



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH PELETAKAN PLAT TIPIS SETELAH *INGATE*  
PADA PENGECORAN DINDING TIPIS BESI TUANG  
NODULAR**

**SKRIPSI**

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

**GARDA MUHAMMAD ICHSAN**

**0405040287**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2009**

## **HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : Garda Muhammad Ichsan**

**NPM : 0405040287**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 26 Juni 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Garda Muhammad Ichsan  
NPM : 0405040287  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Peletakan Plat Tipis setelah *Ingate* pada  
Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

**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 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara M.Si (.....)

Penguji 2 : Dwi Marta Nurjaya S.T., M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 1 Juli 2009

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji serta syukur saya panjatkan bagi Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat 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 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 moril 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) Saudara Aliq Qurbani dan Taufiqurrahman, selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam melakukan penelitian.
- 5) Sahabat serta seluruh pihak yang telah banyak membantu saya dalam melakukan penelitian.

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

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

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

---

---

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

Nama : Garda Muhammad Ichsan  
NPM : 0405040287  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Departemen : Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

demikian 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 Peletakan Plat Tipis setelah *Ingate* pada Pengecoran Dinding Tipis Besi  
Tuang Nodular

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 : 26 Juni 2009  
Yang menyatakan

(Garda Muhammad Ichsan)

## ABSTRAK

Nama : Garda Muhammad Ichsan  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Pengaruh Peletakan Plat Tipis setelah *Ingate* pada Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Pengecoran dinding tipis rentan akan terbentuknya karbida karena kecepatan pembekuan yang tinggi. Peletakan plat tipis pada *ingate* biasanya dihindari karena dapat menyebabkan pembekuan dini. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh peletakan plat tipis setelah *ingate* terhadap struktur mikro, yaitu karbida, *skin effect*, nodularitas dan jumlah nodul, dan pengaruh terhadap sifat mekanis besi tuang nodular, yaitu kekerasan dan kekuatan tarik, dan mengetahui ketebalan plat optimum yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan besi nodular austemper. Hasil penelitian menunjukkan cetakan dapat terisi sempurna. Pengamatan struktur mikro menunjukkan adanya karbida dan *skin effect* pada semua plat. Kekerasan cenderung menurun, dari (1-5) mm, yaitu 147,4 Hv, 139,9 Hv, 145,5 Hv, 133,9 Hv dan 139,4 Hv. *Tensile strength* cenderung menurun, dari (1-5) mm, yaitu 44 kg/mm<sup>2</sup>, 42,3 kg/mm<sup>2</sup>, 33 kg/mm<sup>2</sup>, 32,8 kg/mm<sup>2</sup> dan 39 kg/mm<sup>2</sup>. Ketebalan plat optimum yang berhasil dicapai adalah 2,1 mm, dengan jumlah nodul 1284,1 nodul/mm<sup>2</sup> dan nodularitas 82,25%.

Kata kunci :  
Pengecoran dinding tipis , besi tuang nodular

## ABSTRACT

Name : Garda Muhammad Ichsan  
Major : Metallurgical and Material Engineering  
Title : The Effect of Placing Thin Plate after Ingate on Thin Wall Ductile Iron Casting

Thin wall casting is susceptible of carbide forming because of high solidification rate. Placing thin wall after ingate usually avoided because can cause premature solidification. This research has purpose to know effect of placing thin wall after ingate on microstructure, which are carbide, skin effect, nodularity and nodule count, and effect on mechanical properties of ductile iron, which are hardness and tensile strength, and to know optimum plate thickness which can be used as material for making austempered ductile iron. The result of research shows mould can filled perfectly. Microstructure observation shows there are carbide and skin effect on all plate. Hardness disposed decrease, from (1-5) mm, 147.4 Hv, 139.9 Hv, 145.5 Hv, 133.9 Hv and 139.4 Hv. Tensile strength disposed decrease ,from (1-5) mm, 44 kg/mm<sup>2</sup>, 42.3 kg/mm<sup>2</sup>, 33 kg/mm<sup>2</sup>, 32.8 kg/mm<sup>2</sup> dan 39 kg/mm<sup>2</sup>. Optimum plate thickness which sucesfully reached is 2,1 mm with nodule count 1284.1 nodul/mm<sup>2</sup> and nodularity 82.25%.

Key word :  
Thin wall casting, ductile iron

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR RUMUS</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>1. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
<b>2. DASAR TEORI</b> .....	4
2.1 Besi Tuang .....	4
2.2 Besi Tuang Nodular (BTN) .....	5
2.2.1 Struktur Mikro Besi Tuang Nodular .....	5
2.2.2 <i>Liquid Treatment</i> .....	7
2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular.....	9
2.2.4 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular.....	13
2.2.5 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul.....	15
2.3 Desain Saluran Tuang ( <i>Gating System</i> ) .....	16
2.3.1 Fenomena Pengisian Cetakan .....	16
2.3.2 Sistem Saluran Tuang .....	20
2.3.2.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang .....	20
2.3.2.2 Komponen Sistem Saluran Tuang .....	21
2.4 Pengecoran Dinding Tipis .....	22
2.4.1 Karbida .....	22
2.4.2 Lapisan Efek Kulit ( <i>Skin Effect</i> ) .....	24
2.5 Besi Nodular Austemper ( <i>Austempered Ductile Iron</i> ) .....	24
<b>3. METODOLOGI</b> .....	26
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 Pembuatan Desain Pengecoran .....	29
3.3.2 Pembuatan Pola .....	31

3.3.3 Pembuatan Cetakan .....	32
3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan <i>Liquid Treatment</i> .....	33
3.3.4.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC) .....	33
3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD) .....	34
3.3.5 Pengecoran .....	35
3.3.6 Preparasi Sampel .....	35
3.3.7 Pengujian .....	38
3.3.7.1 Pengamatan Struktur Mikro .....	38
3.3.7.2 Pengujian kekerasan .....	39
3.3.7.3 Pengujian Tarik .....	40
3.3.7.4 Simulasi <i>Software</i> .....	40
<b>4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>41</b>
4.1 Komposisi Kimia .....	41
4.1.1 Persentase Elemen pada Logam Cair .....	41
4.1.2 <i>Carbon Equivalent</i> (CE) .....	42
4.2 Pengamatan Visual .....	42
4.3 Simulasi <i>Software</i> .....	45
4.4 Pengamatan Struktur Mikro .....	47
4.4.2 Karbida .....	47
4.4.2 <i>Skin effect</i> .....	50
4.4.3 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul .....	55
4.5 Pengujian .....	58
4.5.1 Pengujian Kekerasan .....	58
4.5.2 Pengujian Tarik .....	60
<b>5. KESIMPULAN.....</b>	<b>63</b>
<b>6. DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>66</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular	6
<b>Tabel 2.2</b>	Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995	12
<b>Tabel 2.3</b>	Standar ASTM A 897-90 dan A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI	25
<b>Tabel 3.1</b>	Bahan baku logam cair	28
<b>Tabel 4.1</b>	Komposisi kimia logam cair	41
<b>Tabel 4.2</b>	Kadar CE logam cair	42
<b>Tabel 4.3</b>	Tebal aktual benda hasil pengecoran	44
<b>Tabel 4.4</b>	Pengukuran <i>skin effect</i> T1A1	53
<b>Tabel 4.5</b>	Pengukuran <i>skin effect</i> T1A2	54
<b>Tabel 4.6</b>	Nodularitas dan jumlah nodul pada posisi A1 (pinggir) dan A2 (tengah)	57
<b>Tabel 4.7</b>	Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata	57
<b>Tabel 4.8</b>	Kekerasan Vickers sample T1A1	58
<b>Tabel 4.9</b>	Nilai UTS dan elongasi hasil pengujian tarik	60

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b>	Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material	1
<b>Gambar 2.1</b>	Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada <i>ferritic ductile iron</i>	9
<b>Gambar 2.2</b>	Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular	10
<b>Gambar 2.3</b>	Pengaruh bentuk grafit pada kurva <i>stress-strain</i> beberapa besi cor	10
<b>Gambar 2.4</b>	Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247	11
<b>Gambar 2.5</b>	Elemen utama sistem saluran tuang	21
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian	26
<b>Gambar 3.2</b>	Desain pengecoran Stefanescu	30
<b>Gambar 3.3</b>	Desain pengecoran penelitian	31
<b>Gambar 3.4</b>	Pola pada <i>base plate</i>	32
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Pattern plate</i> siap digunakan untuk membuat cetakan	32
<b>Gambar 3.6</b>	Proses <i>merger</i> dari pasangan cetakan	33
<b>Gambar 3.7</b>	Pengambilan sampel uji dari plat	36
<b>Gambar 3.8</b>	Sampel hasil <i>mounting</i>	36
<b>Gambar 3.9</b>	Mikroskop optik digital	38
<b>Gambar 3.10</b>	Pengukuran <i>skin effect</i>	39
<b>Gambar 3.11</b>	<i>Microhardness tester</i> Vickers	39
<b>Gambar 3.12</b>	Bentuk jejak metode Vickers	40
<b>Gambar 4.1</b>	Benda dan saluran tuang hasil pengecoran	43
<b>Gambar 4.2</b>	Benda setelah dilakukan proses <i>machining</i>	44
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Flow result</i>	45
<b>Gambar 4.4</b>	<i>Solidification result</i>	46
<b>Gambar 4.5</b>	Struktur mikro plat 1 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit	47
<b>Gambar 4.6</b>	Struktur mikro plat 2 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit	48
<b>Gambar 4.7</b>	Struktur mikro plat 3 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit	48
<b>Gambar 4.8</b>	Struktur mikro plat 4 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit	49
<b>Gambar 4.9</b>	Struktur mikro plat 5 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit	49
<b>Gambar 4.10</b>	<i>Skin effect</i> pada permukaan plat 1 mm	50
<b>Gambar 4.11</b>	<i>Skin effect</i> pada permukaan plat 2 mm	51
<b>Gambar 4.12</b>	<i>Skin effect</i> pada permukaan plat 3 mm	51
<b>Gambar 4.13</b>	<i>Skin effect</i> pada permukaan plat 4 mm	52
<b>Gambar 4.14</b>	<i>Skin effect</i> pada permukaan plat 5 mm	52
<b>Gambar 4.15</b>	Grafik <i>skin effect</i> T1A1	53
<b>Gambar 4.16</b>	Grafik <i>skin effect</i> T1A2	54
<b>Gambar 4.17</b>	(a) Struktur mikro T1A1 1mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 1mm, perbesaran 100x	55
<b>Gambar 4.18</b>	(a) Struktur mikro T1A1 2mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 2mm, perbesaran 100x	56

<b>Gambar 4.19</b>	(a) Struktur mikro T1A1 3mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 3mm, perbesaran 100x	56
<b>Gambar 4.20</b>	(a) Struktur mikro T1A1 4mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 4mm, perbesaran 100x	56
<b>Gambar 4.21</b>	(a) Struktur mikro T1A1 5mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 5mm, perbesaran 100x	57
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik ketebalan versus kekerasan	59
<b>Gambar 4.23</b>	Grafik ketebalan versus UTS	60
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik ketebalan versus elongasi	61



## DAFTAR RUMUS

(2.1)	Rumus Mg efektif	8
(2.2)	Rumus Nodularitas JIS G5502	16
(2.3)	Rumus Nodularitas <i>image analysis</i>	16
(2.4)	Rumus <i>Carbon Equivalent</i>	23
(3.1)	Rumus diagonal rata-rata jejak Vickers	40
(3.2)	Rumus kekerasan Vickers	40



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Dimensi saluran tuang	68
Lampiran 2	Data pengujian struktur mikro dari Iwate University, Jepang	69

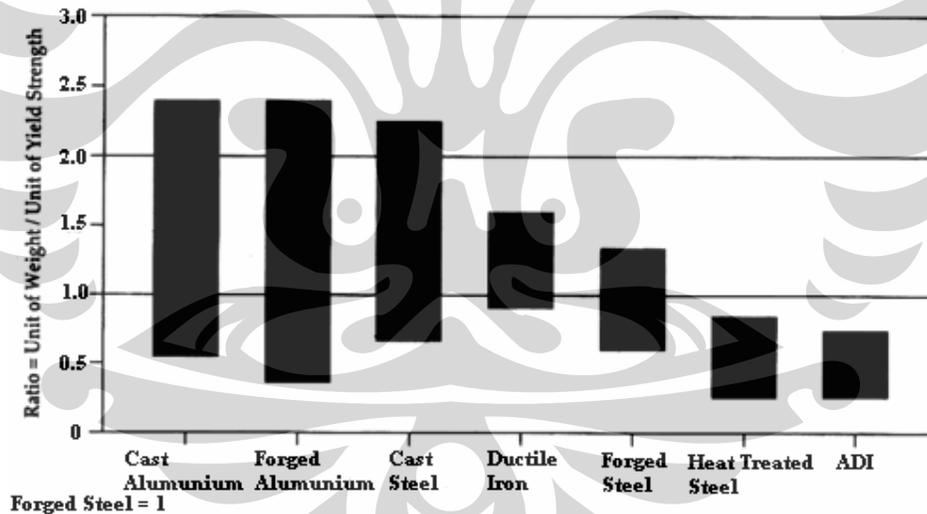


## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Dorongan untuk mereduksi berat komponen otomotif, berkaitan dengan isu dunia tentang penghematan energi<sup>[1][2]</sup>, menyebabkan penggantian komponen otomotif dengan material aluminium yang lebih ringan. Hal ini memberikan pukulan pada industri besi tuang nodular.

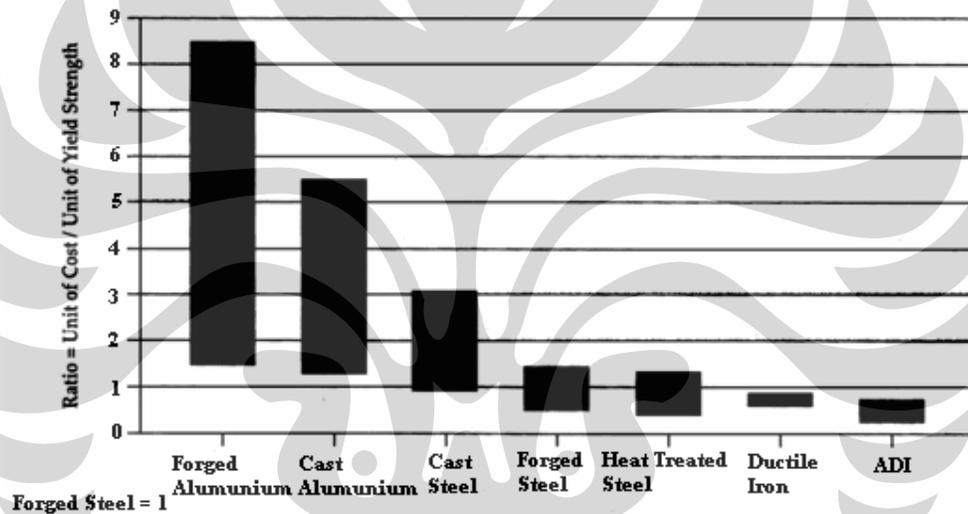
Jika besi tuang nodular dapat diproduksi dengan berat yang sama dengan aluminium, maka besi tuang akan memiliki *yield strength* yang sama bahkan melebihi aluminium seperti terlihat pada gambar 1.1. Dikembangkannya teknologi pembuatan besi tuang nodular dinding tipis (*thin wall ductile iron-TWDI*) menjadikan besi tuang nodular dapat bersaing dengan aluminium untuk masalah berat, walaupun besi tuang nodular tidak tergolong material ringan.



Gambar 1.1 *Relative weight per unit of yield strength*<sup>[3]</sup>

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

Penggunaan besi nodular austemper sebagai material alternatif di dunia semakin meningkat dari tahun ke tahun dan diperkirakan akan mencapai 300.000 ton per tahun pada Tahun 2020<sup>[4]</sup>. Peningkatan ini disebabkan selain karena sifat-sifatnya yang unggul jika dibandingkan dengan besi tuang lainnya dan secara kompetitif terhadap baja dan alumunium, juga karena proses produksi besi nodular austemper sangat ekonomis, lihat gambar 1.2. Konsumsi energi yang digunakan untuk memproduksi 1 ton besi nodular austemper adalah 3100 kWh, sedangkan untuk memproduksi baja tempa adalah 5800 kWh-6200 kWh. besi nodular austemper dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi alumunium<sup>[3]</sup>.



Gambar 1.2 Relative cost per unit of yield strength<sup>[3]</sup>

## 1.2 PERUMUSAN MASALAH

Penelitian pengecoran dinding tipis Stefanescu menyusun plat berturut-turut dari ingate 6, 2,5 dan 3,5 mm untuk menghindari terjadinya pembekuan dini pada plat tipis<sup>[1]</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.

Masalah lain yang mungkin timbul adalah terbentuknya struktur karbida dan *skin effect* yang mempengaruhi sifat mekanis benda. Keberadaan struktur karbida ini berkaitan erat dengan kecepatan pendinginan yang tinggi sebagai akibat tipisnya benda. Sementara *skin effect* dipengaruhi oleh komposisi kimia.

Sebagai bahan baku pembuatan ADI maka bentuk (*nodularity*) dan jumlah nodul (*nodule count*) dari grafit menjadi perhatian penting. Bentuk dan jumlah nodul ini dapat menjadi masalah karena proses nodularisasi mempunyai temperatur dan waktu efektif tertentu. Sementara untuk memperoleh benda cor yang tipis biasanya temperatur penuangan (*pouring*) dinaikkan. Untuk mengatasi masalah tersebut maka desain saluran tuang menjadi sangat penting untuk dapat mengontrol kecepatan pendinginan dan temperatur dalam cetakan.

### 1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh peletakan plat tipis setelah *ingate* terhadap struktur mikro hasil pengecoran dinding tipis yang meliputi karbida, *skin effect*, nodularitas dan jumlah nodul
2. Mengetahui pengaruh peletakan plat tipis setelah *ingate* terhadap sifat mekanis hasil pengecoran dinding tipis yang meliputi kekerasan dan kekuatan tarik
3. Mengetahui ketebalan optimum pada pengecoran dinding tipis sebagai bahan pembuatan ADI

### 1.4 BATASAN MASALAH

Penelitian ini menggunakan proses pengecoran vertikal dengan modifikasi dari desain sistim saluran tuang Stefanescu<sup>[1]</sup> untuk membuat pelat tipis dengan 5 variasi ketebalan, yaitu 5, 4, 3, 2, dan 1 mm. Susunan plat berturut-turut dari *ingate* yaitu 1, 2, 3, 4, dan 5 mm. Pola dibuat dari kayu dan cetakan dibuat dengan menggunakan pasir furan. Pengujian yang dilakukan adalah: pengujian komposisi kimia, pengamatan struktur mikro, dan pengujian mekanis yang meliputi uji tarik dan uji keras.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 BESI TUANG

Logam diklasifikasikan menjadi 2 kelompok besar, yaitu *ferrous* dan *non-ferrous*. Untuk *ferrous*, elemen utamanya adalah besi (Fe) dan karbon (C). *Ferrous* terbagi lagi menjadi 2 kelas, yaitu baja dan besi tuang. Keduanya memiliki Fe dan C sebagai elemen utamanya, perbedaan besi tuang dan baja terletak pada kandungan karbonnya. Pada baja, kandungan karbon berkisar antara (0,02–2,14)%, dan pada besi tuang berkisar antara (2,14–6,687)%<sup>[6]</sup>. Besi tuang terbagi menjadi 5 jenis<sup>[7]</sup>, yaitu:

- a. Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)
- b. Besi Tuang Kelabu (*Gray Cast Iron*)
- c. Besi Tuang Bercorak (*Mottled Cast Iron*)
- d. Besi Tuang Nodular (BTN) atau *Ferro Casting Ductile Iron* (FCDI)
- e. Besi Tuang Malebel (*Malleable Cast Iron*)

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

Merupakan besi tuang yang memiliki struktur *cementit* pada mikrostrukturnya. Besi ini 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*)

Merupakan besi tuang yang 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 adalah besi tuang kelabu yang telah diinokulasi dan nodulasi, sehingga bentuk grafit berubah dari bentuk panjang menjadi bulatan.

