



**PERBANDINGAN MODEL PENGECORAN *GRAVITY* DENGAN ANTI  
*GRAVITY* UNTUK PEMBUATAN DINDING TIPIS BESI TUANG  
NODULAR**

**SKRIPSI**

**TAUFIQURRAHMAN**

**040504066X**

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL**

**DEPOK**

**JUNI 2009**



**PERBANDINGAN MODEL PENGECORAN *GRAVITY* DENGAN ANTI  
*GRAVITY* UNTUK PEMBUATAN DINDING TIPIS BESI TUANG  
NODULAR**

**SKRIPSI**

**TAUFIQURRAHMAN**

**040504066X**

**UNIVERSITAS INDONESIA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL  
DEPOK  
JUNI 2009**



**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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



**Nama : Taufiqurrahman  
NPM : 040504066X  
Tanda Tangan : .....  
Tanggal : 26 Juni 2009**



**HALAMAN PENGESAHAN**

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Taufiqurrahman  
NPM : 040504066X  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul Skripsi : Perbandingan Model Pegecoran *Gravity* Dengan  
Anti *Gravity* Untuk Pembuatan 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 : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT (.....)  
Penguji 2 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, MT (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal :



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan kenikmatan-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Perbandingan Model Pengecoran Gravity Dengan Anti Gravity Untuk Pembuatan Dinding Tipis Besi Tuang Nodular”** disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tugas skripsi ini.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini 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 penyusunan skripsi ini;
- 2) Ibu Rianti Sulamet Ariobimo, selaku pembimbing dan teman selama pembuatan skripsi, yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberi pengarahan dan bimbingan serta diskusi untuk menyelesaikan tugas skripsi ini;
- 3) Aliq Qurbani dan Garda Muhammad Ichsan, selaku teman selama pembuatan skripsi, yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas skripsi ini;
- 4) Seluruh pihak PT. X yang telah banyak membantu dalam program penelitian mulai dari pegarahan sampai memberikan data-data yang saya butuhkan;
- 5) Orang tua dan keluarga besar saya yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material; dan
- 6) Para sahabat saya yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala 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 dibawah ini:

Nama : Taufiqurrahman  
NPM : 040504066X  
Program Studi : Logam  
Departemen : Teknik Metalurgi dan Material  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

### **Perbandingan Model Pengecoran *Gravity* Dengan Anti *Gravity* Untuk Pembuatan Dinding Tipis Besi Tuang Nodular**

beserta 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 tanpa meminta izin dari 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

(Taufiqurrahman)



## ABSTRAK

Nama : Taufiqurrahman  
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material  
Judul : Perbandingan Model Pengecoran *Gravity* Dengan Anti *Gravity*  
Untuk Pembuatan Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Kebutuhan akan penghematan energi telah menyebabkan dikembangkannya material yang ringan, *light weight*, dan proses produksi yang dapat mengurangi berat materials tanpa mengurangi kualitasnya. Salah satunya adalah pengembangan proses *casting* untuk membuat *thin wall ductile iron* (TWDI) *castings*. Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah menentukan jenis desain yang paling sederhana dan paling mungkin untuk diterapkan untuk membuat FCD- TWDI yang memenuhi standar sebagai bahan baku ADI- TWDI.

Pada penelitian ini akan dilakukan proses pengecoran plat untuk dibuat benda uji dengan 2 (dua) buah modal desain cetakan yaitu model *counter gravity casting* dan model *gravity casting* untuk ketebalan 5, 4, 3, 2, dan 1 mm. Jenis plat yang akan dibuat adalah FCD45. Cetakan yang digunakan adalah pasir furan dengan nilai CE dijaga di atas 4,3%, sedangkan polanya akan dibuat dari kayu, proses pengecoran akan dilakukan secara vertikal dan menggunakan saluran tuang.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan model *counter gravity casting* bisa menghasilkan plat dengan jumlah nodul yang lebih banyak, persen nodularitas yang lebih tinggi, serta sifat mekanis yang lebih unggul dibandingkan dengan menggunakan model *gravity casting*.

Kata kunci :

Dinding tipis besi tuang nodular, *gravity casting*, *counter gravity casting*.



## ABSTRACT

Name : Taufiqurrahman  
Major : Metallurgy and Materials Engineering  
Title : The Comparison of gravity Casting with Counter Gravity to Produce Thin Wall Ductile Iron

The demand on energy saving has caused the development of light weight materials and the production process to reduce it is weight without reducing the quality. The development of thin wall ductile iron (TWDI) casting process is one of it. The goal of this research is to decide the most simple and possible design to be applied on making FCD-TWDI that comply the standard as ADI-TWDI raw material.

On this reasearch, plate casting process will be conducted to make two specimens as design model which are counter gravity casting model and casting gravity model for variation of thickness of 5, 4, 3, 2, and 1 mm. The type of plate that will be made is FCD45. The cast used is made of furan sand with CE value maintained above 4.3%, while the pattern plate is made of wood, the casting process will be conducted vertically using pouring system.

The result of this research shows that using the counter gravity casting model can produce plate with a greater number of nodul, higher nodularity percentage and better mechanical properties compare to the using of gravity casting model.

Keyword :

Thin wall ductile iron, gravity casting, counter gravity casting.



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI</b> .....	<b>ii</b>
<b>PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Batasan Masalah.....	2
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b> .....	<b>3</b>
2.1 Besi Tuang ( <i>Cast Iron</i> ).....	3
2.2 Besi Tuang Nodular (BTN).....	4
2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular.....	5
2.2.2 Faktor Pengaruh Pada Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular.....	6
2.2.3 Pengecoran Besi Tuang Nodular.....	9
2.2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular.....	9
2.2.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN).....	13
2.3 Besi Nodular Austemper.....	18
2.3.1 Sifat Mekanik ADI.....	19
2.3.2 Penelitian Terkini Pengecoran Dinding Tipis ADI.....	23
2.4 Sistem Saluran Tuang ( <i>Gating System</i> ).....	24
2.4.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang.....	25
2.4.2 Komponen Sistem Saluran Tuang.....	25
2.4.3 Prinsip Aliran Fluida.....	26
2.4.4 Pengisian Cetakan.....	28
2.4.5 Simulasi <i>software</i> sistem saluran tuang.....	29
2.5 Pengecoran Melawan Gravitasi .....	29
2.5.1 <i>Counter-gravity low-pressure casting of air-melted alloys (CLA)</i> .....	30
2.5.2 <i>Counter-gravity low-pressure casting of vacuum-melted alloys (CLV)</i> .....	31
2.5.3 <i>Check-valve casting (CV)</i> .....	32
2.5.4 <i>Counter-gravity low-pressure air-melted sand casting (CLAS)</i> ....	32
2.6 Gravity Casting.....	33
2.6.1 Gravity Casting dengan Cetakan Terbuka.....	34
2.6.2 Gravity Casting Model Cetakan Tertutup.....	34



<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>35</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	35
3.2 Alat dan Bahan.....	36
3.2.1 Alat.....	36
3.2.2 Bahan .....	38
3.3 Prosedur Penelitian.....	39
3.3.1 Pembuatan Desain Cetak.....	39
3.3.2 Pembuatan Pola.....	40
3.3.3 Pembuatan Cetak.....	41
3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam.....	42
3.3.4.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC).....	42
3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD).....	43
3.3.5 Pengecoran.....	44
3.3.6 Preparasi Sampel.....	45
3.3.6.1 Preparasi Sampel Uji Komposisi Kimia.....	47
3.3.6.2 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro.....	47
3.3.6.3 Preparasi Uji Kekerasan.....	48
3.3.6.4 Preparasi Uji Tarik.....	49
3.3.7 Pengujian.....	49
3.3.7.1 Uji Komposisi Kimia.....	49
3.3.7.2 Simulasi Software Z-Cast.....	49
3.3.7.3 Pengamatan Struktur Mikro.....	49
3.3.7.4 Pengujian kekerasan.....	52
3.3.7.5 Pengujian Tarik.....	53
<b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>54</b>
4.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	54
4.2 Simulasi Z-Cast.....	56
4.3 Pengamatan Visual.....	57
4.4 Pengamatan Struktur Mikro.....	58
4.4.1 Perhitungan Ketebalan Efek Kulit .....	62
4.4.2 Nodularitas.....	64
4.4.3 Jumlah Nodul.....	66
4.4.4 Diameter Rata-rata Nodul.....	67
4.5 Uji Mekanik.....	68
4.5.1 Uji Tarik.....	68
4.5.2 Uji Kekerasan.....	71
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>72</b>
<b>DAFTAR REFERENSI.....</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>76</b>



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1	Diagram Fe-Fe <sub>3</sub> C ..... 3
Gambar 2.2	Klasifikasi besi cor ..... 4
Gambar 2.3	Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN ..... 6
Gambar 2.4	Bentuk grafit pada hasil cor-coran ..... 6
Gambar 2.5	Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital) ..... 14
Gambar 2.6	Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital) ..... 14
Gambar 2.7	Karbida primer (chill terbalik) di dalam BTN perlitik (200X, etsa Nital) ..... 14
Gambar 2.8	Struktur Mikro ADI ..... 20
Gambar 2.9	Stang piston ADI-TWC ..... 21
Gambar 2.10	Ketahanan retak ADI vs temperatur / waktu austemper dan temperatur pengujian ..... 23
Gambar 2.11	Pengaruh mangan terhadap ketahanan retak ADI ..... 23
Gambar 2.12	Elemen utama sistem saluran tuang ..... 25
Gambar 2.13	Ilustrasi skematik aplikasi Teori Bernoulli untuk sistem Saluran Tuang..... 27
Gambar 2.14	Bentuk aliran logam pada beberapa bentuk <i>sprue</i> ..... 27
Gambar 2.15	Nilai $N_R$ untuk berbagai jenis aliran ..... 28
Gambar 2.16	Skematik prose CLA..... 30
Gambar 2.17	Skematik proses CLV..... 31
Gambar 2.18	Skematik prose CV..... 32
Gambar 2.19	Inti dari proses CLAS..... 33
Gambar 2.20	Model <i>gravity casting</i> cetakan terbuka..... 34
Gambar.2.21	<i>Gravity casting</i> model cetakan tertutup..... 34
Gambar 3.1	Model cetakan penelitian ..... 35
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian ..... 36
Gambar 3.3	Desain pengecoran Stefanescu ..... 39
Gambar 3.4	Desain pengecoran untuk penelitian ..... 40
Gambar 3.5	Pola cetakan sebelum dibentuk <i>pattern plate</i> ..... 40
Gambar 3.6	<i>Pattern plate</i> yang telah jadi..... 41
Gambar 3.7	Sepasang cetakan untuk model T3..... 41
Gambar 3.8	Penggabungan cetakan model (T3)..... 42
Gambar 3.9	Proses pembuatan logam cair di <i>electric furnace</i> ..... 44
Gambar 3.10	Metode pengambilan sampel untuk pengujian ..... 45
Gambar 3.11	Metode penamaan sampel..... 46
Gambar 3.12	Sampel hasil <i>mounting</i> ..... 47
Gambar 3.13	Pengambilan foto struktur mikro ..... 50
Gambar 3.14	Mikroskop optik digital ..... 50
Gambar 3.15	Metode perhitungan efek kulit..... 52
Gambar 3.16	Bentuk jejak metode Vickers..... 52
Gambar 3.17	<i>Microhardness tester</i> ..... 53
Gambar 3.18	<i>Tensile strength machine</i> ..... 53



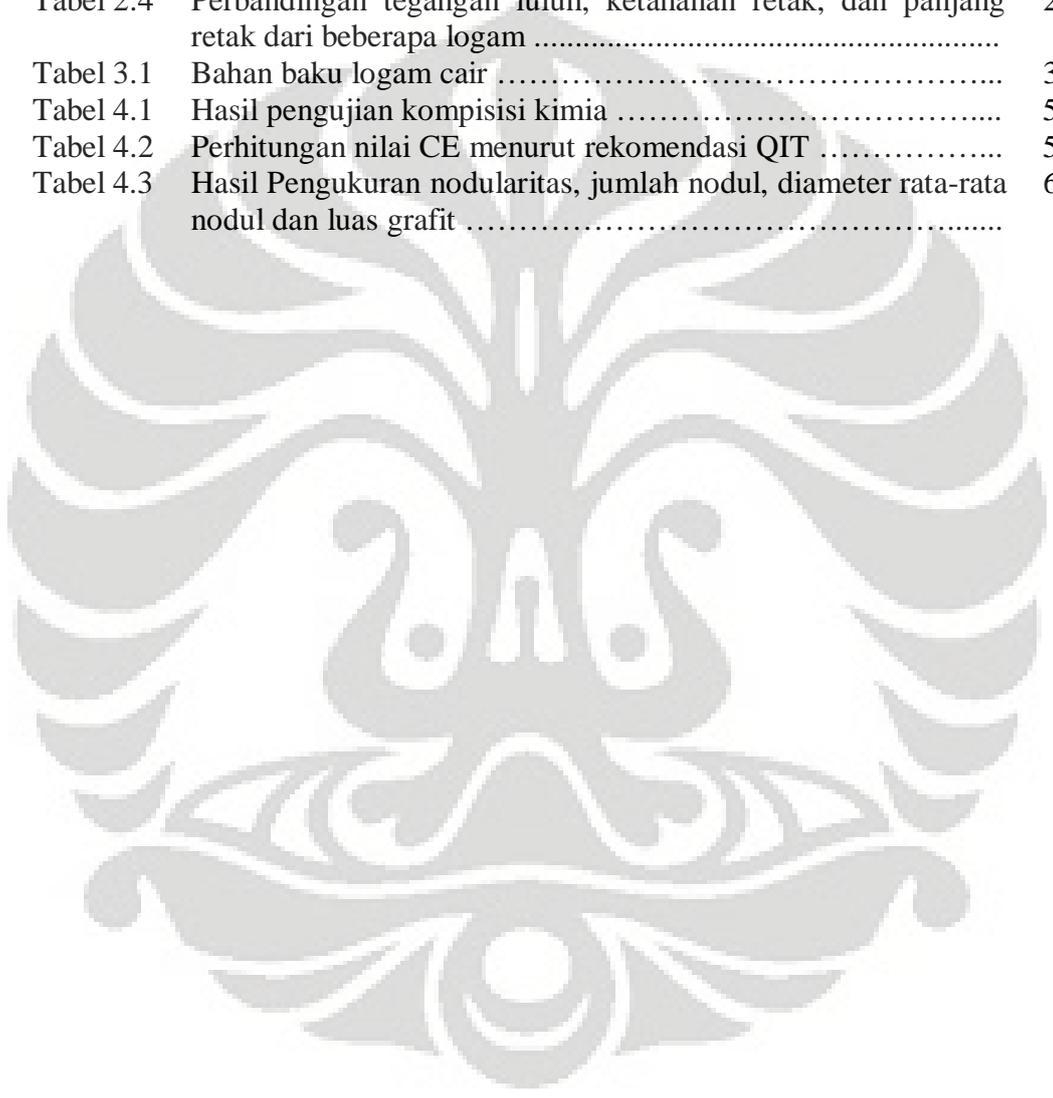
Gambar 4.1	Fenomena turbulensi.....	57
Gambar 4.2	Pengamatan visual sampel sebelum dipotong.....	57
Gambar 4.3	Pengamatan visual sampel sesudah dipotong.....	58
Gambar 4.4	Struktur mikro non-etsa (pembesaran 200X).....	59
Gambar 4.5	Struktur mikro etsa (pembesaran 200X).....	60
Gambar 4.6	Struktur mikro etsa (pembesaran 200X).....	61
Gambar 4.7	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1 bagian tepi.....	62
Gambar 4.8	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1 bagian tengah.....	62
Gambar 4.9	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T3 bagian tepi.....	63
Gambar 4.10	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T3 bagian tengah.....	63
Gambar 4.11	Diagram nodularitas pada posisi A1.....	65
Gambar 4.12	Diagram nodularitas pada posisi A2.....	65
Gambar 4.13	Grafik perbandingan jumlah nodul T1.....	66
Gambar 4.14	Grafik perbandingan jumlah nodul T3.....	66
Gambar 4.15	Grafik perbandingan diameter nodul A1.....	67
Gambar 4.16	Grafik perbandingan diameter nodul A2.....	67
Gambar 4.17	Grafik Perbandingan nilai <i>tensile strength</i> .....	68
Gambar 4.18	Grafik <i>tensile strength</i> vs nodularitas T1.....	69
Gambar 4.19	Grafik <i>tensile strength</i> vs nodularitas T3.....	69
Gambar 4.20	Grafik T1 <i>tensile strength</i> vs diameter nodul.....	70
Gambar 4.21	Grafik T3 <i>tensile strength</i> vs diameter nodul.....	70
Gambar 4.22	Grafik nilai kekerasan vs desain.....	71





**DAFTAR TABEL**

	<b>Halaman</b>
Tabel 2.1 Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN.....	5
Tabel 2.2 Keterangan bentuk grafit pada hasil cor-coran .....	7
Tabel 2.3 Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI .....	19
Tabel 2.4 Perbandingan tegangan luluh, ketahanan retak, dan panjang retak dari beberapa logam .....	21
Tabel 3.1 Bahan baku logam cair .....	38
Tabel 4.1 Hasil pengujian komposisi kimia .....	54
Tabel 4.2 Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT .....	55
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran nodularitas, jumlah nodul, diameter rata-rata nodul dan luas grafit .....	64





# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan penghematan energi telah menyebabkan dikembangkannya material yang ringan, *light weight*, dan proses produksi yang dapat mengurangi berat materials tanpa mengurangi kualitasnya. Industri otomotif telah berusaha untuk mengembangkan besi yang mempunyai sifat yang lebih unggul dari alumunium, karena biaya untuk penggunaan alumunium lebih tinggi dari pada biaya penggunaan besi. Salah satunya pengembangan tentang besi adalah pengembang proses *casting* untuk membuat *thin wall ductile iron* (TWDI) *castings*. TWDI ini digunakan sebagai bahan baku pembuatan *Austempered ductile iron* (ADI). *Austempered ductile iron* diproduksi karena mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas disain, mampu pemesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatigue<sup>[1]</sup>.

Pengurangan dimensi benda menghasilkan komponen yang lebih ringan sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar kendaraan. Misalnya dengan pengurangan berat benda sebesar 250 *pounds* (113,6 kg) secara umum cukup meningkatkan penghematan bahan bakar sebesar 1 *mpg* (0,425 km/l)<sup>[2]</sup>. Oleh karena itu, *Austempered ductile iron* dapat kita temui dalam berbagai bentuk permintaan untuk aplikasi otomotif.

Teknologi ini sangat potensial di kembangkan di Indonesia karena banyak industri pengecoran di Indonesia yang berbasis pada pengecoran besi tuang kelabu (FC) dan besi tuang nodular (FCD). Dengan melihat pada potensi yang dimiliki oleh Indonesia ini, maka dirasa sangat perlu untuk lebih memperhatikan industri pengecoran terutama dalam upaya sosialisasi peningkatan FC menjadi FCD sehingga Indonesia dapat menjadi salah satu produsen komponen otomotif dari ADI, lebih-lebih pada saat ini *issue* dunia adalah konversi energi, yang salah satunya diwujudkan dalam bentuk teknologi *hybrid car*.



## 1.2 Perumusan Masalah

Dalam proses pembuatan plat TWDI yang menjadi masalah utama adalah kecepatan pendinginan. Kecepatan pendinginan yang terlalu tinggi akan menyebabkan terbentuknya karbida yang sangat tidak diharapkan keberadaannya. Kecepatan pendinginann dapat diatur melalui beberapa parameter, dan salah satunya adalah melalui desain cetakan. Desain cetakan yang diajukan pada penelitian ini ada 2 buah, yaitu model pengecoran searah gravitasi (*gravity casting*) dan model pengecoran berlawanan arah gravitasi (*counter gravity casting*).

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah menentukan jenis desain yang paling sederhana dan paling mungkin untuk diterapkan untuk membuat FCD- TWDI yang memenuhi standar sebagai bahan baku ADI- TWDI.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan dengan dilakukan penelitian ini akan dapat dihasilkan suatu teknologi sederhana yang mudah dan murah yang dapat diaplikasikan di dalam semua strata dunia industri pengecoran Indonesia, sehingga produk cor yg dihasilkan mempunyai nilai jual dan daya saing yang tinggi.

## 1.5 Batasan Penelitian

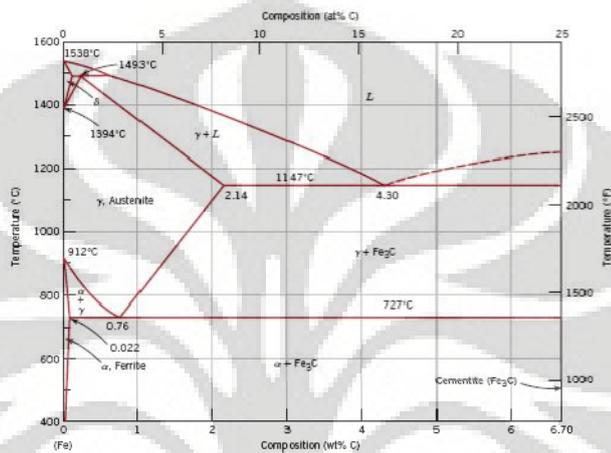
Pada penelitian ini akan dilakukan proses pengecoran plat untuk dibuat benda uji dengan 2 (dua) buah modal desain cetakan yaitu model *counter gravity casting* dan model *gravity casting* untuk ketebalan 5, 4, 3, 2, dan 1 mm. Jenis plat yang akan dibuat adalah FCD45.

Cetakan akan dibuat dengan pasir furan, sedangkan polanya akan dibuat dari kayu, proses pengecoran akan dilakukan secara vertikal dan menggunakan saluran tuang.

## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1 Besi Tuang (*Cast Iron*)

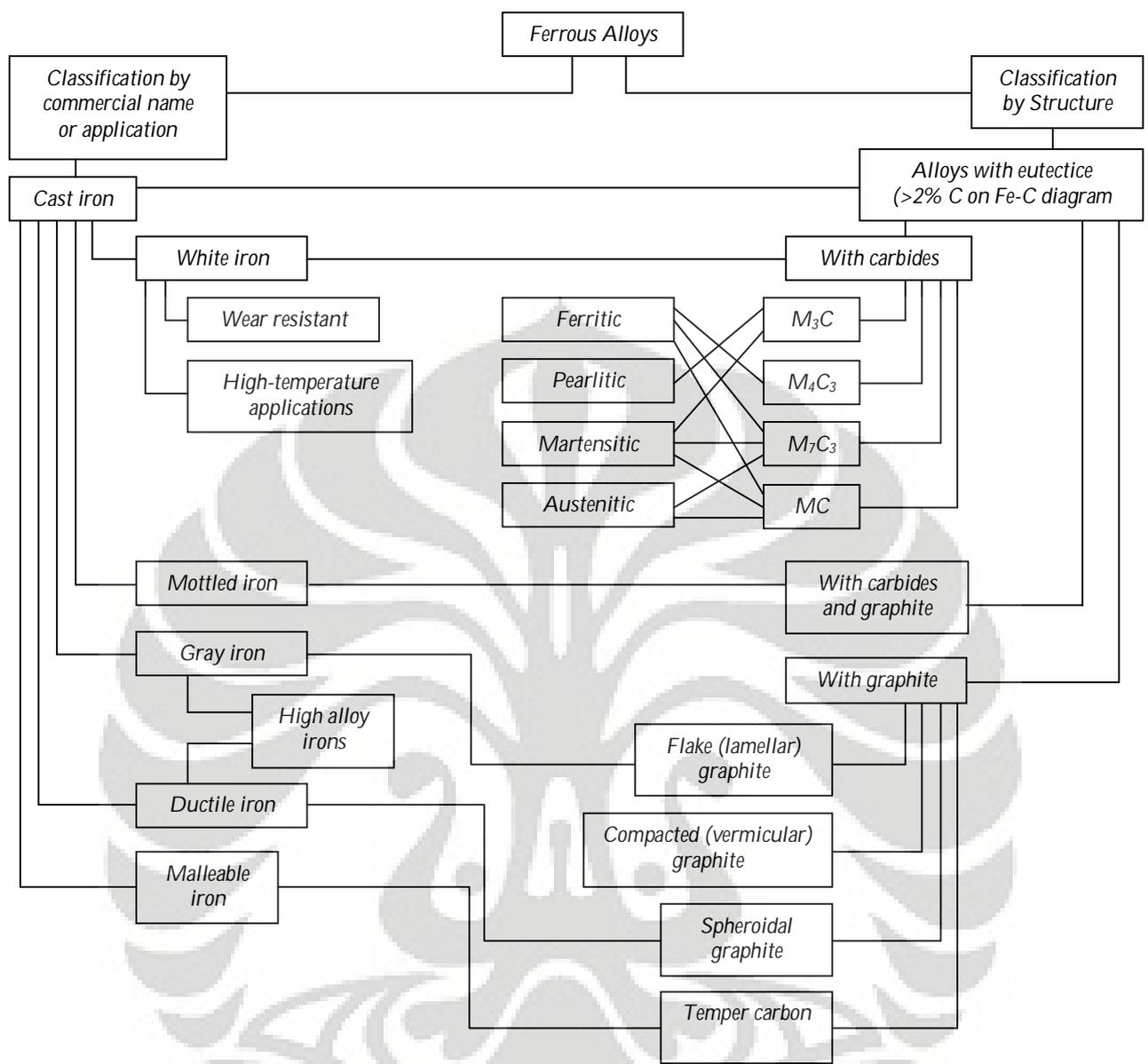
Besi tuang merupakan kelompok paduan besi dengan kandungan karbon di atas 2,14%. Namun demikian, kebanyakan besi tuang mengandung karbon antara 3,0 sampai 4,5%, dan ditambahkan dengan unsur paduan yang lain.<sup>[3]</sup>



Gambar 2.1 Diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C<sup>[3]</sup>

Pada dasarnya, besi tuang (*cast iron*) dikelompokkan menjadi lima jenis, yaitu:<sup>[4]</sup>

1. Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)
2. Besi Tuang Kelabu (*Gray Cast Iron*)
3. Besi Tuang Bercorak (*Mottled Cast Iron*)
4. Besi Tuang Nodular (BTN) atau *Ferro Casting Ductile Iron* (FCDI)
5. Besi Tuang Malebel (*Malleable Cast Iron*)



Gambar 2.2 Klasifikasi besi cor <sup>[4]</sup>

## 2.2 Besi Tuang Nodular (Btn)

Besi tuang nodular atau *ferro casting ductile* (FCD) merupakan material dasar untuk pembuatan ADI. Jenis besi ini memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang yang lain, karena memiliki bentuk grafit berupa bulatan-bulatan. BTN memberikan banyak kombinasi sifat terbaik secara keseluruhan. Keragaman sifat BTN antara lain memberikan pilihan dengan keuletan tinggi, elongasi sebesar 18% (pada *grade* tertentu), atau kekuatan tinggi sampai melampaui 120 ksi (825 MPa). Bahkan, ADI memberikan sifat mekanik



yang lebih besar dan ketahanan aus dengan kekuatan tarik melebihi 230 ksi (1600 MPa).<sup>[1]</sup>

Menurut Keough, proses pengecoran BTN menawarkan banyak metode untuk menghasilkan atau mengembangkan suatu produk menjadi lebih baik dalam waktu yang lebih pendek dan biaya yang lebih rendah<sup>[5]</sup>. Berdasarkan standar ASTM A395, kebanyakan spesifikasi standar dari BTN mensyaratkan nilai kekuatan dan keuletan minimum<sup>[6]</sup>.

### 2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular bukan suatu material tunggal, akan tetapi merupakan bagian kelompok material dimana sifat yang dihasilkan merupakan hasil pengontrolan dari struktur mikronya.

Tabel II.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN <sup>[1]</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.)

