



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH NILAI *CARBON EQUIVALENT*  
TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS  
BESI TUANG NODULAR DINDING TIPIS 1 MM**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**LUSIANA EKA  
0606075031**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

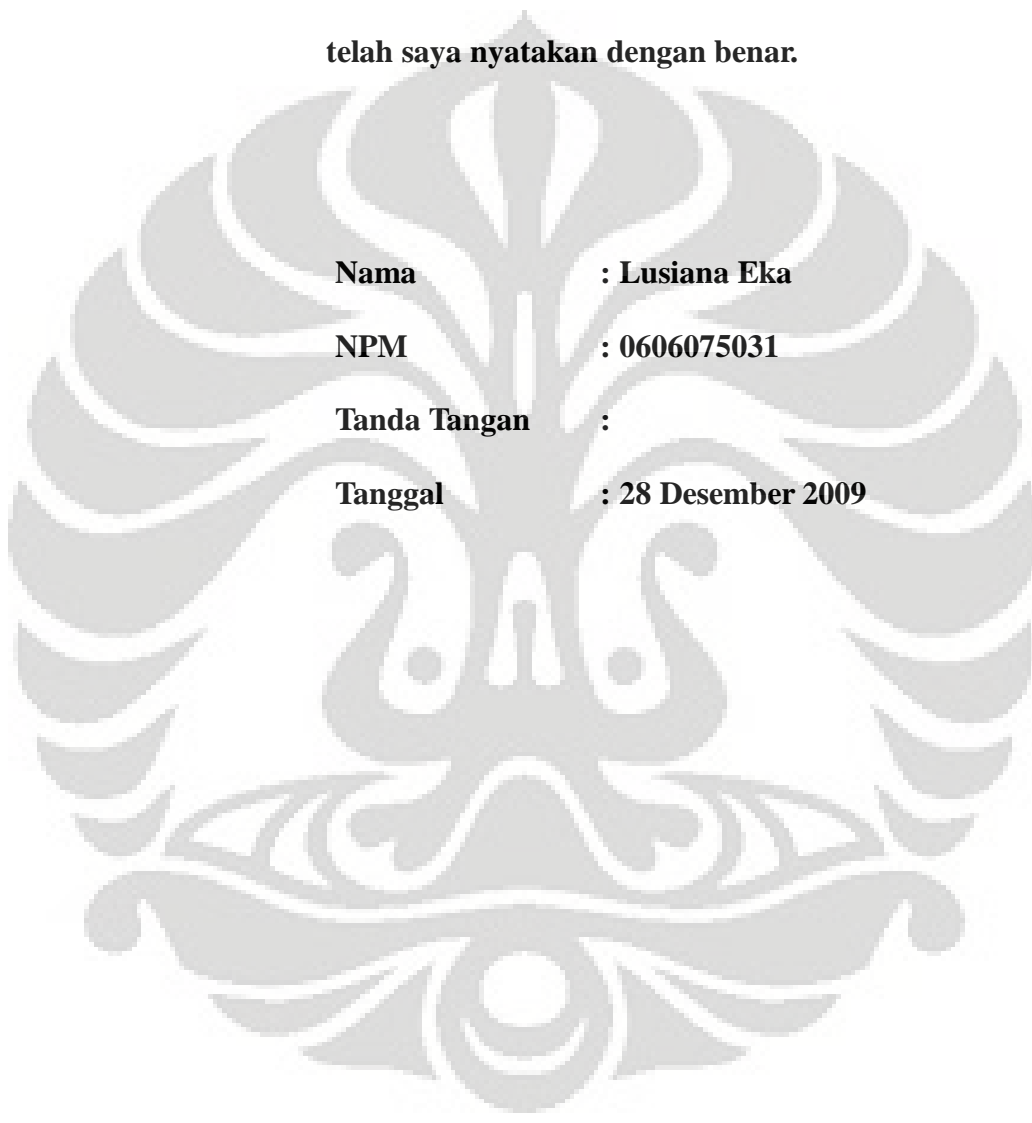
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Lusiana Eka**

**NPM : 0606075031**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 28 Desember 2009**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Lusiana Eka  
NPM : 0606075031  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Nilai *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro & Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular Dinding Tipis 1 mm

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno (.....)  
Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Johnny Wahyuadi M S, DEA (.....)  
Penguji 2 : Rianti Dewi Sulamet-Ariobimo, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku kepala departemen sekaligus dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam menyusun skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberi perhatian dan bantuan baik moral maupun materil;
- (3) Ibu Rianti Sulamet-Ariobimo, selaku pimpinan tim kerja yang telah menyumbangkan pengetahuannya dan membimbing saya selama pengerjaan dan penyusunan skripsi ini;
- (4) Rekan kerja yang telah banyak membantu dan mendukung saya dalam melakukan penelitian, Irlinda Desita, Chintya Viola, Didi Darul dan Ari Azhari;
- (5) Sahabat serta seluruh pihak yang telah banyak membantu saya hingga selesainya penulisan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu Metalurgi dan Material ke depan.

Depok, 28 Desember 2009

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Lusiana Eka  
NPM : 0606075031  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Pengaruh Nilai *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro  
dan Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular Dinding Tipis 1 mm**

beserta seluruh perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 28 Desember 2009

Yang menyatakan

(Lusiana Eka)

## ABSTRAK

Nama : Lusiana Eka  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Nilai *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular Dinding Tipis 1 mm

Dalam pembuatan besi tuang nodular dinding tipis, banyak masalah yang muncul akibat terbentuknya karbida dan kegagalan proses *liquid treatment* yang menyebabkan rendahnya nodularitas. Banyak peneliti yang menyarankan kisaran nilai *carbon equivalent* (CE) tertentu untuk menghasilkan struktur mikro yang bersih dari karbida pada ketebalan tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan nilai *carbon equivalent* (CE) terhadap struktur mikro, yaitu bentuk grafit, nodularitas, jumlah nodul, dan karbida, dan sifat mekanis besi tuang nodular 1 mm, yaitu kekerasan dan kekuatan tarik. Plat 1 mm dipilih karena ukuran ketebalannya sangat rentan terhadap pembentukan karbida. Penelitian dilakukan dengan modifikasi desain pengecoran Stefanescu pada skala pabrik. Variabel pada penelitian ini adalah nilai CE sehingga dilakukan 3 kali peleburan dan penuangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara independen nilai CE tidak berpengaruh terhadap pembentukan karbida, namun berpengaruh terhadap nodularitas. Semakin tinggi nilai CE, nodularitas pada plat 1 mm akan semakin tinggi. Nilai CE juga bukan satu-satunya faktor yang mempengaruhi sifat mekanis hasil pengecoran besi tuang nodular.

Kata kunci:

Nilai CE, karbida, nodularitas, struktur mikro, sifat mekanis

## ABSTRACT

Name : Lusiana Eka  
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering  
Thesis Title : The Effects of Carbon Equivalent to Micro Structure and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron 1 mm

In making thin wall ductile iron, problem occurs due to carbides formation and the failure of liquid treatment. To encounters the problem of carbide formation, many researchers suggest the range of carbon equivalent (CE) to produce free carbides micro structure in certain thickness. The purpose of this study is to see the effects of CE to the micro structure and mechanical properties of thin wall ductile iron. The plate thickness in this study is 1 mm. Micro structure examination is focused to graphite shape, nodularity, nodule count, and carbide while mechanical properties including hardness and tensile strength. This study use modification of Stefanescu's casting design in foundry scale. The result is CE does not influence the formation of carbides independently. CE has the biggest influence to nodularity and tensile strength. The higher CE, the higher nodularity and tensile strength are gained.

Keywords:

CE, carbides, nodularity, micro structure, mechanical properties

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR RUMUS.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	5
1.4 Batasan Masalah .....	5
<b>2. DASAR TEORI</b> .....	<b>6</b>
2.1 Besi Tuang .....	6
2.2 Besi Tuang Nodular (BTN) .....	8
2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular .....	8
2.2.2 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular .....	9
2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular .....	11
2.2.4 <i>Liquid Treatment</i> Besi Tuang Nodular .....	16
2.2.5 Nodularitas Dan Jumlah Nodul .....	17
2.3 Besi Tuang Nodular Austemper ( <i>Austempered Ductile Iron, ADI</i> ) .....	18
2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular.....	19
2.4.1 Karbida.....	20
2.4.2 Lapisan Efek Kulit ( <i>Skin Effect</i> ).....	21
2.5 <i>Carbon Equivalent</i> .....	22
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>26</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	26
3.2 Alat dan Bahan.....	27
3.2.1 Alat .....	27
3.2.2 Bahan Baku .....	28
3.3 Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1 Perbaikan Pola.....	29
3.3.2 Pembuatan Cetakan .....	31
3.3.3 Pembuatan Logam Cair dan <i>Liquid Treatment</i> .....	32
3.3.4 Pengecoran .....	33
3.3.5 Preparasi Sampel .....	34
3.3.6 Pengujian.....	37



<b>4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b> .....	40
4.1 Komposisi Kimia .....	40
4.1.1 Persentase Elemen pada Logam Cair .....	40
4.1.2 <i>Carbon Equivalent</i> (CE) .....	41
4.2 Pengamatan Visual .....	43
4.3 Pengamatan Struktur Mikro .....	45
4.3.1 Grafit .....	45
4.3.2 Nodularitas dan Jumlah Nodul .....	47
4.3.3 Matrik .....	52
4.3.4 Karbida .....	53
4.3.5 <i>Skin effect</i> .....	55
4.4 PENGUJIAN MEKANIS .....	59
4.4.1 Pengujian Kekerasan .....	59
4.4.2 Pengujian Tarik .....	60
<b>5. KESIMPULAN</b> .....	62
DAFTAR REFERENSI .....	63

## DAFTAR TABEL

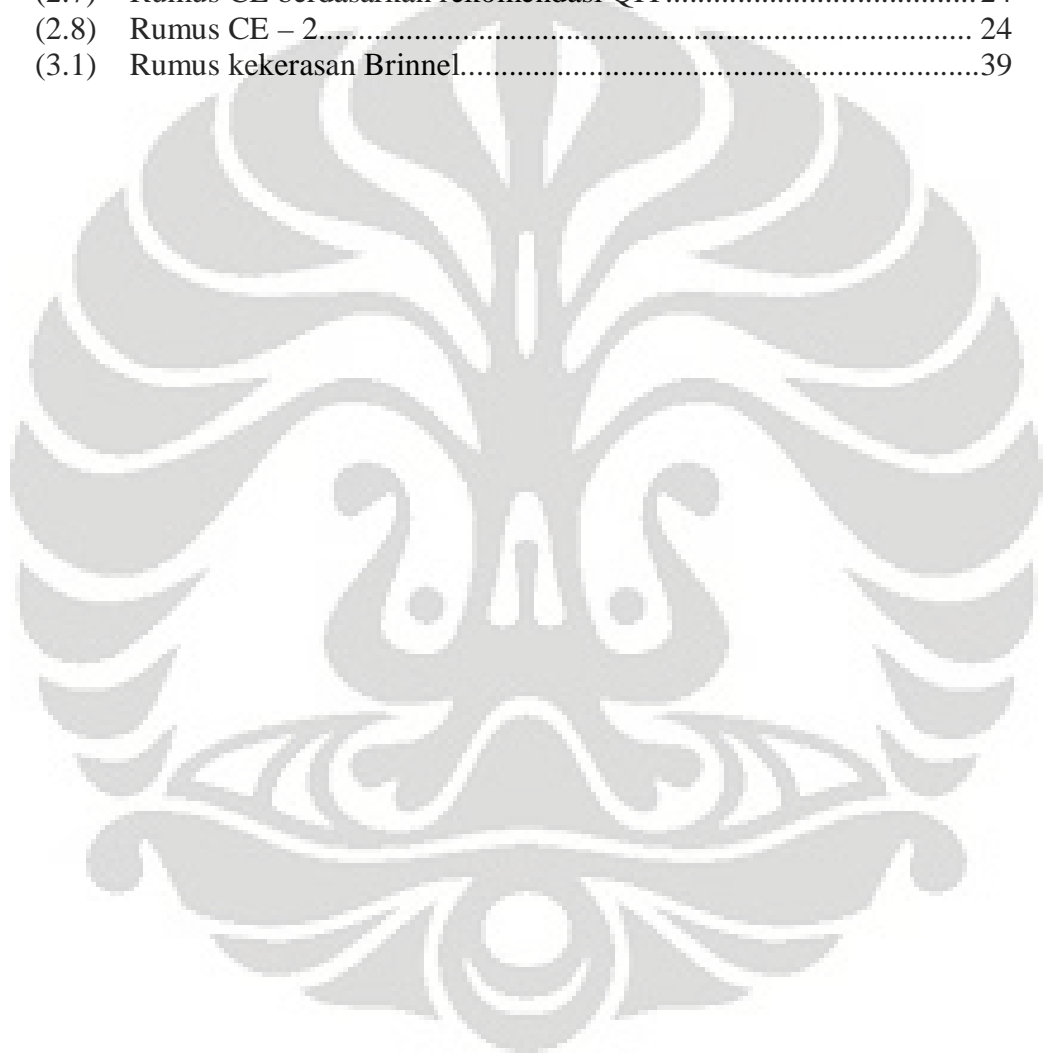
Tabel 2.1.	Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular .....	8
Tabel 2.2.	Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995 .....	15
Table 2.3.	Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI .....	19
Tabel 2.4.	Petunjuk Nilai CE untuk Produksi ADI .....	24
Tabel 4.1.	Perbandingan komposisi kimia logam cair penelitian dengan standar pabrik .....	40
Tabel 4.2.	Kadar CE logam cair .....	41
Tabel 4.3.	Nodularitas dan jumlah nodul pada posisi A1 (pinggir) dan A2 (tengah) .....	51
Tabel 4.4.	Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata .....	51
Tabel 4.5.	Pengukuran <i>skin effect</i> plat 1 mm .....	58
Tabel 4.6.	Data Kekerasan Brinell .....	59
Tabel 4.7.	Nilai UTS dan elongasi plat 1 mm .....	60

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Perbandingan Sifat Tarik ADI dengan Beberapa Material.....	1
Gambar 1.2.	Komponen Otomotif yang Dibuat dari Bahan ADI.....	2
Gambar 2.1.	Klasifikasi besi tuang.....	6
Gambar 2.2.	Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada <i>ferritic ductile iron</i> .....	12
Gambar 2.3.	Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular.....	12
Gambar 2.4.	Pengaruh bentuk grafit pada kurva <i>stress-strain</i> beberapa besi tuang.....	13
Gambar 2.5.	Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247.....	14
Gambar 2.6.	Kandungan karbon dan silikon untuk beberapa jenis material.....	23
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	26
Gambar 3.2.	Desain pengecoran Stefanescu.....	29
Gambar 3.3.	Desain pengecoran penelitian.....	30
Gambar 3.4.	<i>Pattern plate</i> .....	31
Gambar 3.5.	Proses <i>merger</i> dari pasangan cetakan.....	31
Gambar 3.6.	Proses penuangan logam cair.....	34
Gambar 3.7.	Pengambilan sampel uji dari plat.....	35
Gambar 3.8.	Sampel hasil <i>Mounting</i> .....	35
Gambar 3.9.	Mikroskop optik digital Canon.....	37
Gambar 3.10.	Tahapan pengukuran ketebalan <i>skin effect</i> .....	38
Gambar 3.11.	<i>Macrohardness tester</i> Brinell.....	38
Gambar 3.12.	<i>Tensile strength machine</i> .....	39
Gambar 4.1.	Benda dan saluran tuang.....	43
Gambar 4.2.	Benda setelah dilakukan proses pemotongan.....	44
Gambar 4.3.	Struktur mikro plat 1 mm P1.....	46
Gambar 4.4.	Struktur mikro plat 1 mm P5.....	46
Gambar 4.5.	<i>Exploded</i> grafit pada plat 1 mm P6.....	47
Gambar 4.6.	Foto mikro plat 1 mm P1 posisi 2 untuk perhitungan <i>software NIS</i> .....	48
Gambar 4.7.	Foto mikro plat 1mm P5 posisi 2 untuk perhitungan <i>software NIS</i> .....	49
Gambar 4.8.	Foto mikro plat 1mm P6 posisi 2 untuk perhitungan <i>software NIS</i> .....	50
Gambar 4.9.	Grafik nodularitas terhadap nilai CE.....	51
Gambar 4.10.	Struktur mikro karbida pada besi tuang nodular menurut AFS Transactions.....	53
Gambar 4.11.	Struktur mikro etsa plat CE 4,68 (P5).....	53
Gambar 4.12.	Struktur mikro etsa plat CE 4,65 (P1).....	54
Gambar 4.13.	Struktur mikro etsa plat CE 4,17 (P6).....	54
Gambar 4.14.	Struktur mikro tepi P1.....	56
Gambar 4.15.	Struktur mikro tepi P5.....	56
Gambar 4.16.	Struktur mikro tepi P6.....	57
Gambar 4.17.	Grafik hubungan kekerasan terhadap nilai CE.....	59
Gambar 4.18.	Grafik hubungan kekuatan tarik terhadap nilai CE.....	60
Gambar 4.19.	Grafik hubungan Elongasi terhadap nilai CE.....	61

## DAFTAR RUMUS

(2.1)	Rumus Mg efektif.....	17
(2.2)	Rumus Nodularitas JIS G5502.....	18
(2.3)	Rumus Nodularitas image analysis.....	18
(2.4)	Rumus Hubungan Linear C dan Si.....	22
(2.5)	Rumus CE – 1.....	22
(2.6)	Rumus CE dengan pengaruh Si dan P.....	23
(2.7)	Rumus CE berdasarkan rekomendasi QIT.....	24
(2.8)	Rumus CE – 2.....	24
(3.1)	Rumus kekerasan Brinell.....	39



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 JIS Z 2241 : 1998 *Method of tensile test for metallic materials*
- Lampiran 2 JIS Z 2201 : 1998 *Test pieces for tensile test for metallic materials*
- Lampiran 3 JIS G 5502 : 2001 *Spheroidal graphite iron casting*
- Lampiran 4 Data pengujian kekerasan
- Lampiran 5 ASTM E 10 : Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials



# BAB 1

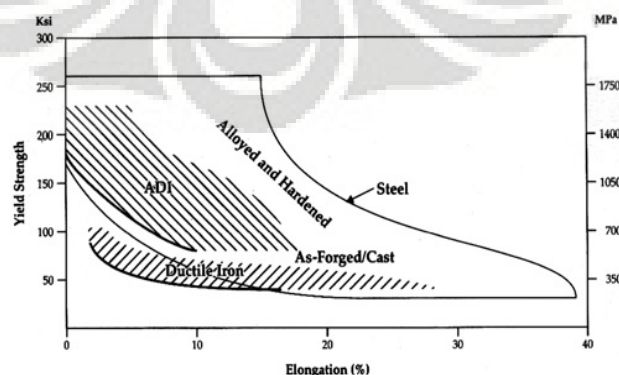
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tingginya permintaan konsumen terhadap kendaraan seperti mobil dan truk membuat bidang otomotif terus menggeliat hingga jumlah produsen telah banyak meningkat sampai saat ini. Banyaknya jumlah produsen serta isu lingkungan mengenai penghematan energi menghasilkan persaingan yang menuntut industri untuk semakin cerdas dalam memilih bahan baku produksi dengan tetap mengutamakan kualitas produk. *Austempered ductile iron* (ADI) dinding tipis merupakan salah satu material alternatif yang dapat memenuhi kebutuhan bidang otomotif tersebut karena sifat-sifatnya yang unggul.

Produksi *austempered ductile iron* (ADI) dapat diperoleh dengan perlakuan panas besi tuang nodular. Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada jenis besi tuang yang lain, yaitu memiliki keuletan dan kekuatan yang tinggi. Dengan proses austempering, maka besi tuang nodular dapat ditingkatkan menjadi besi nodular austemper (*austempered ductile iron*-ADI). Besi nodular austemper memiliki fleksibilitas desain, kemampuan permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, serta ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik yang baik.

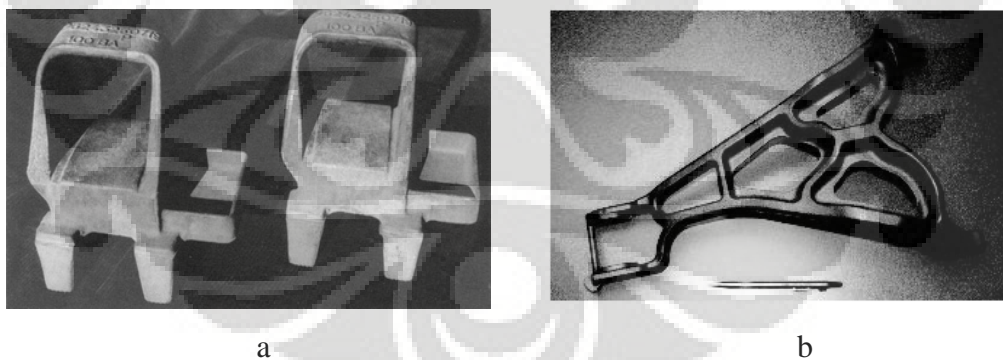
ADI memiliki sifat mekanis yang baik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.1. Dilihat dari proses produksinya ADI juga termasuk sangat ekonomis karena dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi aluminium<sup>[1]</sup>.



Gambar 1.1. Perbandingan Sifat Tarik ADI dengan Beberapa Material<sup>[2]</sup>

Munculnya ADI sebagai material alternatif dalam bidang otomotif dunia mendorong perkembangan semua sektor yang mendukung proses produksi ADI termasuk dalam pelaksanaan penelitian-penelitian untuk terus meningkatkan kemampuan ADI. Penelitian yang digiatkan terutama bertujuan untuk mengurangi berat ADI, sehingga dapat digunakan sebagai material untuk *hybrid car*. Pada tahun 2002 Martinez, berhasil membuat *connecting rod* (stang piston) dengan ketebalan 3 mm yang akan digunakan mesin 2 silinder yang dihasilkan oleh Pronello I+D<sup>[3]</sup>.

