



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN SALURAN MASUK MINOR
PADA PENGECORAN DINDING TIPIS
BESI TUANG NODULAR**

SKRIPSI

**ALIQ QURBANI
0405040082**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENAMBAHAN SALURAN MASUK MINOR
PADA PENGECORAN DINDING TIPIS
BESI TUANG NODULAR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**Aliq Qurbani
0405040082**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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



**Nama : Aliq Qurbani
NPM : 0405040082
Tanda Tangan :
Tanggal : 10 Juli 2009**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aliq Qurbani
NPM : 0405040082
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan Saluran Masuk Minor pada
Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno (.....)
Penguji 1 : Dr. Ir. Donanta Dhaneswara, M.Si (.....)
Penguji 2 : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 10 Juli 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan kenikmatan-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Pengaruh Penambahan Saluran Masuk Minor pada Pengecoran 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) Seluruh pihak PT. X yang telah banyak membantu dalam program penelitian mulai dari pendarahan sampai memberikan data-data yang saya butuhkan;
- 4) Orang tua dan keluarga besar saya yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material; dan
- 5) Para sahabat saya yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas skripsi ini.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semuanya.

Depok, 10 Juli 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Aliq Qurbani
NPM : 0405040082
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 Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Penambahan Saluran Masuk Minor pada Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif 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 : 10 Juli 2009

Yang menyatakan

(Aliq Qurbani)

ABSTRAK

Nama : Aliq Qurbani
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penambahan Saluran Masuk Minor pada Pengecoran 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 penelitian tentang pengecoran dinding tipis besi tuang nodular. Oleh karena itu, akan diamati pengaruh penambahan saluran masuk minor pada pengecoran dinding tipis besi tuang nodular terhadap waktu pengisian dan karakteristik material yang dihasilkan.

Pada penelitian ini akan dilakukan proses pengecoran plat untuk ketebalan 5, 4, 3, 2, dan 1 mm sebagai benda uji melalui 2 (dua) buah desain pengecoran yaitu pengecoran anti grafitasi dengan penambahan saluran masuk minor dan tanpa penambahan saluran masuk minor. Jenis material yang digunakan adalah FCD45. Cetakan yang digunakan adalah pasir furan dengan nilai CE logam cair dijaga di atas 4,3%. Pola terbuat dari kayu dengan sistem saluran tuang. Desain pengecoran juga akan dilakukan uji simulasi *software* komputer.

Hasil penelitian menunjukkan kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. Desain dengan tambahan saluran masuk minor menghasilkan plat dengan nilai nodularitas dan jumlah nodul yang lebih tinggi. Ada kesesuaian pada hasil simulasi *software* computer. Selain itu, ada hubungan yang kuat antara nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul pada sifat mekaniknya.

Kata kunci: Dinding tipis besi tuang nodular, anti grafitasi, sistem saluran tuang, simulasi *software*.

ABSTRACT

Name : Aliq Qurbani
Major : Metallurgical and Material Engineering
Title : The Effect of Minor Ingate Addition on Thin Wall Ductile Iron Casting

The demand on energy saving has caused the development of light weight materials and the production process to reduce its weight without reducing the quality. The one of them is research about thin wall ductile iron casting. Therefore, would be observed addition effect minor gating on thin wall ductile iron casting toward filling time and their characterizing.

On this research would be conducted casting process of thin wall as test specimen for variation of thickness are 5, 4, 3, 2, and 1 mm in size by two casting designs that are counter gravity casting with and without addition minor gating. The material in this casting is FCD45 of type and furan sand for pattern with CE value hold out at less 4.3%. The pattern plate is made of wood with gating system. Casting design would be analyzed by computer simulation software too.

The result indicates that cooling rate a given by casting design. Design with addition minor gating results thin wall with higher nodularity and nodule count value. There is a uniformity between software simulation and the fact. Besides, there are the powerful relationship between nodularity, nodule count, and average nodule diameters with tensile strength and hardness.

Key word: Thin wall ductile iron, counter gravity, gating system, software simulation.

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
2. DASAR TEORI	5
2.1 Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>)	5
2.2 Besi Tuang Nodular (BTN)	6
2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular	7
2.2.2 Faktor Pengaruh Pada Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular	8
2.2.3 Pengecoran Besi Tuang Nodular	10
2.2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular	11
2.2.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)	13
2.3 Besi Nodular Austemper	19
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>)	25
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 Pengaruh Penambahan Saluran Minor	29
2.4.6 Pengecoran Anti Gravitasi (<i>Counter Gravity Casting</i>)	30
2.4.7 Simulasi <i>Software</i> Sistem Saluran Tuang	30
3. METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Diagram Alir Penelitian	31
3.2 Alat dan Bahan	33
3.2.1 Alat	33
3.2.2 Bahan	34
3.3 Prosedur Penelitian	35

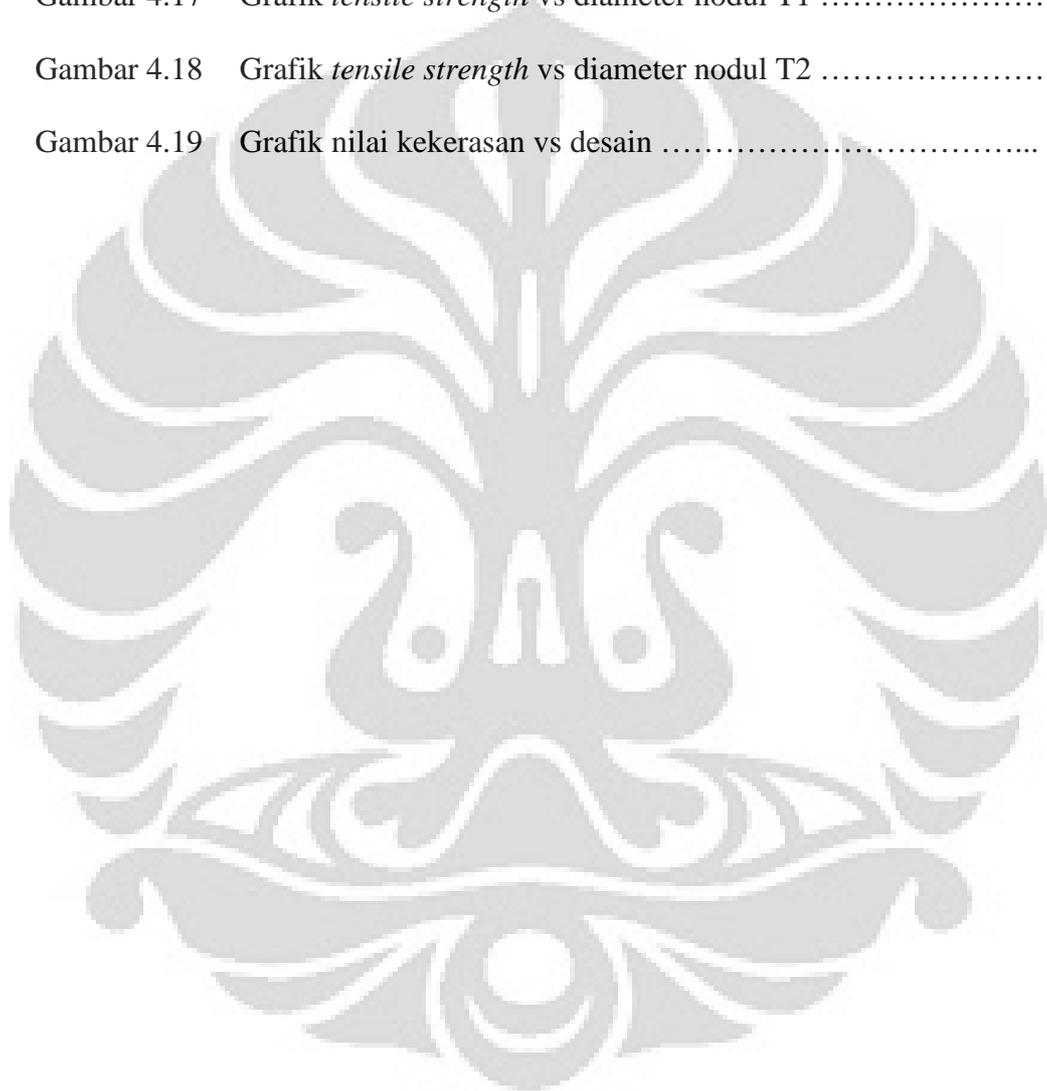
3.3.1 Pembuatan Desain Cetakan	35
3.3.2 Pembuatan Pola	36
3.3.3 Pembuatan Cetakan	38
3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam	39
3.3.4.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)	39
3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)	40
3.3.5 Pegecoran	41
3.3.6 Preparasi Sampel	42
3.3.6.1 Preparasi Sampel Uji Komposisi Kimia	44
3.3.6.2 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro	45
3.3.6.3 Preparasi Uji Kekerasan	46
3.3.6.4 Preparasi Uji Tarik	46
3.3.7 Pengujian	47
3.3.7.1 Uji Komposisi Kimia	47
3.3.7.2 Simulasi Software Z-Cast	47
3.3.7.3 Pengamatan Struktur Mikro	47
3.3.7.4 Pengujian kekerasan	50
3.3.7.5 Pengujian Tarik	51
4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Pengujian Komposisi Kimia	52
4.2 Simulasi Z-Cast	55
4.3 Pengamatan Visual	57
4.4 Pengamatan Struktur Mikro	58
4.4.1 Nodularitas	63
4.4.2 Jumlah Nodul	64
4.4.3 Diameter Rata-rata Nodul	65
4.4.4 Efek Kulit	66
4.5 Uji Mekanik	68
4.5.1 Uji Tarik	68
4.5.2 Uji Kekerasan	71
5. KESIMPULAN	73
DAFTAR REFERENSI	74
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Perbandingan sifat mekanis ADI dengan material yang lain....	1
Gambar 2.1	Diagram Fe-Fe ₃ C	5
Gambar 2.2	Klasifikasi besi cor	6
Gambar 2.3	Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN	8
Gambar 2.4	Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital)	14
Gambar 2.5	Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital)	14
Gambar 2.6	Karbida primer (chill terbalik) di dalam BTN perlitik (200X, etsa Nital)	15
Gambar 2.7	Struktur Mikro ADI	20
Gambar 2.8	Stang piston ADI-TWC	21
Gambar 2.9	Ketahanan retak ADI vs temperatur / waktu austemper dan temperatur pengujian	23
Gambar 2.10	Pengaruh mangan terhadap ketahanan retak ADI	23
Gambar 2.11	Elemen utama sistem saluran tuang	25
Gambar 2.12	Ilustrasi skematik aplikasi Teori Bernoulli untuk sistem saluran Tuang	27
Gambar 2.13	Bentuk aliran logam pada beberapa bentuk <i>sprue</i>	27
Gambar 2.14	Nilai N_R untuk berbagai jenis aliran	28
Gambar 3.1	Desain cetakan penelitian	31
Gambar 3.2	Diagram alir penelitian	32
Gambar 3.3	Desain pengecoran Stefanescu	36
Gambar 3.4	Desain pengecoran untuk penelitian	36
Gambar 3.5	Pola cetakan sebelum dibentuk <i>pattern plate</i>	37
Gambar 3.6	Salah satu sisi <i>pattern plate</i>	38

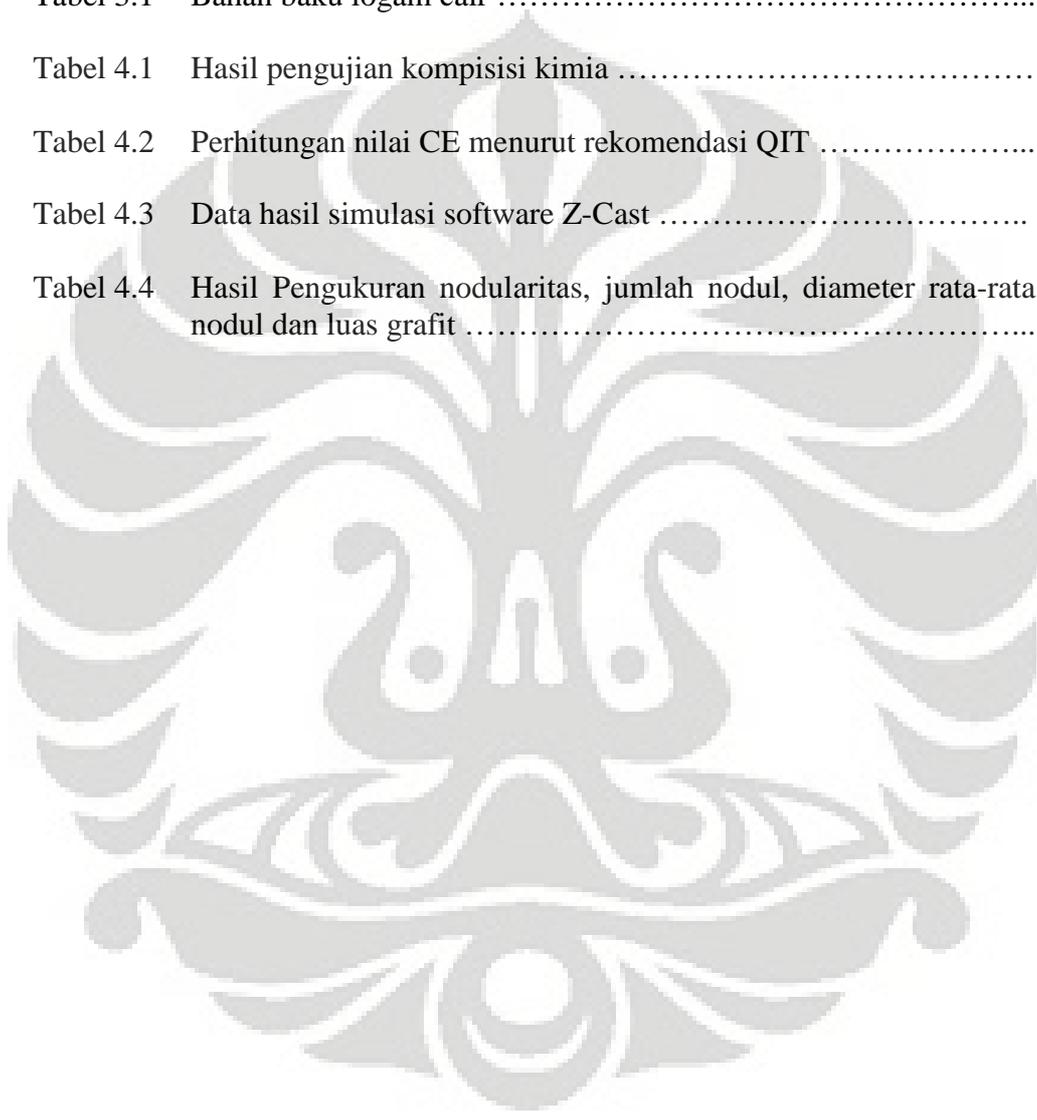
Gambar 3.7	Sepasang cetakan untuk model 2 (T2) pada saat <i>waiting time</i> ..	39
Gambar 3.8	Proses <i>merger</i> dari pasangan cetakan	41
Gambar 3.9	Metode pengambilan sampel untuk pengujian	43
Gambar 3.10	Metode penamaan sampel	44
Gambar 3.11	Sampel hasil <i>mounting</i>	45
Gambar 3.12	Pengambilan foto struktur mikro.....	47
Gambar 3.13	Mikroskop optik digital	48
Gambar 3.14	Metode perhitungan efek kulit	50
Gambar 3.15	Bentuk jejak metode V	50
Gambar 3.16	<i>Microhardness tester</i>	51
Gambar 3.17	<i>Tensile strength machine</i>	51
Gambar 4.1	Nilai CE untuk beberapa jenis material	53
Gambar 4.2	Fenomena turbulensi	56
Gambar 4.3	Pengisian terbalik pada saluran masuk ke-5 dan ke-6 dari bawah	57
Gambar 4.4	Struktur mikro (Non-etsa, pinggir, pembesaran 200X)	59
Gambar 4.5	Struktur mikro (Etsa, pinggir, pembesaran 200X)	60
Gambar 4.6	Struktur mikro (Etsa, tepi, pembesaran 200X)	62
Gambar 4.7	Grafik perbandingan nodularitas	63
Gambar 4.8	Grafik perbandingan jumlah nodul	64
Gambar 4.9	Grafik perbandingan diameter nodul	65
Gambar 4.10	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1	66
Gambar 4.11	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T2	66
Gambar 4.12	Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1 dan T2.....	67

Gambar 4.13	Grafik Perbandingan nilai <i>tensile strength</i>	68
Gambar 4.14	Pengaruh nodularitas pada yield dan <i>tensile strength</i> yang dikontrol Mg dan Pb pada besi nodular feritik	68
Gambar 4.15	Grafik <i>tensile strength</i> vs nodularitas T1	69
Gambar 4.16	Grafik <i>tensile strength</i> vs nodularitas T2	70
Gambar 4.17	Grafik <i>tensile strength</i> vs diameter nodul T1	70
Gambar 4.18	Grafik <i>tensile strength</i> vs diameter nodul T2	71
Gambar 4.19	Grafik nilai kekerasan vs desain	71



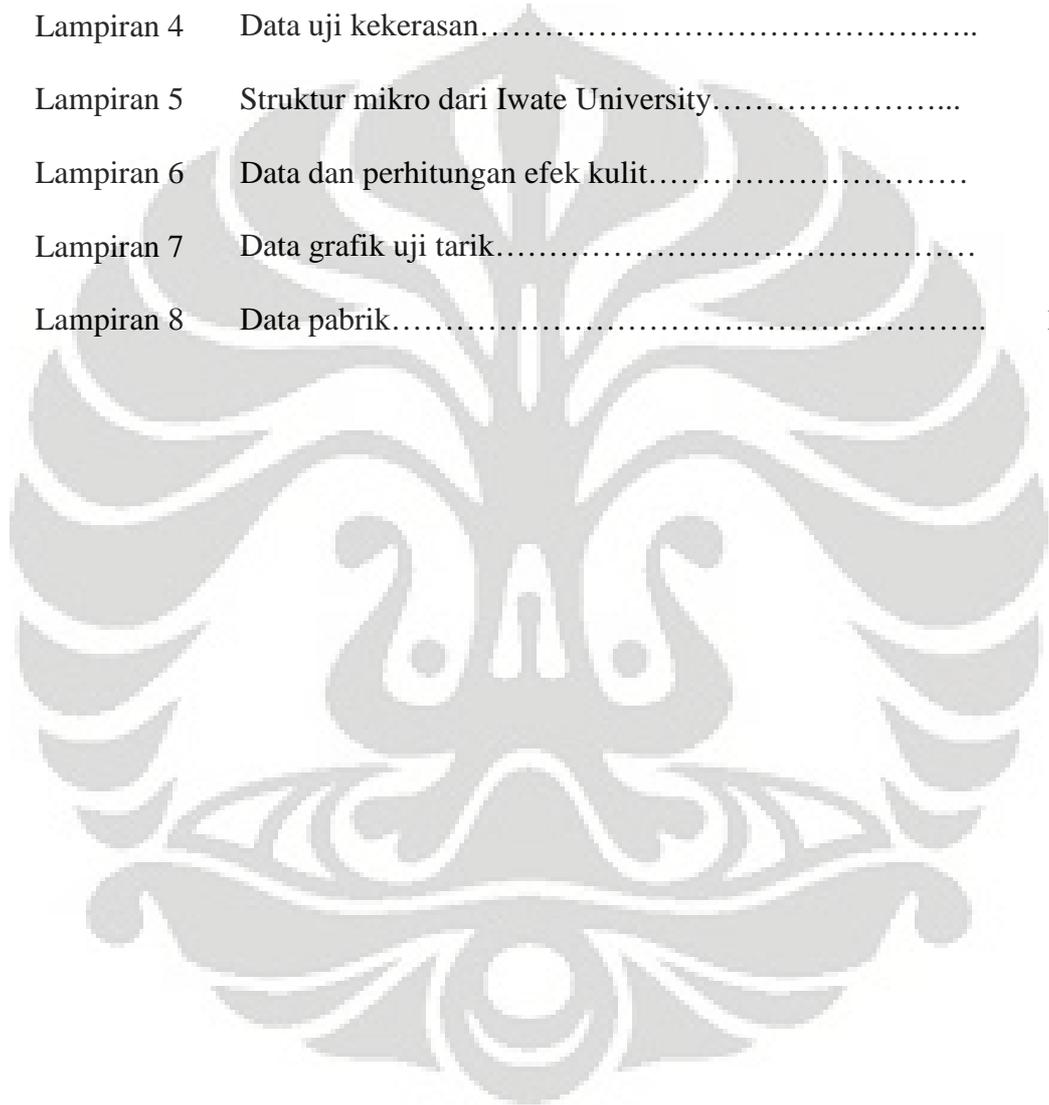
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN	7
Tabel 2.2	Perbandingan tegangan luluh, ketahanan retak, dan panjang retak dari beberapa logam	21
Tabel 3.1	Bahan baku logam cair	34
Tabel 4.1	Hasil pengujian komposisi kimia	52
Tabel 4.2	Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT	54
Tabel 4.3	Data hasil simulasi software Z-Cast	55
Tabel 4.4	Hasil Pengukuran nodularitas, jumlah nodul, diameter rata-rata nodul dan luas grafit	62



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil pengecoran sebelum pemotongan	77
Lampiran 2	Sampel hasil pengecoran	78
Lampiran 3	Simulasi Z-Cast.....	80
Lampiran 4	Data uji kekerasan.....	82
Lampiran 5	Struktur mikro dari Iwate University.....	84
Lampiran 6	Data dan perhitungan efek kulit.....	94
Lampiran 7	Data grafik uji tarik.....	96
Lampiran 8	Data pabrik.....	102



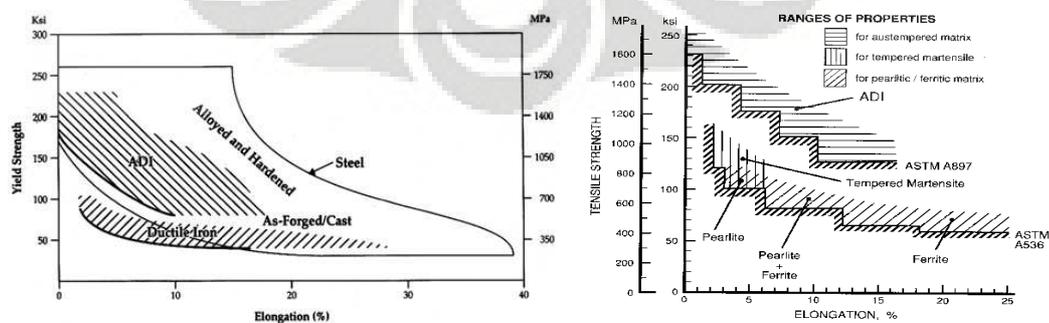
BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini, industri otomotif dunia dihadapkan pada tiga tantangan utama, yaitu: pengurangan emisi kendaraan, penghematan bahan bakar, dan biaya produksi yang rendah.^[1] Tiga tantangan utama ini menjadi sesuatu yang sangat dipertimbangkan ketika mengembangkan teknologi pada industri otomotif. Meskipun, untuk mendapatkan tiga keuntungan sekaligus sulit dicapai pada satu jenis material. Selain itu, perkembangan teknologi pada industri otomotif diupayakan untuk menghasilkan material dengan sifat yang lebih unggul dari pada sebelumnya.

Salah satu metode untuk meningkatkan penghematan bahan bakar adalah mengurangi berat komponen. Pengurangan berat komponen sebesar 250 *pounds* (113,6 kg) secara umum cukup meningkatkan penghematan bahan bakar sebesar 1 *mpg* (0,425 km/l)^[1]. Oleh karena itu, penggunaan logam dengan sifat *light weight* seperti aluminium semakin meningkat. Meskipun demikian, penggunaan material aluminium juga meningkatkan biaya produksi karena harganya yang cukup mahal.

Selain itu, upaya untuk mengurangi berat pada komponen otomotif dilakukan dengan mengurangi dimensi komponen. Salah satu material yang sedang dikembangkan adalah *thin wall austempered ductile iron* (TWADI). Selain karena ADI memiliki sifat mekanis yang baik, Gambar 1.1, ADI juga dipilih karena membutuhkan biaya produksi yang relatif lebih rendah dari pada baja atau aluminium.



Gambar 1.1. Perbandingan sifat mekanis ADI dengan material yang lain^[2]

Penelitian-penelitian saat ini berusaha untuk meningkatkan kemampuan ADI yang disertai dengan mengurangi dimensinya. Pengurangan dimensi ini menghasilkan komponen yang lebih ringan sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar kendaraan.

Indonesia merupakan Negara yang memiliki potensi besar untuk mengembangkan material ADI. Dengan banyaknya industri pengecoran khususnya pengecoran besi tuang kelabu (BTK), baik skala kecil dan menengah maupun skala besar, penguasaan teknologi pengecoran ADI akan mampu meningkatkan nilai tambah bagi produk-produk yang dihasilkan. Namun, perkembangan ADI di Indonesia sampai saat ini masih fokus pada tahap penelitian. Beberapa industri sudah melakukan pembuatan ADI meskipun pada skala yang relatif kecil. Pembuatan ADI masih dianggap teknologi yang mahal dan dilakukan sesuai dengan permintaan khusus. Padahal, dengan menguasai teknologi pembuatan ADI, Indonesia akan mampu menjadi Negara produsen yang kuat dalam kancah perdagangan internasional karena memiliki sumber daya alam yang luar biasa sebagai bahan dasar pembuatan ADI.

Teknologi pembuatan ADI merupakan teknologi yang cukup sederhana. Bahan baku material ADI adalah FCD (*Ferro Casting Ductile*) yang dihasilkan dari material FC (*Ferro Casting*). Untuk meningkatkan FC menjadi FCD dibutuhkan teknologi *liquid treatment*. Teknologi ini merupakan teknologi yang sangat sederhana dan dapat dilakukan oleh industri skala kecil dan menengah.

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

Proses pengecoran dinding tipis (*thin wall casting* - TWC) yang didefinisikan oleh Caldera sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal kurang dari 5 mm,^[3] merupakan bentuk perkembangan proses manufaktur yang dibutuhkan ADI. Ketebalan terakhir yang dapat dicapai pada TWC untuk material FCD adalah 1,4 mm oleh Ruxanda pada tahun 2002.^[4]

1.2 Perumusan Masalah

Pada proses pembuatan dinding tipis terbentuknya karbida sangat dihindari. Hal ini disebabkan karena semakin tipis suatu benda maka akan semakin cepat proses pendinginannya. Oleh karena itu, dibutuhkan kecepatan waktu pengisian yang optimum agar terhindar dari struktur karbida. Selain itu, kecepatan waktu pengisian yang optimum juga untuk mencegah terbentuknya cacat.