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)

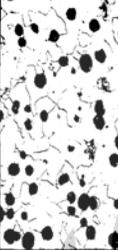
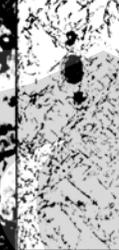
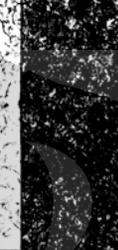
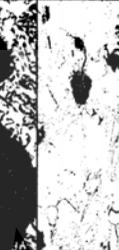
Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang yang lain, antara lain memiliki keuletan yang tinggi (elongasi sebesar 18% pada *grade* tertentu) dan kekerasan 143-187 HB. *Yield strength* 40.000 psi (275 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 90,000 psi (620 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>[3]</sup>, lihat tabel 2.1. Sifat mekanik ini dapat dicapai karena besi tuang nodular memiliki jumlah yang tinggi dan bentuk grafit yang bulat pada struktur mikronya.

### 2.2.1 Struktur Mikro Besi Tuang Nodular

Berdasarkan struktur mikronya, besi tuang nodular dikelompokkan menjadi<sup>[2]</sup> :

- a. Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)
- b. Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)
- c. Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)
- d. Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)
- e. Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)
- f. Besi Ulet Austenitik (*Austenitic Ductile Iron*)
- g. Besi Ulet Hasil Austemper (*Austempered Ductile Iron*)

Tabel 2.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular<sup>[2]</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*)

Grafit 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. Grafit 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 magnetik 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 *Liquid Treatment*

*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

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair. Inokulasi bertujuan untuk memacu 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 yang dikenal dalam penambahan inoculan ke dalam logam cair, yaitu :

- Metode *Ladle* Inokulasi  
Inokulan ditambahkan ke dalam *ladle*. Kelemahan metode ini adalah penurunan suhu yang terjadi besar dan pemudaran inoculan lebih mudah terjadi.
- Metode *Late* Inokulasi  
Inokulan dilakukan sesaat sebelum logam cair memasuki cetakan. Kelemahan metoda ini adalah tidak terkontrolnya dan tidak meratanya inoculasi.

### 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 :

$$\%Mg_{eff} = \frac{0,75\%C \text{ dalam besi cair} * Mg \text{ sisa}}{\%Mg \text{ yang ditambahkan}} \dots\dots\dots(2.1)$$

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

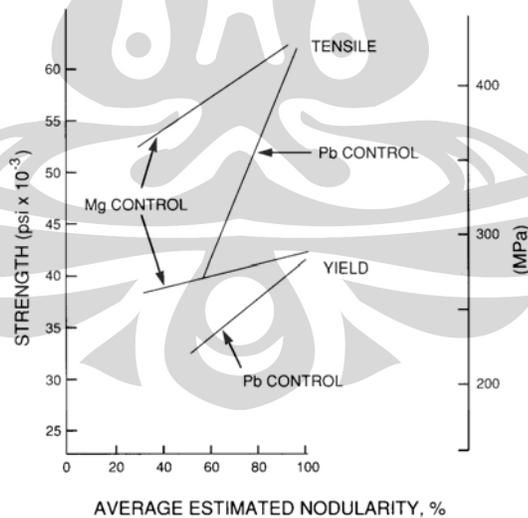
### 2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang antara lain :

- a. Struktur grafit
- b. Jumlah grafit
- c. Struktur matriks
- d. Ukuran ketebalan

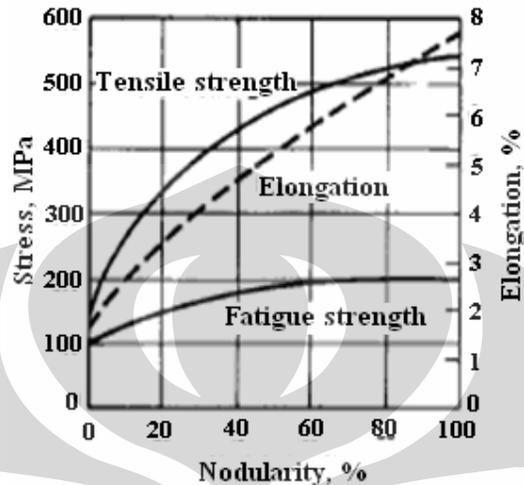
#### a. Struktur grafit

Grafit adalah bentuk stabil dari karbon murni dalam besi tuang. Sifat fisik yang penting 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 2.1. Grafit serpih berperan seperti retakan dalam matrik besi, sementara grafit bulat berperan seperti penangkap retakan, memberikan perbedaan pada sifat mekanis<sup>[8]</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.



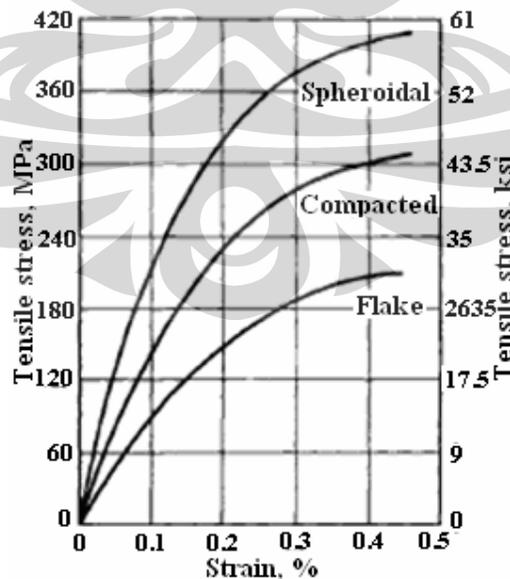
Gambar 2.1. Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada *ferritic ductile iron*

Semua sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan meningkat jika proporsi dari grafit nodular meningkat. Misalnya adalah kekuatan tarik dan kekuatan fatik seperti terlihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular

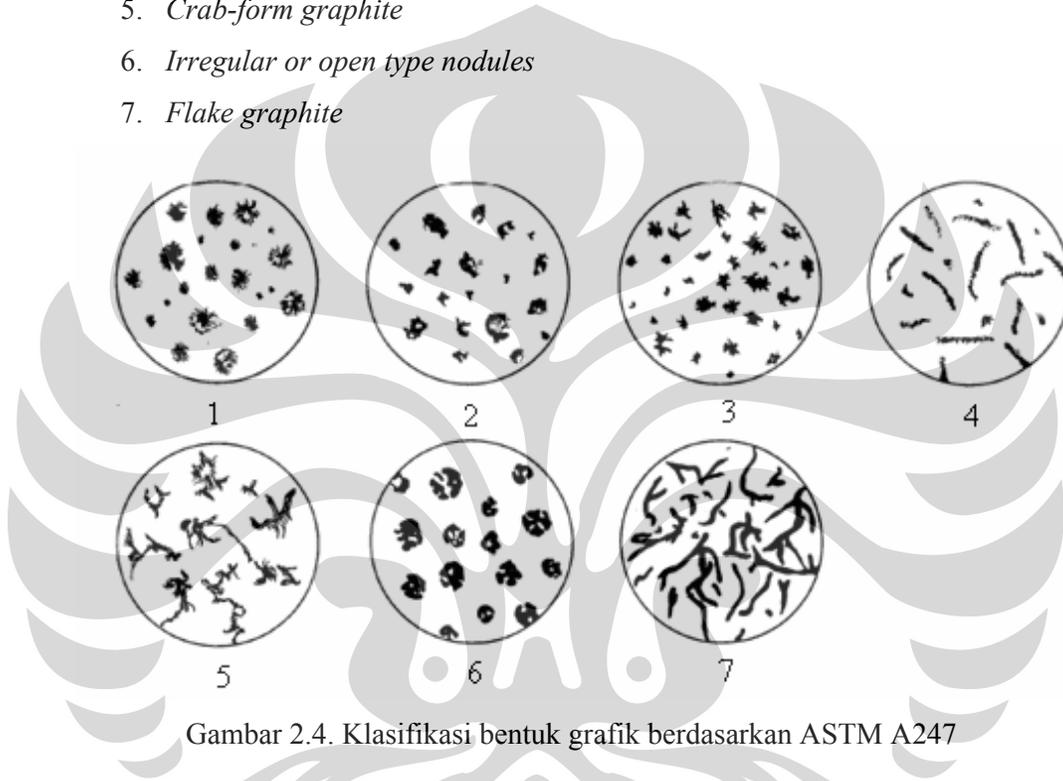
Bentuk dari grafit non-nodular seperti bentuk *flakes* (serpih tipis) dengan sudut yang tajam memiliki pengaruh yang merugikan pada kekuatan besi tuang nodular, lihat gambar 2.3. Presentasi nodularitas yang rendah juga menyebabkan ketahanan energi impak yang lebih rendah, mengurangi kekuatan fatik, meningkatkan kemampuan peredaman, meningkatkan konduktivitas panas dan mengurangi ketahanan listrik.



Gambar 2.3. Pengaruh bentuk grafit pada kurva *stress-strain* beberapa besi cor

Berdasarkan ASTM A247, terdapat tujuh bentuk grafit yang digunakan untuk klasifikasi besi tuang seperti terlihat pada gambar 2.4, yaitu :

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



Gambar 2.4. Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247

#### b. Jumlah grafit

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

### c. Struktur matriks

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi besi tuang nodular adalah struktur matrik. 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, lihat 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		
FCD 400-18L				-20 ± 2	12 min.	9 min.			
FCD 400-15				-	-	-			
FCD 450-10	450 min.	280 min.	10 min.				140 to 210		
FCD 500-7	500 min.	320 min.	7 min.				150 to 230		Ferrite + pearlite
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

Ketika ukuran bidang menurun, kecepatan solidifikasi dan pendinginan dalam cetakan 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, inoculan 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 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:

- a. Karbon (C)
- b. Silikon (Si)
- c. Mangan (Mn)
- d. Magnesium (Mg)
- e. 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*, *carburizer* dan *scrap* besi cor. Jumlah elemen karbon optimum pada (3,4-3,8)% yang 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. Jumlah kandungan silikon optimum pada (2,0-2,8)%. Kadar yang lebih rendah 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 impact meningkat. Struktur ferit yang mengelilingi bulatan grafit pada *pearlitic ductile iron* mengurangi kekuatan luluh tetapi meningkatkan elongasi, kekuatan impact 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)

Elemen ini berfungsi untuk membantu pembentukan grafit bulat dengan kadar (0,04-0,06)%. Jika kandungan sulfur awal dibawah 0,015%, maka kandungan mangan juga 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.

### 2.2.5 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul

Bentuk grafit dalam besi tuang nodular, pada awalnya, ditentukan oleh nodularitas dan jumlah nodulnya. 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:

$$Nodularitas = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \dots\dots\dots(2.2)$$

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>[6]</sup>:

$$Nodularitas = \frac{A_{Acc.}}{A_{Acc.} + A_{Un.Acc}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

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 DESAIN SALURAN TUANG (*GATING SYSTEM*)

Sistem saluran tuang memiliki pengaruh yang besar terhadap kecepatan pengisian logam cair ke dalam cetakan serta kecepatan pembekuan logam cair dalam cetakan. Kecepatan pembekuan logam cair akan mempengaruhi struktur mikro serta sifat-sifat benda cor tersebut. Dengan menggunakan desain sistem saluran tuang yang tepat, maka sifat-sifat produk cor akan optimal.

### 2.3.1 Fenomena Pengisian Cetakan

Pengisian cetakan merupakan salah satu faktor kecil yang mempengaruhi hasil produk cor. Aliran logam cair setelah dituangkan ke dalam cetakan mengalami fenomena seperti turbulensi, *splashing*, pemisahan aliran karena perubahan bentuk cetakan maupun percabangan dan penggabungan kembali, perubahan sifat lelehan seperti densitas, viskositas, dan tegangan permukaan serta solidifikasi.

Terdapat dua karakteristik utama dari logam cair yang berhubungan dengan pengisian cetakan, yaitu fluiditas dan turbulensi.

### Fluiditas

Fluiditas bukanlah sifat fisik, tetapi merupakan sebuah karakteristik secara teknologi. Ini merupakan suatu kemampuan logam cair untuk mengalir melalui lintasan cetakan dan mengisi rongga untuk membentuk desain yang lengkap. Hal itu dapat diukur melalui hubungan antara panjang pemadatan dari sebuah standar pengecoran spiral.

Fluiditas pengecoran dipengaruhi oleh tekanan metalostatik dan dihalangi oleh: viskositas dan tegangan permukaan dari logam cair, difusivitas panas dari cetakan, tekanan balik dari udara dalam rongga cetakan serta friksi antara logam dan cetakan.

- Gaya Metalostatik

Tekanan metalostatik diberikan dengan nilai  $\rho g h$  dimana  $\rho$  adalah densitas logam,  $g$  adalah gaya gravitasi bumi dan  $h$  adalah tinggi dari lintasan logam cair di atas titik pengisian. Semakin tinggi tekanan metalostatik maka semakin tinggi velositas dari cairan logam dan fluiditas juga semakin tinggi.

- Viskositas

Viskositas (kekentalan) tergantung dari jenis, komposisi dan temperatur logam. Pada kebanyakan logam, viskositas saat temperatur penuangan diukur berdasarkan standar air (1 centistoke); aluminium 1,2 centistoke dan besi 0,9 centistoke.

- Tegangan permukaan

Untuk plat datar dengan ketebalan  $t$ , hubungan antara gaya, ketebalan dan tegangan permukaan diberikan oleh  $\rho g h = \gamma / t$ , dimana  $\gamma$  adalah tegangan permukaan. Pada saat temperatur penuangan dicapai, tegangan permukaan dari aluminium dan besi adalah 0,5 dan 0,9 N/m.

- Difusivitas panas

Cetakan dengan difusivitas panas tinggi mengalirkan panas lebih cepat dari logam cair sehingga menyebabkan pendinginan lebih cepat dan menghentikan aliran. Hal ini sesuai dengan rumus  $\sqrt{(Km \rho m Cm)}$ , dimana

$Km$  adalah konduktifitas panas,  $\rho m$  adalah densitas dan  $Cm$  adalah panas spesifik (*heat specific*) dari material cetakan.

- Tekanan balik

Ketika logam cair memasuki cetakan, tekanan balik dari udara yang ditekan dari permukaan rongga mengurangi tekanan metalostatik sehingga mengganggu pengisian. Tekanan balik tergantung dari *volume* rongga, permeabilitas cetakan dan velositas dari bagian pemercepat seperti saluran udara (ventilasi).

- Friksi

Permukaan yang kasar dari cetakan pasir dapat mengganggu aliran logam. Karena itu pelapis cetakan (biasanya cairan mengandung *silica flour* dan grafit) mengurangi friksi antara logam dan cetakan, sehingga meningkatkan fluiditas.

### Turbulensi

Turbulensi merupakan ketidakteraturan atau fluktuasi aliran akibat gangguan-gangguan. Gangguan tersebut antara lain disebabkan oleh adanya penghalang dalam pola aliran seperti sudut lancip atau perubahan ketebalan bagian benda.

Adanya tekanan inersia (yang menyebabkan cairan berjalan terus dalam arah yang sama) yang lebih besar dari tekanan *drag* (yang cenderung menghentikan pergerakan cairan) juga dapat mengganggu aliran logam. Tekanan *drag* disebabkan oleh viskositas dan tegangan permukaan. Viskositas tergantung dari kekentalan cairan logam sedangkan tegangan permukaan tergantung pada dinding cetakan.

Pada umumnya, keseluruhan pola dari logam cair dalam suatu sistem saluran terjadi turbulensi. Tujuan utama dari sistem saluran tuang adalah untuk mengurangi turbulensi, meskipun hal itu tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Pola dari logam cair selama proses pengecoran terdiri dari 4 bagian utama, yaitu :

- Penuangan logam cair dari ladel ke rongga cetakan.
- Aliran dalam saluran tuang dari *pouring basing* sampai *ingate*.
- Pancaran logam cair muncul dari *ingate* dan memasuki rongga cetakan.
- Pengisian rongga cetakan oleh pergerakan cairan.

Ada tiga kelas utama dari cacat pengecoran yang berhubungan dengan pengisian cetakan, yaitu:

a. Pengisian tidak penuh (*incomplete filling*)

Cacat ini disebabkan fluiditas cairan logam yang buruk. Misalnya *cold shut* dan *misrun*. Cacat *cold shut* terjadi ketika dua aliran logam cair yang datang dari arah berlawanan bertemu, tetapi tidak menyatu secara sempurna. Cacat *misrun* terjadi ketika logam cair tidak mengisi bagian rongga cetakan secara penuh (biasanya pada bagian ujung rongga yang sempit). Kehadiran oksida dan pengotor dalam cairan logam membuat lebih buruk dari cacat yang dihasilkan.

b. Inklusi padatan (*solid inclusion*)

Cacat ini disebabkan oleh turbulensi dalam logam cair, misalnya inklusi pasir atau slag. Inklusi pasir disebabkan oleh turbulensi *bulk* dalam saluran tuang atau rongga cetakan yang mengeluarkan partikel pasir dari dinding cetakan. Inklusi slag dapat disebabkan oleh turbulensi permukaan sepanjang aliran logam cair, menyebabkan penyampuran lapisan oksida permukaan dengan logam cair.

c. Jebakan gas (*gaseous entrapments*)

Cacat jenis ini disebabkan adanya udara atau gas yang terperangkap, biasanya dalam bentuk *blow hole* dan porositas gas. Cacat-cacat ini terjadi ketika udara atau gas masuk rongga cetakan dan tidak dapat keluar melalui cetakan. Sumber utama gas yang masuk adalah pelarutan gas dalam logam cair, penguapan cairan dalam pasir cetak dan pembakaran pengikat (*binder*) dalam pasir inti atau cetak. Terjadinya cacat-cacat ini semakin meningkat seiring dengan bertambahnya udara yang terperangkap atau gas yang dihasilkan, pengisian dan solidifikasi yang cepat, dan ventilasi cetakan yang buruk.

### 2.3.2 Sistem Saluran Tuang

Sebuah rongga cetakan harus diisi dengan logam yang bersih dan cara yang terkontrol untuk memastikan kehalusan, keseragaman, dan pengisian sempurna, agar bebas dari cacat, inklusi padatan dan kekosongan. Ini dapat dicapai dengan sistem saluran tuang yang baik. Tahap pertama melibatkan pemilihan jenis dari sistem saluran tuang dan rancangan saluran tuang: orientasi dan posisi dari *sprue*, *runner*, dan *ingate*. Ketentuan desain yang paling penting adalah memiliki waktu pengisian yang ideal, berdasarkan saluran tuang yang dirancang.

Objek utama dari sistem saluran tuang adalah untuk mengarahkan logam cair yang bersih tertuang dari ladle ke rongga cetakan, memastikan kehalusan, keseragaman dan pengisian sempurna. Logam yang bersih mencegah secara tidak langsung masuknya *slag* dan inklusi ke dalam rongga cetakan dan meminimalisasi turbulensi permukaan. Pengisian yang halus secara tidak langsung meminimalisasi turbulensi. Pengisian seragam secara tidak langsung menunjukkan bahwa semua bagian cetakan terisi secara terkendali, biasanya pada waktu yang sama. Pengisian yang sempurna memastikan secara tidak langsung logam cair dapat mengisi bagian yang tipis dan ujung dengan ketahanan minimum.

#### 2.3.2.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang

Berdasarkan orientasi dari bidang pemisah (*parting plane*), sistem saluran tuang diklasifikasikan menjadi sistem saluran tuang horizontal dan system saluran tuang vertikal<sup>[14]</sup>.

##### Sistem Saluran Tuang Horizontal

Sistem saluran tuang horizontal cocok untuk pengecoran datar dengan pengaruh gaya grafitasi dalam pengisian. Ini digunakan cukup luas dalam pengecoran pasir logam besi dan juga metode *gravity die casting* untuk logam *non-ferrous*.

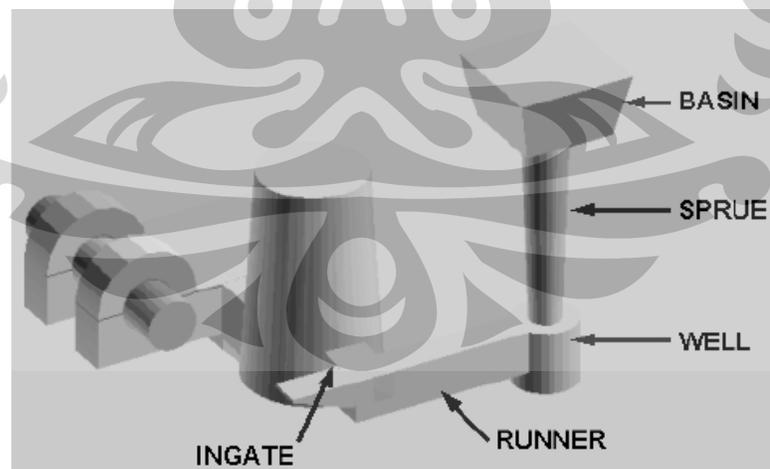
##### Sistem Saluran Tuang Vertikal

Sistem saluran tuang vertikal cocok untuk pengecoran tinggi. Ini melibatkan proses cetakan pasir tekanan tinggi (*high pressure sand mould*), *shell mould* dan *die casting*, dengan bidang pamisah adalah vertikal.