Namun amat disayangkan, perkembangan ADI di Indonesia hingga saat ini sangat minim, masih fokus dalam tahap penelitian. Tahap produksi telah dilakukan tetapi masih dalam skala yang sangat kecil dan atas permintaan khusus. Bahkan sebagian pihak berpendapat bahwa proses produksi ADI mahal. Padahal banyaknya industri pengecoran di Indonesia yang berbasis pengecoran besi tuang kelabu (FC) merupakan potensi tersendiri untuk memproduksi ADI. Dengan kemajuan teknologi, FC dapat ditingkatkan menjadi besi tuang nodular (FCD) yang merupakan bahan baku dari ADI. Melihat bahwa teknologi yang dibutuhkan untuk meningkatkan FC menjadi FCD adalah teknologi sederhana dan jika ditinjau dari segi biaya juga tidak membutuhkan investasi yang besar sungguh sangat disayangkan tidak banyak perusahaan pengecoran yang melakukan hal ini.



Gambar 1.2. Komponen Otomotif yang Dibuat dari Bahan ADI<sup>[2]</sup>

- a. Penahan pegas pada truk
- b. *Suspension arm* untuk Mustang Cobra

Dengan dilakukannya proses peningkatan tersebut maka nilai ekonomis yang dimilikipun akan meningkat. Indonesia juga sangat potensial karena banyaknya industri komponen otomotif, baik skala besar, menengah maupun kecil. Apalagi dengan melihat angka pertumbuhan produksi otomotif yang



mencapai 18%. Industri otomotif adalah penggunaan utama dari ADI. Hal lain, yang paling penting, yang menyebabkan Indonesia potensial untuk menghasilkan ADI adalah FCD yang dihasilkan di Indonesia, baik merupakan hasil dari Industri pengecoran skala manapun, walaupun tidak memenuhi persyaratan FCD untuk ADI<sup>[2]</sup>, ternyata dapat di ADI kan<sup>[4]</sup>.

Dengan melihat pada potensi yang dimiliki oleh Indonesia, maka dirasa sangat perlu untuk lebih memperhatikan industri pengecoran terutama dalam upaya sosialisasi peningkatan FC menjadi FCD sehingga Indonesia dapat menjadi salah satu produsen komponen otomotif dari ADI, lebih-lebih pada saat ini *issue* dunia adalah konversi energi, yang salah satunya diwujudkan dalam bentuk teknologi *hybrid car*. Komponen ADI, dengan sifat *light weight*-nya akan menjadi alternatif yang baik.

Salah satu cara untuk mendukung sifat *light weight* ADI adalah dengan meminimalkan ketebalan benda. Peminimalan ketebalan benda berkaitan erat dengan teknologi proses pengecoran FCD yang merupakan proses manufaktur pertama di dalam tahapan pembuatan ADI. Pengecoran FCD memberikan banyak pilihan metode untuk mencapai kompleksitas bentuk yang tinggi.

Proses pengecoran dinding tipis (*thin wall casting-TWC*) yang didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal kurang dari 5 mm<sup>[5]</sup>, merupakan bentuk perkembangan proses manufaktur yang dibutuhkan ADI. Ketebalan terakhir yang sudah dapat dicapai oleh TWC untuk FCD adalah 1,4 mm<sup>[6]</sup>.

## 1.2 Perumusan Masalah

Besi tuang nodular (FCD) yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan dinding tipis ADI dalam penelitian ini adalah FCD 45. Proses pengecoran yang digunakan adalah pengecoran vertikal dengan modifikasi dari desain sistem saluran tuang Stefanescu<sup>[7]</sup>. Pada penelitian ini modifikasi dilakukan dengan 5 variasi ketebalan plat, berturut-turut dari ingate 1, 2, 3, 4 dan 5 mm. Pencegahan terjadinya pembekuan dini pada plat 1 mm di ingate memanfaatkan panas dari aliran logam cair yang cepat dan terus-menerus sehingga pembekuan baru terjadi setelah cetakan terisi penuh. Pola dibuat dari kayu dan cetakan dibuat dengan menggunakan pasir furan. Masalah yang mungkin timbul dalam pembuatan plat



tipis ini selain pembekuan dini adalah terbentuknya struktur karbida.

Jumlah karbida yang sangat besar meningkatkan ketahanan aus dari besi tuang, namun membuatnya getas dan sulit untuk dilakukan permesinan. Pembentukan karbida biasanya terjadi jika proses *liquid treatment* tidak berjalan dengan benar atau jika pengecoran dilakukan pada benda-benda tipis.

*Liquid treatment* adalah suatu usaha penambahan bahan suntikan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam yang akan dihasilkan. Penambahan bahan suntikan yang dilakukan pada *liquid treatment* tidak akan mengganggu komposisi dari logam cair tersebut karena bahan tersebut memacu suatu perbaikan dan jumlahnya pun relatif sedikit. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 *liquid treatment* yang dialami, yaitu inokulasi dan nodularisasi.

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) atau Cerium (Ce) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular atau bola-bola kecil.

Pada proses pembuatan besi tuang nodular (FCD) resiko pembentukan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan/atau Ce sebagai nodulan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Struktur mikro karbida merupakan struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang memiliki kecepatan pendinginan tinggi atau benda cor yang tipis. Keberadaan struktur karbida, bentuk (*nodularity*) dan jumlah nodul (*nodule count*) dari grafit berkaitan erat dengan kecepatan pendinginan yang tinggi sebagai akibat tipisnya plat yang dicor.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh nilai *carbon equivalent* (CE) terhadap struktur mikro besi tuang nodular dinding tipis.
2. Mengetahui pengaruh nilai *carbon equivalent* (CE) terhadap sifat mekanis besi tuang nodular dinding tipis.

### 1.4 Batasan Masalah

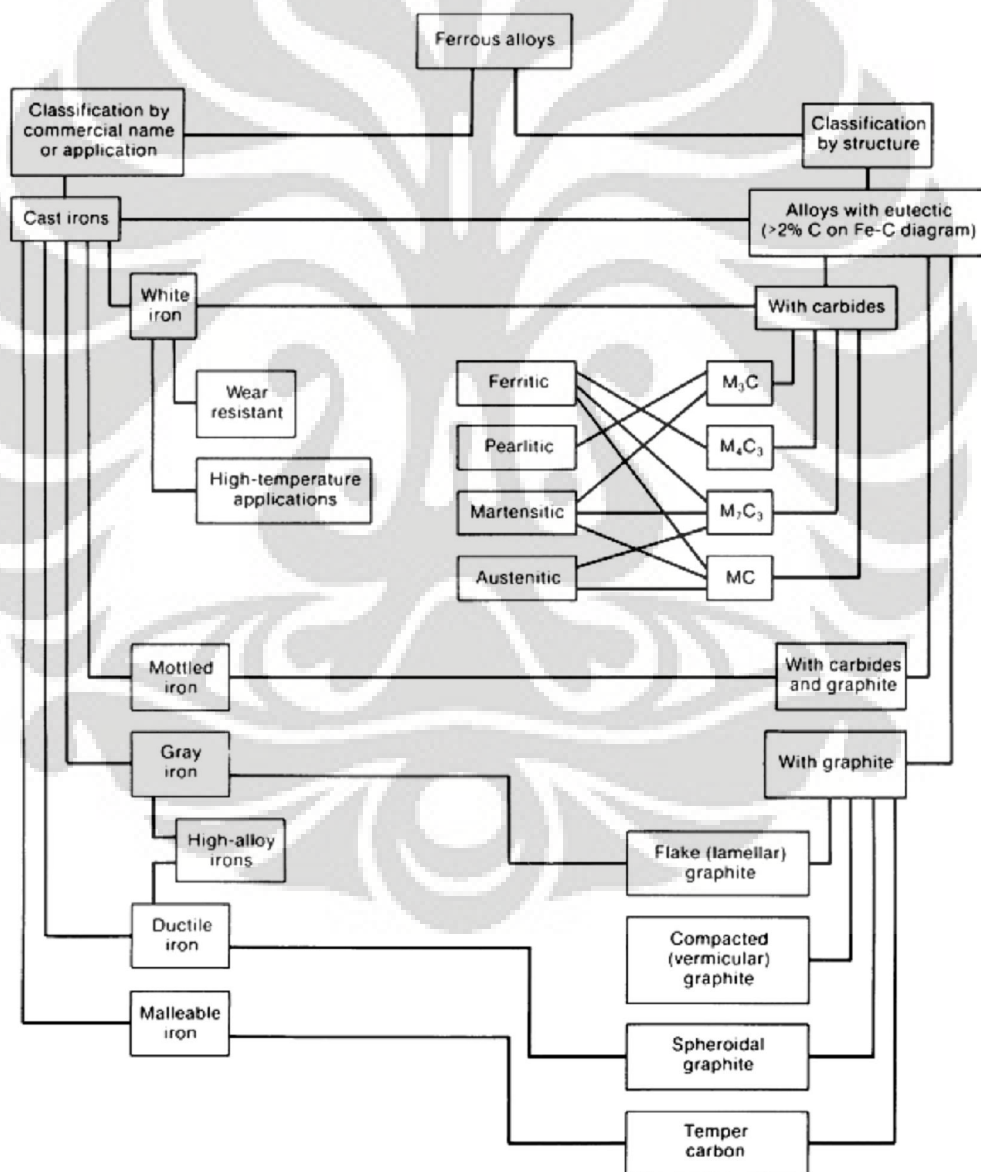
Penelitian ini dilakukan pada skala pabrik dan merupakan awal dari penelitian-penelitian lanjutan untuk memperoleh peralatan atau komponen ADI dinding tipis. Pada penelitian ini baru dilakukan penelitian pembuatan material dinding tipis FCD menggunakan proses pengecoran vertikal dengan modifikasi dari desain sistim saluran tuang Stefanescu<sup>[7]</sup> untuk membuat pelat tipis 1 mm dengan 5 variasi ketebalan berturut-turut dari ingate 1, 2, 3, 4, dan 5 mm.

Penelitian ini akan difokuskan untuk mengetahui pengaruh perbedaan nilai *carbon equivalent* (CE) terhadap struktur mikro dan sifat mekanis besi tuang nodular dinding tipis. Variabel yang digunakan adalah nilai CE sehingga akan diuji 3 buah plat tipis yang dihasilkan dari 3 penuangan berbeda. Pada penelitian ini, yang akan diuji dan dibandingkan adalah plat dengan ketebalan 1 mm dari setiap penuangan.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 Besi Tuang

Besi tuang merupakan salah satu bagian dari keluarga besar paduan besi. Besi tuang adalah paduan yang memiliki Fe dan C sebagai elemen utamanya, dengan kandungan karbon berkisar antara (2,14–6,687)%.<sup>[10]</sup> Selain Fe dan C, besi tuang juga mungkin mengandung Si, Mn, P, S, dan unsur seperti Ti, Sb, dan Sn dalam berbagai variasi komposisi.



Gambar 2.1 Klasifikasi besi tuang<sup>[11]</sup>

Variasi sifat besi tuang yang luas dapat diperoleh dengan mengubah keseimbangan antara karbon dan silikon, memadukannya dengan berbagai logam atau unsur-unsur bukan logam, dan dengan melakukan berbagai variasi proses peleburan, pengecoran, dan perlakuan panas. Pada dasarnya terdapat 5 jenis dasar dari besi tuang<sup>[11]</sup>, yaitu:

a. Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)

Jenis besi tuang ini memiliki struktur sementit pada mikrostrukturnya, sangat keras dan rapuh tanpa di anil. Apabila besi tuang putih di anil akan menghasilkan *malleable cast iron*.

b. Besi Tuang Kelabu (*Gray Cast Iron*)

Besi tuang jenis ini memiliki *flakes* grafit pada mikrostrukturnya. Berdasarkan penggunaan inokulan dan nodulan, maka besi tuang kelabu terbagi menjadi 2 jenis yaitu:

- *Inoculated grey cast iron* (IGCI) yaitu besi tuang kelabu yang telah ditambahkan inokulan sehingga *flakes* grafitnya terdistribusi secara merata.
- *Ferro casting ductile iron* (FCDI) yaitu besi tuang kelabu yang ditambahkan inokulan dan nodulan sehingga grafitnya tidak lagi berbentuk *flakes*, tetapi berubah menjadi bentuk nodular. Apabila FCDI ini dilanjutkan dengan proses austemper maka akan menghasilkan ADI.

c. Besi Tuang Bercorak (*Mottled Cast Iron*)

Merupakan besi tuang yang memiliki matriks besi tuang putih pada sisi luar dan besi tuang kelabu pada sisi dalam.

d. Besi Tuang Nodular (BTN) atau *Ferro Casting Ductile Iron* (FCDI)

Besi tuang nodular merupakan besi tuang kelabu yang telah melalui proses inokulasi dan nodulasi, sehingga bentuk grafitnya bulat.

e. Besi Tuang Malebel (*Malleable Cast Iron*)

Besi tuang malebel adalah besi tuang putih yang telah dilakukan proses pelunakan (*annealing*).

## 2.2 Besi Tuang Nodular (BTN)

Besi tuang nodular merupakan material dasar untuk pembuatan ADI. Besi jenis ini memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang yang lain, seperti memiliki keuletan yang tinggi (elongasi ebesar 18% pada *grade* tertentu) dan kekerasan 143-187 HB. *Yield strength* 40.000 psi (275 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 90,000 psi (620 MPa) untuk jenis martensitik. Sementara untuk *tensile strength* mencapai 60,000 psi (414 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 200,000 psi (1380 MPa) untuk jenis martensitik.<sup>[12]</sup>

### 2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular

Berdasarkan struktur mikronya, besi tuang nodular dikelompokkan menjadi tujuh jenis<sup>[13]</sup> seperti yang terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular<sup>[13]</sup>

MATRIX							
Ferritic Grade 5	Ferritic-pearlitic Grade 3	Pearlitic Grade 1	Martensitic (With retained austenite)	Tempered Martensitic	ADI Grade 150	ADI Grade 230	Austenitic
60,000 p.s.i. (414 mPa)	80,000 p.s.i. (552 mPa)	100,000 p.s.i. (690 mPa)	N.A. .	115,000 p.s.i. (793 mPa)	150,000 p.s.i. (1050 mPa)	230,000 p.s.i. (1600 mPa)	45,000 p.s.i. (310 mPa)

\* Approximate ultimate tensile strength 87,000 p.s.i.(600 mPa) Hard, Brittle.

(Note that the magnifications are different.)

#### a. Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)

Grafrit bulat dalam matrik ferit memberikan keuletan dan ketahanan impak yang baik, serta kekuatan tarik dan luluh seperti baja karbon rendah.

#### b. Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)

Jenis ini merupakan jenis besi tuang paling umum. Grafrit bulat dalam matrik mengandung ferit dan perlit. Sifat yang dihasilkan adalah antara sifat ferit dan perlit, dengan kemampumesinan yang baik dan biaya produksi yang rendah.

c. Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)

Grafit bulat dalam matrik perlit menghasilkan besi dengan kekuatan tinggi, ketahanan aus yang baik, dan keuletan serta ketahanan impak yang cukup baik. Kemampumesinan dari jenis ini sebanding dengan baja.

d. Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)

Diperoleh melalui penambahan paduan yang cukup untuk mencegah pembentukan perlit dan kemudian dilakukan perlakuan panas berupa *harden* dan *temper*. Sifat yang dihasilkan adalah kekuatan dan ketahanan aus yang sangat tinggi tetapi tingkat keuletan dan ketangguhan yang rendah.

e. Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)

Diperoleh melalui penambahan paduan dan atau perlakuan panas untuk mencapai struktur yang keras.

f. Besi Ulet Austenitik (*Austenitic Ductile Iron*)

Penambahan paduan dilakukan untuk menghasilkan matrik austenit. Besi ulet jenis ini memiliki ketahanan korosi dan oksidasi yang baik, sifat magnetic yang baik, dan kestabilan dimensi serta kekuatan yang baik.

g. Besi Ulet Hasil Austemper (*Austempered Ductile Iron*) ADI merupakan kelompok besi ulet yang paling baru dikembangkan dengan perlakuan panas berupa *austempering*. Sifat yang dihasilkan hampir dua kali kekuatan besi ulet perlitik (*pearlitic ductile iron*). ADI juga memiliki ketangguhan dan elongasi yang tinggi. Kombinasi ini menghasilkan material dengan kekuatan fatik dan ketahanan aus yang sangat tinggi.

### 2.2.2 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular

Penambahan elemen paduan pada besi tuang nodular berfungsi untuk mengontrol sifat dan performa material sesuai kebutuhan aplikasi. Beberapa elemen yang dapat ditambahkan dalam komposisi besi tuang nodular antara lain, karbon (C), silikon (Si), mangan (Mn), magnesium (Mg), dan sulfur (S)

a. Karbon (C)

Karbon dapat mempengaruhi fluiditas dari besi cair dan karakteristik cacat *shrinkage* dari benda cor. Elemen karbon dihasilkan dari *pig iron*, *carburiizer* dan *scrap* besi cor. Jumlah elemen karbon optimum perlu disesuaikan dengan



kandungan silikon. Komposisi karbon diatas batas tersebut dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi menyebabkan ketidakkokohan dari cetakan. Sedangkan komposisi dibawah batas tersebut dapat mengakibatkan kekurangan pembenihan (*lack of feeding*) dan pada kandungan yang sangat rendah karbida-karbida dapat muncul di permukaan, khususnya pada benda tipis.

b. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Sumber silikon berasal dari *raw material* yang meliputi *scrap* besi cor, *pig iron*, paduan besi dan sejumlah kecil paduan yang ditambahkan selama inokulasi. Kekurangan kadar silikon menyebabkan keuletan tinggi ketika dilakukan perlakuan panas dan membahayakan terbentuknya karbida pada bagian yang tipis, sementara kadar silikon tinggi mempercepat anil dan mencegah pembentukan karbida pada bagian tipis. Selain itu, silikon meningkatkan temperatur transisi ulet ke getas pada besi feritik dan meningkatkan kekerasan, kekuatan luluh dan kekuatan tarik. Dengan komposisi normal, peningkatan jumlah silikon menghadirkan struktur yang mempunyai jumlah ferit lebih besar. Selain itu juga berpengaruh pada penguatan padatan dan kekerasan dari ferit. Namun, meningkatnya jumlah ferit menyebabkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik menurun meskipun elongasi dan kekuatan impak meningkat. Struktur ferit yang mengelilingi bulatan grafit pada *pearlitic ductile iron* mengurangi kekuatan luluh tetapi meningkatkan elongasi, kekuatan impak dan kekuatan fatik.

c. Mangan (Mn)

Sumber utama mangan adalah *scrap* baja. Kadar elemen harus dibatasi untuk menghasilkan keuletan maksimum. Kadar mangan untuk besi cor feritik harus  $\leq 0,2\%$ . Kadar untuk besi yang akan dilakukan perlakuan panas untuk jenis feritik harus  $\leq 0,5\%$  tetapi untuk besi jenis perlitik bisa sampai 1%. Mangan merupakan elemen yang dapat menyebabkan segregasi mikro, khususnya terjadi pada bagian tebal, dimana mangan mendorong pembentukan karbida pada batas butir sehingga dihasilkan keuletan dan ketangguhan yang rendah serta perlit yang keras.

d. Magnesium (Mg)

Magnesium dalam pengecoran besi tuang nodular membantu pembentukan grafit bulat dengan kadar. Jika kandungan sulfur awal dibawah 0,015%, maka kandungan mangan disesuaikan lebih rendah antara (0,035-0,04)% untuk menghasilkan sifat yang diinginkan.

e. Sulfur (S)

Sulfur berasal dari muatan material bahan baku. Kandungan sulfur pada besi nodular biasanya di bawah 0,015% tetapi jika cerium ditambahkan, kadarnya meningkat karena terbentuk serium sulfida. Ketika menggunakan kupola, sering terjadi desulfurisasi biasanya dengan *lime* atau kalsium karbida, sebelum perlakuan magnesium sampai level 0,02% atau kurang.

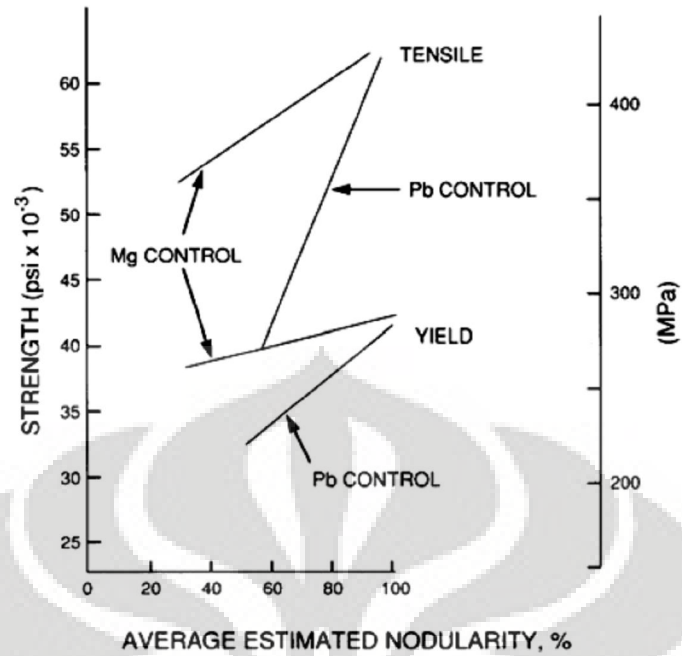
### 2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik seperti kekuatan dan keuletan yang baik. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang nodular antara lain adalah struktur grafit, jumlah grafit, struktur matriks, dan ukuran ketebalan.

a. Struktur grafit

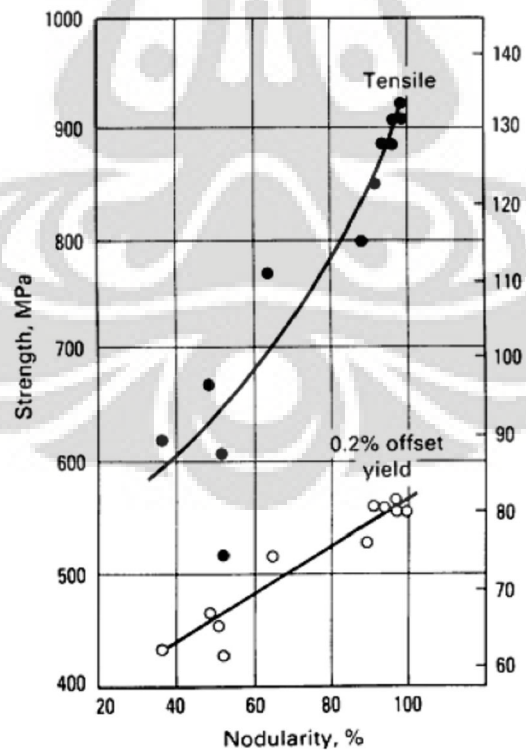
Jumlah dan bentuk grafit pada besi tuang nodular ditentukan selama pembekuan dan tidak dapat diubah dengan proses perlakuan panas. Grafit adalah bentuk stabil dari karbon murni dalam besi tuang. Sifat fisik yang penting dari grafit adalah massa jenis yang rendah, kekerasan yang rendah, dan konduktivitas panas dan pelumasan yang tinggi. Bentuk grafit, dapat berupa serpihan hingga bulat, memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanis besi tuang seperti terlihat pada Gambar 2.2. Grafit serpih berperan seperti retakan dalam matrik besi, sementara grafit bulat berperan seperti penangkap retakan, memberikan perbedaan pada sifat mekanis<sup>[14]</sup>. Kehadiran grafit dalam bentuk bulatan pada besi tuang nodular (pada besi kelabu berbentuk *flakes*) disebabkan oleh penambahan magnesium (atau magnesium dan cerium) pada logam cair. Jumlah dan bentuk grafit dalam besi tuang nodular ditentukan selama solidifikasi dan tidak dapat diubah oleh perlakuan panas berikutnya.