Hal-hal yang berpengaruh pada kecepatan pengisian antara lain: desain cetakan, ketinggian tuangan, dan desain sistem saluran tuang.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk:

1. Meneliti pengaruh penambahan saluran masuk minor pada pengecoran dinding tipis besi tuang nodular terhadap waktu pengisian dan karakteristik material yang dihasilkan.
2. Menentukan desain pengecoran yang cocok untuk membuat dinding tipis besi tuang nodular dengan metode anti grafitasi.
3. Membandingkan proses pengecoran di Lapangan dengan simulasi software di Laboratorium.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan dengan dilakukan penelitian ini akan dapat dikembangkan proses produksi untuk pengecoran besi dengan ketebalan dinding tipis. Hal ini dicapai dengan teknologi desain pengecoran sederhana yang mudah dan murah yang dapat diaplikasikan di semua tingkat industri pengecoran Indonesia, sehingga produk cor yang dihasilkan mempunyai nilai jual dan daya saing tinggi.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini terdiri dari pemilihan desain cetakan dengan saluran tuang yang cocok untuk menghasilkan pengecoran besi tuang nodular yang dapat dijadikan material dasar pembuatan ADI-TWDI. Desain cetakan pada penelitian ini merupakan modifikasi desain cetakan Stefanescu tentang pembuatan dinding

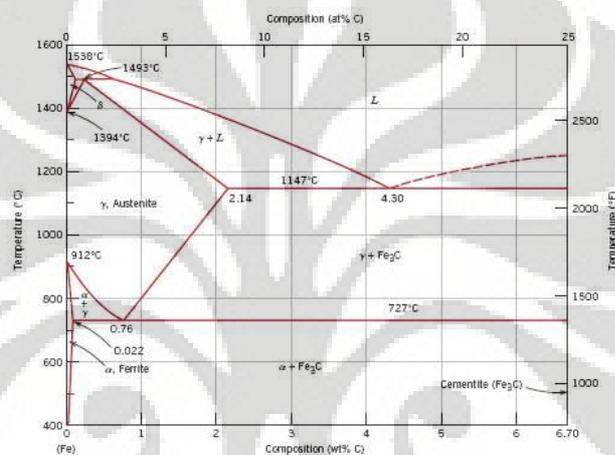
tipis. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk menentukan parameter proses FCD-TWC dengan variasi kecepatan waktu pengisian (*filling time*) pada sistem saluran tuang. Ketebalan tujuan yang akan dicapai adalah 1 – 5 mm. Cetakan akan dibuat dari pasir cetak furan. Proses pengecoran akan dilakukan secara vertikal dengan posisi *ingate* di bawah (*bottom ingate*). Jenis material yang akan digunakan untuk pengecoran adalah FCD 45. Pengujian yang akan dilakukan adalah uji komposisi kimia, simulasi *software*, pengamatan struktur mikro, uji tarik dan uji kekerasan.



BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Besi Tuang (*Cast Iron*)

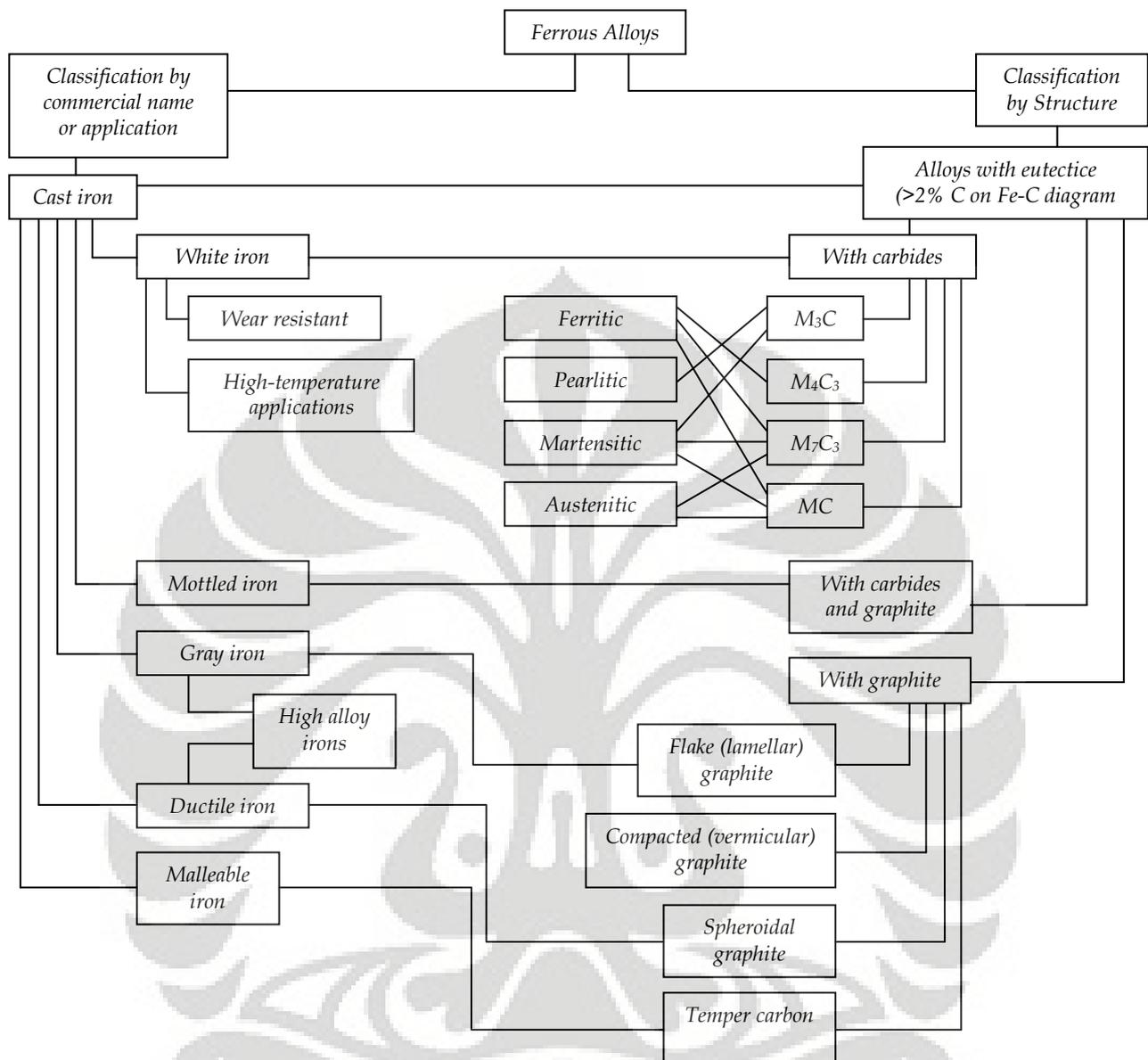
Besi tuang merupakan kelompok paduan besi dengan kandungan karbon di atas 2,14%, Gambar 2.1. Namun demikian, kebanyakan besi tuang mengandung karbon antara 3,0 sampai 4,5%, dan ditambahkan dengan unsur paduan yang lain.^[5]



Gambar 2.1 Diagram Fe-Fe₃C^[5]

Pada dasarnya, besi tuang (*cast iron*) dikelompokkan menjadi lima jenis, Gambar 2.2, yaitu:^[6]

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* (FCD)
5. Besi Tuang Malebel (*Malleable Cast Iron*)



Gambar 2.2 Klasifikasi besi cor ^[6]

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 lainnya, 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

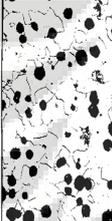
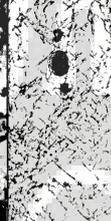
sampai melampaui 120 ksi (825 MPa). Bahkan, ADI memberikan sifat mekanik yang lebih besar serta ketahanan aus dengan kekuatan tarik melebihi 230 ksi (1600 MPa).^[2]

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.^[7] Berdasarkan standar ASTM A395, kebanyakan spesifikasi standar dari BTN mensyaratkan nilai kekuatan dan keuletan minimum.^[8]

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 2.1.^[2]

Tabel 2.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN ^[2]

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,^[2]

yaitu:

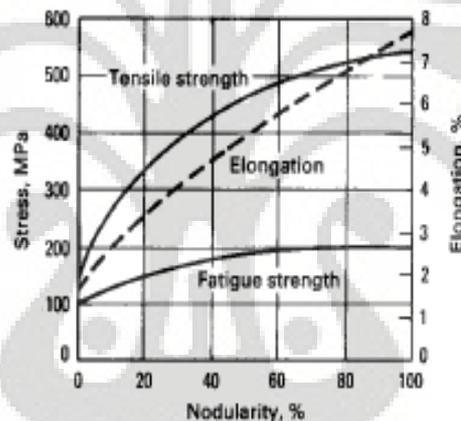
1. Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)
2. Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)
3. Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)
4. Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)
5. Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)
6. Besi Ulet Austenitik (*Austenitic 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. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang nodular, 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, Gambar 2.3.^[6]



Gambar 2.3. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN^[9]

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.^[6]

3. Struktur matrik

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi BTN adalah struktur matrik. 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 sering dilakukan

adalah proses anil untuk menghasilkan matrik feritik penuh dan *normalizing* untuk menghasilkan matrik perlitik.^[6]

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, inokulan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi.^[6]

Sedangkan, ketika ukuran ketebalan meningkat, jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih susah. 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.^[6]

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:

1. Karbon (C)

Jumlah elemen karbon optimum pada 3,4 - 3,8% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Komposisi karbon di atas 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.^[2]

2. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Jumlah kandungan silikon optimum pada 2,0 - 2,8%. Kadar yang lebih rendah menyebabkan keuletan meningkat ketika dilakukan perlakuan panas dan membahayakan karena terbentuk karbida pada bagian yang tipis. Sedangkan, 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 serium 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 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 nodularisasi dan inokulasi.^[9]

1) Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) dan atau serium (Ce) ke dalam logam cair pada temperatur 1450 - 1510°C yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular.^[6] 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 sebelum nodulasi.

Selain untuk pembentukan grafit, inokulasi 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 benda cor. Namun, kendala utama yang akan dihadapi pada pengecoran FCD dalam proses penipisan adalah terbentuknya karbida.

Pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal 5 mm.^[3] 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.^[10] Javid 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.^[11] 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 horizontal.^[12] 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* (LDASC). Ketebalan minimal yang dibuat adalah 2 mm. Hasil yang diperoleh 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.^[13]

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.^[1]

Penelitian tentang parameter-parameter yang mempengaruhi sifat mekanik dilakukan oleh Caldera. Dalam penelitiannya, Caldera mengamati pengaruh jumlah nodul terhadap kekuatan fatik pada material besi tuang nodular feritik dengan menggunakan metode pengecoran horizontal dan vertikal. Hasil yang dicapai adalah peningkatan jumlah nodul menyebabkan peningkatan kekuatan fatik.^[3] Dix mengamati pengaruh sifat kekuatan tarik dan elongasi akibat kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan terjadi akibat pengaruh tekanan logam cair dan temperatur tuang. Semakin besar tekanan dan tinggi temperatur maka semakin kasar permukaan yang dihasilkan. Selain itu, diamati pula kecepatan pendinginan terhadap jumlah nodul yang dihasilkan. Jumlah nodul meningkat sejalan dengan meningkatnya kecepatan pendinginan.^[14] Pengaruh penambahan logam tanah jarang telah dilakukan oleh Choi. Ketebalan minimal yang dicapai adalah 2 mm dengan menggunakan cetakan pasir. Hasil yang dicapai adalah penggunaan logam tanah jarang menyebabkan kenaikan jumlah nodul dan nodularitas.^[15] Selain itu, Labreque melakukan optimalisasi sifat mekanik

terhadap pengecoran dinding tipis BTN melalui penggunaan komposisi pasir cetak. Jenis cetakan yang digunakan adalah LDASC dan ketebalan yang dicapai 3 mm. Hasil yang dicapai adalah komposisi pasir cetak menjadi salah satu parameter penting untuk membuat dinding tipis.^[16]

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 bahwa jumlah dan ukuran nodul berhubungan erat dengan jarak antar partikel (λ_G), jika jumlah dan ukuran nodul naik maka λ_G berkurang.^[4]

2.2.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)

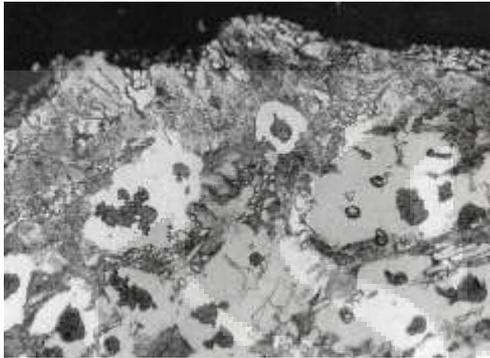
Pada pengecoran BTN, ada beberapa hal yang berkaitan dengan sifat yang dihasilkan, antara lain:

1. Pembentukan Karbida

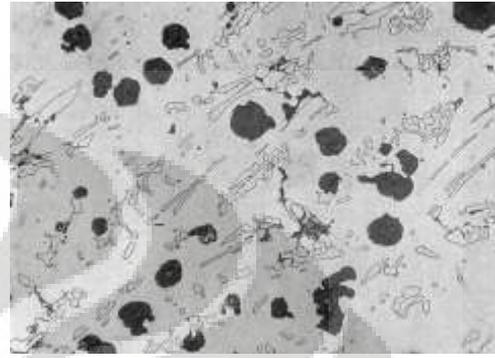
Dalam proses solidifikasi besi tuang, selain terbentuk grafit bebas juga mempunyai kecenderungan terbentuknya struktur karbida. Pada pengecoran besi tuang nodular (BTN), struktur karbida (Fe_3C) adalah salah satu bentuk cacat secara metalurgi^[17] dimana struktur ini memiliki sifat keras dan getas. Pembentukan 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.^[18] 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 , karbida sementit, besi putih dan besi keras (*hard iron*).^[17] Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) dengan temperatur proses lebih kurang $900^{\circ}C$.^[19]

Langkah utama dalam mengontrol terjadinya karbida primer pada BTN adalah memberikan perhatian terhadap waktu inokulasi dan *fading*. Waktu yang

dibutuhkan harus cukup selama proses inoculasi sehingga dapat dipastikan inoculan bekerja secara efektif dan mencegah terjadinya *fading*. Sebagai contoh, pengecoran modern sekarang ini telah menggunakan inoculasi *late-stream* atau inoculasi cetakan untuk meniadakan pengaruh *fading*.^[18]

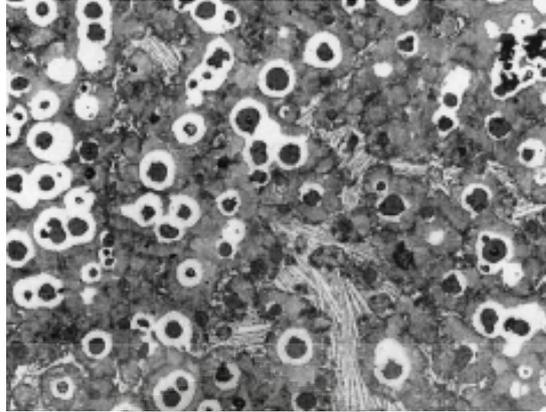


Gambar 2.4. Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital)^[18]



Gambar 2.5. Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital)^[18]

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.^[18] 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, 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*), Gambar 2.6.^[18]



Gambar 2.6. Karbida primer (chill terbalik) di dalam BTN perlitik.
(200X, etsa Nital)^[18]

Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginan tinggi atau ketebalan benda tipis. Keberhasilan pembuatan komponen dengan dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.^[12] Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistem pengecoran. 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.^[12]

Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi,^[20] keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE),^[21] kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit, dan rendahnya jumlah nodul (*nodule count*) dan bentuk nodul (*nodularity*).^[22]

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.^[23]

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)%.^[24] 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.^[25] 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.^[12] 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%.^[26]

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

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

dengan t adalah ketebalan benda.^[27]

Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%^[21] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5 mm).^[28] Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

Javaid berhasil membuat TWDI bebas karbida dengan ketebalan 3 mm dalam cetakan pasir dengan nilai CE (4,5 – 5,08)%.^[11] Labreque dengan menggunakan inokulan yang mengandung Bi dan Ce berhasil membuat TWDI 3 mm dengan nilai CE (4,6 – 4,9)%.^[29] Sedangkan Dogan membuat plat berketebalan (1.5 – 9) mm dengan menggunakan nilai CE (4,7 – 4,8)%.^[30] 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 juga ditambahkan pada perhiungan CE, sehingga rumusnya menjadi sebagai berikut:

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

TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.^[31] Selain persyaratan nilai CE, kadar Si dan kadar unsur-unsur paduan seperti Mo dan Ni juga harus dijaga. Untuk kadar Si disarankan oleh Mourad (2,4 – 2,7)% untuk ketebalan (3-10) mm.^[32]

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*^[4] atau *skin effect*.^[33] Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200 µm atau 0,2 mm.^[4] Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik dan biasanya dihilangkan dengan proses permesinan.^[34]

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.^[4]

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.^[33]

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.^[35] Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan pada pembesaran mikroskop 100x.^[35] Pada

tahap awal keduanya ditentukan dengan membandingkan foto struktur mikro non 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:

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

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:

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

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)

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

2. Menurut *compactness* (C)

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

Berdasarkan konvesi maka untuk dapat dihitung nilai $S > 0,65$ dan nilai $C > 0,7$.^[36]

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 μm .

Nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul mempengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan peningkatan nodularitas dan jumlah nodul. Sedangkan kekerasan meningkat ketika nilai nodularitas dan jumlah nodul menurun.^[2]

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*.^[9] 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

Menurut Harding, Penelitian tentang ADI sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersil dalam skala kecil pada tahun 1970-an. ADI menawarkan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, mampu permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik.^[7] 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.^[37]

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.^[7] ADI dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi aluminium.^[38] Peningkatan penggunaan ADI dapat dikaitkan dengan terjadinya peningkatan permintaan akan besi tuang nodular di USA^[39] 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.^[40] 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*.^[40] 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 2.7. Struktur Mikro ADI ^[41]

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.^[7]

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 dan kawan-kawan, berhasil membuat stang piston atau *connecting road* ADI dengan ketebalan cor 3 mm, Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Stang piston ADI-TWC ^[31]

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 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.

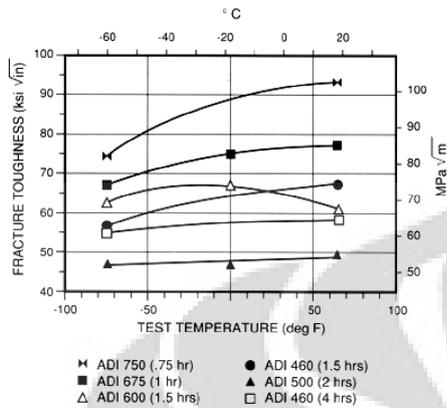
Tabel 2.2. Perbandingan tegangan luluh, ketahanan retak, dan panjang retak dari beberapa logam^[7]

Jenis Logam	Perlakuan Panas		σ_y (MPa)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	$(K_{IC}/\sigma_y)^2$ 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

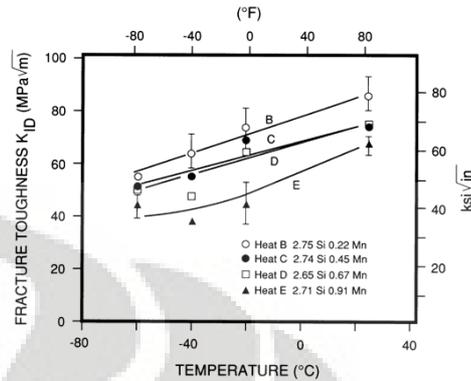
C-3	850 ^o C, 1 hr	300 ^o C	1199.5	78.20	4.25
		350 ^o C	900.3	61.60	4.68
		400 ^o C	908.0	59.40	4.27
C-5	850 ^o C, 1 hr	300 ^o C	118.2	85.74	5.88
Ductile Iron, Ferritic, 1.55%C-1.5%Si-1.2%Ni			269	42.8	25.3
Ductile Iron, Ferritic, 3.6%C-2.5%Si-0.38%Ni-0.35%Mo			331	48.3	21.3
Ductile Iron, Perlitic, 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 ^o C, 1 hr, Oil Quench	204 ^o C	1449	43.80	0.92
		280 ^o C	1587	55.00	1.2
		396 ^o C	1518	55.60	1.34
	1100 ^o C, 1 hr, Oil Quench	204 ^o C	1380	65.05	2.22
		246 ^o C	1449	57.25	1.56
	1200 ^o C, 1 hr, Oil Quench	204 ^o C	1380	89.12	4.18
		246 ^o C	1449	72.64	2.52
		323 ^o C	1414.5	53.30	1.42
		348 ^o C	1393.8	58.46	1.76
	AISI 4340	870 ^o C, 1 hr, Oil Quench	200 ^o C	1345	65.38
280 ^o C			1504.2	66.81	1.97
350 ^o C			1497.3	87.69	3.43
400 ^o C			1449.0	100.22	4.78
1200 ^o C, 1 hr, Oil Quench		246 ^o C	1380.0	90.55	4.31
		280 ^o C	1393.8	69.01	2.45
843 ^o C, 1 hr, Oil Quench, Tempered		260 ^o C	1642.2	48.79	0.88
		427 ^o C	1421.4	84.47	3.53

Berdasarkan data pada Tabel 2.2. 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) $MPm^{1/2}$. Ketahanan retak ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan kekuatan tarik besi tuang nodular, kecuali untuk besi tuang nodular *Ni-resist*. Terhadap BTN *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 2.9. Ketahanan retak ADI vs temperatur / waktu austemper dan temperatur pengujian^[7]



Gambar 2.10. Pengaruh mangan terhadap ketahanan retak ADI^[7]

Pada Gambar 2.9. 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°C kecuali untuk 600°/1,5 jam. Kesimpulan yang dapat diambil adalah 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 2.10. 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 5 mm.^[3] Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm.^[31] Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil dan sama dengan 3 mm.^[12]

Ketebalan minimal terakhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm oleh kelompok Stefanescu.^[4] Sedangkan ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis sebagai bahan baku ADI adalah 2 mm yang dicapai oleh kelompok Mourad^[32] dalam bentuk benda uji dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez^[31] 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.^[12] 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 sistim pengecorannya. Pada karakteristik logam cair, komposisi kimia dan temperatur tuang, *pouring temperature*, adalah 2 unsur penting yang harus diperhatikan. Sedangkan pada proses *liquid treatment* yang mempengaruhi peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.^[12]

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*).^[4]

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.^[12]

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.^[42]

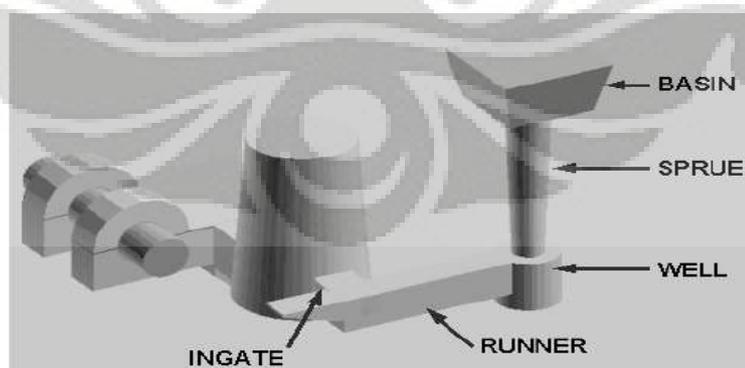
1. Sistem Saluran Tuang Horizontal

Sistem saluran tuang horizontal cocok untuk pengecoran datar dengan pengaruh gaya gravitasi 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 2.11. Elemen utama sistem saluran tuang^[42]

Berdasarkan Gambar 2.11, 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 ladai.

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 perangkap slag. Ini biasanya ditempatkan di *runner* atau antara *runner* dan *ingate* yang 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.^[6]

1. Teori Bernoulli

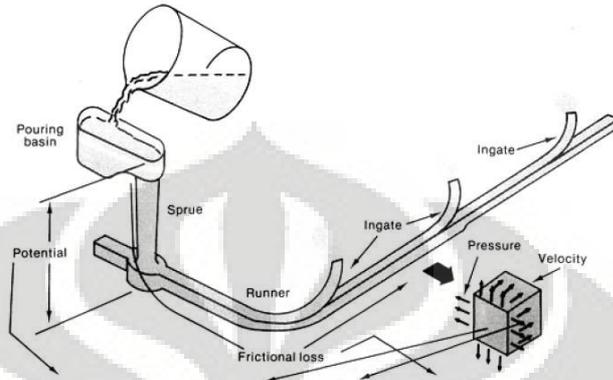
Teori ini menyatakan bahwa pada setiap titik dalam sistem yang tertutup, jumlah dari energi potensial, energi kinetik, energi tekanan, dan energi friksi dari aliran cairan adalah konstan. Rumus Bernoulli dapat ditulis sebagai berikut:

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

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/inci²*), v adalah volume spesifik cairan (dalam *inci³/pound*), g adalah

percepatan gravitasi bumi (dalam $386,4 \text{ inci/s}^2$), V adalah kecepatan (dalam inci/s), F adalah gaya gesek per satuan berat dan K adalah konstan.

Pada Gambar 2.12 mengilustrasikan aplikasi Teori Bernoulli pada sistem saluran tuang.



Gambar 2.12. Ilustrasi skematik aplikasi Teori Bernoulli untuk sistem saluran tuang^[6]

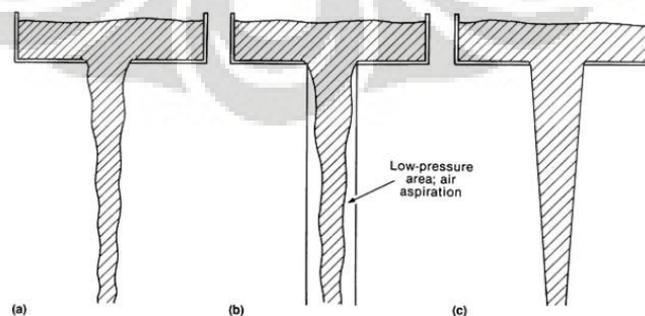
2. Hukum Kontinuitas

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

$$Q = A_1v_1 = A_2v_2 \quad (2.9)$$

Dimana Q adalah laju aliran atau debit (dalam $\text{inci}^3/\text{detik}$), A adalah luas penampang aliran (dalam inci^2), 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 2.13 berikut.



Gambar 2.13. Bentuk aliran logam pada beberapa bentuk *sprue*.
 (a) Aliran alami secara jatuh bebas, (b) Adanya rongga udara, (c) Aliran logam pada *sprue* yang lancip.^[6]

3. Pengaruh Tumbukan

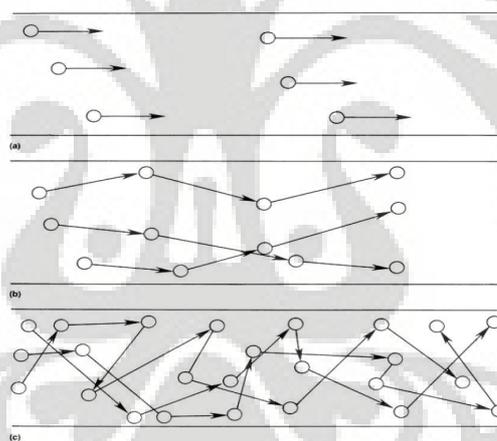
Hukum pertama Newton menyatakan bahwa benda yang bergerak akan terus bergerak ke arah yang diberikan sampai ada gaya lain yang mengubah arah gaya tersebut.

Aliran fluida dapat diukur dengan pengukuran khusus yang disebut dengan *Reynold's Number*. Perhitungan *Reynold's Number* dapat diperoleh dari rumus berikut ini.

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

dimana N_R adalah *Reynold's Number*, v adalah kecepatan cairan, d adalah diameter, ρ adalah densitas cairan dan μ adalah viskositas cairan.