Berdasarkan bentuk matrik, BTN dikelompokkan menjadi 7 kelompok<sup>[1]</sup>, yaitu:

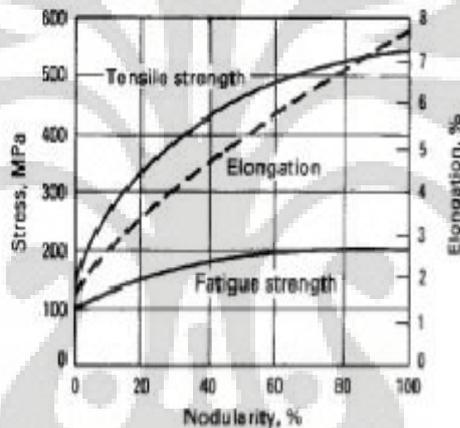
1. Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)
2. Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)
3. Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)
4. Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)
5. Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)
6. Besi Ulet Austenitik (*Austenitic Ductile Iron*)
7. Besi Ulet Austemper (*Austempered Ductile Iron*)

### 2.2.2 Faktor Pengaruh Pada Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular memberikan keuntungan sifat mekanik sehingga sangat cocok untuk penggunaan aplikasi struktural. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang antara lain:

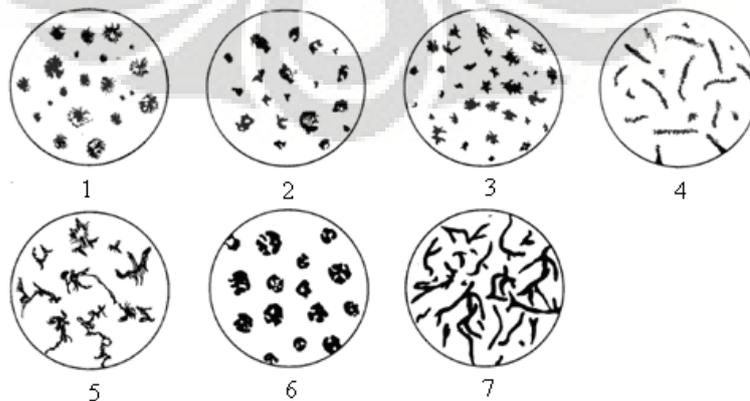
#### 1. Struktur grafit

Kehadiran grafit dalam bentuk bulatan pada BTN (pada besi kelabu berbentuk serpihan tajam) disebabkan oleh penambahan magnesium (atau magnesium dan cerium) pada logam cair. Sifat mekanik dan fisik dari jenis material ini hakikatnya ada pada keseluruhan bentuk grafit nodular. Semua sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan menurun jika proporsi dari grafit non-nodular meningkat.<sup>[4]</sup>



Gambar 2.3. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN<sup>[7]</sup>

Terdapat tujuh bentuk grafit yang digunakan untuk klasifikasi besi cor, antara lain:



Gambar 2.4. Bentuk grafit pada hasil cor-coran<sup>[7]</sup>



Table II.2. Keterangan bentuk grafit pada hasil cor-coran <sup>[7]</sup>

ASTM A 247	Equivalent ISO/R 945-1969 (E)	Description
I	VI	Nodular (spheroidal) graphite
II	VI	Nodular (spheroidal) graphite, Imperfectly formed
III	IV	Agregate or temper carbon
IV	III	Quasi-flake graphite
V	II	Crab-form graphite
VI	V	Irregular or open type nodules
VII	I	Flake graphite

## 2. Jumlah grafit

Ketika jumlah grafit meningkat, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang menurun pula. Pada umumnya, pengaruh-pengaruh ini adalah kecil jika dibandingkan dengan pengaruh dari variabel lainnya, karena kandungan karbon ekuivalen pada besi nodular bukan variabel utama dan pada umumnya dijaga tetap pada nilai eutektik. <sup>[4]</sup>

## 3. Struktur matriks

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi BTN adalah struktur matriks. Pada hasil *as-cast*, matrik akan terdiri dari perlit dan ferit, dan ketika jumlah perlit meningkat, kekuatan dan kekerasan juga meningkat. 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. <sup>[4]</sup>

## 4. Ukuran ketebalan

Ketika ukuran ketebalan menurun, kecepatan pendinginan dalam cetakan meningkat. Pada ketebalan yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampumesinan dan menyebabkan kegetasan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inoculan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi. <sup>[4]</sup>

Ketika ukuran ketebalan meningkat, jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih berat. Hal ini menghasilkan ukuran nodul yang besar,



pengurangan jumlah ferit pada hasil *as-cast*, dan peningkatan ketahanan terhadap pembentukan struktur feritik penuh ketika proses anil.<sup>[4]</sup>

## 5. Komposisi Paduan

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.<sup>[4]</sup>

### 1. Karbon (C)

Jumlah elemen karbon optimum pada 3,4-3,8% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Komposisi karbon diatas jangkauan tersebut dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi. Kandungan karbon yang tinggi akan mengurangi deformasi plastik yang dibutuhkan untuk *void* tumbuh dan bergabung, sedangkan kandungan karbon yang berkurang akan meningkatkan keuletan dan elongasi besi tuang nodular feritik.<sup>[1]</sup>

### 2. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Jumlah kandungan silikon optimum pada 2,0-2,8%. Tingkat 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.

### 3. Mangan (Mn)

Kadar mangan untuk besi cor feritik harus  $\leq 0,2\%$ . Kadar untuk besi yang akan dilakukan 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.

### 4. 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 (0,035-0,04%) untuk menghasilkan sifat yang diinginkan.



## 5. Sulfur (S)

Kandungan sulfur pada besi nodular biasanya dibawah 0,015% tetapi jika cerium ditambahkan, kadarnya meningkat karena terbentuk serium sulfida. Ketika menggunakan kupola, sering terjadi desulfurisasi- biasanya dengan *lime* atau kalsium karbida, sebelum perlakuan magnesium- sampai level 0,02% atau kurang.

### 2.2.3 Pengecoran Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular dibentuk dari dari pengecoran besi tuang yang dilakukan proses perlakuan cairan (*liquid treatment*). Proses perlakuan cairan adalah usaha penambahan bahan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam yang akan dihasilkan. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 perlakuan cairan yang dialami, yaitu nodulasi dan inokulasi.<sup>[7]</sup>

#### 1) Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) dan atau serium (Ce) ke dalam logam cair pada temperatur 1450 sampai 1510 °C yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular.<sup>[6]</sup> Nodulan yang sering digunakan adalah unsur magnesium (*Mg-treatment*) karena Mg lebih murah dan mudah diperoleh.

#### 2) Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit, sehingga grafit yang terbentuk semakin banyak. Proses ini dilakukan setelah nodulasi.

Selain untuk pembentukan grafit, inokulan juga berfungsi dalam:

1. Meratakan distribusi grafit didalam logam
2. Memberikan struktur yang homogen pada setiap ketebalan
3. Mencegah timbulnya cil
4. Memperbaiki sifat mekanis logam
5. Mampu menghilangkan karbida eutektik di dalam ladeburit

### 2.2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Selain dengan cara mengganti material yang berat dengan material yang ringan seperti aluminium dan magnesium, jika dikaitkan dengan kebutuhan untuk penggunaan berat yang ringan-*light weight*, maka salah satu cara untuk



memenuhinya adalah dengan menipiskan ketebalan dinding dari benda cor. Namun, kendala utama yang akan dihadapi dalam proses penipisan ini pada proses pengecoran FCD adalah terbentuknya karbida.

Pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal kurang dari 5 mm.<sup>[8]</sup> Pengecoran dinding tipis dilakukan untuk mengurangi berat yang dimiliki oleh produk tuang sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan *light weight* pada suatu komponen.

Skaland mencoba melihat efek dari ketebalan pengecoran terhadap jumlah nodul yang dihasilkan dengan menggunakan inokulan yang mengandung (Ca-Ce-S-O). Pada percobaannya, Skaland bervariasi ketebalan cornya pada: 40, 20, 10, dan 5 mm. Hasil yang diperoleh ternyata jumlah nodul berkurang dengan semakin tipisnya ketebalan cor.<sup>[9]</sup> Javaid mencoba untuk melihat hubungan ketebalan cor dengan komposisi kimia terhadap nilai impak. Ketebalan yang digunakannya adalah 12 mm dan 3 mm. Hasil yang diperoleh adalah perubahan komposisi kimia lebih berpengaruh pada ketebalan cor yang tebal, dalam hal ini 12 mm.<sup>[10]</sup> Dengan menggunakan 2 sistem penuangan (*pouring*), yaitu: penuangan horisontal dan penuangan vertikal, Stefanescu mencoba membuat ketebalan minimal untuk plat (100X25)mm, 1,5 mm untuk penuangan horisontal dan 2,5 mm untuk penuangan vertikal. Setelah dilakukan pengujian dan datanya dibandingkan, ternyata tidak ditemukan karbida pada penuangan vertikal dan sifat mekanis pada penuangan vertikal lebih terjamin dari pada penuangan horisontal.<sup>[11]</sup> Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, Showman mencoba meminimalisasi ketebalan benda cor dengan memperbaiki kapasitas panas dan konduktivitas panas dari bahan cetakan. Bahan cetakan yang digunakannya dalam penelitian ini adalah *low density alumina silicate ceramics* atau LDASC. Ketebalan minimal yang dibuat adalah 2 mm. Hasil yang diperolehnya adalah penggunaan LDASC dapat mengurangi ketebalan benda cor dan dengan meningkatnya perbandingan LDASC di dalam bahan cetakan semakin mengurangi jumlah karbida yang terbentuk pada bagian tipis.<sup>[12]</sup>

Schrems melakukan penelitian untuk melihat hubungan antara ketebalan benda cor dengan sifat-sifat mekanis yang dimiliki benda cor tersebut. Ketebalan minimal yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1,7 mm. Dari penelitian ini



diperoleh kesimpulan bahwa tegangan tarik maksimal berbanding terbalik terhadap ketebalan dinding cor dan regangan berbanding lurus dengan ketebalan dinding cor.<sup>[2]</sup>

Ketebalan cor yang paling minim yang pernah dibuat adalah 1,4 mm, dicapai oleh Ruxanda di dalam penelitiannya yang bertujuan melihat pengaruh ketebalan dinding benda cor terhadap struktur mikro. Dari hasil penelitiannya ini diperoleh kesimpulan jumlah dan ukuran nodul berhubungan erat dengan jarak antar partikel ( $\lambda_G$ ), jika jumlah dan ukuran nodul naik maka  $\lambda_G$  berkurang.<sup>[13]</sup>

Berikut ini merupakan perkembangan dari penelitian dan publikasi berkaitan dengan pengecoran dinding tipis ini, yaitu:<sup>[32]</sup>

1. Pedersen dan Tiedje, pada Jurnal *Material Characterization*, 2007 mempublikasikan hasil penelitiannya tentang pengaruh jumlah dan ukuran nodul grafit dalam FCD *thin-wall*.
2. Pedersen dan Tiedje, pada Jurnal *Measurement*, 2007 membahas tentang pengukuran temperatur pada proses solidifikasi FCD *thin-wall* secara teori dan eksperimen.
3. Caldera, dkk, pada Jurnal *Material Science and Technology*, 2007, membahas pengaruh jumlah nodule pada sifat fatik feritik FCD hasil pengecoran dinding tipis.
4. Loper dan Lekakh pada *Technology Summary*, 2007 melaporkan hasil penelitiannya tentang peningkatan sifat dari pengecoran *thin-wall* melalui penggunaan additif.
5. Showman, dkk., pada Jurnal *Modern Casting*, 2006, mempublikasikan penggunaan LDASC untuk mengatasi cacat pada pengecoran dinding tipis.
6. David, dkk., pada *International Journal of Cast Metals Research*, 2006, melaporkan hasil penelitiannya tentang design sistem saluran tuang untuk pengecoran plat FCD *thin-wall*.
7. Juretzko dan Stefanescu, pada Jurnal *AFS Transaction*, 2005, membahas perbandingan antara pemodelan dengan eksperimen proses pengisian cetakan.
8. Labrecque dan Gagne, pada Jurnal *AFS Transaction*, 2005, membahas tentang optimasi sifat mekanis dari FCD *thin-wall*.



9. Stefanescu, dkk., pada Jurnal *AFS Transaction*, 2005, mempublikasikan hasil penelitiannya tentang pembuatan FCD *thin-wall* dengan teknik *delayed in mold process*.
10. Woolley dan Stefanescu, pada Jurnal *AFS Transaction*, 2005, membahas hasil penelitian mereka tentang kecenderungan terjadinya pengerutan mikro pada FCD *thin-wall*.
11. Aufderheiden, dkk, pada Jurnal *AFS Transaction*, 2005, mempublikasikan hasil penelitiannya tentang minimalisasi pengaruh lapisan tipis pada FCD *thin-wall*.
12. David, dkk., pada Jurnal *ISIJ Int.*, memaparkan hasil penelitiannya tentang pengaruh CE dan distribusi grafit terhadap sifat mekanis dari FCD *thin-wall*.
13. Juretzko, dkk., pada Jurnal *AFS Transaction*, 2004, membahas tentang pengaruh penggunaan *pre conditioner* pada FCD *thin-wall*.
14. Torrance dan Stefanescu pada Jurnal *AFS Transaction*, 2004, mempublikasikan hasil penelitian mereka tentang kekasaran permukaan dari FCD *thin-wall*.
15. Woolley, dkk., pada Jurnal *AFS Transaction*, 2004, memaparkan hasil penelitian mereka tentang faktor-faktor yang berperan dalam pembentukan penyusutan mikro pada FCD *thin-wall*.
16. Dogan, dkk., pada Jurnal *AFS Transaction*, 2003 membahas tentang struktur mikro dari FCD *thin-wall*.
17. Dix, dkk, pada *AFS Transaction*, 2003, membahas hasil uji tarik dan kekasaran permukaan dari *light weight* feritik dan perlitik FCD.
18. Schrems, dkk., pada Jurnal *ASM International*, 2002, membahas tentang verifikasi metodologi pengujian FCD *thin-wall*.
19. Lambert, pada Jurnal *Modern Casting*, 1999, mempublikasikan hasil penenelitiannya tentang penggunaan proses *green sand* bertekanan rendah untuk pengecoran *thin-wall* baja.
20. Doi, menyarankan, dalam *Moderen Casting*, Juni 1999, untuk menggunakan proses pengecoran vakum untuk pengecoran dinding tipis logam ferro.
21. Tordoff, dalam *Modern Casting*, November 1999, membicarakan tentang proses pengecoran *hybrid* untuk pengecoran dinding tipis logam ferro.



22. Ramesh, dkk., pada Jurnal *SAE International*, 1997, mempublikasikan hasil penelitiannya tentang teknik pengecoran *counter gravity* untuk membuat baja *thin-wall*.

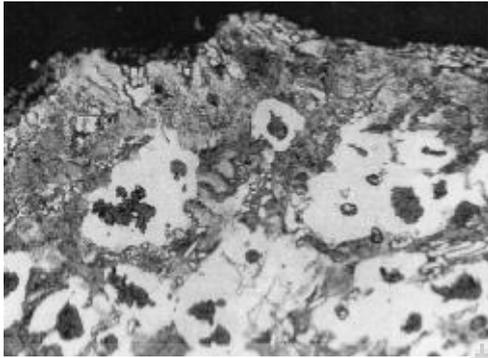
### 2.2.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)

Pada pengecoran BTN, ada beberapa hal yang berkaitan dengan sifat yang dihasilkan, antara lain:

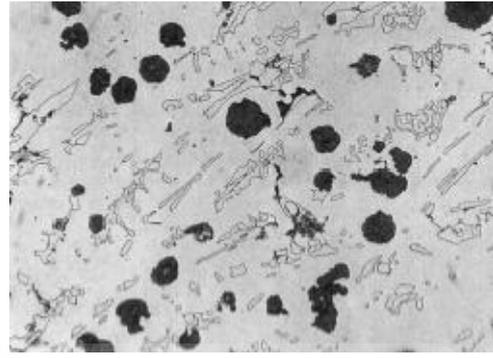
#### 1. Pembentukan Karbida

Dalam proses solidifikasi besi tuang, selain terbentuk grafit bebas juga mempunyai kecenderungan terbentuknya struktur karbida. Pada pengecoran besi tuang nodular (BTN), struktur karbida ( $Fe_3C$ ) adalah salah satu bentuk cacat secara metalurgi<sup>[14]</sup> dimana struktur ini memiliki sifat keras dan getas. Pembentukan struktur ini disebabkan oleh rasio luas permukaan presipitasi grafit yang terbatas terhadap volume fraksi dari jumlah grafit. Oleh karena itu, perlu ditambahkan elemen penstabil karbida seperti Mg untuk proses nodulasi. Faktor yang lain adalah bahwa kandungan unsur S di dalam besi nodular secara sengaja direndahkan sampai lebih kecil dari 0,02%, untuk memfasilitasi pembentukan bulatan grafit.<sup>[15]</sup> Pembentukan karbida biasanya juga terjadi jika proses inokulasi tidak berjalan dengan efektif atau jika pengecoran dilakukan pada benda-benda tipis. Proses inokulasi yang kurang efektif dapat mengakibatkan terjadinya fading sehingga terbentuk karbida primer. Karbida yang terbentuk memiliki beberapa nama antara lain ladeburit, chill, karbida primer,  $Fe_3C$ , cementit karbida, besi putih dan besi keras (*hard iron*).<sup>[15]</sup> Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) dengan temperatur proses lebih kurang  $900^{\circ}C$ .<sup>[16]</sup>

Langkah utama dalam mengontrol terjadinya karbida primer pada BTN adalah memberikan perhatian terhadap waktu inokulasi dan fading. Waktu yang dibutuhkan harus cukup selama proses inokulasi sehingga dapat dipastikan inokulan bekerja secara efektif dan mencegah terjadinya fading. Sebagai contoh, pengecoran modern sekarang ini telah menggunakan inokulasi late-stream atau inokulasi cetakan untuk meniadakan pengaruh fade.<sup>[15]</sup>

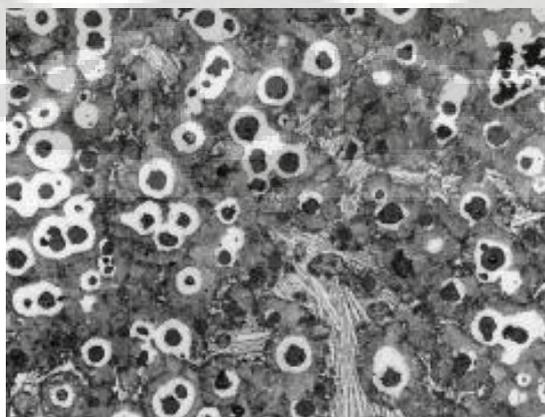


Gambar 2.5. Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital)<sup>[15]</sup>



Gambar 2.6. Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital)<sup>[15]</sup>

Pada proses pembuatan BTN resiko pembentukkan 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. Kandungan dalam logam cair dapat juga menyebabkan pembentukan karbida primer seperti Mn, Cr, V dan Mo.<sup>[15]</sup> Dalam BTN, kromium adalah unsur pembentuk karbida primer yang stabil yang tidak mudah dihilangkan dengan perlakuan panas dan inoculasi yang paling sesuai. Hidrogen juga dapat menyebabkan terbentuknya karbida primer. Dalam berbagai hal, bagaimanapun, karbida primer dapat terjadi di dalam besi yang terakhir membeku sehingga menyebabkan segregasi unsur hidrogen ke cairan selama solidifikasi. Ketika ini terjadi, bentuk karbida khusus dihasilkan, yang dikenal sebagai chill terbalik (*inverse chill*).<sup>[15]</sup>



Gambar 2.7. Karbida primer (chill terbalik) di dalam BTN perlitik. (200X, etsa Nital)<sup>[15]</sup>



Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginan tinggi atau tipis. Keberhasilan pembuatan komponen dengan dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.<sup>[11]</sup> Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistem 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>[11]</sup>

Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi,<sup>[17]</sup> keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE),<sup>[18]</sup> kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit, dan rendahnya jumlah (*nodule count*) dan bentuk nodul (*nodularity*).<sup>[19]</sup>

Sedangkan menurut Massone untuk memperoleh TWDI yang harus diperhatikan adalah desain cetakan yang memungkinkan terjadinya *soundness casting* dan kondisi logam cair sebelum tuang sehingga dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen dan bersih dari karbida.<sup>[20]</sup>

## 2. Nilai *Carbon Equivalent* (CE)

Pada penelitian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent*, CE, adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Menurut Loper, nilai CE untuk ketebalan benda tuang (10-30) mm agar bersih dari struktur karbida adalah (4,35 – 4,65)%.<sup>[21]</sup> Jika ketebalan ditipiskan maka nilai CE harus dinaikkan. Menurut Rijikov jika CE mencapai nilai 5,0% maka akan diperoleh struktur mikro bersih dari karbida dengan 40% matriks feritik.<sup>[22]</sup> Stefanescu dengan menjaga unsur-unsur lain, seperti Mn, P, S, dan Cr, berhasil membuat struktur mikro TWDI bersih dari karbida dengan nilai CE yang lebih rendah.<sup>[11]</sup> Karsay menyarankan nilai CE sebesar 4,72% untuk



memperoleh 100% matriks feritik. Nilai-nilai CE yang direkomendasikan tersebut dibuat berdasarkan bahan baku yang mempunyai kadar mangan (Mn) lebih tinggi dari 0,4% dan kadar fosfor (P) lebih tinggi dari 0,06%.<sup>[23]</sup>

QIT merekomendasikan suatu persamaan untuk menghitung nilai CE sesuai dengan ketebalan yang dibutuhkan, yaitu:

$$CE = 4,9265 - 0,0425 \times t \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan t adalah ketebalan benda.<sup>[24]</sup>

Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%<sup>[18]</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>[25]</sup> Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si \dots\dots\dots(2.2)$$

Javaid berhasil membuat TWDI bebas karbida dengan ketebalan 3 mm dalam cetakan pasir dengan nilai CE (4,5 – 5,08)%.<sup>[10]</sup> Labreque dengan menggunakan inokulan yang mengandung Bi dan Ce berhasil membuat TWDI 3 mm dengan nilai CE (4,6 – 4,9)%.<sup>[26]</sup> Sedangkan Dogan membuat plat berketebalan (1.5 – 9) mm dengan menggunakan nilai CE (4,7 – 4,8)%.<sup>[27]</sup> Setelah dilakukan suatu *literature review* maka direkomendasikan menggunakan nilai CE (4,45 – 4,9)% untuk membuat TWDI dengan ketebalan di bawah 5 mm dengan menggunakan cetakan pasir.

Karena pengaruhnya terhadap pembentukan grafit maka Mn, P, dan S kemudian juga ditambahkan pada perhiungan CE, sehingga rumusnya menjadi sebagai berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \dots\dots\dots(2.3)$$

TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.<sup>[28]</sup> Selain persyaratan nilai CE, kadar Si dan kadar dari unsur-unsur paduan seperti Mo dan Ni. Untuk kadar Si disarankan oleh Mourad (2,4 – 2,7)% untuk ketebalan (3-10) mm.<sup>[29]</sup>

### 3. Lapisan Efek Kulit (*Skin Effect*)

Pada bagian tepi, struktur mikro TWDI terbentuk suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular. Lapisan ini diberi nama



*flake graphite rim anomaly*<sup>[13]</sup> atau *skin effect*.<sup>[30]</sup> Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200 μm atau 0,2 mm.<sup>[13]</sup> Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik dan biasanya dihilangkan dengan proses permesinan.<sup>[31]</sup>

Pada analisisnya, Ruxanda menemukan adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan daerah tengah. Perbedaan inilah yang dianggap bertanggung jawab atas terjadinya perbedaan bentuk grafit. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi sebagai akibatnya oksidasi Mg. Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.<sup>[13]</sup>

Aufderheiden mencoba menghilangkan efek kulit ini dengan mencampurkan *low density alumina silicate ceramic* (LDASC) dengan pasir cetakan. Kesimpulan yang diperolehnya antara lain adalah, untuk kehomogenan struktur mikro pada permukaan dan inti maka kecepatan pendinginan harus dijaga.<sup>[30]</sup>

#### 4. Nodularitas, Jumlah Nodul dan Diameter Rata-rata Nodul

Bentuk grafit dalam besi tuang nodular, pada awalnya, ditentukan oleh nodularitas dan jumlah nodulnya. Nodularitas didefinisikan sebagai kebulatan dari grafit. Disebut sebagai nodul bila bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2 kali diameternya.<sup>[32]</sup> Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan pada pembesaran mikroskop 100x.<sup>[32]</sup> Pada tahap awal keduanya ditentukan dengan membandingkan foto struktur mikro not etsa dengan pembesaran (M) 100x dengan diagram yang dikeluarkan oleh AFS dan DIS. Kenodulan juga dapat ditentukan dengan melihat pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap jenis grafit yang ada dan dinyatakan dalam bentuk persentase.

Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 sebagai berikut:

$$Nodularitas = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

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 sebagai berikut:

$$Nodularitas = \frac{A_{Acc.}}{A_{Acc} + A_{Un.Acc}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan  $A_{Acc.}$  : Area dari partikel yang memenuhi syarat untuk dihitung  
 $A_{Un.Acc}$  : Area dari partikel yang tidak memenuhi syarat untuk dihitung

Kriteria pemilihan dilakukan berdasarkan pada faktor bentuk (*shape factor*) yang terdiri dari 2 cara, yaitu:

- 1. Menurut *sphericity* (S)

$$S = \frac{4\pi \times A}{(perimeter)^2} \dots\dots\dots(2.6)$$

- 2. Menurut *compactness* (C)

$$C = \frac{4\pi \times A}{(conveksparameter)^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

Berdasarkan konvesi maka untuk dapat dihitung nilai  $S > 0,65$  dan nilai  $C > 0,7$ .<sup>[33]</sup>

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

**2.3 Besi Nodular Austemper (*Austempered Ductile Iron-ADI*)**

*Austempered ductile iron* (ADI) merupakan salah satu jenis besi tuang nodular yang diperlakukan panas (*austempering*) sehingga meningkatkan kekuatan fatik. Proses ini membutuhkan 2 tahap, yaitu austenisasi dan *quenching*. Austenisasi membutuhkan pemanasan dan penahanan temperatur sampai sekitar 900 °C (1650 °F). Sedangkan *quenching* melibatkan proses pendinginan cepat dan penahanan temperatur austemper secara isothermal, yang biasanya dilakukan di dalam *salt bath*.<sup>[7]</sup> Pemanasan di atas temperatur kritis dapat mengurangi kadar karbon dari struktur mikro hasil *quenching* dan *tempering* sehingga menghasilkan



kekuatan tarik serta ketahanan aus yang rendah dari pada hasil cor dengan kekerasan yang sama. ADI memiliki matrik yang merupakan kombinasi dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit yang stabil.

### 2.3.1 Sifat Mekanik ADI

Table II.3. Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI <sup>[7]</sup>

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

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

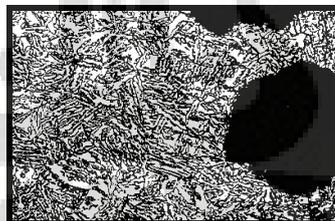
Menurut Harding, Penelitian tentang ADI sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersial dalam skala kecil pada tahun 1970-an. ADI menawarkan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, mampu pemesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik.<sup>[5]</sup> Selain itu, permintaan ADI yang tinggi di dalam bidang otomotif dan juga di sektor lain disebabkan karena ADI mempunyai sifat mekanis yang unggul jika dibandingkan dengan besi tuang lainnya dan secara ekonomis cukup kompetitif terhadap baja dan aluminium.<sup>[35]</sup>

Dalam suatu *reviewed article*, Spada mengatakan, ADI ideal untuk aplikasi-aplikasi industri yang membutuhkan kekuatan tinggi dengan ketahanan aus yang rendah. Menurut Keough, konsumsi energi yang digunakan untuk memproduksi 1 ton ADI adalah 3100 kWh, sedangkan untuk memproduksi baja tempa adalah (5800 – 6200) kWh.<sup>[5]</sup> ADI dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi



aluminium.<sup>[36]</sup> Peningkatan penggunaan ADI dapat dikaitkan dengan terjadinya peningkatan permintaan akan besi tuang nodular di USA<sup>[37]</sup> dan investasi sebesar 1 juta Euro oleh Elkem pada modernisasi pabrik *ferro alloys*, terutama Mg-FeSi, di Islandia.

Peningkatan sifat-sifat, terutama sifat mekanis, yang terjadi pada ADI disebabkan adanya perubahan pada struktur mikronya.<sup>[38]</sup> Sifat dari ADI dikarenakan struktur matrik yang unik dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit penstabil karbon, yang disebut ausferit. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki oleh ADI disebut sebagai Bainit. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja. Tetapi, dari hasil-hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja, kemudian berdasarkan ASTM A644-92 disebut sebagai *ausferrite*.<sup>[38]</sup> Proses *austempering* telah dikembangkan sejak 1930-an pada besi cor dan *wrought steel*. Proses *austempering* pertama kali dilakukan secara komersil terhadap besi tuang nodular pada tahun 1972 dan pada 1998 produksi seluruh dunia mencapai 100.000 ton per tahun.



Gambar 2.8. Struktur Mikro ADI<sup>[39]</sup>

Menurut Harding, pada awalnya ADI diaplikasikan untuk bidang otomotif dengan adanya pengumuman dari Mazda. Tetapi dengan melihat pada *kelebihan-kelebihan* yang dimilikinya, maka penggunaan ADI sebagai bahan komponen tidak lagi hanya untuk bidang otomotif, tetapi juga untuk bidang-bidang lain seperti: konstruksi, pertambangan, perkeretaapian, pertanian, dan pertahanan<sup>[5]</sup> Karena sifat *light-weightnya*, ADI juga dapat dimungkinkan untuk dikembangkan sebagai bahan komponen, antara lain: blok mesin, poros engkol, stang piston, dan roda gigi, pada *hybrid car*.