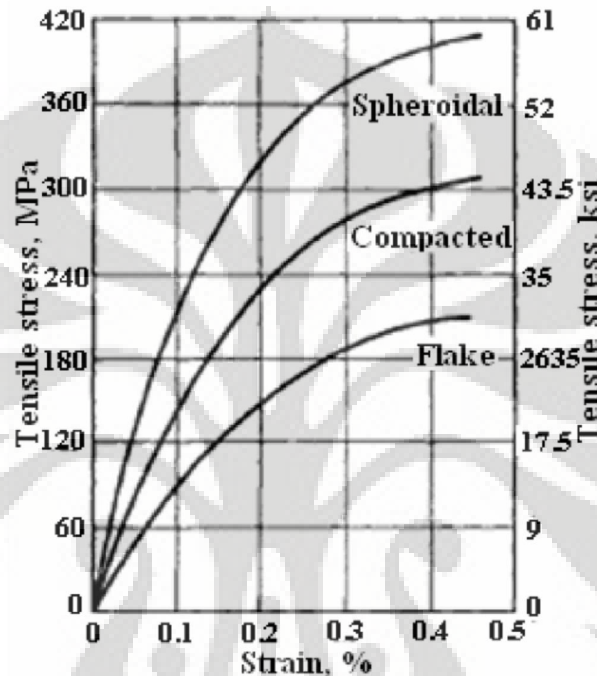
Gambar 2.2. Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada *ferritic ductile iron*

Semua sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan meningkat jika proporsi dari grafit nodular meningkat. Misalnya adalah kekuatan tarik seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Pengaruh nodularitas pada kekuatan tarik tuang nodular<sup>[11]</sup>

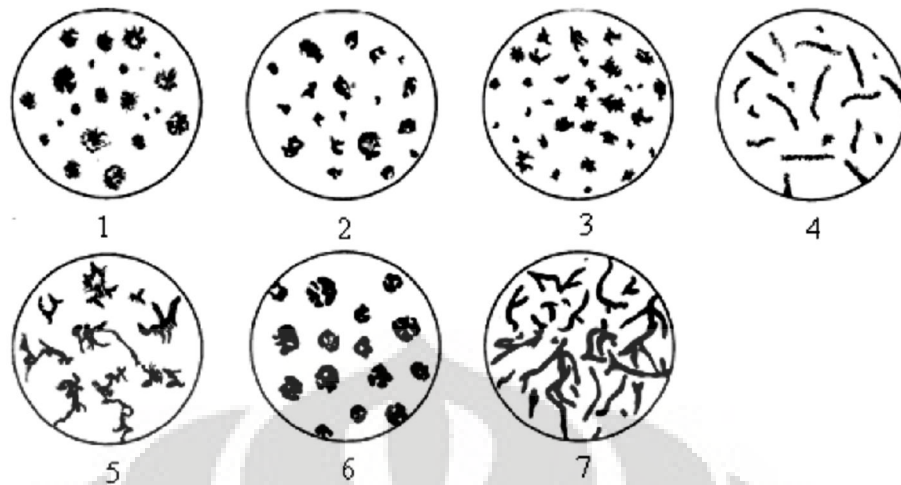
Bentuk dari grafit non-nodular seperti bentuk *flakes* (serpih tipis) dengan sudut yang tajam memiliki pengaruh yang merugikan pada kekuatan besi tuang nodular, seperti ditunjukkan Gambar 2.4. Presentasi nodularitas yang rendah juga menyebabkan ketahanan energi impak yang lebih rendah, mengurangi kekuatan fatik, meningkatkan kemampuan peredaman, meningkatkan konduktivitas panas dan mengurangi ketahanan listrik.



Gambar 2.4. Pengaruh bentuk grafit pada kurva *stress-strain* beberapa besi tuang

Berdasarkan ASTM A247, terdapat tujuh bentuk grafit yang digunakan untuk klasifikasi besi tuang<sup>[15]</sup> seperti terlihat pada gambar 2.5, yaitu:

1. *Nodular (spheroidal) graphite*
2. *Nodular (spheroidal) graphite, Imperfectly formed*
3. *Aggregate or temper carbon*
4. *Quasi-flake graphite*
5. *Crab-form graphite*
6. *Irregular or open type nodules*
7. *Flake graphite*



Gambar 2.5. Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247<sup>[15]</sup>

b. Jumlah grafit

Dengan meningkatnya jumlah grafit, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang menurun pula. Pada umumnya pengaruh-pengaruh ini kecil jika dibandingkan dengan pengaruh dari variable lain, karena kandungan karbon ekuivalen pada besi nodular bukan variabel utama dan dijaga tetap pada nilai eutektik.

c. Struktur matriks

Struktur matriks merupakan faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi besi tuang nodular. Struktur ferit memberikan kekuatan dan kekerasan yang rendah, tetapi keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Sementara pearlit memberikan kombinasi antara kekuatan yang tinggi dan keuletan yang umumnya memenuhi kebutuhan banyak aplikasi rakayasa. Pada hasil *as-cast*, matrik akan terdiri dari berbagai proporsi dari perlit dan ferit. Keuletan dan kekuatan impak ditentukan oleh proporsi dari ferit dan perlit dalam matrik. Ketika jumlah perlit meningkat, kekuatan dan kekerasan juga meningkat, seperti terlihat pada Tabel 2.2. Struktur matrik dapat diubah dengan perlakuan panas, dan yang paling sering dilakukan adalah proses anil untuk menghasilkan matrik feritik penuh dan *normalizing* untuk menghasilkan matrik perlitik. Secara umum, proses anil menghasilkan matrik yang lebih ulet dengan temperatur transisi impak yang lebih rendah dari pada yang dihasilkan dalam besi *as-cast* feritik. *Normalizing* menghasilkan

kekuatan tarik dan jumlah elongasi yang lebih tinggi dari pada yang dihasilkan dalam besi *as-cast* perlitik penuh.

Tabel 2.2. Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995

Symbol of grade	Tensile strength N/mm <sup>2</sup>	Yield strength N/mm <sup>2</sup>	Elongation %	Charpy absorption energy			(Informative reference)	
				Test Temperature °C	Mean value of 3 pieces J	Individual value J	Hardness HB	Matrix structure
FCD 350-22	350 min.	220 min.	22 min.	23 ± 5	17 min.	14 min.	150 max.	Ferrite
FCD 350-22L				-40 ± 2	12 min.	9 min.		
FCD 400-18	400 min.	250 min.	18 min.	23 ± 5	14 min.	11 min.	130 to 180	Ferrite + pearlite
FCD 400-18L				-20 ± 2	12 min.	9 min.		
FCD 400-15				15 min.	-	-		
FCD 450-10	450 min.	280 min.	10 min.	-	-	-	140 to 210	
FCD 500-7	500 min.	320 min.	7 min.	-	-	-	150 to 230	
FCD 600-3	600 min.	370 min.	3 min.	-	-	-	170 to 270	Pearlite + ferrite
FCD 700-2	700 min.	420 min.	2 min.	-	-	-	180 to 300	Pearlite
FCD 800-2	800 min.	480 min.	-	-	-	-	200 to 330	Pearlite or tempered structure

d. Ukuran ketebalan

Dengan menurunnya ukuran bidang, kecepatan solidifikasi dan pendinginan dalam cetakan akan meningkat. Pada bidang yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampumesinan dan menyebabkan kegetasan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inokulan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi. Ketika ukuran bidang meningkat, jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih besar. Ini menghasilkan ukuran nodul yang besar, pengurangan jumlah ferit pada hasil *as-cast*, dan meningkatkan ketahanan terhadap pembentukan struktur feritik penuh ketika di anil. Pada bagian yang lebih berat, elemen minor khususnya pembentuk karbida seperti kromium, titanium, dan vanadium, membentuk pola tersendiri yang mengurangi sifat keuletan, ketangguhan, dan kekuatan. Pengaruh pada ketahanan luluh dinyatakan paling sedikit. Pada bentuk bagian yang besar penting untuk diinokulasi dengan baik dan penambahan elemen-elemen minor dengan komposisi rendah.

#### 2.2.4 *Liquid Treatment* Besi Tuang Nodular

*Liquid treatment* adalah suatu usaha penambahan bahan suntikan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam yang akan dihasilkan. Penambahan bahan suntikan yang dilakukan pada *liquid treatment* tidak akan mengganggu komposisi dari logam cair tersebut karena bahan tersebut memacu suatu perbaikan dan jumlahnya pun relatif sedikit. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 *liquid treatment* yang dialami, yaitu inokulasi dan nodularisasi.

##### a. Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon ke dalam logam cair. Inokulasi bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Dalam proses inokulasi biasanya silikon ditambahkan dalam bentuk *ferro-silikon* berkisar antara (0,5-1,5)% sesuai dengan kebutuhan. Fungsi lain penambahan inokulan yaitu :

- Memacu pertumbuhan grafit
- Meratakan distribusi grafit di dalam logam
- Memberikan struktur yang homogen pada setiap ketebalan
- Mencegah timbulnya cil
- Memperbaiki sifat mekanis logam
- Mampu menghilangkan karbida eutektik di dalam ladeburit

Ada 2 metode dalam penambahan inokulan ke dalam logam cair, yaitu:

- Metode *Ladle* Inokulasi

Inokulan ditambahkan ke dalam *ladle*. Kelemahan metode ini adalah penurunan suhu yang terjadi besar dan pemudaran inokulan lebih mudah terjadi.

- Metode *Late* Inokulasi

Inokulan dilakukan sesaat sebelum logam cair memasuki cetakan. Kelemahan metoda ini adalah tidak terkontrolnya dan tidak meratanya inokulasi.

## b. Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) atau Cerium (Ce) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular atau bola-bola kecil. Karena Mg lebih murah dan mudah diperoleh, maka biasanya unsur yang ditambahkan adalah Mg, sehingga biasa disebut *Mg-treatment*. Banyaknya Mg yang ditambahkan dan larut dalam logam cair tergantung pada kadar sulfur dan kadar oksigen. Banyaknya kadar Mg yang efektif dapat dihitung dengan Rumus 2.1 berikut:

$$\% Mg_{\text{eff}} = \frac{0,75\% C \text{ dalam besi cair} \times Mg_{\text{dida}}}{\% Mg_{\text{yang ditambahkan}}} \quad (2.1)$$

Suhu perlakuan berkisar antara 1538°C sampai 1565°C, yaitu suhu di atas titik didih Mg. Biasanya Mg ditambahkan dalam bentuk senyawa karena sifatnya sangat eksplosif. Ada 5 cara penambahan Mg ke dalam logam cair yaitu:

- Cara *ladle* terbuka
- Cara *sandwich*
- Cara penambahan permukaan
- Cara *plunging*
- Cara Vortex

### 2.2.5 Nodularitas Dan Jumlah Nodul

Nodularitas didefinisikan sebagai kebulatan dari grafit. Dianggap sebagai nodul bila bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2 kali diameternya. Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan yang pembesaran mikroskop 100x. Perhitungan jumlah nodul dapat dilakukan dengan membandingkan foto mikro struktur non-etsa dengan *Microstructure Rating Chart 1993* yang dikeluarkan oleh *American Foundry Society – AFS* dan *Graphite Rating in Ductile Iron Chart 1999* yang dikeluarkan oleh *Ductile Iron Society – DIS*. Nodularitas dapat ditentukan dengan melihat pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap jenis grafit yang ada dan dilaporkan dalam bentuk prosentase. Perhitungan nodularitas



juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 seperti terlihat pada Rumus 2.2 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n_1 + 0,5n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \quad (2.2)$$

dengan  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ , dan  $n_5$  adalah jenis grafit yang tercantum pada diagram klasifikasi bentuk dari grafit. Tetapi pada tahun 2001, perhitungan ini diubah menjadi hanya memperhitungkan tipe V dan tipe VI saja terhadap keseluruhan jumlah grafit yang ada dengan memperhatikan diameter dari nodul grafit. Kemudian dengan bantuan *image analysis* perhitungan nodularitas dikembangkan menjadi Rumus 2.3 sebagai berikut<sup>[10]</sup>:

$$\text{Nodularitas} = \frac{A_{Acc}}{A_{Acc} + A_{Unacc}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Perhitungan jumlah nodul dilakukan setelah ditentukan S, C, dan diameter minimal nodul yang akan dihitung. Diameter minimal nodul yang akan dihitung yang biasa digunakan adalah 5  $\mu\text{m}$ .

### 2.3 Besi Tuang Nodular Austemper (*Austempered Ductile Iron, ADI*)

*Austempered ductile iron* (ADI) merupakan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, mampu permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik<sup>[11]</sup>. Karena sifat *light-weightnya*, ADI juga dapat dimungkinkan untuk dikembangkan sebagai bahan komponen, antara lain: blok mesin, poros engkol, stang piston, dan roda gigi, pada *hybrid car*.

ADI merupakan salah satu jenis besi tuang nodular yang diperlakukan panas (*austempering*) sehingga meningkatkan kekuatan fatik. Proses pembuatan ADI membutuhkan 2 tahap, yaitu austenisasi dan *quenching*. Austenisasi membutuhkan pemanasan dan penahanan temperatur sampai sekitar 900°C (1650°F). Sedangkan *quenching* melibatkan proses pendinginan cepat dan penahanan temperatur austemper secara isothermal, yang biasanya dilakukan di dalam *salt bath*<sup>[9]</sup>. Pemanasan di atas temperatur kritis dapat mengurangi kadar karbon dari struktur mikro hasil *quenching* dan *tempering* sehingga menghasilkan kekuatan tarik serta ketahanan aus yang rendah dari pada hasil cor dengan kekerasan yang sama. ADI memiliki matrik yang merupakan kombinasi dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit yang stabil.

Penelitian tentang ADI sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersil dalam skala kecil pada tahun 1970-an karena variable *liquid treatment*, *casting* dan *heat treatment* harus dikontrol secara sangat hati-hati untuk mendapatkan struktur mikro yang sesuai agar mendapatkan sifat yang maksimal. Syarat yang harus dimiliki besi tuang nodular agar dapat dijadikan ADI adalah nodularitas > 90%, jumlah nodul > 1000/mm<sup>2</sup>, matrik *ferrit/pearlit* dengan perbandingan yang konsisten, minimal level karbida, minimal level inklusi dan tidak ada segregasi<sup>[4]</sup>. Untuk penggunaan langsung maka harus bersih dari karbida<sup>[7]</sup>.

Tabel 2.3. Standar ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI

Grade	Tensile (min)		Yield (min)		Elongation, %	Impact(a)		Hardness, HB(c)
	MPa	ksi	MPa	ksi		J	ft · lbf	
125-80-10	...	125	...	80	10	...	75	269-321
850-550-10	850	...	550	...	10	100	...	269-321
150-100-7	...	150	...	100	7	...	60	302-363
1050-700-7	1050	...	700	...	7	80	...	302-363
175-125-4	...	175	...	125	4	...	45	341-444
1200-850-4	1200	...	850	...	4	60	...	341-444
200-155-1	...	200	...	155	1	...	25	388-477
1400-1100-1	1400	...	1100	...	1	35	...	388-477
230-185	...	230	...	185	(b)	...	(b)	444-555
1600-1300	1600	...	1300	...	(b)	(b)	...	444-555

(a) Unnotched Charpy bars tested at  $72 \pm 7^\circ\text{F}$  ( $22 \pm 4^\circ\text{C}$ ). The values in the table are a minimum for the average of the highest three test values of four tested samples. (b) Elongation and impact requirements are not specified. Although grades 200-155-1, 1400-1100-1, 230-185, 1600-1300 are primarily used for gear and wear resistance applications, grades 200-155-1 and 1400-1100-1 have applications where some sacrifice in wear resistance is acceptable in order to provide a limited amount of ductility and toughness. (c) Hardness is not mandatory and is shown for information only.

Sifat dari ADI dikarenakan struktur matriks yang unik dari *ferrit acicular* dan *austenite* penstabil karbon yang disebut *ausferrit*. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki ADI disebut sebagai *bainite*. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses austempering baja. Tetapi dari hasil-hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan oleh proses austempering baja, kemudian berdasarkan ASTM A644-92 disebut sebagai *ausferrit*.

## 2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Pengecoran dinding tipis dilakukan untuk mengurangi berat yang dimiliki oleh produk besi tuang sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan *light weight* pada suatu komponen. Belum ada standar baku untuk ketebalan benda yang



dikategorikan dalam pengecoran dinding tipis. Berikut ini definisi ketebalan pengecoran dinding tipis oleh beberapa peneliti terdahulu.

- Caldera mendefinisikan ketebalan dinding dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal kurang dari 5 mm.<sup>[5]</sup>
- Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm.<sup>[3]</sup>
- Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil atau sama dengan 3 mm.<sup>[7]</sup>

Ketebalan minimal terakhir yang sudah dapat dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm yang dibuat oleh kelompok Stefanescu<sup>[16]</sup>. Sedangkan ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis sebagai bahan baku ADI adalah 2 mm yang dicapai oleh kelompok Mourad<sup>[13]</sup> dalam bentuk benda uji, dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez<sup>[3]</sup> dalam bentuk komponen *hollow connecting rod* dari design inovatif mesin 2 silinder. Keberhasilan pengecoran dinding tipis ini ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida dan *skin effect*

#### 2.4.1 Karbida

Selain terbentuknya grafit, karbida juga mungkin terbentuk dalam proses solidifikasi besi tuang. Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang memiliki kecepatan pendinginan tinggi atau benda cor yang tipis. Jumlah karbida yang sangat besar meningkatkan ketahanan aus dari besi tuang, namun membuatnya getas dan sulit untuk dilakukan permesinan. Pembentukan karbida biasanya terjadi jika proses inokulasi tidak berjalan dengan benar atau jika pengecoran dilakukan pada benda-benda tipis. Pada proses pembuatan besi tuang nodular (FCD) resiko pembentukan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan/atau Ce sebagai nodulan. Kedua unsur tersebut selain akan berfungsi sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida. Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas, *heat treatment*, dengan temperatur proses lebih kurang 900°C. Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah:

karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistim pengecorannya. Pada karakteristik logam cair komposisi kimia dan temperatur tuang, *pouring temperature*, adalah 2 unsur penting yang harus diperhatikan. Sedangkan pada proses *liquid treatment* yang mempengaruhi adalah peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya<sup>[7]</sup>. Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi, keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE), kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit, dan rendahnya jumlah (*nodule count*) dan bentuk (*nodularity*) nodule<sup>[6]</sup>. Sedangkan menurut Massone untuk memperoleh TWDI yang harus diperhatikan adalah desain mould yang memungkinkan terjadinya *soundness casting* dan kondisi logam cair sebelum tuang sehingga dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen dan bersih dari karbida<sup>[13]</sup> Pada penelitian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent*, CE, adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida.

#### 2.4.2 Lapisan Efek Kulit (*Skin Effect*)

Pada benda hasil pengecoran *thin wall ductile iron* (TWDI), ditemukan suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular pada bagian tepi struktur mikronya. Lapisan ini kemudian diberi nama *flake graphite rim anomaly*<sup>[8]</sup> atau *skin effect*.<sup>[17]</sup> Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200  $\mu\text{m}$  atau 0,2 mm.<sup>[6]</sup> Lapisan ini dapat menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih dapat berperan sebagai konsentrasi stress dan lokasi permulaan retak.<sup>[17]</sup> Biasanya lapisan ini dihilangkan dengan proses permesinan.<sup>[18]</sup> Ruxanda menemukan adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan daerah tengah. Perbedaan inilah yang dianggap bertanggung jawab atas terjadinya bentuk grafit serpih. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi sebagai akibatnya oksidasi Mg.<sup>[6]</sup> Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.

## 2.5 Carbon Equivalent

*Carbon Equivalent* (CE) merupakan nilai empiris dari persen berat, mengkombinasikan efek dari berbagai elemen paduan yang digunakan dalam pembuatan material *ferrous*, seperti besi tuang dan baja karbon, terhadap jumlah yang setara dengan karbon<sup>[19]</sup>. Nilai ini dapat dihitung menggunakan persamaan matematika. Konsep mengenai CE banyak digunakan pada pengelasan, perlakuan panas, maupun dalam pengecoran. Kemampulan yang lebih baik dan ketangguhan material pada suhu rendah juga dapat diperoleh. Dalam hal pengelasan, CE berperan mengatur kekerasan dari logam induk karena kaitannya dengan kandungan karbon, mangan, kromium, molibdenum, vanadium, nikel dan tembaga.