Berdasarkan nilai besarnya *Reynold's Number* yang diperoleh dari perhitungan dapat digunakan untuk memprediksi pola aliran yang terbentuk, seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. 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.^[6]

2.4.4 Pengisian Cetakan

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

Terdapat dua karakteristik utama dari logam cair yang berhubungan dengan pengisian cetakan, yaitu fluiditas dan turbulensi.^[43]

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 ketidakaturan 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 Pengaruh Penambahan Saluran Masuk Minor

Saluran masuk minor adalah suatu saluran kecil tambahan yang berfungsi untuk membantu proses pengisian ke dalam rongga cetakan. Saluran minor ini berfungsi membantu *ingate* untuk mempercepat proses pengisian cetakan. Saluran masuk minor ini ditambahkan ke dalam rongga cetakan dari *runner* atau *sprue*.

Peningkatan kecepatan pengisian berlangsung sejalan dengan luas penampang dari saluran masuk minor yang ditambahkan. Hal ini sesuai dengan Teori Bernoulli yang 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. Oleh karena itu, setiap penambahan

saluran minor pada lingkup sistem yang cukup memenuhi persyaratan sebagai sistem yang tertutup, maka akan membantu mempercepat proses pengisian.

2.4.6 Pengecoran Anti Gravitasi (*Counter Gravity Casting*)

Counter gravity casting merupakan metode pengecoran dengan aliran logam cair yang masuk dari *ingate* ke rongga cetakan berlawanan arah dengan gravitasi bumi. Keuntungan metode ini adalah proses pengisian cetakan yang lambat. Dengan melambatnya proses pengisian diharapkan akan memperlambat juga proses pengisian dan kecepatan pendinginannya. Dalam percobaan yang dilakukan oleh Stefanescu, pada penggunaan sistem saluran tuang vertikal ini tidak dihasilkan karbida pada plat (100X25 mm) dengan ketebalan 2,5 mm dan sifat mekanis yang dihasilkan lebih terjamin.^[12]

Counter gravity casting tekanan rendah terdiri dari: ^[6]

- 1) *Counter-gravity low-pressure casting of air-melted alloys (CLA)*
- 2) *Counter-gravity low-pressure casting of vacuum-melted alloys (CLV)*
- 3) *Check-valve casting (CV)*
- 4) *Counter-gravity low-pressure air-melted sand casting (CLAS)*

2.4.7 Simulasi *Software* Sistem Saluran Tuang

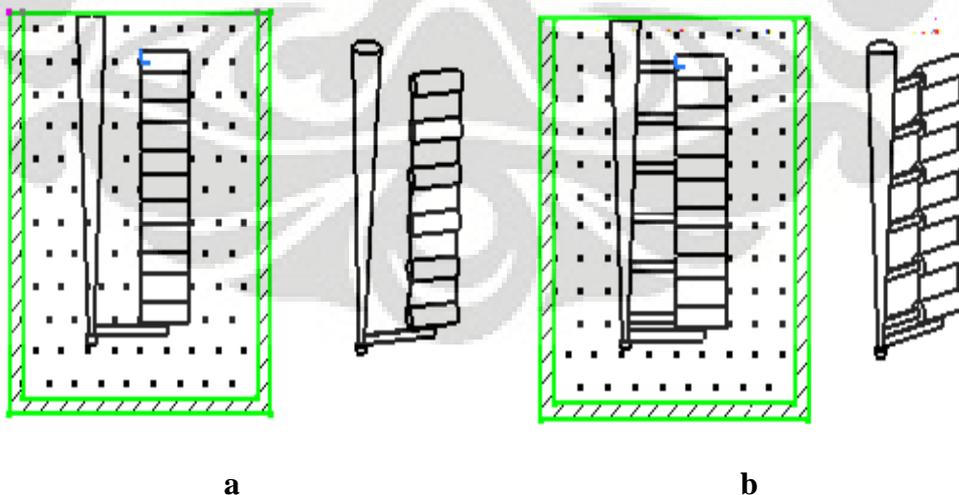
Simulasi *software* untuk sistem saluran tuang merupakan bentuk permodelan komputer dalam teknologi pengecoran yang dikembangkan dalam rangka meningkatkan efisiensi kerja. Dalam sistem simulasi ini, data-data seperti: desain pengecoran, biasanya dalam bentuk program *autocad* atau *solid work*, temperatur penuangan, dan kecepatan pengisian diolah untuk menghasilkan gambaran atau prediksi proses pengisian cetakan pada saat pengecoran. Hal ini sangat berguna untuk melihat kemungkinan-kemungkinan yang akan terjadi pada saat pengecoran seperti turbulensi, kecepatan pengisian dan pembekuan, serta dapat menentukan apakah desain pengecoran yang telah dibuat cocok untuk digunakan dalam pengecoran atau tidak.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian awal untuk menghasilkan *thin wall austempered ductile iron* (TWADI). Penelitian ini difokuskan pada pengaruh kecepatan waktu pengisian (*filling time*) pada pengecoran dinding tipis besi tuang nodular melalui penambahan saluran masuk minor dengan sistem saluran tuang vertikal anti grafitasi.

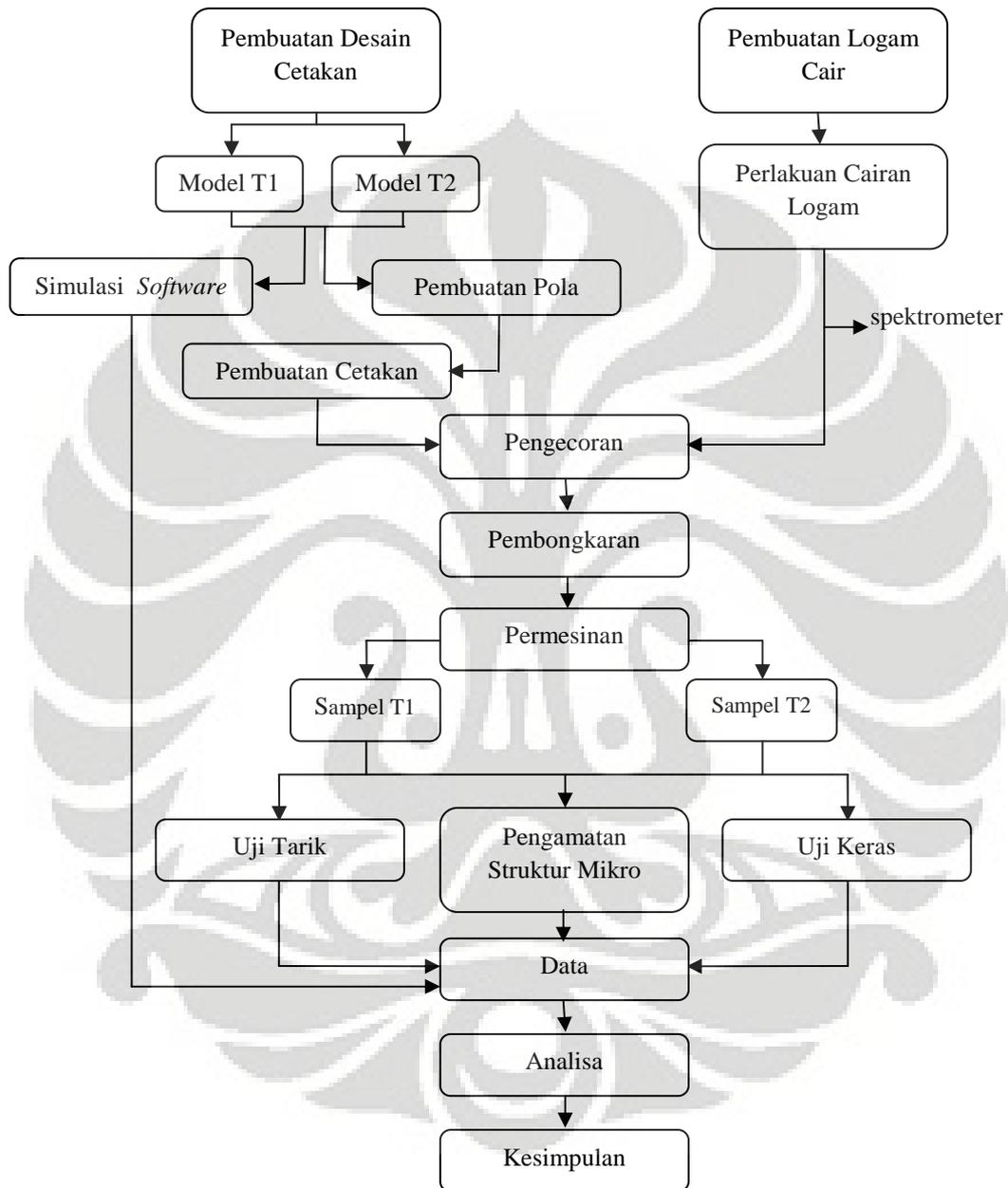
3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dibuat 2 desain cetakan dengan sistem saluran tuang. Desain cetakan ini merupakan modifikasi dari desain Stefanescu. Desain pengecoran Stefanescu merupakan desain pengecoran vertikal dengan *ingate* terletak di bawah (*bottom ingate*). Perbedaan desain cetakan antara keduanya adalah satu cetakan tanpa tambahan saluran masuk minor (model T1) sedangkan yang lain dengan tambahan saluran masuk minor (model T2), Gambar 3.1. Model T2 dengan penambahan saluran masuk minor diharapkan dapat meningkatkan kecepatan pengisian dan kedua desain ini akan disimulasikan pada simulasi *software* komputer.



Gambar 3.1. Desain cetakan penelitian; a) Model T1 dan b) Model T2

Penelitian yang difokuskan pada pengaruh kecepatan waktu pengisian (*filling time*) melalui penambahan saluran masuk minor ini, secara umum seperti pada diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

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.

2. Alat Pembuatan Cetakan

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan meliputi:

- a) Mesin pencampur pasir (*mixer*)
- b) Sepasang flask tipe Excel
- c) Mesin pengangkut

3. Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi:

- a) Dapur induksi (*induction furnace*)
- b) Spektrometer
- c) Termokopel

4. Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk pengecoran meliputi:

- a) Panci tuang (*ladle*)
- b) Termokopel
- c) Mesin pengangkut

5. Alat Pembongkaran

Alat yang digunakan berupa mesin guncang yang diletakkan di bawah tanah. Setelah itu, untuk membersihkan produk cor dari pasir-pasir yang melekat, digunakan metode *shotblasting*, yaitu ditembakkan dengan bola-bola baja kecil pada ruang tertutup.

6. Alat Permesinan

Alat yang digunakan untuk permesinan: mesin pemotong, *milling machine*, mesin gerinda, mesin poles, dan amplas.

7. Alat Pengujian

Alat yang digunakan dalam pengujian antara lain:

- 1) Spektrometer
- 2) *Microskop optic digital*
- 3) *Microhardness tester*
- 4) *Tensile strength machine*

3.2.2 Bahan

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

1. Bahan Pola

Bahan baku yang digunakan dalam pembuatan pola adalah kayu, papan triplex, lem, dempul, dan cat.

2. Bahan Baku Logam Cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair seperti pada Tabel 3.1. di bawah ini.

Tabel 3.1. Bahan baku logam cair^[42]

No	Nama Material	Kuantitas	
		kg	Penambahan
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. Bahan Baku Cetakan

Cetakan yang digunakan dalam pengecoran adalah cetakan pasir furan.

Adapun bahan baku yang digunakan antara lain:

- 1) Pasir silika

Pasir silika merupakan bahan baku utama dari cetakan pasir.

- 2) Asam furan

Asam furan merupakan bahan pengikat yang dilakukan katalisasi dengan katalis asam tanpa pemanasan. Jumlah yang ditambahkan sekitar 0,9 – 2,0% dari berat pasir.

3) Bahan pengikat tambahan

Biasanya ditambahkan 20-50% dari berat pengikat utama.

4) Serbuk arang

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

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

a) *Plating*

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

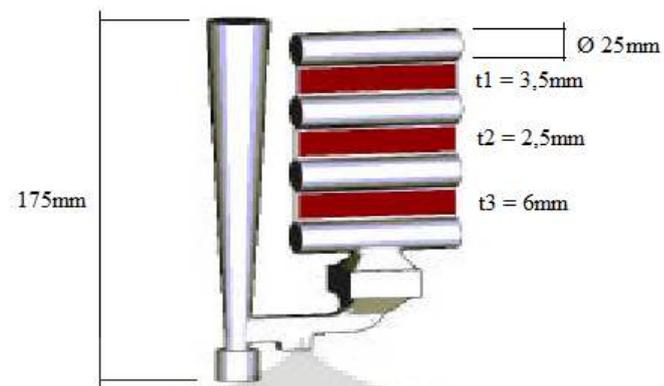
b) *Isomol*

Isomol adalah cairan antara serbuk *coating* dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan cetakan yang baik. Tepat setelah dilakukan pemolesan, campuran ini langsung dibakar untuk menguapkan kandungan alkohol.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pembuatan Desain Cetakan

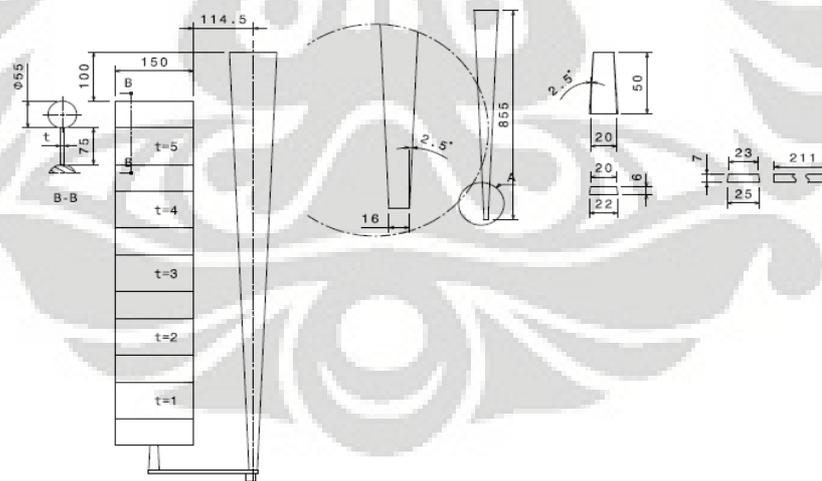
Pembuatan desain cetakan merupakan modifikasi dari desain sebelumnya yang telah dikembangkan oleh Stefanescu pada tahun 2002, Gambar 3.3. Desain pengecoran Stefanescu merupakan desain pengecoran vertikal dengan *ingate* terletak di bawah (*bottom ingate*), yang terdiri dari 3 plat tipis ukuran 100x25 mm dengan ketebalan (dari bawah ke atas) masing-masing 6 mm, 2,5 mm dan 3,5 mm, dan 4 buah *riser* yang disusun di samping setiap plat (*rised plates*). Besar diameter *riser* adalah 25 mm dan tinggi dari saluran tuang adalah 175 mm.



Gambar 3.3. Desain pengecoran Stefanescu^[12]

Modifikasi desain untuk penelitian ini meliputi:

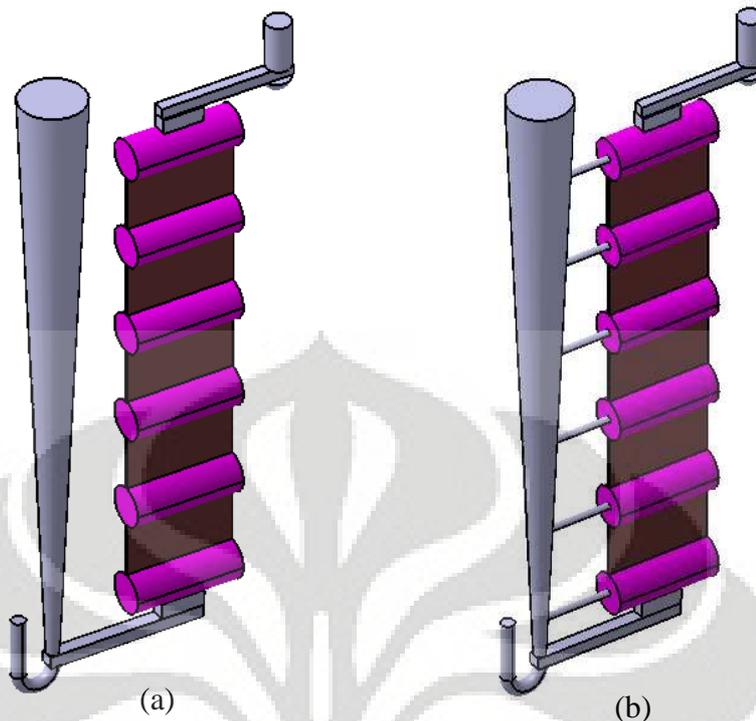
1. Dimensi plat tipis berukuran 150x75 mm dengan ketebalan berurutan dari bawah ke atas adalah 1, 2, 3, 4, dan 5 mm.
2. Jumlah plat tipis sebanyak 5 buah.
3. Tinggi sprue 855 mm.
4. Posisi ketebalan terkecil (1 mm) paling dekat dengan *ingate*.
5. Pada model T2 ditambahkan saluran masuk minor pada sisi sejajar setiap *riser* dengan diameter 8 mm.



Gambar 3.4 Desain pengecoran untuk penelitian.

3.3.2 Pembuatan Pola

Proses pembuatan pola dilakukan dengan menggunakan material kayu, yang terdiri atas: saluran tuang, benda cor, dan *riser*, Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Pola cetakan sebelum dibentuk *pattern plate*;
(a) Model T1 dan (b) Model T2

PT. X yang terletak di Kawasan Industri Pulogadung Jakarta Utara merupakan tempat dilakukannya proses pengecoran. Perusahaan pengecoran ini menggunakan *uran sand* untuk melakukan proses pengecoran pasir cetak, sehingga pola cetakan dibuatkan terlebih dahulu *base plate* menghasilkan *pattern plate*, Gambar 3.6. *Pattern plate* memiliki ukuran 120x120 cm disesuaikan dengan ukuran *flask* (100x100 cm) yang akan digunakan untuk membuat cetakan. Pola cetakan disusun untuk variasi ketebalan plat yang berbeda-beda. Kondisi plat dapat dilakukan bongkar pasang sehingga dapat dilakukan model pengecoran lain dengan urutan ketebalan plat yang diinginkan. Pada penelitian ini mengambil model cetakan dengan ketebalan 1 mm berada paling dekat dengan *ingate* sehingga logam cair masuk rongga cetakan dimulai dari ketebalan paling kecil.

Pattern plat dilapisi dengan *plating* agar seluruh permukaan merata dan halus sehingga mudah dilakukan pemisahan dengan pasir cetak saat pelepasan cetakan.



Gambar 3.6. Salah satu sisi *pattern plate*

3.3.3 Pembuatan Cetakan

Pembuatan cetakan dilakukan dengan menggunakan teknologi *uran sand*. Pembuatan cetakan ini diperlukan *flask* yang diletakkan di atas *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, maka cetakan dibuat sesuai dengan jumlah 1 set setiap hari. Satu set terdiri dari model T1, T2, T3, T4 dan T5. T3, T4 dan T5 tidak dibahas pada penelitian ini.

Setelah *flask* terpasang di atas *pattern plat*, kemudian dilakukan pengisian pasir cetak. Proses pengisian cukup mudah dan memerlukan waktu yang singkat karena tidak dibutuhkan *ramming* yang kuat untuk memastikan pasir cetak terdistribusi merata dan memadat. *Furan sand* merupakan jenis pasir cetak dengan ikatan yang terjadi secara kimia sehingga dihasilkan daya ikat antar pasir yang baik.

Setelah cetakan dibuat untuk masing-masing sisi, kemudian dilakukan *waiting time* minimal 4-5 jam sebelum dilakukan proses penggabungan (*merger*). Ini dilakukan agar cetakan pasir mengering dan memiliki kekuatan yang cukup untuk tidak ambruk ketika dilakukan penggabungan.



Gambar 3.7. Sepasang cetakan model T2 pada saat *waiting time*

Pada Gambar 3.7, pembuatan saluran masuk minor untuk model T2 dilakukan secara manual dengan menggunakan sebuah batangan besi pada desain cetakan model T1. Hal ini lebih efektif dari pada harus membuat pola saluran masuk minor yang kemudian ditempelkan pada *pattern plate* untuk dibuatkan cetakan.

3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam

Pembuatan logam cair dilakukan dalam dapur induksi. 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 pada titik leburnya. Setelah semua material melebur, dilakukan penambahan seperti *carburizer* kemudian temperatur pemanasan dinaikkan sampai dapat dilakukan pengangkatan terak. Kemudian logam cair ditaburi *slag remover* untuk mengikat terak agar mudah dilakukan pemisahan dengan logam cair. Penaburan *slag remover* ini

dilakukan sampai terak dalam logam cair diperkirakan habis. Logam cair tetap dipanaskan untuk dilakukan pemeriksaan komposisi dengan spektrometer. Uji CE tidak dilakukan karena pada saat itu alat uji CE yang ada sedang dikalibrasi. Selain itu, uji fluiditas yang dilakukan belum memberikan data yang baik mengingat uji ini belum ada aturan bakunya.

3. Tahap *refining*

Ketika temperatur logam cair mencapai sekitar 1400°C, maka dilakukan pengambilan sampel untuk pemeriksaan komposisi kimia dengan spektrometer. 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 memenuhi.

4. Tahap *tapping*

Ketika temperatur logam cair mencapai temperatur *tapping*, biasanya 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. Namun, uji cil tidak dilakukan karena pengujian komposisi dengan spektrometer sudah dilakukan.

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

3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

Pembuatan besi tuang nodular dilakukan melalui proses *liquid treatment* untuk mengontrol bentuk grafit berbentuk bulatan atau nodular. Tahapan ini dilakukan bersamaan dengan tahap *tapping*. Tahapan ini terdiri dari dua jenis, yaitu inokulasi dan nodulasi.

Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam panci tuang, sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam panci tuang di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara

langsung dengan logam cair. Selain itu, dengan cara seperti ini jumlah logam Mg yang bereaksi lebih efektif.

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 silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Setelah dilakukan inokulasi, kemudian terjadi proses nodulasi ketika logam cair mencapai dasar panci tuang. Ciri-ciri yang tampak pada proses ini adalah terjadi ledakan di dalam panci tuang 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. Temperatur efektif untuk terjadinya nodulasi adalah sekitar 1380°C.

3.3.5 Pengecoran

Sebelum dilakukan pengecoran, cetakan pasir dari kedua sisi *flask* dilakukan *merger*. Proses ini membutuhkan ketelitian agar posisi rongga cetakan sesuai bentuk benda dengan menggabungkan dowel yang telah dibuat antara sisi positif dan negatifnya, Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Proses *merger* dari pasangan cetakan

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari panci tuang ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Pengontrolan temperatur selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dilakukan penuangan ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan termokopel. Temperatur tuang dijaga

sekitar 1393^oC sampai 1450^oC untuk memastikan cetakan dapat terisi penuh oleh cairan. Lamanya waktu penuangan diukur dengan menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair.

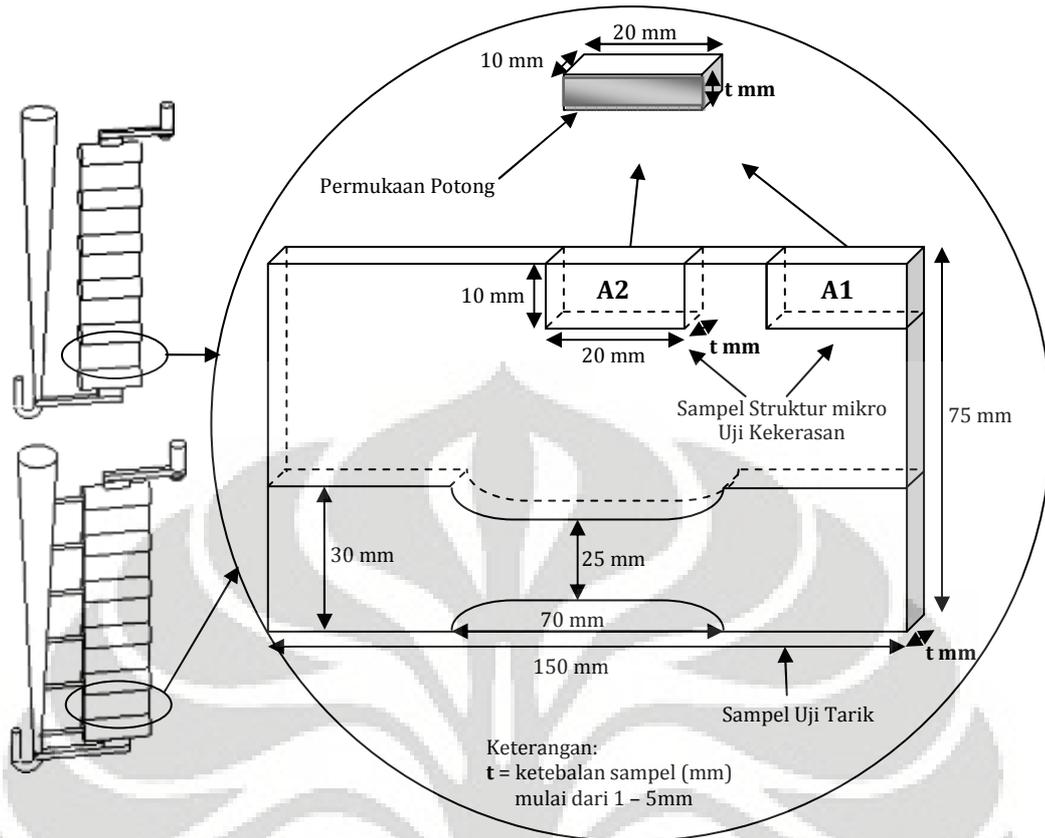
Setelah proses pengecoran selesai, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Pembongkaran dilakukan setelah benda cor mendingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Proses pembongkaran cetakan dilakukan dalam sebuah ruang bawah tanah dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokkan cetakan pasir. Setelah itu, agar hasil cor-coran bersih dari butiran pasir yang melekat kuat, maka dilakukan *shotblasting*. Metode ini menggunakan bola-bola baja kecil dengan mekanisme penumbukan. *Machining* dilakukan untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan 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 3.9. Berikut metode pengambilan sampel pada semua plat untuk pengujian.