### 2.3.2.2 Komponen Sistem Saluran Tuang

Elemen utama dari sistem saluran tuang meliputi *pouring basin*, *sprue*, *well*, *runner* dan *ingate*, dalam urutan aliran logam cair dari ladle ke rongga cetakan.

- *Pouring Basin (Bush atau Cup)*  
*Pouring basin* adalah kantong bundar atau persegi yang menerima logam cair dari ladle.
- *Sprue (Downsprue)*  
*Sprue* merupakan bundaran melintang yang mengarahkan logam cair dari *pouring basin* ke *sprue well*. Posisi *sprue* selalu vertikal.
- *Sprue Well*  
*Sprue well* berfungsi untuk mengubah arah aliran logam cair dengan sudut  $90^\circ$  untuk dialirkan ke *runner*.
- *Runner*  
*Runner* berfungsi untuk mengarahkan logam cair dari *sprue* ke *ingate*.
- *Ingate*  
*Ingate* berfungsi untuk mengarahkan logam cair masuk ke rongga cetakan. Biasanya, bersama *sprue well* dan *runner* dilokasikan pada bidang pemisah (*parting plate*).



Gambar 2.5. Elemen utama sistem saluran tuang<sup>[8]</sup>

Elemen penting lain dari sistem saluran tuang adalah penyaring (*filter*) atau perangkap *slag*. Penyaring ini biasanya ditempatkan di *runner* atau antara *runner* dan *ingate*, berfungsi menyaring slag atau inklusi lainnya.

## 2.4 PENGECORAN DINDING TIPIS

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 (*thin wall casting*). Caldera mendefinisikan ketebalan dinding dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal kurang dari 5 mm<sup>[9]</sup>. Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm<sup>[10]</sup>. Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil atau sama dengan 3 mm<sup>[11]</sup>.

Ketebalan minimal terakhir yang sudah dapat dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm yang dibuat oleh kelompok Stefanescu<sup>[11]</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>[2]</sup> dalam bentuk benda uji, dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez<sup>[10]</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

Dalam proses solidifikasi besi tuang selain grafit dapat juga terbentuk karbida, atau sementit. 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<sup>0</sup>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>[1]</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>[12]</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 peneltian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent*, CE, adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0.31\%Si \dots \dots \dots (2.4)$$

Loper mengatakan untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%<sup>[12]</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>[13]</sup>.

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

Pada bagian tepi struktur mikro *thin wall ductile iron* (TWDI) terbentuk suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular. Lapisan ini kemudian diberi nama *flake graphite rim anomaly*<sup>[12]</sup> atau *skin effect*<sup>[14]</sup>. Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200  $\mu\text{m}$  atau 0,2 mm<sup>[12]</sup>. Lapisan ini dapat menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih dapat berperan sebagai konsentrasi stress dan lokasi permulaan retak<sup>[14]</sup>. Biasanya lapisan ini dihilangkan dengan proses permesinan<sup>[15]</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>[12]</sup>. Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.

### 2.5 BESI NODULAR AUSTEMPER (*AUSTEMPERED DUCTILE IRON-ADI*)

ADI merupakan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, kemampuan permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, serta ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik yang baik<sup>[3]</sup>. 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>[5]</sup>. Untuk penggunaan langsung maka harus bersih dari karbida<sup>[1]</sup>.

Penahanan temperatur pada 705°C (1300°F) selama tidak lebih dari 4 jam meningkatkan ketahanan patah (*fracture resistance*). 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.

Table 2.3. Standard 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  $72 \pm 7$  °F ( $22 \pm 4$  °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.

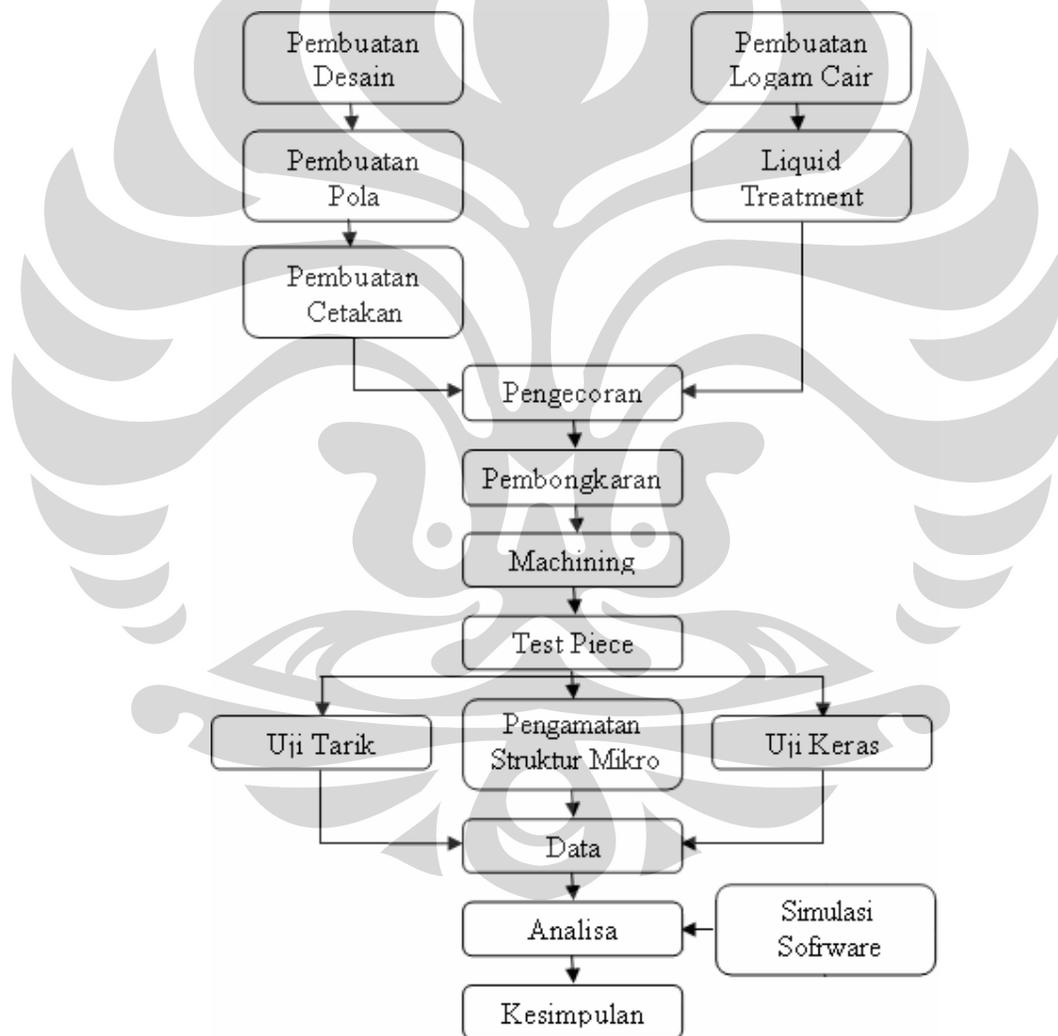
Sifat dari ADI dikarenakan struktur matriks yang unik dari *ferit acicular* dan *austenite* penstabil karbon yang disebut *ausferit*. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki ADI disebut sebagai *bainite*. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses austempering baja.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

### BAB 3

#### METODE PENELITIAN

#### 3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian tahap pertama dari suatu rangkaian penelitian dengan tujuan pembuatan TWDI yang memiliki persyaratan untuk dijadikan ADI. Selanjutnya penelitian akan dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

### 3.2 ALAT DAN BAHAN

Alat dan bahan yang digunakan meliputi alat dan bahan saat proses pembuatan pola, pengecoran dan 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*)  
Alat ini mencampur pasir dengan bahan aditif lainnya.
- Sepasang flask  
Flask yang digunakan adalah tipe excel karena metode pengecoran yang dilakukan vertikal.
- Mesin pengangkut  
Digunakan untuk memindahkan cetakan terutama ketika cetakan sudah dibuat karena berat yang cukup besar.

##### Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi :

- *Electric furnace*  
*Electric furnace* merupakan jenis dapur peleburan yang menggunakan energi listrik untuk proses induksi.
- *CE meter*  
*CE meter* adalah uji komposisi kimia untuk mengontrol kandungan elemen dalam logam cair.
- *Thermocople*  
*Thermocopel* merupakan alat untuk mengukur temperatur logam cair.

### Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk pengecoran meliputi :

- Ladel  
Ladel adalah tempat untuk menampung logam cair untuk dituangkan ke dalam rongga cetakan.
- *Thermocople*
- Mesin pengangkut

### Alat Pembongkaran

Alat yang digunakan untuk melakukan pembongkaran berupa mesin guncang yang diletakkan di bawah tanah. Selain itu, untuk membersihkan produk cor dari pasir-pasir yang melekat, digunakan mesin *shotblasting*.

### Alat Permesinan

Alat yang digunakan untuk melakukan permesinan berupa mesin pemotong, mesin bubut, mesin gerinda dan amplas.

### **3.2.2 Bahan Baku**

Bahan baku yang digunakan pada saat dilakukan pengecoran meliputi: bahan baku logam cair dan bahan baku cetakan.

#### Bahan Baku Logam Cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair adalah *return scrap* dan *steel scrap*. Jumlah bahan baku logam cair dapat terlihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Bahan baku logam cair

No	Nama Material	Jumlah awal (Kg)	Addition (Kg)
1	<i>Return Scrap</i>	400	-
2	<i>Steel Scrap</i>	800	-
3	<i>Carburizer</i>	34	4,5
4	FeSi	10	8,4
5	FeMn	-	2,4
6	Inokulan	9	-
7	FeSiMg	12	-

### Bahan Baku Cetakan

Bahan baku yang digunakan untuk membuat cetakan terdiri dari :

- Pasir silika  
Pasir merupakan bahan baku utama dari cetakan pasir. Pasir ini berikatan secara kimia.
- Asam furan  
Asam furan (*furfuryl alcohol*) merupakan bahan pengikat yang dilakukan katalisasi tanpa pemanasan.
- Serbuk arang  
Serbuk arang ditambahkan ke cetakan agar memiliki sifat mampu ambruk ketika dilakukan pembongkaran sehingga dapat dipakai kembali.

Selain bahan baku utama, ada beberapa bahan tambahan untuk mendukung proses pengecoran, yaitu:

- Plating  
Plating merupakan serbuk karang laut yang dioleskan pada *pattern plate* sehingga memudahkan pelepasan ketika membuat cetakan.
- 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.

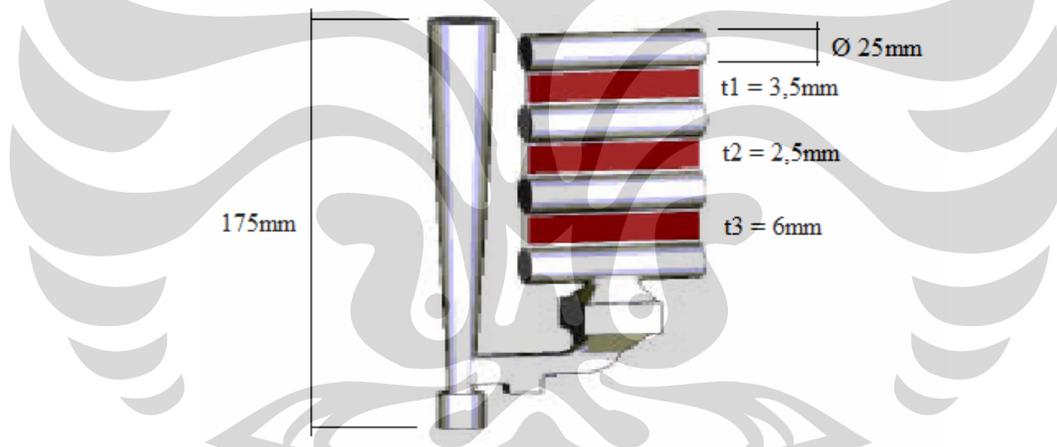
### **3.3 PROSEDUR PENELITIAN**

Rancangan awal penelitian adalah membuat TWDI dengan melakukan modifikasi pada desain sistim saluran tuang pengecoran vertikal Stefanescu.

#### **3.3.1 Pembuatan Desain Pengecoran**

Pada desain vertikalnya, 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<sup>[1]</sup>.

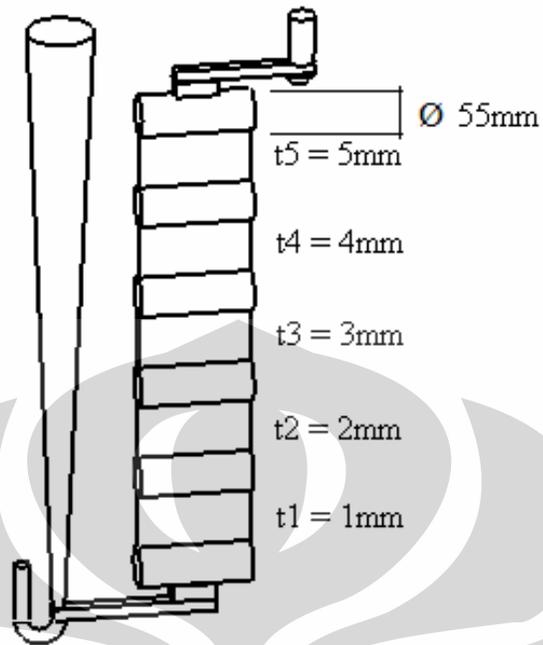
Pada desain vertikal ini, Stefanescu menggunakan mekanisme *counter gravity* untuk memperlambat proses pengisian cetakan. Dengan melambatnya proses pengisian diharapkan akan memperlambat juga proses kecepatan pendinginannya. Selain itu Stefanescu juga mengatur laju kecepatan pendinginan dengan meletakkan plat berturut-turut dari ingate 6 mm, 2,5 mm dan 3,5 mm, lihat gambar 3.2. Dengan disusun demikian maka Stefanescu memperlambat kecepatan pendinginan pada plat 2,5 mm. Perlambatan tersebut dilakukan 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>[1]</sup>

Modifikasi desain untuk penelitian ini terlihat pada gambar 3.3 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.

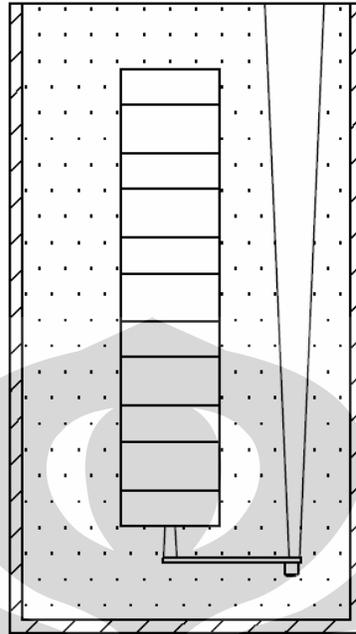


Gambar 3.3. Desain pengecoran penelitian

### 3.3.2 Pembuatan Pola

Setelah pembuatan desain selesai maka dilanjutkan dengan pembuatan pola. Pola dibuat dengan 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 sistim saluran tuang terdiri dari 1 *sprue*, 1 *runner*, dan 1 *ingate*. Setelah itu pola dipasang pada *base plate*, lihat gambar 3.4.



Gambar 3.4. Pola pada *base plate*

### 3.3.3 Pembuatan Cetakan

Semua pola di tempelkan pada *base plate* yang berukuran sebesar *flask* yang akan digunakan untuk membuat cetakan. *Base plate* yang telah dipasangi pola disebut *pattern plate* seperti terlihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Pattern plate* siap digunakan untuk membuat cetakan

Tipe *flask* yang digunakan adalah tipe excel yang merupakan *flask* untuk pengecoran vertikal. Pola kemudian diletakan dalam *flask*, setelah itu pasir furan dimasukkan hingga *flask* penuh.



Gambar 3.6 Proses *merger* dari pasangan cetakan

Sebelum dilakukan pengecoran, cetakan pasir dari kedua sisi *flask* dilakukan *merger*, gambar 3.6. Proses ini membutuhkan ketelitian agar posisi rongga cetakan sesuai bentuk benda dengan menggabungkan *dowel* yang telah dibuat antara sisi positif dan negatifnya. Selain itu ditambahkan juga perekat agar kedua sisi *flask* tidak mengalami kebocoran.

### 3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Liquid Treatment

Besi tuang nodular dihasilkan dari besi tuang kelabu yang telah melewati tahap *liquid treatment* yang terdiri dari inokulasi dan nodulasi.

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

Tahap ini terdiri dari:

a. Tahap *charging*

Merupakan tahapan pengisian bahan baku pertama kali sebelum dapur dinyalakan. Selain itu, 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*

Tahapan ini diawali 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*

Ketika temperatur logam cair mencapai sekitar 1400° C, maka dilakukan pengambilan sampel untuk pemeriksaan komposisi kimia dengan CE meter. Temperatur logam cair masih tetap ditahan pada temperatur ini sampai dihasilkan komposisi kimia logam cair. Jika komposisi yang diinginkan telah tercapai, maka dilakukan pengecekan terhadap temperatur 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.

#### 3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

Pembuatan besi tuang nodular dilakukan melalui proses *liquid treatment* 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.

### 3.3.5 Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Pengontrolan temperatur selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dilakukan penuangan ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan *thermocouple*. Pada saat penuangan temperatur berkisar antara 1450<sup>o</sup>C sampai 1393<sup>o</sup>C. Waktu penuangan diukur dengan menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair, lamanya antara 5 sampai 14 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. Proses pembongkaran cetakan dilakukan dalam sebuah ruang bawah tanah dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokkan cetakan pasir. Setelah itu, agar hasil cor-an lebih bersih dari pasir yang melekat kuat, maka dilakukan pembersihan dengan menggunakan metode *shotblasting* menggunakan bola-bola baja kecil dengan mekanisme penumbukan. *Machining* dilakukan hanya untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip.

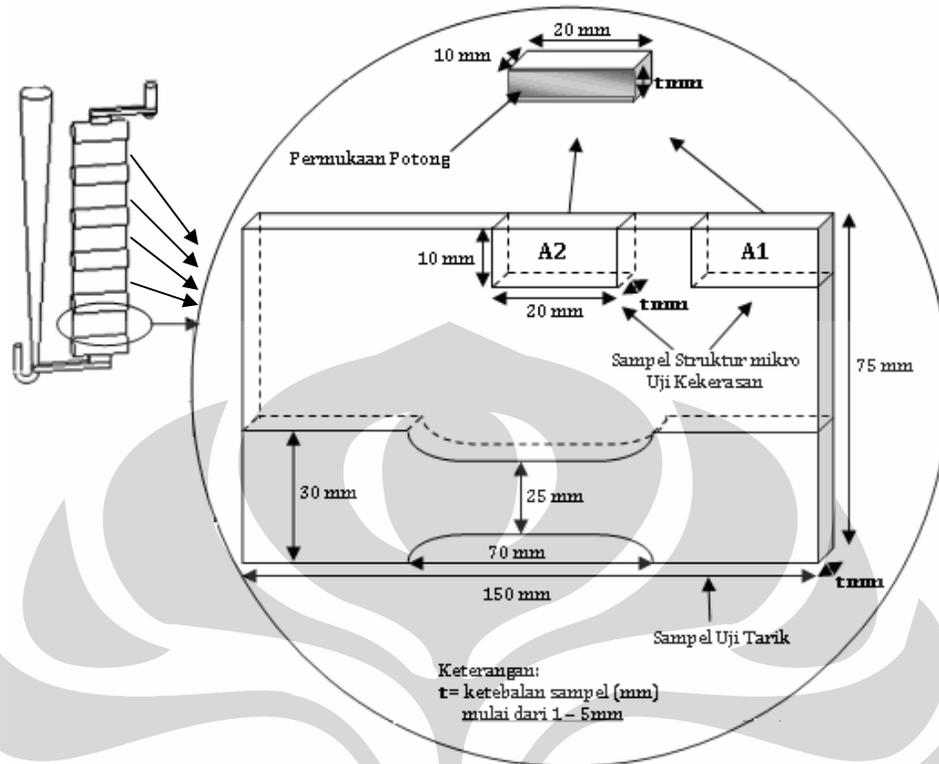
### 3.3.6 Preparasi Sampel

Setelah dilakukan permesinan kemudian dilakukan preparasi sampel untuk dilakukan pengujian, yang terdiri atas: pengujian struktur mikro, pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi (LUK) Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT), Serpong. Sedangkan, pengujian tarik dan kekerasan bertempat di Laboratorium Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia.