Pada besi tuang, konsep CE digunakan untuk mengetahui efek dari perlakuan panas dan karakteristik pengecoran logam beserta sifat-sifatnya. Dengan memvariasikan jumlah karbon dan elemen paduan lainnya pada material *ferrous*, tingkat kekuatan yang diinginkan dapat dicapai dengan perlakuan panas yang tepat. Kemampuan untuk membentuk fasa yang keras seperti martensite atau fasa keras lainnya tergantung pada CE dan laju pendinginan termasuk pendinginan dari suhu transformasi. Semakin tinggi nilai CE, laju pendinginan semakin cepat, maka semakin tinggi kecenderungan terbentuknya fasa yang keras dan rapuh selama proses pendinginan. Nilai CE juga dapat digunakan dalam menentukan kisaran temperatur pembekuan dari paduan besi tuang.

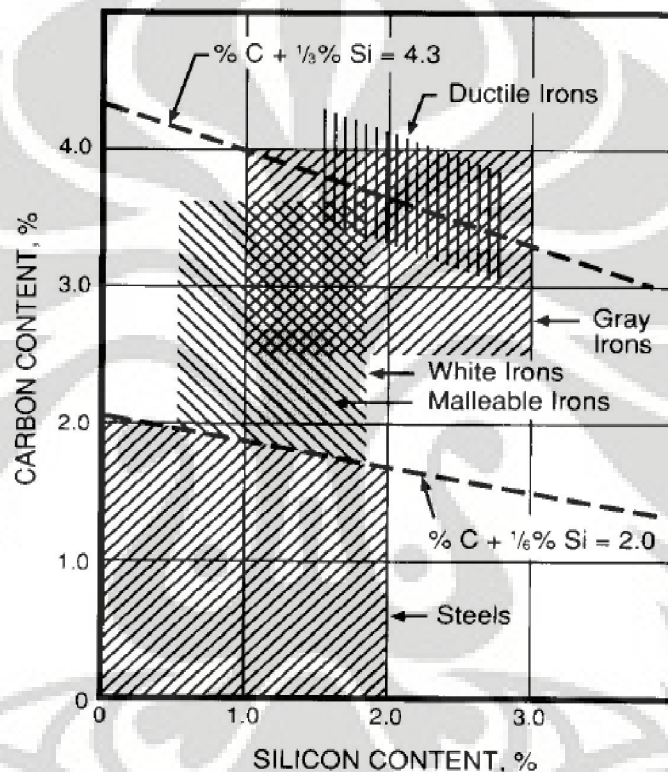
Terdapat beberapa persamaan yang umum digunakan untuk mengekspresikan CE. Pada Gambar 2.6, garis putus-putus yang letaknya paling atas menunjukkan komposisi eutektik untuk paduan Fe-C-Si. Tanpa silikon, titik eutektik berada pada 4,3%. Dengan meningkatnya kandungan silikon, kandungan karbon pada eutektik menurun. Hubungan linear ini dapat diekspresikan dalam Rumus 2.4. berikut.

$$\% C + \frac{1}{3} \% Si = 4,3 \quad (2.4)$$

Efek kombinasi dari silikon dengan karbon dalam besi tuang secara tersendiri dikenal dengan istilah Carbon Equivalent (CE):

$$CE = \% C + \frac{1}{3} \% Si \quad (2.5)$$

CE dari besi tuang menjelaskan bagaimana dekatnya analisis dengan komposisi eutektik. Ketika CE sebesar 4,3, paduan berada pada titik eutektik, CE sebesar 3,9 menunjukkan sebuah paduan dengan kandungan karbon dan silikon lebih rendah dari komposisi eutektik (hipoeutektik), dan CE dengan nilai 4,6 menunjukkan kandungan karbon dan silikon yang lebih tinggi dari komposisi eutektik (hipereutektik). Besi tuang dengan nilai CE yang sama bisa didapat dengan variasi nilai karbon dan silikon yang berbeda.



Gambar 2.6 Kandungan karbon dan silikon untuk beberapa jenis material<sup>[15]</sup>

Nilai lain yang merepresentasikan nilai CE juga telah dipelajari. Ketika sejumlah fosfor hadir dalam komposisi besi tuang, kandungan fosfor dalam besi tuang diikutkan dalam perhitungan.

$$CE = \% C + \frac{\% Si + \% P}{3} \quad (2.6)$$

Pada penelitian-penelitian terdahulu, CE merupakan parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Menurut Loper, nilai CE untuk ketebalan benda tuang (10-30) mm agar bersih dari struktur karbida adalah (4,35 – 4,65)%<sup>[7]</sup>. Jika ketebalan ditipiskan maka nilai CE harus

dinaikkan. Menurut Rijikov, jika CE mencapai nilai 5,0% maka akan diperoleh struktur mikro bersih dari karbida dengan 40% matriks feritik.<sup>[7]</sup> Stefanescu dengan menjaga unsur-unsur lain, seperti Mn, P, S, dan Cr, berhasil membuat struktur mikro TWDI bersih dari karbida dengan nilai CE yang lebih rendah. Karsay menyarankan nilai CE sebesar 4,72% untuk memperoleh 100% matrik feritik.<sup>[7]</sup> Nilai-nilai CE yang direkomendasikan tersebut dibuat berdasarkan bahan baku yang mempunyai kadar mangan (Mn) lebih tinggi dari 0,4% dan kadar fosfor (P) lebih tinggi dari 0,06%.<sup>[7]</sup> QIT merekomendasikan suatu persamaan untuk menghitung nilai CE sesuai dengan ketebalan yang dibutuhkan, yaitu:

$$CE = 4,9265 - 0,0425 \times t \quad (2.7)$$

dengan t adalah ketebalan benda.

Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa diperlukan nilai CE yang tinggi untuk menghindari terbentuknya karbida dalam struktur mikro. Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%<sup>[7]</sup> dan juga mengusulkan nilai CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5 mm).<sup>[20]</sup> Loper membuktikan bahwa dengan meningkatnya nilai CE terjadi peningkatan jumlah nodul yang akan berperan dalam menurunkan resiko terbentuknya struktur karbida. Nilai CE tersebut dihitung sesuai dengan Rumus (2.2).

Javaid menggunakan cetakan pasir berhasil membuat TWDI bebas karbida dengan ketebalan 3 mm dengan nilai CE (4,5 – 5,08)%.<sup>[21]</sup> Labreque dengan menggunakan inoculan yang mengandung Bi dan Ce berhasil membuat TWDI 3 mm dengan nilai CE (4,6 – 4,9)%.<sup>[22]</sup> Dogan menggunakan nilai CE (4,7 – 4,8)% untuk membuat plat berketebalan (1.5 – 9) mm. Maka pada penelitian ini direkomendasikan menggunakan nilai CE (4,45 – 4,9)% untuk membuat TWDI dengan ketebalan di bawah 5 mm dengan menggunakan cetakan pasir. Unsur Mn, P, dan S juga ditambahkan pada perhiungan CE karena pengaruhnya terhadap pembentukan grafit, sehingga rumusnya menjadi sebagai berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \quad (2.8)$$

Martinez mengatakan, TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.<sup>[3]</sup> Mourad menyarankan kadar Si perlu dijaga (2,4 – 2,7)% untuk ketebalan (3-10) mm.<sup>[23]</sup> Hayrynen membuat suatu petunjuk nilai CE untuk memperoleh kualitas ADI<sup>[9]</sup> yang sesuai dengan standar ASTM A897/897M seperti yang terlihat pada Tabel 2.4. Nilai CE yang dianjurkan oleh Hayrynen dihitung sesuai dengan Rumus 2.5.

Tabel 2.4 Petunjuk Nilai CE untuk Produksi ADI<sup>[9]</sup>

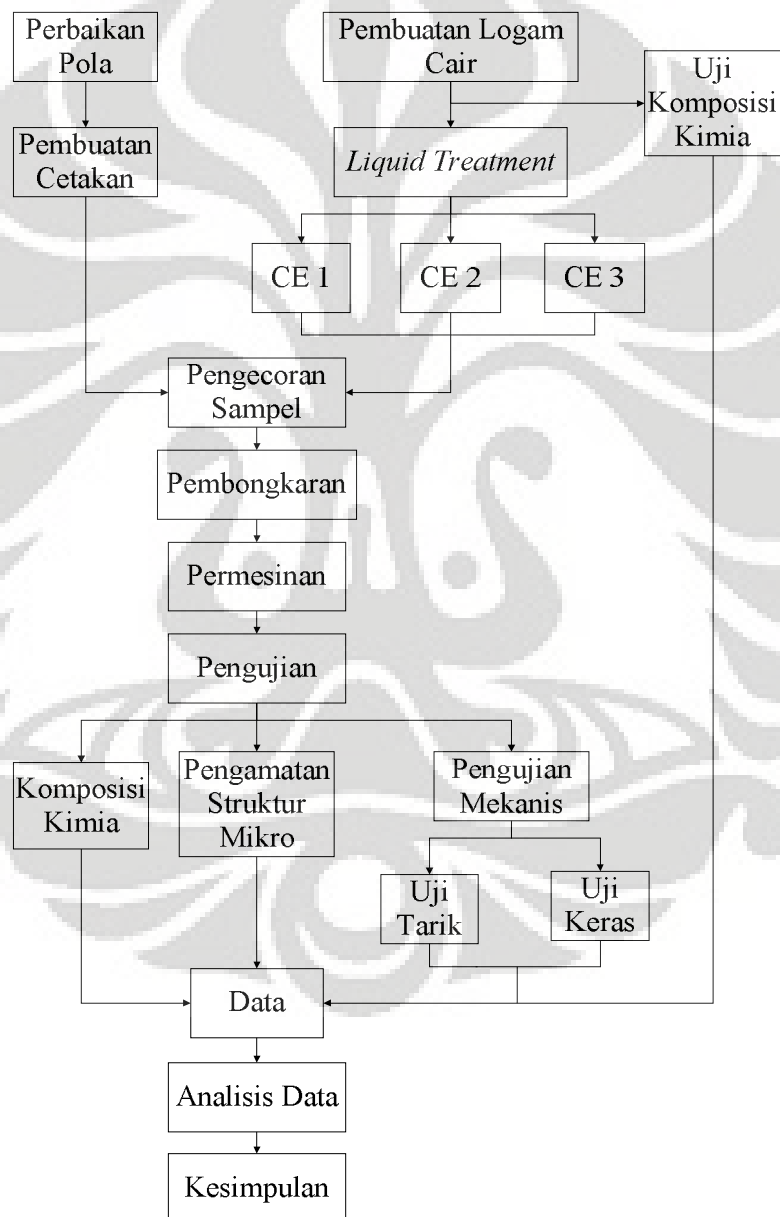
Section Size	CE Range
0 – 0.5 inches (0 – 13 mm)	4.4 – 4.6
0.5 – 2 inches (13 – 51 mm)	4.3 – 4.6
Over 2 inches (51 mm)	4.3 – 4.5



## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini merupakan tahap awal dari rangkaian penelitian dengan tujuan pembuatan *thin wall ductile iron* (TWDI) yang memiliki persyaratan untuk dijadikan *austempered ductile iron* (ADI) dinding tipis. Penelitian akan dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan pemberian kode pada setiap sampel untuk memudahkan pengelolaan data dan pembahasan. Proses penuangan dalam rangkaian penelitian besar dilakukan sebanyak 6 kali dengan penamaan sesuai keterangan asal penuangan, yaitu: P1, P2, P3, P4, P5, P6. Namun untuk keperluan skripsi ini hanya digunakan sampel dari 3 penuangan yaitu penuangan ke-1, 5, dan ke-6 sehingga hanya akan ditemukan kode P1, P5, dan P6 disini. Pada sampel pengamatan struktur mikro, kode sampel ditambahkan sesuai dengan posisi daerah pengambilan sampel, yaitu: A1, A2, dan A3. Untuk sampel uji tarik karena hanya 1 untuk setiap plat dan kondisi maka kodenya sama dengan kode plat.

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan meliputi alat dan bahan mulai dari proses pembuatan pola, pengecoran, hingga pengujian.

#### 3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

- Alat Pembuatan Pola

Alat yang digunakan untuk pembuatan pola antara lain: mesin gergaji, mesin bubut kayu, mesin bor, penggaris, jangka sorong, amplas, martil dan pensil.

- Alat Pembuatan Cetakan

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan meliputi:

- Mesin pencampur pasir (*mixer*)
- Sepasang *flask* tipe *excel*
- Mesin pengangkut

- Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi:

- *Induction furnace*
- *CE meter*
- *Thermocouple*

- Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk proses pengecoran meliputi:

- Ladel
- *Thermocouple*
- Mesin pengangkut



- **Alat Pembongkaran**  
Berupa mesin guncang yang diletakkan di bawah tanah. Pembersihan produk cor dari pasir-pasir yang melekat menggunakan mesin *shotblasting*.
- **Alat Permesinan**  
Alat yang digunakan untuk melakukan permesinan berupa mesin pemotong, mesin bubut, mesin gerinda dan amplas.
- **Alat Pengujian**  
Alat yang digunakan dalam pengujian antara lain:
  - Spektrometer
  - *Microskop optic digital*
  - *Microhardness tester*
  - *Tensile strength machine*

### 3.2.2 Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan pada proses pengecoran meliputi bahan baku logam cair dan bahan baku cetakan.

- **Bahan Baku Pembuatan Pola**  
Bahan baku yang digunakan dalam pembuatan pola adalah kayu, papan triplex, lem, dempul, dan cat.
- **Bahan Baku Logam Cair**  
Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi:
  - *return scrap*
  - *steel scrap*
- **Bahan Baku Cetakan**  
Bahan baku yang digunakan untuk membuat cetakan terdiri dari:
  - Pasir silika sebagai bahan baku utama dari cetakan pasir.
  - Asam furan untuk bahan pengikat.
  - Serbuk arang

Selain bahan baku utama di atas, terdapat beberapa bahan tambahan yang digunakan untuk mendukung proses pengecoran, yaitu:

- Isomol  
Isomol adalah gabungan antara cat dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan cetakan

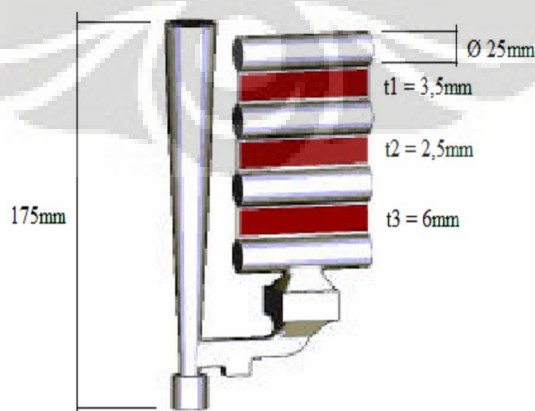
yang baik. Tepat setelah dilakukan pemolesan, campuran ini langsung dibakar dengan api untuk menguapkan kandungan alkohol.

### 3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian meliputi perbaikan pola, pembuatan cetakan, pembuatan logam cair dan *liquid treatment*, pengecoran, preparasi sampel hingga pengujian.

#### 3.3.1 Perbaikan Pola

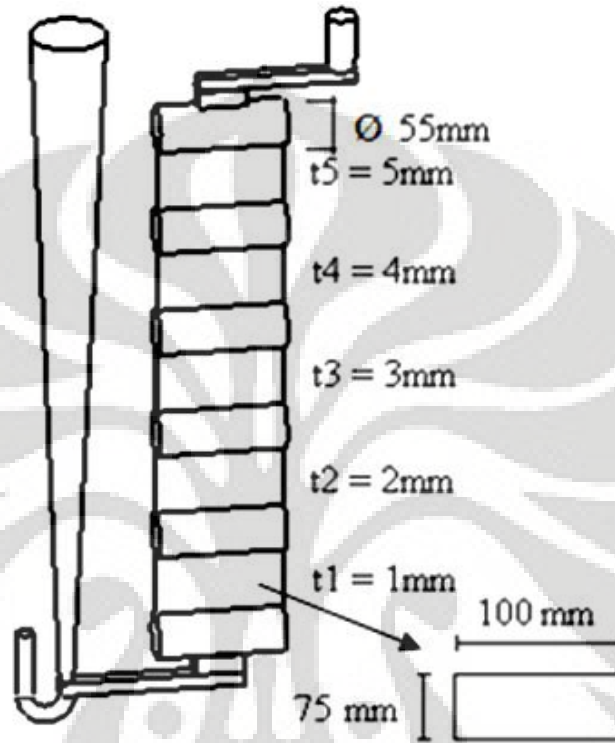
Pola untuk keperluan penelitian dibuat sesuai dengan modifikasi dari desain sistem saluran tuang Stefanescu. Sistem saluran tuang Stefanescu terdiri dari benda berupa plat dengan ukuran (25x100) cm sebanyak 3 buah dengan ketebalan tersusun 6 mm, 2,5 mm dan 3,5 mm, dan *riser* yang berbentuk silinder dengan diameter 25 mm sebanyak 4 buah. Pada desain vertikal ini, Stefanescu menggunakan mekanisme *counter gravity* untuk memperlambat proses pengisian cetakan sehingga diharapkan juga akan memperlambat kecepatan pendinginannya. Selain itu Stefanescu juga mengatur laju kecepatan pendinginan dengan meletakkan plat berturut-turut dari ingate 6 mm, 2,5 mm dan 3,5 mm, seperti terlihat pada Gambar 3.2. Susunan tersebut dapat memperlambat kecepatan pendinginan pada plat 2,5 mm dengan cara memperlambat kecepatan pengisian dengan memperbesar luas permukaan aliran masuk, lalu mempercepat pendinginan pada plat 3,5 mm dengan mempercepat kecepatan pengisian. Kecepatan pengisian dilakukan dengan memperkecil luas permukaan aliran masuk untuk debit yang sama. Kekurangan dari desain ini adalah kemungkinan kecepatan alir yang terlalu tinggi sehingga terbentuk karbida dan kemungkinan terhambatnya aliran.



Gambar 3.2. Desain pengecoran Stefanescu<sup>[7]</sup>

Modifikasi desain untuk penelitian ini terlihat pada Gambar 3.3. yang meliputi:

- Dimensi plat tipis berukuran (150x75) mm dengan ketebalan berurutan dari bawah ke atas adalah 1–5 mm.
- Jumlah plat tipis sebanyak 5 buah.
- Posisi ketebalan terkecil (1 mm) paling dekat dengan ingate.



Gambar 3.3. Desain pengecoran penelitian

Pembuatan pola menggunakan bahan kayu yang terdiri dari 3 kelompok, yaitu: kelompok benda, kelompok *riser*, dan kelompok saluran tuang. Kelompok benda terdiri dari 5 plat dengan ukuran 150 X 75 mm dengan ketebalan 1, 2, 3, 4, dan 5 mm, kelompok *riser* terdiri dari 6 buah silinder dan kelompok sistem saluran tuang terdiri dari 1 *sprue*, 1 *runner*, dan 1 *ingate*. Setelah itu pola dipasang pada *base plate* hingga menghasilkan *pattern plate* seperti yang terlihat Gambar 3.4. *Pattern plate* memiliki ukuran 120x120 cm disesuaikan dengan ukuran *flask* (100x100 cm) yang akan digunakan untuk membuat cetakan. *Pattern plat* dilapisi dengan *plating* agar seluruh permukaan merata dan halus sehingga mudah dilakukan pemisahan dengan pasir cetak saat pelepasan cetakan.



Gambar 3.4. *Pattern plate*

### 3.3.2 Pembuatan Cetakan

Cetakan dibuat dengan pasir furan yang merupakan jenis pasir cetak dengan ikatan yang terjadi secara kimia sehingga dihasilkan daya ikat antar pasir yang baik. Tipe *flask* yang digunakan adalah tipe excel yang merupakan *flask* untuk pengecoran vertikal. *Pattern plate* kemudian diletakan dalam *flask*, setelah itu dilakukan pengisian pasir furan ke dalam *flask* hingga penuh.



Gambar 3.5. Proses *merger* dari pasangan cetakan

Sebelum dilakukan pengecoran, dilakukan *merger* yaitu penggabungan cetakan pasir dari kedua sisi *flask* seperti terlihat pada Gambar 3.5. Ditambahkan juga

**Universitas Indonesia**

perekat pada kedua sisi *flask* untuk menghindari resiko kebocoran. Proses *merger* membutuhkan ketelitian agar posisi rongga cetakan sesuai bentuk benda dengan menggabungkan *dowel* yang telah dibuat antara sisi positif dan negatifnya.

### 3.3.3 Pembuatan Logam Cair dan *Liquid Treatment*

Proses pembuatan logam cair pada penelitian ini dilakukan sebanyak 3 kali untuk memperoleh nilai *Carbon Equivalent* (CE) yang berbeda-beda. Pembuatan logam cair dilakukan di dalam dapur induksi dengan skala pabrik. Besi tuang nodular dihasilkan dari besi tuang kelabu yang telah melewati tahap *liquid treatment* yang terdiri dari inokulasi dan nodulasi.

#### 3.3.3.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)

Tahap ini terdiri dari:

a. Tahap *charging*

Merupakan pengisian bahan baku pertama kali sebelum dapur dinyalakan. Tahapan ini juga terjadi ketika dilakukan peleburan berikutnya dengan kondisi dapur induksi yang masih panas. Material bahan baku meliputi *return scrap* dan *steel scrap*.

b. Tahap *melting*

Diawali dengan pemanasan material sampai pada titik leburnya. Setelah semua material melebur, dilakukan penambahan seperti *carburizer* kemudian temperatur pemanasan dinaikkan sampai dapat dilakukan pengangkatan terak. Kemudian logam cair ditaburi *slag remover* untuk mengikat terak agar mudah dilakukan pemisahan dengan logam cair. Penaburan *slag remover* ini dilakukan sampai terak dalam logam cair diperkirakan habis. Logam cair tetap dipanaskan untuk dilakukan pemeriksaan komposisi dan CE meter.

c. Tahap *refining*

Dilakukan pengambilan sampel untuk pemeriksaan komposisi kimia dengan CE meter ketika temperatur logam cair mencapai sekitar 1400°C. Temperatur logam cair masih tetap ditahan pada temperatur ini sampai dihasilkan komposisi kimia logam cair. Jika komposisi yang diinginkan telah tercapai, selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap temperature logam cair untuk persiapan *tapping*. Namun, jika komposisi yang diinginkan belum tercapai, maka dilakukan penambahan terhadap unsur-unsur yang belum tercapai.

d. Tahap *tapping*

Setelah rangkaian pengujian di atas, baru kemudian dilakukan *tapping* yaitu logam cair dituangkan dari dapur peleburan ke dalam ladle.