Pada tahun 2002, Martinez, dkk, berhasil membuat stang piston atau *connecting rod* ADI dengan ketebalan cor 3 mm.



Gambar 2.9. Stang piston ADI-TWC [28]

Salah satu kekhususan ADI adalah sifat ketahanan retaknya. Sebagai suatu material yang relatif masih baru, belum ada data yang cukup lengkap untuk ketahanan retak dari *austempered ductile iron* (ADI). Belum lengkapnya data ini disebabkan karena pengumpulan data sifat mekanisnya lebih diutamakan pada sifat-sifat mekanis konvensional dan untuk memperoleh nilai ketahanan retaknya sebagai usaha awal dilakukan konversi dari nilai uji Charpy. Selain itu, semakin tinggi *grade* dari ADI ternyata ketahanan retaknya tidak mengikuti karakteristik dari LEFM, dan ditentukan dengan menggunakan EPFM, yaitu *J* integral atau CTOD.

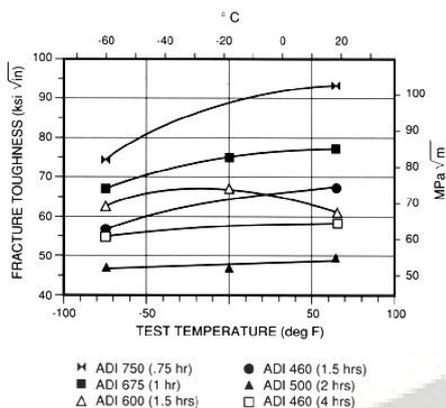
Tabel II.4. Perbandingan tegangan luluh, ketahanan retak, dan panjang retak dari beberapa logam<sup>[5]</sup>

Jenis Logam	Perlakuan Panas	Temp (°C)	$\sigma_y$ (MPa)	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$(K_{IC}/\sigma_y)^2$ Mm
A-2	850°C, 1 hr salt/quech	260°C	1205.4	73.49	3.72
		300°C	1107.4	68.62	3.84
		350°C	989.8	72.10	5.30
		400°C	744.8	72.91	9.58
		430°C	744.6	74.52	10.00
B-5	850°C, 1 hr	260°C	1029.0	75.18	5.34
		300°C	980.1	75.40	5.92
		350°C	793.7	73.68	8.62
		400°C	756.0	76.01	10.08
C-1	850°C, 1 hr	300°C	1151.5	86.00	5.58
C-3	850°C, 1 hr	300°C	1199.5	78.20	4.25
		350°C	900.3	61.60	4.68

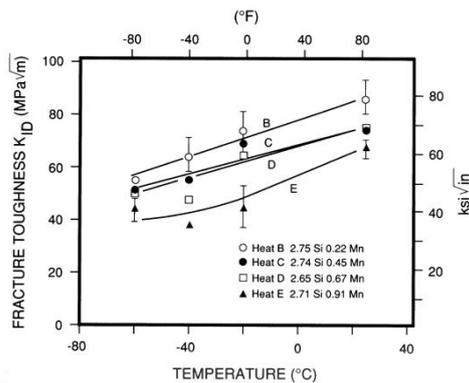


		400°C	908.0	59.40	4.27
C-5	850°C, 1 hr	300°C	118.2	85.74	5.88
Ductile Iron, Ferritic, 1.55%C-1.5%Si-1.2%Ni			269	42.8	25.3
Ductile Iron, Ferritic, 3.6%C-2.5%Si-0.38%Ni-0.35%Mo			331	48.3	21.3
Ductile Iron, Perlitic, 0.5%Mo			483	48.3	10.0
Ductile Iron, 80-60-03			432	27.1	3.9
Ductile Iron, D7003			717	51.7	5.2
Ductile Iron, Ni-Resist D-5B			324	64.1	39.1
AISI 4140	850°C, 1 hr, Oil Quench	204°C	1449	43.80	0.92
		280°C	1587	55.00	1.2
		396°C	1518	55.60	1.34
	1100°C, 1 hr, Oil Quench	204°C	1380	65.05	2.22
		246°C	1449	57.25	1.56
	1200°C, 1 hr, Oil Quench	204°C	1380	89.12	4.18
		246°C	1449	72.64	2.52
		323°C	1414.5	53.30	1.42
		348°C	1393.8	58.46	1.76
	AISI 4340	870°C, 1 hr, Oil Quench	200°C	1345	65.38
280°C			1504.2	66.81	1.97
350°C			1497.3	87.69	3.43
400°C			1449.0	100.22	4.78
1200°C, 1 hr, Oil Quench		246°C	1380.0	90.55	4.31
		280°C	1393.8	69.01	2.45
843°C, 1 hr, Oil Quench, Tempered		260°C	1642.2	48.79	0.88
		427°C	1421.4	84.47	3.53

Berdasarkan pada data yang ada, Tabel II.6. menunjukkan perbandingan nilai retak dari ADI dengan besi tuang nodular dan baja. Ketahanan retak ADI untuk semua jenis proses (A-2, B-5, C-1, C-3, dan C-5) berkisar antara (59-86) MPm<sup>1/2</sup>. Ketahanan retak ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan kekuatan tarik besi tuang nodular, kecuali untuk besi tuang nodular Ni-resist. Terhadap Ni-resist ketahanan retak ADI hanya untuk beberapa jenis proses saja masih sedikit lebih unggul. Sedangkan terhadap baja, dalam hal ini diwakili oleh AISI 4140 dan AISI 4340, ketahanan retak ADI untuk beberapa proses lebih tinggi.



Gambar 2.10. Ketahanan retak ADI vs temperatur / waktu austemper dan temperatur pengujian<sup>[5]</sup>



Gambar 2.11. Pengaruh mangan terhadap ketahanan retak ADI<sup>[5]</sup>

Pada Gambar 2.8. terlihat data ketahanan retak ADI sebagai fungsi dari temperatur/waktu *austempering* dan temperatur pengujian. Ternyata untuk semua proses, ketahanan retak ADI lebih tinggi untuk pengujian pada temperatur 20<sup>0</sup> kecuali untuk 600<sup>0</sup>/1,5 jam. Kesimpulan yang dapat diambil adalah untuk hampir semua parameter proses, nilai ketahanan retak ADI akan meningkat sejalan dengan meningkatnya temperatur uji.

Selain oleh parameter proses, ketahanan retak ADI juga dipengaruhi oleh komposisi kimianya. Pada Gambar 2.9. memperlihatkan pengaruh mangan terhadap ketahanan retak ADI. Mangan bersama-sama dengan silikon akan sangat berperan di dalam pembentukan struktur mikro. Semakin tinggi kadar mangan, walaupun sudah diimbangi dengan silikon, semakin rendah ketahanan retak ADI.

### 2.3.2 Penelitian Terkini Pengecoran Dinding Tipis ADI

Sampai saat ini, belum ada standar baku 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>[8]</sup> Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm.<sup>[28]</sup> Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil dan sama dengan 3 mm.<sup>[11]</sup>

Ketebalan minimal terakhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm oleh kelompok Stefanescu.<sup>[13]</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>[29]</sup> dalam bentuk benda uji dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez<sup>[28]</sup> dalam bentuk komponen *hollow connecting rod* dari desain inovatif mesin 2 silinder.

Keberhasilan pembuatan komponen dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.<sup>[12]</sup> Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginan tinggi atau tipis. Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistem 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 peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.<sup>[11]</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 nodul (*nodularity*).<sup>[13]</sup>

Dengan menggunakan 2 sistem penuangan (*pouring*), yaitu penuangan horizontal dan penuangan vertikal, Stefanescu mencoba membuat ketebalan minimal untuk plat (100x25)mm, 1,5 mm untuk penuangan horizontal dan 2,5 mm untuk penuangan vertikal. Setelah dilakukan pengujian dan datanya dibandingkan, ternyata tidak ditemukan karbida pada penuangan vertikal dan sifat mekanis pada penuangan vertikal lebih terjamin dari pada penuangan horizontal.<sup>[11]</sup>

#### 2.4 Sistem Saluran Tuang (*Gating System*)

Sebuah rongga cetakan harus diisi dengan logam yang bersih dalam 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. Ketentuan desain yang paling

penting adalah memiliki waktu pengisian yang ideal, berdasarkan saluran tuang yang dirancang.

### 2.4.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang

Berdasarkan orientasi dari bidang pemisah (*parting plane*), sistem saluran tuang diklasifikasikan menjadi sistem saluran tuang horizontal dan sistem saluran tuang vertikal.<sup>[40]</sup>

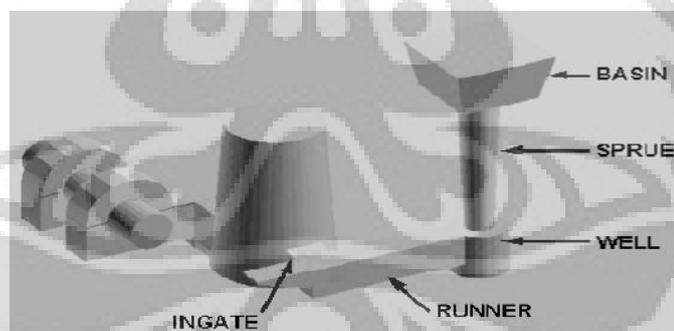
#### 1. Sistem Saluran Tuang Horizontal

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*.

#### 2. 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 pemisah adalah vertikal.

### 2.4.2 Komponen Sistem Saluran Tuang



Gambar 2.12. Elemen utama sistem saluran tuang<sup>[40]</sup>

Elemen utama dari sistem saluran tuang meliputi: pouring basin, sprue, well, runner dan ingate.

#### 1. *Pouring Basin* (*Bush* atau *Cup*)

*Pouring basin* adalah kantong bundar atau persegi yang menerima logam cair dari ladle.

#### 2. *Sprue* (*Downsprue*)



*Sprue* merupakan bundaran melintang yang mengarahkan logam cair dari *pouring basin* ke *sprue well*. Posisi *sprue* selalu vertikal.

3. *Sprue Well*

*Sprue well* berfungsi untuk mengubah arah aliran logam cair dengan sudut 90° untuk dialirkan ke runner.

4. *Runner*

*Runner* berfungsi untuk mengarahkan logam cair dari *sprue* ke *ingate*.

5. *Ingate*

*Ingate* berfungsi untuk mengarahkan logam cair masuk ke rongga cetakan. Biasanya, bersama *sprue well* dan *runner* dilokasikan pada bidang pemisah (*parting plate*).

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

**2.4.3 Prinsip Aliran Fluida**

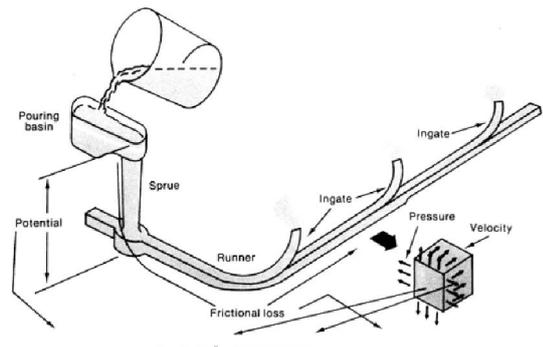
Untuk membuat desain sistem saluran tuang yang optimum, maka perlu diperhatikan beberapa prinsip dasar dari aliran fluida. Prinsip-prinsip dasar tersebut antara lain Teori Bernoulli, Hukum Kontinuitas dan Efek Momentum<sup>[4]</sup>.

1. Teori Bernoulli

Teori ini menyatakan bahwa pada suatu titik dalam sistem yang tertutup, jumlah dari energi potensial, energi kinetik, energi tekanan, dan energi friksi dari aliran cairan adalah konstan. Formula Bernoulli ditulis sebagai berikut:

$$z + wPv + \frac{wV^2}{2g} + wF = K \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana *w* adalah berat total dari cairan yang mengalir (dalam *pound*), *Z* adalah tinggi cairan (dalam inci), *P* adalah tekanan statis dalam cairan (dalam *pound/inci<sup>2</sup>*), *v* adalah volume spesifik cairan (dalam *inci<sup>3</sup>/pound*), *g* adalah percepatan grafitasi bumi (dalam 386,4 inci/s<sup>2</sup>), *V* adalah kecepatan (dalam inci/detik), *F* adalah gaya gesek per satuan berat dan *K* adalah konstan.



Gambar 2.13. Ilustrasi skematik aplikasi Teori Bernoulli untuk sistem saluran tuang<sup>[4]</sup>

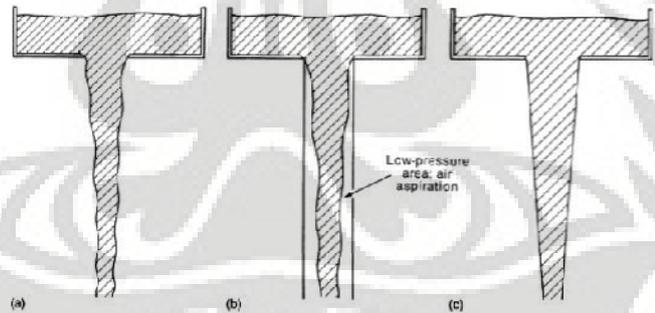
### 2. Hukum Kontinuitas

Hukum ini menyatakan bahwa untuk sistem yang tertutup (dinding tidak dapat ditembus dan tanpa tekanan), kecepatan aliran akan sama pada semua titik dalam sistem. Formula ini ditulis sebagai berikut:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana Q adalah laju aliran atau debit (dalam inci<sup>3</sup>/detik), A adalah luas penampang aliran (dalam inci<sup>2</sup>), v adalah kecepatan aliran (dalam inci/detik), 1 dan 2 menunjukkan lokasi yang berbeda di dalam sistem.

Salah satu aplikasi dari Hukum Kontinuitas seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.14. Bentuk aliran logam pada beberapa bentuk sprue. (a) Aliran alami secara jatuh bebas, (b) Adanya rongga udara, (c) Aliran logam pada sprue yang lancip.<sup>[4]</sup>

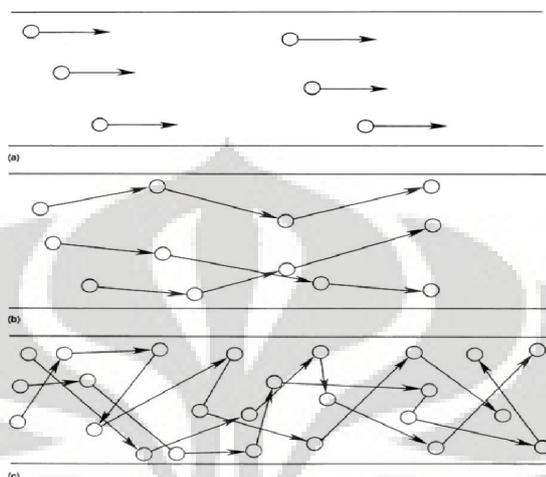
### 3. Pengaruh Tumbukan

Hukum pertama Newton menyatakan bahwa benda yang bergerak akan terus bergerak ke arah yang diberikan sampai ada gaya lain yang mengubah arah gaya tersebut.

Aliran fluida dapat diukur dengan pengukuran khusus yang disebut dengan Reynold's Number. Reynold's Number dapat ditulis sebagai berikut:

$$N_R = \frac{vd\rho}{\mu} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana  $N_R$  adalah *Reynold's Number*,  $v$  adalah kecepatan cairan,  $d$  adalah diameter,  $\rho$  adalah densitas cairan dan  $\mu$  adalah viskositas cairan.



Gambar 2.15. Nilai  $N_R$  untuk berbagai jenis aliran. (a)  $N_R < 2000$ , aliran laminar, (b)  $2000 \leq N_R \leq 20.000$ , aliran turbulen, (c)  $N_R \geq 20.000$ , aliran sangat turbulen.<sup>[4]</sup>

#### 2.4.4 Pengisian Cetakan

Pengisian cetakan merupakan salah faktor kecil yang mempengaruhi hasil produk cor. Aliran logam cair setelah dituangkan kedalam 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.<sup>[41]</sup>

##### 1. 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. Fluiditas pengecoran dipengaruhi oleh tekanan metalostatik dan dihalangi oleh: viskositas dan tegangan permukaan dari logam cair, difusivitas panas dari cetakan, tekanan balik (*back pressure*) dari udara dalam rongga cetakan serta friksi antara logam dan cetakan.



## 2. Turbulensi

Turbulensi merupakan ketidakteraturan atau fluktuasi aliran akibat gangguan-gangguan. Terdapat dua jenis turbulensi yaitu: turbulensi bulk dan permukaan (*surface*).

- a. Turbulensi *bulk* (*bulk turbulence*), diukur oleh nilai *Reynolds Number* ( $Re$ ), yaitu rasio antara inersia dengan tekanan viskos dalam cairan. Jika  $Re$  lebih dari 2000, maka dihasilkan aliran yang turbulen.
- b. Turbulensi permukaan (*surface turbulence*), diukur dengan *Weber Number* ( $We$ ), yaitu rasio antara inersia dengan tekanan tegangan permukaan dalam cairan. Nilai  $We$  diperoleh dari  $\rho V^2 r / \gamma$ , dimana  $r$  adalah radius dari lekukan permukaan bebas cairan (*free liquid surface*). Untuk  $We$  kurang dari 1, maka tidak ada turbulensi permukaan sedangkan ketika  $We$  senilai 100 atau lebih, maka terjadi turbulensi permukaan.

### 2.4.5 Simulasi *software* sistem saluran tuang

Simulasi *software* untuk sistem saluran tuang merupakan bentuk permodelan komputer dalam teknologi pengecoran yang dikembangkan dalam rangka meningkatkan efisiensi kerja. Misalnya untuk mengetahui dimana terjadinya turbulensi, lamanya waktu pengisian dan pembekuan. Dalam sistem simulasi ini, data-data seperti: desain pengecoran biasanya dalam bentuk program *autocad* atau *solid work*, temperature penuangan, dan kecepatan pengisian diolah untuk menghasilkan gambaran atau prediksi proses pengecoran berlangsung. Hal ini sangat berguna untuk melihat kemungkinan-kemungkinan yang akan terjadi pada saat pengecoran dan dapat menentukan apakah disain cocok untuk digunakan dalam sebuah pengecoran.

## 2.5 Pengecoran Melawan Gravitasi (*Counter Gravity Casting*)

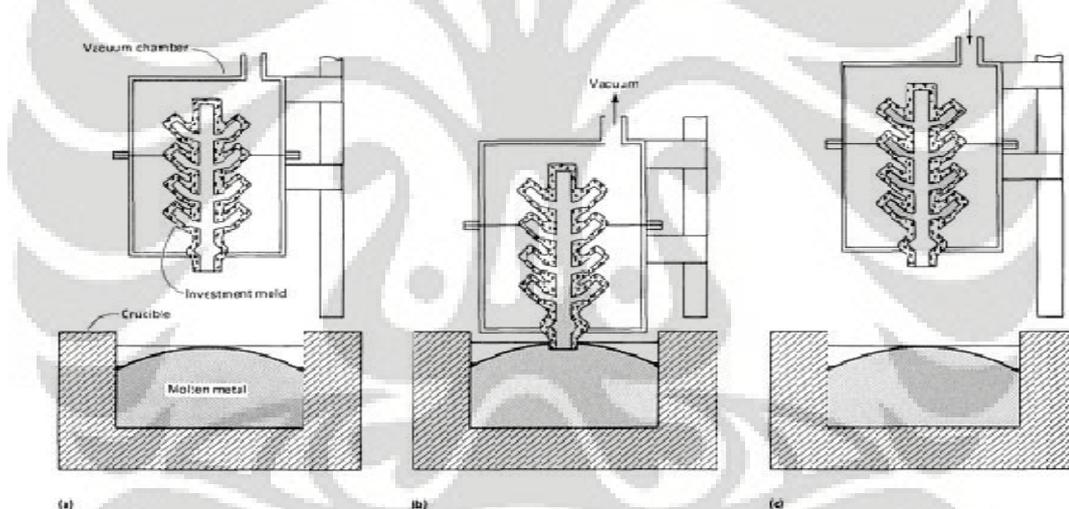
Berbagai upaya telah dilakukan oleh para rekayasawan, sejak awal abad ini, untuk dapat memasukan logam cair ke dalam cetakan melawan arah gravitasi pada proses pengecoran. Cetakan biasanya dimasukkan ke dalam ruang vakum dengan menambahkan pipa pengisi yang memanjang dari cetakan sampai keluar ruang vakum. Pipa pengisi terhubung ke dalam cetakan, dan ruang vakum disekitar cetakan menyebabkan logam ke naik ke dalam cetakan. Metode ini banyak

digunakan pada masa Perang Dunia II. Pada awal tahun 1970-an, metode baru dikembangkan untuk counter-gravity casting dengan menggunakan cetakan dari bahan non metal, pertama menggunakan keramik dan kemudian menggunakan pasir cetak suhu rendah.

Counter-gravitasi rendah tekanan proses pengecoran meliputi:

### 2.5.1 Counter-gravity low-pressure casting of air-melted alloys (CLA)

Proses CLA biasa digunakan pada pengecoran logam yang lumer di udara. Nilai ekonomis proses ini yaitu dapat menghasilkan lebih banyak benda cor per cetakan, efisiensi gating yang tinggi (karena sebagian besar logam pada saluran tuang mengalir kembali ke dalam tanur) cacat pengecoran yang lebih sedikit (khususnya inklusi lelehan, yang berkurang karena saluran tuang selalu terisi logam yang bersih). Pengecoran dinding tipis (ketebalan dinding 0,75 mm atau 0,03 in) mudah dilakukan pada jumlah besar dan biaya rendah.



Gambar 2.16 Skematik prose CLA<sup>[4]</sup>

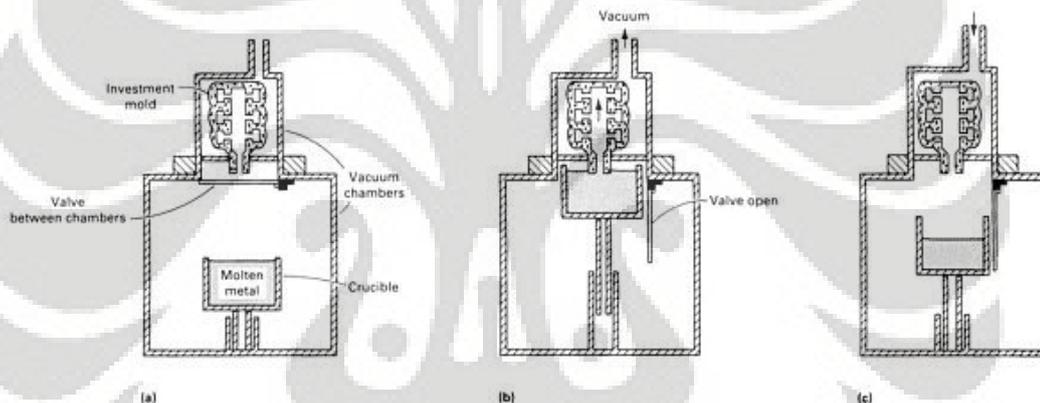
(a) Cetakan Investment dalam ruang pengecoran. (b) Cetakan direndahkan pada posisi pengisian (c) Cetakan mengandung logam yang membeku; sebagian besar lelehan di saluran tuang kembali kedalam tanur

Aplikasi CLA adalah proses yang digunakan untuk membuat bagian dari segala jenis paduan pada berbagai industri. Untuk industri otomotif, digunakan untuk membuat komponen steering system, transmission parts, diesel precombustion chambers, rocker arms, mounts, dan engsel. Komponen yang diproduksi untuk industri pesawat terbang dan pesawat luar angkasa adalah

temperature probes, fuel pump impellers, missile wings, brake parts, pump housings, dan bagian struktural. Aplikasi lain termasuk kepala tongkat golf, banyak sekali komponen mesin, bagian-bagian kunci, komponen senapan, dan katup.

### 2.5.2 Counter-gravity low-pressure casting of vacuum-melted alloys (CLV)

Proses CLV digunakan untuk logam yang mengandung paduan reaktif, terutama superalloys yang berisi aluminium, titanium, zirconium, dan hafnium. Dapat dilihat bahwa keuntungan dari proses CLA juga berlaku untuk proses CLV. Keunggulan proses ini yaitu kemampuan untuk mengisi bagian tipis dan membuat hasil cor yang bebas dari oksida yang sering terjadi pada metode penuangan gravitasi. Hal ini memungkinkan pembuatan dinding yang ketipisannya dibawah 0,5 mm (0,02 in) dan tanpa oxides yang menyebabkan cacat.



Gambar 2.17 Skematik proses CLV<sup>[4]</sup>

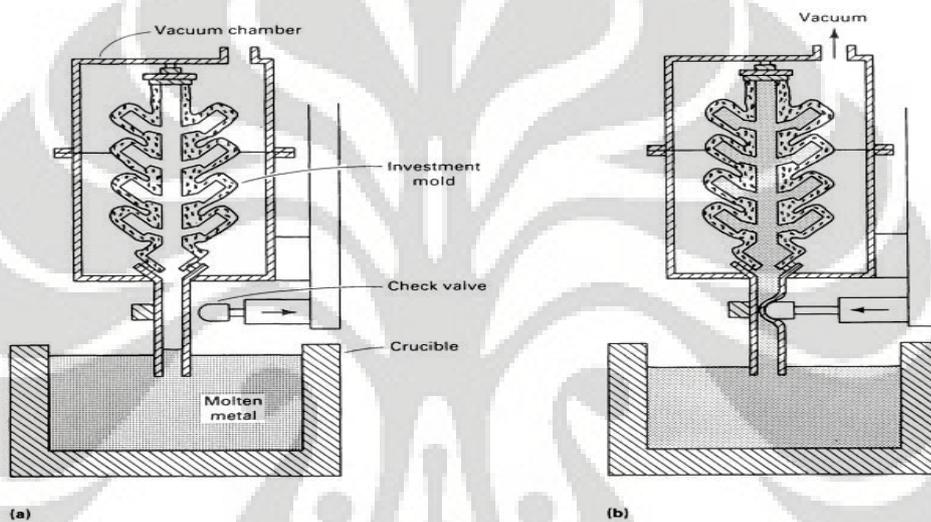
(a) Logam dilelehkan dalam vakum, cetakan panas dimasukkan kedalam bagian ruang yang terpisah. Kevakuman diciptakan pada ruang berikutnya. (b) Kedua ruangan diisi dengan argon, katup antara ruangan dibuka, pipa pengisi memasuki lelehan metal. Kevakuman ditambahkan pada ruangan atas untuk menarik metal ke atas. (c) Kevakuman dihilangkan setelah pembekuan terjadi, sisa lelehan logam kembali lagi ke tanur.

Aplikasi CLV antara lain untuk mesin turbin gas, proses CLV menghasilkan bagian dengan tingkat inklusi oksida terendah pada paduan seperti MAR seperti F-509 dan René 125, dimana sering terjadi inklusi hafnium dan zirconium penuangan gravitasi. Proses ini memungkinkan suatu pendekatan baru untuk desain mesin pembakaran jet, dimana lembaran logam yang di *roll* dan di las dapat diganti dengan dinding tipis (0,5 mm, atau 0,02 in) yang didapat dari proses

pegecoran untuk *transfer* panas yang maksimum dan mengurangi *therma fatigue*. Peningkatan kualitas dan penurunan biaya telah dicapai pada pengecoran *airfoils*, *turbin*, *conduits*, *clamps*, dan *turbocharger wheels*.

### 2.5.3 Check-valve casting (CV)

Proses CV digunakan untuk pengecoran benda yang terlalu tebal dan tidak bias dilakukan dengan CLA atau CLV proses. Proses ini menggunakan pipa pengisi fleksibel yang tertutup oleh katup bila cetakan telah terisi. Proses CV menghasilkan pengisian yang baik pada pengecoran tipis, serta meningkatkan kebersihan dari proses logam lainnya, dan berlaku untuk semua metode cetakan.



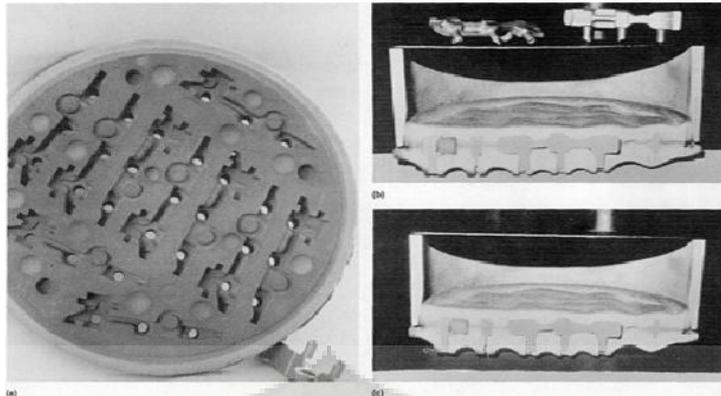
Gambar 2.18 Skematik prose CV<sup>[4]</sup>

(a) pipa pengisi dimasukan dan vakum digunakan untuk memenuhi cetakan seperti pada proses CLA (b) Ketika cetakan penuh katup menutup. Logam terperangkap dalam cetakan, dan kemudian dibiarkan membeku seperti pada pengecoran grafitasi.