#### a. Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

Untuk preparasi sampel pengamatan struktur mikro dilakukan dengan berbagai tahap preparasi antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

- Pemotongan (*Cutting*) 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 pada permukaan sampel, lihat gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat

- *Mounting* bertujuan untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media, lihat gambar 3.8. Terlebih dahulu sampel dimasukkan 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 menghindari 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 detil 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

Preparasi untuk uji kekerasan diambil dari sampel yang sebelumnya digunakan untuk pengamatan struktur mikro, dan telah dilakukan pemolesan kembali.

#### 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, lihat gambar 3.7. Standar yang digunakan adalah JIZ 2201.

### 3.3.7 Pengujian

Pengujian yang dilakukan meliputi pengamatan struktur mikro, uji kekerasan dan uji tarik

#### 3.3.7.1 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik digital Canon, gambar 3.9. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 100x dan 200x. Pada saat pengambilan gambar, temperatur dijaga pada temperatur sekitar  $27^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan teknik yang digunakan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.

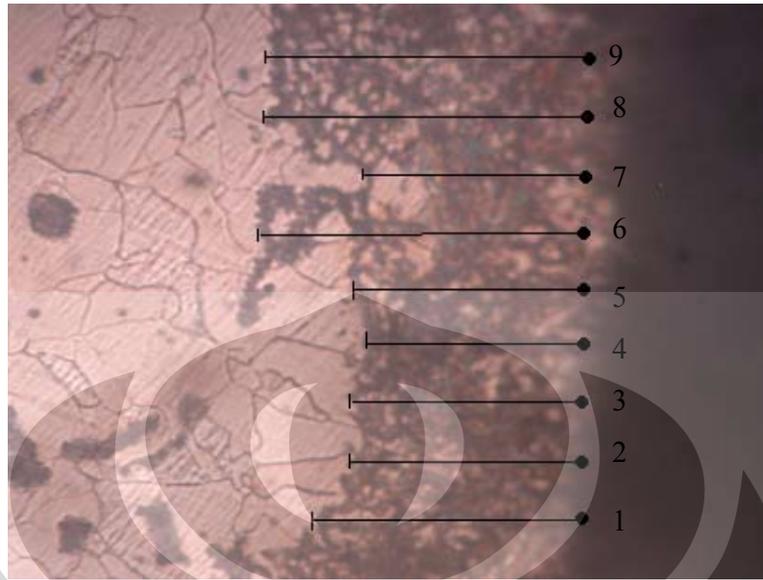


Gambar 3.9. Mikroskop optik digital

Selain melakukan pengamatan juga dilakukan perhitungan jumlah nodul dengan diameter minimal nodul yang akan dihitung yaitu  $5\ \mu\text{m}$  dan perhitungan nodularitas dengan *software* berdasarkan perhitungan *image analysis*<sup>[4]</sup>.

Pengukuran ketebalan efek kulit dilakukan sebagai berikut:

1. Pengukuran dilakukan pada foto pembesaran 200x dengan ukuran hasil cetak foto standar kamera, seperti terlihat pada Gambar 3.10.
2. Lalu pada bagian tinggi foto diberi 9 titik pengukuran dari bawah ke atas dengan jarak yang sama antara masing-masing titik, gambar 3.10.
3. Setelah itu pada setiap titik pengukuran dibuat garis horisontal sejajar dengan datum, lalu dilakukan pengukuran dengan menggunakan penggaris pada setiap titik.
4. Hasil pengukuran lalu dibagi dengan 200 untuk memperoleh ketebalan sesungguhnya.



Gambar 3.10 Pengukuran *skin effect*

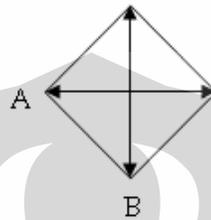
### 3.3.7.2 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dibawah *microhardness tester* dengan metode Vickers, gambar 3.11. Metode Vickers ini menggunakan indentor diamond berbentuk limas dengan bentuk penjejakan belah ketupat seperti terlihat pada gambar 3.12. Pada saat penjejakan, beban yang digunakan sebesar 300 gf, lamanya penjejakan selama 5 detik, dan temperatur berkisar  $27^0$  C.



Gambar 3.11 *Microhardness tester* Vickers

Penjejakan dilakukan pada arah horizontal dan vertikal. Pada arah horizontal, penjejakan dilakukan sebanyak 7x dan arah vertikal berbeda-beda tergantung dari ketebalan sampel. Pada ketebalan 1 mm sampai 5 mm berturut-turut 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 titik. Hal ini dilakukan untuk menghasilkan data kekerasan yang representatif.



Gambar 3.12. Bentuk jejak metode Vickers

Metode perhitungan berdasarkan metode Vickers seperti rumus 3.1, yaitu:

$$dp = \frac{A + B}{2} \dots\dots\dots(3.1)$$

Hasil perhitungan kemudian dimasukkan kedalam rumus 3.2 berikut:

$$Hv = \frac{1854 \times \text{beban}}{dp^2} \dots\dots\dots(3.2)$$

### 3.3.7.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan *tensile strength machine*. Prinsip kerja mesin uji tarik adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Beban yang digunakan sebesar 20 ton kemudian ditarik sampai putus.

### 3.3.7.4 Simulasi *Software*

*Software* yang digunakan dalam simulasi penelitian ini adalah Z-Cast Solution v2.5. Simulasi yang dilakukan yaitu simulasi pengisian logam cair dan simulasi pembekuan.

## BAB 4

### HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 KOMPOSISI KIMIA

Komposisi kimia logam cair setelah dilakukan penambahan terlihat pada tabel 4.1. Kadar C dan S berada diatas batas optimum, Mg berada pada batas bawah kadar optimum sementara elemen lain masuk pada kadar optimumnya.

##### 4.1.1 Persentase Elemen pada Logam Cair

Tabel 4.1 Komposisi kimia logam cair

No.	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Cr	%Ni	%Mg
2411808B	3,84	2,595	0,37	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,04

- Karbon (C)

Jumlah elemen karbon optimum pada besi tuang nodular adalah (3,4-3,8)%. Kadar karbon sebesar 3,84% dalam logam cair dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi sehingga menyebabkan ketidakkokohan cetakan.

- Silikon (Si)

Jumlah elemen silikon optimum pada besi tuang nodular adalah (2,0-2,8)%. Dengan kadar silikon 2,595% didapat struktur feritik pada mikrostruktur besi tuang nodular. Struktur ferit menyebabkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik rendah meskipun elongasi cukup tinggi.

- Mangan (Mn)

Kadar Mn untuk besi yang akan dilakukan perlakuan panas untuk jenis feritik harus  $\leq 0,5\%$ . Kadar mangan sebesar 0,37% dalam logam cair mencegah pembentukan karbida pada bagian tebal yang menyebabkan keuletan rendah.

- Magnesium (Mg)

Kadar magnesium dalam logam cair sebesar 0,04% masuk dalam batas optimum dalam membantu pembentukan grafit bulat yaitu antara (0,04-0,06)%. Penggunaan unsur Mg selain sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida.

- Sulfur (S)

Kandungan sulfur pada besi nodular biasanya di bawah 0,015%, dengan kandungan sulfur berlebih sebesar 0,02% kemungkinan menyebabkan terikatnya sulfur dengan Mg sehingga menyebabkan terjadinya *skin effect*.

#### 4.1.2 Carbon Equivalent (CE)

Jika melihat pada nilai CE yang diperoleh dari tabel 4.2, 4,646%, maka nilai CE masuk dalam jangkauan yang dianjurkan, yaitu (4,04-4,68)%<sup>[4]</sup>, untuk mencegah terbentuknya struktur karbida.

Tabel 4.2 Kadar CE logam cair

Pengecoran ke	No. Heat	CE
P1	2411808B	4,646

Keterangan : CE : (%C+0,31%Si)

#### 4.2 PENGAMATAN VISUAL

Hasil pengecoran, gambar 4.1, menunjukkan cetakan terisi sempurna walaupun terjadi perubahan dimensi ketebalan plat. Perubahan dimensi, terutama terjadi pada plat 1mm dan 2mm, karena cetakan tidak kuat menahan tekanan logam cair saat melewati bagian tipis.

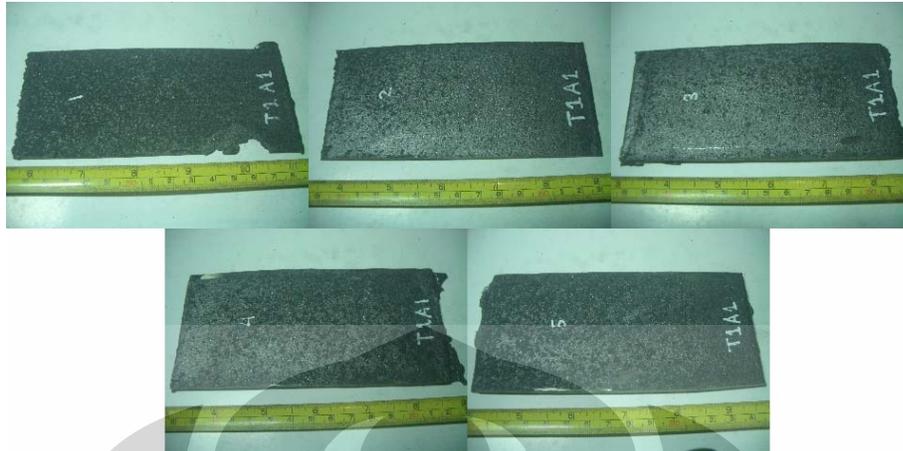
Cacat sirip sepanjang *sprue* bagian atas disebabkan terbantuknya celah antara *parting line*. Celah ini terbentuk karena sprue tidak kuat menahan beban logam cair saat memasuki sprue. Pada bagian benda juga terjadi cacat sirip tetapi merupakan imbas dari celah pada sprue, yaitu pada plat dengan ketebalan 3 mm, 4 mm dan 5 mm.



Gambar 4.1. Benda dan saluran tuang hasil pengecoran

Cacat lain yang terjadi adalah terdapat *shrinkage* dan inklusi padatan pada plat 1 mm sementara pada plat lain tidak terdapat *shrinkage* dan inklusi padatan. *Shrinkage* kemungkinan terjadi akibat *riser* yang tidak bekerja maksimal pada plat 1 mm.

Inklusi padatan yang terjadi adalah inklusi pasir yang berasal dari cetakan yang runtuh akibat tekanan logam cair yang tinggi. Pasir yang masuk ke dalam cetakan terletak pada sambungan plat 1 mm dan *riser* pertama setelah *ingate*, di mana terjadinya perlambatan kecepatan pengisian akibat saluran tipis pada plat 1 mm. Perlambatan kecepatan pengisian ini menyebabkan tekanan logam cair menjadi tinggi dan menekan pasir cetak hingga runtuh dan menjadi inklusi. Kadar karbon berlebih pada logam cair juga berperan menyebabkan ketidakkokohan cetakan.



Gambar 4.2. Benda setelah dilakukan proses *machining*

Setelah proses *machining*, gambar 4.2, dilakukan pengukuran ketebalan aktual benda, seperti terlihat pada table 4.3.

Tabel 4.3 Tebal aktual benda hasil pengecoran

Tebal pola (mm)	Tebal aktual (mm)
1	2,1
2	3,2
3	3,85
4	4,4
5	5,1

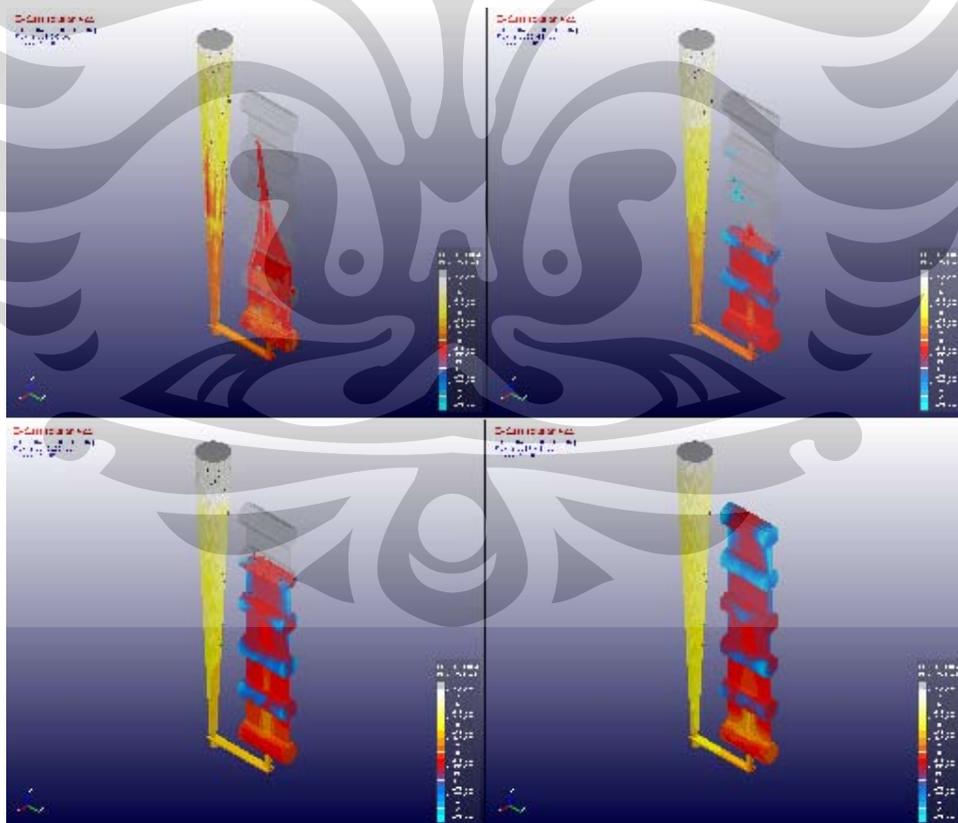
Plat paling tipis yang berhasil dibuat yaitu 2,1 mm dan yang paling tebal 5,1 mm. Benda yang paling mendekati pola yaitu plat 5 mm dengan ketebalan aktual 5,1 mm. Sedangkan yang memiliki perubahan dimensi paling besar adalah plat 2 mm dengan ketebalan aktual 3,2 (perubahan dimensi 1,2 mm) diikuti oleh plat 1 mm dengan perubahan dimensi sebesar 1,1 mm.

Hal ini menandakan bahwa bagian bawah cetakan menerima tekanan yang sangat tinggi dari logam cair akibat peletakan plat tipis pada *ingate*. Logam cair kemudian mendorong cetakan pasir sehingga terjadi perubahan dimensi, walaupun tidak sampai menyebabkan terjadinya celah pada cetakan.

### 4.3 SIMULASI SOFTWARE

Desain yang dibuat lalu disimulasikan dengan menggunakan *Z-Cast*. Hasil simulasi untuk proses pengisian, gambar 4.3, menunjukkan bahwa:

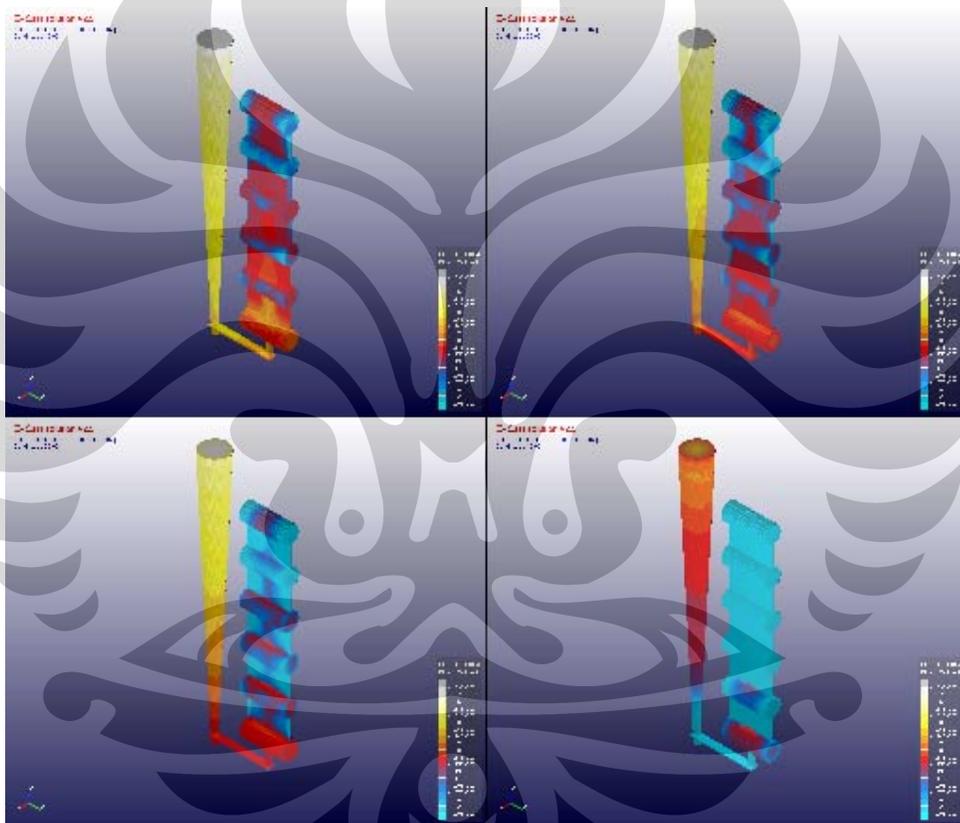
- Proses pengisian melalui saluran masuk utama dapat mengisi penuh cetakan
- Terjadi *splashing* ketika logam cair mengisi benda.
- Pada saat proses pengisian penuh temperatur logam cair terendah ada pada kisaran  $1200^{\circ}\text{C}$ . Ini menandakan bahwa selama proses pengisian belum terjadi solidifikasi.
- Waktu pengisian 67,349 detik
- Terlihat bahwa temperatur plat 1 mm yang diposisikan dekat dengan saluran masuk utama tidak mengalami penurunan temperatur yang mengarah pada solidifikasi dini yang memungkinkan terjadinya penutupan saluran masuk utama.



Gambar 4.3. *Flow result*

Hasil simulasi untuk proses pembekuan, gambar 4.4, menunjukkan bahwa:

- Penurunan temperatur terlihat terjadi pertama kali pada *riser* yang terhubung dengan plat berketebalan 5 mm yang terposisi pada bagian yang terisi terakhir sebelum lubang gas.
- Pembekuan mulai dari tepi dan mengarah ke tengah.
- Setelah semua plat membeku, pembekuan baru mengarah ke *sprue*.
- Semua *riser* bekerja baik dengan membeku terakhir setelah plat didekatnya.



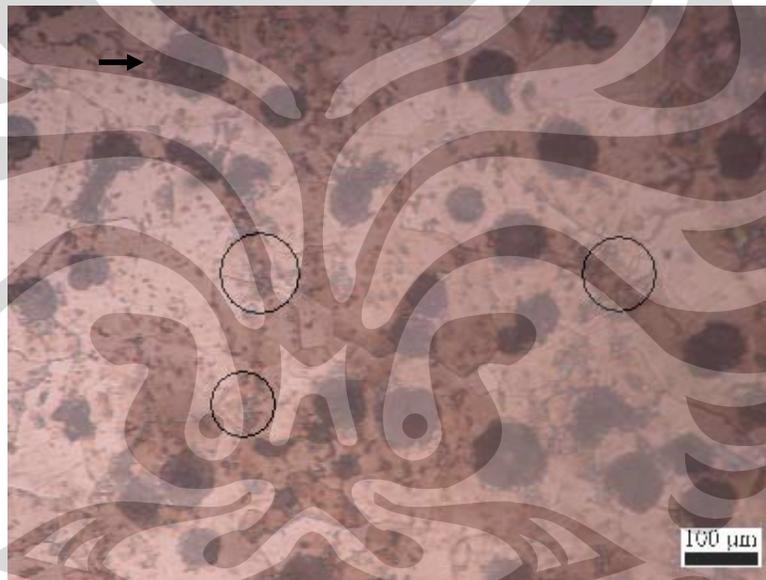
Gambar 4.4. *Solidification result*

#### 4.4 PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

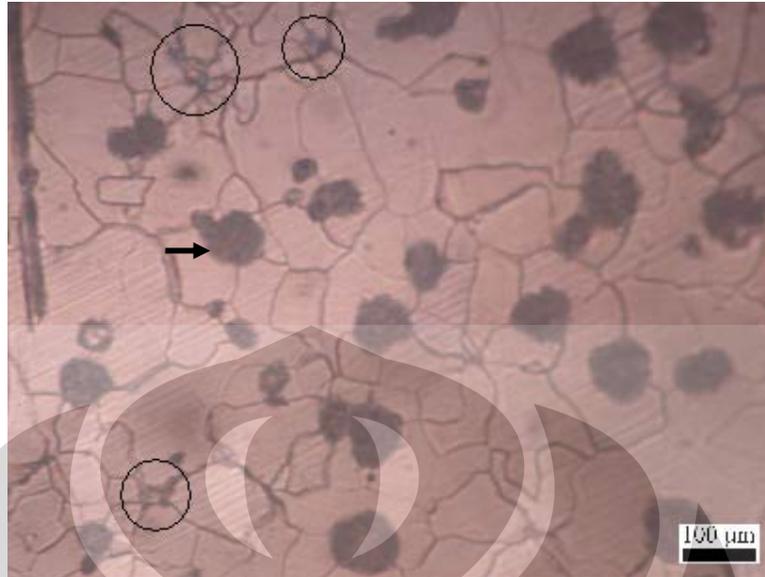
Dengan mengambil referensi pada *ASM Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa mikro struktur yang terbentuk pada semua foto mikrostruktur di atas adalah grafit dalam fasa ferit. Pada setiap ketebalan juga terdapat karbida dan *skin effect*.