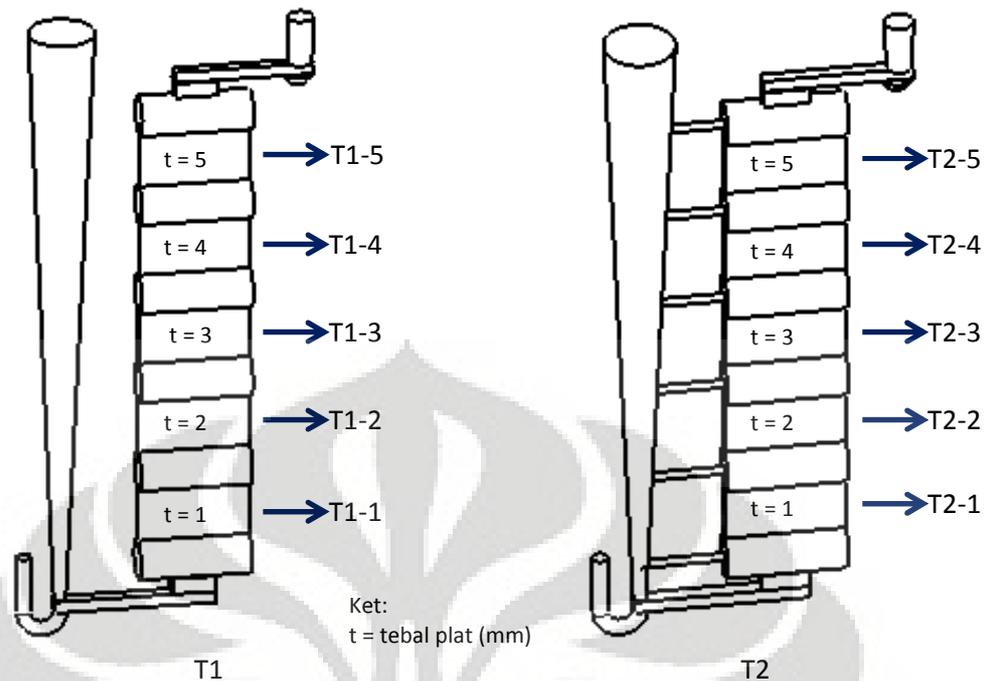


Gambar 3.9. Metode pengambilan sampel untuk pengujian.

Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi (LUK) Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT) – Serpong kemudian dikirim 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 T2. Pada setiap desain pengecoran ada 5 buah plat dengan ketebalan yang berbeda, mulai dari 1, 2, 3, 4, dan 5 mm dimulai dari bawah ke atas. Sehingga, penamaan sampel dilakukan dengan menambahkan angka pada kode sampel, Gambar 3.10. Sebagai contoh: T1-1 untuk plat 1 mm dari desain T1 dan T2-1 adalah plat 1 mm dari desain T2.



Gambar 3.10. 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 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 terkontaminasi oleh 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 3.9.

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 3.11. 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 μm , 3 μm , 2 μm , dan 0,25 μm . 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 ke dalam 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 seperti pada Gambar 3.9.

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 3.12 di bawah ini:



Gambar 3.12. 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 27⁰C. Sedangkan teknik yang digunakan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.



Gambar 3.13. 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 mikro 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/mm² untuk AFS dan 600 nodul/mm² 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.^[4]

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

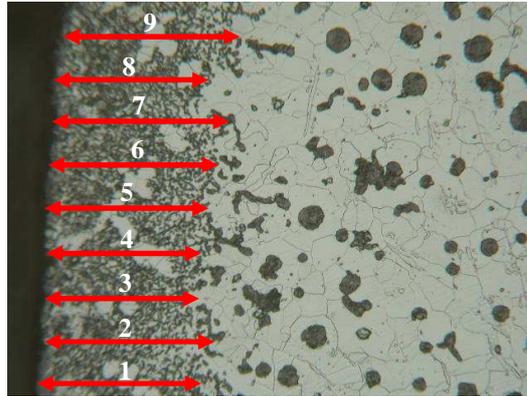
Perhitungan diameter rata-rata nodul pada tahap awal juga dilakukan secara manual dengan menggunakan mal lingkaran pada foto struktur mikro non etsa pada pembesaran 200X. Semua nodul diukur dengan menggunakan mal lalu dihitung rata-ratanya. Hasilnya lalu dibagi dengan 200.

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.

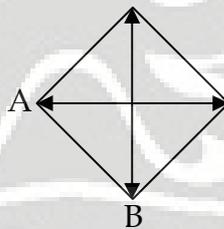


Gambar 3.14. Metode perhitungan efek kulit

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 27⁰C. Standar yang digunakan untuk pengujian ini adalah ASTM E92.

Penjejakan dilakukan pada arah horizontal dan vertikal. Pada arah horizontal, penjejakan dilakukan sebanyak 7x dan arah vertikal berbeda-beda tergantung dari ketebalan sampel. Pada ketebalan 1 mm sampai 5 mm berturut-turut 2, 3, 4, 5, dan 6 titik. Hal ini dilakukan untuk menghasilkan data kekerasan yang representatif. Adapun bentuk penjejakan seperti pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15. 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 3.16. *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 selembur 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 3.17. *Tensile strength machine*

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan menggunakan spektrometer yang terkalibrasi. Berikut ini adalah hasil pengujian komposisi kimia, Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil pengujian komposisi kimia^[44]

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

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada Tabel 4.1 di atas, kadar 3 unsur penting yaitu 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 bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%,^[21] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5) mm.^[28] Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si \quad (4.1)$$

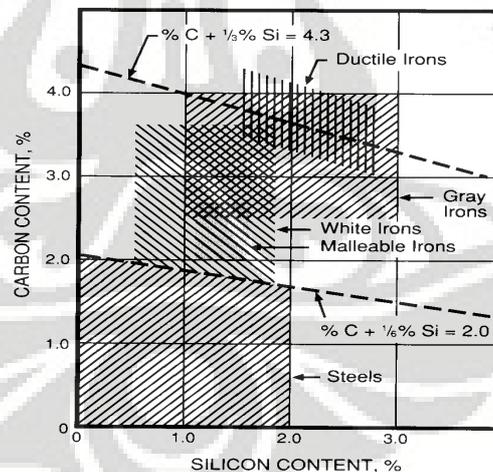
Oleh karena itu, nilai CE yang dimiliki oleh logam cair pada saat pengecoran sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,31\%Si \\ &= 3,84\% + 0,31(2,60\%) \\ &= 4,65\% \end{aligned}$$

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 masih ada struktur karbida pada hasil pengecoran.

Di lain pihak, nilai CE sebesar 4,65% memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk pengecoran dinding tipis berdasarkan Stefanescu ($CE > 4,3\%$). Nilai CE yang sesuai dengan rencana penelitian ini diharapkan mampu mencegah terbentuknya struktur karbida.



Gambar 4.1. Nilai CE untuk beberapa jenis material^[6]

Selain itu, perhitungan nilai CE yang dibutuhkan untuk setiap ketebalan berdasarkan rekomendasi QIT^[27] adalah sebagai berikut.

Tabel 4.2. Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT

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 ini.



Adanya penambahan unsur Si menyebabkan pembentukan cementit (Fe_3C) 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.

Sedangkan, 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.^[6]

Dari kandungan unsur paduan di atas dapat dikelompokkan menjadi:

- 1) Elemen pembentuk perlit, yaitu: Ni, Mn dan Cu.
- 2) Elemen pembentuk karbida, yaitu: Cr dan Mn.

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 di bawah 0,015% maka kandungan magnesium antara 0,035 – 0,04% dapat memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk membentuk bulatan grafit.

4.2 Simulasi Z-Cast

Simulasi dilakukan dengan kecepatan pengisian sebesar 100.000. Gambar hasil simulasi dapat dilihat pada lampiran 3. Adapun data hasil simulasi Z-Cast adalah sebagai berikut.

Tabel 4.3. Data hasil simulasi software Z-Cast

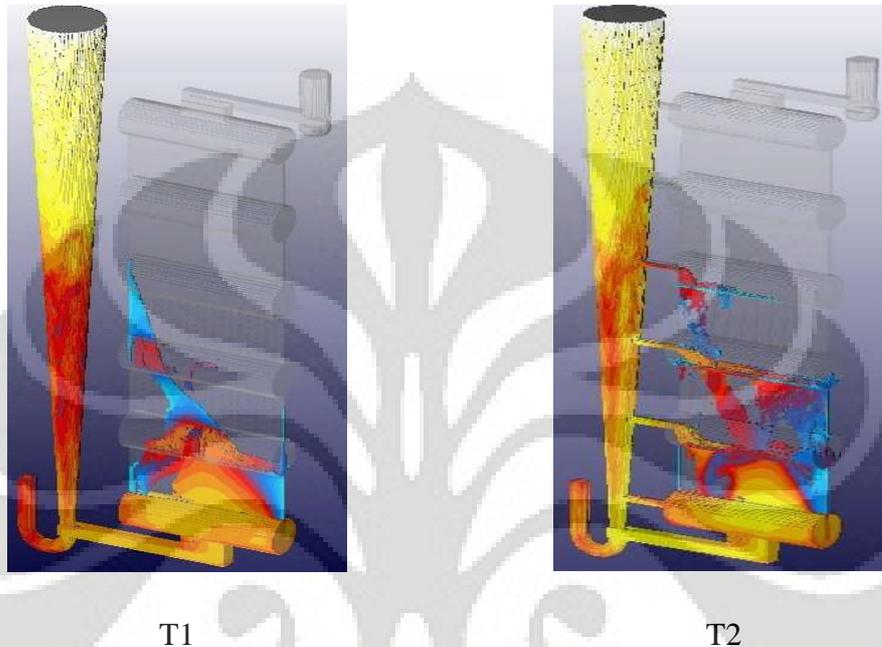
Parameter	Model T1	Model T2
Waktu pengisian	67,349 detik	11,973 detik
Turbulensi	Lebih kecil	Lebih besar

Berdasarkan data simulasi pada lampiran, terdapat beberapa fenomena yang terjadi, antara lain:

1. Turbulensi

Turbulensi terjadi pada saat logam memasuki rongga cetakan, baik untuk Model T1 maupun Model T2. Hal ini terjadi karena luas permukaan *ingate* yang lebih kecil dari pada luas penampang *sprue* mengakibatkan kecepatan pengisian ke dalam rongga cetakan menjadi lebih tinggi. Untuk model T1, fenomena ini 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. Sedangkan

pada Model T2, terjadi semburan yang lebih kecil dari pada Model T1, namun dengan adanya penambahan saluran masuk minor juga mengakibatkan terjadinya turbulensi. Bahkan, adanya saluran masuk minor ini mengakibatkan turbulensi yang terjadi lebih kompleks.



Gambar 4.2. Fenomena turbulensi

2. Pengisian yang lebih cepat

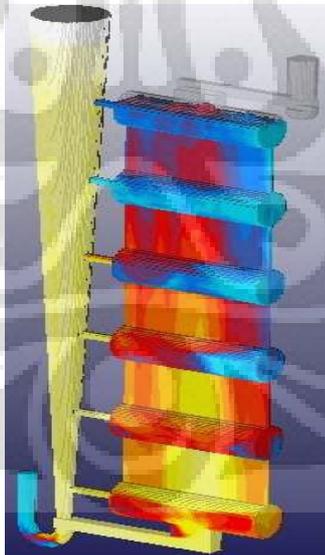
Proses pengisian yang lebih cepat terjadi pada Model T2 karena adanya penambahan saluran masuk minor. Saluran masuk minor mulai membantu pengisian logam cair ke dalam rongga cetakan pada nomer 4 dari bawah, baru kemudian berturut-turut nomer 3, 2, dan 1. Namun, untuk nomer 5 dan 6 tidak berfungsi sebagai mana mestinya.

Jika dibandingkan dengan data proses pengisian aktualnya, Model T2 memiliki kecepatan pengisian yang lebih besar dari pada Model T1 dengan waktu 25,79 detik sedangkan untuk T1 selama 66,28 detik. Hal ini sesuai dengan simulasi dengan perbedaan waktu yang dibutuhkan untuk pengisian antara Model T1 dan T2 cukup besar. Selisih waktu pada simulasi sebesar 55,376 detik sedangkan pada kejadian aktual sebesar 40,49 detik. Perbedaan selisih antara simulasi dan aktual terjadi karena beberapa hal seperti: kecepatan pengisian yang

tidak sama, proses pengisian pada aktual yang kurang konstan, kondisi cetakan yang berbeda, dan viskositas logam cair yang tidak sama.

3. Pengisian yang terbalik

Maksud dari pengisian terbalik adalah bahwa penambahan sistem saluran tuang minor dimaksudkan untuk membantu proses pengisian ke dalam rongga cetakan, namun terjadi proses sebaliknya, dimana cairan logam dalam rongga cetakan mengalir melalui tambahan saluran masuk minor ke arah yang berlawanan (menuju *sprue*). Hal ini terjadi pada model T2 pada saluran masuk nomer 5 dan 6 dari bawah, Gambar 4.3. Analisa yang dihasilkan adalah bahwa tekanan pada titik yang sejajar pada saluran masuk minor nomer 5 dan 6 tersebut tidak cukup untuk memberikan dorongan logam cair masuk sehingga ketika logam cair dalam rongga cetakan telah mencapai titik yang sejajar, kemudian mengalirkan logam cair ke dalam saluran masuk minor ke arah *sprue*. Tekanan yang kurang ini diakibatkan oleh volume logam cair dalam *sprue* yang belum terisi penuh dan adanya gaya grafitasi sehingga logam cair jatuh bebas ke bawah menuju *sprue base*.



Gambar 4.3. Pengisian terbalik pada saluran masuk ke-5 dan ke-6 dari bawah.

4.3 Pengamatan Visual

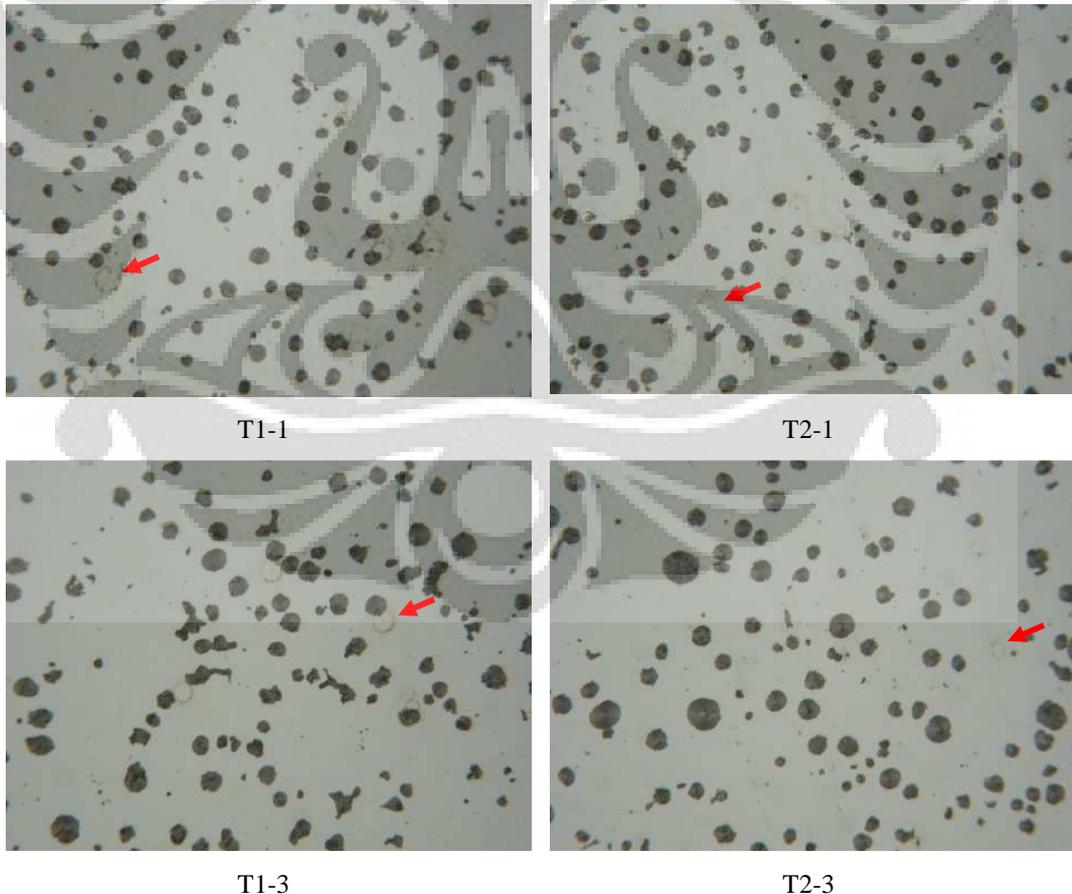
Berdasarkan gambar visual sampel sebelum dipotong, terdapat cacat sirip pada Model T1 dan T2 yaitu pada bagian *sprue*. Namun, secara keseluruhan

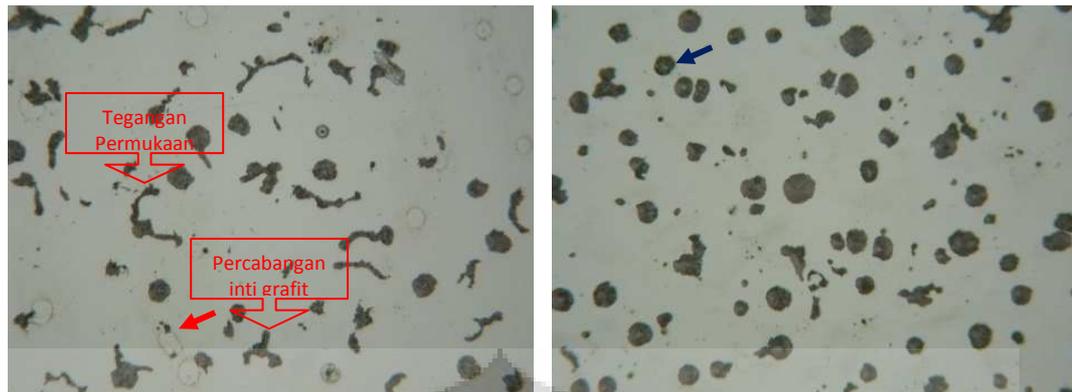
produk yang dihasilkan cukup baik karena perubahan dimensi ketebalan tidak terlalu besar, Lampiran 1. Cacat sirip terjadi karena adanya celah pada cetakan.

Setelah dilakukan pemotongan, 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 Pengamatan Struktur Mikro

Pada pengamatan struktur mikro, pembahasan dilakukan dengan mengambil 3 jenis ketebalan yang sama pada Model T1 dan T2. 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 T2 pada ketebalan 1, 3, dan 5 mm.





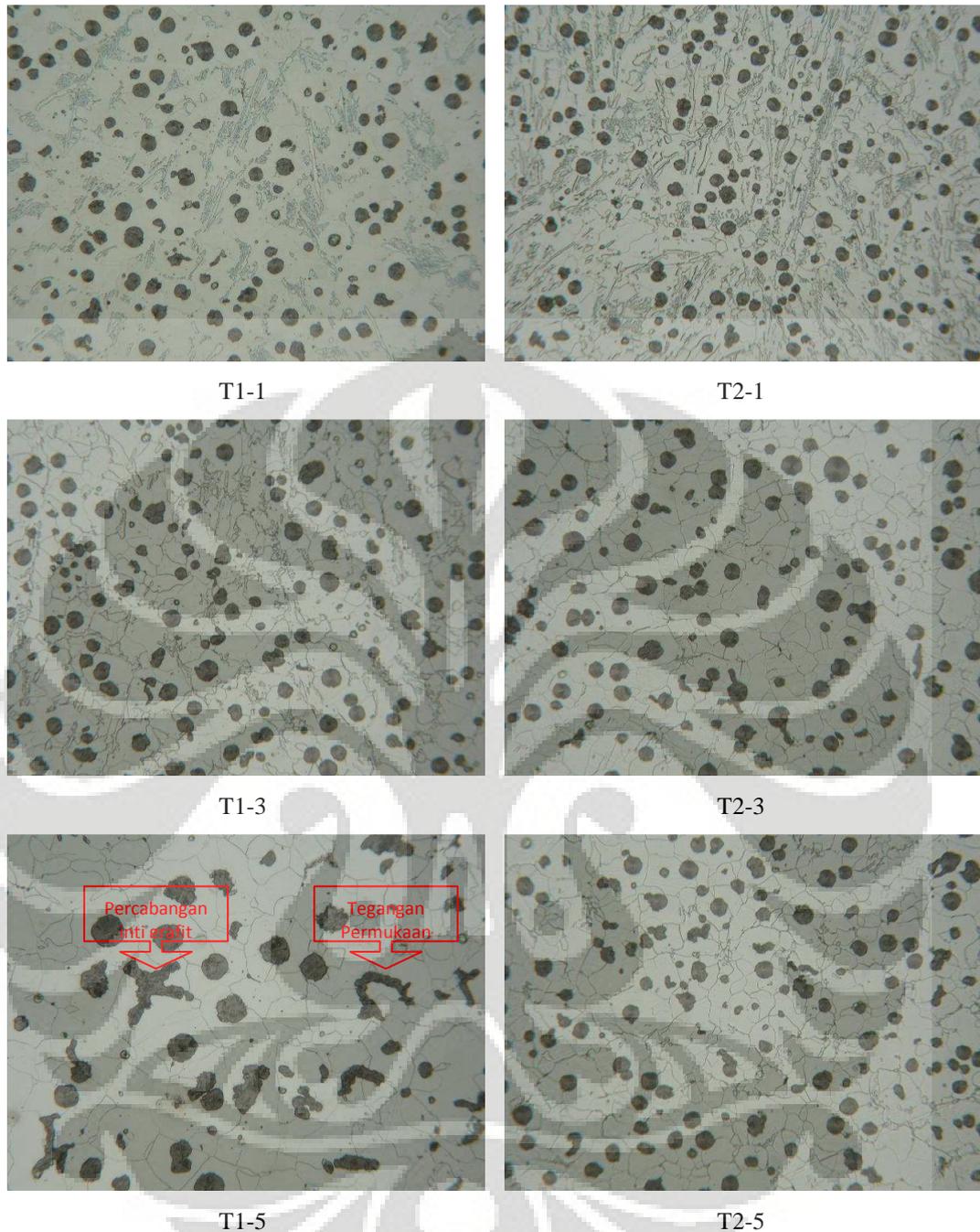
T1-5

T2-5

Gambar 4.4. Struktur mikro (Non-etsa, pinggir, pembesaran 200X)

Struktur mikro pada Gambar 4.4. di atas yaitu struktur mikro tanpa dilakukan etsa dengan pembesaran 200X yang digunakan untuk perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Penggunaan struktur mikro non- etsa untuk perhitungan nilai-nilai tersebut karena struktur mikro non etsa hanya menampakkan bentuk dan ukuran grafit sehingga struktur-struktur mikro yang lain seperti karbida tidak mengganggu dalam perhitungan. Tampak dalam struktur mikro di atas adanya bulatan kosong pada hampir setiap ketebalan pada masing-masing model. Analisa yang digunakan adalah berdasarkan hipotesa pembentukan grafit nodular, yaitu hipotesa gelembung gas. Hipotesa ini menjelaskan bahwa mekanisme pembentukan grafit nodular berhubungan dengan gelembung gas, dalam hal ini adalah gas CO₂ yang akan menjadi tempat bagi pertumbuhan benih grafit. Kekosongan grafit terjadi karena belum adanya karbon yang mengisi ruang-ruang kosong tersebut yang berasal dari luar.

Selain itu, untuk struktur mikro T1-5 merupakan struktur mikro dengan bentuk grafit paling tidak teratur. Hal itu terjadi karena masih banyak bagian grafit yang belum membentuk nodul sempurna akibat tidak cukup waktu untuk membentuk nodular sebelum akhirnya terjadi pembekuan. Selain itu, bentuk grafit pada bagian ini juga dapat menggambarkan teori pembentukan grafit nodular yaitu hipotesa percabangan inti grafit dan hipotesa pengaktif unsur-unsur pengaktif tegangan permukaan.



Gambar 4.5. Struktur mikro (Etsa, pinggir, pembesaran 200X)

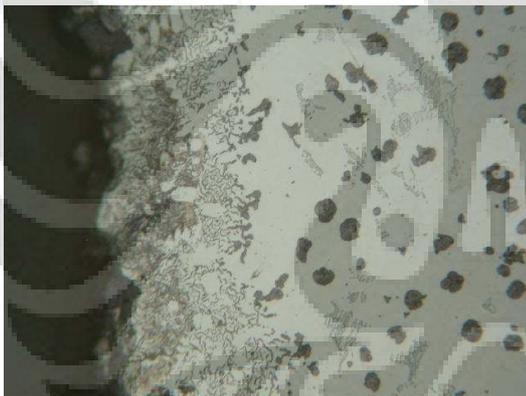
Dengan mengambil referensi pada *ASM Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa struktur mikro yang terbentuk pada kedua model adalah grafit dalam matriks ferit, Gambar 4.5. Hasil ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. 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 akan memperlambat juga proses pengisian dan kecepatan pendinginannya.

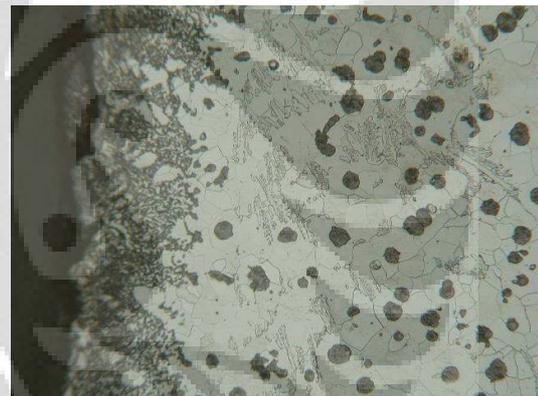
Selain itu, dalam setiap ketebalan plat dari kedua desain terbentuk karbida. Hal tersebut dapat diasumsikan sebagai akibat penggunaan nilai CE yang sama untuk semua ketebalan dan tidak mengikuti standar yang diberikan oleh QIT.

Berdasarkan kebutuhan, matrik hasil pengecoran model T1 dan T2 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.

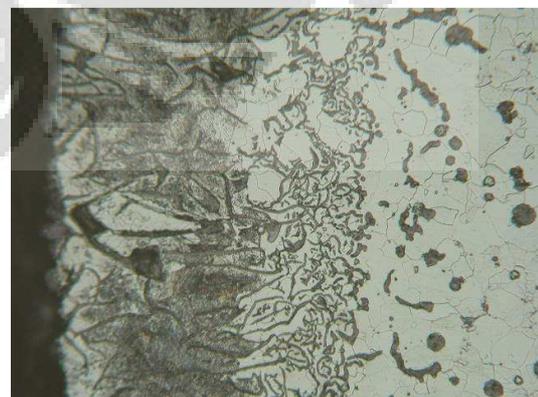
Untuk struktur mikro T1-5 di atas, memiliki struktur grafit yang lebih besar dan menggambarkan hipotesa pembentukan grafit nodular yaitu hipotesa percabangan inti grafit dan hipotesa pengaktif unsur-unsur pengaktif tegangan permukaan.