3.3.3.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

Proses *liquid treatment* pada pembuatan besi tuang nodular dilakukan untuk mengontrol bentuk grafit membentuk bulatan-bulatan atau nodular. Tahapan ini dilakukan bersamaan dengan tahap *tapping*. Tahap ini terdiri dari dua jenis, yaitu inokulasi dan nodulasi. Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam ladle pada temperatur 1480°C, sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam ladle di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara langsung dengan logam cair. Selain itu, dengan cara seperti ini jumlah logam Mg yang bereaksi lebih efektif. Proses ini berlangsung sekitar 10-15 menit. Pada proses ini, inokulan yang digunakan adalah Fe-Si sedangkan nodulan yang digunakan Fe-Si-Mg.

3.3.4 Pengecoran

Pada penelitian ini dilakukan 3 kali pengecoran dengan bahan baku logam cair yang berbeda-beda. Pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui *sprue basin*, seperti yang terlihat pada Gambar 3.6. Dilakukan pengontrolan temperatur ketika akan dilakukan penuangan logam cair ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan *thermocouple*. Pada saat penuangan temperature berkisar antara 1393°C sampai 1298°C. Waktu penuangan diukur dengan menggunakan *stopwatch*. Waktu yang dimaksud adalah mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair, lamanya antara 9 sampai 11 detik. Setelah proses pengecoran selesai, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Pembongkaran dilakukan setelah benda cor mendingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Dilakukan *shotblasting* agar hasil cor-an lebih bersih dari pasir yang melekat kuat. Metode *shotblasting* merupakan pembersihan dengan menggunakan bola-bola baja kecil dengan mekanisme penumbukan. Selanjutnya dilakukan *machining* untuk memisahkan



bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip.



Gambar 3.6. Proses penuangan logam cair

### 3.3.5 Preparasi Sampel

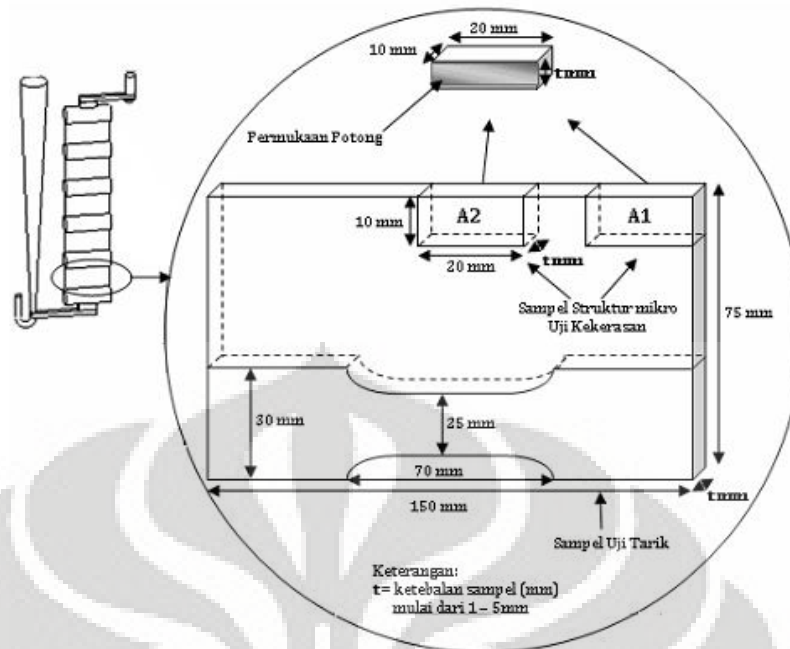
Tahapan selanjutnya setelah permesinan selesai dikerjakan adalah preparasi sampel untuk dilakukan pengujian. Preparasi sampel dilakukan untuk pengujian yang terdiri atas: pengujian struktur mikro, pengujian tarik, dan pengujian kekerasan. Pemberian kode sampel didasarkan pada urutan pengecorannya. Untuk pengecoran pertama sampel diberi kode P1, untuk pengecoran ke-5 sampel diberi nama P5, dan P6 untuk sampel hasil pengecoran yang ke-6.

#### a. Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

Tahapan preparasi sampel untuk pengamatan struktur mikro antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

- Pemotongan (*Cutting*) sampel dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses *cutting* agar dapat mengurangi tingkat deformasi permukaan sampel. Pengambilan sampel plat 1 mm dilakukan untuk pengamatan struktur mikro seperti terlihat pada Gambar 3.7.





Gambar 3.7. Pengambilan sampel uji dari plat

- *Mounting* bertujuan untuk mempermudah penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro pada penelitian ini adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 3.8. Pembuatannya dengan memasukan sampel ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan selama kurang lebih 8 menit. Setelah itu didinginkan selama kurang lebih 6 menit dengan media air.



Gambar 3.8. Sampel hasil *Mounting*

- Pengamplasan (*Grinding*) bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel pada saat pemotongan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas berturut-turut dengan nomor grid #80, #180, #360, #500, #700, #800 dan #1200. Pada saat pengamplasan, pemberian air dilakukan untuk menghindarkan efek pemanasan terhadap struktur mikro dan mengalirkan geram logam yang terkikis. Selain itu, perubahan arah pengamplasan penting dilakukan agar permukaan sampel benar-benar halus dan merata.
  - Pemolesan (*Polishing*) bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkilap seperti cermin serta menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde 0.01  $\mu\text{m}$  dengan menggunakan *diamond paste* dengan ukuran berturut-turut 6, 3, 1, dan  $\frac{1}{4}$  mikron. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata agar cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan kembali secara fokus.
  - Etsa (*Etching*) merupakan suatu proses pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak sehingga detail struktur yang akan diamati dapat terlihat dengan jelas dan tajam. Sampel dicelupkan kedalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan.
- b. Preparasi Uji Kekerasan
- Sampel untuk uji kekerasan diambil dari bagian tengah antara sampel untuk uji tarik dan pengamatan struktur mikro. Preparasi sampel untuk uji kekerasan meliputi pengamplasan untuk memperoleh permukaan yang halus. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM E10.
- c. Preparasi Uji Tarik
- Preparasi uji tarik dilakukan dengan memotong pada bagian sisi yang bersebrangan dengan sisi yang digunakan untuk pengambilan sampel pengamatan struktur mikro, seperti terlihat pada gambar 3.6. Standar yang digunakan adalah JIS Z2201.

### 3.3.6 Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengamatan struktur mikro, uji kekerasan dan uji tarik.

#### 3.3.6.1 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik digital Canon, terlihat pada Gambar 3.9. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 100x dan 200x. Pada saat pengambilan gambar, temperatur dijaga pada temperatur sekitar 27°C.

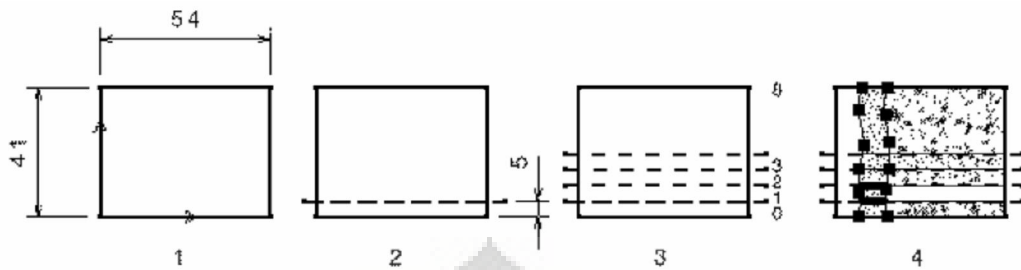


Gambar 3.9. Mikroskop optik digital Canon

Selain melakukan pengamatan struktur mikro yang diperoleh dan anomali-anomalnya, juga dilakukan perhitungan jumlah nodul dengan diameter minimal nodul yang dihitung yaitu 5  $\mu\text{m}$  dan perhitungan nodularitas dengan *software* NIS. Tahapan pengukuran ketebalan efek kulit<sup>[24]</sup> dilakukan sebagai berikut:

1. Pengukuran dilakukan pada foto pembesaran 200x dengan ukuran hasil cetak foto standar kamera, (54x41) mm.
2. Pada bagian tinggi foto diberi 9 titik pengukuran dari bawah ke atas dengan jarak yang sama antara masing-masing titik, gambar 3.10.
3. Dibuat garis horisontal sejajar dengan datum pada setiap titik pengukuran, lalu dilakukan pengukuran dengan menggunakan penggaris pada setiap titik.

4. Hasil pengukuran lalu dibagi dengan 200 untuk memperoleh ketebalan sesungguhnya.



Gambar 3.10 Tahapan pengukuran ketebalan *skin effect*<sup>[24]</sup>

### 3.3.6.2 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dibawah *macrohardness tester* dengan metode Brinell, alat seperti terlihat pad Gambar 3.11. Metode Brinell menggunakan indenter baja berbentuk bola. Pada saat penjejakan, beban yang digunakan sebesar 187,5 kg dengan lamanya penjejakan selama 15 detik, dan temperatur berkisar 27°C.



Gambar 3.11 *Macrohardness tester* Brinell

Penjejakan dilakukan pada arah horizontal sebanyak 7 kali. Hal ini dilakukan untuk menghasilkan data kekerasan yang representatif.

Metode perhitungan berdasarkan metode Brinnel seperti rumus 3.1, yaitu:

$$BHN = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.1)$$

Dimana:

P = beban (Kg),

D = diameter indenter (mm), dan

d = diameter jejak (mm)

### 3.3.6.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Shimadzu Servopulser* seperti terlihat pada Gambar 3.12. Prinsip kerja mesin uji tarik ini adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Beban yang digunakan sebesar 20 ton (200 KN) kemudian ditarik sampai putus. Mesin uji tarik ini belum terintegrasi dengan sistem komputerisasi sehingga, data yang didapat adalah grafik hasil jarum pembaca yang tercetak pada selembar kertas. Standar pengujian yang digunakan dalam penelitian ini adalah JIS Z 2241.



Gambar 3.12. *Tensile strength machine*

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Komposisi Kimia

Komposisi kimia logam cair setelah melalui *liquid treatment* dapat dilihat pada Tabel 4.1. Komposisi kimia dari sampel P1 dan P5 hampir sama kecuali untuk kadar Cu dan Mg. Sample P6 memiliki komposisi kimia yang jauh berbeda dengan sampel P1 dan P5, kecuali pada kadar fosfor dan sulfurnya identik dengan P1 dan P5. Temperatur tuang untuk P1, P5, dan P6 berurut-turut adalah 1393°C, 1298°C, dan 1385°C. Waktu tuang untuk P1 selama 11 detik, P5 selama 10 detik, dan P6 selama 9 detik.

##### 4.1.1 Persentase Elemen pada Logam Cair

Dari komposisi kimia secara umum menunjukkan bahwa sebagian besar unsur pepadu berada pada standar yang ditetapkan kecuali untuk Mg.

Tabel 4.1. Perbandingan komposisi kimia logam cair penelitian dengan standar pabrik <sup>[25]</sup>

Komposisi (%)	Pabrik	Sampel Penelitian		
		P1	P5	P6
%C	3,5-3,9	3,84	3,82	3,51
%Si	2,4-2,8	2,60	2,76	2,14
%Mn	0,3-0,5	0,37	0,36	0,34
%P	0,03 max	0,02	0,02	0,02
%S	0,02 max	0,02	0,02	0,02
%Cu	0,15 max	0,04	0,02	0,12
%Cr	0,15 max	0,04	0,05	0,04
%Ni	0,15 max	0,03	0,03	0,07
%Mg	0,03 min	0,04	0,07	0,02

- Karbon (C)

Dari Tabel 4.1, dapat dilihat bahwa sampel P1 memiliki kadar karbon paling tinggi sementara sampel P6 memiliki kadar karbon paling rendah. Jika dibandingkan dengan standar pabrik, kadar karbon ketiga



sampel memenuhi komposisi kimia logam cair standar pabrik untuk FCD 450.

- Silikon (Si)

Kadar silikon P6 berada di bawah batas minimum standar pabrik. Rendahnya kadar silikon ini menyebabkan terbentuknya karbida yang ditemukan pada mikro struktur palt 1 mm P6.

- Mangan (Mn)

Kadar Mn untuk besi yang selanjutnya akan dilakukan perlakuan panas untuk jenis feritik harus  $\leq 0,5\%$ . Kadar mangan dalam logam cair pada ketiga sampel telah memenuhi standar.

- Magnesium (Mg)

Kadar magnesium pada sampel P1 dan P5 berada diatas batas minimum untuk membantu pembentukan grafit bulat. Pada sampel P6 kadar Mg yang berada di bawah standar dapat menyebabkan proses pembentukan grafit bulat berjalan kurang sempurna, hal ini terbukti dari rendahnya nodularitas P6.

#### 4.1.2 Carbon Equivalent (CE)

Secara umum, dari ketiga penuangan terlihat bahwa sampel P1 dan P5 memiliki nilai CE yang hampir mendekati dan keduanya terpaut cukup jauh dengan nilai CE sampel P6. Dilakukan tiga jenis perhitungan nilai CE pada P1, P5, maupun P6 untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan nilai CE yang signifikan dengan memasukan pengaruh kadar unsur-unsur lain selain karbon dan silikon dalam perhitungan.

Tabel 4.2. Kadar CE logam cair

Sampel	CE-1	CE-2	CE untuk fluiditas
P1	4,65	4,63	4,50
P5	4,68	4,66	4,52
P6	4,17	4,16	4,06
Keterangan :			
CE – 1 : (%C+0,31%Si)			
CE – 2 : (%C+0,3%Si+0,33%P-0,027%Mn+0.4%S)			
CE Fluiditas : (%C+0,25%Si+0,50%P)			



Nilai CE-1 hanya memperhitungkan keberadaan kadar karbon dan silikon dimana diperoleh nilai untuk P1, P5, dan P6 berturut-turut 4,65, 4,68, dan 4,17. Nilai CE-2 juga dihitung untuk mengetahui pengaruh kadar mangan, fosfor, dan sulfur terhadap pembentukan grafit. Nilai CE-2 untuk P1 sebesar 4,63, untuk P5 sebesar 4,66 dan 4,16 untuk P6. Dengan memasukkan kadar mangan, fosfor, dan sulfur dalam perhitungan ternyata menyebabkan turunnya nilai CE pada setiap penuangan. Sehingga untuk memperoleh nilai CE yang diinginkan, selain mengontrol kadar karbon dan silikon, perlu juga dilakukan kontrol terhadap kadar mangan, fosfor, dan sulfur dalam logam cair.

CE fluiditas dalam penelitian ini dihitung untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kemampuan logam cair dalam mengisi cetakan. Ternyata pada besi tuang variasi nilai CE fluiditas, seperti disajikan pada Tabel 4.2, tidak terlalu berpengaruh, terbukti dari hasil pengamatan visual seluruh cetakan, baik P1, P5, dan P6 terisi penuh.

Perhitungan nilai CE yang dibutuhkan untuk plat dengan ketebalan 1 mm berdasarkan rekomendasi QIT adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{CE} &= 4,9265 - 0,0425t \\ &= 4,9265 - (0,0425 \times 1) \\ &= 4,88 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan rekomendasi QIT untuk plat setebal 1 mm, maka seharusnya CE bernilai 4,88. Dari ketiga sampel, semua nilai CE yang dimiliki berada di bawah nilai CE berdasarkan rekomendasi QIT. Nilai CE yang berada di bawah nilai rekomendasi bisa menyebabkan terbentuknya struktur karbida.

## 4.2 Pengamatan Visual

Pengamatan visual meliputi pengamatan kondisi makro benda dan saluran tuang dan plat yang diperoleh setelah dilakukan proses pemotongan.



(a)

(b)



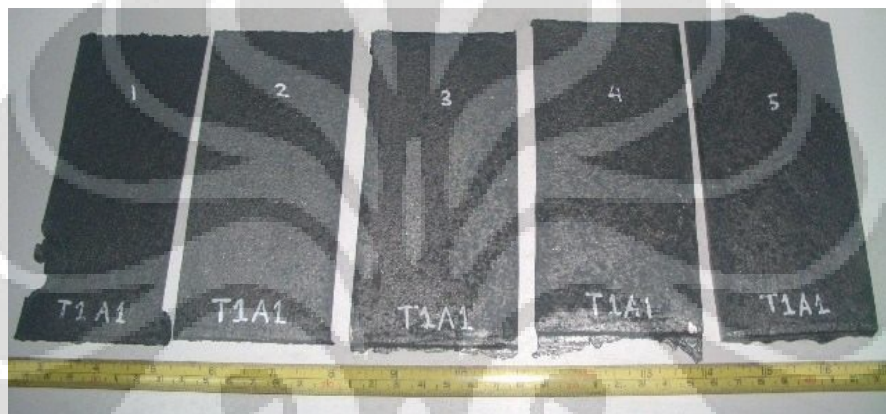
(c)

Gambar 4.1. Benda dan saluran tuang (a) P1 (b) P5 (c) P6

Dari pengamatan visual, Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa seluruh cetakan terisi penuh. Pada sampel P1 terdapat cacat sirip sepanjang *sprue* bagian atas hingga bagian plat dengan 4 mm dan 5 mm disebabkan terbentuknya celah antara *parting line* yang memungkinkan logam cair mengalir keluar. Sirip yang

terbentuk pada pengecoran P1 mengganggu dimensi plat dan memperbesar daerah pendinginan pada plat yang memiliki ketebalan 5 mm dan 4 mm.

Pada hasil penuangan P5 terjadi cacat sirip pada sprue bagian bawah. Cacat sirip ini disebabkan adanya celah antara *parting line* karena tidak kuatnya cetakan pada bagian bawah menerima tekanan yang sangat tinggi akibat peletakan plat tipis setelah *ingate*. Sirip yang terbentuk pada pengecoran P5 mengganggu dimensi plat dan memperbesar daerah pendinginan, khususnya pada plat 1 dan 2. Pada hasil pengecoran P6 hanya ditemukan sedikit cacat sirip pada *sprue* bagian tengah dan bawah.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.2. Benda setelah dilakukan proses pemotongan (a) P1 (b) P5 (c) P6

Plat 1 mm P1, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. dengan kode 1, tampak mengalami inklusi padatan berupa pasir. Inklusi pasir kemungkinan berasal dari cetakan yang runtuh akibat tekanan logam cair yang tinggi sehingga pasir masuk kedalam cetakan terletak pada sambungan plat 1 mm dan *riser* pertama setelah *ingate*. Peristiwa ini dapat terjadi karena adanya perlambatan kecepatan pengisian akibat saluran yang tipis pada plat 1mm. Melambatnya kecepatan pengisian inilah yang mengakibatkan tekanan logam cair menjadi tinggi dan menekan pasir cetak hingga runtuh dan menjadi inklusi pada plat 1 mm P1.

Secara umum, hasil pengecoran menunjukkan bahwa cetakan untuk sampel P1, P5, dan P6 semuanya terisi sempurna. Dari ketiga pengecoran sebelum dilakukan proses *finishing*, terlihat bahwa pengecoran ke-3 paling baik dibandingkan dengan yang lainnya. Secara visual, pengaruh nilai CE ini belum terlihat karena untuk P1, P5, dan P6 semua plat dapat terisi dengan baik.

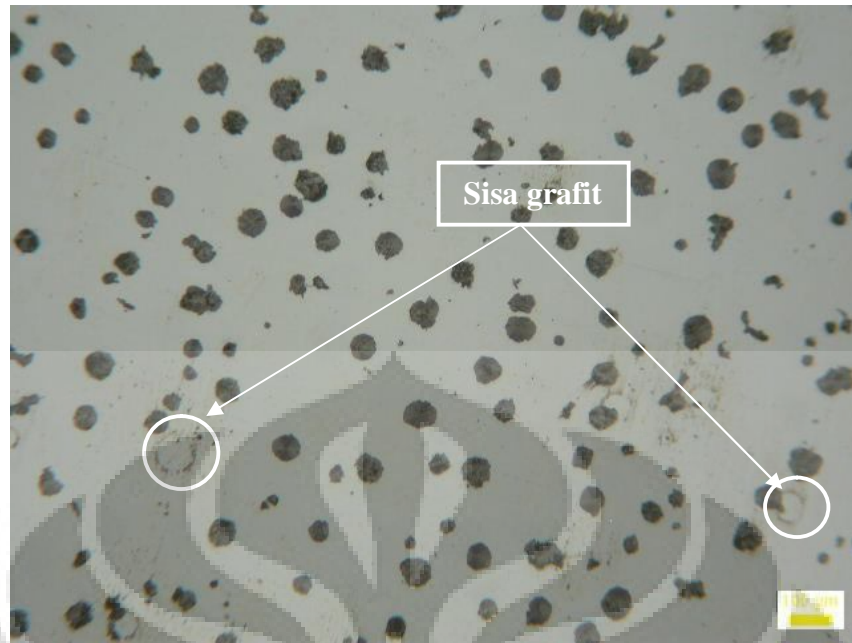
### 4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro meliputi bentuk grafit, nodularitas, jumlah nodul, matrik, karbida, *skin effect*.