##### 4.4.1 Karbida

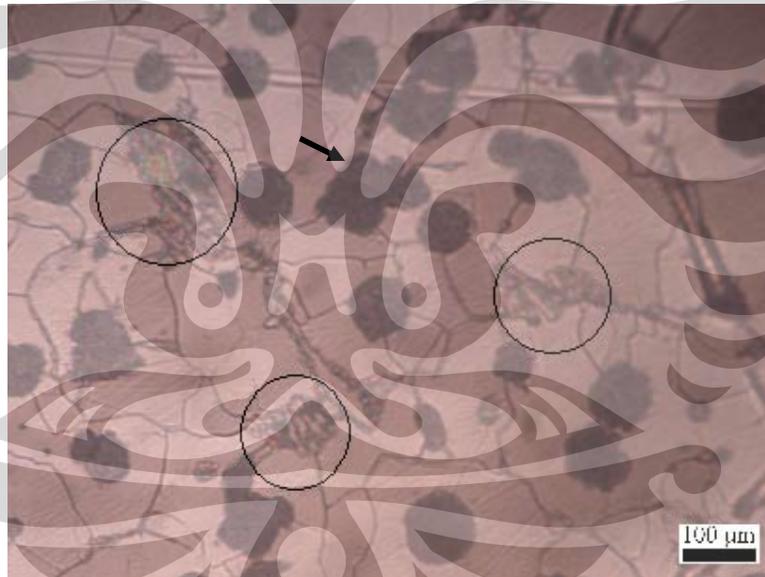
Walaupun dapat diperoleh grafit nodular dalam matrik feritis, tetapi karbida juga terbentuk, seperti terlihat pada gambar 4.5 – 4.9. Pada bagian tepi yang terbentuk adalah grafit serpih. Pada daerah yang mengarah ke tengah terlihat percampuran antara grafit serpih, grafit setengah nodul, dan grafit nodul. Lalu, pada daerah tengah grafit yang terbentuk adalah grafit nodul.



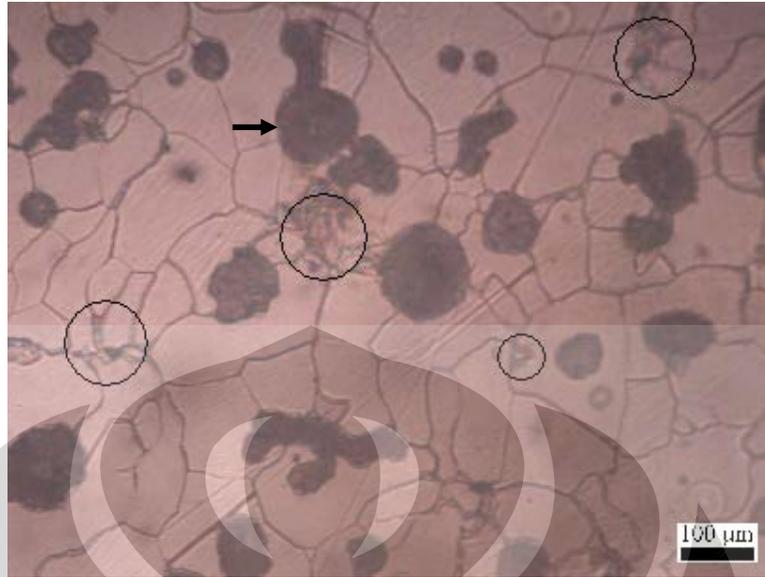
Gambar 4.5 Struktur mikro plat 1 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit



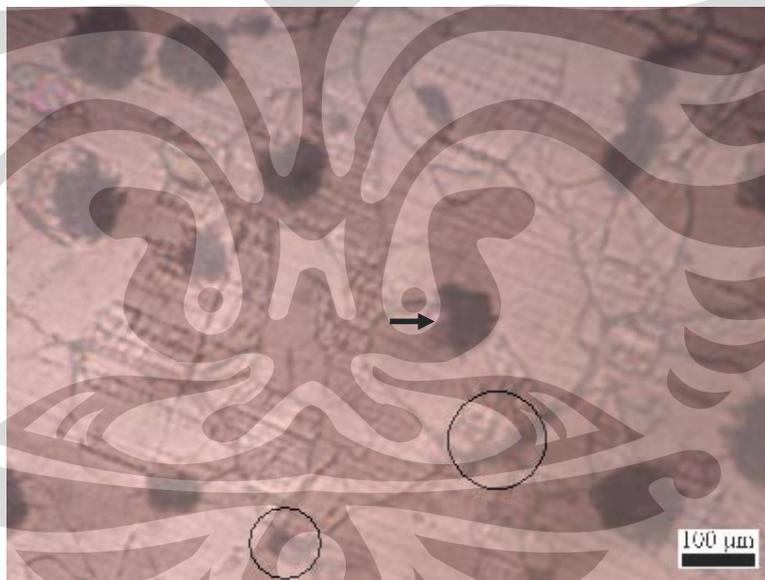
Gambar 4.6 Struktur mikro plat 2 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit



Gambar 4.7 Struktur mikro plat 3 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit



Gambar 4.8 Struktur mikro plat 4 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit



Gambar 4.9 Struktur mikro plat 5 mm, karbida (lingkaran) dan grafit (panah) dalam struktur ferit

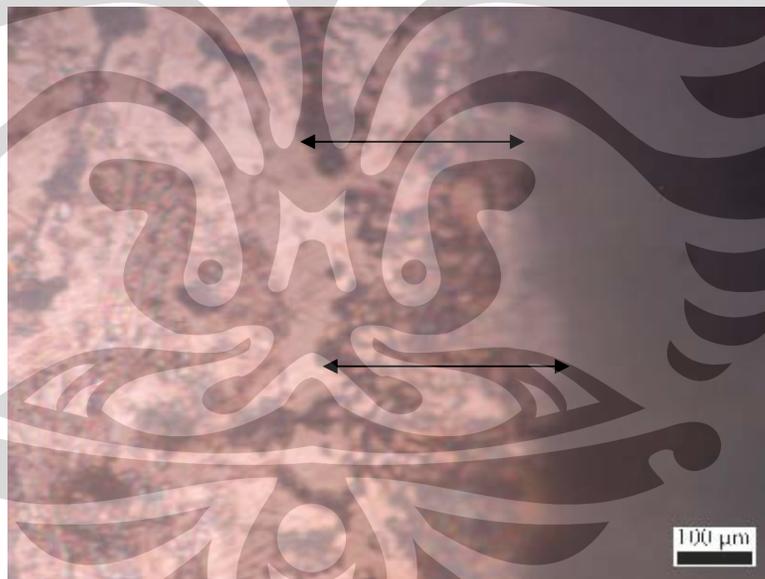
Dari pengamatan struktur mikro, secara umum dapat dikatakan bahwa makin tebal plat maka karbida yang terbentuk akan semakin sedikit. Hal ini sesuai dengan teori pembentukan karbida yang menyatakan bahwa karbida akan terbentuk secara alami dan semakin mudah terbentuk pada plat tipis.

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 *rare earth* yang membantu pembulatan grafit dan mencegah terbentuknya karbida. Komposisi Mg dalam logam cair walaupun masuk dalam batas optimum untuk pembentukan nodul berperan juga dalam pembentukan karbida.

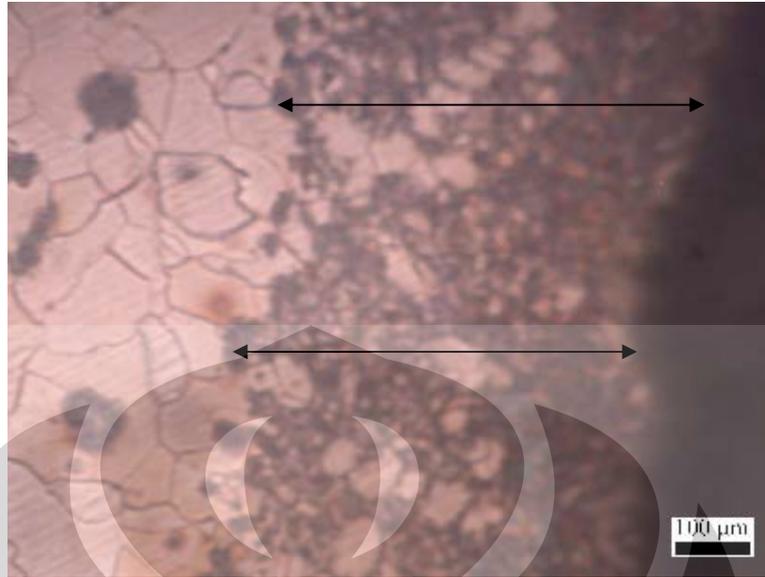
Kandungan karbida dapat dihilangkan dengan pemanasan saat proses austemper pembuatan ADI. Agar dapat menghilangkan karbida sama sekali saat proses pengecoran maka harus diperhatikan komposisi Mn dan Si agar berada dalam batas optimum.

#### 4.4.2 *Skin effect*

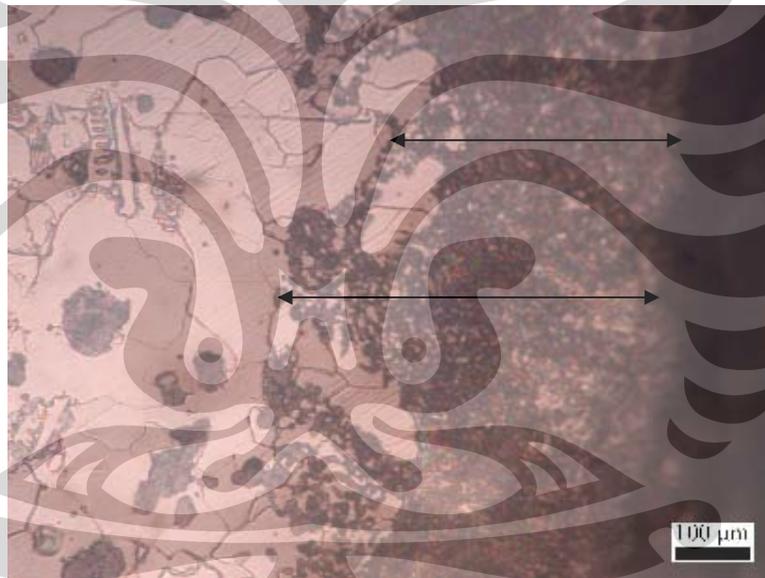
Melalui analisa yang dilakukan pada foto struktur mikro terlihat bahwa lapisan kulit tersebut sebenarnya adalah grafit yang berbentuk serpihan dengan matrik yang bervariasi, gambar 4.10 – 4.14.



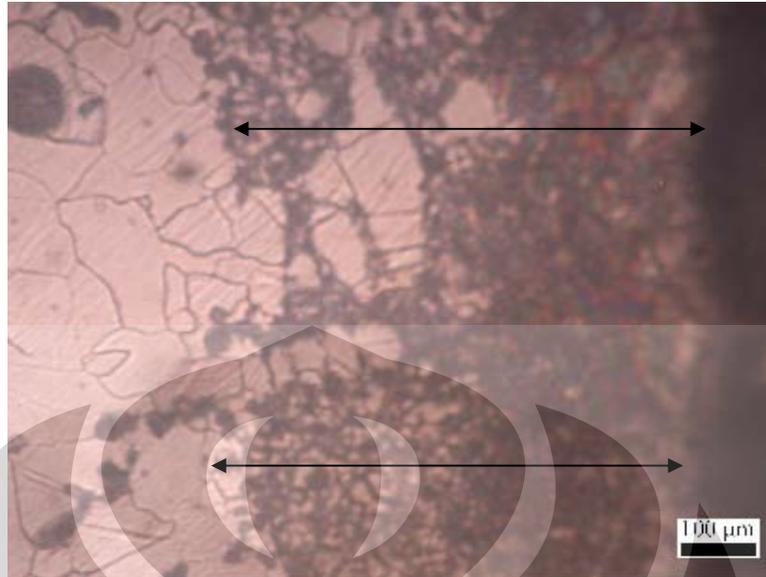
Gambar 4.10 *Skin effect* pada permukaan plat 1 mm



Gambar 4.11 *Skin effect* pada permukaan plat 2 mm



Gambar 4.12 *Skin effect* pada permukaan plat 3 mm



Gambar 4.13 *Skin effect* pada permukaan plat 4 mm



Gambar 4.14 *Skin effect* pada permukaan plat 5 mm

Perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan daerah tengah kemungkinan merupakan penyebab terjadinya perbedaan bentuk grafit serpih. Pada daerah tepi didapatkan jumlah nodul yang lebih sedikit dari pada bagian tengah.

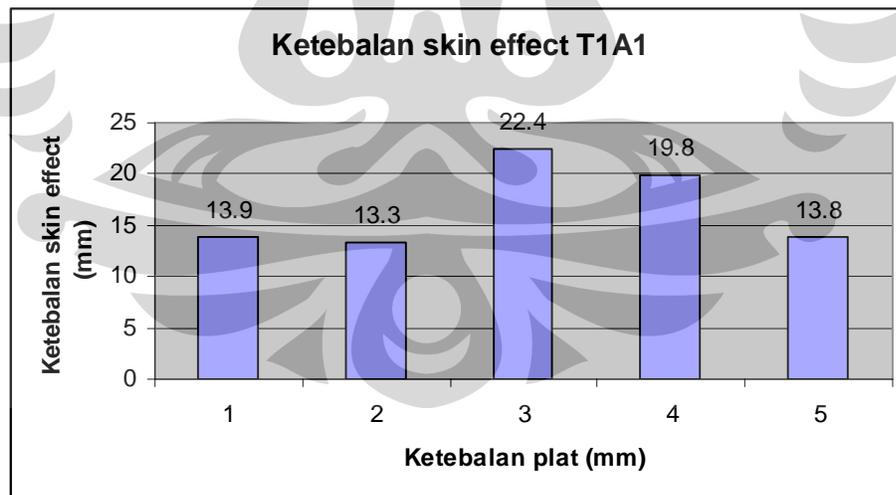
Kadar sulfur yang berlebih pada logam cair juga merupakan faktor terbentuknya *skin effect*, dimana sulfur kemudian berikatan dengan Mg. Hal ini menyebabkan inokulasi tidak berjalan dengan baik sehingga terbentuk grafit serpih pada permukaan benda.

Untuk mengukur ketebalan *skin effect* yang terbentuk dilakukan pengukuran pada 9 titik sepanjang permukaan sampel tepi (A1). Pengukuran dilakukan pada gambar perbesaran 200x, maka hasil pengukuran dalam satuan millimeter (mm). Hasil pengukuran terlihat pada table 4.4.

Tabel 4.4. Pengukuran *skin effect* T1A1

n ke	T1A1 - 1 (mm)	T1A1 - 2 (mm)	T1A1 - 3 (mm)	T1A1 - 4 (mm)	T1A1 - 5 (mm)
1	17	12.5	23	17.5	12
2	16	14.5	23.5	21	12
3	11	12.5	22	16.5	16
4	13	14.5	20.5	19	15
5	15	15.5	19	22	13.5
6	12	19	23.5	21	13
7	14	12	22.5	19.5	14.5
8	11.5	10.5	24.5	20.5	15
9	15.5	9	23.5	21.5	13.5
Mean	13.9	13.3	22.4	19.8	13.8

Dari data pengukuran *skin effect* pada sampel tepi, ketebalan *skin effect* hampir seragam tetapi ketebalan *skin effect* yang berbeda terlihat pada sampel 3 mm dan 4 mm. Data-data tersebut lalu di plot ke dalam grafik pada gambar 4.15.



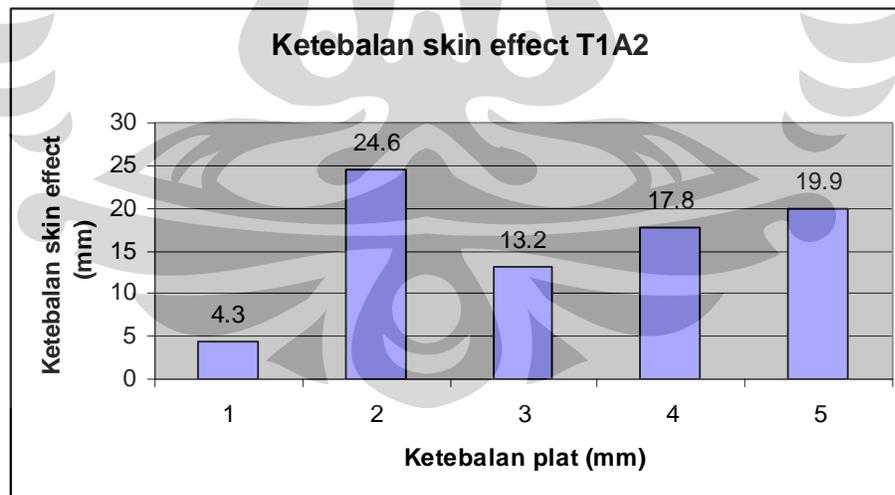
Gambar 4.15 Grafik *skin effect* T1A1

Sebagai pembandingan dilakukan juga pengukuran *skin effect* pada sampel tengah (A2). Hasil pengukuran terlihat pada table 4.5.

Tabel 4.5 Pengukuran *skin effect* T1A2

n ke	T1A2 – 1 (mm)	T1A2 – 2 (mm)	T1A2 – 3 (mm)	T1A2 – 4 (mm)	T1A2 – 5 (mm)
1	7	25.5	12	16	20.5
2	3.5	25	12	16	17
3	4.5	28	12	18.5	22.5
4	4.5	26	12	19	23
5	3	26.5	12	15.5	17.5
6	3	21	14	20	18
7	4.5	20	15	20	21
8	4.5	24	16	18	23.5
9	4	25.5	13.5	17.5	16
Mean	4.3	24.6	13.2	17.8	19.9

Secara umum terlihat peningkatan *skin effect* seiring pertambahan ketebalan. Ketidaksesuaian terjadi pada plat 2 mm yang memiliki *skin effect* paling tebal. Data-data tersebut lalu di plot ke dalam grafik pada gambar 4.16.