Aplikasi dari proses ini yaitu pengecoran sayap roket, *valve bodies*, engsel, dan sebagian *parts* lainnya dengan berbagai ketebalan.

### 2.5.4 Counter-gravity low-pressure air-melted sand casting (CLAS)

proses CLAS digunakan untuk pengecoran pasir dan sangat berbeda dari proses lainnya yang dibahas di atas. Proses ini memiliki kemampuan yang unik untuk menghasilkan pengecoran tipis dengan tingkat kevakuman yang rendah. Karena logam diambil dari bagian lelehan yang bersih dan karena castings dibuat pada temperatur logam yang rendah, jumlah inklusi lelehan sangat rendah dibandingkan dengan yang ditemukan pada pengecoran grafitasi.



Gambar 2.19 Inti dari proses CLAS<sup>[4]</sup>

- (a) tampilan cetakan CLAS menunjukkan kepadatan cetakan bagian bawah yang terbuka. Cetakan menunjukkan penuangan langsung ke dalam cetakan. (b) Penampakan melintang dari cetakan dan benda cor saat pengisian cetakan. (c) Penampakan melintang dari cetakan dan benda cor setelah pengisian cetakan.

Blind riser dapat digunakan pada benda tebal.

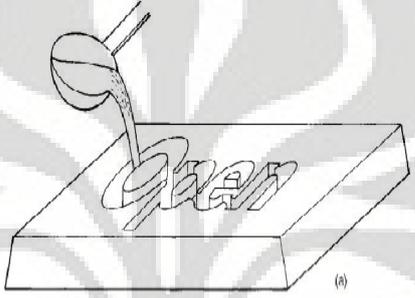
Aplikasi CLAS yaitu connecting rod yang tipis, *hollow cam shafts* untuk penggunaan otomotif dapat dibuat dengan ketebalan hanya 1,5 mm (0,06 in) dari baja dan besi tuang. Pusat roda truk dari stainless steel dapat lebih ringan dari roda aluminium karena dibuat tipis dengan proses ini.

## 2.6 Gravity Casting

Research dan pengembangan gravity casting telah mengambil peranan penting dalam proses produksi logam. Produk-produk ini digunakan untuk komponen bangunan, pesawat dan otomotif yang memberikan ketahanan yang lama dan penghemat yang tinggi. Besi tuang noduler dibuat dari logam cair, kemudian logam cair ini dimasukkan kedalam cetakan dibawah tekanan atau vakum yang memanfaatkan gaya gravitasi. Gravity casting juga dikenal dengan sebutan vacum casting. Teknik ini pertama kali digunakan pada tahun 1970. Metode gravity casting telah memberikan banyak kelebihan seperti harga yang efektif, kualitas tinggi dan proses kontrol seperti teknis casting lainnya. Secara garis besar, Gravity Casting dibagi 2, yaitu:

### 2.6.1 Gravity Casting dengan Cetakan Terbuka

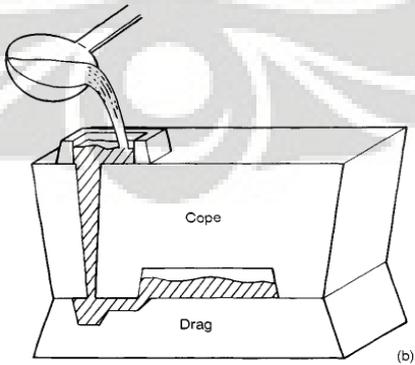
Banyak pengecoran membutuhkan cetakan yang dibentuk dari dua bagian, yaitu; bagian bawah ( *drag* ) sebagai cetakan dasar casting dan bagian atas ( *cope* ) sebagai penutupnya. Namun, beberapa jenis pengecoran tidak membutuhkan penutup bagian atas, sehingga logam cair dapat dituang dengan langsung. Ini adalah teknik yang telah sukses digunakan pada pengecoran besi tuang dan lebih ekonomis. Dimana permukaan belakang bendanya tidak diminta dengan performan yang bagus.



Gambar 2.20 Model *gravity casting* cetakan terbuka<sup>[42]</sup>

### 2.6.2 Gravity Casting dengan Cetakan Tertutup

Casting dengan cetakan tertutup memberikan tantangan besar kepada seorang *engineer*. *Gravity casting* mempunyai dua bagian, yaitu; bagian dasar dan bagian penutup. Untuk mendapatkan *gravity casting* baik yang terpenting adalah dengan mengatur saluran masuk logam cair secara serasi sehingga bisa menghindari terjadinya turbulensi. Contoh model *gravity casting* tertutup.

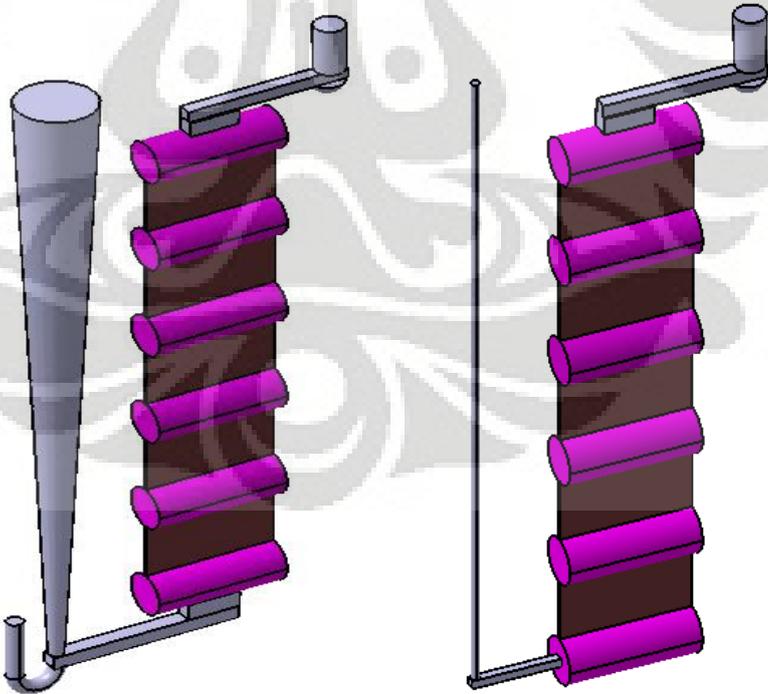


Gambar. 2.21 *Gravity casting* model cetakan tertutup<sup>[42]</sup>

# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengamati pengaruh *counter gravity casting* (model T1) dan *gravity casting* (model T3) terhadap waktu pengisian (*filling time*) pada pengecoran besi tuang nodular. Kecepatan pendinginan yang terlalu tinggi akan menyebabkan terbentuknya karbida yang sangat tidak diharapkan keberadaannya. Kecepatan pendinginann dapat diatur melalui beberapa parameter, dan salah satunya adalah melalui desain cetakan ini. Dengan pengaturan parameter tersebut, harapan dapat diperoleh desain pengecoran yang sesuai untuk pengecoran dinding tipis pada material FCD45 sebagai material dasar ADI-TWDI. Ke dua model desain cetakan ini menggunakan saluran tuang. Pola akan dibuat dari kayu dan cetakan akan dibuat dengan menggunakan pasir furan, serta proses pengecorannya akan dilakukan secara vertikal.

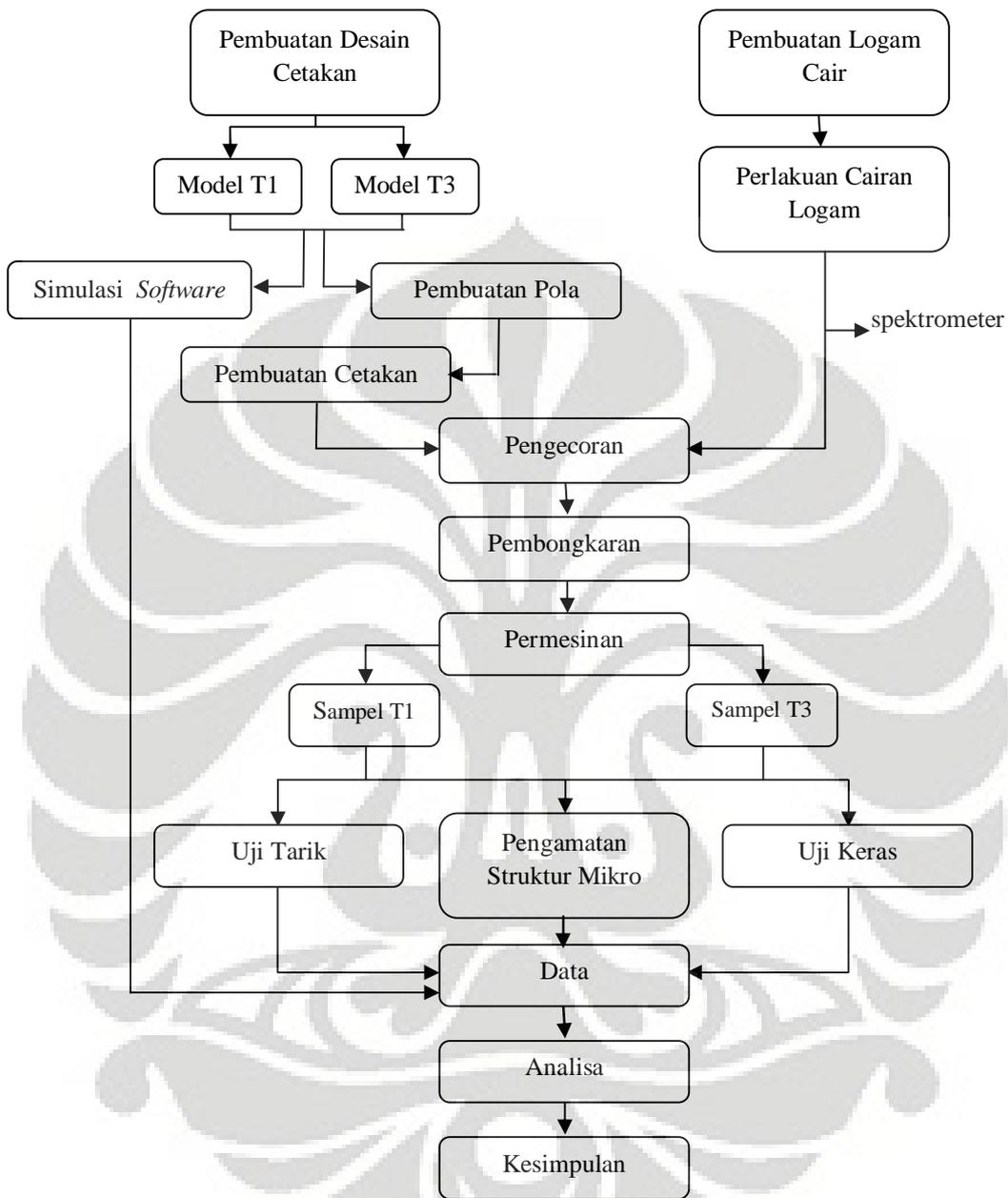


Model anti-gravity casting (T1)

Model gravity casting (T3)

Gambar 3.1. Model cetakan penelitian

Secara garis besar, diagram alir pada penelitian ini adalah;



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian

### 3.2 Alat Dan Bahan

#### 3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

##### 3.2.1.1 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.

### 3.2.1.2 Alat Pembuatan Cetakan

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan meliputi:

1) Mesin pencampur pasir (*mixer*)

Alat ini mencampur pasir dengan bahan aditif lainnya.

2) Sepasang flask

Flask yang digunakan adalah tipe excel karena metode pengecoran yang dilakukan vertikal.

3) Mesin pengangkut

Digunakan untuk memindahkan cetakan terutama ketika cetakan sudah dibuat karena berat yang cukup besar.

### 3.2.1.3 Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi:

1) *Electric furnace*

*Electric furnace* merupakan jenis dapur peleburan yang menggunakan energi listrik untuk proses induksi.

2) *CE meter*

CE meter adalah uji komposisi kimia untuk mengontrol kandungan elemen dalam logam cair.

3) *Thermocopel*

*Thermocopel* merupakan alat untuk mengukur temperatur logam cair.

### 3.2.1.4 Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk pengecoran meliputi:

1) Ladel

Ladel adalah tempat untuk menampung logam cair untuk dituangkan ke dalam rongga cetakan.

2) Thermocouple

3) Mesin pengangkut



### 3.2.1.5 Alat Pembongkaran

Alat yang digunakan untuk melakukan pembongkaran berupa mesin guncang yang diletakkan di bawah tanah. Selain itu, untuk memastikan produk cor bersih dari pasir yang melekat, digunakan mesin pembersih menggunakan bola-bola baja kecil yang ditumbukan.

### 3.2.1.6 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.

### 3.2.2.1 Bahan Baku Logam Cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair seperti pada tabel

3.1. berikut ini:

Tabel 3.1. Bahan baku logam cair<sup>[43]</sup>

No	Nama Material	Kuantitas	
		Kg	Addition
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	-

### 3.2.2.2 Bahan Baku Cetakan

Bahan utama yang digunakan untuk membuat cetakan terdiri dari:

#### 1) Pasir silika

Pasir silika merupakan bahan baku utama dari cetakan pasir. Pasir ini berikatan secara kimia.

2) Asam furan

Asam furan merupakan bahan pengikat yang dilakukan katalisasi tanpa pemanasan.

3) Serbuk arang

Serbuk arang ditambahkan ke cetakan agar bersifat mampu ambruk ketika dilakukan pembongkaran sehingga dapat dipakai kembali.

4) Plating

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

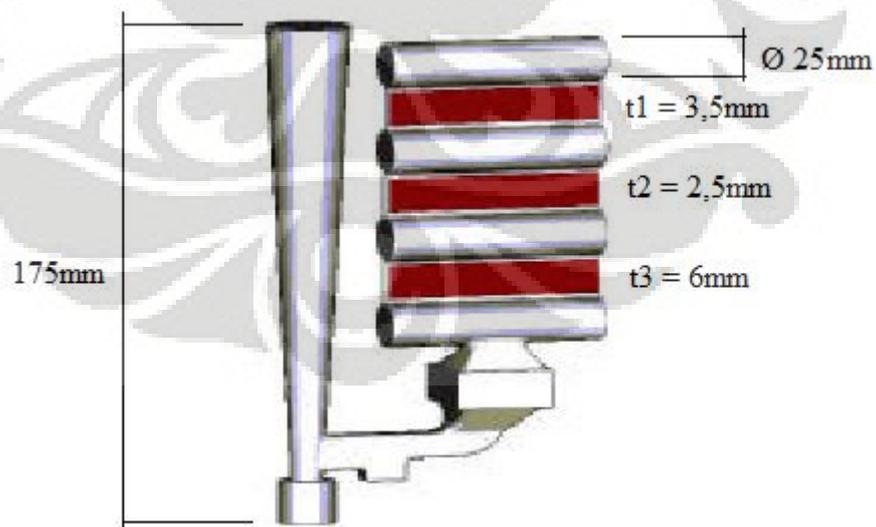
5) Isomol

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

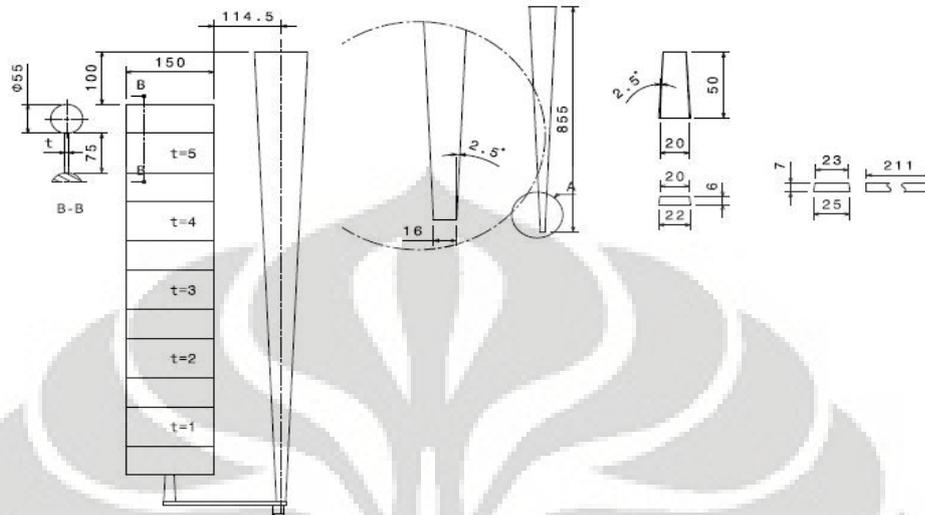
#### 3.3.1 Pembuatan Desain Cetakan

Desain cetakan pada penelitian ini merupakan modifikasi dari desain yang sebelumnya telah dikembangkan oleh Stefanescu pada tahun 2002.



Gambar 3.3 Desain pengecoran Stefanescu<sup>[11]</sup>

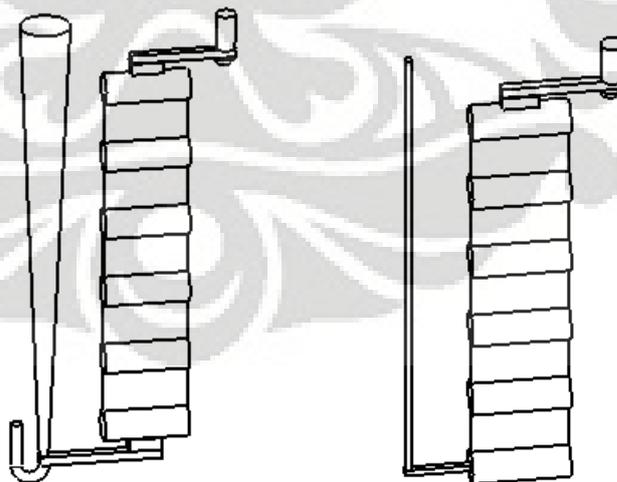
Modifikasi dari desain ini meliputi jumlah dan ukuran dari benda cor. Benda cor yang dihasilkan berjumlah lima buah dengan ukuran 150x75 mm dari ketebalan 1 - 5 mm.



Gambar 3.4 Desain cetakan pengecoran

### 3.3.2 Pembuatan Pola

Pembuatan pola menggunakan material kayu, dimana terdiri dari atas kelompok gating system dan benda cor berbentuk plat ukuran 150x75 mm dengan variasi ketebalan 1 – 5 mm.



Gambar 3.5 Pola cetakan sebelum di bentuk *pattern plate*

Proses pengecoran dilakukan di PT. X, Kawasan Industri Pulogadung, dimana cetakan menggunakan *furansand* sehingga pola cetakan dibuatkan *base*

*plate* untuk menghasilkan *pattern plate*. Pola cetakan disusun untuk variasi ketebalan plat yang berbeda-beda. Plat yang bisa bongkar pasang dibuat untuk membentuk pola pengecoran dengan model cetakan yang diinginkan.

Pada Model T1, ketebalan 1 mm berada di susunan paling bawah. Sedangkan pada model T3, ketebalan 1 mm berada pada susunan paling atas. Sehingga ketebalan 1 mm berada paling dekat dengan saluran masuk, dengan demikian logam cair akan mengisi mulai dari ketebalan yang paling kecil.



Gambar 3.6. *Pattern plate* yang telah jadi.

### 3.3.3 Pembuatan Cetakan

Pembuatan cetakan dilakukan dengan menggunakan cetakan *furand sand*. pembuatan cetakan ini diperlukan flask untuk meletakkan *pattern plate*. Tipe flask yang digunakan adalah tipe Excel. Tipe Excel digunakan karena tipe ini adalah satu-satunya tipe flask yang dimiliki oleh PT. X yang dapat digunakan untuk pengecoran vertikal. Karena keterbatasan flask jenis Excel yang dimiliki oleh PT. X, maka cetakan tidak dapat dibuat sesuai dengan perencanaan awal melainkan hanya 1 set setiap hari.



Gambar 3.7 Satu set cetakan untuk model (T3)



Gambar 3.8 Penggabungan cetakan model (T3)

### 3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam

Pembuatan logam cair dilakukan dalam electric furnace. Pembuatan logam cair diawali dengan dilakukannya pengisian, *charging*, bahan baku ke dalam dapur induksi. Setelah itu dapur dinyalakan dan proses dilanjutkan dengan proses peleburan, *melting*, lalu *refining*, dan diakhiri dengan proses tapping. Charging material terlebih dahulu untuk material dasar seperti return scrap dan steel scrap baru kemudian unsur paduan seperti FeSi, Carburizer, FeSiMg setelah material dasar meleleh.

Pembuatan logam cair terdiri dari dua tahap yaitu: pembuatan besi tuang kelabu (*ferro casting*) dan pembuatan besi tuang nodular (*ferro casting ductile*).

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

Tahap ini terdiri dari:

##### 1) 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.

##### 2) Tahap melting

Tahapan ini diawali pemanasan material sampai temperatur 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.

### 3) 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.

### 4) Tahap tapping

Ketika temperatur logam cair mencapai suhu tapping, maka dilakukan uji cil. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui jenis FC yang dihasilkan dan tebal cil yang terjadi. Sampel dibuat sesuai spesimen uji cil kemudian sampel didinginkan dengan mencelupkan ke dalam air. Setelah itu, sampel dipukul dan dianalisa terhadap patahan yang terjadi. 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)

Merupakan proses liquid treatment untuk mengontrol grafit berbentuk bulatan. 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, sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode sandwich. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam ladle dibawah *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.

Pada proses ini, inokulan yang digunakan adalah Fe-Si sedangkan nodulan yang digunakan Fe-Si-Mg. Inokulasi bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit



sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silicon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Setelah dilakukan inokulasi, kemudian terjadi proses nodulasi ketika logam cair mencapai dasar ladle. Ciri-ciri yang tampak pada proses ini adalah terjadi ledakan di dalam ladle yang mengeluarkan asap putih dan cahaya. Hal ini terjadi karena nodulan bersifat eksplosif. Pada proses liquid treatment ini, magnesium mengubah grafit dari bentuk serpih menjadi bulatan. Proses ini berlangsung sekitar 10 - 15 menit.



Gambar 3.9 Proses pembuatan logam cair di *electric furnace*.

### 3.3.5 Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui sprue basin. Control temperature selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dimasukkan ke dalam rongga cetakan melalui sprue basin dengan menggunakan thermocouple. Temperatur tuang dijaga sekitar  $1450^{\circ}\text{C}$  sampai  $1393^{\circ}\text{C}$  untuk memastikan cetakan dapat terisi penuh oleh cariran. Lamanya waktu penuangan diukur dengan menggunakan stopwatch mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair.

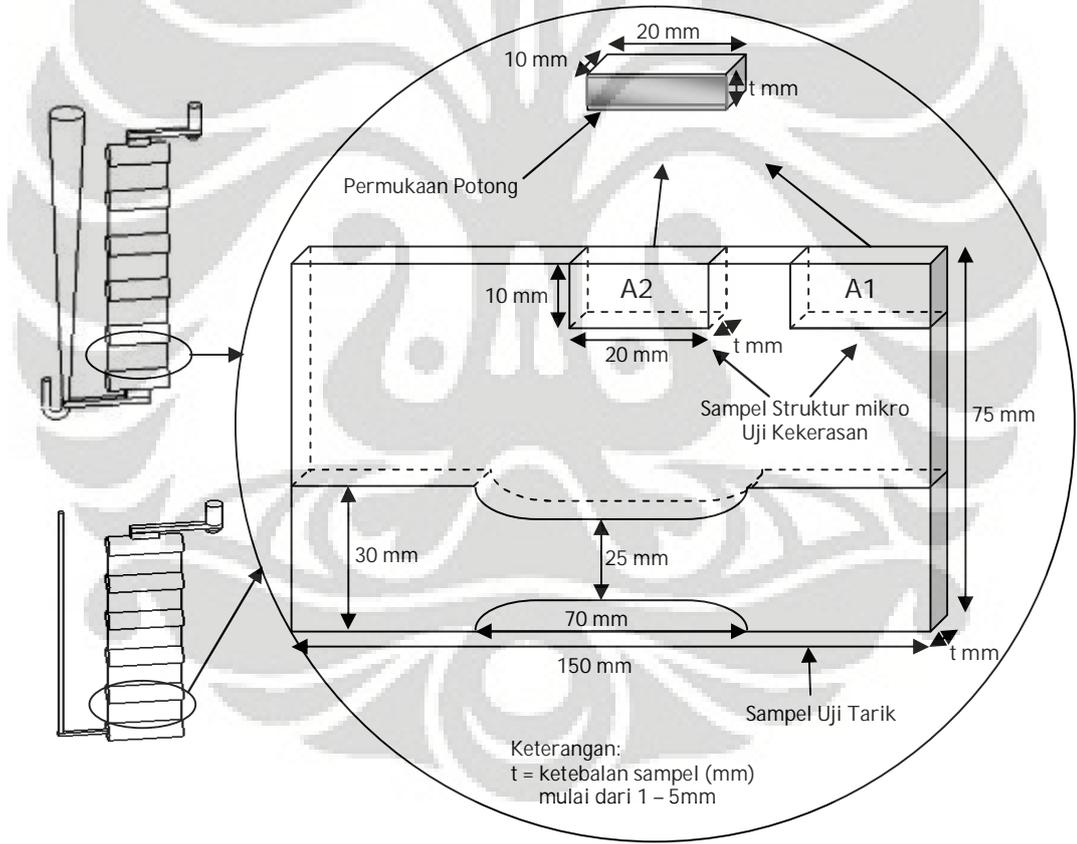
Setelah cetakan dibongkar kemudian dilakukan machining untuk mengambil benda cor (plat) yang sebelumnya telah dibersihkan dengan menggunakan sand blasting. Machining dilakukan hanya untuk memisahkan bagian plat dengan gating system serta cacat sirip.

### 3.3.6 Preparasi Sampel

#### 1. Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel untuk uji komposisi kimia dilakukan pertama kali dengan membuat cetakan uji spektrometer sebelum penuangan logam cair ke dalam rongga cetakan.

Sedangkan, produk hasil cor berupa plat dengan ketebalan mulai dari 1 – 5 mm, kemudian dilakukan preparasi sampel untuk dilakukan pengujian, yang terdiri atas: pengujian struktur mikro, pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Setiap plat dilakukan pengambilan sampel uji pada posisi yang ditunjukkan pada gambar 3.10. Berikut metode pengambilan sampel pada semua plat untuk pengujian.



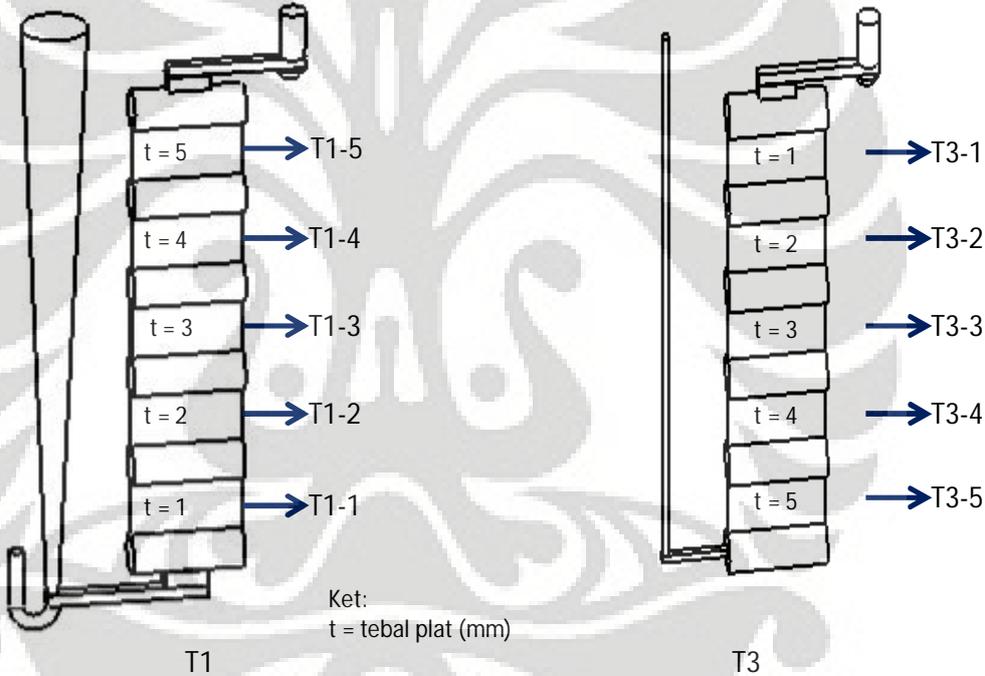
Gambar 3.10. Metode pengambilan sampel untuk pengujian.

Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi (LUK) Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT) – Serpong kemudian di kirim ke Iwate University – Jepang untuk menghitung nodularitas,

jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul. Sedangkan pengujian tarik dan kekerasan bertempat di Laboratorium Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.