#### 4.3.1 Grafit

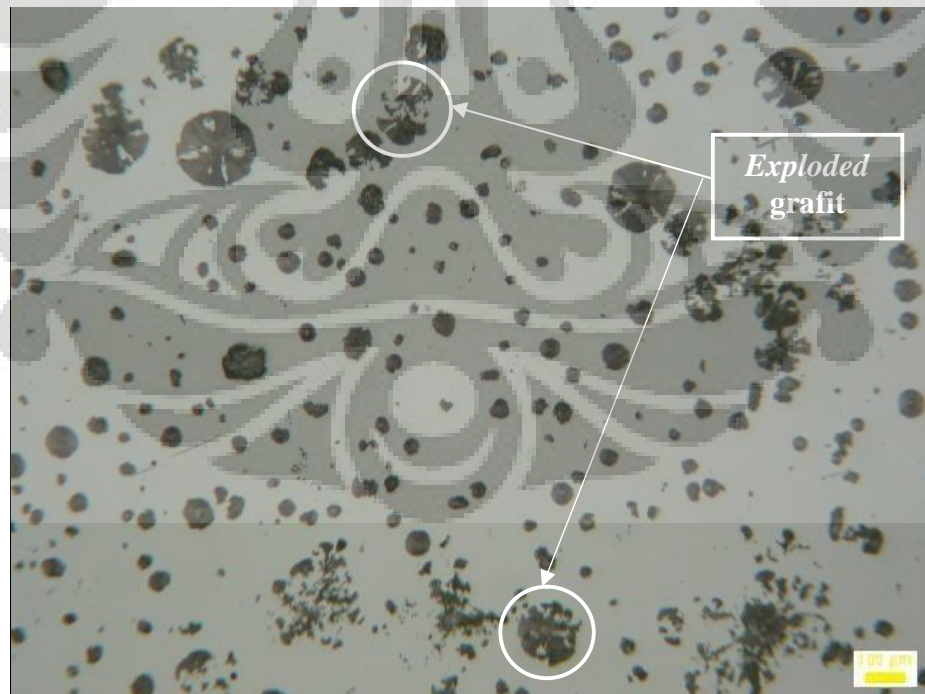
Pada plat 1 mm P1 dengan CE sebesar 4,65 struktur grafit nodul yang terbentuk tersebar merata dengan diameter nodul yang terlihat tidak jauh berbeda satu dengan lainnya. Pada P5 dengan CE 4,68 grafit nodul terbentuk dengan baik seperti pada P1 dan terdapat grafit nodul primer yang memiliki diameter cukup besar jika dibandingkan dengan diameter grafit nodul normalnya. Grafit primer mungkin terbentuk karena nilai CE lebih besar dari 4,3%. Sedangkan pada hasil foto struktur mikro P6, hanya terbentuk sedikit grafit nodul yang persebarannya tidak merata dan terbentuk banyak *exploded* grafit.





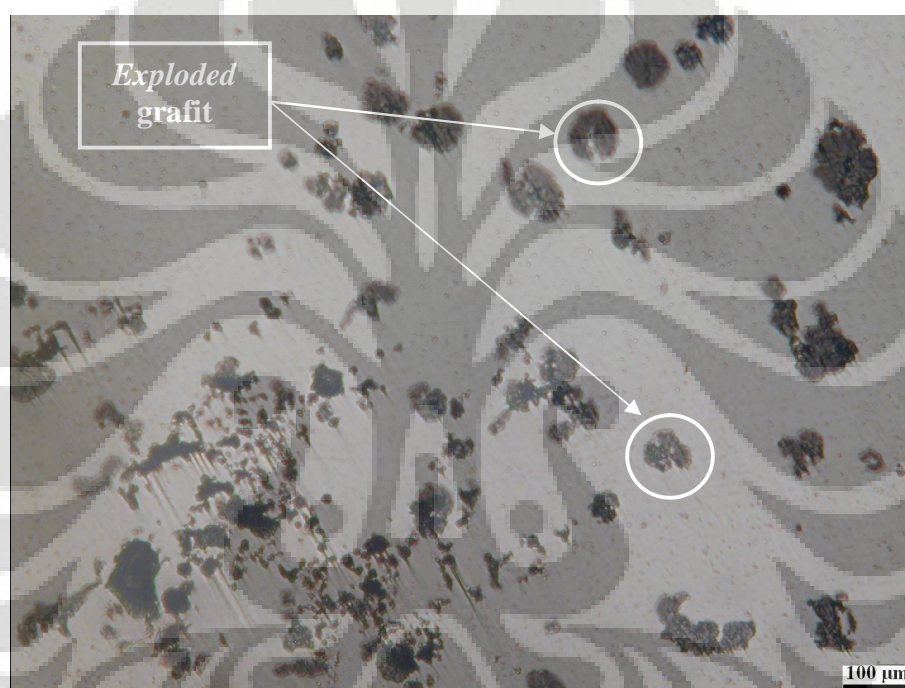
Gambar 4.3. Struktur mikro plat 1 mm P1(non etsa, 100x)

Pada plat P1, seperti terlihat pada Gambar 4.3, ditemukan struktur lain yang seolah-olah merupakan sisa dari grafit. Struktur ini dicurigai sebagai inklusi.



Gambar 4.4. Struktur mikro plat 1 mm P5 (non etsa, 200x)

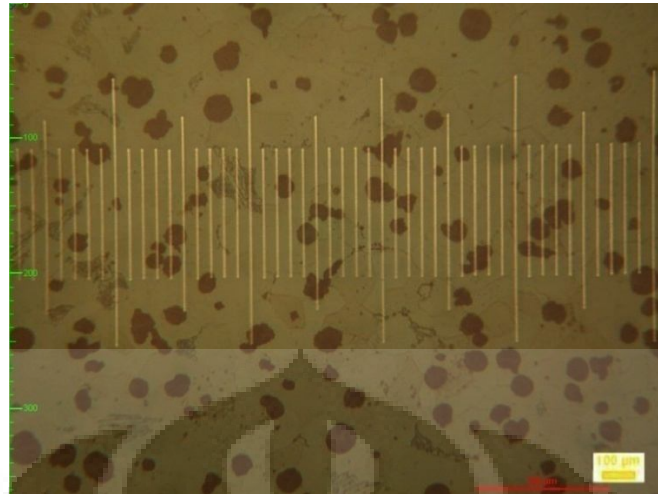
Pada plat P5 dan P6, Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, terlihat adanya grafit yang mengalami *exploded*. Bentuk grafit semacam ini mungkin ditemukan pada besi hipereutektik dengan nilai CE lebih besar dari 4,5 % yang memiliki residu magnesium tinggi. Jadi, kemungkinan terbentuknya *exploded* grafit pada P5 yang memiliki nilai CE sebesar 4,68 disebabkan oleh residu magnesium yang tinggi. Sedangkan pada P6, *exploded* grafit yang terjadi kemungkinan dikarenakan pendinginan yang terlalu lama menyebabkan timbulnya perbedaan temperatur sehingga ada panas yang masih tertahan dan menyebabkan struktur grafit yang terjadi seperti meledak.



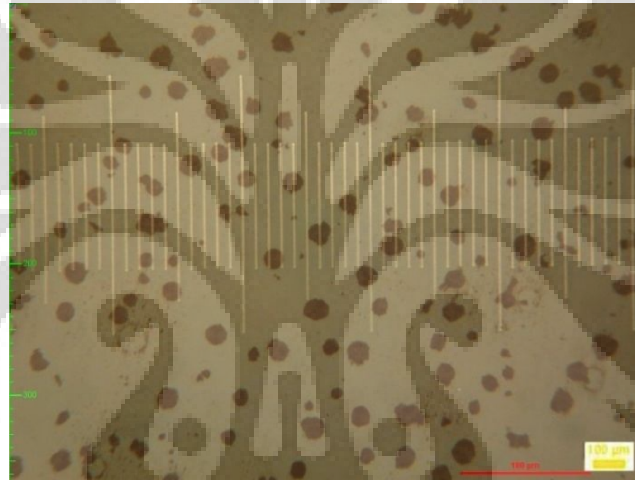
Gambar 4.5 *Exploded* grafit pada plat 1 mm P6 (non etsa, 200x)

#### 4.3.2 Nodularitas dan Jumlah Nodul

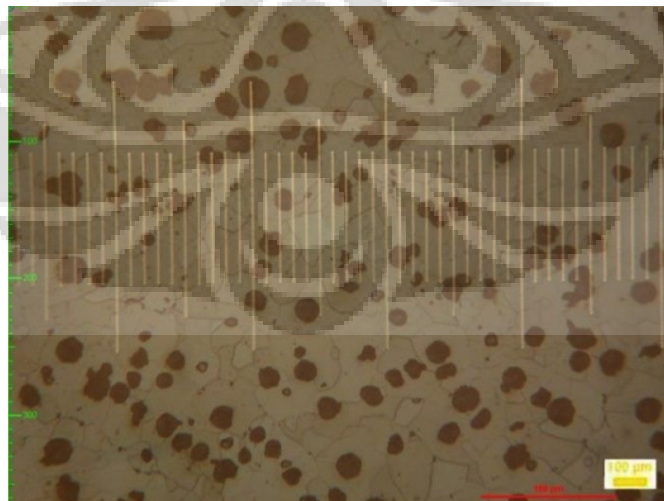
Perhitungan jumlah nodul menggunakan perhitungan *image analysis* dengan diameter minimal yang dihitung adalah 5  $\mu\text{m}$ , seperti terlihat pada Gambar 4.6, Gambar 4.7, dan Gambar 4.8. Pembatasan perhitungan dengan diameter minimal 5  $\mu\text{m}$  dilakukan untuk menghindari terbacanya inklusi dan porositas sebagai nodul oleh software. Hasil perhitungan nodul pada setiap gambar terlihat pada Tabel 4.3, selanjutnya dilakukan perhitungan rata-rata nodularitas, diameter nodul rata-rata, jumlah nodul, dan area grafit yang hasilnya terlihat pada Tabel 4.4. Perhitungan nodularitas dan jumlah nodul ini dilakukan menggunakan *software* NIS.



(a)



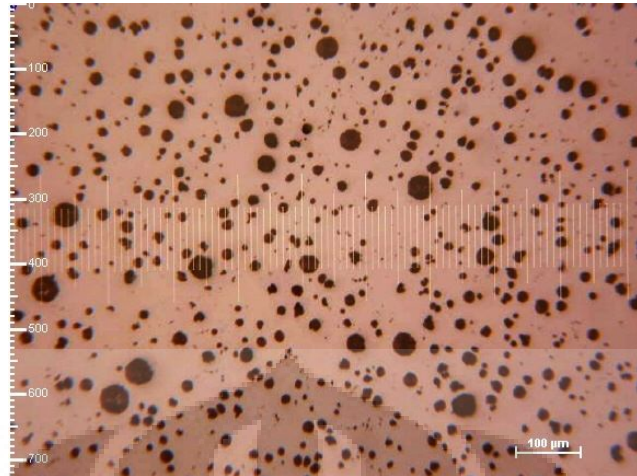
(b)



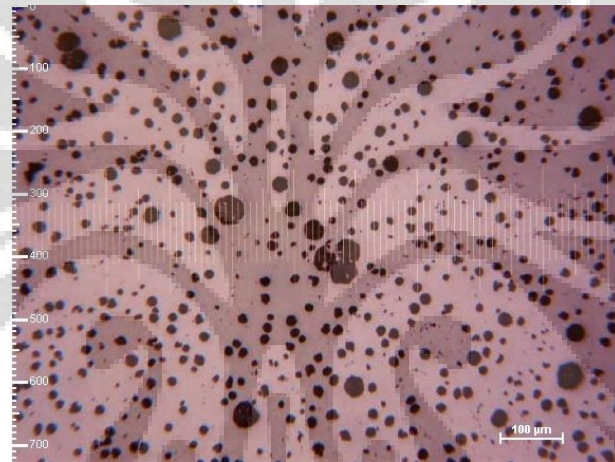
(c)

Gambar 4.6 Foto mikro plat 1 mm P1 untuk perhitungan *software* NIS  
(a) Gambar 1, (b) Gambar 2 dan (c) Gambar 3

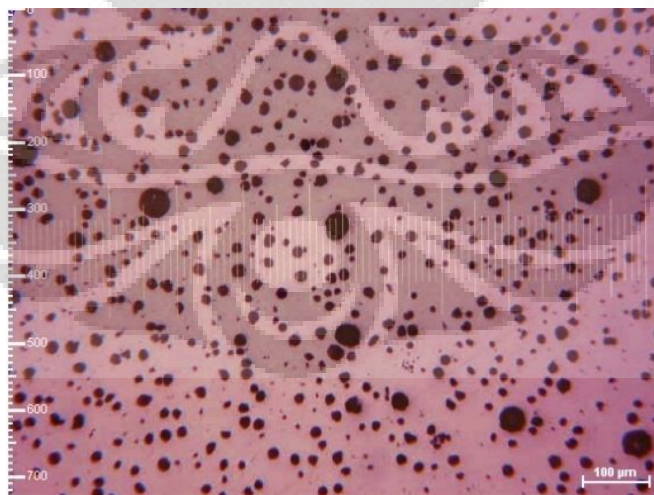




(a)

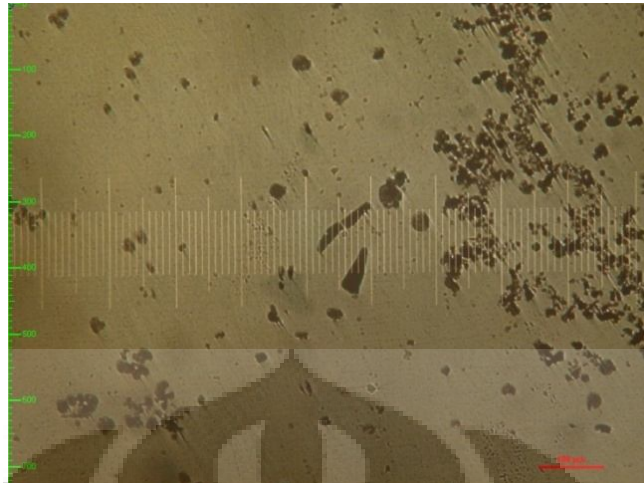


(b)

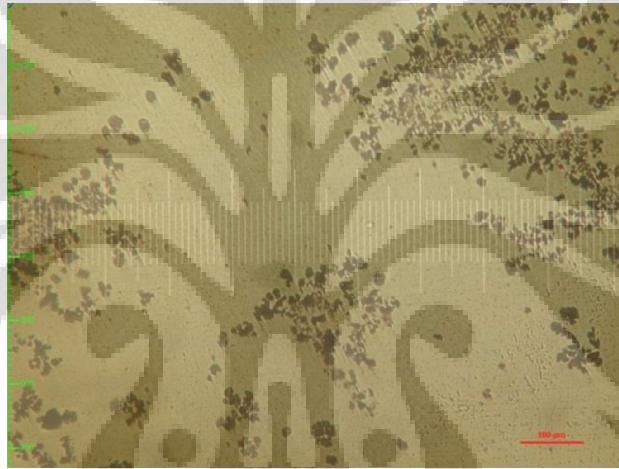


(c)

Gambar 4.7 Foto mikro plat 1mm P5 untuk perhitungan *software* NIS  
(a) Gambar 1, (b) Gambar 2 dan (c) Gambar 3



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Foto mikro plat 1mm P6 untuk perhitungan *software* NIS  
(a) Gambar 1, (b) Gambar 2 dan (c) Gambar 3

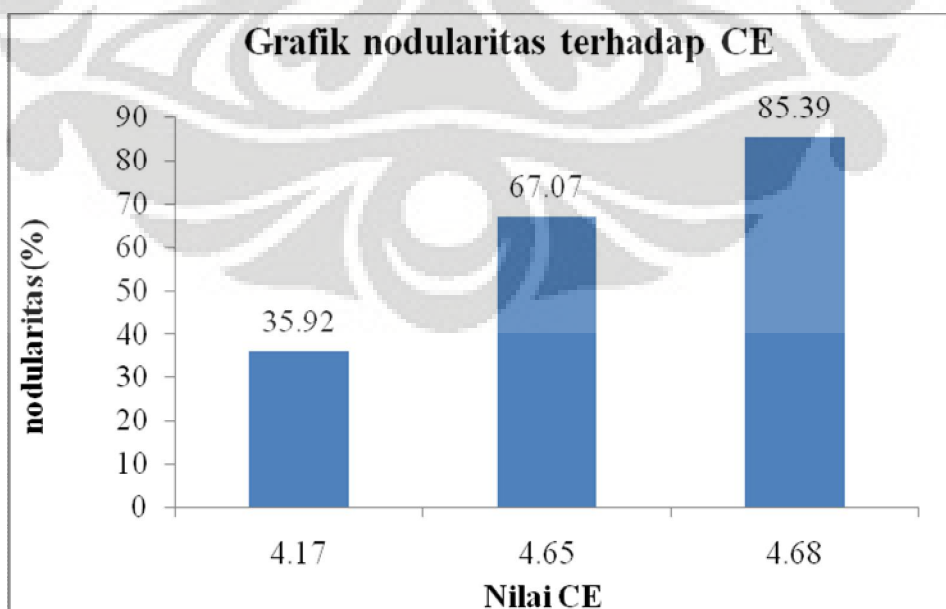
Tabel 4.3. Nodularitas dan jumlah nodul dari 3 posisi berbeda.

Penuangan	Posisi	Nodularitas (%)	Jumlah Nodul (nodul/mm <sup>2</sup> )	Diameter Nodul Rata-rata ( $\mu$ m)
P1	Gambar 1	61,93	811	13,52
	Gambar 2	66,3	805	14,53
	Gambar 3	72,98	816	11,98
P5	Gambar 1	85,7	636	11,37
	Gambar 2	85,48	765	11,1
	Gambar 3	84,98	719	11,32
P6	Gambar 1	39,66	520	13,86
	Gambar 2	28,1	700	11,46
	Gambar 3	40	532	12,81

Tabel 4.4. Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata

Penuangan	Nilai CE	Nodularitas (%) Rata-rata	Jumlah Nodul (nodul/mm <sup>2</sup> ) Rata-rata	Diameter Nodul Rata-rata ( $\mu$ ) Rata-rata
P1	4,65	67,07	811	13,34
P5	4,68	85,39	706	11,26
P6	4,17	35,92	584	12,71

Dari Tabel 4.4, data nodularitas untuk setiap penuangan dimasukkan ke dalam Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Grafik nodularitas terhadap nilai CE

Secara umum, kecenderungan yang terlihat sesuai dengan literatur<sup>[11]</sup> dimana semakin tingginya nilai CE, maka nodularitas rata-rata yang diperoleh juga akan semakin tinggi. Dari hasil perhitungan, diperoleh jumlah nodul untuk P1 sebanyak 811 nodul/mm<sup>2</sup>, P5 sebanyak 706 nodul/mm<sup>2</sup>, dan P6 sebanyak 584 nodul/mm<sup>2</sup>. Jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata yang diperoleh dari hasil penelitian menunjukkan nilai yang acak terhadap nilai CE. Hal ini disebabkan karena jumlah nodul sendiri berkaitan dengan % silikon yang ditambahkan sebagai inokulan,<sup>[11]</sup> dimana semakin tinggi silikon yang ditambahkan sebagai inokulan maka jumlah nodul akan meningkat. Dari penelitian ini menunjukkan diameter nodul tidak berkaitan dengan nilai CE.

Syarat FCD untuk ADI adalah<sup>[3]</sup>:

- Nodularitas > 90%  
Nodularitas pada setiap plat 1 mm P1 maupun P5 tidak ada yang mencapai 90%. Nodularitas tertinggi diperoleh plat P5, dengan nilai 85,39%.
- Jumlah nodul > 1000/mm<sup>2</sup>  
Jumlah nodul dari ketiga plat tidak ada yang memenuhi persyaratan untuk pembuatan ADI. Dari data pada Tabel 4.4, jumlah nodul di tiga posisi berbeda dalam satu plat memiliki nilai yang cukup berbeda jauh, mengindikasikan bahwa persebaran nodul pada setiap plat belum merata. Dari hasil penelitian, jumlah nodul paling tinggi yang diperoleh plat P1 sebesar 811 nodul/mm<sup>2</sup>.

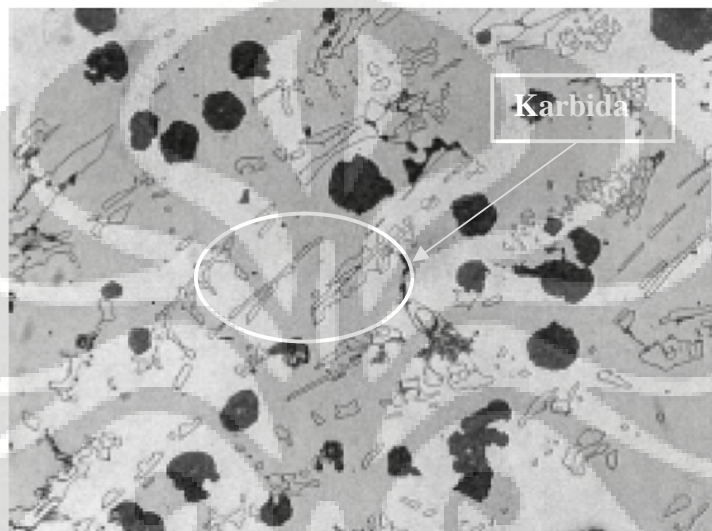
#### 4.3.3 Matrik

Dengan mengambil referensi pada *ASM Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa struktur mikro yang terbentuk pada plat 1 mm P1, P5, dan P6 adalah grafit dalam 100% fasa ferit. Meskipun nilai CE pada P1 dan P5, yaitu 4,65 dan 4,68, berbeda jauh dengan P6 yang nilainya 4,17, ternyata didapatkan matrik yang sama pada setiap struktur mikro plat tipis hasil penuangan. Dari pengamatan ini diketahui bahwa nilai CE ternyata tidak berpengaruh terhadap matrik yang terbentuk pada besi tuang nodular dinding tipis.