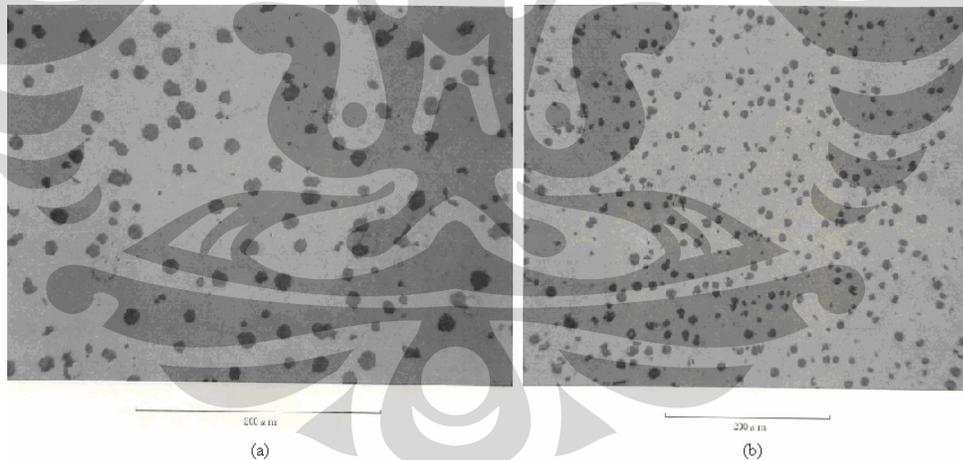
Gambar 4.16 Grafik *skin effect* T1A2

Dari grafik sampel yang diambil baik pada bagian tepi maupun tengah ketebalan lapisan kulit yang terbentuk tidak rata, Gambar 4.15 dan Gambar 4.16, dan model persamaannya tidak dapat diambil melalui statistik. Demikian juga fluktuasi ketebalan yang terjadi antara daerah A1 dengan daerah A2 tidak sama. Kecenderungannya adalah ketebalan kulit pada daerah A1 secara umum seragam sedangkan pada A2 meningkat seiring pertambahan ketebalan. Hal ini terjadi sebagai akibat dari kecepatan pendinginan yang berbeda untuk semua posisi, dimana pembekuan terjadi mulai dari daerah tepi lalu mengarah ke bagian tengah.

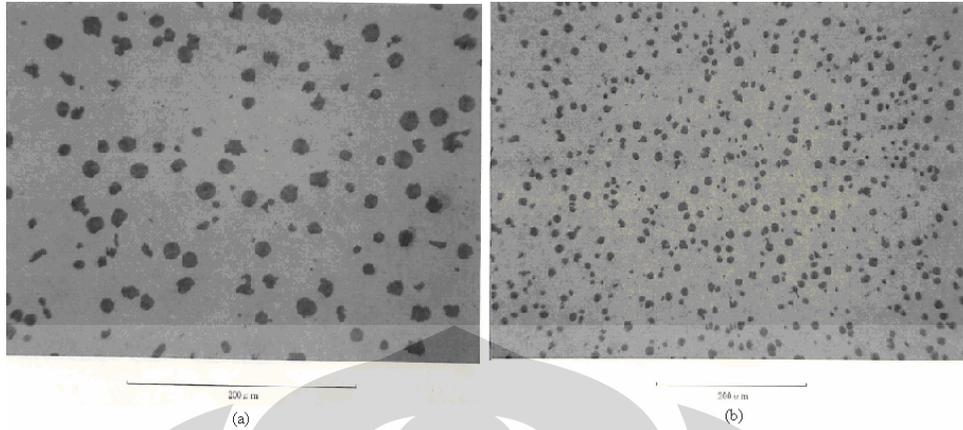
Untuk mencegah terbentuknya *skin effect* komposisi yang harus diperhatikan adalah Mg dan S. *Skin effect* dapat dihilangkan dengan proses permesinan.

#### 4.4.3 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul

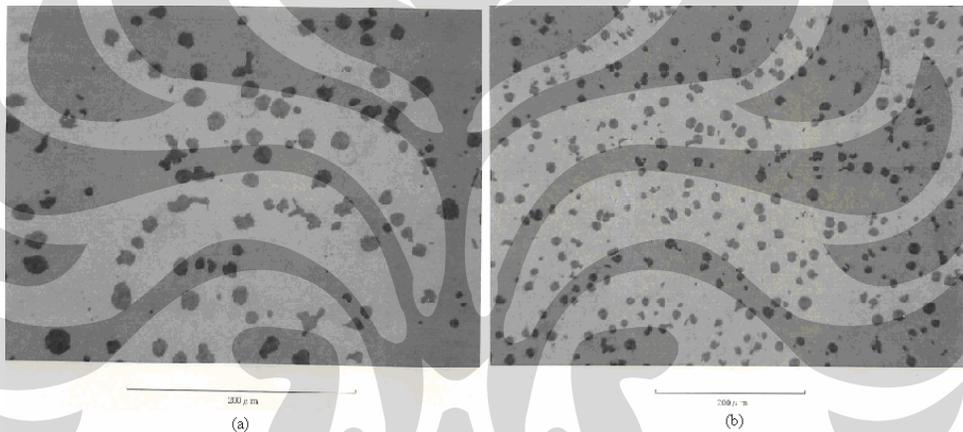
Perhitungan jumlah nodul menggunakan perhitungan *image analysis* dengan diameter minimal yang dihitung adalah  $5\ \mu\text{m}$ , seperti terlihat pada gambar 4.17 – 4.21. Perhitungan dilakukan menggunakan *software* di Iwate University, Jepang.



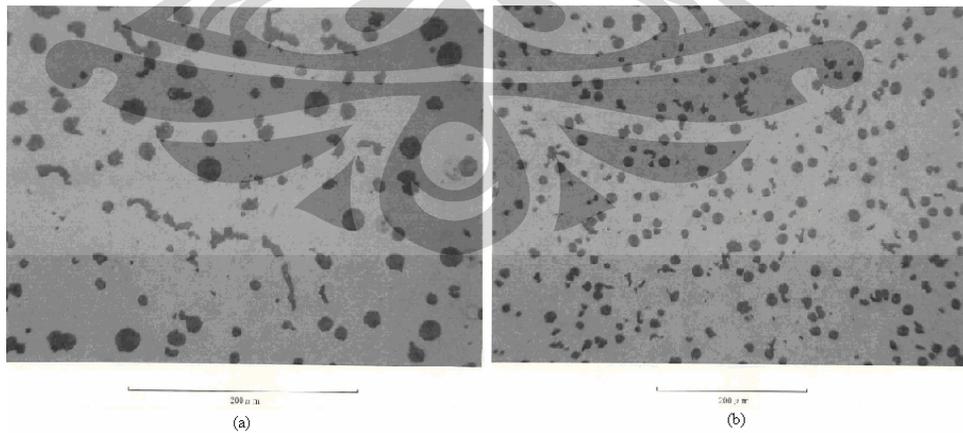
Gambar 4.17. (a) Struktur mikro T1A1 1 mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 1 mm, perbesaran 100x



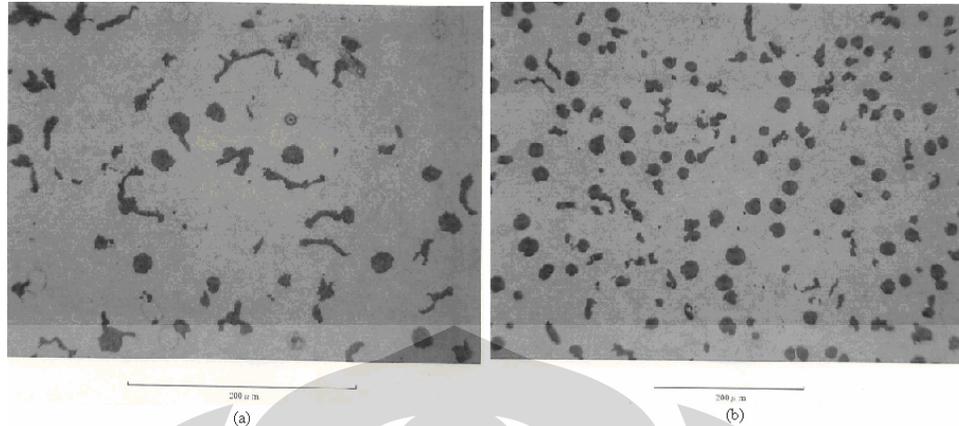
Gambar 4.18.(a) Struktur mikro T1A1 2 mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 2 mm, perbesaran 100x



Gambar 4.19.(a) Struktur mikro T1A1 3 mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 3 mm, perbesaran 100x



Gambar 4.20. (a) Struktur mikro T1A1 4 mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 4 mm, perbesaran 100x



Gambar 4.21.(a) Struktur mikro T1A1 5 mm, perbesaran 200x (b) Struktur mikro T1A2 5 mm, perbesaran 100x

Perhitungan dilakukan pada posisi A1 dan A2, tabel 4.6, kemudian dirata-rata untuk mendapatkan nilai nodularitas dan jumlah nodul yang representatif pada setiap ketebalan, tabel 4.7.

Tabel 4.6. Nodularitas dan jumlah nodul pada posisi A1 (pinggir) dan A2 (tengah)

Model	T	Posisi	Nodularity (%)	Nodule Count (nodul/mm <sup>2</sup> )	Aver. Nodule Dia. (μm)	Graphite Area (%)
T-1	1	A1	79.1	1057.6	13	10.5
		A2	85.4	1510.6	10.6	9.8
	2	A1	82.6	886.5	14.6	10.9
		A2	81.1	1633	10.8	11
	3	A1	80.8	816.5	15.6	11.8
		A2	76.8	1065.7	13.8	11.2
	4	A1	73	847.7	16.8	13
		A2	70.8	970.6	15.4	12.5
	5	A1	25.4	466.6	22.6	9.2
		A2	64.4	557.4	21.3	13

Tabel 4.7. Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata

ketebalan (mm)	Nodularitas (%)	Jumlah Nodul (nodul/mm <sup>2</sup> )	Diameter nodul rata-rata (μm)	Grafir area (%)
	Rata-rata	Rata-rata	Rata-rata	Rata-rata
1	82.25	1284.1	11.8	10.15
2	81.85	1259.75	12.7	10.95
3	78.8	941.1	14.7	11.5
4	71.9	909.15	16.1	12.75
5	44.9	512	21.95	11.1

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

- Nodularitas > 90%

Nodularitas pada setiap plat tidak ada yang mencapai 90%. Nodularitas tertinggi terdapat pada plat 1 mm, 82,25% dan menurun seiring pertambahan ketebalan. Pada ketebalan plat (1-4) mm, nodularitas berkisar antara (70-85)%. sedangkan pada ketebalan 5 mm nodularitas turun sangat jauh yaitu 44,9% terutama pada bagian tepi hanya mencapai 25,4%.

- Jumlah nodul > 1000/mm<sup>2</sup>

Jumlah nodul pada bagian tengah selalu lebih tinggi dari pada bagian tepi, mengindikasikan persebaran nodul belum merata. Jumlah nodul pada plat 1 mm dan 2 mm mencapai lebih dari 1200 nodul/mm<sup>2</sup>, pada plat 3 mm dan 4 mm jumlah nodul hanya mencapai 900 nodul/mm<sup>2</sup>, sedangkan pada 5 mm hanya mencapai 512 nodul/mm<sup>2</sup>. Secara umum, terlihat bahwa jumlah nodul menurun seiring pertambahan ketebalan.

#### 4.5 PENGUJIAN

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kekerasan dan tensile strength dari plat tipis hasil pengecoran.

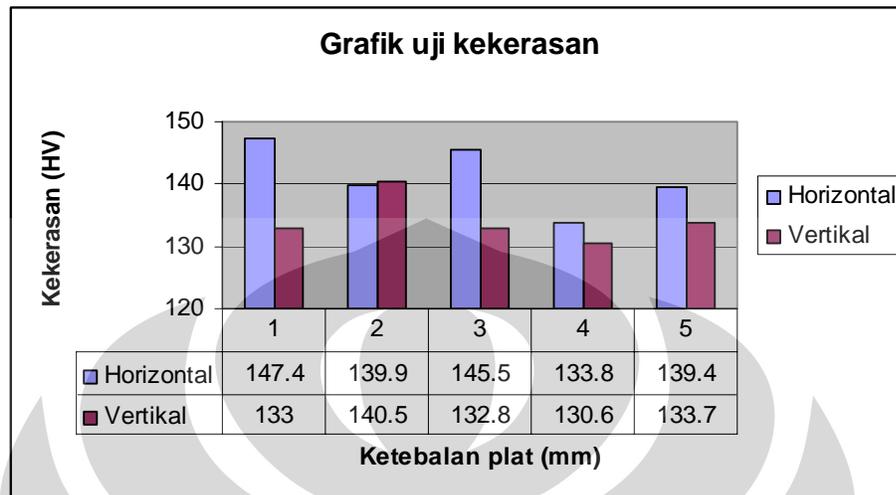
##### 4.5.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Vickers dan terbagi dalam arah horizontal (H) dan vertikal (V), seperti terlihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8. Kekerasan Vickers sample T1A1

Ketebalan (mm)		Kekerasan Vickers (mm)							Rata-rata
		1	2	3	4	5	6	7	
1	H	192.5	140.1	155.1	136.9	135.8	136.9	134.2	147.4
	V	135.8	130.1						133
2	H	140.1	141.3	141.3	134.2	138.5	129.1	154.5	139.9
	V	155.1	132.7	133.7					140.5
3	H	196.2	142.4	127.7	137.9	140.1	139.6	134.7	145.5
	V	141.3	127.7	133.2	129.1				132.8
4	H	150	140.1	128.2	131.1	125.8	130.6	131.1	133.8
	V	131.1	121.2	132.2	129.6	139			130.6
5	H	152	135.8	143	144.7	131.6	139	129.6	139.4
	V	142.4	134.7	142.4	134.2	124.8	123.4		133.7

Hasil rata-rata pengujian pada beberapa titik sepanjang sumbu horizontal dan vertikal di plot ke dalam grafik ketebalan vs kekerasan pada gambar 4.22.



Gambar 4.22. Grafik ketebalan versus kekerasan

Berdasarkan ASTM, kekerasan yang mampu dicapai besi tuang nodular adalah 143-187 HB atau sama dengan 150-197 HV. Hasil pengujian menunjukkan kekerasan yang mampu dicapai berkisar 132-147 Hv, masih dibawah standar kekerasan besi tuang nodular. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai yang acak dikarenakan pengujian dilakukan pada skala mikro sehingga saat indenter mengenai grafit atau karbida maka nilai kekerasan akan tinggi, sebaliknya saat mengenai fasa ferit maka nilai kekerasan merupakan nilai kekerasan ferit yang lebih rendah.

Pada sumbu horizontal, kekerasan secara umum menurun seiring pertambahan ketebalan, hal ini dikarenakan kadar karbida, sebagai struktur keras, menurun dengan pertambahan ketebalan. Sedangkan pada sumbu vertikal data yang didapat acak dan tidak terlihat pola yang jelas. Hal ini disebabkan pengujian hanya dilakukan dengan jumlah titik yang lebih sedikit berdasarkan ketebalan plat.

#### 4.5.2 Pengujian Tarik

Hasil yang didapat dari pengujian tarik berupa nilai UTS dan elongasi seperti yang terlihat pada table 4.9.

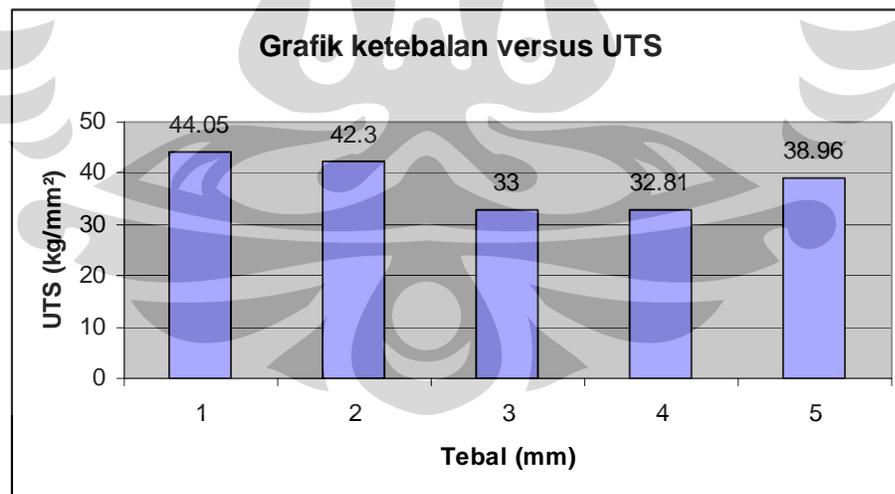
Tabel 4.9 Nilai UTS dan elongasi hasil pengujian tarik

Tipe	Tebal (mm)	UTS (kg/mm <sup>2</sup> )	e (%)
T1	1	44.05	0.5
	2	42.3	6
	3	33	2
	4	32.81	2.5
	5	38.96	7

Dari data tabel di atas kemudian di plot kedalam 2 buah grafik masing-masing yaitu grafik ketebalan vs UTS dan grafik ketebalan vs elongasi.

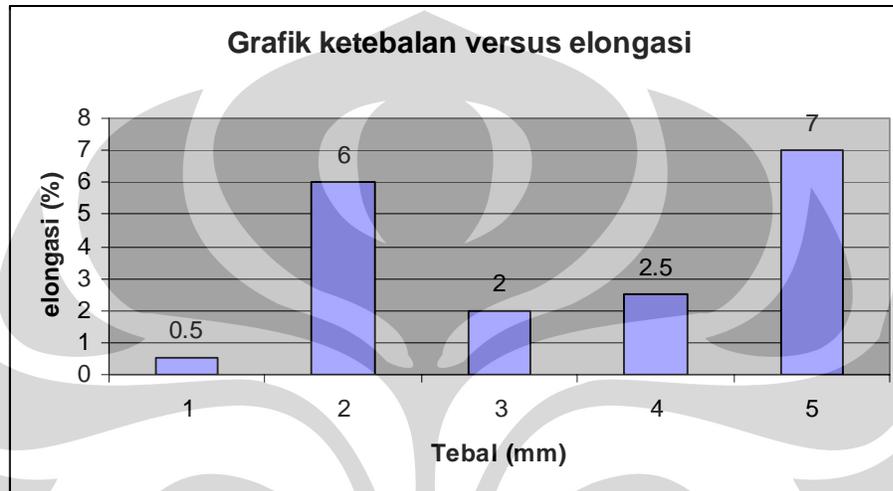
Nilai *tensile strength* besi tuang nodular dengan matrik ferit berdasarkan ASTM adalah 414 Mpa atau sama dengan 42,228 kg/mm<sup>2</sup>. Data pengujian menunjukkan hanya plat 1 mm dan 2 mm yang mencapai nilai tersebut, sementara *tensile strength* plat lainnya dibawah standar besi tuang nodular.

Nodularitas memiliki pengaruh yang signifikan pada *tensile strength* dan elongasi. dimana penambahan nodularitas akan meningkatkan nilai *tensile strength* dan elongasi besi tuang seperti terlihat pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik ketebalan versus UTS

Grafik 4.23 terlihat bahwa semakin tebal benda maka *tensile strength* nya semakin menurun. Sementara nilai UTS plat 5 mm merupakan anomali yang kemungkinan terjadi akibat preparasi sampel yang kurang baik. Sebelum dilakukan uji tarik, sampel di gerinda untuk menghilangkan *skin effect* yang dapat mempengaruhi nilai mekanis benda. Masih terdapatnya *skin effect* pada plat 5 mm mungkin yang menjadi penyebab anomali tersebut.



Gambar 4.24. Grafik ketebalan versus elongasi

Sementara UTS menurun seiring peningkatan ketebalan, maka elongasi cenderung meningkat seiring pertambahan ketebalan, gambar 4.24. Hal ini disebabkan pengaruh karbida yang menyebabkan keuletan rendah dan kekerasan meningkat sehingga elongasi menurun.

Elongasi besi tuang nodular seharusnya mencapai 18%, namun data pengujian menunjukkan tak satupun plat yang mencapai nilai tersebut. Terdapatnya karbida pada struktur mikro menurunkan nilai elongasi sampai jauh dari nilai standar.

Pada plat 5 mm kembali terjadi peningkatan nilai elongasi yang tidak biasa yang menegaskan adanya preparasi yang kurang baik. Sementara pada plat 2 mm terjadi anomali nilai elongasi sementara nilai UTS nya sesuai, hal ini kemungkinan besar dikarenakan jumlah nodul dan nodularitas plat 2 mm cenderung lebih tinggi dari pada plat lainnya.

Seharusnya dengan kadar nodularitas yang semakin tinggi maka *tensile strength* dan elongasi akan meningkat pula. Namun dengan hadirnya struktur karbida pada plat dengan nodularitas yang tinggi menyebabkan elongasi justru menurun. Hal ini disebabkan plat tipis memungkinkan tercapainya nodularitas sekaligus secara alami terjadi pembentukan karbida.



## BAB 5

### KESIMPULAN

#### Modifikasi Desain

Modifikasi desain dengan meletakkan plat tipis 1 mm di *ingate* menghasilkan :

- Pengisian cetakan terjadi dengan baik tanpa terjadi *cold shut* pada bagian tipis.
- Ketebalan plat yang dihasilkan berturut-turut dari *ingate* 2,1 mm, 3,2 mm, 3,85 mm, 4,4 mm dan 5,1 mm
- Terdapat acat sirip pada *sprue* dan plat 3, 4 dan 5 mm akibat adanya celah pada bagian atas cetakan
- Terdapat cacat *shrinkage* pada plat 1 mm akibat kinerja *riser* yang kurang baik
- Terdapat cacat inklusi pada plat 1 mm akibat tekanan logam cair yang tinggi dan pengaruh karbon berlebih pada logam cair.