2. Metode penamaan sampel

Pemberian kode dilakukan pertama kali berdasarkan desain pengecoran yang dibuat, yaitu: T1 dan T3. Pada setiap desain pengecoran ada 5 buah plat dengan ketebalan yang berbeda, mulai dari 1, 2, 3, 4, dan 5 mm. Sehingga, penamaan sampel dilakukan dengan menambahkan angka pada kode sampel, Gambar 3.11. Sebagai contoh: T1-1 untuk plat 1 mm dari desain T1 dan T3-1 adalah plat 1 mm dari desain T3.



Gambar 3.11. Metode penamaan sampel

Pada sampel pengamatan struktur mikro, kode sampel ditambahkan sesuai dengan posisi daerah pengambilan sampel, yaitu: A1 dan A2. Kode A1 adalah untuk posisi pengambilan di pinggir sedangkan A2 untuk posisi pengambilan di tengah, Gambar 3.10. Sebagai contoh, sampel T1A1-1 adalah sampel 1 mm pada Model T1 dengan posisi pengambilan di pinggir (A1). Untuk sampel uji tarik, karena hanya 1 untuk setiap plat dan kondisi maka kodenya sama dengan kode plat.

### 3.3.6.1 Preparasi Sampel Uji Komposisi Kimia

Sampel uji komposisi kimia atau uji spektrometer diambil dari cetakan uji berupa cetakan uji spektrometer. Preparasi selanjutnya dilakukan dengan memotong sedikit pada bagian atasnya kemudian dibubut bagian dasarnya. Proses pembubutan ini dilakukan agar diperoleh permukaan uji yang rata dan bersih dari kotoran atau lemak yang dapat mempengaruhi hasil pengujian. Setelah dibubut, sampel uji komposisi ini tidak boleh dipegang pada bagian bawahnya agar tidak terkena kontaminasi dari tangan.

### 3.3.6.2 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

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

#### 1. Pemotongan (*Cutting*)

Pemotongan sampel dilakukan dengan metode penggergajian. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses pemotongan agar dapat mengurangi tingkat deformasi pada permukaan sampel. Pengambilan sampel pada proses ini sesuai dengan Gambar 3.10.

#### 2. *Mounting*

Proses *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. Sampel dimasukkan ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan. Setelah itu didinginkan dengan media air.



Gambar 3.12. Sampel hasil *mounting*.



### 3. Pengamplasan (*Grinding*)

Pengamplasan bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel pada saat pemotongan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas dengan nomor grid #80, #180, #360, #500, #700, #800 dan #1200 yang dilakukan secara bertahap, dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus).

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.

### 4. Pemolesan (*Polishing*)

Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkilap seperti cermin serta menghilangkan ketidakteraturan dengan menggunakan *diamond pasto* yang ditambahkan air. Proses ini berturut-turut mulai dari tingkat kehalusan 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , dan 0,25  $\mu\text{m}$ . Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata agar cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan kembali secara fokus.

### 5. Etsa (*Etching*)

Etsa 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. Zat etsa yang digunakan adalah Nital 2%. Sampel dicelupkan kedalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan.

#### 3.3.6.3 Preparasi Uji Kekerasan

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



#### **3.3.6.4 Preparasi Uji Tarik**

Preparasi uji tarik dilakukan dengan pemotongan bagian sisi yang berseberangan dengan sisi yang digunakan untuk pengambilan sampel pengamatan struktur mikro. Pemotongan dilakukan dengan arah memanjang dengan lebar 30 mm. Sampel hasil pemotongan dibentuk sesuai standar JIS Z 2201 dengan menggunakan *milling machine*. Setelah itu, permukaan sampel digerinda untuk menghilangkan *skin effect* karena struktur ini bersifat rapuh sehingga dapat mengganggu pada saat dilakukan pengujian tarik. Cara pengambilan sampel uji tarik sesuai dengan gambar 3.10.

#### **3.3.7 Pengujian**

##### **3.3.7.1 Uji Komposisi Kimia**

Uji komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan Spektrometer. Sampel uji spektrometer ditembak sebanyak 2 kali, kemudian diambil nilai rata-ratanya. Uji komposisi kimia ini bertujuan untuk mengetahui kadar unsur-unsur yang terkandung dalam sampel.

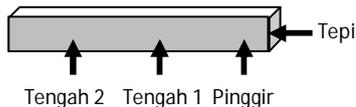
##### **3.3.7.2 Simulasi Software Z-Cast**

Simulasi *software* dilakukan untuk mengetahui proses pengisian cetakan sehingga dapat diketahui hal-hal yang mungkin terjadi pada saat dilakukan penuangan logam cair ke dalam cetakan. Simulasi ini menggunakan parameter seperti temperatur dan waktu pengisian. Uji simulasi dilakukan dengan program *software* bernama Z-Cast yaitu simulasi yang dimiliki oleh Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

##### **3.3.7.3 Pengamatan Struktur Mikro**

Ketika selesai pada tahap pemolesan, semua sampel dilakukan pengambilan gambar struktur mikro berupa struktur grafit bebas. Pengamatan ini dilakukan untuk menghasilkan gambar non etsa yang digunakan untuk menghitung nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Baru setelah semua sampel diambil struktur mikro non etsa, kemudian dilanjutkan tahap etsa untuk melihat struktur mikro berupa batas butir dan fasa yang terbentuk.

Adapun pengambilan foto struktur mikro seperti pada Gambar di bawah ini:



Gambar 3.13. Pengambilan foto struktur mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik digital Canon. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 50x, 100x, 200x, 500x, dan 1000x. Temperatur saat pengambilan gambar sekitar 27<sup>0</sup>C. Sedangkan teknik yang digunakan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.



Gambar 3.14. Mikroskop optik digital

Foto struktur mikro kemudian digunakan untuk menghitung nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul. Adapun metode perhitungan untuk variabel-variabel ini adalah sebagai berikut:

1. Metode perhitungan nodularitas

Pada tahap pertama, penentuan kenodulan dilakukan dengan melihat standar JIS No. G5502 dan ASTM A427. Setelah itu dilakukan perhitung secara manual. Proses perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

- a) Pengukuran dilakukan pada foto struktur miko non etsa pada pembesaran 200X.
- b) Langkah pertama semua grafit yang ada dihitung. Langkah selanjutnya dengan menggunakan bantuan penggaris mal lingkaran, setiap grafit dimal. Semua grafit yang pas masuk mengisi mal dihitung sebagai grafit nodul.
- c) Kenodulan diperoleh dengan membagi jumlah grafit nodul dengan jumlah keseluruhan grafit dan mengalikannya dengan 100%.



Perhitungan kenodulan juga dilakukan dengan menggunakan program yang dimiliki oleh *Iwate University* untuk validasi dari metode manual.

## 2. Metode perhitungan jumlah nodul

Perhitungan jumlah nodul diawali dengan membandingkan foto struktur mikro 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*. Jumlah nodul maksimum yang ada pada tabel-tabel tersebut hanya mencapai 300 nodul/mm<sup>2</sup> untuk AFS dan 600 nodul/mm<sup>2</sup> untuk DIS, sedangkan jumlah nodul yang terjadi pada TWDI melebihi jumlah tersebut. Selain itu, juga digunakan referensi yang dibuat oleh Ruxanda, tetapi tidak dapat digunakan karena pada referensi Ruxanda dicantumkan nilai S.<sup>[13]</sup>

Perhitungan kemudian dilanjutkan dengan cara manual pada foto struktur mikro non etsa pada pembesaran 100X dan 200X dengan menghitung semua grafit yang ada tanpa melihat kebulatannya.

Kemudian perhitungan jumlah nodul dikoreksi dengan melakukan perhitungan menggunakan program yang dimiliki oleh *Iwate University* dengan batas minimal diameter grafit adalah 5 µm. Hasil kedua perhitungan lalu dibandingkan.

## 3. Metode perhitungan diameter rata-rata nodul

Perhitungan diameter rata-rata nodul pada tahap awal juga dilakukan secara manual dengan menggunakan mal lingkaran pada foto struktur mikro non etsa pada pembesaran 200X. Semua nodul diukur dengan menggunakan mal lalu dihitung rata-ratanya. Hasilnya lalu dibagi dengan 200.

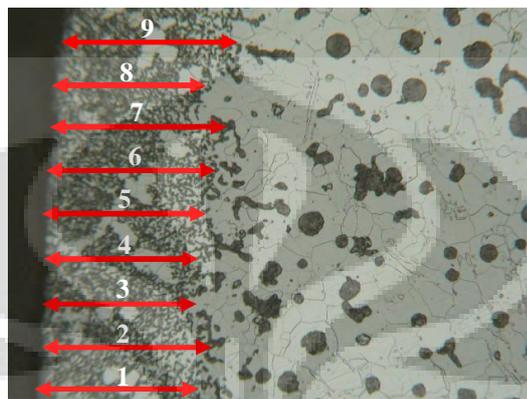
Validasi dilakukan dengan menggunakan program yang dimiliki oleh *Iwate University*.

## 4. Metode Pengukuran Ketebalan Efek Kulit

Pengukuran ketebalan efek kulit dilakukan sebagai berikut:

- a) Pengukuran dilakukan pada foto struktur mikro non etsa pada pembesaran 200X dengan ukuran hasil cetak foto standar kamera.
- b) Lalu pada bagian tinggi foto diberi tanda dengan jarak masing-masing 5 mm mulai dari bawah (datum), sehingga akan diperoleh 9 titik pengukuran.

- c) Setelah itu pada setiap titik pengukuran dibuat garis horisontal sejajar dengan datum, lalu lakukan pengukuran dengan menggunakan penggaris pada setiap titik.
- d) Hasil pengukuran lalu dibagi dengan 200 untuk memperoleh ketebalan sesungguhnya.

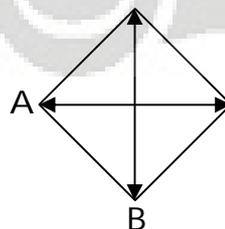


Gambar 3.15. Metode perhitungan efek kulit

### 3.3.7.4 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dibawah *microhardness tester* dengan metode Vickers. Metode Vickers ini menggunakan indenter diamond limas. Pada saat penjejakan, beban yang digunakan sebesar 300 gf, lamanya penjejakan selama 5 detik, dan temperatur berkisar 27<sup>0</sup>C. Standar yagn digunakan untuk pengujian ini adalah ASTM E92.

Penjejakan dilakukan pada arah horisontal dan vertikal. Pada arah horisontal, 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 3.16. Bentuk jejak metode vickers

Untuk menghitung diameter penjejakan, digunakan rumus perhitungan sebagai berikut:



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

Hasil perhitungan  $dp$  kemudian digunakan untuk menghitung nilai kekerasan dengan formula sebagai berikut:

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



Gambar 3.17. *Microhardness tester.*

### 3.3.7.5 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Shimadzu Servopulser*. Mesin ini memiliki kapasitas 20 ton (200 KN) dan belum terintegrasi dengan sistem komputerisasi. Sehingga, data yang dihasilkan melalui pembentukan grafik oleh jarum pembaca terdapat pada selembar kertas. Prinsip kerja mesin uji tarik adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinu sambil diukur pertambahan panjangnya. Standar pengujian yang digunakan adalah JIS Z 2241.



Gambar 3.18. *Tensile strength machine*



## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Komposisi Kimia

Tabel IV.1. Hasil pengujian komposisi kimia<sup>[43]</sup>

Elemen	Standar	Uji 1	Uji 2	Rata-rata
C	3.90 – 4.00	3.90	3.78	3.84
Si	1.50 – 1.70	2.61	2.58	2.60
Mn	0.30 – 0.50	0.37	0.37	0.37
P	0.03 Max	0.02	0.02	0.02
S	0.02 Max	0.023	0.023	0.023
Cu	0.15 Max	0.04	0.04	0.04
Cr	0.15 Max	0.04	0.04	0.04
Ni	0.15 Max	0.03	0.03	0.03
Mg	0.03 Min	0.04	0.04	0.04
Mo	0.2 Max	0.002	0.002	0.002
Al	-	0.02	0.02	0.02

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan spektrometer yang terkalibrasi. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia di atas, terdapat unsur karbon sebesar 3,84%, silikon sebesar 2,60% dan fosfor sebesar 0.02%. Ketiga unsur ini adalah elemen yang dibutuhkan untuk menghitung nilai CE baik untuk mengetahui nilai CE itu sendiri juga untuk menentukan nilai fluiditas berdasarkan grafik.

Loper mengatakan untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%,<sup>[18]</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>[25]</sup> Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

Sedangkan, perhitungan nilai CE untuk Fluiditas (%C+0,25%Si+0,50%P) dihasilkan sebesar 4,5%.

Nilai CE sebesar 4,65% memenuhi persyaratan CE minimum oleh Loper untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida. Akan tetapi, nilai ini tidak cukup untuk memenuhi persyaratan struktur bebas dari karbida pada ketebalan 3 – 5 mm untuk TWDI (4,75 – 4,92%). Hal ini dibuktikan adanya struktur karbida pada



hasil pengecoran. Nilai CE yang diperoleh juga masuk dalam jangkauan nilai CE yang dianjurkan oleh Marteniz, yaitu: 4,4 sampai 4,6 %. Hal ini berdasarkan persyaratan TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.<sup>[25]</sup>

Selain itu, perhitungan nilai CE yang dibutuhkan untuk setiap ketebalan berdasarkan rekomendasi QIT<sup>[24]</sup> adalah sebagai berikut.

Tabel IV.2. Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT<sup>[24]</sup>

Ketebalan t (mm)	CE (4,9265 – 0,0425t)
1	4,884
2	4,842
3	4,799
4	4,757
5	4,714

Berdasarkan hasil perhitungan rekomendasi QIT, terlihat bahwa setiap ketebalan memiliki nilai CE yang berbeda-beda tetapi dengan desain yang digunakan maka hanya ada 1 nilai CE untuk semua ketebalan. Perbedaan yang terjadi ini secara visual tidak terlihat menimbulkan masalah karena semua cetakan dapat terisi dengan baik tetapi untuk memastikannya harus dilakukan analisa lebih lanjut.

Data komposisi kimia di atas juga menunjukkan bahwa sebagian besar unsur pepadu berada pada standar yang ditetapkan kecuali Si dan S. Kelebihan unsur Si disebabkan pengaruh proses inokulasi yang dilakukan terhadap logam cair untuk memicu pertumbuhan grafit, sehingga grafit yang terbentuk semakin banyak. Seperti pada reaksi pembentukan grafit bebas berikut.



Penambahan unsur Si menyebabkan pembentukan cementit (Fe<sub>3</sub>C) menjadi lebih susah sehingga mengijinkan unsur C membentuk grafit bebas. Hal ini berfungsi untuk menyediakan grafit yang cukup dalam besi tuang nodular dan mencegah terbentuknya struktur karbida yang merugikan. Dan sebaliknya, jika nilai Si yang dihasilkan lebih rendah dari pada standar yang digunakan, maka



akan mudah sekali terbentuk struktur karbida. Hal ini juga ditunjukkan dengan nilai CE yang akan menjadi lebih rendah.

Kelebihan unsur S disebabkan adanya kandungan yang berlebih dari material bahan baku. Hal ini mengakibatkan terbentuknya magnesium sulfida berupa dross pada lapisan logam cair, sehingga sering kali pada saat akan dilakukan penuangan harus memindahkan dross terlebih dahulu agar tidak masuk ke dalam rongga cetak. Untuk pengecoran besi tuang nodular, sebaiknya kandungan S dijaga pada kadar  $<0,015\%$ , akan tetapi jika ditambahkan Ce (inokulan) maka kadar S harus ditambahkan karena akan terbentuk serium sulfida.<sup>[4]</sup>

Kadar magnesium dalam paduan sebesar  $0,04\%$ . Hal ini penting untuk dijaga antara  $0,04 - 0,06\%$  agar memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk menghasilkan bulatan-bulatan grafit. Dengan kandungan sulfur yang melebihi standar, pembentukan bulatan grafit tetap berlangsung karena masih dalam jangkauan  $0,04 - 0,06\%$ . Namun, jika kandungan unsur S berada dibawah  $0,015\%$  maka kandungan magnesium antara  $0,035 - 0,04\%$  dapat memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk membentuk bulatan grafit.

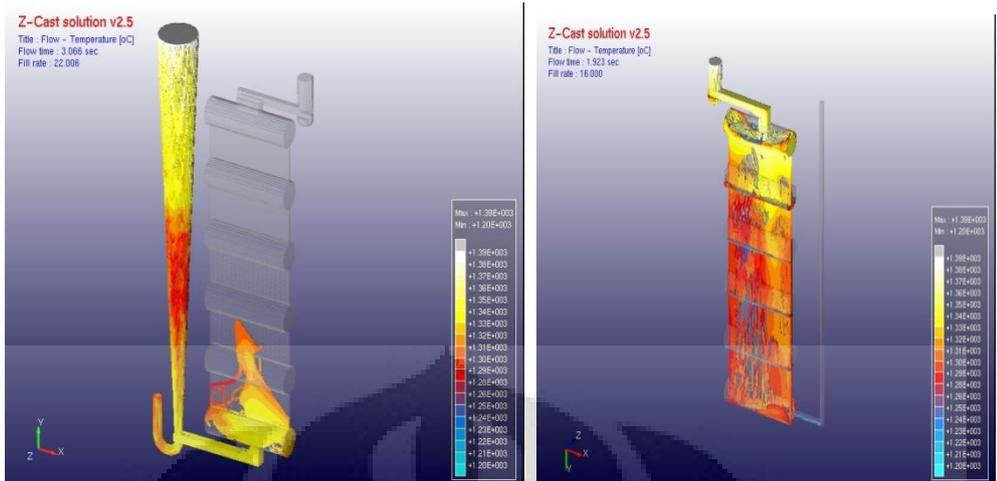
#### **4.2 Simulasi Z-Cas**

Berdasarkan data simulasi Z-cas, terdapat beberapa data pending yang didapat, antara lain:

##### **1. Kecepatan Pengisian**

Proses pengisian yang lebih cepat terjadi pada Model T3, yaitu selama  $8,554$  detik, hal ini karena pengisian T3 searah dengan gravitasi. Sedangkan waktu pengisian T1, selama  $67,349$  detik. Data ini juga sesuai data proses pengisian aktualnya, dimana Model T3 juga memiliki kecepatan pengisian yang lebih tinggi dari pada Model T1.

##### **2. Fenomena turbulensi**



T1

T3

Gambar 4.1. Fenomena turbulensi

Turbulensi terjadi pada kedua model, baik untuk Model T1 maupun Model T3. Pada Model T3, turbulensi nya lebih tinggi karena kecepatan pengisian jauh lebih cepat dibandingkan dengan T1, hal ini terjadi disebabkan T3 pengisiannya searah dengan gravitasi. Pada model T1, turbulensi ditunjukkan dengan semburan logam cair ke dalam rongga cetakan kemudian logam cair tersebut turun kembali. Namun, dengan volume riser yang cukup besar dan posisi yang baik, tampak gas tidak terperangkap dalam benda/plat.

**4.3 Pengamatan Visual**



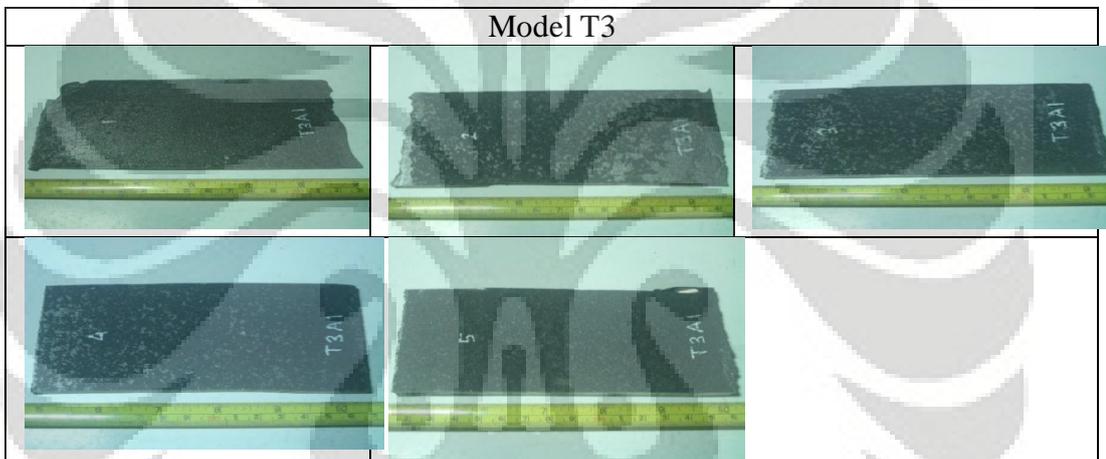
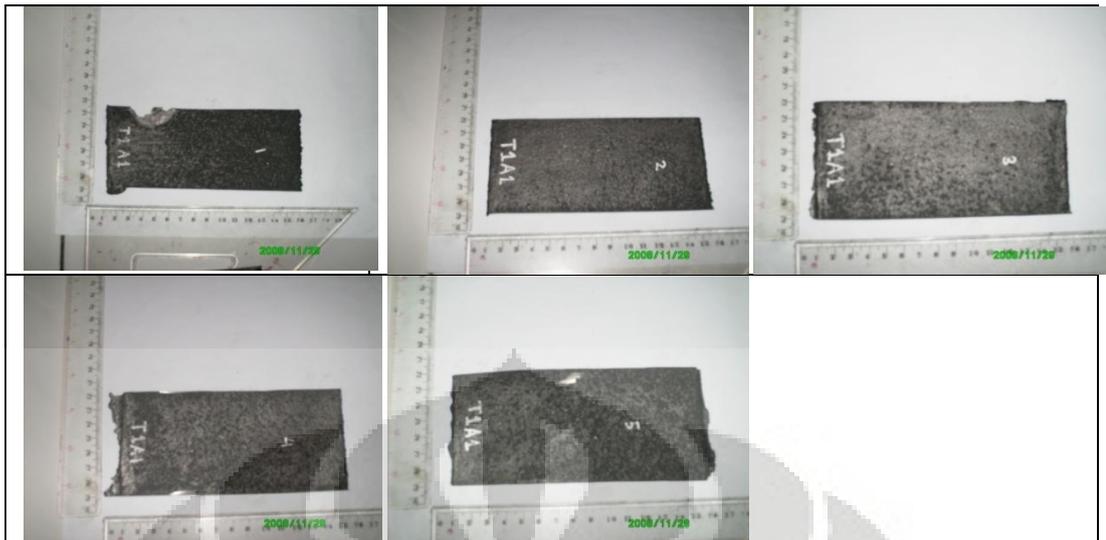
**Model T1**



**Model T3**

Gambar 4.2. Pengamatan visual sampel sebelum dipotong

Model T1



Gambar 4.3. Pengamatan visual sampel sesudah dipotong.

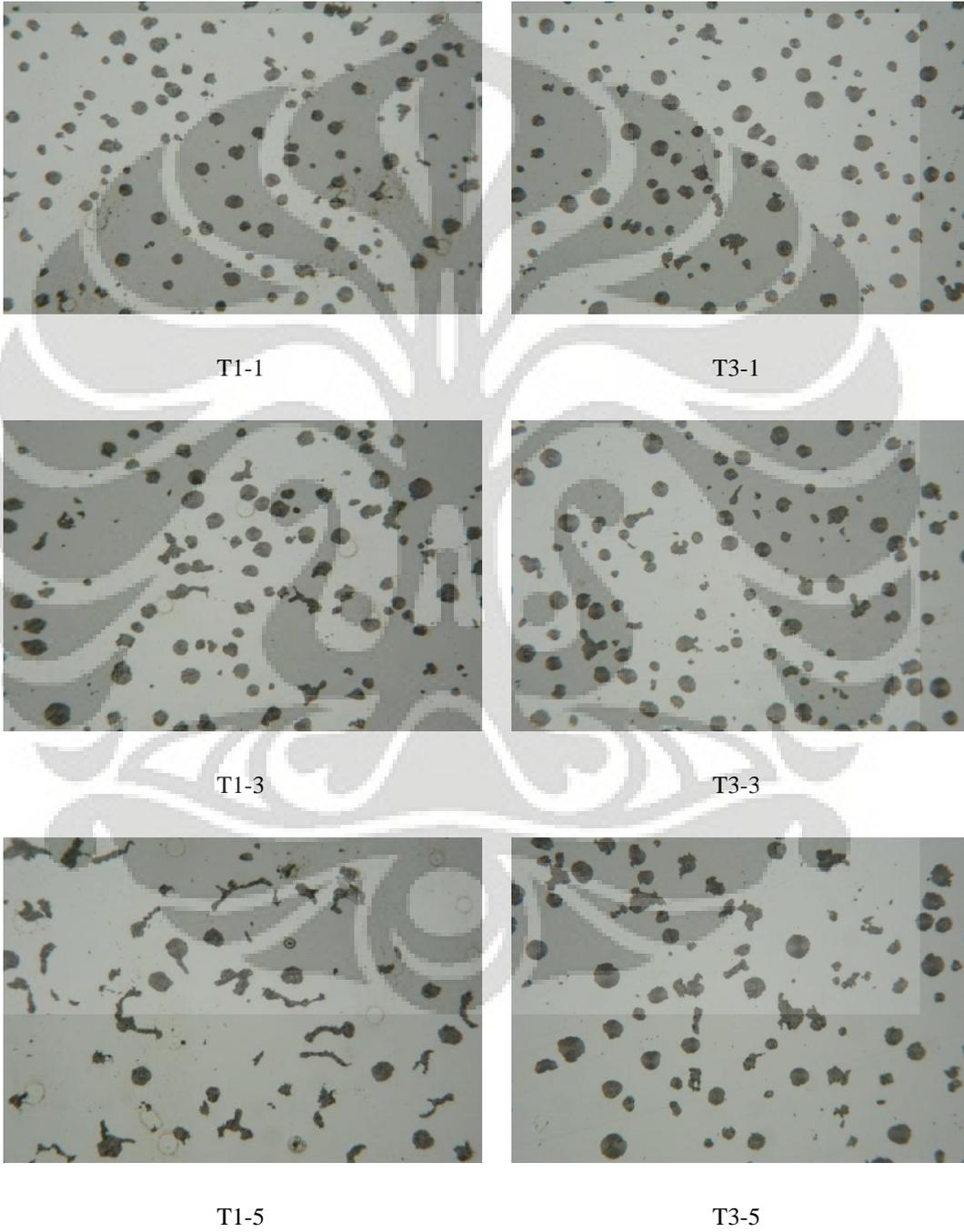
Berdasarkan gambar visual sampel sebelum dipotong, terdapat cacat sirip pada Model T1 dan T3 yaitu pada bagian sprue. Namun, secara keseluruhan produk yang dihasilkan cukup baik karena perubahan dimensi ketebalan tidak terlalu besar. Cacat sirip terjadi karena adanya celah pada cetakan.

Setelah dilakukan pemotongan, akan tampak jenis cacat shrinkage yang terjadi pada sampel T1-1 sedangkan sampel yang lain bebas dari cacat *shrinkage*. Cacat ini terjadi karena proses pembekuan yang tidak seragam.