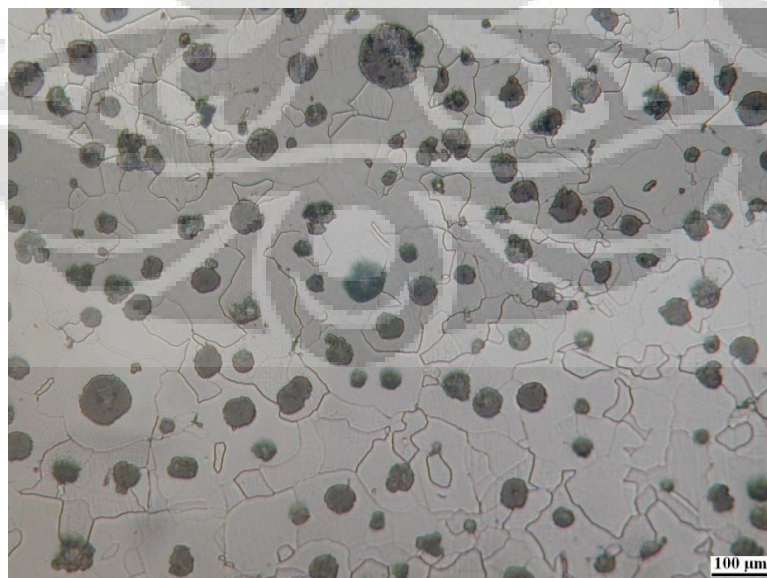


#### 4.3.4 Karbida

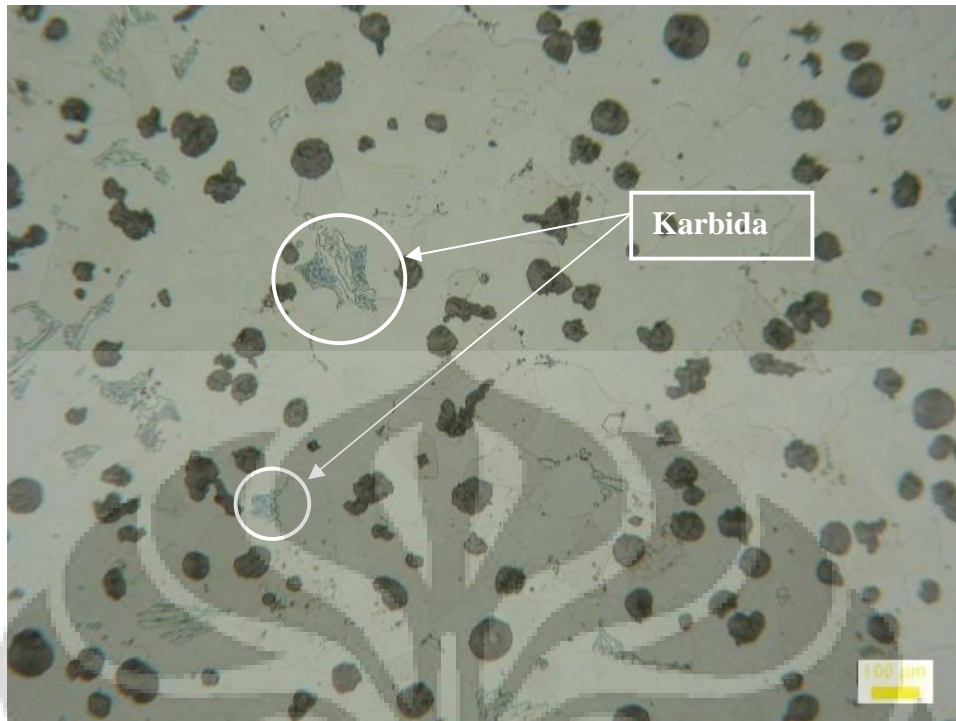
Sebagai acuan untuk meidentifikasi adanya karbida, digunakan Gambar 4.10 dar AFS Transaction. Pada struktur mikro P1 dan P6 yang memiliki nilai CE masing-masing 4,65 dan 4,17, terlihat karbida yang persebarannya cukup merata dalam matriks seperti disajikan oleh Gambar 4.12. dengan nilai CE 4,68, struktur mikronya tampak bersih dari karbida. Struktur mikro plat 1 mm P5 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



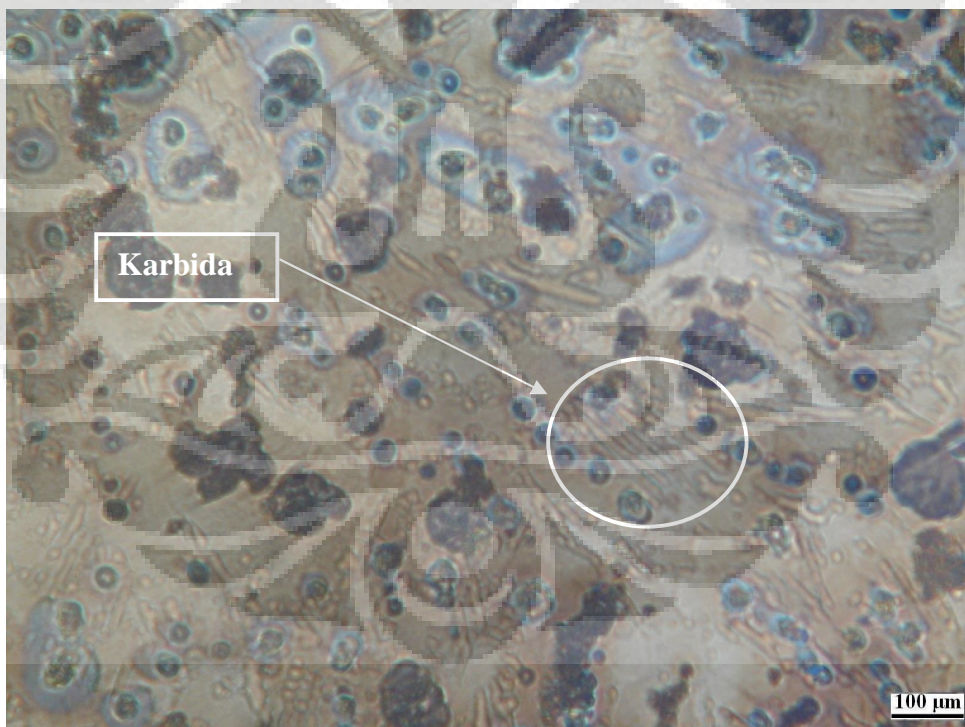
Gambar 4.10. Struktur mikro karbida pada besi tuang nodular menurut AFS transactions (400x)



Gambar 4.11. Struktur mikro etsa plat CE 4,68 (P5)



Gambar 4.12. Struktur mikro etsa plat CE 4,65 (P1)



Gambar 4.13. Struktur mikro etsa plat CE 4,17 (P6)

Melihat pada nilai CE, seharusnya diperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida untuk plat 1 mm P1 dan P5 dan terbentuk karbida pada P6. Walaupun nilai CE logam cair masuk dalam jangkauan yang dianjurkan Stefanescu,<sup>[4]</sup> yaitu

(4,04-4,68)%, namun pada penelitian, tersebut Stefanescu menggunakan penambahan logam tanah jarang yang membantu pembulatan grafit dan mencegah terbentuknya karbida. Dalam penelitian ini tidak digunakan penambahan logam tanah jarang.

Dari hasil pengamatan ini kemungkinan lain adalah CE bukanlah satu-satunya faktor yang berperan dalam menentukan terbentuknya karbida dalam pengecoran besi tuang nodular dinding tipis, faktor lain yang turut berperan adalah laju pendinginan. Kandungan karbida seperti yang terbentuk pada plat 1 mm P1 dapat dihilangkan dengan pemanasan saat proses austemper dalam pembuatan TWADI. Apabila ingin menghilangkan karbida sama sekali saat proses pengecoran, perlu diperhatikan komposisi Mn dan Si agar berada dalam batas optimum.

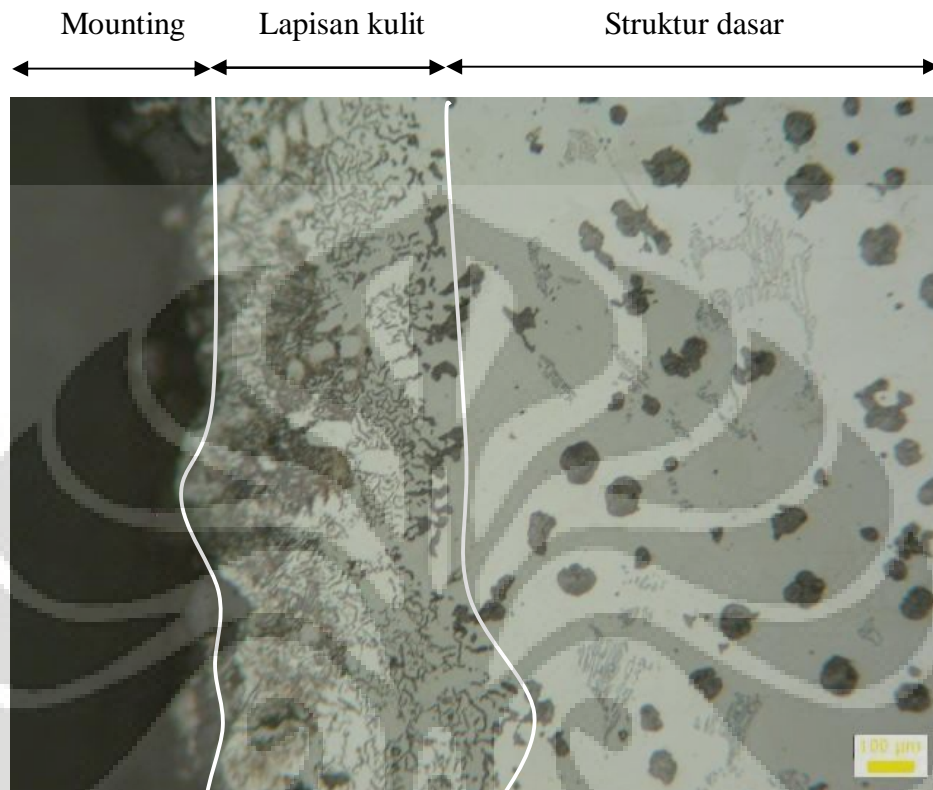
#### 4.3.5 *Skin effect*

Pada pengamatan struktur mikro juga terlihat terbentuknya lapisan kulit yang dikenal sebagai anomali *skin effect*. Lapisan kulit ini terbentuk secara merata pada plat 1 mm P1 dan P6 tetapi tidak pada P5. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.16, ditemukan bahwa lapisan kulit tersebut sebenarnya adalah grafit yang berbentuk serpihan dengan matriks yang bervariasi. Pada P1 dan P6, setelah efek kulit, tampak grafit berbentuk serpih dan semakin ke tengah yang tampak adalah daerah transisi dimana terdapat pencampuran antara grafit serpih dan nodul. Penyebab terbentuknya lapisan kulit ini belum dapat dipastikan tetapi kemungkinan disebabkan oleh adanya oksidasi Mg, terikatnya Mg dengan S, kecepatan pengisian yang terlalu lama, kecepatan pendinginan yang terlalu cepat, dan proses *liquid treatment* yang tidak sempurna.

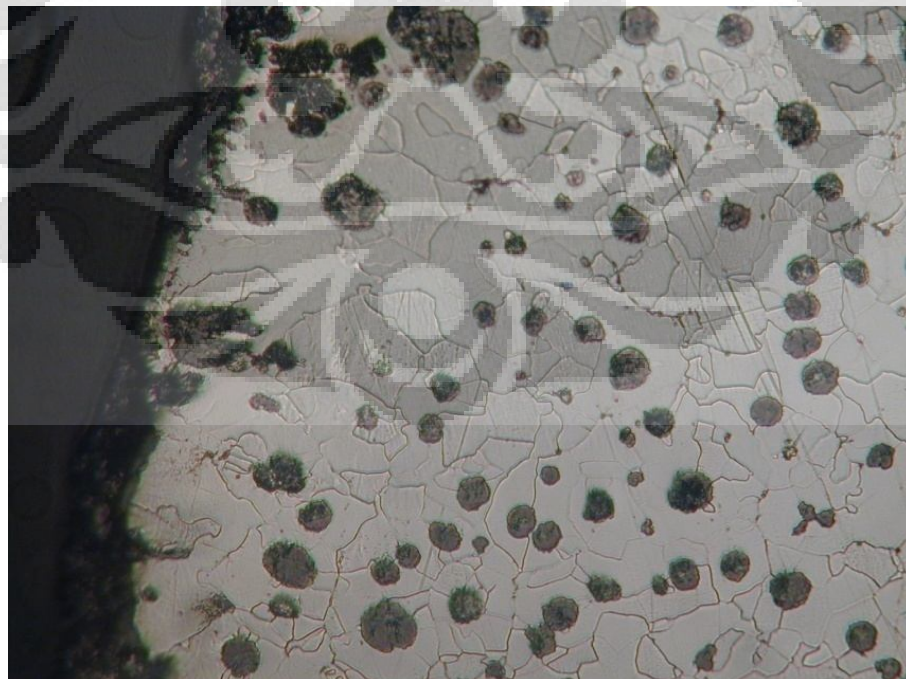
Adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan tengah kemungkinan merupakan penyebab terjadinya perbedaan bentuk grafit di tengah dan tepi plat, dimana bagian tepi positif mengalami segregasi mikro Mg. Kandungan Mg yang lebih rendah pada daerah tepi merupakan hasil oksidasi Mg oleh gas dari cetakan. Sulfur berikatan dengan Mg menyebabkan *liquid treatment* tidak berjalan dengan baik sehingga terbentuk grafit serpih pada tepi plat. Sulfur dapat berasal dari furan, sehingga bereaksi dengan magnesium logam cair hanya pada bagian tepinya saja. Kadar sulfur yang berlebih pada logam cair juga



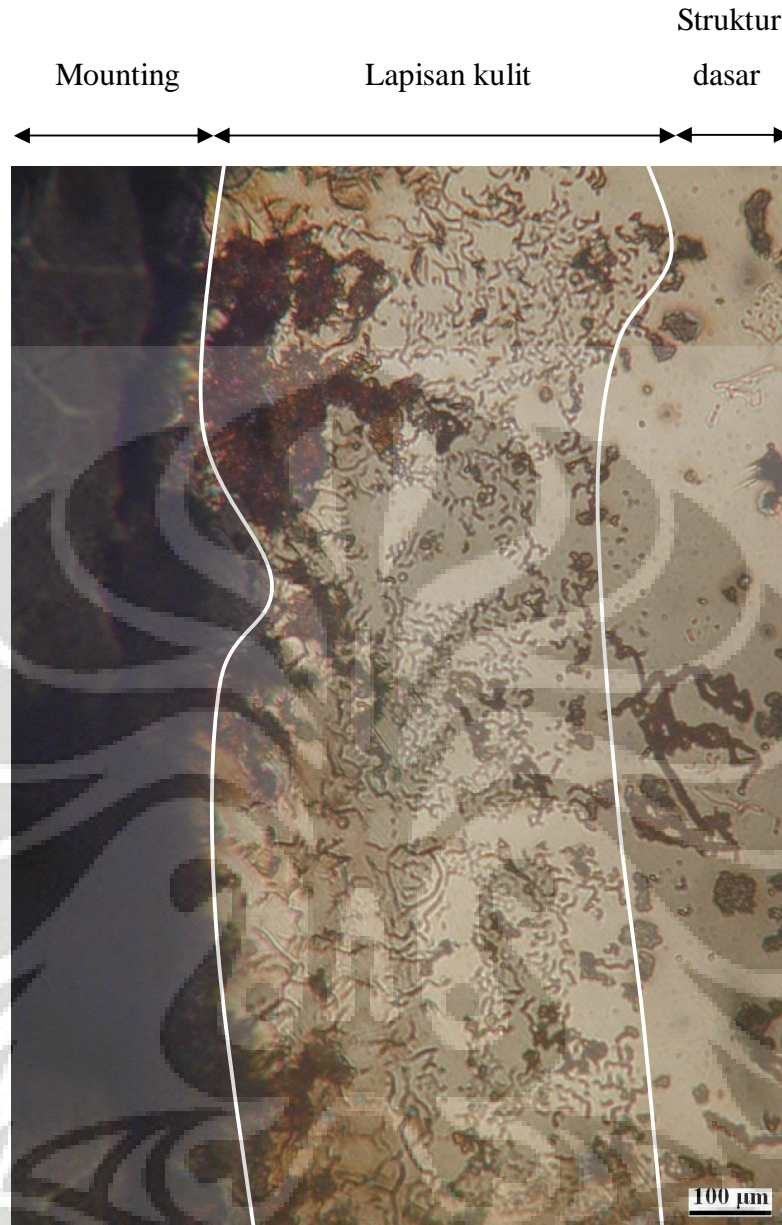
merupakan faktor terbentuknya *skin effect*. Keberadaan *skin effect* dapat menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih berpotensi menjadi pusat tegangan dan dapat berperan sebagai daerah inisiasi retak.



Gambar 4.14 Struktur mikro tepi P1



Gambar 4.15 Struktur mikro tepi P5



Gambar 4.16 Struktur mikro tepi P6

Pengukuran ketebalan *skin effect* yang terbentuk pada plat dilakukan dengan mengukurnya pada 9 titik sepanjang permukaan sampel tepi. Hasil pengukuran, dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Pengukuran *skin effect* plat 1 mm

n ke	P1		P6	
	Tepi (mm)	Tengah (mm)	Tepi (mm)	Tengah (mm)
1	0,09	0,04	0,12	0,07
2	0,08	0,02	0,11	0,06
3	0,06	0,02	0,08	0,04
4	0,07	0,02	0,09	0,04
5	0,08	0,01	0,09	0,03
6	0,06	0,01	0,11	0,05
7	0,07	0,02	0,11	0,04
8	0,06	0,02	0,1	0,05
9	0,08	0,02	0,1	0,07
Mean	0,07	0,02	0,1	0,05

Dari data hasil perhitungan pada Tabel 4.5, terlihat bahwa terdapat perbedaan nilai ketebalan *skin effect* yang amat besar antara sampel P1 tepi dan tengah. Pada tepi plat 1 mm ketebalan *skin effect*-nya jauh lebih besar dari bagian tengahnya. Ketebalan *skin effect* pada P1 bagian tepi lebih besar jika dibandingkan dengan P6 sedangkan pada bagian tengah lebih kecil, tidak terdapat suatu kecenderungan dengan CE. Secara umum, keberadaan *skin effect* pada hasil penelitian ini berada kurang dari 0,2 mm sehingga dapat ditolelir dalam pengecoran besi tuang nodular dinding tipis dan dapat diatas dengan *machining*.

Hubungan antara nilai CE dengan ketebalan *skin effect* dapat dibangun apabila pada P5 yang memiliki nilai CE hampir mendekati P1 juga terbentuk *skin effect*. Namun pada P5 tidak terbentuk *skin effect* seperti pada P1 dan P6. Melihat kondisi ini maka kemungkinan *skin effect* terbentuk akibat kecepatan pendinginan karena temperatur tuang dari P5 paling rendah diantara ketiga sampel.

#### 4.4 PENGUJIAN MEKANIS

Pengujian mekanis dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan dan kekuatan tarik dari plat 1 mm hasil pengecoran.

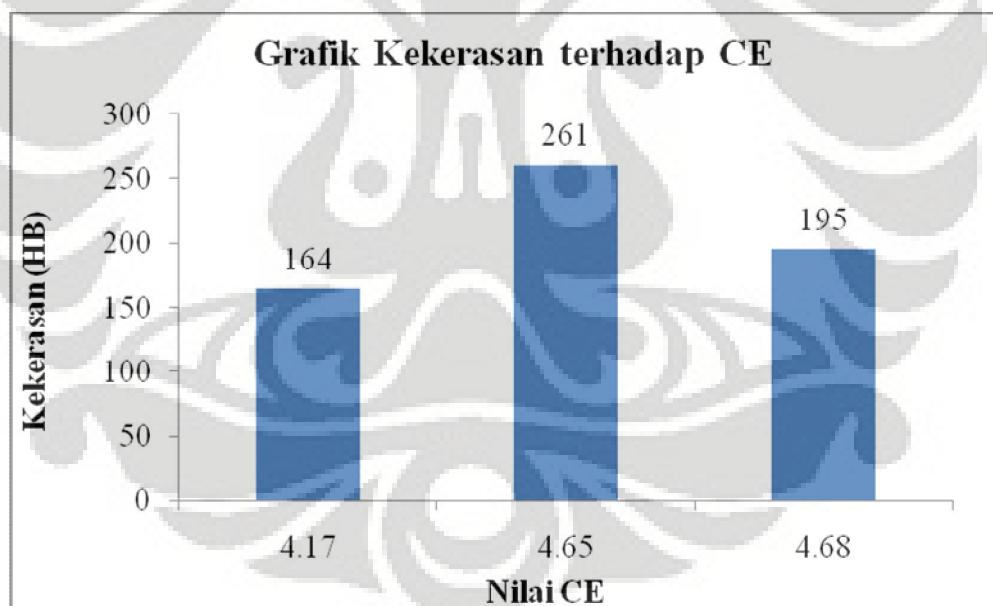
##### 4.4.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell. Diameter penjeakan yang diperoleh dari pengujian kemudian diolah dengan menggunakan rumus (3.1) sehingga diperoleh data pengujian, seperti pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Data Kekerasan Brinell

Sampel	CE	1	2	3	4	5	6	7	Kekerasan (HB) Rata-rata
P1	4,68	153	201	302	290	240	299	342	261
P5	4,65	163	187	218	226	197	192	184	195
P6	4,17	221	199	119	127	126	159	199	164

Hasil rata-rata pengujian pada beberapa titik kemudian di plot ke dalam grafik CE terhadap nilai kekerasan seperti pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17. Grafik hubungan kekerasan terhadap nilai CE

Dari hasil penelitian untuk plat 1 mm, diperoleh nilai kekerasan berturut-turut pada P1 261,15 HB, P5 sebesar 195,14 HB, dan untuk P6 diperoleh kekerasan 164,26 HB. Berdasarkan standar ASTM, kekerasan yang mampu dicapai besi tuang nodular adalah 143-187 HB. Jika merujuk pada standar maka hanya plat 1 mm P6 yang memiliki nilai kekerasan yang sesuai. Dari Gambar



4.17, secara umum kecenderungan yang terlihat adalah terjadi peningkatan kekerasan seiring dengan meningkatnya nilai CE, namun pada P1 nilai kekerasan melonjak tajam. Hal ini dapat dijelaskan dari hasil pengamatan struktur mikro, dimana terbentuk banyak karbida yang tersebar secara merata pada plat 1 mm P1.