#### Struktur Mikro

Dari pengamatan struktur mikro dapat disimpulkan:

- Struktur mikro yang terdapat pada setiap plat adalah struktur feritik.
- Karbida terbentuk pada setiap plat dan jumlahnya menurun dengan penambahan ketebalan
- *Skin effect* terbentuk pada setiap plat dan ketebalannya tidak mengalami kecenderungan tertentu.

### Nodularitas dan Jumlah Nodul

Hasil perhitungan nodularitas dan jumlah nodul dengan menggunakan *image analysis* :

- Nodularitas berbanding terbalik dengan penambahan ketebalan. Nilai nodularitas yang diperoleh berturut-turut dari (1-5) mm yaitu 82,25%, 81,85%, 78,8%, 71,9% dan 44,9%
- Jumlah nodul berbanding terbalik dengan penambahan ketebalan. Jumlah nodul yang diperoleh berturut-turut dari (1-5) mm yaitu 1284,1 nodul/mm<sup>2</sup>, 1259,75 nodul/mm<sup>2</sup>, 941,1 nodul/mm<sup>2</sup>, 909,15 nodul/mm<sup>2</sup> dan 512 nodul/mm<sup>2</sup>

### Kekerasan

- Kekerasan besi tuang berdasarkan ASTM yaitu 150-197 HV, tidak dapat dicapai pada setiap plat
- Kekerasan berturut-turut dari (1-5) mm yaitu 147.4 HV, 139.9 HV, 145.5 HV, 133.9 HV dan 139.4 HV
- Kekerasan secara umum menurun dengan penambahan ketebalan.

### Kekuatan tarik dan elongasi

- *Tensile strength* besi tuang berdasarkan ASTM yaitu 42,2 kg/mm<sup>2</sup>, hanya berhasil dicapai pada plat 1 mm dan 2 mm
- *Tensile strength* secara umum menurun dengan penambahan ketebalan. *Tensile strength* berturut-turut dari (1-5) mm yaitu 44 kg/mm<sup>2</sup>, 42.3 kg/mm<sup>2</sup>, 33 kg/mm<sup>2</sup>, 32.8 kg/mm<sup>2</sup> dan 39 kg/mm<sup>2</sup>
- Elongasi yang didapat dari pengujian dibawah standar ASTM untuk besi tuang yaitu 18%
- Elongasi secara umum meningkat dengan penambahan ketebalan. Elongasi berturut-turut dari (1-5) mm yaitu 0.5%, 6%, 2%, 2.5% dan 7%
- Elongasi tidak berbanding lurus dengan nodularitas karena terdapat struktur karbida yang jumlahnya berbanding lurus dengan nodularitas

### Ketebalan Plat Optimum

Ketebalan plat optimum yang dapat dibuat ADI dengan desain pengecoran ini adalah 2,1 mm, dengan jumlah nodul mencapai 1284,1 nodul/mm<sup>2</sup> dan nodularitas 82,25%. Nilai ini masih mungkin untuk ditingkatkan mengingat ketebalan yang dihasilkan belum mencapai 1 mm akibat terjadinya celah pada cetakan.



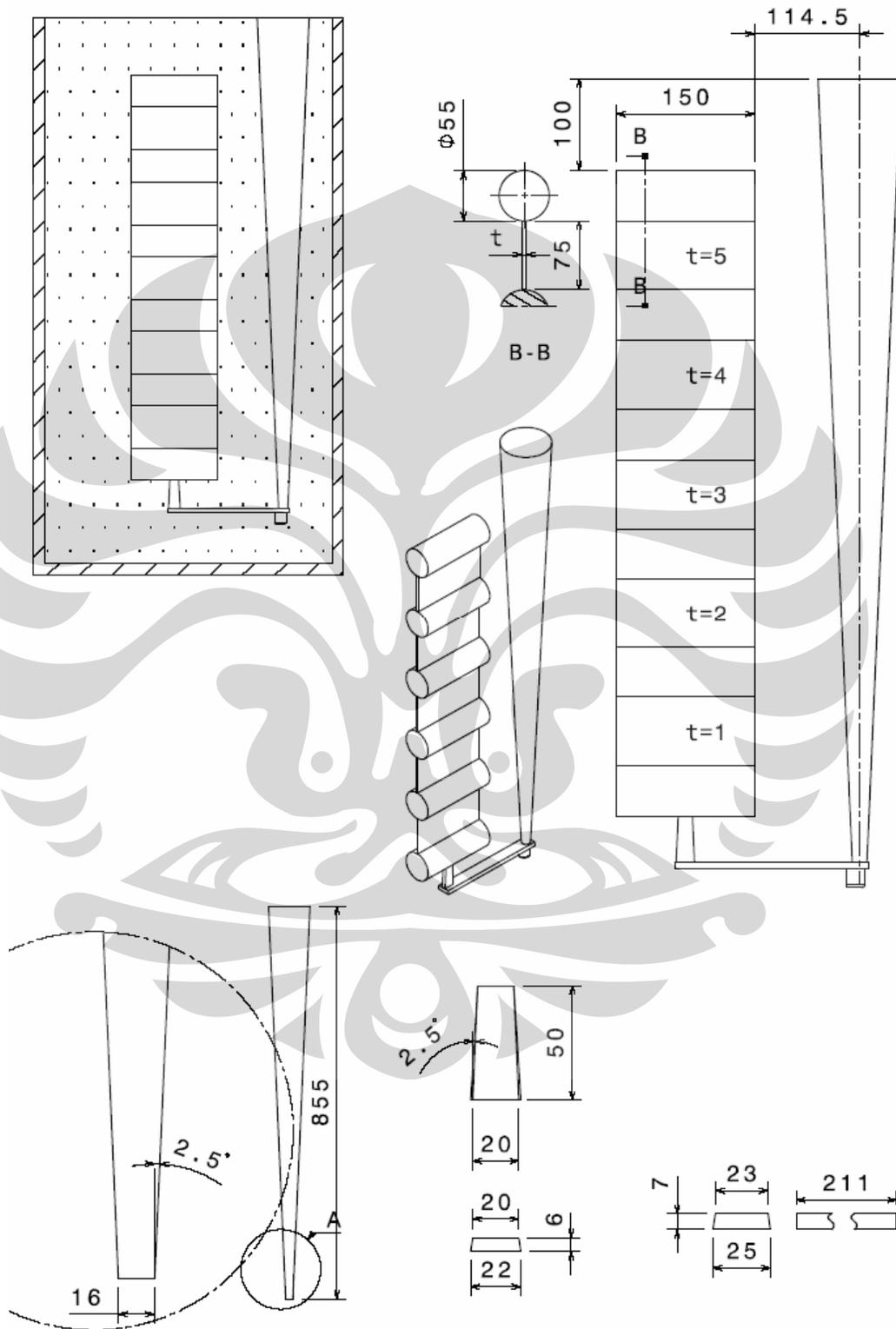
## REFERENSI

1. Stefanescu, D.M. *Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron* AFS Transaction 02-178, 2002.
2. Mourad, Mohamed M. *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron* 68<sup>th</sup> WFC, 7<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> February 2008, pp.161-166.
3. Ductile Iron Society. *A Design Engineer's Digest of Ductile Iron*. 9th Edition. <<http://www.Ductile.org>>
4. Hayrynen, K. L., dkk., *Austempered Ductile Iron – The State of the Industry in 2003*. Keith D. Millis Symposium, 2003.
5. Sulamet-Ariobimo, R. D., *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, 2003.
6. Callister Jr., William D. *Materials Science and Engineering an Introduction*. 6th Edition. New York : John Willey and Sons, Inc., 2003.
7. ASM Handbook. *Casting : Volume 15*. Ohio : ASM International Metal Park. 1990
8. Industrial Metal Casting. *Gating design analysis*. <<http://industrialmetalcasting.com>>
9. Caldera, M. *Influence of Nodule Count on Fatigue Properties of ferritic Thin Wall Ductile Iron*. Materials Science and Technology, August 2007, 23, ProQuest Science Journals pg 1000
10. Martinez, R.A. *Applications of ADI in Hogh Strength Thin Wall Automotive Parts*. World Conference on ADI, 2002.
11. Stefanescu, D. M., *Modeling of Cast Iron Solidification – The Defining Moments*. Metallurgical and Materials Transaction. 30B: p. 927-932, 2007.
12. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction. 02(177), 2002.

13. Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. Vol. 44(7): p. 1180-1187. ISIJ Int., 2004.
14. Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*. AFS, 2005.
15. Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction. 03(109), 2003.



**Lampiran 1**  
**Dimensi saluran tuang**



## Lampiran 2

## Data pengujian struktur mikro dari Iwate University, Jepang

1mm A1

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.1-200x

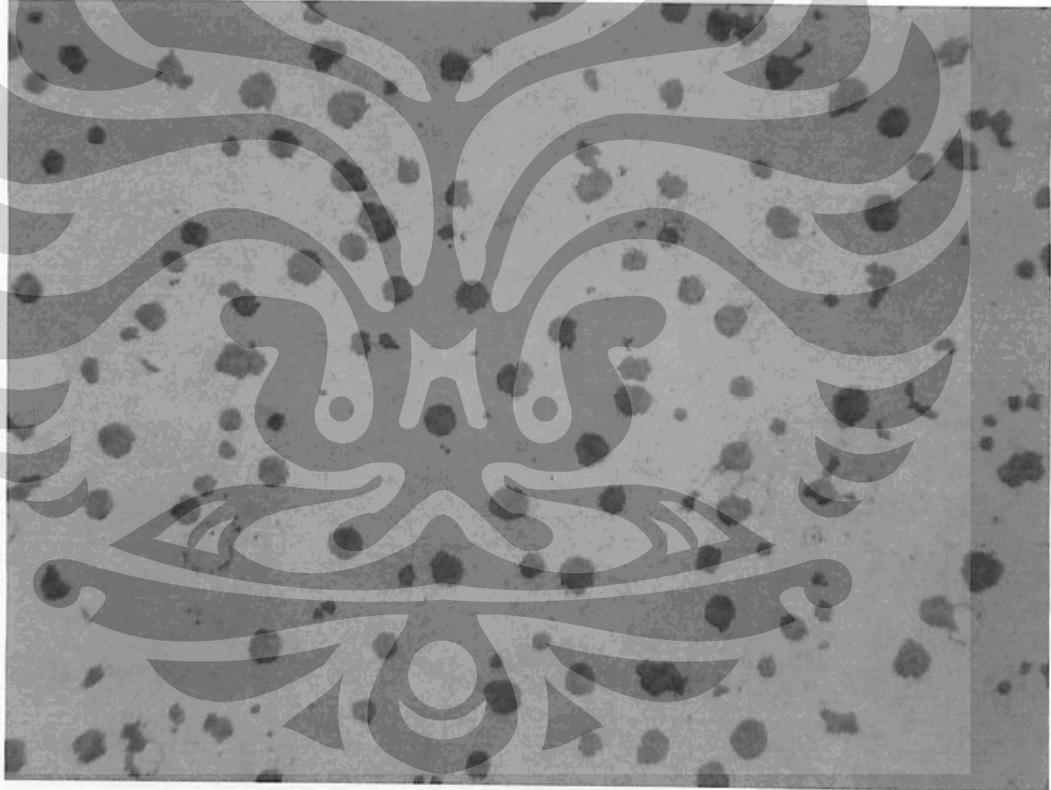
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 79.1[%]  
 黒鉛粒数 1057.6個/mm<sup>2</sup>  
 黒鉛平均粒径 13.0[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 10.5[%]

視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ m

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均	27個	102個	79.1%	1057.6個/mm <sup>2</sup>	13.0 $\mu$ m	10.3%
視野1	27	102	79.1	1057.6	13.0	10.5

視野1

200  $\mu$ m

2mm A1

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.2-200x

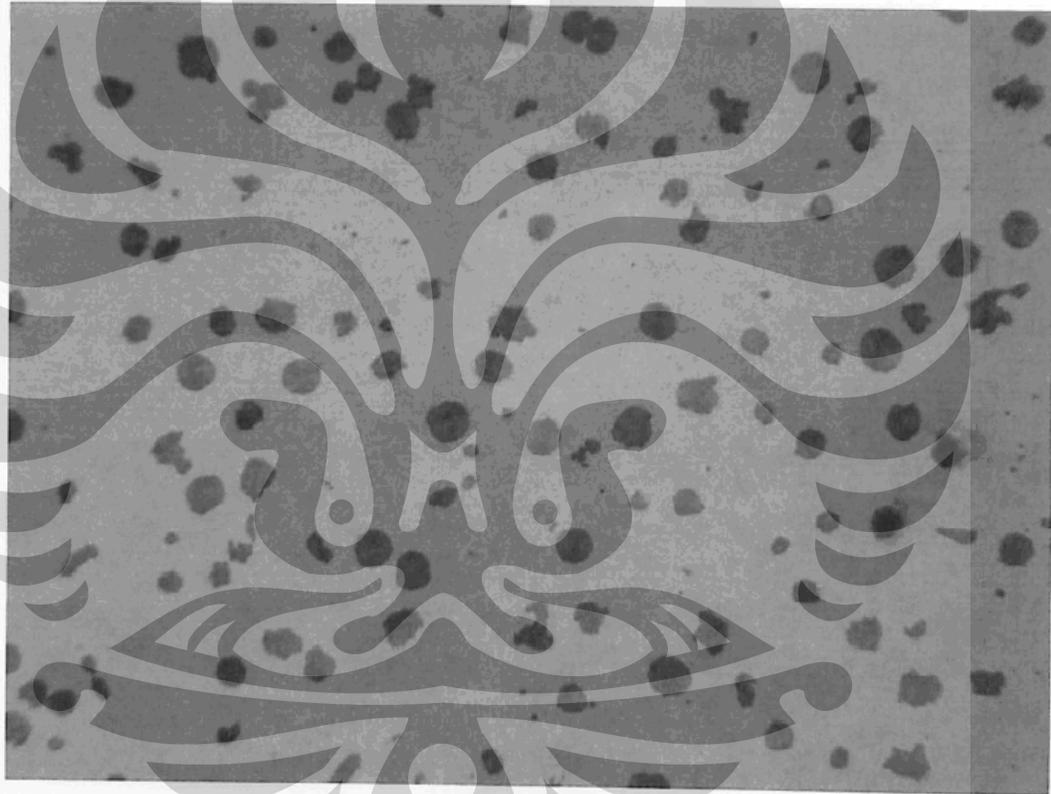
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 82.6[%]  
 黒鉛粒数 886.5[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 14.6[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 10.9[%]

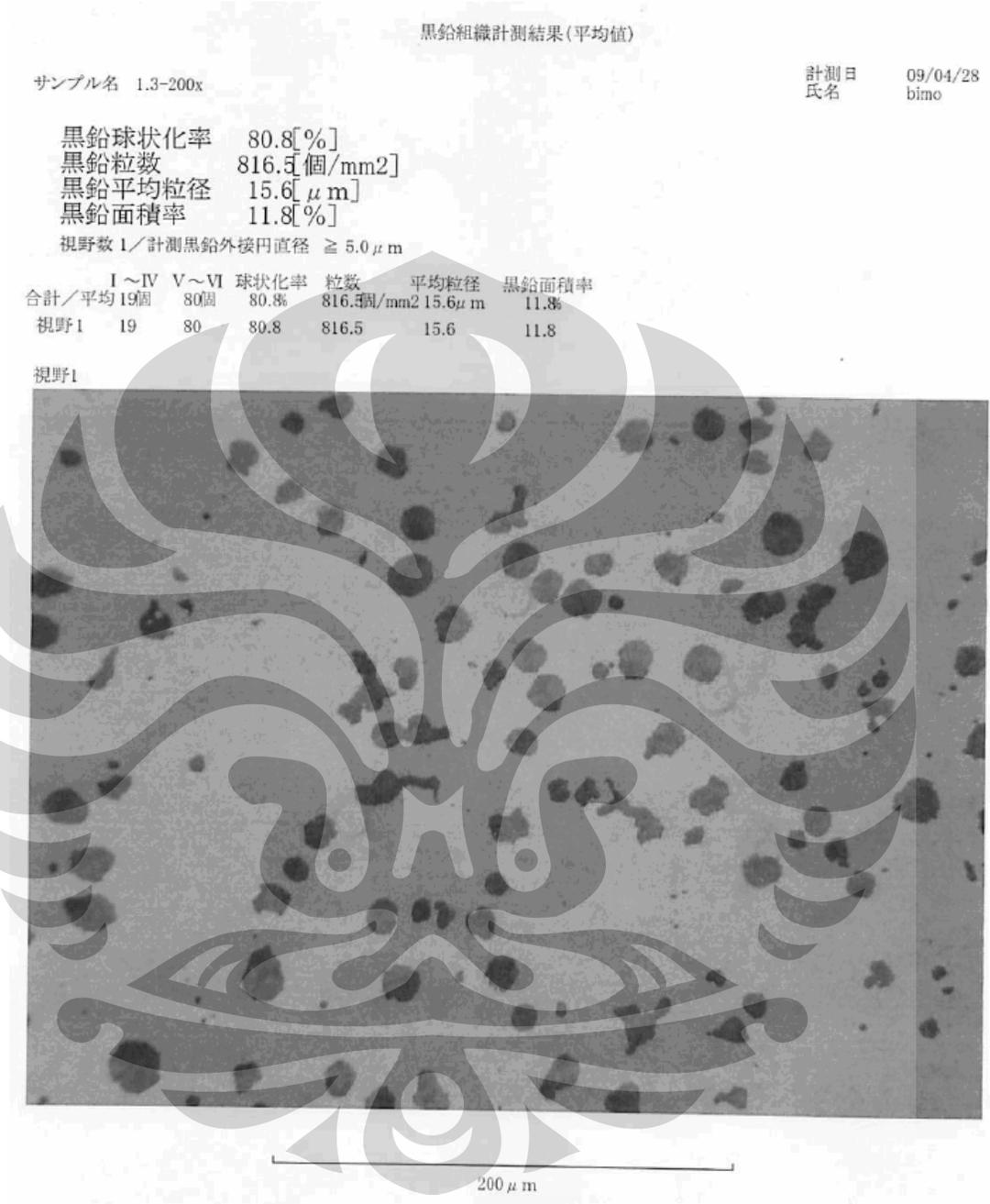
視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ m

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均	19個	90個	82.6%	886.5個/mm <sup>2</sup>	14.6 $\mu$ m	10.9%
視野1	19	90	82.6	886.5	14.6	10.9