#### 4.4 Struktur Mikro

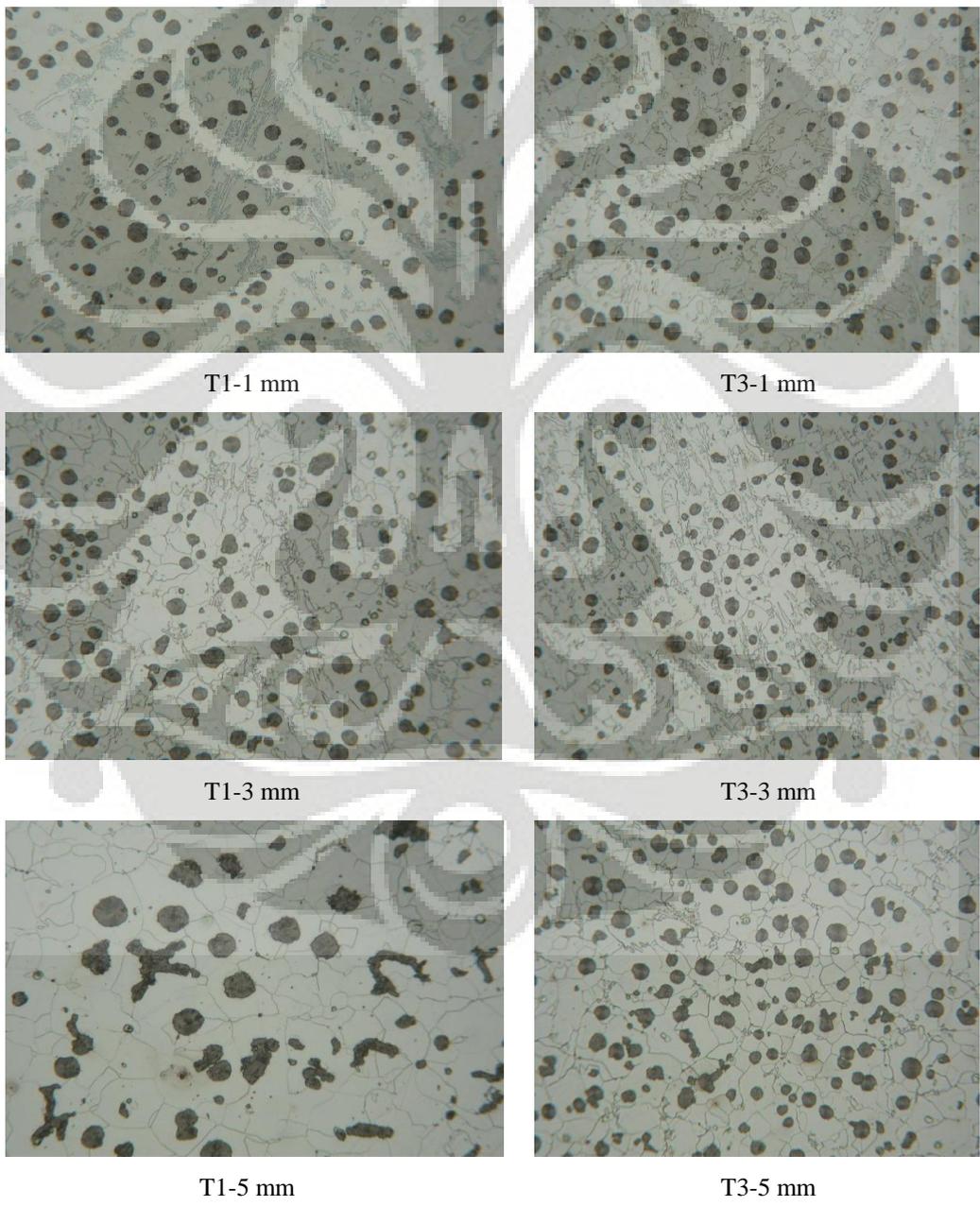
Pada pengamatan struktur mikro, pembahasan dilakukan dengan mengambil 3 jenis ketebalan yang sama pada Model T1 dan T3. Ketebalan yang diambil adalah 1 mm, 3 mm dan 5 mm. Ketebalan 1 mm dipilih karena

merupakan ketebalan yang ingin dicapai pada penelitian besar ini. ketebalan 3 mm dipilih karena merupakan ketebalan yang telah berhasil dicapai pada penelitian-penelitian sebelumnya. Sedangkan ketebalan 5 mm dipilih karena merupakan batas ketebalan maksimal untuk pengecoran dinding tipis. Berikut ini struktur mikro dari sampel T1 dan T3 pada ketebalan 1, 3, dan 5 mm.



Gambar 4.4. Struktur mikro non-etsa (pembesaran 200X)

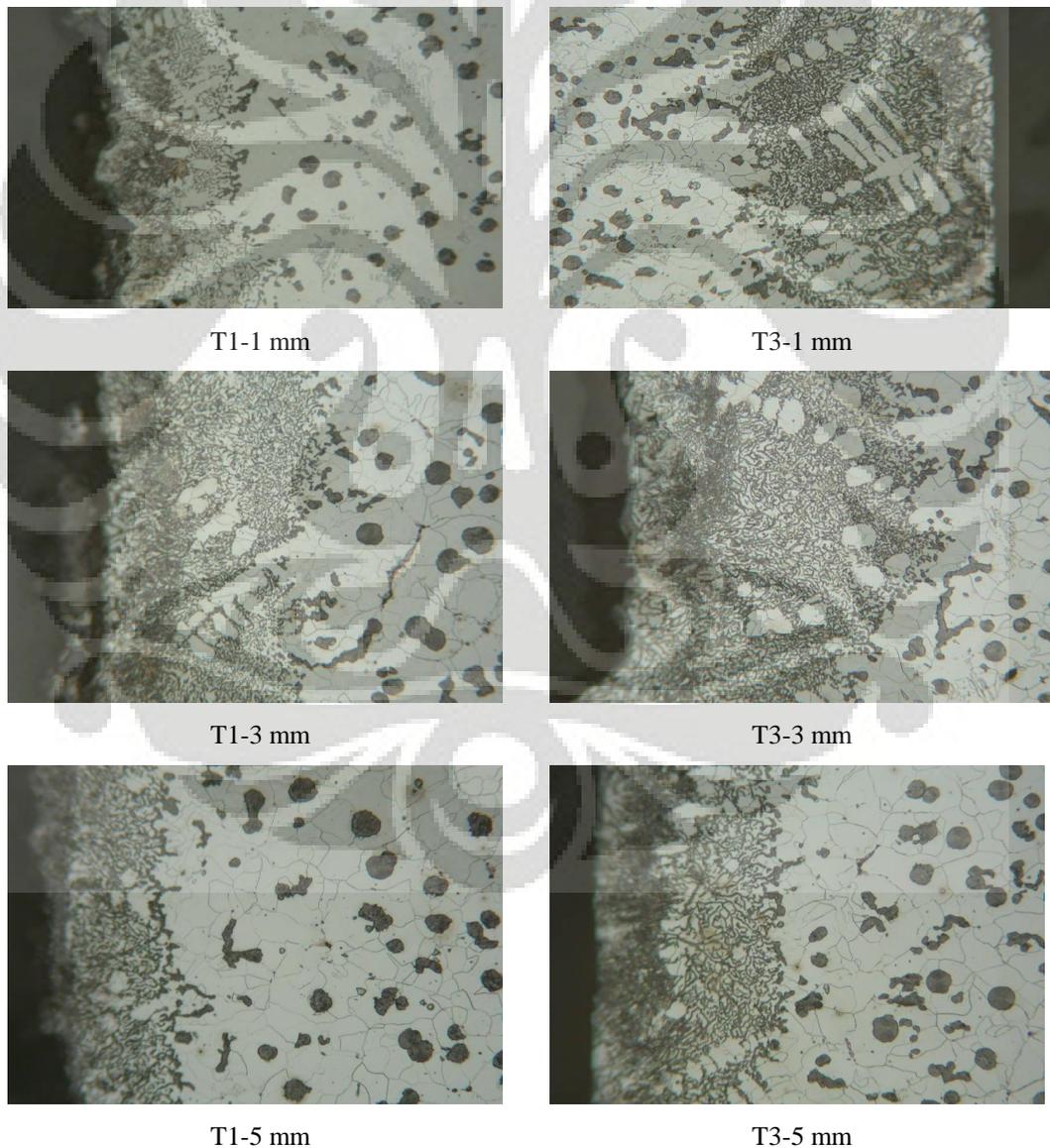
Gambar struktur mikro diatas merupakan foto mikro yang diambil dari sampel yang belum di etsa. Fungsi utama foto struktur mikro non etsa adalah digunakan untuk menghitung jumlah nodul dari sampel yang di uji, hal ini karena pada foto non-etsa hanya tampak bentuk dan ukuran grafit saja, sehingga mempermudah penghitungan jumlah nodul. Dari gambar di atas bisa kita lihat, pembentukan nodul pada T3 lebih sempurna dibandingkan dengan T1, hal ini karena grafit belum terbentuk secara sempurna pada T1.



Gambar 4.5. Struktur mikro etsa (pembesaran 200X)

Berdasarkan hasil foto struktur mikro, matrik hasil pengecoran model T1 dan T3 sesuai dengan yang ingin dicapai yaitu grafit nodular dalam matriks feritis. Akan tetapi, karbida juga terbentuk dan terlihat adanya 3 daerah struktur mikro. Ketiga daerah itu terdiri atas: daerah tepi yang berupa efek kulit, daerah transisi, dan daerah inti. Juga ditemukan struktur lain yang mungkin bisa kita asumsikan sebagai gelembung gas yang belum diisi oleh grafit.

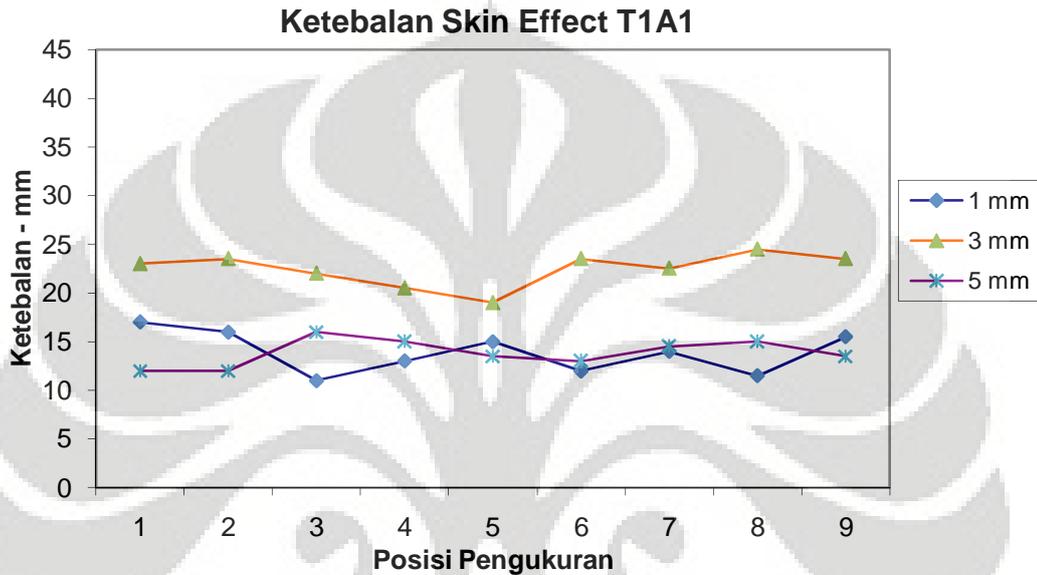
Pada gambar T3 jumlah karbida yang muncul jauh lebih banyak, hal ini karena pembekuan T3 sangat cepat. Selain itu terbentuknya karbida sebagai akibat penggunaan nilai CE yang sama untuk semua ketebalan dan tidak mengikuti standar yang diberikan oleh QIT.



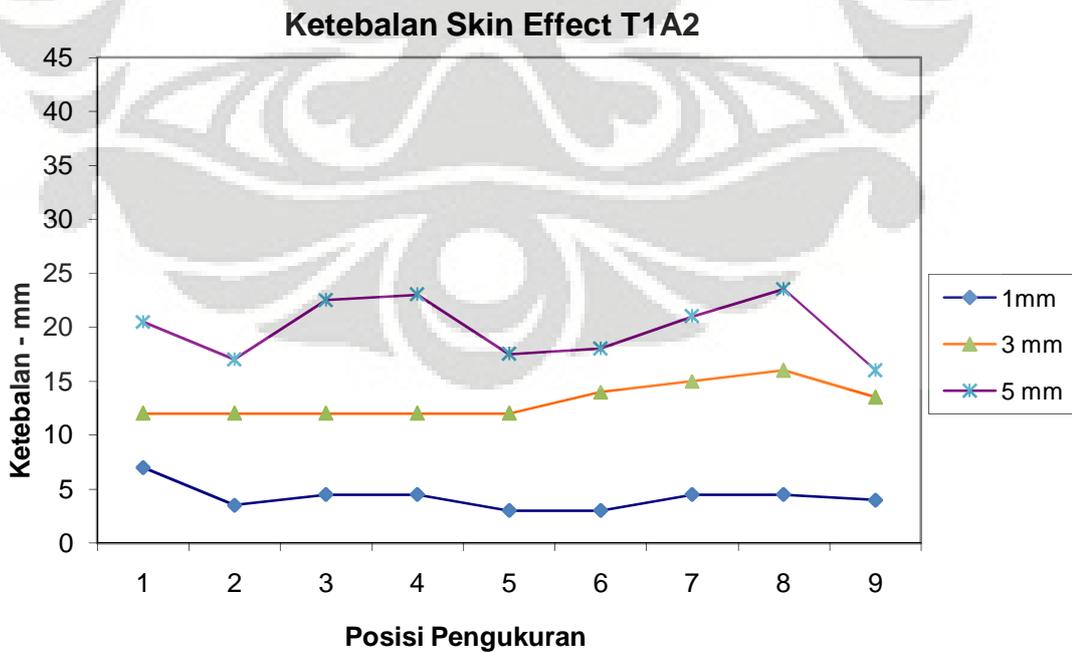
Gambar 4.6. Struktur mikro etsa (pembesaran 200X).

Pada bagian tepi struktur mikro TWDI terbentuk suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular. Lapisan ini kemudian diberi nama *flake graphite rim anomaly* atau *skin effect*. Ketebalan lapisan adalah antara 0,3 mm sampai dengan 39 mm. Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik dan biasanya dihilangkan dengan proses permesinan.

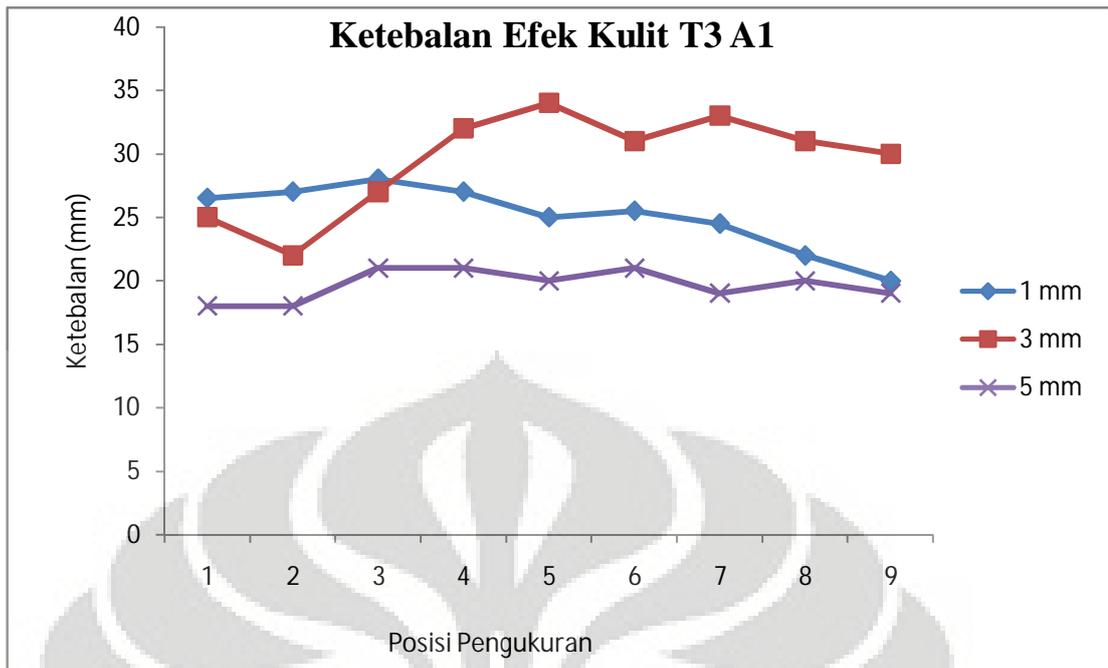
#### 4.4.1 Perhitungan Ketebalan Efek Kulit



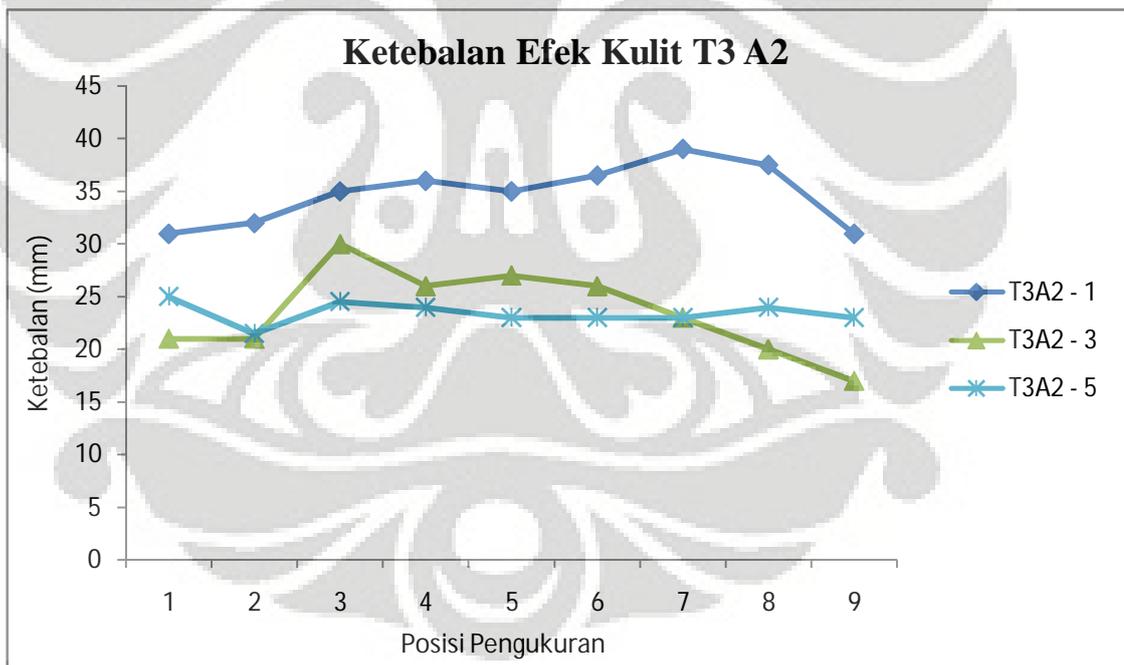
Gambar 4.7. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1 bagian tepi



Gambar 4.8. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1 bagian tengah.



Gambar 4.9. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T3 bagian tepi.



Gambar 4.10. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T3 bagian tengah.

Pada setiap ketebalan sampel, memiliki ketebalan efek kulit yang berbeda-beda. Pada sampel T1A1, sampel 3 mm memiliki ketebalan kulit yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel 1 dan 5 mm. Sedangkan pada sampel T1A2,



sampel 5 mm memiliki ketebalan kulit yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel 1 dan 3 mm.

Pada sampel T3A1, sampel 3 mm mendominasi ketebalan kulit yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel 1 dan 5 mm. Sedangkan pada sampel T3A2, sampel 1 mm mendominasi ketebalan kulit yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel 3 dan 5 mm.

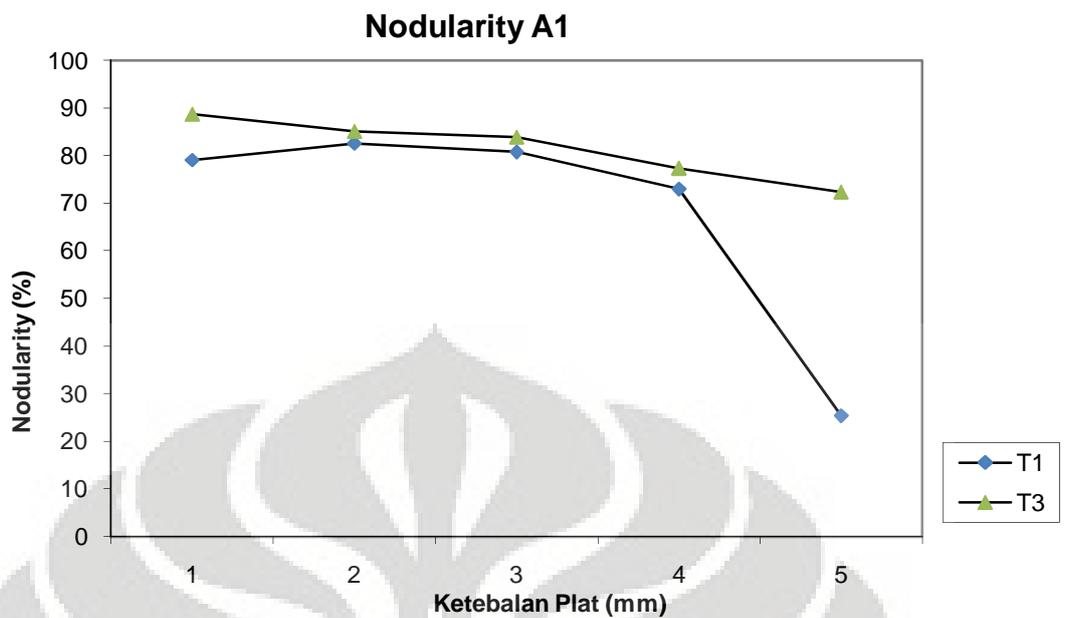
Hal ini menunjukkan bahwa pada daerah tepi dan tengah terdapat perbedaan ketebalan kulit dan hal ini sesuai dengan penelitian Ruxanda yang menemukan adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan daerah tengah. Perbedaan inilah yang dianggap bertanggung jawab atas terjadinya perbedaan bentuk grafit. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi sebagai akibatnya oksidasi Mg. Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.

Selain itu pada grafik di atas juga menunjukkan secara keseluruhan T3 mempunyai ketebalan kulit yang lebih tinggi dibandingkan T1, hal ini karena kecepatan pendinginan T3 jauh lebih cepat dari T1.

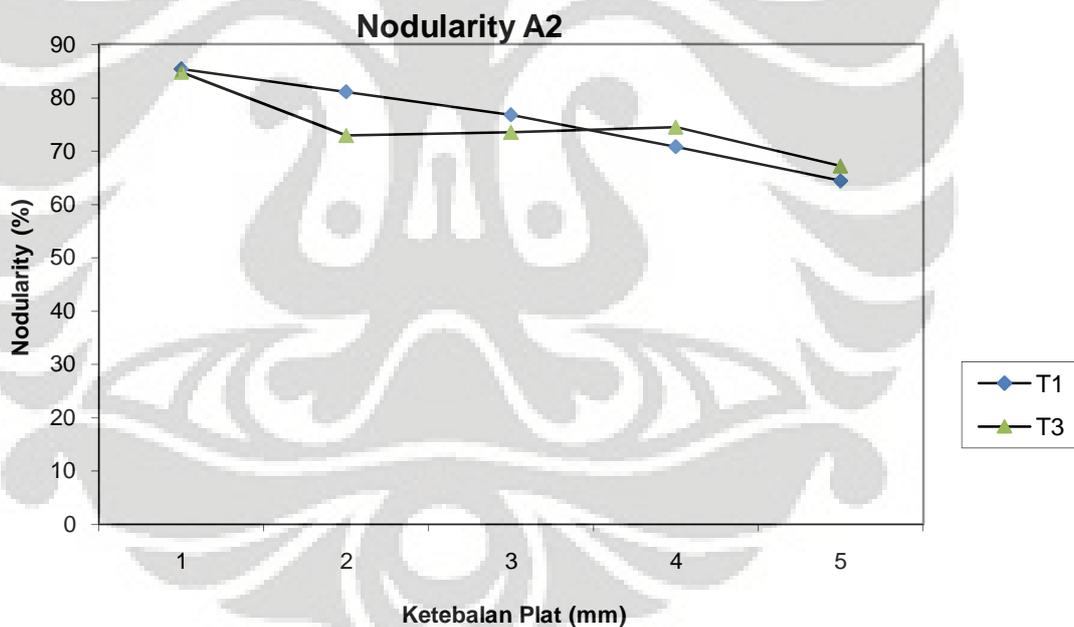
#### 4.4.2 Nodularitas

Tabel IV.3. Hasil Pengukuran nodularitas, jumlah nodul, diameter rata-rata nodul dan luas grafit

Model	Tebal (mm)	Posisi	Nodularitas (%)	Jumlah Nodul (nodul/mm <sup>2</sup> )	Ø Nodul (µm)	Luas Grafit (%)
T-1	1	A1	79.1	1057.6	13	10.5
		A2	85.4	1510.6	10.6	9.8
	3	A1	80.8	816.5	15.6	11.8
		A2	76.8	1065.7	13.8	11.2
	5	A1	25.4	466.6	22.6	9.2
		A2	64.4	557.4	21.3	13
T-3	1	A1	88.7	956.5	13.3	10.8
		A2	84.8	1344.4	11.8	11.2
	3	A1	83.9	909.9	14.9	12.8
		A2	73.5	1065.7	14.1	11.7
	5	A1	72.4	622.1	19.1	12.7
		A2	74.5	796.8	16.2	11.2



Gambar 4.11. Diagram nodularitas pada posisi A1



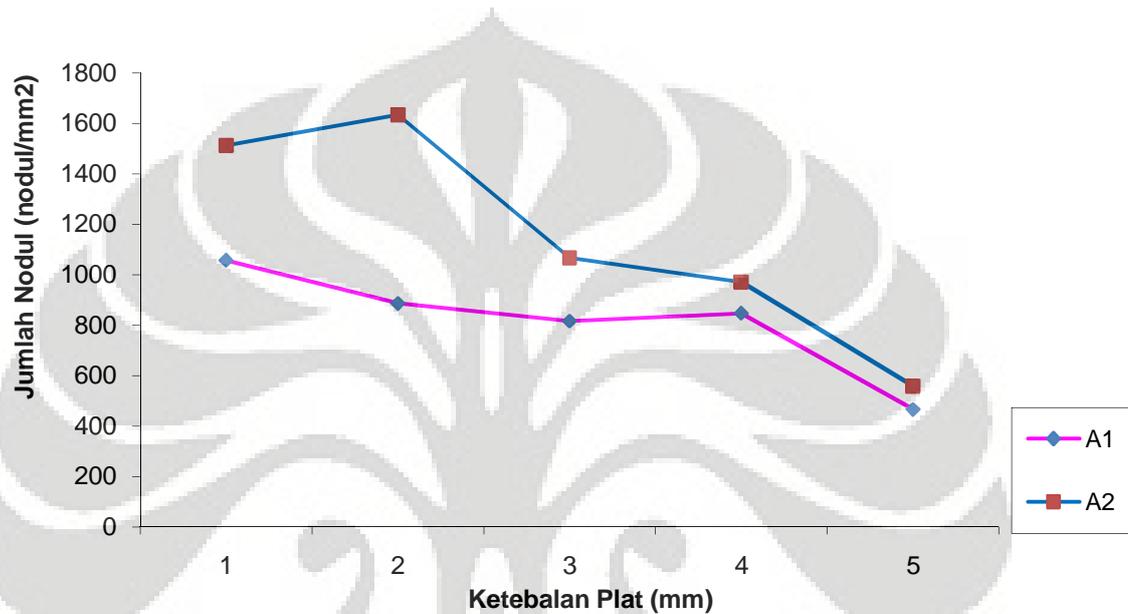
Gambar 4.12. Diagram nodularitas pada posisi A2

Berdasarkan grafik di atas, pada ketebalan 1, 3 dan 5 mm pada posisi A1 dan A2, tingkat nodularitas terbaik dimiliki oleh plat 1mm. Nodularitas dari plat 1 mm ke 5mm cenderung turun.

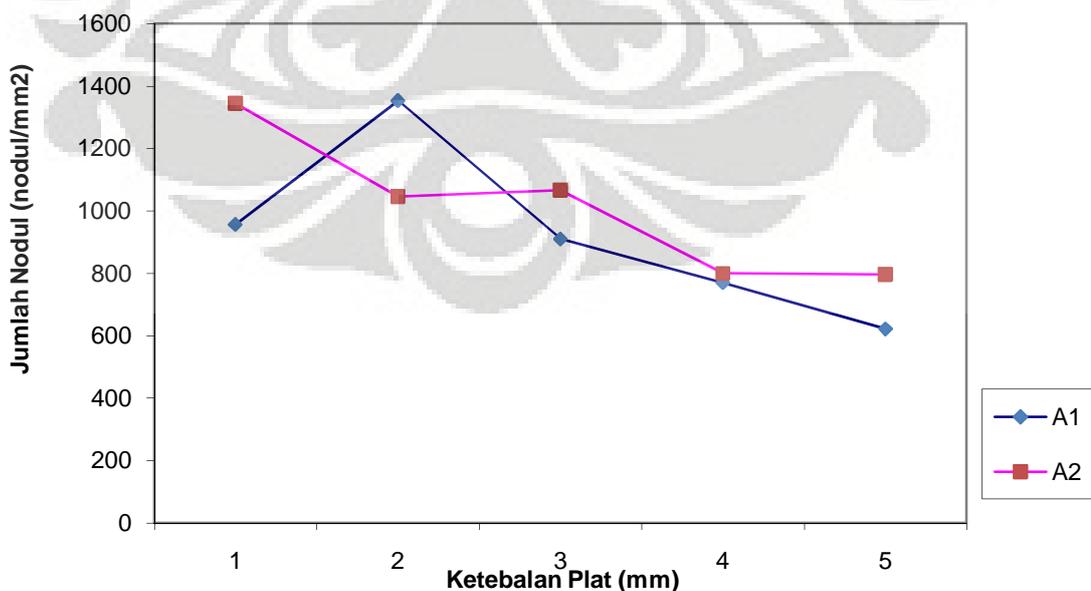
Selain itu, nodularitas pada Model T3 A1 lebih besar dari pada Model T1 A1. Sedangkan nodularitas pada Model T1 A2 dan T3 A2, cenderung hampir sama.