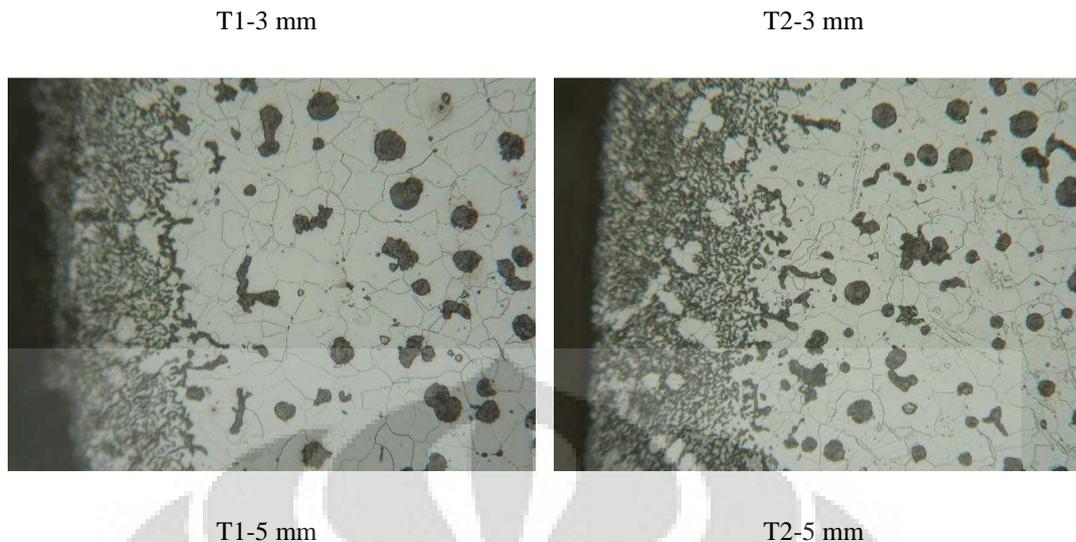


T1-1 mm



T2-1 mm





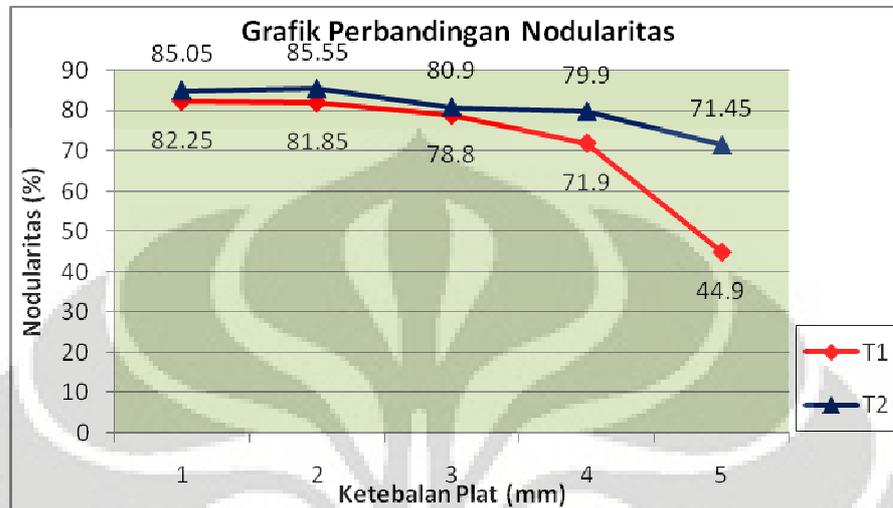
Gambar 4.6. Struktur mikro (Etsa, tepi, pembesaran 200X)

Seperti halnya dengan terbentuknya beberapa daerah, pada grafit juga memiliki bentuk yang bermacam-macam. Seperti pada Gambar 4.6 di atas, pada bagian tepi yang terbentuk adalah grafit serpih. Pada daerah transisi terlihat percampuran antara grafit serpih, grafit setengah nodul, dan grafit nodul. Lalu pada daerah inti grafit yang terbentuk adalah grafit nodul.

Tabel 4.4. Hasil Pengukuran nodularitas, jumlah nodul, diameter rata-rata nodul dan luas grafit

Model	Tebal (mm)	Posisi	Nodularitas (%)	Jumlah Nodul (nodul/mm ²)	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-2	1	A1	85.6	1197.6	12.5	10.9
		A2	84.5	1934.7	9.9	10.8
	3	A1	87.6	824.3	14.5	11.6
		A2	74.2	990.3	14.2	11.2
	5	A1	76.2	707.7	16.2	12.6
		A2	66.7	577.1	18.5	9.9

4.4.1 Nodularitas



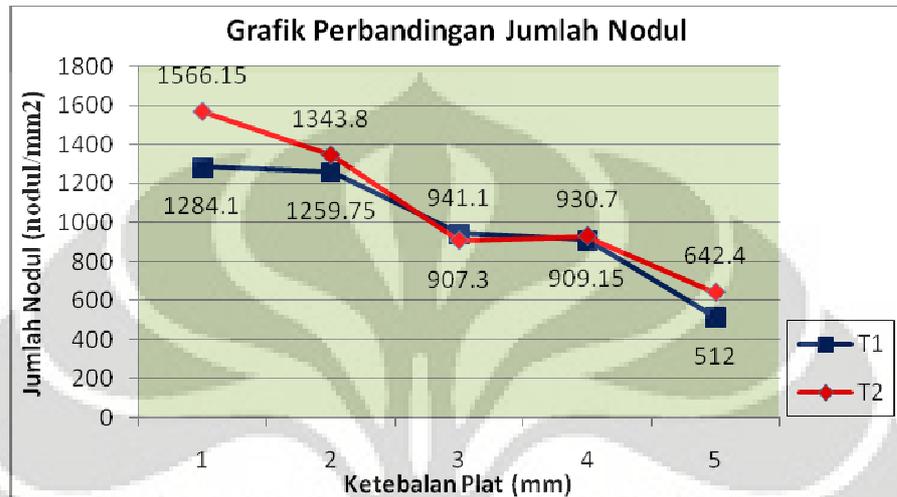
Gambar 4.7. Grafik perbandingan nodularitas

Berdasarkan Gambar 4.7 di atas, baik model T1 dan T2, nilai nodularitas cenderung mengalami penurunan ketika terjadi peningkatan ketebalan. Ketika ketebalan meningkat, maka kecepatan pendinginan lebih lambat sehingga menghasilkan ukuran grafit yang lebih besar dan lebih sedikit.^[9] Dengan ukuran nodul yang lebih besar lebih sulit untuk menghasilkan grafit dengan nodularitas yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan nodulan yang kuat sehingga terbentuk nodul yang sempurna. Namun, penggunaan nodulan juga harus dibatasi karena dapat juga berperan sebagai agen pembentuk karbida.

Selain itu, nodularitas pada Model T2 lebih besar dari pada Model T1. Sebagian besar sampel pada T2 memenuhi persyaratan yang dibutuhkan oleh *ductile iron data* yaitu tingkat nodularitas sebesar 80%^[2] dan berdasarkan syarat dari *ferro casting ductile iron (FCDI)* yaitu sebesar 70-80% nodularitas^[38]. Perbedaan ini disebabkan oleh kecepatan pengisian yang lebih cepat pada Model T2 sehingga terbentuk nodul grafit yang lebih banyak dengan ukuran yang lebih kecil. Pembentukan grafit yang lebih kecil dengan nodularitas yang tinggi lebih mudah dari pada bentuk grafit yang lebih besar. Hasil 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. Namun, dengan penambahan saluran masuk menyebabkan proses pengisian lebih cepat sehingga proses solidifikasi juga lebih cepat.

4.4.2 Jumlah Nodul

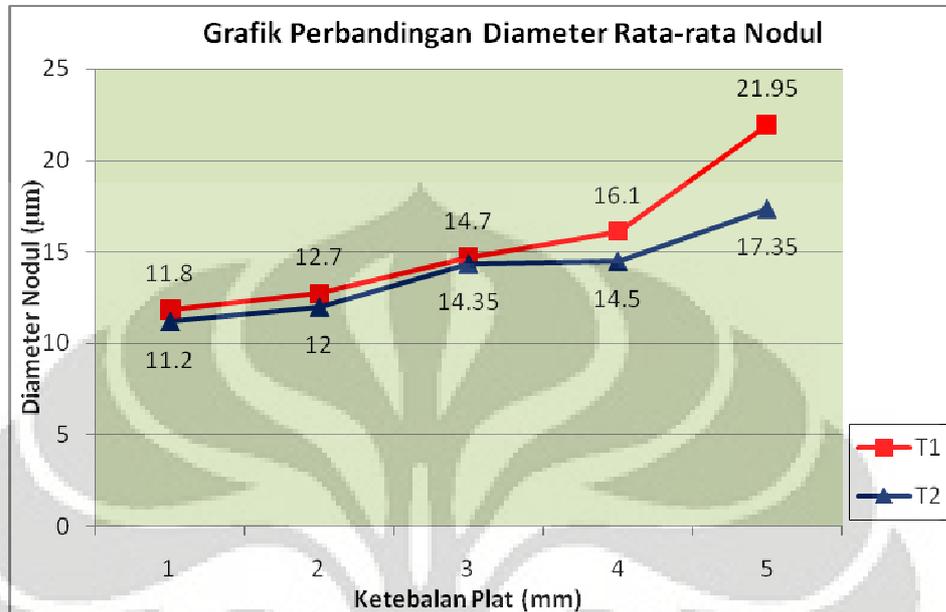


Gambar 4.8. Grafik perbandingan jumlah nodul

Pada Gambar 4.8 di atas, penurunan ketebalan cenderung menghasilkan jumlah nodul yang lebih banyak. Hal ini membuktikan bahwa ketika ketebalan berkurang maka kecepatan pendinginan di dalam cetakan meningkat. Ini menghasilkan struktur butir yang lebih halus. Oleh karena adanya inoculan yang cukup kuat sehingga mendorong pembentukan grafit dengan jumlah nodul yang lebih tinggi.^[6] Jumlah nodul meningkat sejalan dengan meningkatnya kecepatan pendinginan.^[13] Hal ini berbeda dengan percobaan yang dilakukan oleh Skaland. Skaland mencoba melihat efek dari ketebalan pengecoran terhadap jumlah nodul yang dihasilkan dengan menggunakan inoculan yang mengandung (Ca-Ce-S-O). Pada percobaannya, Skaland bervariasi ketebalan corannya pada: 40, 20, 10, dan 5 mm. Hasil yang diperoleh ternyata jumlah nodul berkurang dengan semakin tipisnya ketebalan cor.^[10]

Di samping itu, jumlah nodul untuk T2 lebih besar dari pada T1. Hal ini terjadi karena pada proses pengisian yang lebih cepat seiring dengan penambahan inoculan, membantu proses pembentukan jumlah nodul yang lebih banyak selama solidifikasi. Dan ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran.

4.4.3 Diameter Rata-rata Nodul

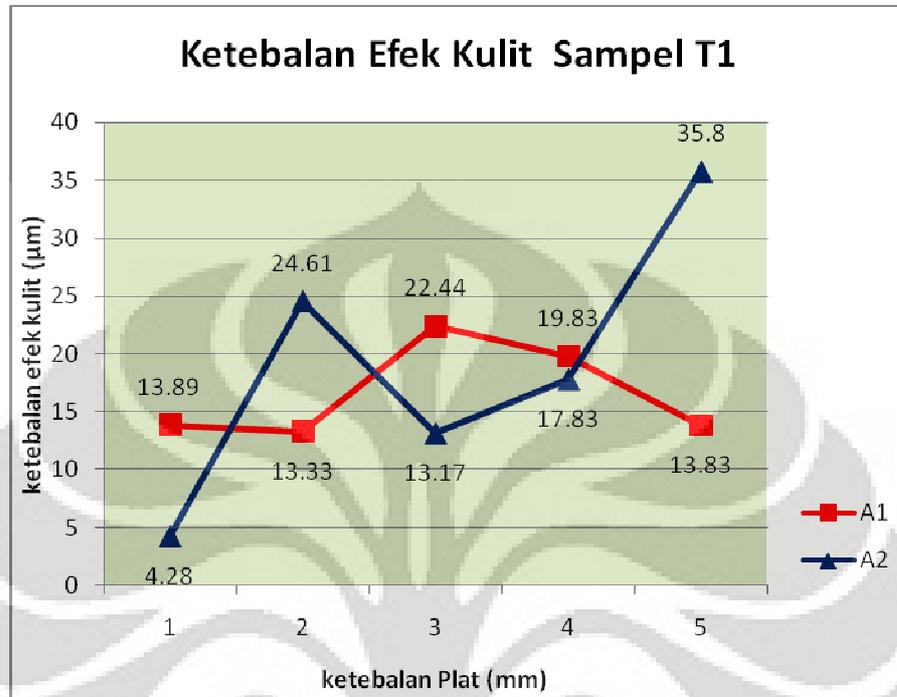


Gambar 4.9. Grafik perbandingan diameter nodul

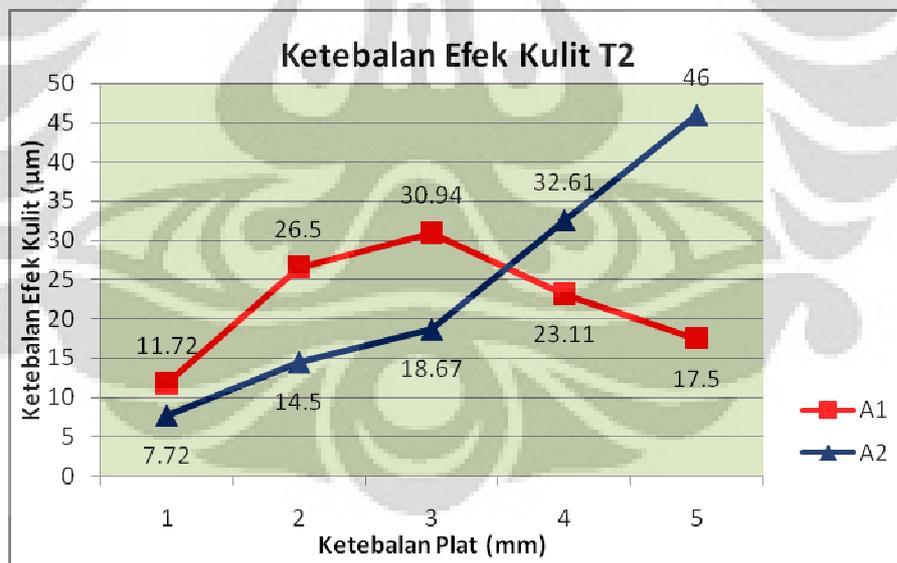
Pada Gambar 4.9 di atas, diameter rata-rata nodul baik Model T1 maupun T2 mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan ketebalan. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar ketebalan maka jumlah nodul yang terbentuk semakin besar pula. Hal ini terjadi karena ketika ketebalan meningkat maka jumlah nodul yang terbentuk menurun sehingga rasio volume ruang untuk grafit berpresipitasi membentuk bulatan semakin lebih besar.

Selain itu, sampel T1 memiliki nilai diameter rata-rata yang lebih besar dari pada T2. Hal 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 akan memperlambat juga proses pengisian dan kecepatan pendinginannya.

4.4.4 Efek Kulit



Gambar 4.10. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T1

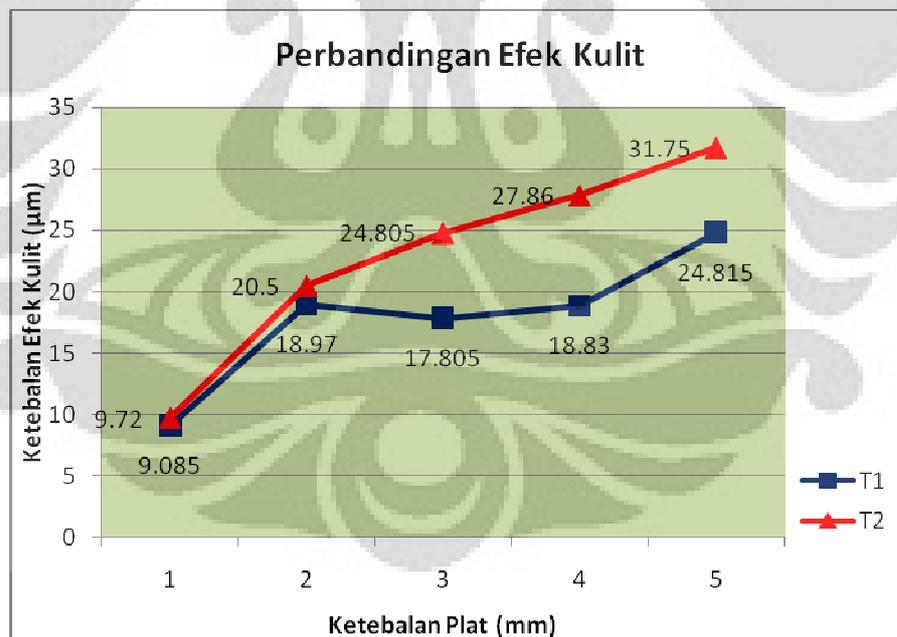


Gambar 4.11. Grafik ketebalan efek kulit pada sampel T2

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*^[27] atau *skin effect*.^[33] Ketebalan lapisan

maksimum yang pernah dicapai adalah 200 μm atau 0,2 mm.^[27] Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik dan biasanya dihilangkan dengan proses permesinan.^[34]

Berdasarkan Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 di atas, setiap ketebalan sampel memiliki ketebalan efek kulit yang berbeda-beda. Pada sampel yang terletak di pinggir baik T1A1 dan T2A1, sampel 3 mm memiliki ketebalan kulit yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel 1 dan 5 mm. Sedangkan pada sampel yang terletak di bagian tengah baik T1A2 dan T2A2, ketebalan berturut-turut dari besar ke kecil terletak pada sampel 5 mm, 3 mm dan 1 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 akibat oksidasi Mg. Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.



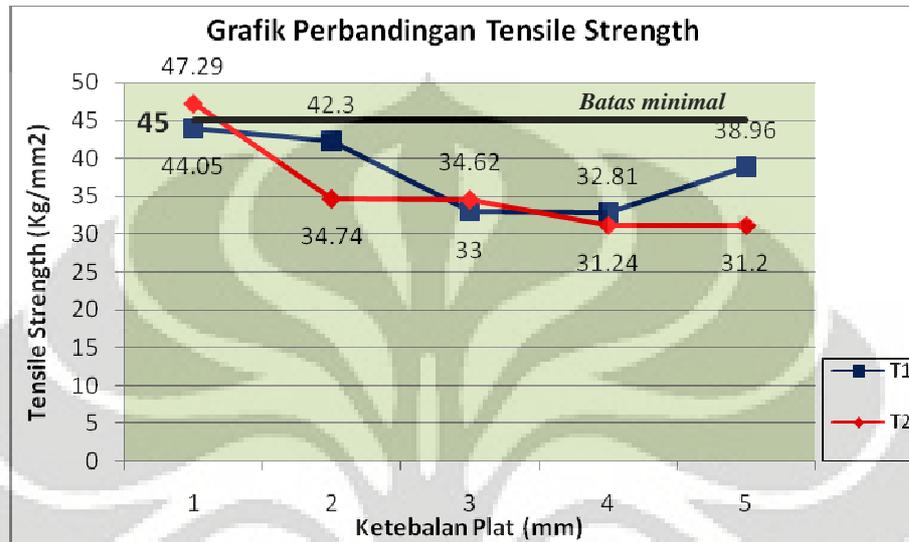
Gambar 4.12. Grafik perbandingan ketebalan efek kulit T1 dan T2

Pada Gambar 4.12 di atas, grafik T1 dan T2 hampir membentuk pola yang sama. Ketebalan efek kulit meningkat seiring dengan peningkatan ketebalan yaitu pada plat 1, 3, dan 5 mm. Model T2 menghasilkan ketebalan efek kulit yang lebih

besar dari pada Model T1. Hal ini diakibatkan oleh perbedaan proses pembekuan dimana sampel T2 lebih cepat membeku dari pada T1.

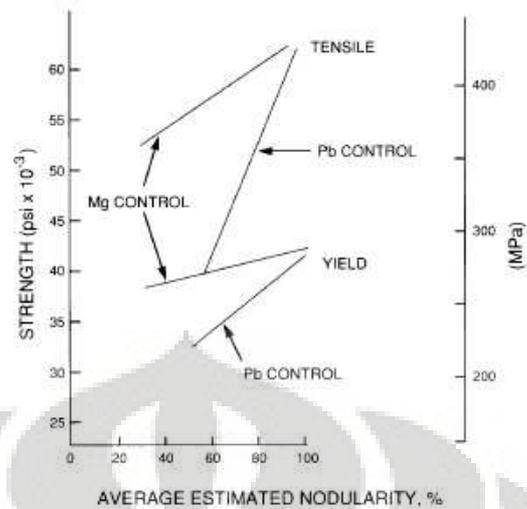
4.5 Uji Mekanik

4.5.1 Uji Tarik



Gambar 4.13. Grafik Perbandingan nilai *tensile strength*

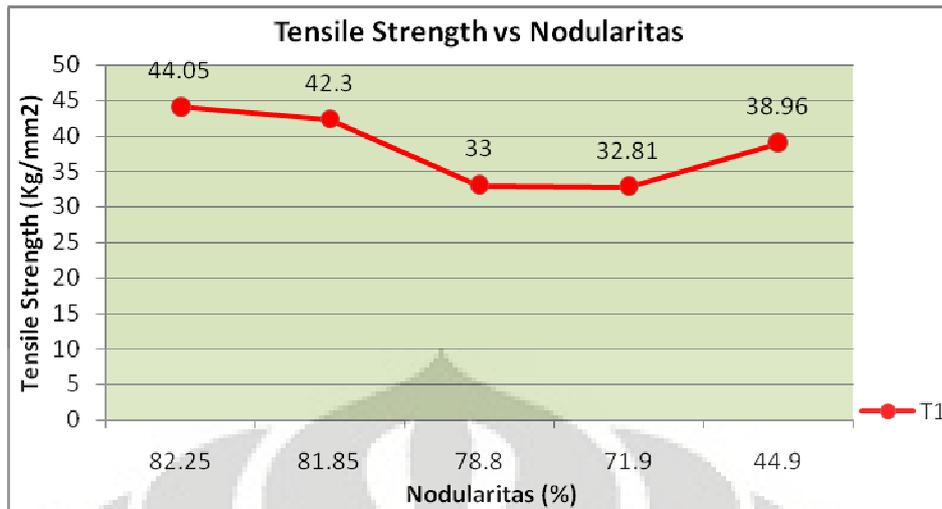
Berdasarkan grafik perbandingan nilai *tensile strength* diatas, kekuatan tarik menurun seiring dengan peningkatan ketebalan sampel, Gambar 4.13. Hal ini terjadi karena dengan ketebalan yang semakin berkurang menghasilkan tingkat kebulatan yang lebih tinggi (grafik perbandingan nodularitas), jumlah nodul yang dihasilkan semakin besar, dan bentuk butir yang lebih halus, sehingga kekuatan tarik meningkat.



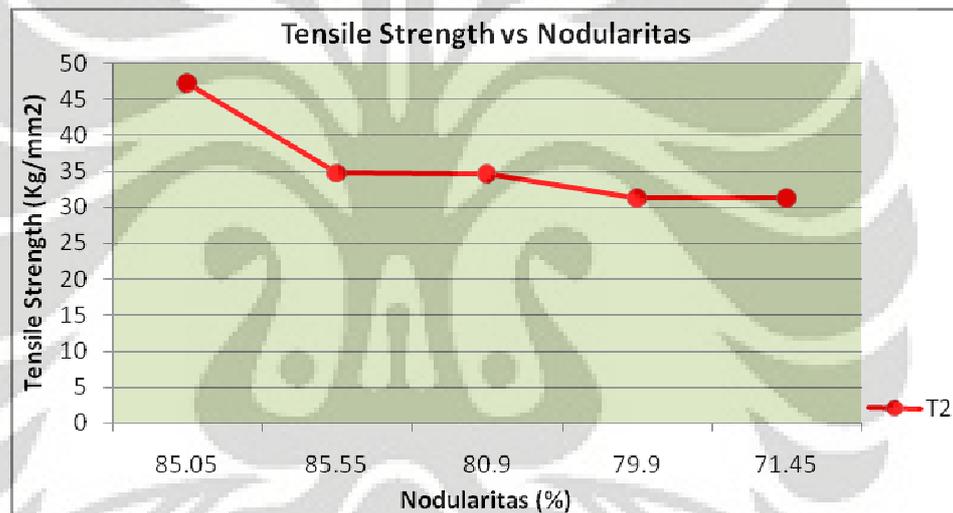
Gambar 4.14. Pengaruh nodularitas pada yield dan tensile strength yang dikontrol Mg dan Pb pada besi nodular feritik.^[2]

Pada Gambar 4.14 di atas, menunjukkan hubungan antara kekuatan dengan nodularitas yang telah diubah nilainya melalui kontrol Mg dan Pb. Hal ini menunjukkan bahwa ketika nodularitas berkurang maka kekuatan yang dihasilkan juga berkurang.^[2] Penambahan unsur Mg sebagai nodulan menghasilkan tingkat nodularitas yang tinggi.

Baik T1 maupun T2 menunjukkan gejala yang sama, namun ada sedikit penyimpangan yaitu pada T1-5 dan T2-5. Pada sampel T1, peningkatan nilai tarik dari sampel 4 mm ke 5 mm cukup besar dari pada T2. 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 tarikannya. Hal ini ditunjukkan masih adanya efek kulit di daerah patahan sampel yang telah dilakukan uji tarik.

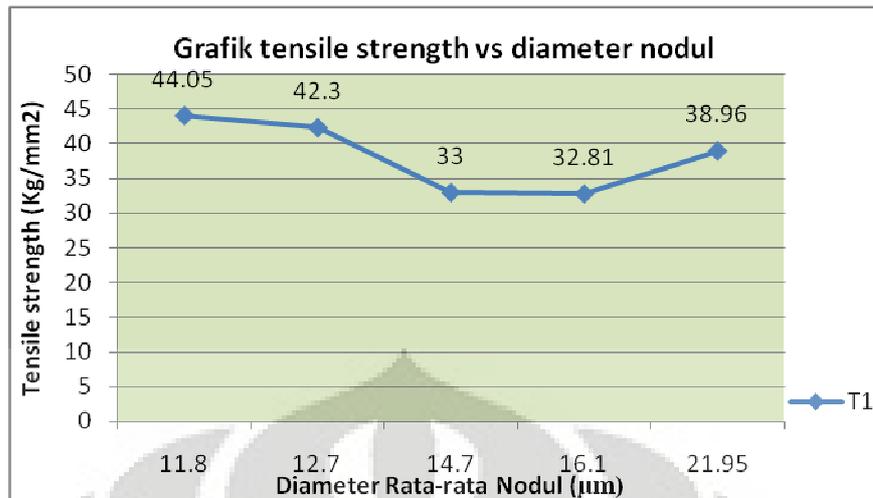


Gambar 4.15. Grafik *tensile strength* vs nodularitas T1

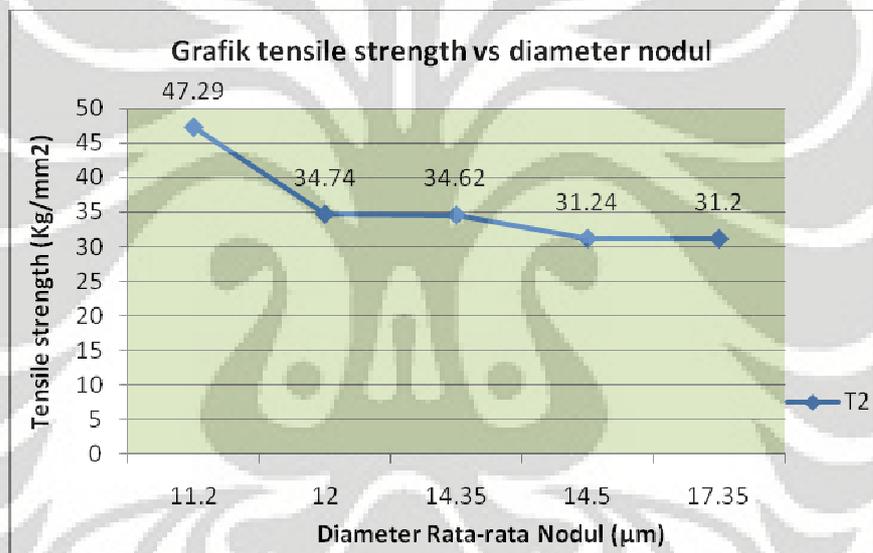


Gambar 4.16. Grafik *tensile strength* vs nodularitas T2

Berdasarkan Gambar 4.15 dan 4.16 di atas, peningkatan nodularitas dari grafit menyebabkan peningkatan pada kekuatan tarik yang dihasilkan. Pengaruh yang sangat kuat dari nodularitas terhadap kekuatan tarik karena pengaruh peningkatan konsentrasi tegangan yang berhubungan dengan partikel grafik non nodular. Ketika struktur grafit menjadi lebih buruk, beberapa dimensi partikel grafit meningkat. Partikel yang lebih besar menghasilkan peningkatan intensitas tegangan di sekitar partikel sehingga menurunkan tegangan kritis untuk terjadi keretakan.