視野1

200  $\mu$ m

## 3mm A1



4mm A1

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

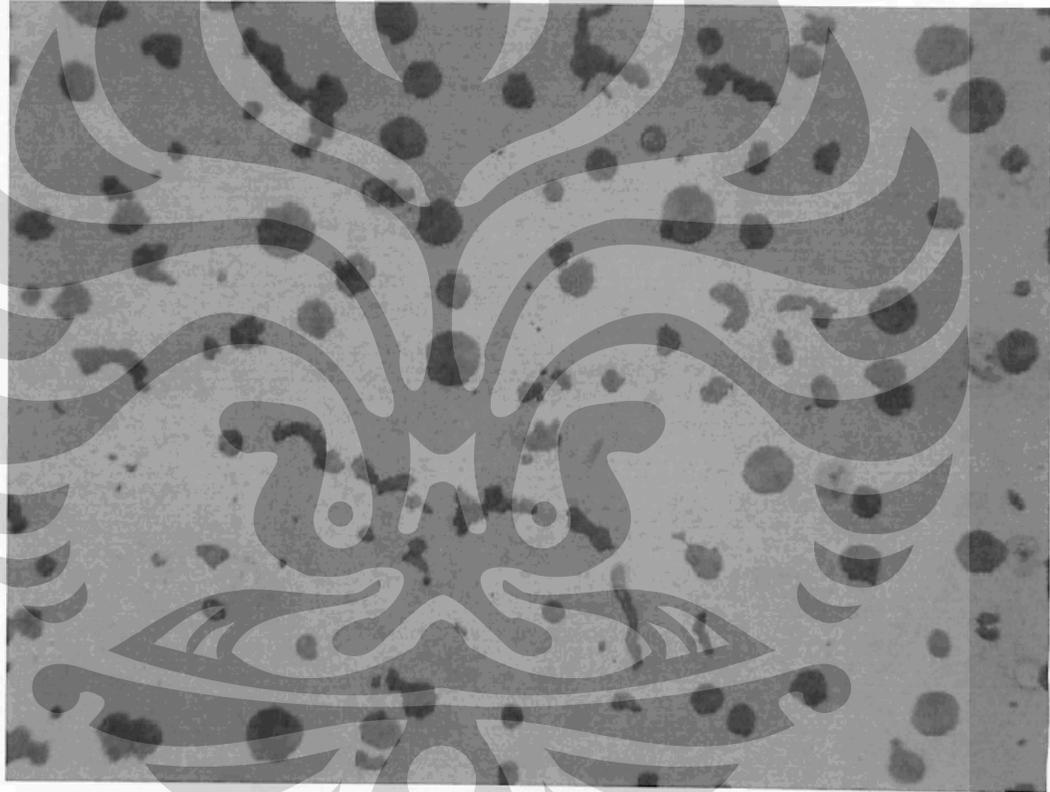
サンプル名 1.4-200x

計測日 09/04/28  
氏名 bimo

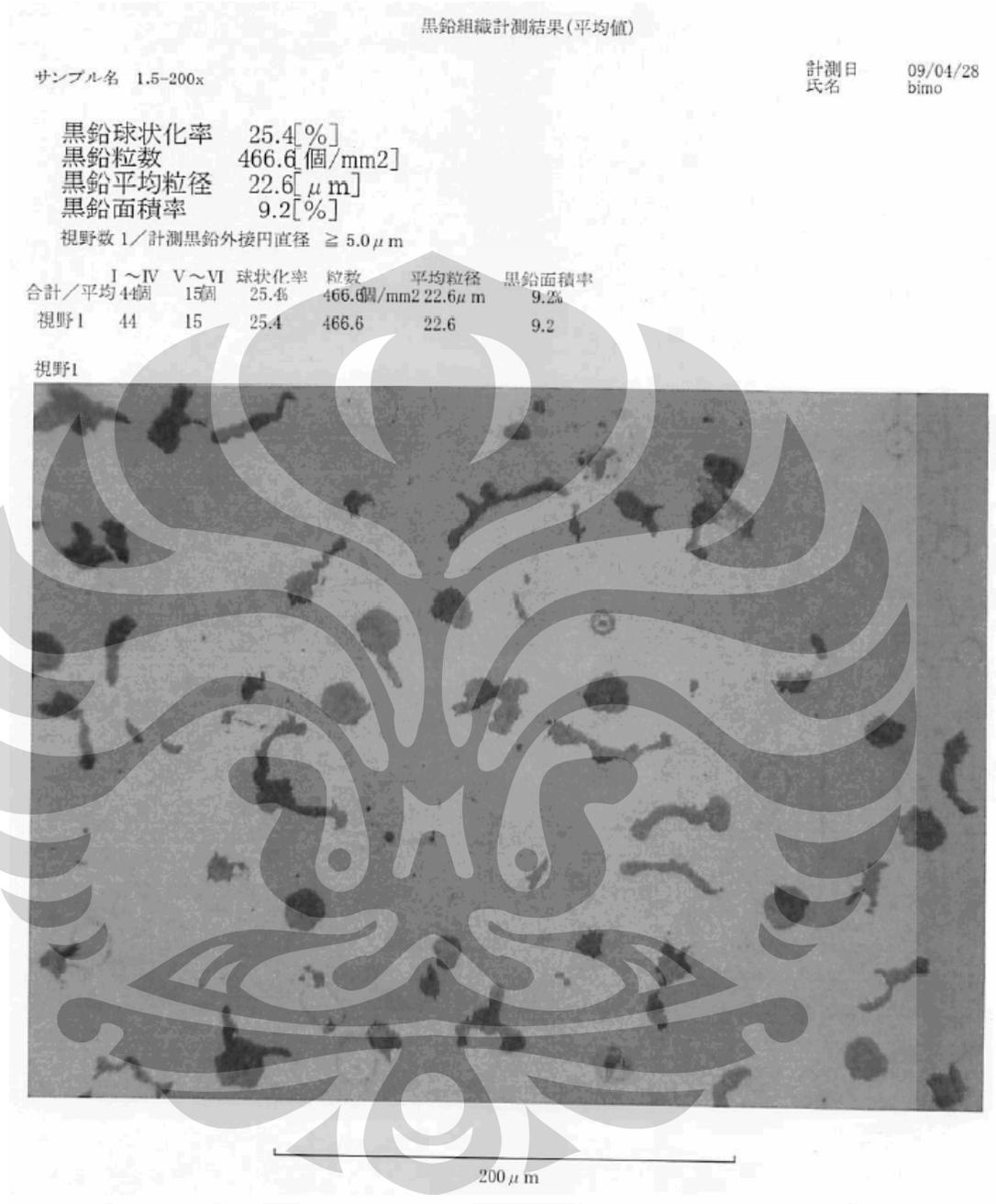
黒鉛球状化率 73.0[%]  
 黒鉛粒数 847.7[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 16.8[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 13.0[%]  
 視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ m

	I ~ IV	V ~ VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計 / 平均 27個	73個		73.0%	847.7個/mm <sup>2</sup>	16.8 $\mu$ m	13.0%
視野1	27	73	73.0	847.7	16.8	13.0

視野1

200  $\mu$ m

## 5mm A1



1mm A2

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.1-100x

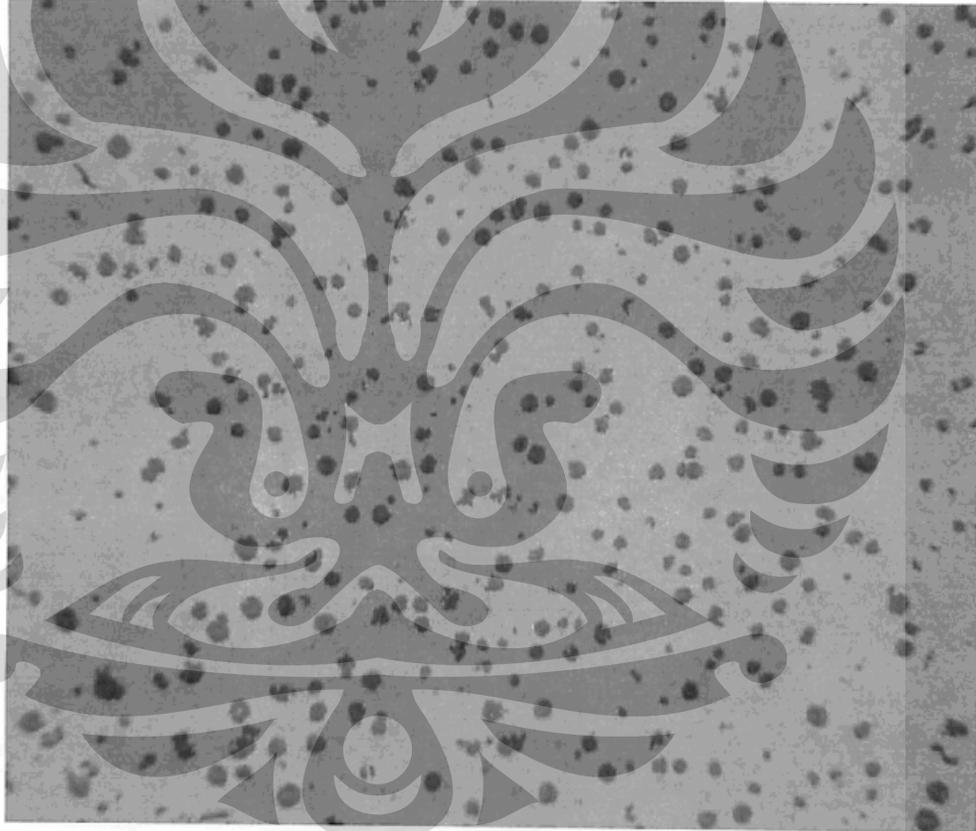
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 85.4[%]  
 黒鉛粒数 1510.6[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 10.6[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 9.8[%]

視野数1/計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0\mu$ m

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均54個	317個		85.4%	1510.6個/mm <sup>2</sup>	10.6 $\mu$ m	9.8%
視野1	54	317	85.4	1510.6	10.6	9.8

視野1

200  $\mu$ m

2mm A2

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

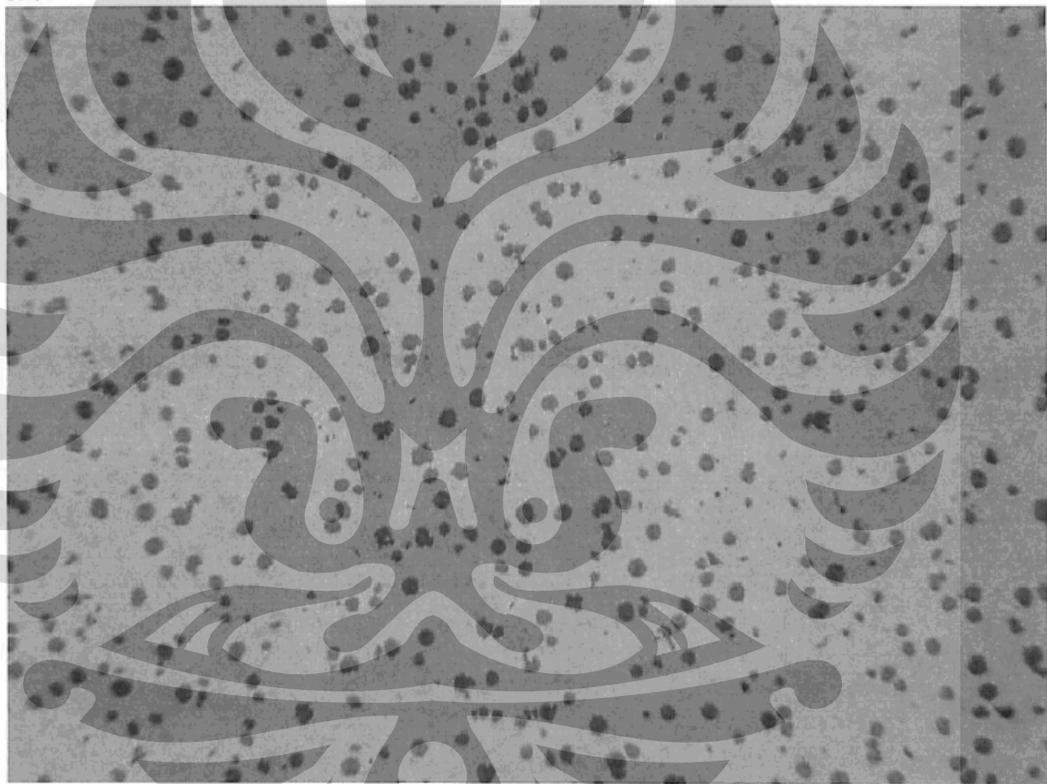
サンプル名 1.2-100x

計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 81.1[%]  
 黒鉛粒数 1633.0[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 10.8[ $\mu\text{m}$ ]  
 黒鉛面積率 11.0[%]  
 視野数1/計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0\mu\text{m}$

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均91個	390個	390個	81.1%	1633.0個/mm <sup>2</sup>	10.8 $\mu\text{m}$	11.0%
視野1	91	390	81.1	1633.0	10.8	11.0

視野1

200  $\mu\text{m}$

## 3mm A2

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

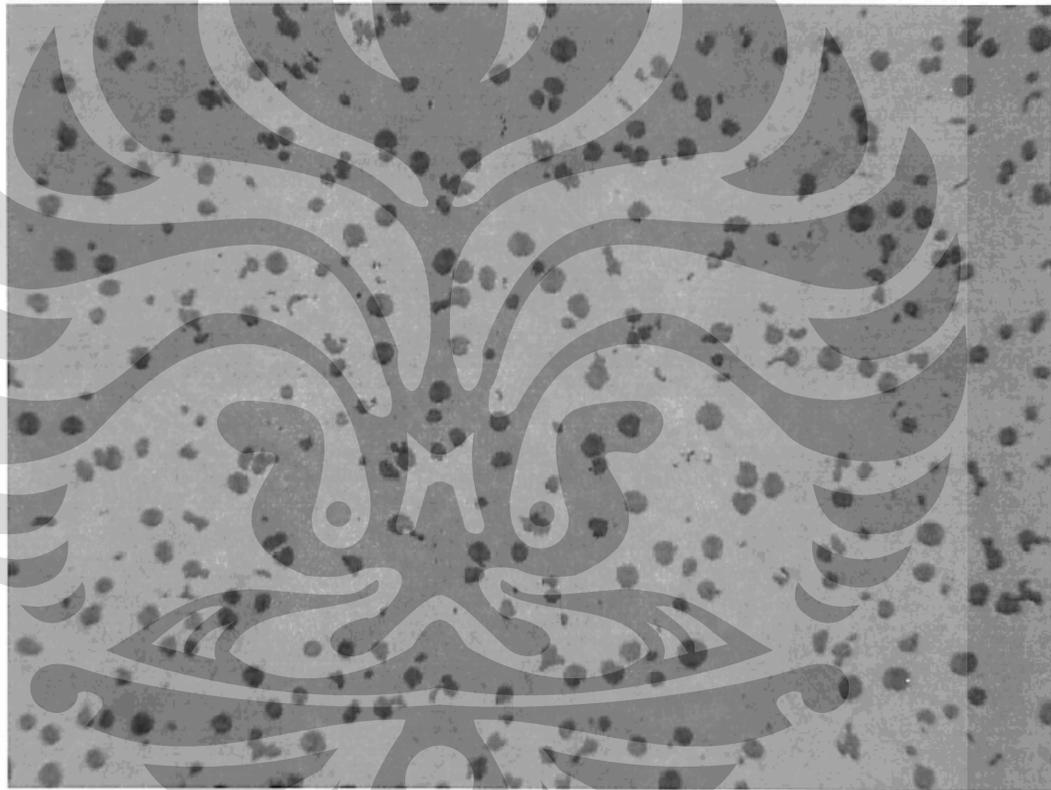
サンプル名 1.3-100x

計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 76.8[%]  
 黒鉛粒数 1065.7[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 13.8[ $\mu\text{m}$ ]  
 黒鉛面積率 11.2[%]  
 視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0\mu\text{m}$

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均	72個	23個	76.8%	1065.7個/mm <sup>2</sup>	13.8 $\mu\text{m}$	11.2%
視野1	72	23	76.8	1065.7	13.8	11.2

視野1

200  $\mu\text{m}$

4mm A2

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.4-100x

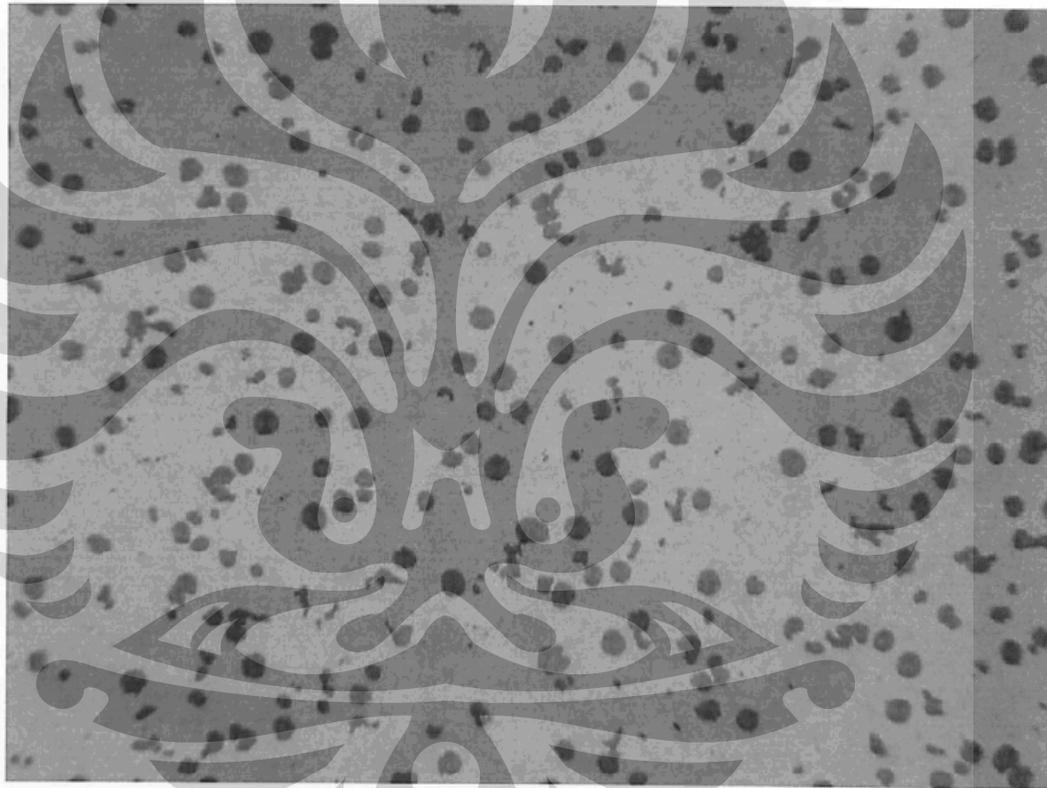
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 70.8[%]  
 黒鉛粒数 970.6[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 15.4[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 12.5[%]

視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ m

	I ~ IV	V ~ VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計 / 平均	82個	199個	70.8%	970.6個/mm <sup>2</sup>	15.4 $\mu$ m	12.5%
視野1	82	199	70.8	970.6	15.4	12.5

視野1

200  $\mu$ m

5mm A2

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.5-100x

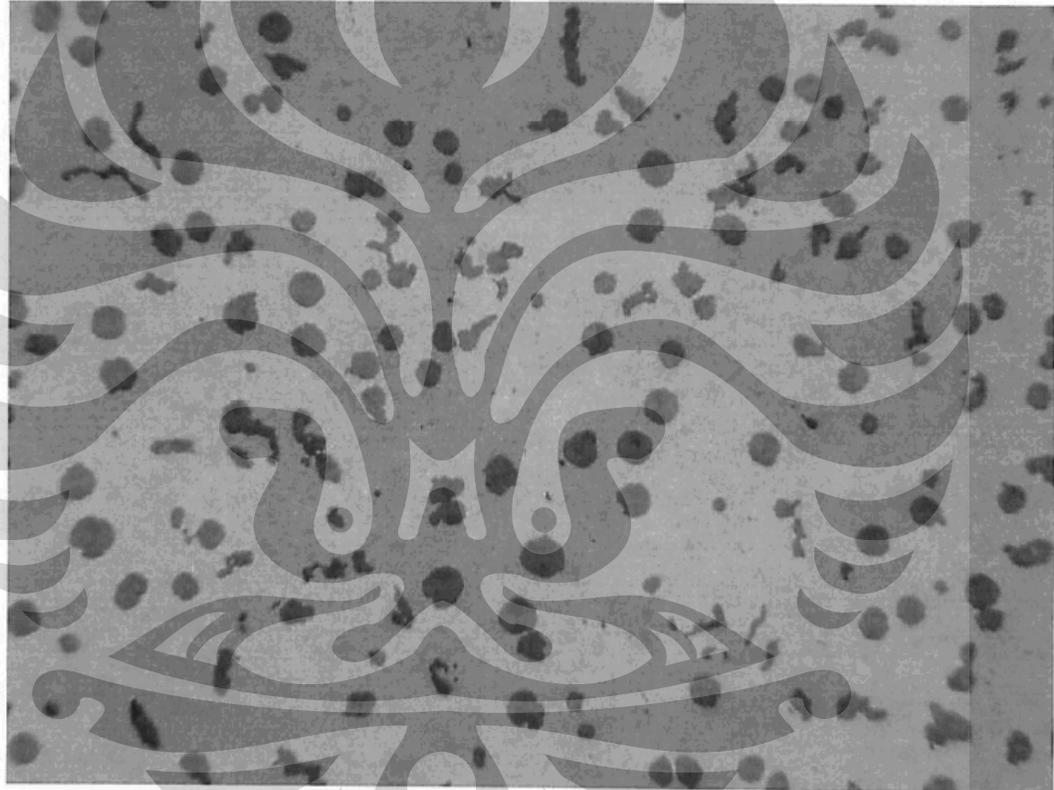
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 64.4[%]  
 黒鉛粒数 557.4[個/mm<sup>2</sup>]  
 黒鉛平均粒径 21.3[ $\mu$ m]  
 黒鉛面積率 13.0[%]

視野数 1 / 計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ m

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均5個	103個		64.4%	557.4個/mm <sup>2</sup>	21.3 $\mu$ m	13.0%
視野1	57	103	64.4	557.4	21.3	13.0

視野1

200  $\mu$ m