Sebagian besar sampel pada T3 memenuhi persyaratan yang dibutuhkan oleh *ductile iron data* yaitu tingkat nodularitas sebesar 80%<sup>[2]</sup> dan berdasarkan syarat dari *ferro casting ductile iron* (FCDI) yaitu sebesar 70-80% nodularitas<sup>[21]</sup>. Perbedaan ini disebabkan oleh kecepatan pengisian yang lebih besar pada Model T3.

#### 4.4.3 Jumlah Nodul



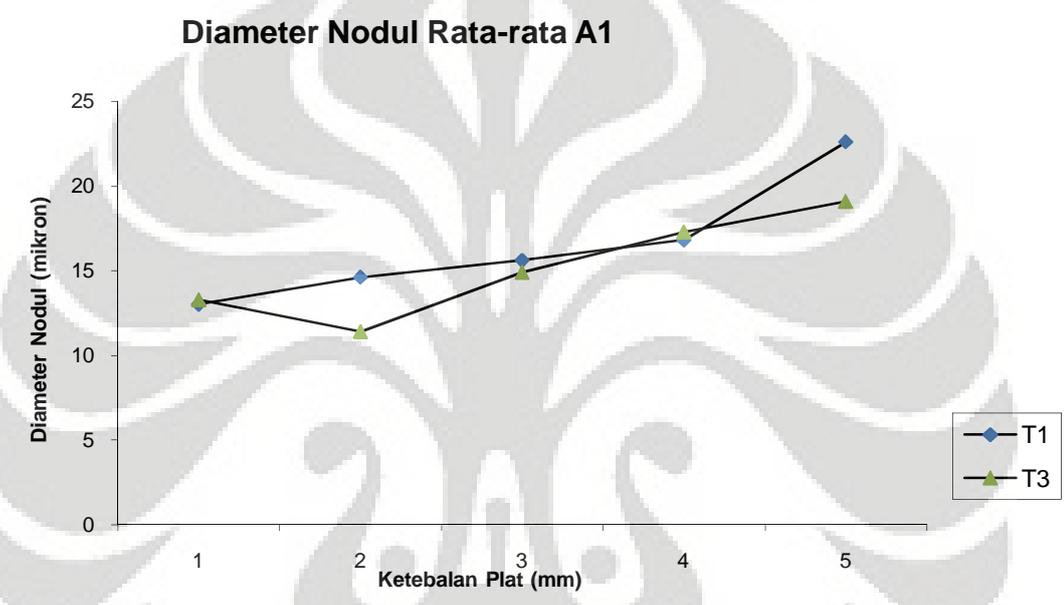
Gambar 4.13. Grafik perbandingan jumlah nodul T1



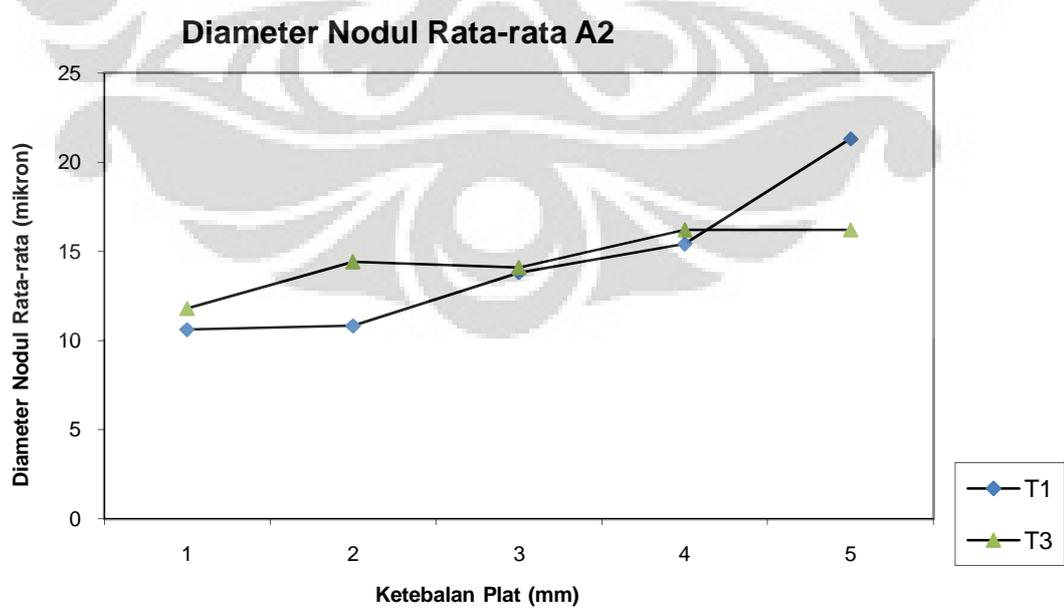
Gambar 4.14. Grafik perbandingan jumlah nodul T3

Pada grafik di atas, Model T1 A2 mempunyai jumlah nodul yang lebih baik dibandingkan T1 A2. Pada Model T3, A2 juga cenderung memiliki jumlah nodul yang lebih tinggi dibandingkan A1. Jumlah nodul terbanyak ada pada Model T1A2-2, yaitu sebesar 1633 nodul/mm<sup>2</sup>. Sedangkan nodul paling sedikit dimiliki oleh T1A1-5, dengan jumlah nodul sebesar 466,6. Selain itu pada grafik juga terlihat semakin tebal ketebalan plat, maka jumlah nodul semakin cenderung menurun.

#### 4.4.4 Diameter Rata-rata Nodul



Gambar 4.15. Grafik perbandingan diameter nodul A1.



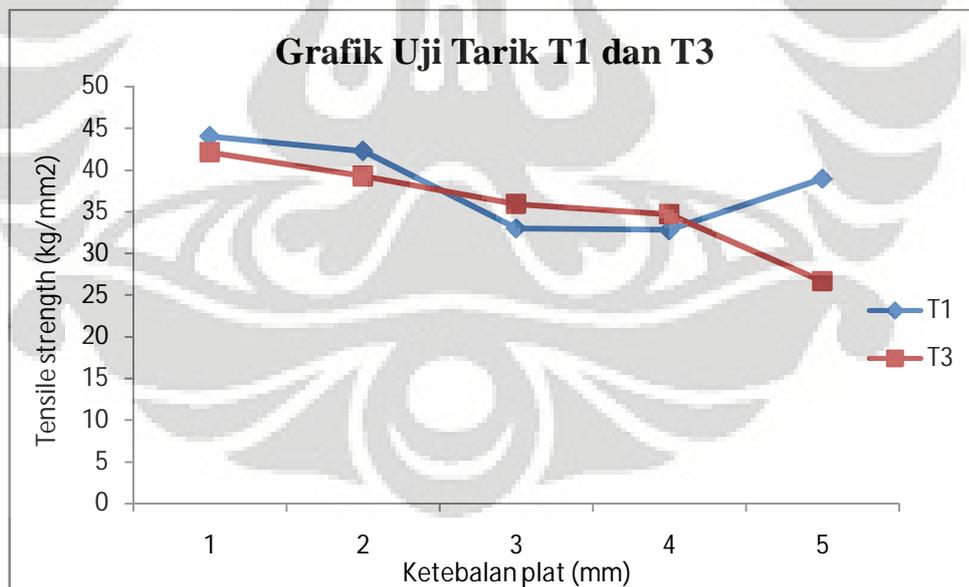
Gambar 4.16. Grafik perbandingan diameter nodul A2.

Pada grafik di atas dapat kita lihat, diameter rata-rata nodul dari ketebalan 1 sampai 5 cenderung naik. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar ketebalan maka diameter nodul yang terbentuk semakin besar pula. Sedangkan jumlah nodulnya akan berkurang krn rasio volume ruang untuk grafit membentuk bulatan semakin lebih besar. Diameter nodul terbesar ada pada T1 A1 5mm, yaitu sebesar 22,6 mikron.

Sampel T1 memiliki nilai diameter rata-rata yang lebih besar dari pada T3, ini disebabkan oleh proses pengisian yang lebih lama sehingga memberikan toleransi grafit untuk bersegregasi membentuk bulatan lebih besar selama solidifikasi. Dan ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. Pada desain vertikal dimana terjadi mekanisme perlawanan kecepatan logam cair terhadap gravitasi, *counter gravity* bertujuan untuk memperlambat proses pengisian cetakan. Dengan melambatnya proses pengisian diharapkan jumlah karbida yang terbentuk semakin sedikit.

## 4.5 Uji Mekanik

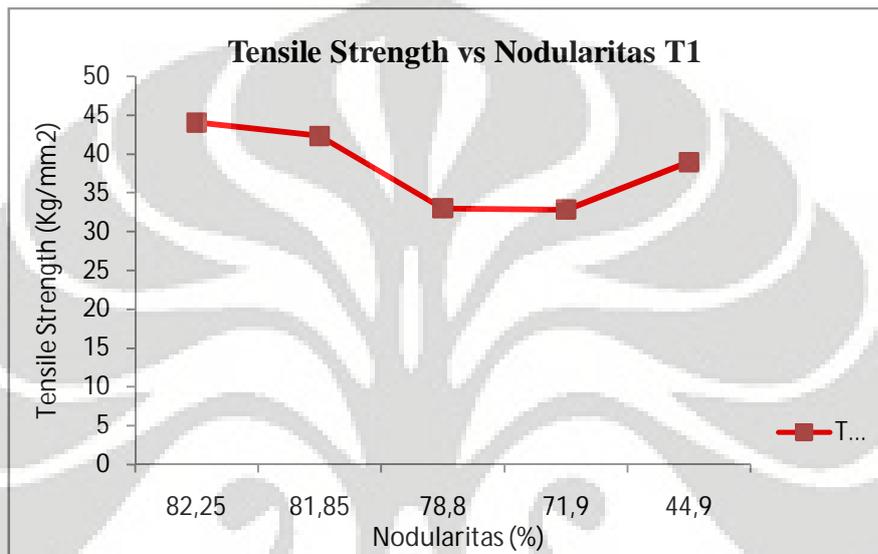
### 4.5.1 Uji Tarik



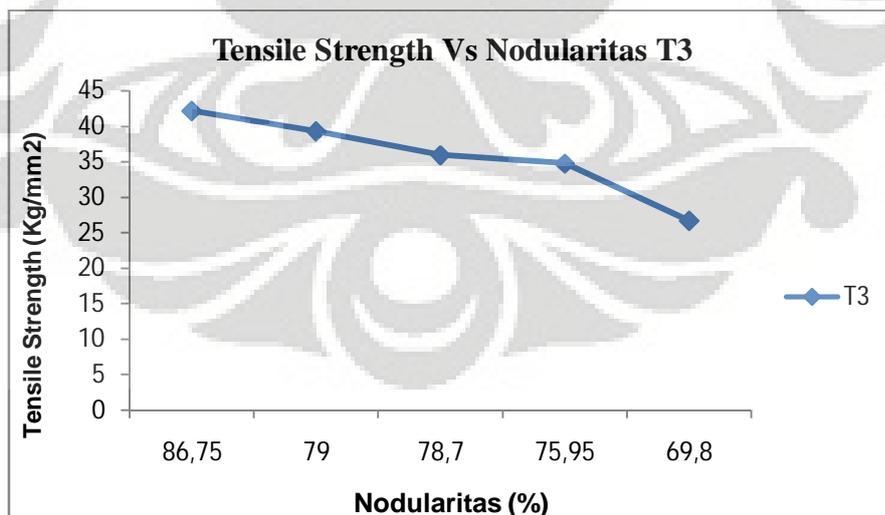
Gambar 4.17. Grafik Perbandingan nilai *tensile strength*

Pada grafik perbandingan nilai tensile strength diatas, kekuatan tarik T1 dan T3 menurun seiring dengan peningkatan ketebalan sampel. Hal ini terjadi

karena dengan ketebalan yang semakin berkurang menghasilkan tingkat kebulatan yang lebih tinggi), jumlah nodul yang dihasilkan semakin besar, dan bentuk butir yang lebih halus, sehingga kekuatan tarik meningkat. Namun pada T1 dengan ketebalan 5 mm ada terjadi penyimpangan, hal ini karena pada ketebalan 5 mm tersebut jumlah skin efek yang terbentuk sangat sedikit, sehingga nilai mekanisnya cukup baik, dimana bisa menghasilkan kekuatannya tarik sebesar 38,96 kg/mm<sup>2</sup>.



Gambar 4.18. Grafik *tensile strength* vs nodularitas T1

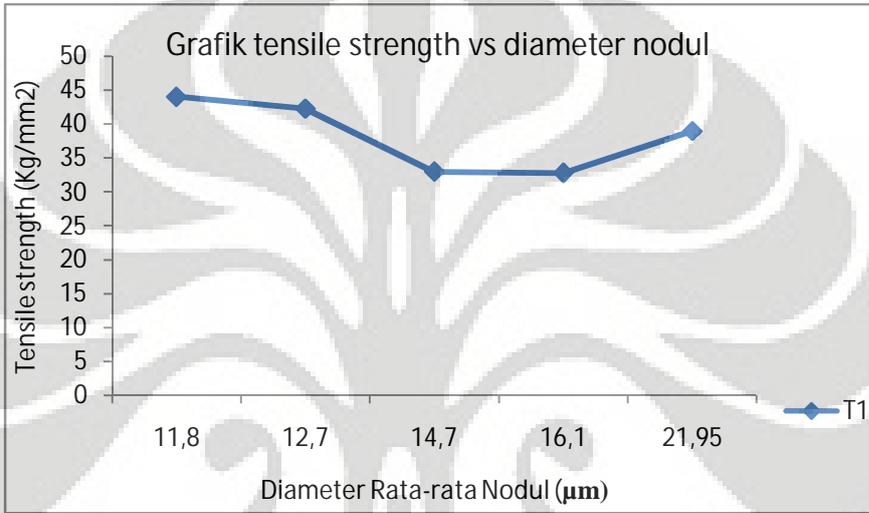


Gambar 4.19. Grafik *tensile strength* vs nodularitas T3

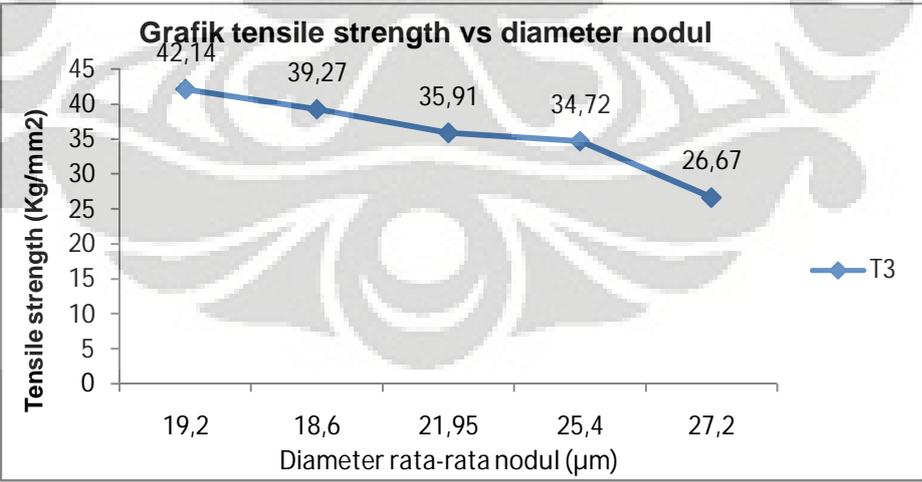
Pada grafik di atas menunjukkan hubungan antara kekuatan dengan nodularitas. Ketika nodularitas berkurang maka kekuatan yang dihasilkan juga

berkurang. Ini terlihat pada grafik ketika nodulnya tinggi, maka kekuatan tariknya pun akan tinggi. Nilai kekuatan tarik paling tinggi sebesar  $44,05 \text{ kg/mm}^2$ , pada tingkat nodularitas sebesar 82,25 %.

Ada sedikit penyimpangan pada T1-5. Penyimpangan ini disebabkan adanya efek kulit dari sampel yang lebih tipis dimana untuk ketebalan yang lebih besar lebih mudah dilakukan permesinan untuk menghilangkan efek kulit. Oleh karena itu, pada ketebalan 5 mm tidak banyak terpengaruh oleh efek kulit pada nilai kekuatan tariknya.



Gambar 4.20. Grafik T1 *tensile strength* vs diameter nodul



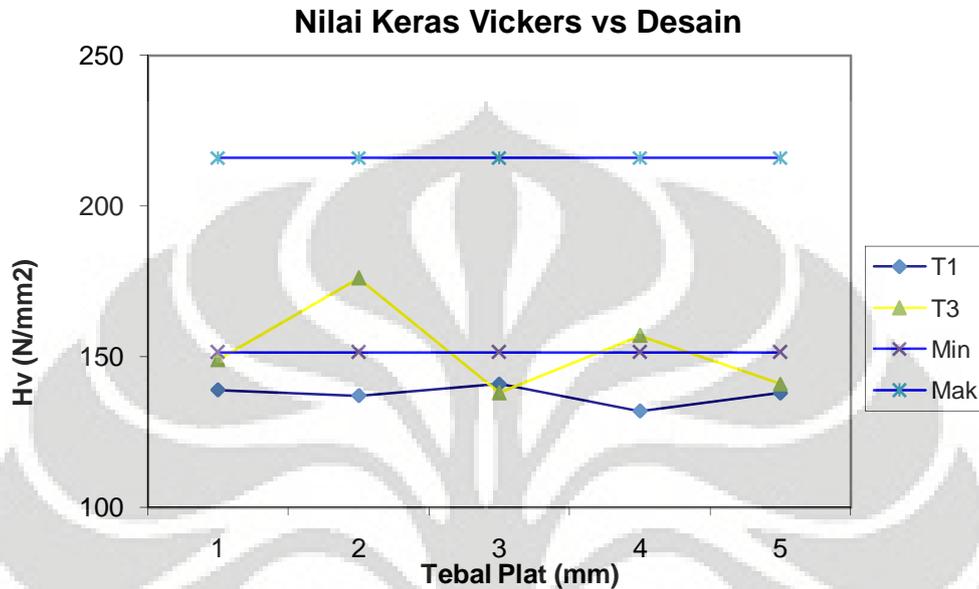
Gambar 4.21. Grafik T3 *tensile strength* vs diameter nodul

Berdasarkan Gambar di atas, peningkatan diameter rata-rata nodul pada grafit menyebabkan kekuatan tarik yang menurun. Hal ini terjadi karena pada



diameter grafit yang lebih besar, tegangan tidak terdistribusi secara merata dan terjadi konsentrasi tegangan pada grafit sehingga menurunkan tegangan kritis untuk terjadi perpatahan.

#### 4.6.1 Uji Kekerasan



Gambar 4.22. Grafik nilai kekerasan vs desain

Pada grafik di atas, nilai kekerasan T1 semuanya berada dibawah batas minimum. Sedangkan pada T3 hanya pada ketebalan 2 mm dan 4 mm saja yang mencapai nilai kekerasan standar. Nilai kekerasan yang berada di bawah batas standar disebabkan oleh penggunaan metode pengujian yang kurang mewakili untuk nilai kekerasan permukaan sampel yaitu dengan metode Vickers. Kelemahan untuk metode ini yaitu bentuk indentor berupa limas segi empat sehingga penjejakan banyak terjadi di fasa yang lebih lunak yaitu ferit. Hal ini terjadi karena matrik yang dihasilkan adalah feritik seluruhnya.

Nilai kekerasan T3 lebih besar dari pada T1. Hal ini disebabkan oleh proses pendinginan pada T3 yang lebih cepat. Proses pengisian yang lebih cepat menyebabkan solidifikasi yang lebih cepat pula. Pada Model T3, yang merupakan pengecoran searah grafitasi sehingga kecepatan pengisian jauh lebih tinggi dibandingkan dengan T1 yang arah pengisiannya berlawanan dengan arah gravitasi, sehingga solidifikasi T3 pun akan jauh lebih cepat dibandingkan dengan T1.



## BAB V KESIMPULAN

1. Penggunaan desain cetakan vertikal *counter gravity* cukup baik untuk pengecoran dinding tipis.
2. Desain pengecoran dinding tipis berpengaruh pada struktur mikro yang dihasilkan berdasarkan proses pengisian cetakan dan kecepatan pendinginan.
3. Pada pengecoran dinding tipis, nilai CE harus dijaga  $> 4,3\%$  untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida.
4. Aplikasi simulasi software berfungsi untuk melihat proses pengisian cetakan sehingga dapat memprediksi fenomena yang terjadi pada saat pengisian.
5. Penurunan ketebalan pada pengecoran dinding tipis meningkatkan kecepatan pendinginan sehingga semakin mudah terbentuk karbida.
6. Nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul berpengaruh pada sifat mekanik yang dihasilkan.
7. Kekuatan tarik dipengaruhi oleh *skin effect* yang terbentuk pada lapisan permukaan.
8. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan peningkatan nilai nodularitas.



## DAFTAR REFERENSI

1. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (1990). *Ductile Iron Data for Design Engineers*. Montreal, Canada: Author.
2. Schrems, K.K., dkk, *Statistical analysis of the mechanical properties of thin-walled ductile iron casting*. SAE Technical Paper Doc. No. : 2003-01-0828, 2003.
3. Callister, William D., (2007). *Material Science and Engineering: An Introduction*. Department of Metallurgical Engineering: The University of Utah. USA
4. ASM Handbook. (1988). *Casting: Volume 15*. Ohio: ASM International Metal Park.
5. Keough, J. R., dkk, *Carbide Austempered Ductile Iron*. Pada DIS Meeting. 2000, USA: DIS.
6. ASTM E-8M. (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
7. ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
8. Caldera, M., dkk, *Influence of nodule count on fatigue properties of ferritic thin wall ductile iron*. Materials Science and Engineering, 2007. 23(8): p. 1000- 1004.
9. Skaland, T., dkk, *Inoculation material improves graphite formation in ductile iron*. Modern Casting, 2001. 91(12): p. 43-45.
10. Javaid, A., dkk, *Mechanical properties in thin wall ductile iron casting*. Modern Casting, 2000. 90(6): p. 39-41.
11. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178).
12. Showman, R. E. and R. Aufderheide, *Getting to the core of thin-walled casting*. Modern Casting, 2004. 94(4): p. 32-34.
13. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177).
14. Elkem
15. Goodrich, G. M., *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. p. 97-30.
16. (Dawson, 1976).
17. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Javaid, 1998).
18. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Loper, 1965).



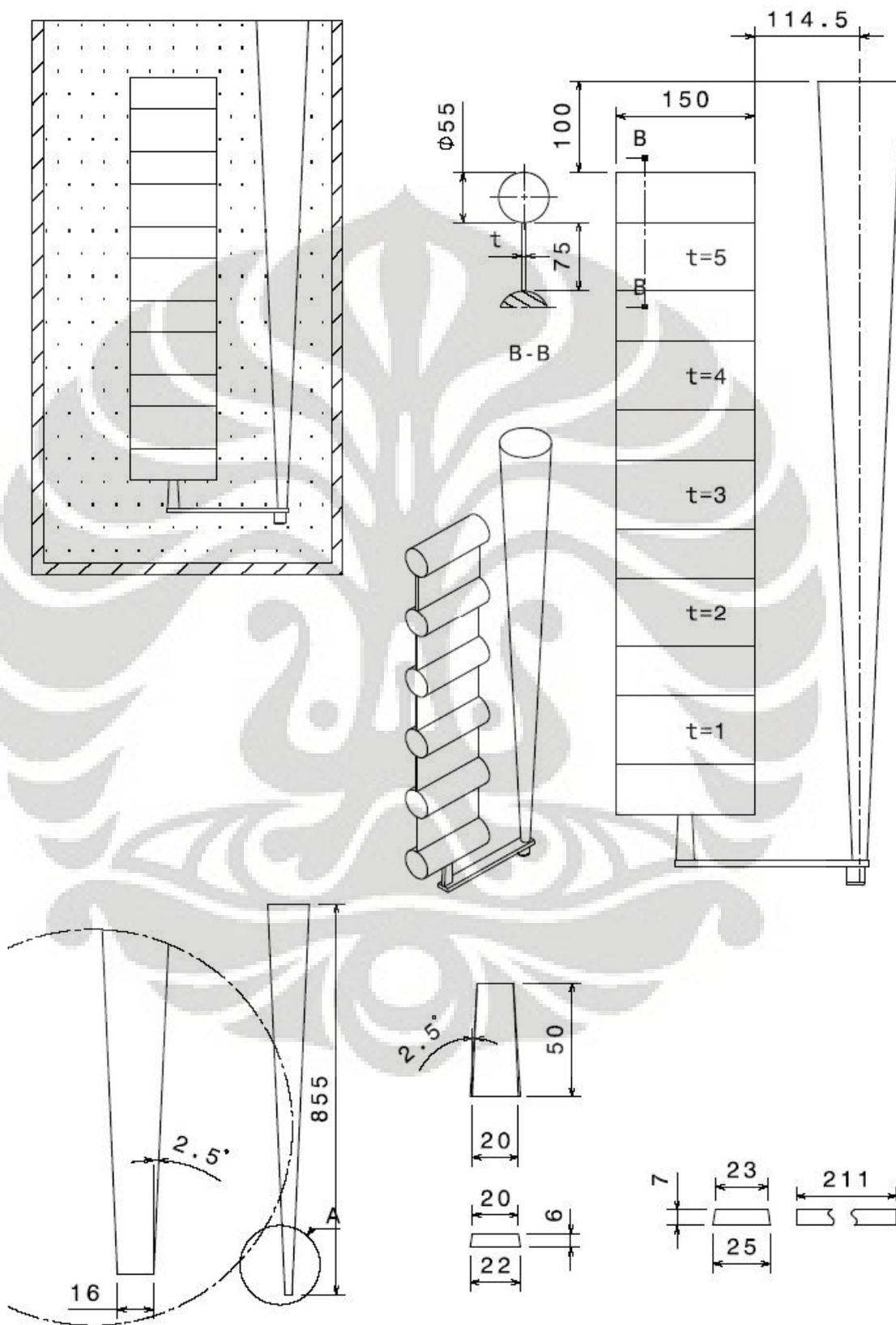
19. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Evans, 1981).
20. Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. ISIJ Int., 2004. Vol. 44(7): p. 1180-1187.
21. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Loper, 1965).
22. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Rijikov, 1965).
23. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Karsay, 1965).
24. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Henning, 1999).
25. Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. ISIJ Int., 2004. Vol. 44(7): p. 1180-1187. (Loper, 1969).
26. Labreque, dkk, *Development of Carbide Free Thin Wall Ductile Iron Casting*, AFS Transaction, 2000. Vol. 108: p. 31-38.
27. (Dogan, 2003).
28. Martinez, R. A., dkk, *Application of ADI in high strength thin wall automotive parts*. Pada 2002 World Conference on ADI, 2002.
29. Mourad, M. M., dkk, *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron*. Pada 68th World Foundry Congress, 2008, Chennai, India: WFO.
30. Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*, 2005, AFS.
31. Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction, 2003. 03(109).
32. Mullins, 2003
33. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (*Image pro Plus Reference Guide, 1998; Omnimet Enterprise Handbook, 1998; UTHSCSA Image Tool Handbook, 1995*).
34. Sulamet-Ariobimo, R. D.
35. Thomson, R. C., dkk, *Modeling Microstructure Evaluation and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron*. Journal Material Science and Technology, 2000. 16: Pg.1412 – 1419.
36. [www.steelinc.com.au](http://www.steelinc.com.au)
37. Metal Bulletin Monthly, vol.345, Pg.90, September 1999
38. 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. 2003 :  
Rockhampton, Australia : Central Queensland University.
39. Kovacs, B. V., *On The Terminology and Structure of Austempered Ductile Iron*. Pada 98<sup>th</sup> Casting Congress. 1994, Hamilton, Ontario, Canada :  
American Foundrymen's Society Inc.
40. [www.energymanagertraining.com](http://www.energymanagertraining.com)
41. Atlas of casting defect: Institute of British Foundrymen.  
(<http://www.industrialmetalcasting.com/gating-system-analysis>)
42. Campbell, J., *Casting Practice*.
43. Laboratorium PT Geteka Founindo