Gambar 4.17. Grafik *tensile strength* vs diameter nodul T1

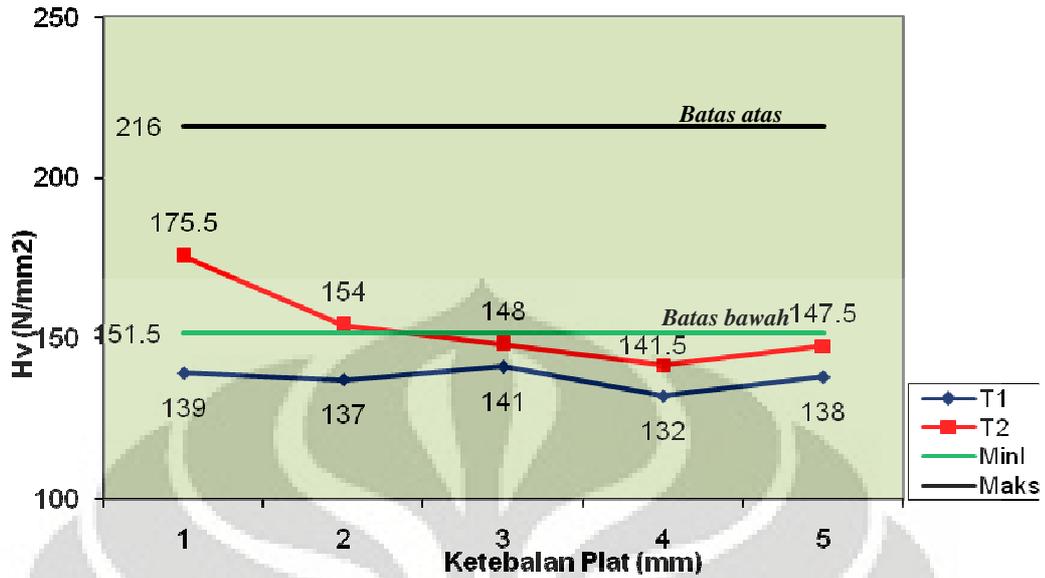


Gambar 4.18. Grafik *tensile strength* vs diameter nodul T2

Berdasarkan Gambar 4.17 dan 4.18 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.

4.5.2 Uji Kekerasan

Grafik Nilai Kekerasan Vickers



Gambar 4.19. Grafik nilai kekerasan

Berdasarkan Gambar 4.19 di atas, nilai kekerasan yang dihasilkan sebagian besar berada di bawah batas minimal. Namun ada 2 nilai kekerasan dari T2 yang mencapai nilai kekerasan standar yaitu pada T2-1 dan T2-2. 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 indenter 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. Selain itu, kebanyakan daerah penjejakan berada pada bagian tengah sehingga sangat sedikit daerah karbida yang terkena penjejakan.

Selain itu, nilai kekerasan T2 lebih besar dari pada T1. Hal ini disebabkan oleh proses pendinginan pada T2 yang lebih cepat dikarenakan proses pengisian yang lebih cepat dari pada T1. Proses pengisian yang lebih cepat menyebabkan solidifikasi yang lebih cepat pula. Hasil ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. Pada desain dengan penambahan saluran masuk menyebabkan peningkatan kecepatan proses pengisian yang diharapkan dan juga meningkatkan kecepatannya.

BAB 5 KESIMPULAN

1. Kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran.
2. Penggunaan desain cetakan vertikal *counter gravity* cukup baik untuk pengecoran dinding tipis.
3. Desain T2 menghasilkan hasil produk yang lebih baik.
4. Pada pengecoran dinding tipis, nilai CE harus dijaga $> 4,3\%$ untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida.
5. Aplikasi simulasi software berfungsi untuk melihat proses pengisian cetakan sehingga dapat memprediksi fenomena yang terjadi pada saat pengisian.
6. Model T2 memiliki waktu pengisian yang lebih singkat dari pada Model T1. Pada simulasi *software* waktu yang dibutuhkan untuk Model T1 sebesar 67,349 detik dan Model T2 sebesar 11,973 detik. Sedangkan pada data faktualnya, waktu yang dibutuhkan untuk Model T1 sebesar 66,28 detik dan Model T2 sebesar 25,79 detik.
7. Penurunan ketebalan pada pengecoran dinding tipis mulai dari 5 - 1 mm meningkatkan kecepatan pendinginan sehingga semakin mudah terbentuk karbida.
8. Nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul berpengaruh pada sifat mekanik yang dihasilkan.
9. Sebagian besar, nilai kekuatan tarik dari setiap sampel berada di bawah batas standar yaitu 45 kg/mm^2 .
10. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan peningkatan nilai nodularitas dan jumlah nodul.
11. Kekuatan tarik dipengaruhi oleh *skin effect* yang terbentuk pada lapisan permukaan.

DAFTAR REFERENSI

1. 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.
2. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (1990). *Ductile Iron Data for Design Engineers*. Montreal, Canada: Author.
3. 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.
4. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177).
5. Callister, William D., (2007). *Material Science and Engineering: An Introduction*. Department of Metallurgical Engineering: The University of Utah. USA.
6. ASM Handbook. (1988). *Casting: Volume 15*. Ohio: ASM International Metal Park.
7. Keough, J. R., dkk, *Carbide Austempered Ductile Iron*. Pada DIS Meeting. 2000, USA: DIS.
8. ASTM E-8M. (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
9. ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
10. Skaland, T., dkk, *Inoculation material improves graphite formation in ductile iron*. Modern Casting, 2001. 91(12): p. 43-45.
11. Javaid, A., dkk, *Mechanical properties in thin wall ductile iron casting*. Modern Casting, 2000. 90(6): p. 39-41.
12. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178).
13. Showman, R. E. and R. Aufderheide, *Getting to the core of thin-walled casting*. Modern Casting, 2004. 94(4): p. 32-34.
14. Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction, 2003. 03(109).
15. Choi, P., dkk, *Effect of Rare Earth Element on Microstructure Formation and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron Casting*. Material Science and Engineering A, Vol. 383, Pg. 323-333.
16. Labreque and Gagne, *Production and Properties on Thin Wall Ductile Iron Casting*. International journal of Cast Metal Research, Vol. 16, No. 1-3, Pg. 313-317.
17. <http://www.Foundry-Elkem.com>

18. Goodrich, G. M., *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. p. 97-30.
19. Dawson, J. V., *Carbides in As-cast Nodular (SG) Iron-Their Causes and Prevention*. British Cast Iron Research Association, 1976. BCIRA Report 1221: p. 153-158.
20. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Javaid, 1998).
21. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Loper, 1965).
22. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Evans, 1981).
23. 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.
24. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Loper, 1965).
25. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Rijikov, 1965).
26. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Karsay, 1965).
27. Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Henning, 1999).
28. 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).
29. Labreque, dkk, *Development of Carbide Free Thin Wall Ductile Iron Casting*, AFS Transaction, 2000. Vol. 108: p. 31-38.
30. Dogan, O.N., dkk, *Verification of Thin Wall Ductile Iron Test methodology*. ASTM Journal, Vol. 30, Iss 1, Pg.
31. Martinez, R. A., dkk, *Application of ADI in high strength thin wall automotive parts*. Pada 2002 World Conference on ADI, 2002.
32. Mourad, M. M., dkk, *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron*. Pada 68th World Foundry Congress, 2008, Chennai, India: WFO.
33. Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*, 2005, AFS.
34. Mullins, J. D., *Nodule Count – Why and How!*, Ductile Iron News, 2003. Iss 2: p. 1-2. www.ductile.org
35. 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*).

36. JIS G5502 1989
37. Thomson, R. C., dkk, *Modeling Microstructure Evaluation and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron*. Journal Material Science and Technology, 2000. 16: Pg.1412 – 1419.
38. www.steelinc.com.au
39. Metal Bulletin Monthly, vol.345, Pg.90, September 1999
40. 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.
41. Kovacs, B. V., *On The Terminology and Structure of Austempered Ductile Iron*. Pada 98th Casting Congress. 1994, Hamilton, Ontario, Canada : American Foundrymen's Society Inc.
42. www.energymanagertraining.com
43. Atlas of casting defect: Institute of British Foundrymen.
(<http://www.industrialmetalcasting.com/gating-system-analysis>)
44. Laboratorium PT Geteka Founindo



LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil pengecoran sebelum pemotongan

Model T1

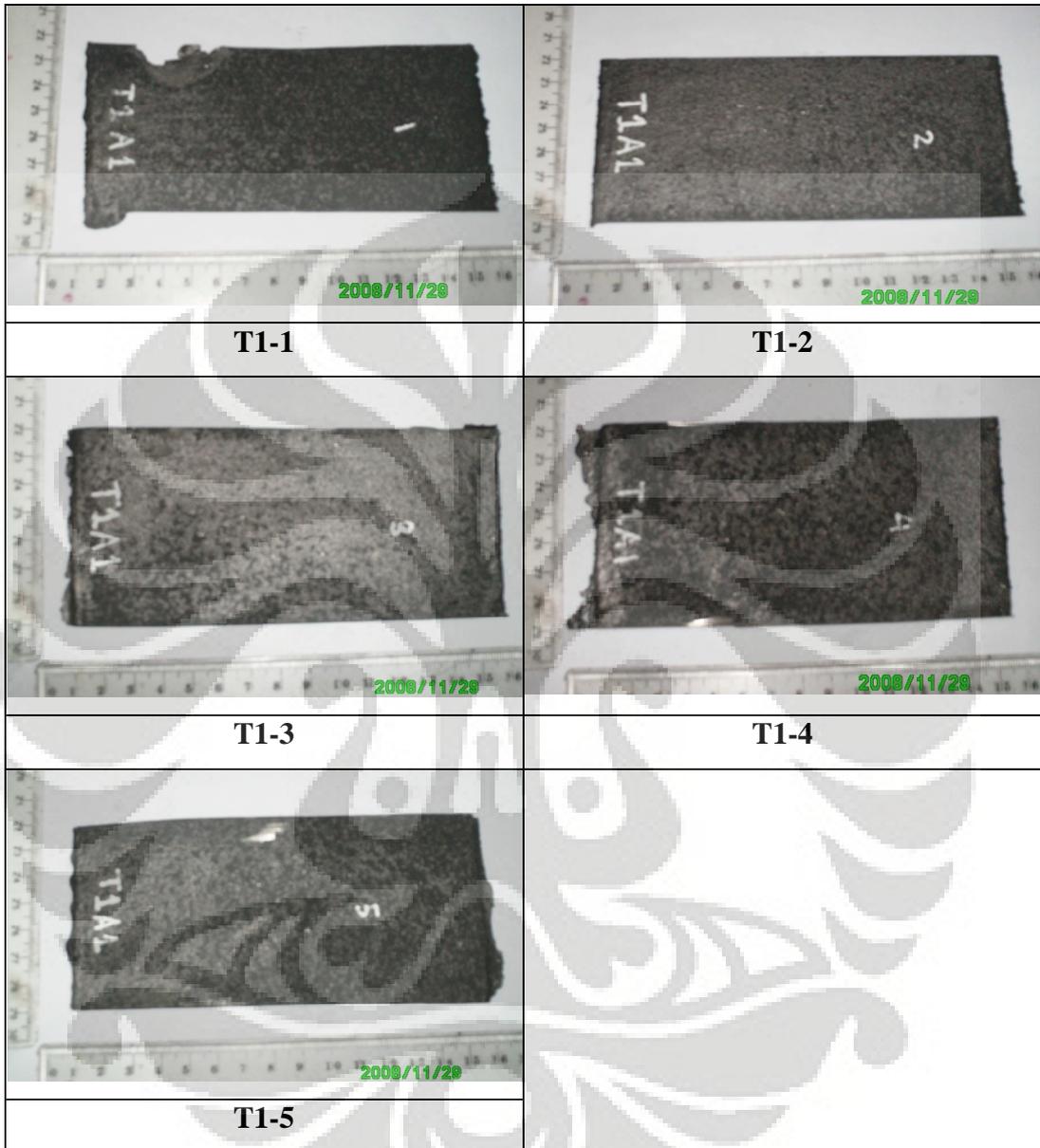


Model T2

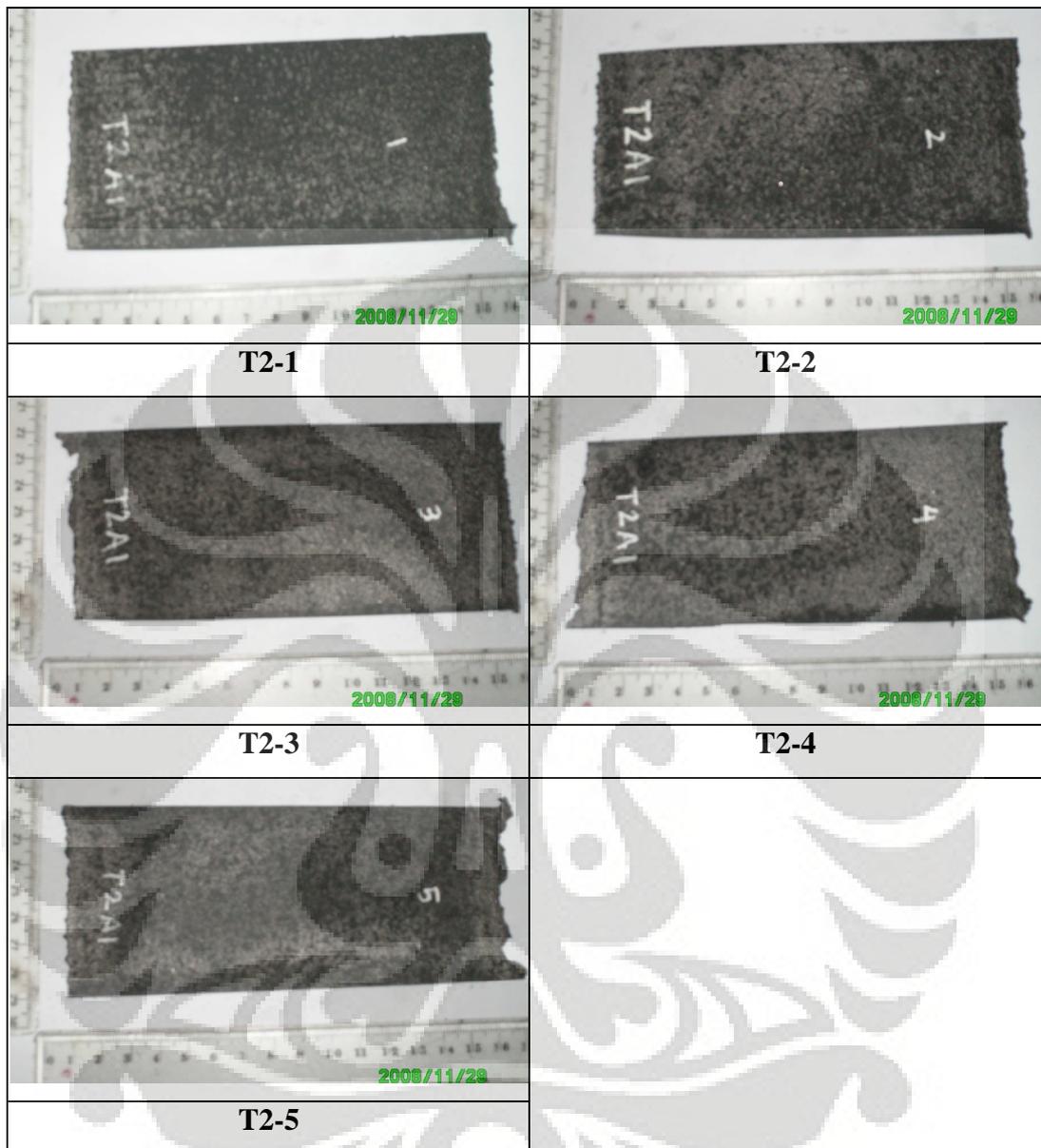


Lampiran 2
Sampel hasil pengecoran

Model T1

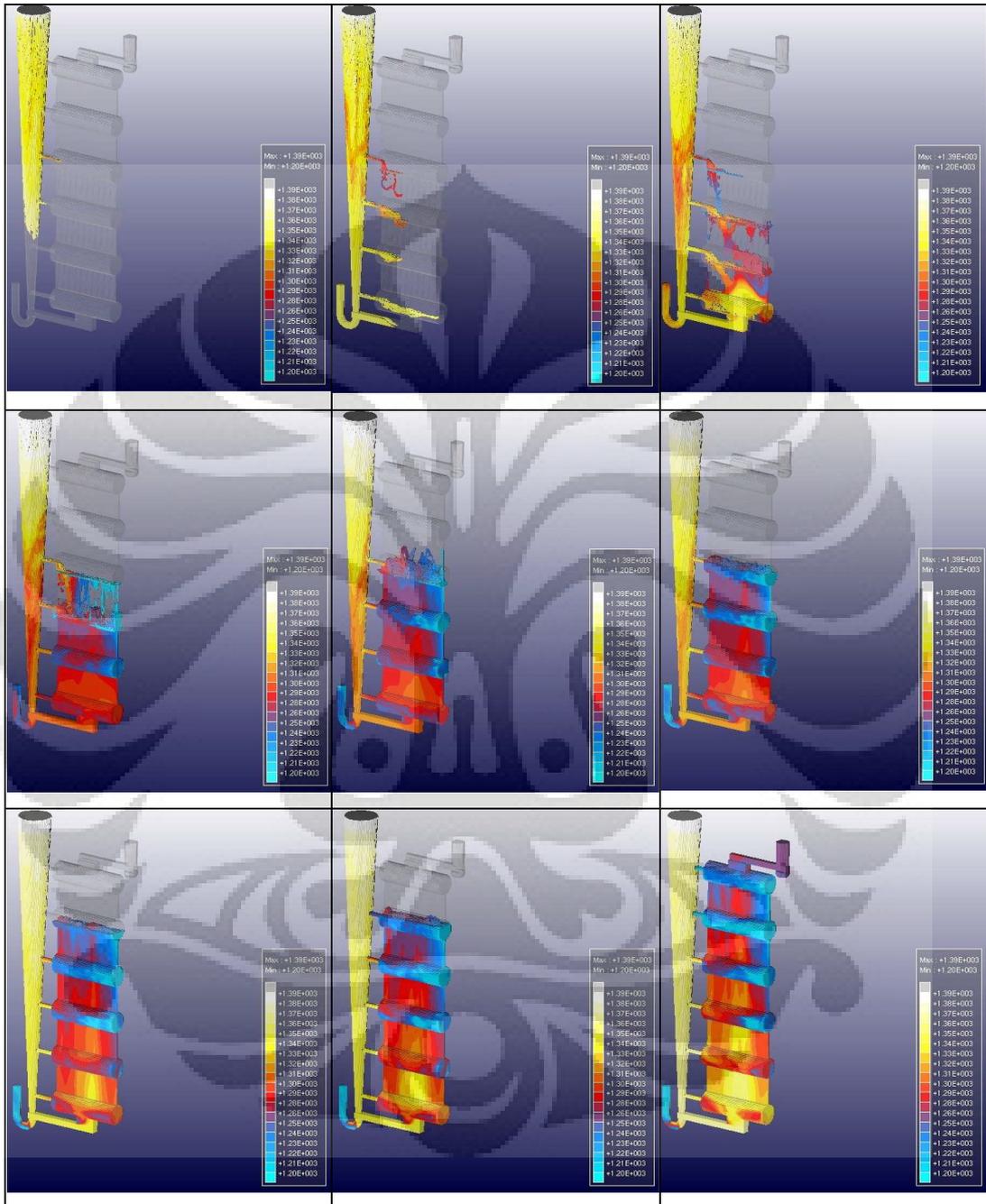


Model T2

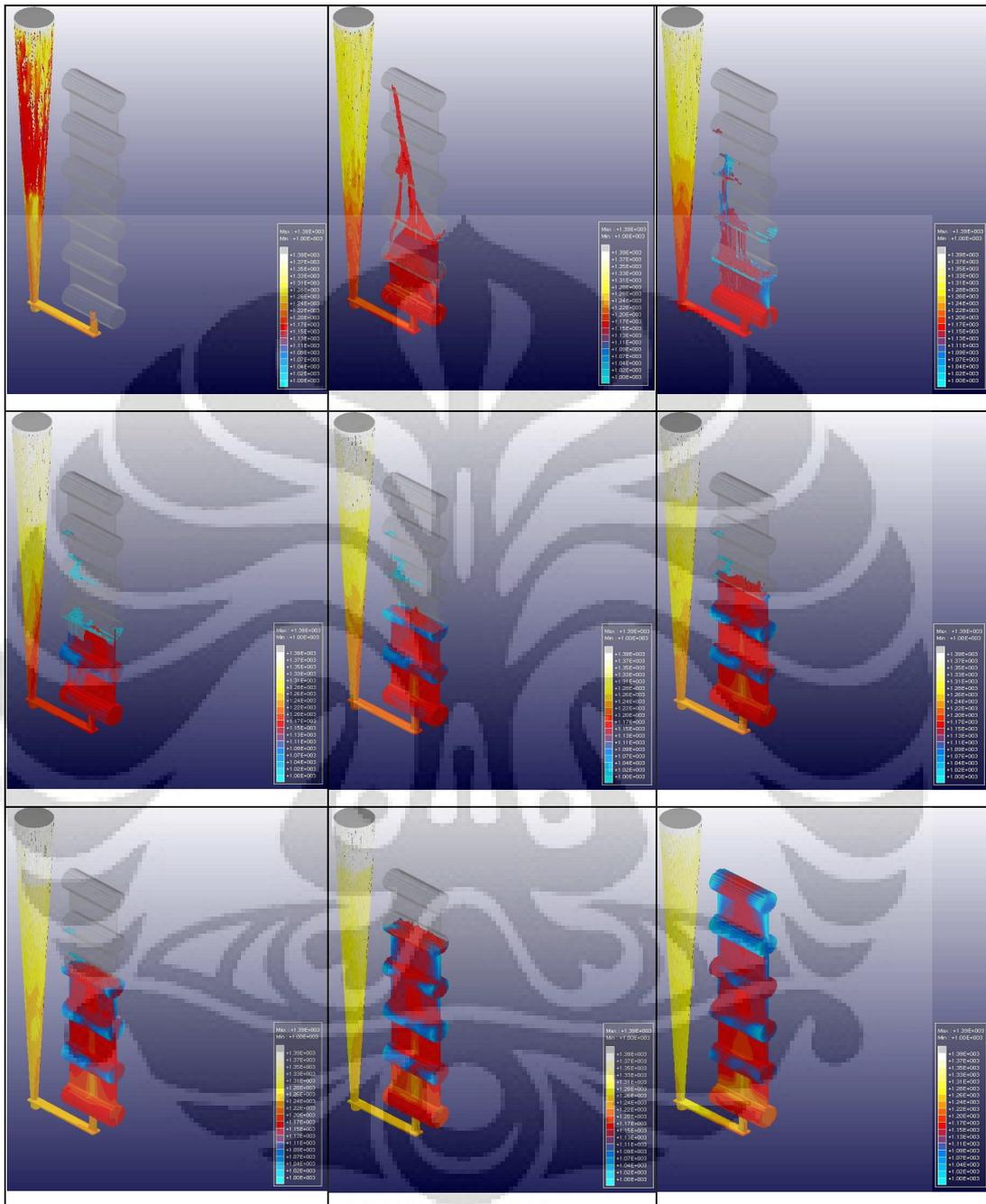


Lampiran 3
Simulasi Z-Cast

Model T2



Model T1



Lampiran 4
Data Uji Kekerasan

Model T1

Tebal	Horisontal				Vertikal				Hv Rata2		
		A	B	Dp	Hv		A	B		Dp	Hv
1 mm	1	55	52.5	53.75	192.5192	1	62	66	64	135.791	144.1613
	2	62.75	63.25	63	140.1361	2	65.75	65	65.375	130.139	
	3	59.5	60.25	59.875	155.1458						
	4	63	64.5	63.75	136.8581						
	5	63.5	64.5	64	135.791						
	6	64	63.5	63.75	136.8581						
	7	63.25	65.5	64.375	134.2136						
2 mm	1	63.5	62.5	63	140.1361	1	59.5	60.25	59.875	155.1458	140.0495
	2	62.5	63	62.75	141.2549	2	65	64.5	64.75	132.6635	
	3	61.5	64	62.75	141.2549	3	64	65	64.5	133.6939	
	4	64.5	64.25	64.375	134.2136						
	5	62.5	64.25	63.375	138.4825						
	6	66.5	64.75	65.625	129.1494						
	7	58.75	61.25	60	154.5						
3 mm	1	53	53.5	53.25	196.1516	1	63	62.5	62.75	141.2549	140.8985
	2	61.5	63.5	62.5	142.3872	2	66	66	66	127.686	
	3	65.5	66.5	66	127.686	3	64.5	64.75	64.625	133.1772	
	4	63	64	63.5	137.9379	4	64.75	66.5	65.625	129.1494	
	5	62.5	63.5	63	140.1361						
	6	61.5	64.75	63.125	139.5816						
	7	64	64.5	64.25	134.7363						
4 mm	1	60.25	61.5	60.875	150.0904	1	63	67.25	65.125	131.1401	132.5192
	2	62.5	63.5	63	140.1361	2	69	66.5	67.75	121.1748	
	3	64.25	67.5	65.875	128.171	3	63.5	66.25	64.875	132.1528	
	4	65.5	64.75	65.125	131.1401	4	64.5	66.5	65.5	129.6428	
	5	65	68	66.5	125.7731	5	64	62.5	63.25	139.0304	
	6	64.5	66	65.25	130.6381						
	7	65	65.25	65.125	131.1401						
5 mm	1	61	60	60.5	151.9568	1	62	63	62.5	142.3872	136.7474
	2	64	64	64	135.791	2	63	65.5	64.25	134.7363	
	3	62	62.75	62.375	142.9585	3	63	62	62.5	142.3872	
	4	62.5	61.5	62	144.693	4	61.75	67	64.375	134.2136	
	5	64	66	65	131.645	5	64.5	69	66.75	124.8327	
	6	62	64.5	63.25	139.0304	6	66.5	67.75	67.125	123.4418	
	7	65.75	65.25	65.5	129.6428						