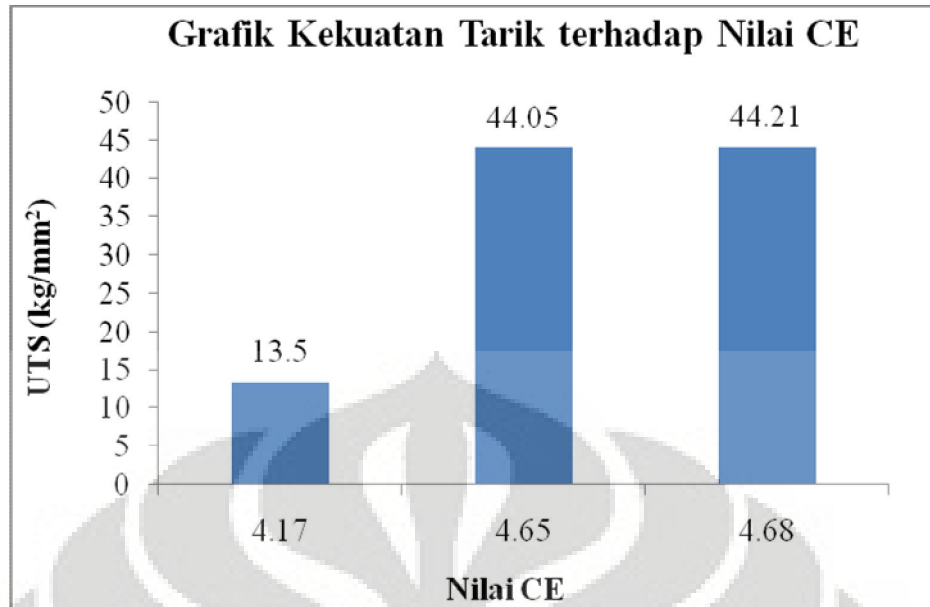
#### 4.4.2 Pengujian Tarik

Hasil yang didapat dari pengujian tarik berupa nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan elongasi seperti yang terlihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7. Nilai UTS dan elongasi plat 1 mm

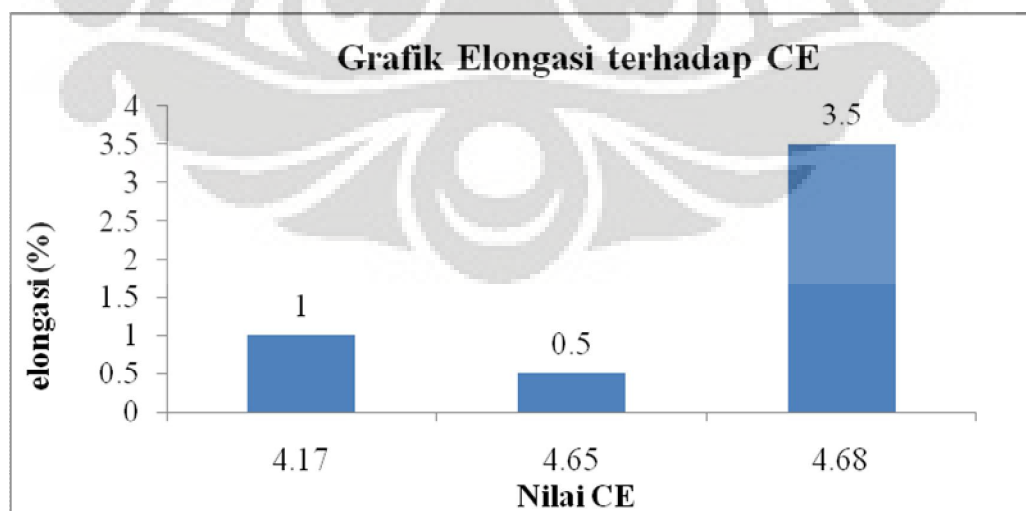
Penuangan	CE	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongasi (%)
P1	4,65	44,05	0,5
P5	4,68	44,21	3,5
P6	4,17	13,50	1

Nilai kekuatan tarik besi tuang nodular dengan matriks ferit berdasarkan ASTM adalah 42,23 kg/mm<sup>2</sup>. Dari Tabel 4.7, maka terlihat bahwa nilai kekuatan tarik plat 1 mm P1 dan P5 telah memenuhi standar, sedangkan P6 berada di bawah standar. Nilai kekuatan tarik P6 yang jauh di bawah standar bisa dijelaskan dari struktur mikronya, plat 1 mm P6 memiliki nodularitas yang sangat rendah. Nodularitas memiliki pengaruh yang signifikan pada kekuatan tarik dan elongasi. Dimana penambahan nodularitas akan meningkatkan nilai kekuatan tarik besi tuang.



Gambar 4.18. Grafik hubungan kekuatan tarik terhadap nilai CE

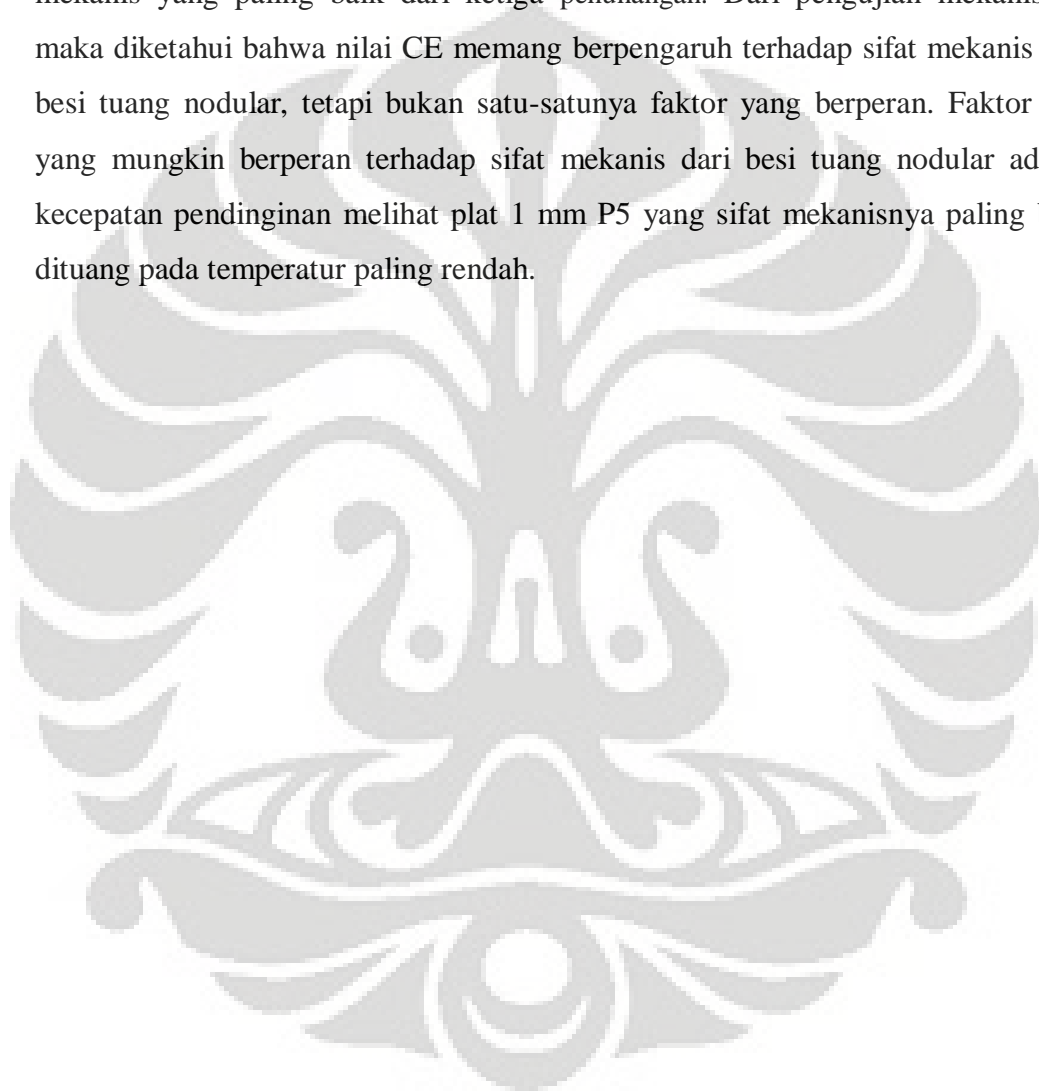
Secara umum, penelitian ini sesuai dengan literatur<sup>[11]</sup> dimana dengan semakin tinggi nilai CE, kekuatan tarik yang diperoleh juga akan semakin tinggi, seperti terlihat pada Gambar 4.18. Hal ini disebabkan karena sifat tarik pada besi tuang nodular ditentukan oleh struktur grafitnya. Dengan semakin banyaknya grafit nodul yang terbentuk maka nilai kekuatan tarik yang dihasilkan akan semakin tinggi. Semakin banyaknya grafit nodul yang terbentuk pada besi tuang nodular dapat diindikasikan dengan semakin tingginya nilai nodularitas. Jadi, dengan meningkatnya nilai CE, nodularitas meningkat dan kekuatan tarik juga akan meningkat.



Gambar 4.19. Grafik hubungan Elongasi terhadap nilai CE



Menurut JIS G 5502-1995, elongasi besi tuang nodular seharusnya bisa mencapai 10%, namun dari sampel hasil penelitian tidak satu pun yang memenuhi standar. Pada Gambar 4.19. terlihat adanya anomali pada plat dengan nilai CE 4,66 atau plat P5. Anomali ini dapat dijelaskan dari pengamatan struktur mikro. Pada P5 diperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida maupun *skin effect* sehingga keuletannya akan meningkat. Secara umum, plat 1 mm P5 memiliki sifat mekanis yang paling baik dari ketiga penunangan. Dari pengujian mekanis ini maka diketahui bahwa nilai CE memang berpengaruh terhadap sifat mekanis dari besi tuang nodular, tetapi bukan satu-satunya faktor yang berperan. Faktor lain yang mungkin berperan terhadap sifat mekanis dari besi tuang nodular adalah kecepatan pendinginan melihat plat 1 mm P5 yang sifat mekanisnya paling baik dituang pada temperatur paling rendah.



## BAB 5

### KESIMPULAN

- Nilai CE yang diperoleh dari penuangan P1, P5, dan P6 berturut-turut adalah 4,65%, 4,68%, dan 4,17%.
- Semakin tinggi nilai CE, nodularitas pada plat 1 mm semakin tinggi. Nodularitas yang diperoleh berturut-turut untuk P1, P5, dan P6 adalah 67,07%, 85,39%, dan 35,92%.
- Jumlah nodul dan diameter nodul tidak memiliki kecenderungan tertentu terhadap nilai CE. Jumlah nodul yang diperoleh berturut-turut untuk P1, P5, dan P6 adalah 82,25 nodul/mm<sup>2</sup>, 85,39 nodul/mm<sup>2</sup>, dan 35,92 nodul/mm<sup>2</sup> dan diameter nodul yang diperoleh berturut-turut untuk P1, P5, dan P6 adalah 13,34  $\mu$ , 11,26  $\mu$ , dan 12,71  $\mu$ .
- Terbentuk karbida dan *skin effect* pada P1 dan P6 tetapi tidak terbentuk pada P5. Secara independen nilai CE tidak berpengaruh terhadap pembentukan karbida.
- Cenderung terjadi peningkatan kekerasan seiring dengan meningkatnya nilai CE, namun pada P1 nilai kekerasan melonjak tajam karena terbentuk karbida secara merata pada struktur mikronya. Nilai kekerasan yang diperoleh dari penelitian untuk P1, P5, dan P6 berturut-turut 261,15 HB, 195,14 HB, dan 164,26 HB.
- Dengan meningkatnya nilai CE, nodularitas meningkat dan kekuatan tarik juga akan meningkat. Nilai kekuatan tarik yang diperoleh dari penelitian untuk P1, P5, dan P6 berturut-turut adalah 44,05 kg/mm<sup>2</sup>, 44,21 kg/mm<sup>2</sup>, dan 13,50 kg/mm<sup>2</sup>.
- Tidak terlihat kecenderungan elongasi terhadap CE. Nilai elongasi yang diperoleh dari penelitian untuk P1, P5, dan P6 berturut-turut adalah 0,5 %, 3,5 %, dan 1 %.
- Secara umum, plat 1 mm P5 memiliki sifat mekanis yang paling baik dari ketiga penunangan.
- Nilai CE berpengaruh terhadap nodularitas dan kekuatan tarik besi tuang nodular dinding tipis.

## DAFTAR REFERENSI

- [1] [www.steelinc.com.au](http://www.steelinc.com.au), down load 14/11/2009
- [2] Keough, J. R., dkk. (2000) *Carbide Austempered Ductile Iron*. Pada DIS Meeting. USA: DIS.
- [3] Martinez, R. A., dkk. (2002) *Application of ADI in high strength thin wall automotive parts*. Pada 2002 World Conference on ADI
- [4] Sulamet-Ariobimo, R. D. (2003) *Austempered Ductile Iron Production Technology from Based Material Produced by Ferro-Casting Industry in Indonesia*, Faculty of Engineering and Physical System. Rockhampton, Australia: Central Queensland University.
- [5] Caldera, M., dkk. (2007) *Influence of nodule count on fatigue properties of ferritic thin wall ductile iron*. *Materials Science and Engineering*. 23(8): p. 1000- 1004.
- [6] Ruxanda, F. E., dkk. (2001) *Microstructure characterization of ductile thin wall iron casting*. *AFS Transaction*. 02(177).
- [7] Stefanescu, D.M., dkk. (2002) *Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron*. *AFS Transactions*.
- [8] Massone, D. P., dkk. (2004) *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron –Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. Vol. 44(7): p.1180-1187. *ISIJ Int*.
- [9] Hayrynen, K. L., dkk. (2002) *The Production of Austempered Ductile Iron (ADI)*. Pada 2002 World Conference on ADI.
- [10] Callister Jr., William D. (2003) *Materials Science and Engineering an Introduction*. 6th Edition. New York: John Willey and Sons, Inc.
- [11] ASM International. (1990) *ASM Handbook Volume 15: Casting*. Ohio: Materials Park.
- [12] Ductile Iron Society. *A Design Engineer's Digest of Ductile Iron*. 9th Edition. <http://www.ductile.org> wn load 15/11/2009
- [13] Mourad, Mohamed M. (2008) *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron* 68th WFC, 7th-10th February.
- [14] Industrial Metal Casting. *Gating design analysis*.

<http://industrialmetalcasting.com> download 11/11/2009

- [15] ASM (1996) *Cast Iron, ASM Specialty Handbook*, Metals Park, Ohio, USA: American Society for Metals.
- [16] Stefanescu, D. M., *Modeling of Cast Iron Solidification – The Defining Moments*. Metallurgical and Materials Transaction. 30B: p. 927-932, 2007
- [17] Aufderheiden, dkk. (2005) *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*. AFS.
- [18] Dix, L. P., dkk. (2003) *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction.
- [19] Web definisi CE
- [20] Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. ISIJ Int., 2004. Vol. 44(7): p. 1180-1187
- [21] Javaid, A., dkk. (2000) *Mechanical Properties in Thin Wall Ductile Iron Casting*. Modern Casting. 90(6): p. 39-41.
- [22] Labreque, dkk, (2000) *Development of Carbide Free Thin Wall Ductile Iron Casting*, AFS Transaction. Vol. 108: p. 31-38.
- [23] Mourad, M. M., dkk. (2008) *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron*. Pada 68th World Foundry Congress, Chennai, India: WFO.
- [24] Sulamet-Ariobimo, R. D. (2009) *Pengecoran Dinding Tipis (Thin Wall) Austempered Ductile Iron: Analisa Dan Pemilihan Desain Pengecoran Thin Wall Ductile Iron Sebagai Bahan Baku Thin Wall Austempered Ductile Iron*, Depok: Universitas Indonesia
- [25] Laboratorium PT. Geteka Founindo, Pulo Gadung, Jakarta Timur

Data Pengujian Kekerasan P1

Perhitungan dia bola Brinell = 3.2 mm waktu 15 detik  
 Brinell  
 P = 187.5 kg

Kode	sampel	x	y	d	HB	HB Rata2
5mm	1	1.185	1.218	1.2015	159.4038	154.549
	2	1.168	1.265	1.2165	155.3426	
	3	1.215	1.346	1.2805	139.5852	
	4	1.222	1.215	1.2185	154.8124	
	5	1.199	1.191	1.195	161.2112	
	6	1.254	1.171	1.2125	156.4109	
	7	1.196	1.239	1.2175	155.0772	
4mm	1	1.195	1.193	1.194	161.4919	154.2317
	2	1.216	1.21	1.213	156.2768	
	3	1.238	1.228	1.233	151.045	
	4	1.228	1.234	1.231	151.5568	
	5	1.214	1.22	1.217	155.2098	
	6	1.258	1.187	1.2225	153.7598	
	7	1.243	1.229	1.236	150.282	
3mm	1	1.112	1.1	1.106	189.2468	164.6999
	2	1.242	1.217	1.2295	151.9422	
	3	1.209	1.22	1.2145	155.8754	
	4	1.208	1.156	1.182	164.9157	
	5	1.234	1.174	1.204	158.7164	
	6	1.224	1.147	1.1855	163.9064	
	7	1.241	1.1	1.1705	168.296	
2mm	1	1.229	1.168	1.1985	160.2343	149.8731
	2	1.228	1.216	1.222	153.8908	
	3	1.169	1.06	1.1145	186.2767	
	4	1.293	1.285	1.289	137.6666	
	5	1.377	1.318	1.3475	125.4292	
	6	1.373	1.303	1.338	127.3082	
	7	1.136	1.275	1.2055	158.306	
1mm	1	1.222	1.23	1.226	152.8471	261.1508
	2	1.089	1.057	1.073	201.4537	
	3	0.916	0.845	0.8805	302.1405	
	4	0.903	0.895	0.899	289.586	
	5	1.015	0.955	0.985	240.2071	
	6	0.903	0.866	0.8845	299.3592	
	7	0.841	0.815	0.828	342.4618	

Data Pengujian Kekerasan P5

Perhitungan

Brinell

D

P = 187.5 kg

dia bola Brinell = 3.2 mm

waktu 15 detik

Kode	sampel	x	y	d	HB	HB Rata2
D1	1	1.191	1.186	1.1885	163.0483	195.1412
	2	1.127	1.1	1.1135	186.6226	
	3	1.03	1.036	1.033	217.8448	
	4	1.017	1.014	1.0155	225.6316	
	5	1.07	1.1	1.085	196.886	
	6	1.12	1.079	1.0995	191.5647	
	7	1.105	1.135	1.12	184.3907	
D2	1	1.247	1.205	1.226	152.8471	164.4345
	2	1.187	1.168	1.1775	166.2267	
	3	1.169	1.15	1.1595	171.6237	
	4	1.167	1.168	1.1675	169.1942	
	5	1.184	1.156	1.17	168.4452	
	6	1.206	1.18	1.193	161.7733	
	7	1.216	1.176	1.196	160.9312	
D3	1	1.216	1.198	1.207	157.8971	164.6821
	2	1.184	1.173	1.1785	165.934	
	3	1.172	1.178	1.175	166.9615	
	4	1.173	1.165	1.169	168.7443	
	5	1.187	1.169	1.178	166.0803	
	6	1.184	1.171	1.1775	166.2267	
	7	1.193	1.199	1.196	160.9312	
D4	1	1.145	1.152	1.1485	175.0473	171.4151
	2	1.152	1.144	1.148	175.2053	
	3	1.165	1.193	1.179	165.788	
	4	1.165	1.153	1.159	171.7772	
	5	1.165	1.181	1.173	167.5527	
	6	1.161	1.171	1.166	169.646	
	7	1.157	1.141	1.149	174.8895	
D5	1	1.257	1.192	1.2245	153.2373	156.49
	2	1.224	1.201	1.2125	156.4109	
	3	1.207	1.186	1.1965	160.7915	
	4	1.215	1.221	1.218	154.9447	
	5	1.218	1.21	1.214	156.0091	
	6	1.221	1.204	1.2125	156.4109	
	7	1.23	1.186	1.208	157.6254	



Data Pengujian Kekerasan P6

Perhitungan

Brinell

P6-A

P = 187.5 kg

dia bola Brinell = 3.2 mm

waktu 15 detik

Kode	sampel	x	y	d	HB	HB Rata2
A1	1	1.006	1.044	1.025	221.355	164.2623
	2	1.069	1.091	1.08	198.7707	
	3	1.38	1.384	1.382	118.9271	
	4	1.34	1.338	1.339	127.1085	
	5	1.359	1.333	1.346	125.7233	
	6	1.207	1.199	1.203	158.9908	
	7	1.089	1.07	1.0795	198.9607	
A2	1	0.947	1.006	0.9765	244.5143	210.342
	2	0.976	0.975	0.9755	245.0284	
	3	1.112	1.106	1.109	188.1908	
	4	1.136	0.984	1.06	206.578	
	5	1.096	1.073	1.0845	197.0733	
	6	1.184	1.114	1.149	174.8895	
	7	1.065	1.009	1.037	216.12	
A3	1	0.858	0.872	0.865	313.2849	217.1737
	2	1.007	1.009	1.008	229.0935	
	3	1.062	1.018	1.04	214.8394	
	4	1.059	1.044	1.0515	210.0316	
	5	1.111	1.142	1.1265	182.1973	
	6	1.12	1.176	1.179	165.788	
	7	1.072	1.056	1.064	204.9813	
A4	1	1.058	1.115	1.0865	196.3256	194.3425
	2	1.13	1.11	1.12	184.3907	
	3	1.139	1.148	1.1435	176.6362	
	4	1.208	1.137	1.1725	167.701	
	5	1.122	1.1	1.111	187.4915	
	6	1.039	1.046	1.0425	213.7807	
	7	0.999	0.996	0.9975	234.0719	
A5	1	0.918	0.895	0.9065	284.7139	261.8735
	2	0.954	0.997	0.9755	245.0284	
	3	1.015	0.984	0.9995	233.1115	
	4	0.998	1.047	1.0225	222.4689	
	5	1.023	1.037	1.03	219.1515	
	6	0.913	0.833	0.873	307.4589	
	7	0.833	0.876	0.8545	321.1811	