### 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

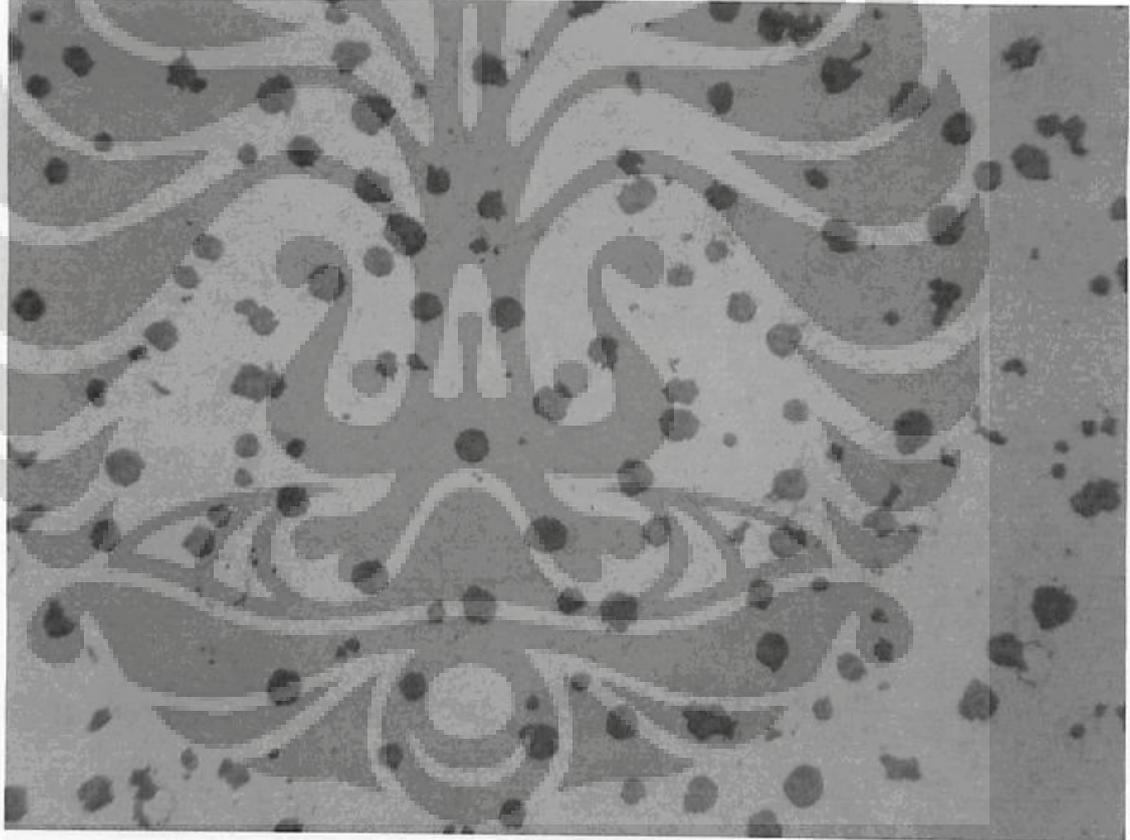
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

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	102	79.1%	1057.6個/mm <sup>2</sup>	13.0 $\mu$ m	10.5%
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)

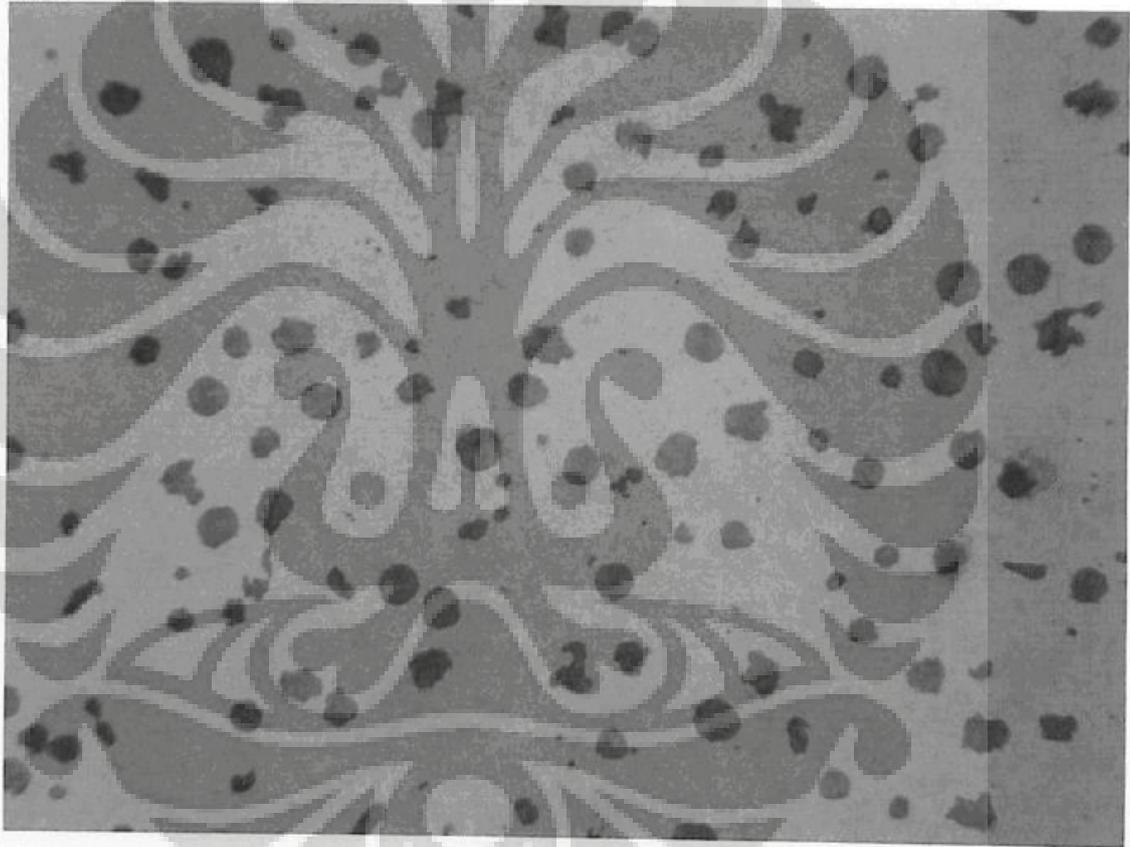
サンプル名 1.2-200x

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/計測黒鉛外核円直径  $\geq 5.0 \mu$ 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

黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.3-200x

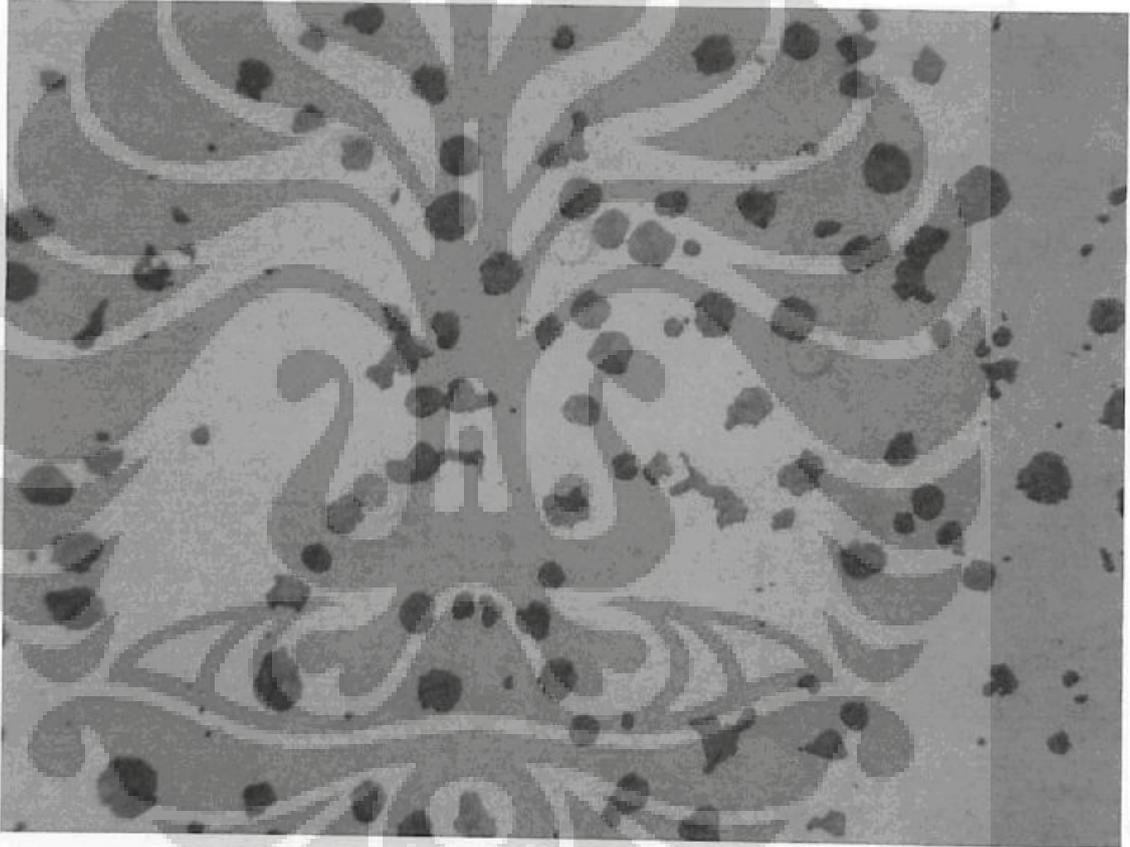
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 80.8[%]  
黒鉛粒数 816.5[個/mm<sup>2</sup>]  
黒鉛平均粒径 15.6[ $\mu$ m]  
黒鉛面積率 11.8[%]

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	19個	80個	80.8%	816.5個/mm <sup>2</sup>	15.6 $\mu$ m	11.8%
視野1	19	80	80.8	816.5	15.6	11.8

視野1



200  $\mu$ m



4mm A1

黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.4-200x

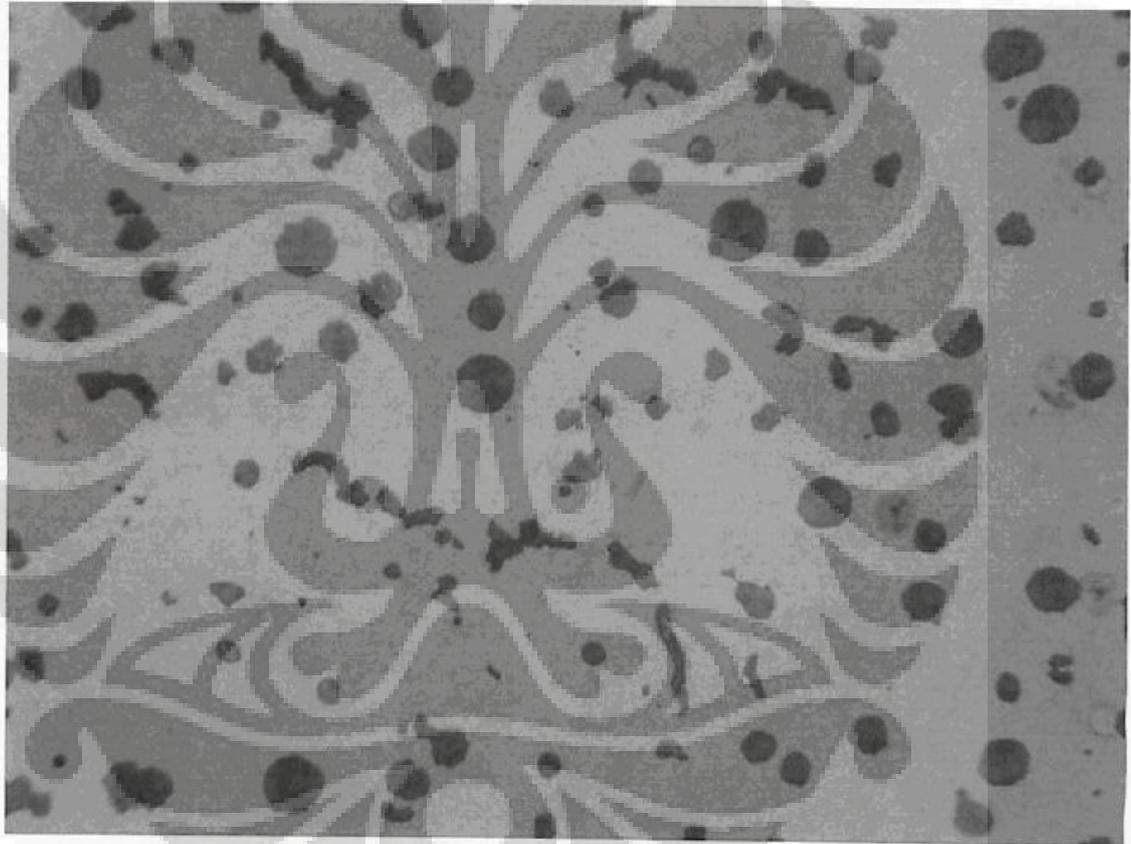
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

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

## 黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.5-200x

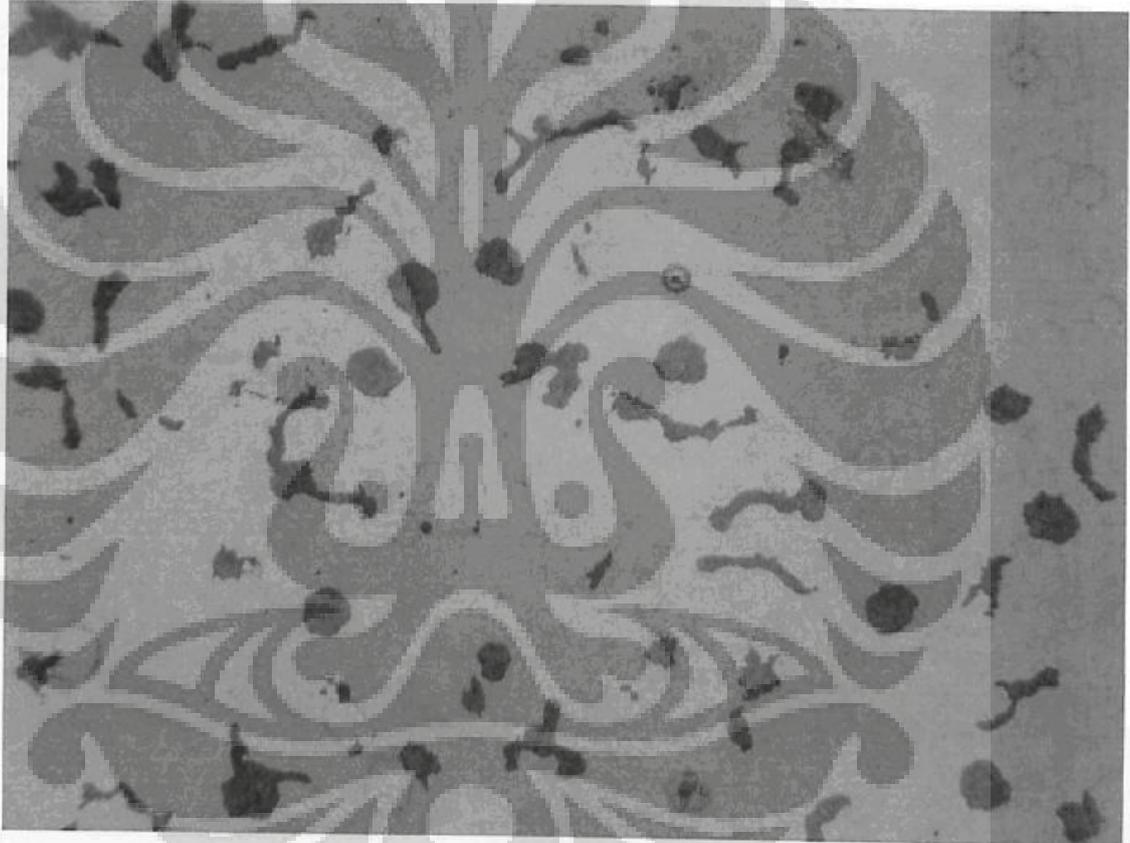
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

黒鉛球状化率 25.4[%]  
黒鉛粒数 466.6[個/mm<sup>2</sup>]  
黒鉛平均粒径 22.6[ $\mu$ m]  
黒鉛面積率 9.2[%]

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	4個	15個	25.4%	466.6個/mm <sup>2</sup>	22.6 $\mu$ m	9.2%
視野1	44	15	25.4	466.6	22.6	9.2

視野1



200  $\mu$ m



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)

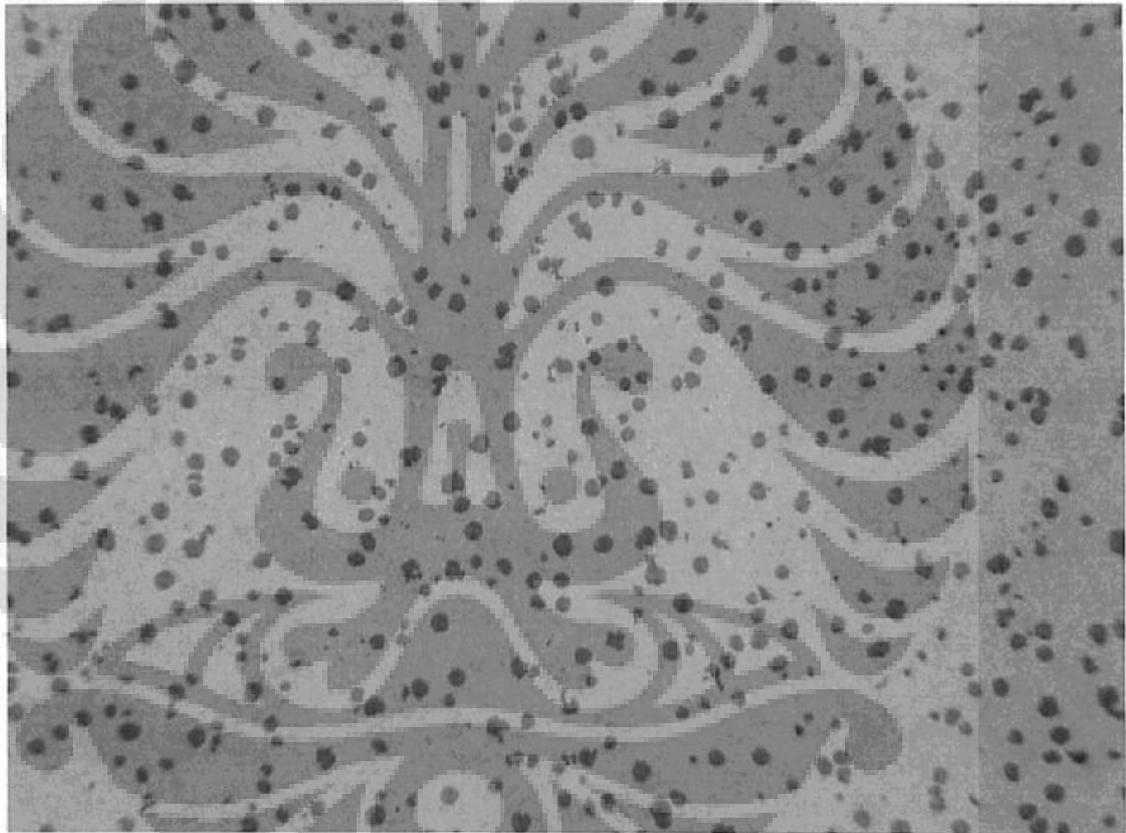
サンプル名 1.2-100x

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[ $\mu$ m]  
黒鉛面積率 11.0[%]  
視野数1/計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0\mu$ m

	I~IV	V~VI	球状化率	粒数	平均粒径	黒鉛面積率
合計/平均9個	390個	390個	81.1%	1633.0個/mm <sup>2</sup>	10.8 $\mu$ m	11.0%
視野1	91	390	81.1	1633.0	10.8	11.0

視野1



200  $\mu$ m



3mm A2

黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.3-100x

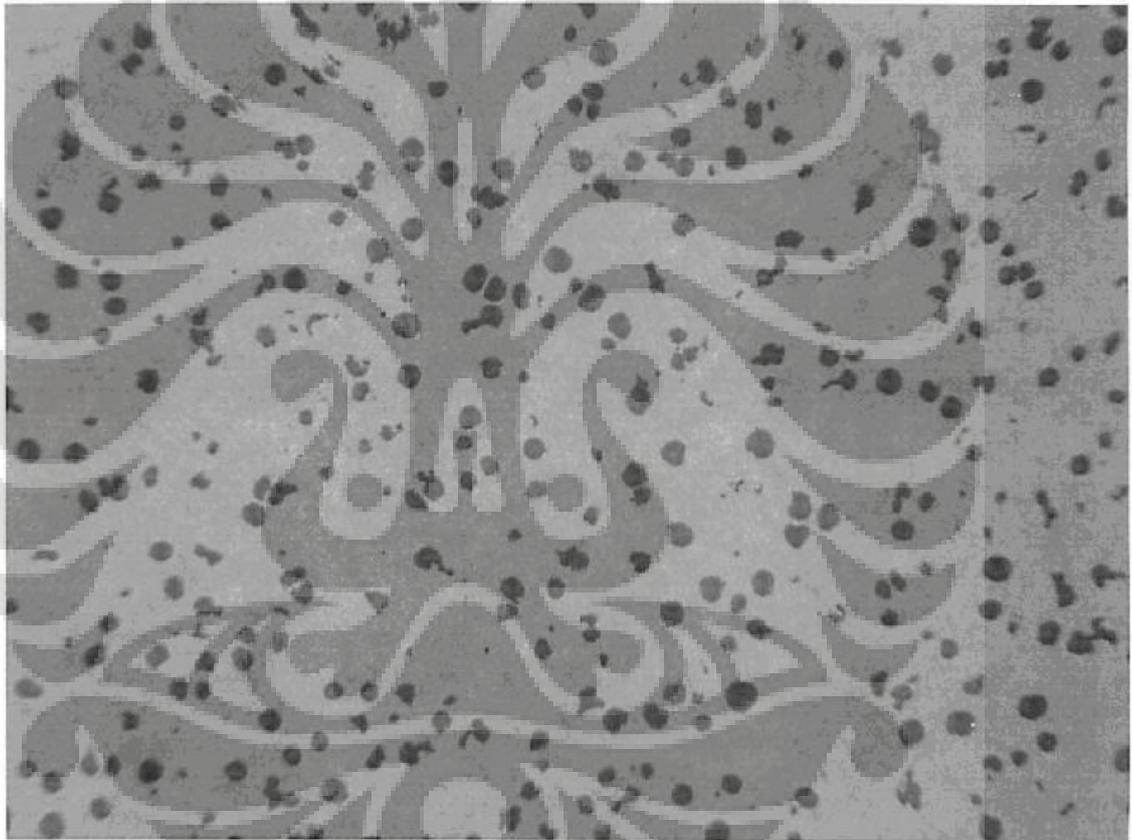
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

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[ $\mu$ m]  
黒鉛面積率 11.2[%]

視野数 1/計測黒鉛外接円直径  $\geq 5.0 \mu$ 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	238個	76.8%	1065.7個/mm <sup>2</sup>	13.8 $\mu$ m	11.2%
視野1	72	238	76.8	1065.7	13.8	11.2

視野1



200  $\mu$ m



4mm A2

黒鉛組織計測結果(平均値)

サンプル名 1.4-100x

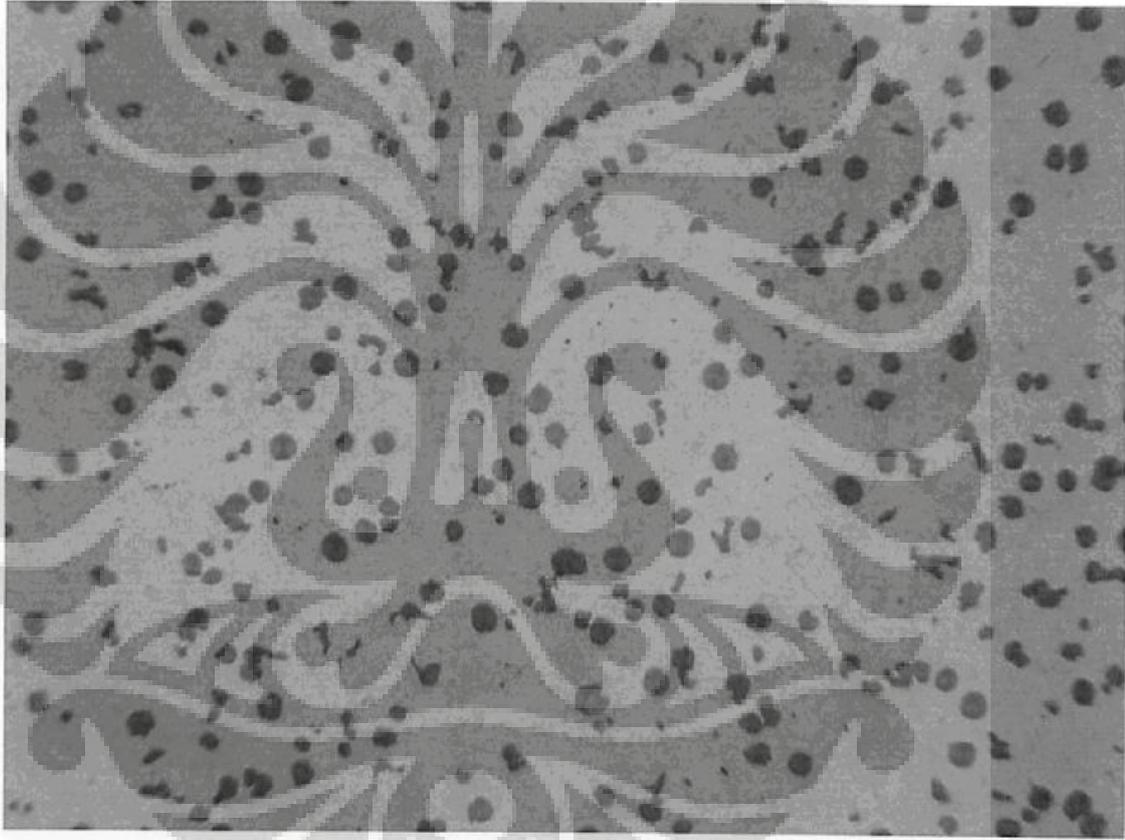
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

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

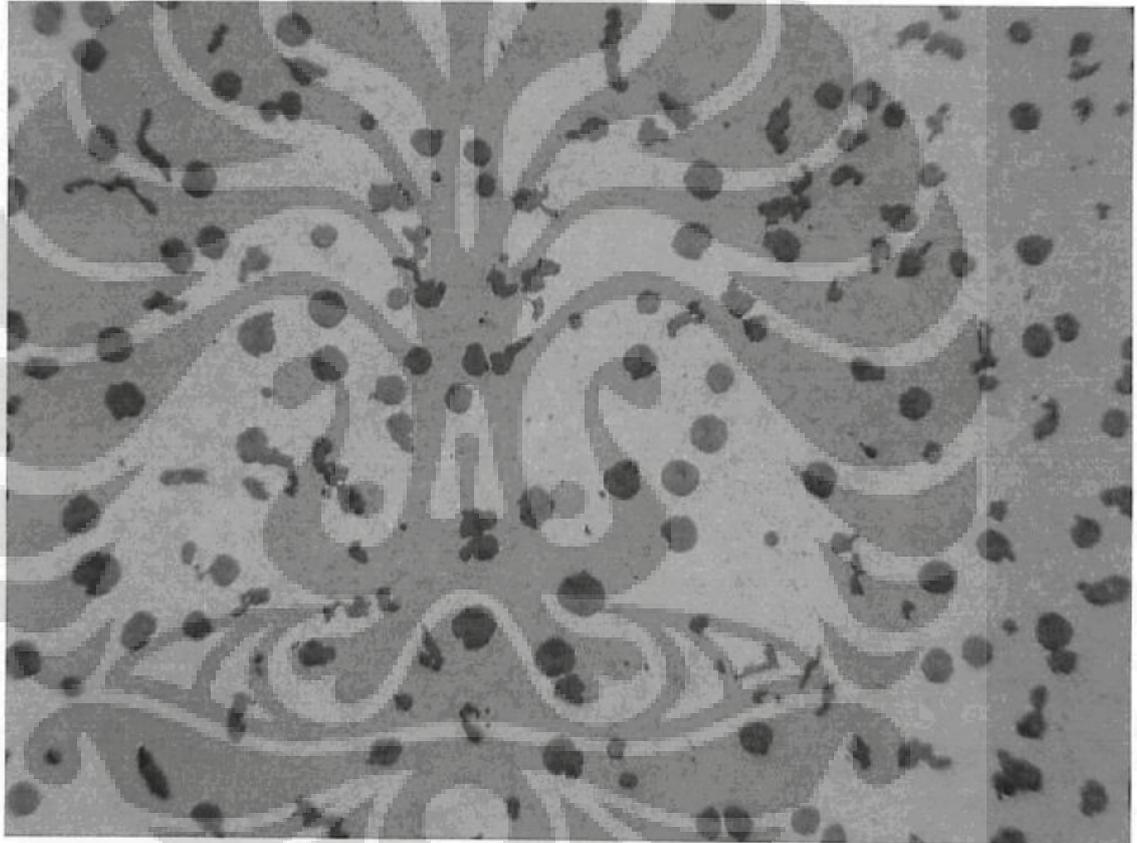
計測日 09/04/28  
氏名 bimo

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	10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