-Lanjutan-

Model T2

Tebal	Horizontal				Vertikal				Hv Rata2		
		A	B	Dp	Hv		A	B		Dp	Hv
1 mm	1	65	64.5	64.75	132.6635	1	63.5	62	62.75	141.2549	156.3896
	2	66.5	65	65.75	128.6588	2	61.5	61.5	61.5	147.0553	
	3	64.5	66.5	65.5	129.6428						
	4	58	57.5	57.75	166.7735						
	5	56.5	59.5	58	165.3389						
	6	55	52	53.5	194.3226						
	7	52	53	52.5	201.7959						
2 mm	1	65	64.75	64.875	132.1528	1	60.5	66.5	63.5	137.9379	141.5501
	2	63.5	63.5	63.5	137.9379	2	63.5	64.25	63.875	136.323	
	3	62	66	64	135.791	3	59.25	60.5	59.875	155.1458	
	4	65	65.5	65.25	130.6381						
	5	64.5	63.75	64.125	135.2621						
	6	58	57.75	57.875	166.0539						
	7	61	61.5	61.25	148.2582						
3 mm	1	63.5	63	63.25	139.0304	1	64	65.5	64.75	132.6635	132.2531
	2	67	65	66	127.686	2	65	74.5	69.75	114.3254	
	3	63.5	64.5	64	135.791	3	62.5	66.75	64.625	133.1772	
	4	65.5	66.5	66	127.686	4	64.25	66	65.125	131.1401	
	5	63	64.5	63.75	136.8581						
	6	64	62.5	63.25	139.0304						
	7	63.75	63.5	63.625	137.3964						
4 mm	1	63	64.5	63.75	136.8581	1	63.5	68.5	66	127.686	139.489
	2	64	64.5	64.25	134.7363	2	63	62.5	62.75	141.2549	
	3	62	61.5	61.75	145.867	3	59.75	61	60.375	152.5867	
	4	65.25	65	65.125	131.1401	4	63.5	62.5	63	140.1361	
	5	63.25	62.75	63	140.1361	5	65.5	64.75	65.125	131.1401	
	6	62	61.25	61.625	146.4594						
	7	61	62.5	61.75	145.867						
5 mm	1	64.5	64.5	64.5	133.6939	1	57.25	62.5	59.875	155.1458	133.3868
	2	64	63.75	63.875	136.323	2	68.25	69	68.625	118.1045	
	3	67.5	66	66.75	124.8327	3	61.25	66	63.625	137.3964	
	4	63	63.25	63.125	139.5816	4	64	67	65.5	129.6428	
	5	65	65	65	131.645	5	67	66.5	66.75	124.8327	
	6	63.5	63.75	63.625	137.3964	6	65	66	65.5	129.6428	
	7	63.25	64.75	64	135.791						

Lampiran 5
Struktur mikro dari Iwate University

TIA2-2

MAKROHUBUNGAN/PMGI

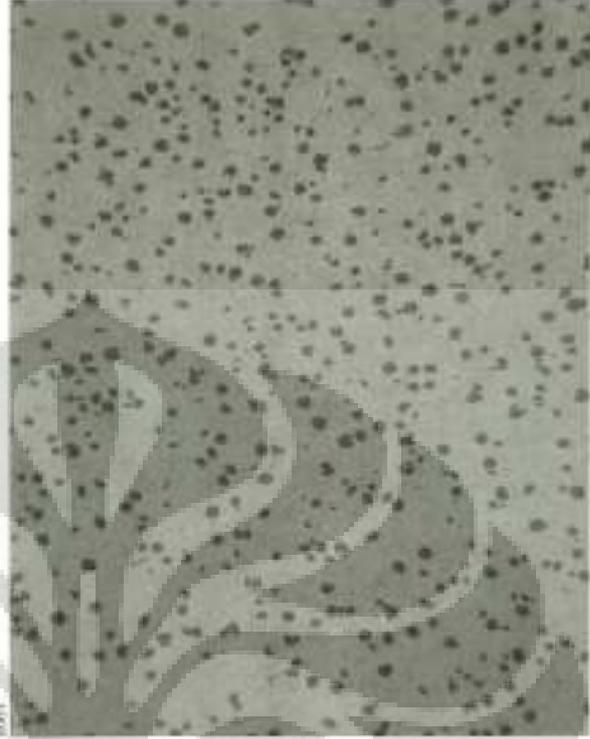
2000 800000
5.0 10.0

65-7648 1.2-10u

黒鉛炭素化率 91.1 [%]
黒鉛粒数 1633 個/mm²
黒鉛平均粒径 10.3 μm
黒鉛面積率 11.0 [%]
測定用ノズル径φ0.1mm 2.5mm

1-10 V-V3 測定条件 既述
測定電圧 10.0kV
測定電流 5.00 nA
測定時間 10.00min
測定位置 10.0mm
測定温度 23.0℃

SEM



200 μm

TIA2-1

MAKROHUBUNGAN/PMGI

2000 800000
5.0 10.0

65-7648 1.1-10u

黒鉛炭素化率 85.6 [%]
黒鉛粒数 1510 個/mm²
黒鉛平均粒径 10.0 μm
黒鉛面積率 9.66 [%]
測定用ノズル径φ0.1mm 2.5mm

1-10 V-V3 測定条件 既述
測定電圧 10.0kV
測定電流 5.00 nA
測定時間 10.00min
測定位置 10.0mm
測定温度 23.0℃

SEM



200 μm

TIA2-3

SEM/EDS (10.0kV, X1000)

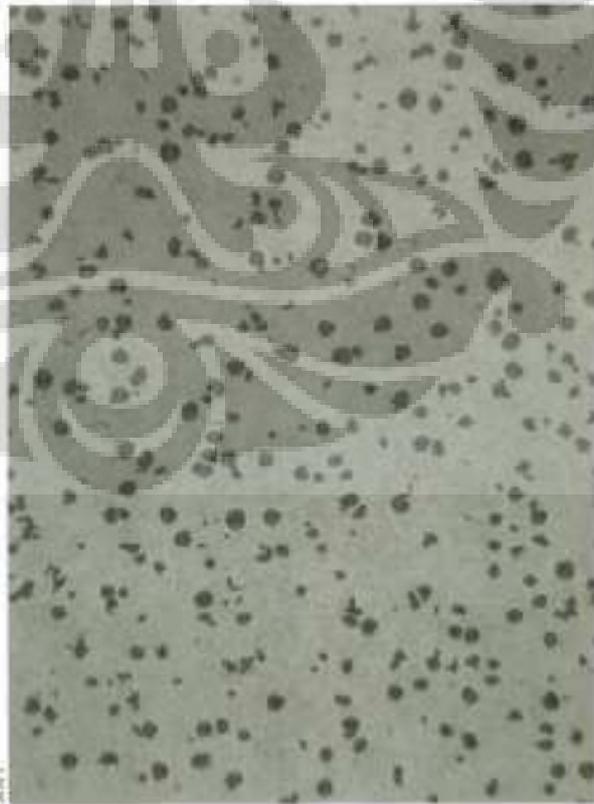
20/04/25
15.8

サンプラ名 1.3-100

黒鉛充填率 74.5(%)
黒鉛粒数 1005.7個/mm²
黒鉛平均粒径 11.8(μm)
黒鉛面積率 1.2(%)
SEM/EDS (10.0kV, X1000)

合計/平均値 1005.7/1005.7
黒鉛率 74.5/74.5
黒鉛平均粒径 11.8/11.8
黒鉛面積率 1.2/1.2

SEM



200 μm

TIA2-4

SEM/EDS (10.0kV, X1000)

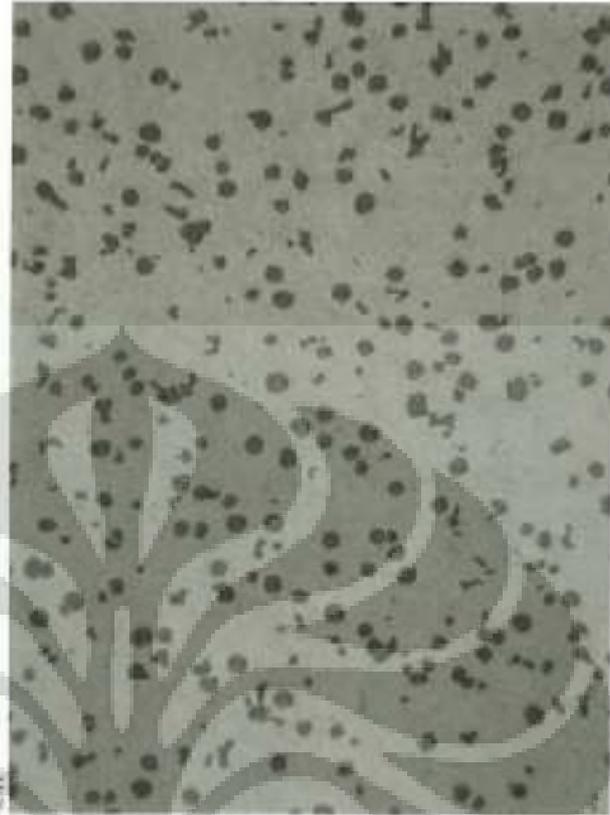
20/04/25
15.8

サンプラ名 1.3-100

黒鉛充填率 70.8(%)
黒鉛粒数 970.6個/mm²
黒鉛平均粒径 15.4(μm)
黒鉛面積率 12.5(%)
SEM/EDS (10.0kV, X1000)

合計/平均値 970.6/970.6
黒鉛率 70.8/70.8
黒鉛平均粒径 15.4/15.4
黒鉛面積率 12.5/12.5

SEM



200 μm

- Lanjutkan -

TIA2-5

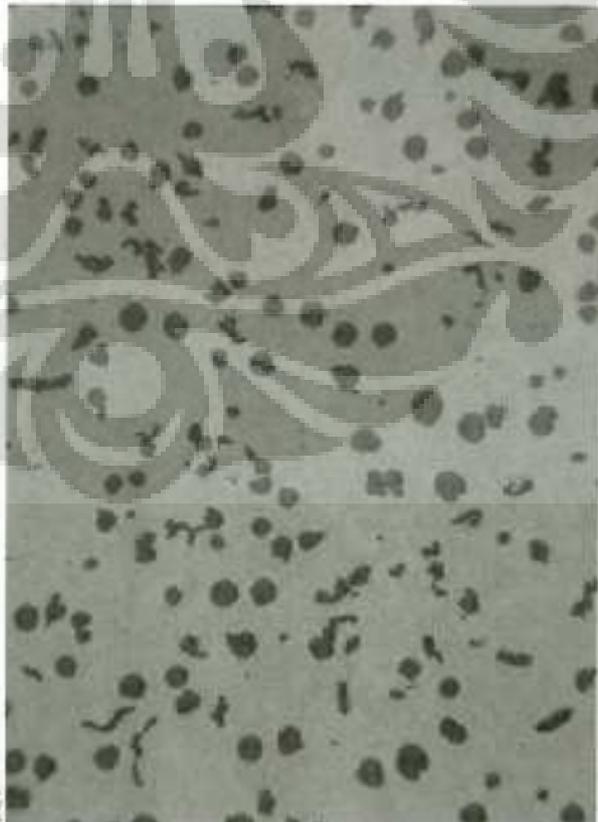
製品型番: 1.1-100x

製造元: 株式会社

成分: 64.4 [%]
 成分: 67.4 [%]
 成分: 21.3 [%]
 成分: 11.0 [%]

成分: 64.4 [%]

成分: 64.4 [%]
 成分: 67.4 [%]
 成分: 21.3 [%]
 成分: 11.0 [%]



TIA1-1

製品型番: 1.1-100x

製造元: 株式会社

成分: 79.1 [%]
 成分: 1057.6 [%]
 成分: 13.0 [%]
 成分: 10.5 [%]

成分: 79.1 [%]

成分: 79.1 [%]
 成分: 1057.6 [%]
 成分: 13.0 [%]
 成分: 10.5 [%]



TIA1-2

測定方法 (単位)

サンプル名: 120002

重量含水率 4.24 [%]
 重量塩素 89.34 [mg/g (ppm)]
 高純率均粒係数 1.44 [% (μ)]
 重量樹脂率 10.53 [%]
 測定方法: 重量法 (乾燥 2 時間)

元素分析 (単位) 結果
 C (%) 60.58 60.58 (理論値) 60.58
 H (%) 1.18 1.18 (理論値) 1.18
 N (%) 38.24 38.24 (理論値) 38.24

単位

サンプル名: 120002

測定方法 (単位)

TIA1-3

測定方法 (単位)

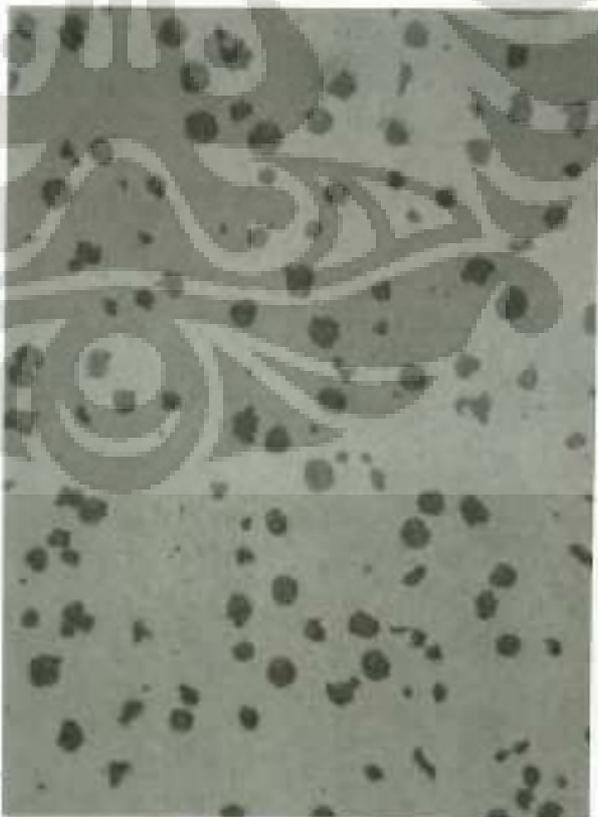
サンプル名: 120002

測定方法 (単位)

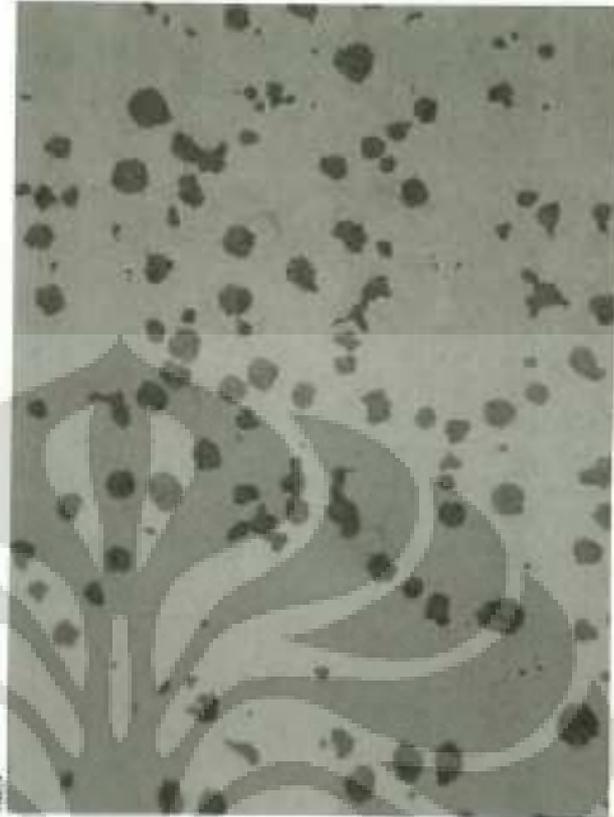
重量含水率 30.8 [%]
 重量塩素 81.63 [mg/g (ppm)]
 高純率均粒係数 15.06 [% (μ)]
 重量樹脂率 11.85 [%]
 測定方法: 重量法 (乾燥 2 時間)

元素分析 (単位) 結果
 C (%) 57.08 57.08 (理論値) 57.08
 H (%) 1.18 1.18 (理論値) 1.18
 N (%) 41.74 41.74 (理論値) 41.74

単位



200 μm



200 μm

TIA1-4

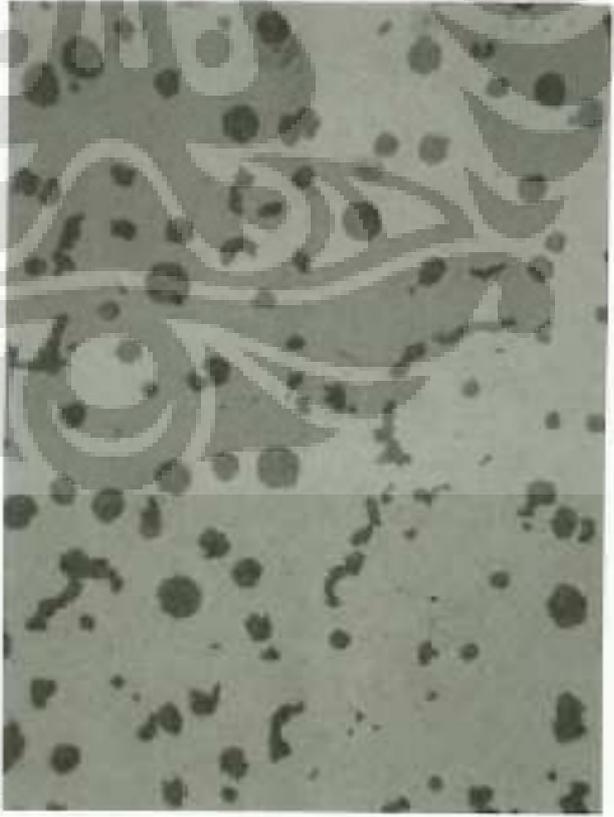
PROSES PEMBUATAN (1/4000)

PROSES
NO. 1-4

KEBUTUHAN KIMIAWA
 73.0%
 84.1%
 15.8%
 13.0%

1-10 1-11 1-12 1-13
 100 100 100 100
 100 100 100 100
 100 100 100 100

SUBI



300 μm

TIA1-5

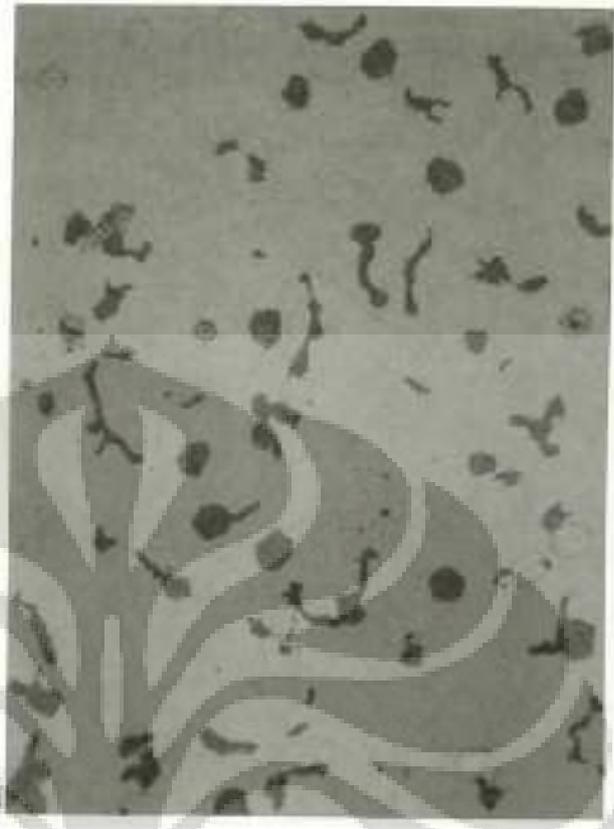
PROSES PEMBUATAN (1/1000)

PROSES
NO. 1-5

KEBUTUHAN KIMIAWA
 25.4%
 66.8%
 22.8%
 9.2%

1-10 1-11 1-12 1-13
 100 100 100 100
 100 100 100 100
 100 100 100 100

SUBI



300 μm

T2A2-1

Magnesium oksida (MgO)

サンプル名 T2A2-1

黒鉛添加比率 84.65 [%]
 黒鉛添加量 1934.4 [mg / mm²]
 黒鉛平均粒径 9.9 [μm]
 黒鉛面積率 30.65 [%]
 黒鉛 L / 非黒鉛 L の体積比 = 0.30

1 - IV V-VI 測定条件 圧力 0.1 MPa
 測定時間 5分
 測定温度 室温

測定機名 83 81 81.5 1991.7 3.0

測定機

測定機名 83 81 81.5 1991.7 3.0

黒鉛添加比率 83.0 [%]
 黒鉛添加量 1544.4 [mg / mm²]
 黒鉛平均粒径 11.3 [μm]
 黒鉛面積率 31.3 [%]
 黒鉛 L / 非黒鉛 L の体積比 = 0.30

1 - IV V-VI 測定条件 圧力 0.1 MPa
 測定時間 5分
 測定温度 室温

測定機名 83 81 81.5 1991.7 3.0

測定機

T2A2-2

Magnesium oksida (MgO)

サンプル名 T2A2-2

黒鉛添加比率 84.65 [%]
 黒鉛添加量 1934.4 [mg / mm²]
 黒鉛平均粒径 9.9 [μm]
 黒鉛面積率 30.65 [%]
 黒鉛 L / 非黒鉛 L の体積比 = 0.30

1 - IV V-VI 測定条件 圧力 0.1 MPa
 測定時間 5分
 測定温度 室温

測定機名 83 81 81.5 1991.7 3.0

測定機



200 μm

200 μm

T2A2-3

黒鉛添加量 0.05% (平均値)

サンプル名 T2-100a

黒鉛球状化率 74.5%]
 黒鉛粒数 990.3個/mm²]
 黒鉛平均粒径 14.5μm]
 黒鉛面積率 11.5%]
 測定条件/測定時間/測定径 2.00mm

項目	単位	測定値	標準偏差
ΔE / mm ² mm	mm	74.5	0.5
黒鉛	個	990.3	11.2
黒鉛	μm	14.5	1.2

単位

黒鉛添加量 0.05% (平均値)

T2A2-4

黒鉛添加量 0.05% (平均値)

サンプル名 T2-100b

黒鉛球状化率 78.3%]
 黒鉛粒数 780.3個/mm²]
 黒鉛平均粒径 18.0μm]
 黒鉛面積率 11.1%]
 測定条件/測定時間/測定径 2.00mm

項目	単位	測定値	標準偏差
ΔE / mm ² mm	mm	78.3	0.5
黒鉛	個	780.3	10.0
黒鉛	μm	18.0	1.1

単位



-Lanjutan-

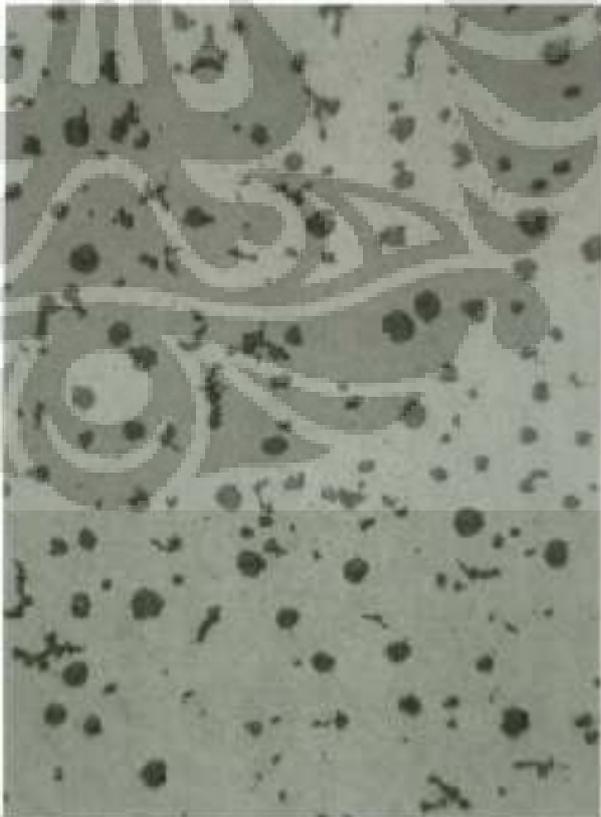
T2A2-5

Mikroskop Biner (40x10)

200x100 2.5 100x

Massa partikel kimia: 66,71%]
 Massa partikel: 677,11 [mm²]
 Massa partikel: 18,51 [mm²]
 Massa partikel: 9,01 [mm²]
 Massa partikel: 2,01 [mm²]

1 ~ 10 V ~ 10 100x 100x 100x 100x
 100x 100x 100x 100x 100x 100x
 100x 100x 100x 100x 100x 100x



100x100

T2A1-1

Mikroskop Biner (40x10)

200x100 2.5 100x

Massa partikel kimia: 85,01%]
 Massa partikel: 1197,01 [mm²]
 Massa partikel: 12,51 [mm²]
 Massa partikel: 10,01 [mm²]

1 ~ 10 V ~ 10 100x 100x 100x 100x
 100x 100x 100x 100x 100x 100x
 100x 100x 100x 100x 100x 100x



100x100



- Lanjutan -

T2A1-4

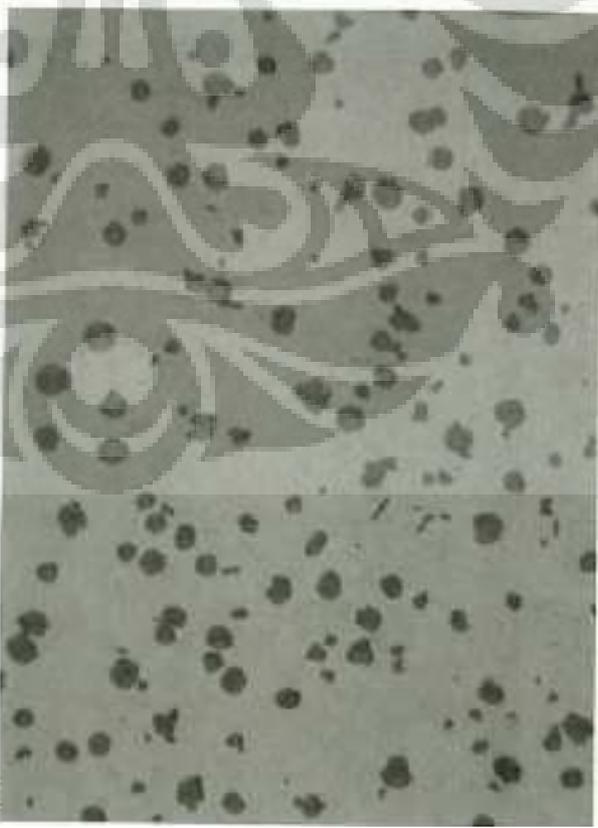
材料名: 鋼板 (S235JR)

寸法: 2.4 x 200 x 0.8

炭素含有率 81.5 %
 錳含有率 100.0 %
 平均粒径 13.0 μm
 平均面積率 11.5 %
 測定条件: 2.0 x 10 x 10

1-2V-VIS 測定条件: 0.25 μm
 0.1 μm 200 100 50 25 12.5 6.25 3.125 1.5625 0.78125 0.390625

0.25 μm



200 μm

T2A1-5

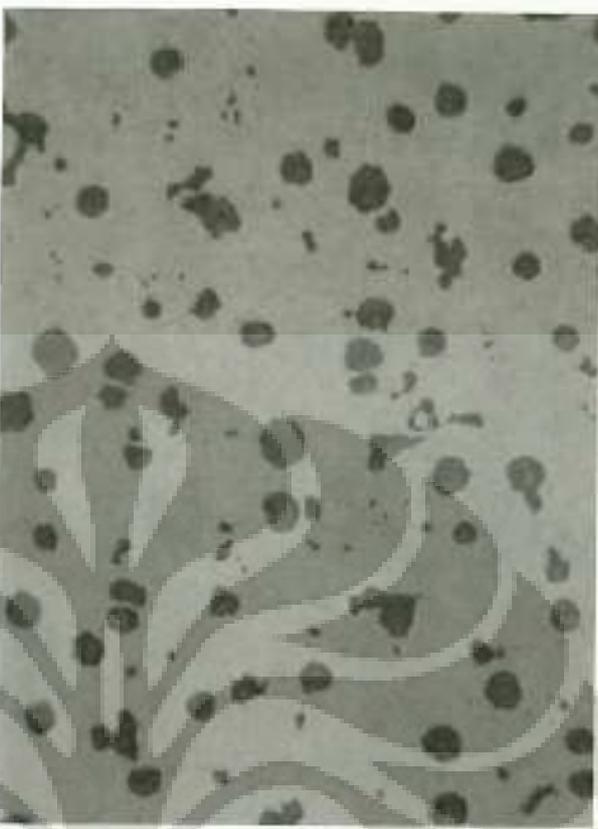
材料名: 鋼板 (S235JR)

寸法: 2.4 x 200 x 0.8

炭素含有率 76.0 %
 錳含有率 792.0 %
 平均粒径 16.0 μm
 平均面積率 12.0 %
 測定条件: 2.0 x 10 x 10

1-2V-VIS 測定条件: 0.25 μm
 0.1 μm 200 100 50 25 12.5 6.25 3.125 1.5625 0.78125 0.390625

0.25 μm



200 μm

Lampiran 6

Data dan Perhitungan Efek Kulit

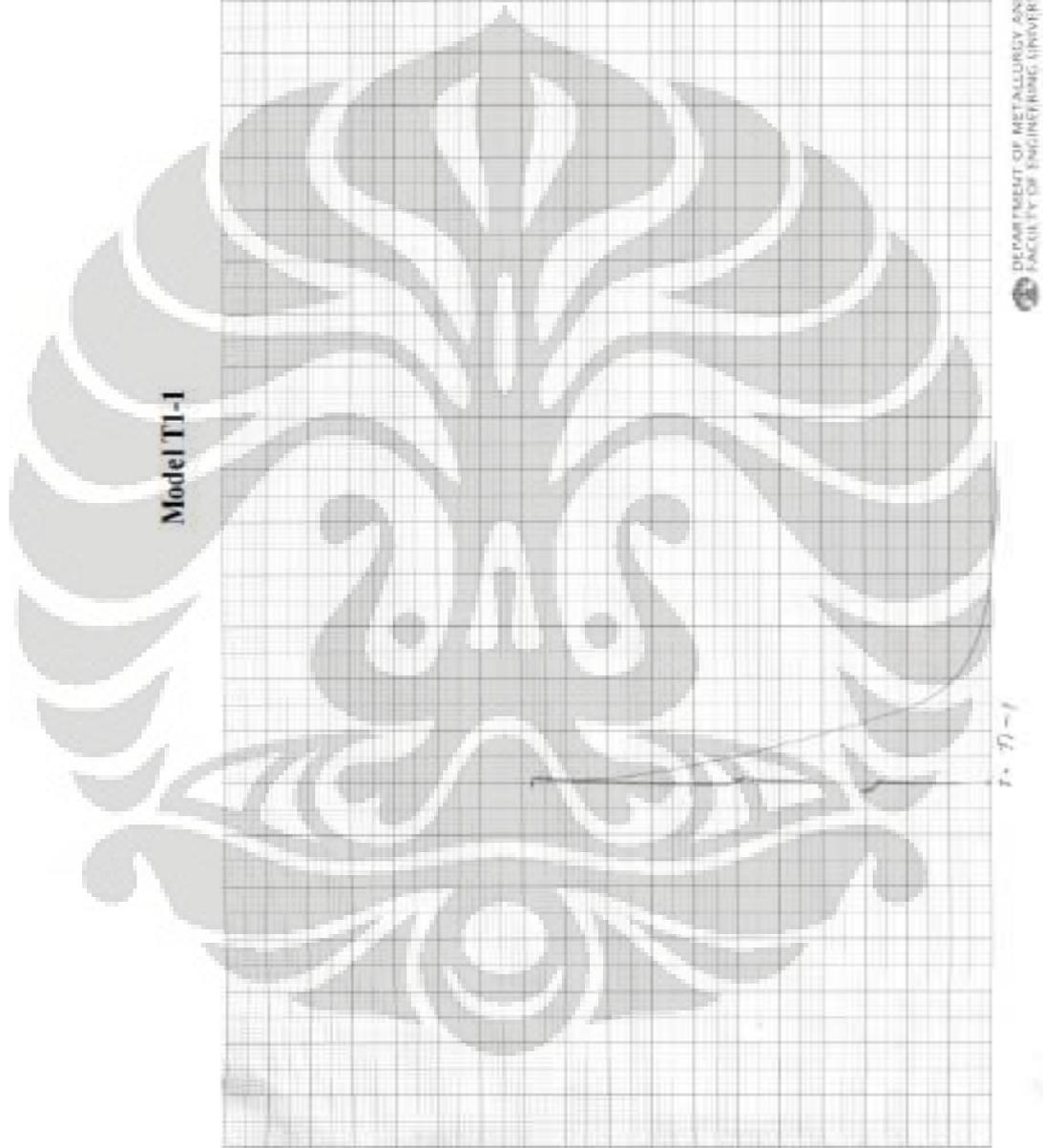
Model T1

n ke	T1A1				T1A1				T1A1						
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	17	12.5	23	17.5	12	7	25.5	12	16	20.5					
2	16	14.5	23.5	21	12	3.5	25	12	16	17					
3	11	12.5	22	16.5	16	4.5	28	12	18.5	22.5					
4	13	14.5	20.5	19	15	4.5	26	12	19	23					
5	15	15.5	19	22	13.5	3	26.5	12	15.5	17.5					
6	12	19	23.5	21	13	3	21	14	20	18					
7	14	12	22.5	19.5	14.5	4.5	20	15	20	21					
8	11.5	10.5	24.5	20.5	15	4.5	24	16	18	23.5					
9	15.5	9	23.5	21.5	13.5	4	25.5	13.5	17.5	16					
Σ	125	120	202	178.5	124.5	38.5	221.5	118.5	160.5	179					
Mean	13.88889	13.33333	22.44444	19.83333	13.83333	4.27778	24.61111	13.16667	17.83333	35.8					
Median	14	12.5	23	20.5	13.5	4.5	25.5	12	18	20.5					
Min	11	9	19	16.5	12	3	20	12	15.5	16					
Max	17	19	24.5	22	16	7	28	16	20	23.5					
Stdv	2.132747	2.947457	1.721998	1.870829	1.391941	1.20185	2.583333	1.541104	1.713914	2.825971					

Model T2

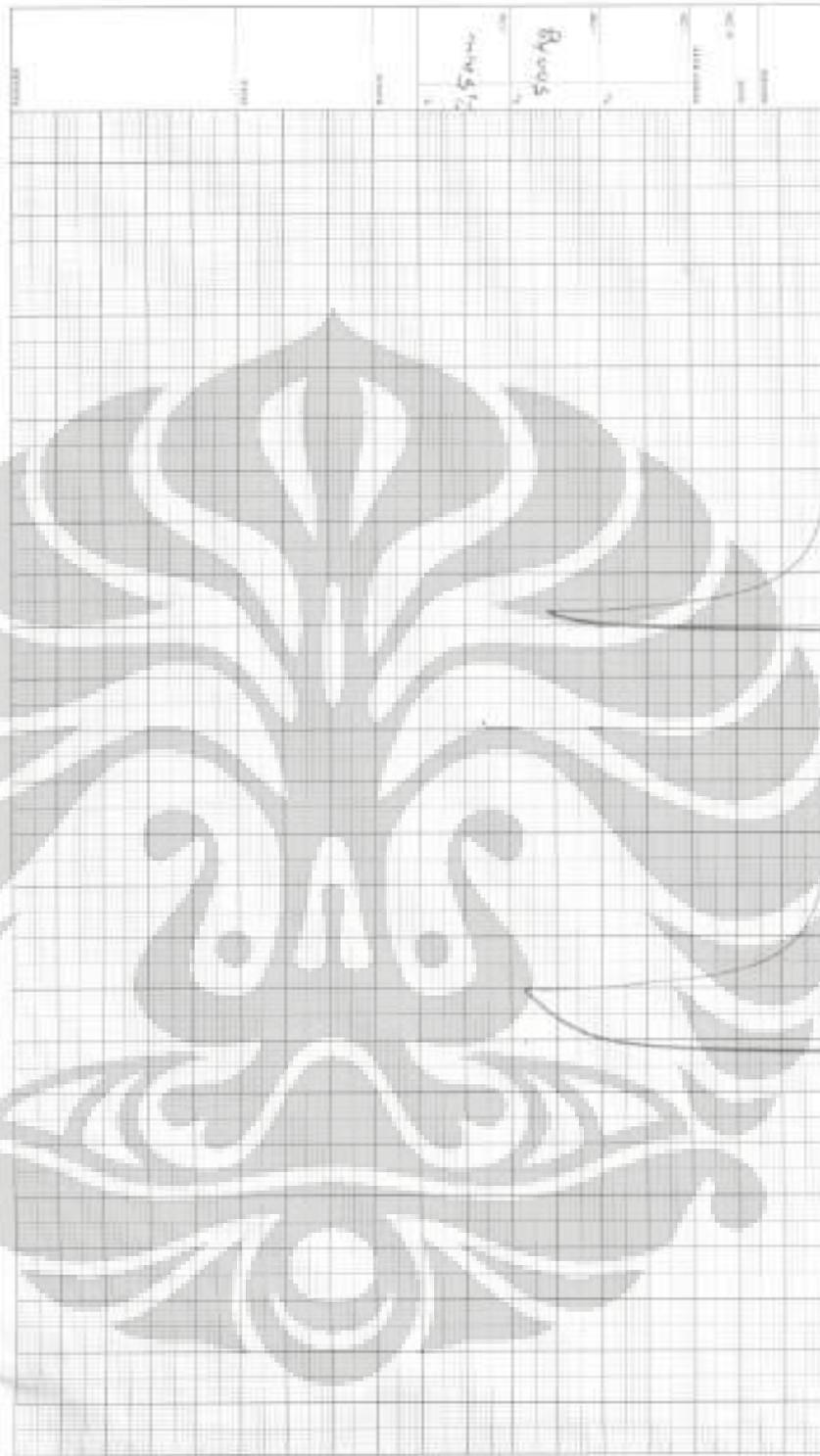
n ke	T2A1					T2A2				
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
1	11	20.5	29	21.5	20.5	4	9	20	32	17
2	11.5	20	30	21.5	17	8	10	21	32	25
3	6	26	29.5	24.5	14	7	11	18	29	25
4	11.5	26	31	23	20.5	8.5	19	20	35	25
5	13	31	31	22	15.5	8	17	17	38.5	28
6	13	34	32	24.5	19.5	9.5	20	20	30	26.5
7	11	32	32.5	24.5	14	10.5	20	18	35	27.5
8	12	27.5	32.5	22.5	18.5	7.5	12.5	17	35	29
9	16.5	21.5	31	24	18	6.5	12	17	27	27
Σ	105.5	238.5	278.5	208	157.5	69.5	130.5	168	293.5	230
Mean	11.72222	26.5	30.94444	23.11111	17.5	7.722222	14.5	18.66667	32.61111	46
Median	11.5	26	31	23	18	8	12.5	18	32	26.5
Min	6	20	29	21.5	14	4	9	17	27	17
Max	16.5	34	32.5	24.5	20.5	10.5	20	21	38.5	29
Stdv	2.73988	5.141741	1.261062	1.293681	2.54951	1.855921	4.472136	1.581139	3.603625	3.512873

Lampiran 7
Data Grafik Uji Tarik



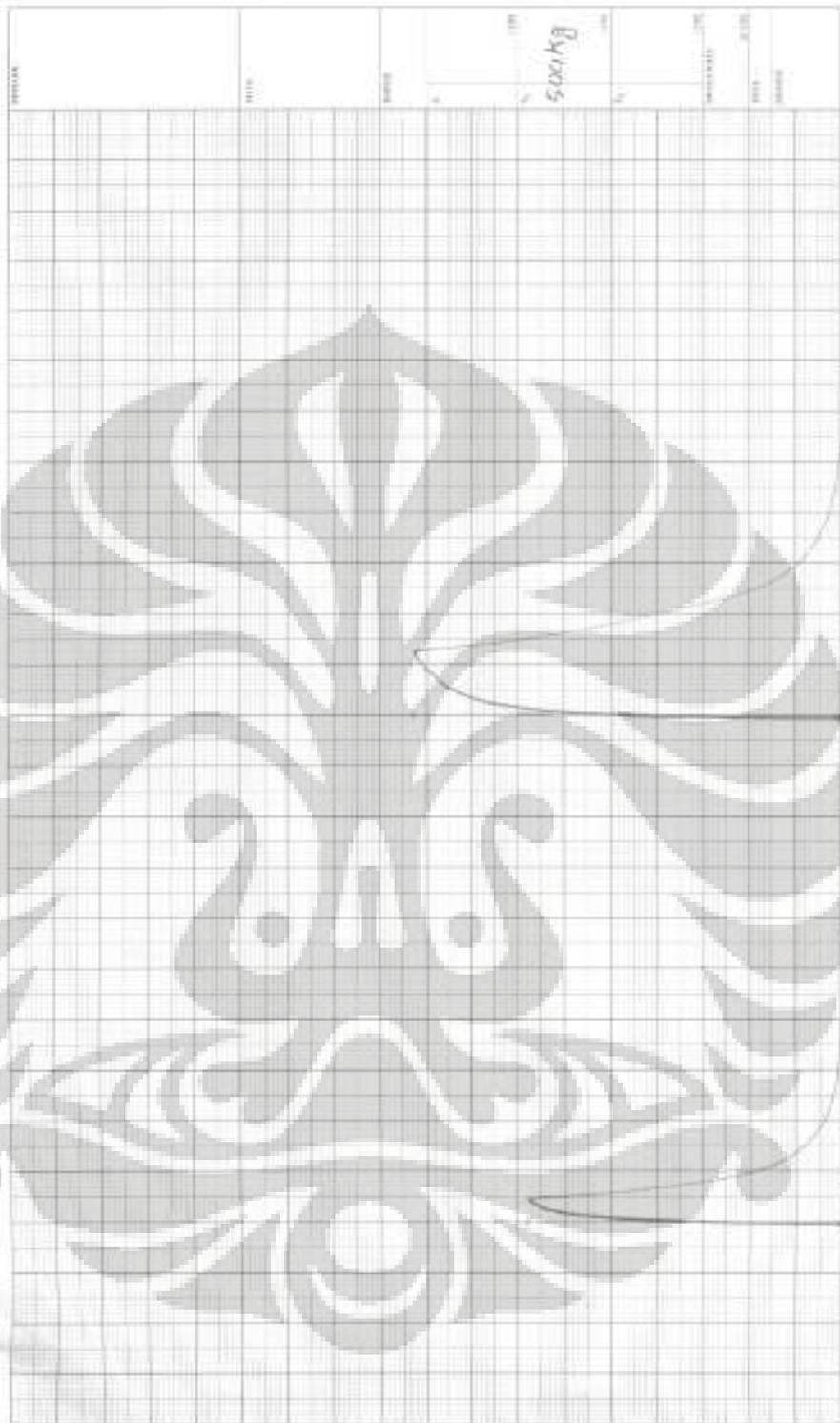
-Lanjutan-

Model T1-2 dan T1-3



- Lanjutan -

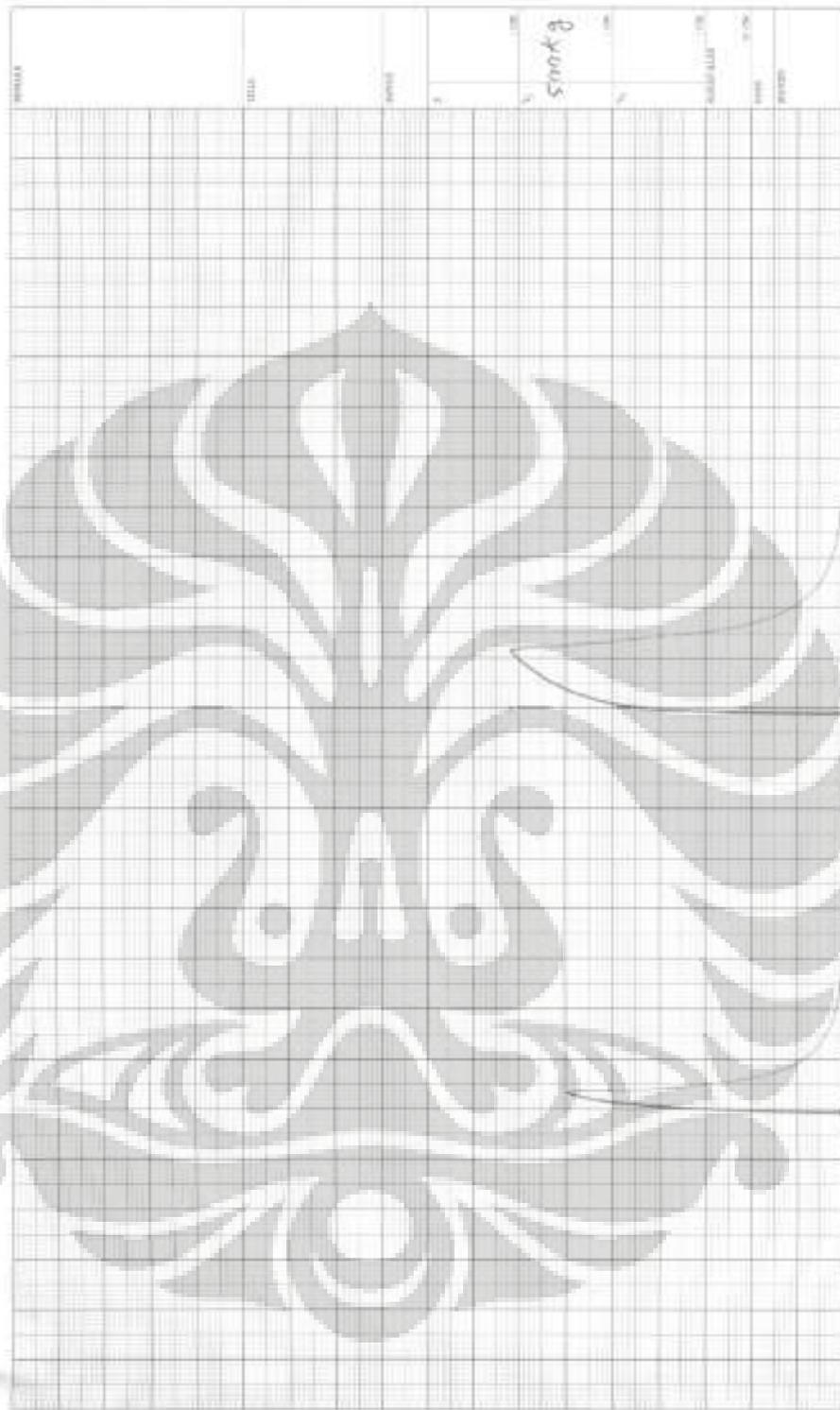
Model T1-4 dan T1-5



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

-Lanjutan-

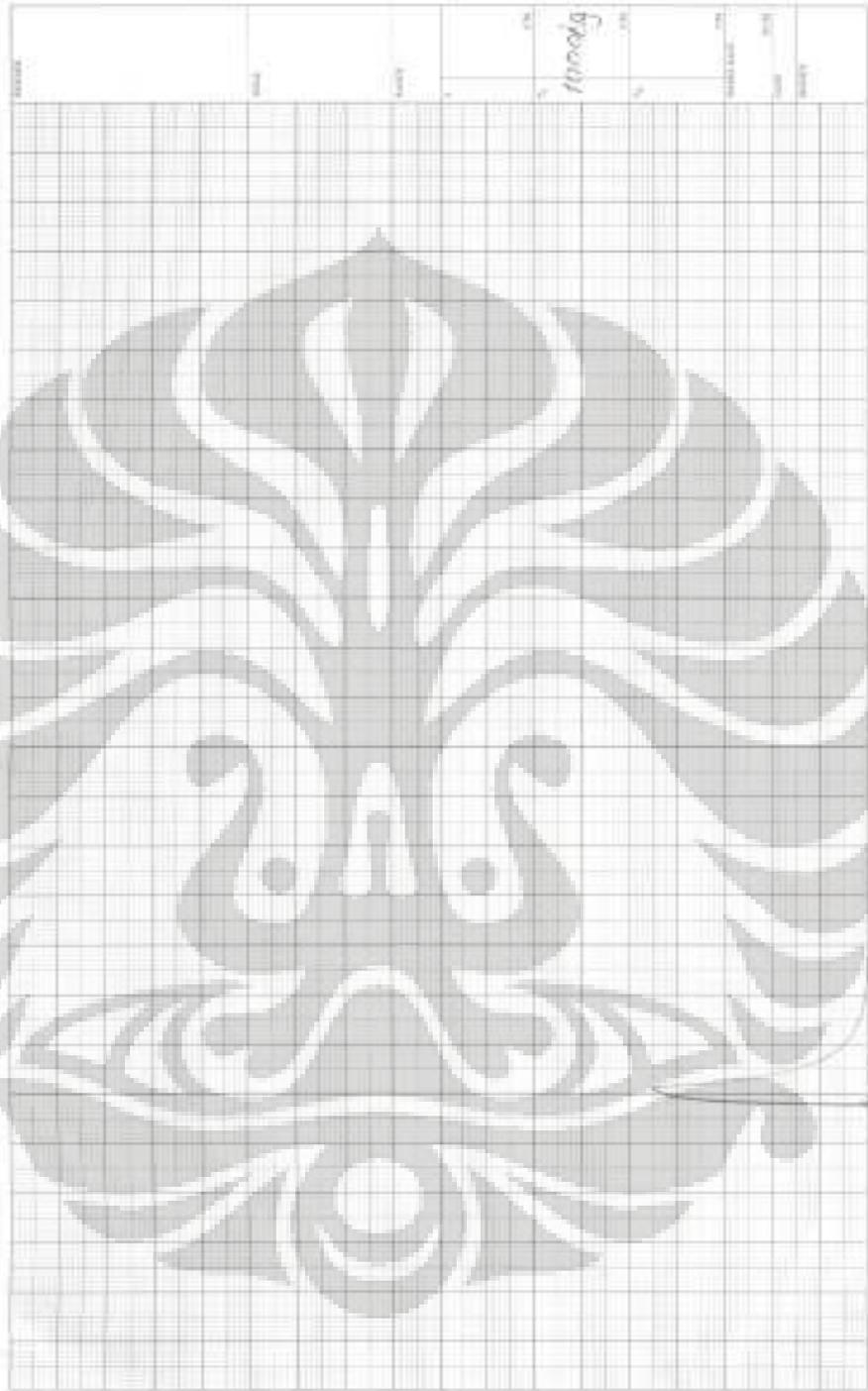
Model T2-1 dan T2-2



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

-Lanjutan-

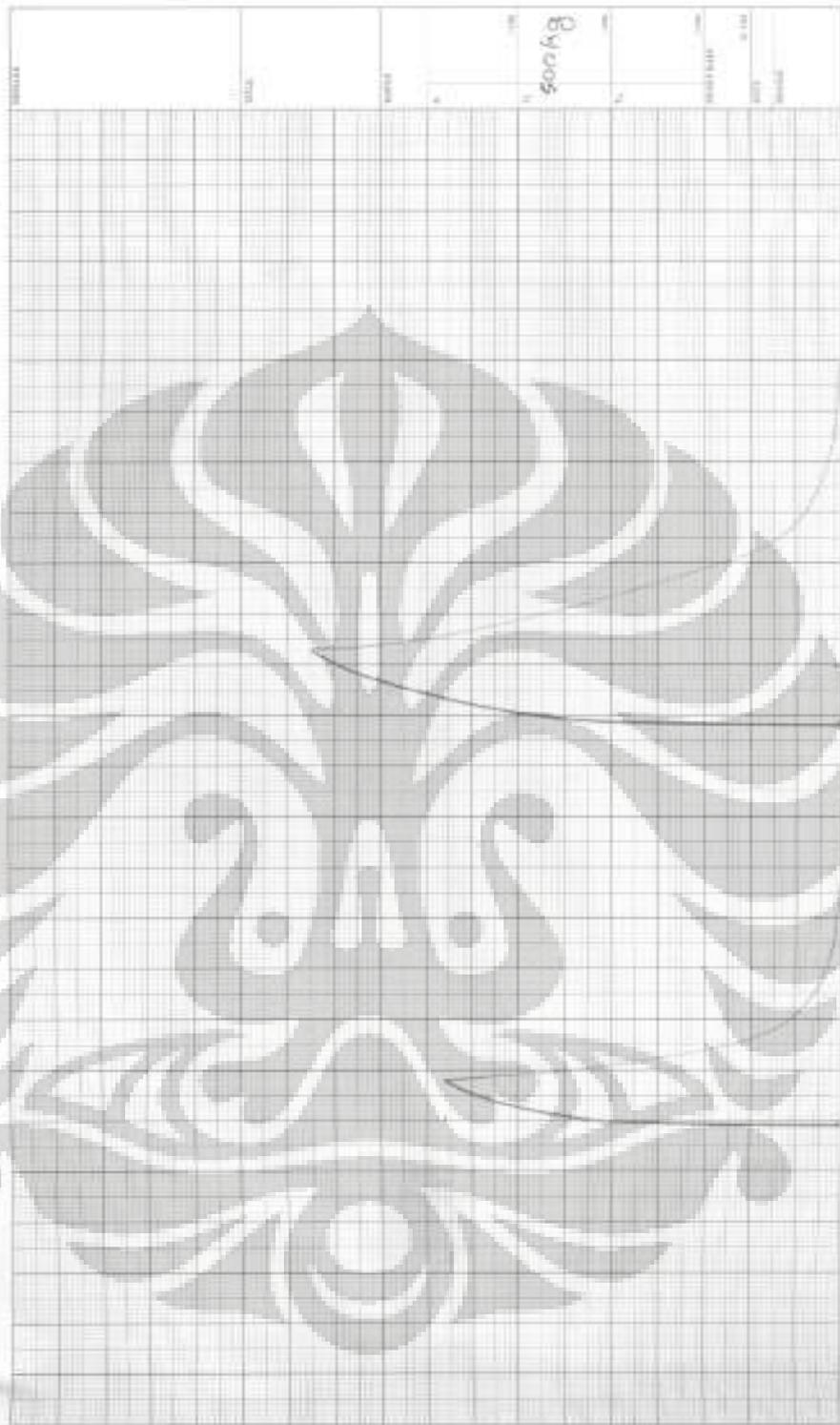
Model T2-3



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING, UNIVERSITY OF WIDJENARA

Lanjutan-

Model T2-4 dan T2-5



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

