



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH LAPISAN KULIT (*SKIN EFFECT*)
TERHADAP SIFAT MEKANIS
BESI TUANG NODULAR DINDING TIPIS**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**IRLINDA DESITA
0606074962**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama	: Irlinda Desita
NPM	: 0606074962
Tanda Tangan	:
Tanggal	: 28 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Irlinda Desita
NPM : 0606074962
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Lapisan Kulit (*Skin Effect*) Terhadap Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular Dinding Tipis

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

DEWAN PENGUJI

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

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 28 Desember 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

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

- 1) Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 2) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberi perhatian dan bantuan baik moril maupun materil.
- 3) Ibu Rianti Sulamet-Ariobimo, selaku pimpinan tim kerja yang telah menyumbangkan pengetahuannya dan membimbing saya selama pengerjaan dan penyusunan skripsi ini.
- 4) Saudara Lusiana Eka, Chintya Viola, Didi Darul dan Ari Azhari selaku rekan kerja yang telah banyak membantu dalam melakukan penelitian
- 5) Sahabat serta seluruh pihak yang telah banyak membantu saya dalam melakukan penelitian.

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

Depok, 28 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Irlinda Desita
NPM : 0606074962
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Departemen : Metalurgi dan Material
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Pengaruh Lapisan Kulit (*Skin Effect*) Terhadap Sifat Mekanis
Besi Tuang Nodular Dinding Tipis

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 28 Desember 2009

Yang menyatakan

(Irlinda Desita)

ABSTRAK

Nama : Irlinda Desita
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Lapisan Kulit (*Skin Effect*) Terhadap Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular Dinding Tipis

Penggunaan material ringan merupakan salah satu upaya untuk mengurangi emisi dan penggunaan energi. Besi tuang nodular dinding tipis dibuat untuk mendukung tujuan itu karena sifat mekanisnya yang unggul. Pembuatan besi tuang nodular dinding tipis akan berhubungan dengan pembentukan lapisan kulit pada struktur mikronya. Lapisan kulit ini dikenal sebagai *skin effect*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh dari *skin effect* terhadap sifat mekanis besi tuang nodular dinding tipis. FCD 450 skala *foundry* dilakukan penuangan sebanyak dua kali dengan perbedaan temperatur penuangan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sifat mekanis yang lebih tinggi dicapai oleh besi tuang nodular dinding tipis dengan temperatur penuangan yang lebih rendah yang mana memperlihatkan tidak ditemukannya *skin effect* pada struktur mikro besi tuang nodular dinding tipis.

Kata kunci:

Skin effect, besi tuang nodular dinding tipis, temperatur penuangan

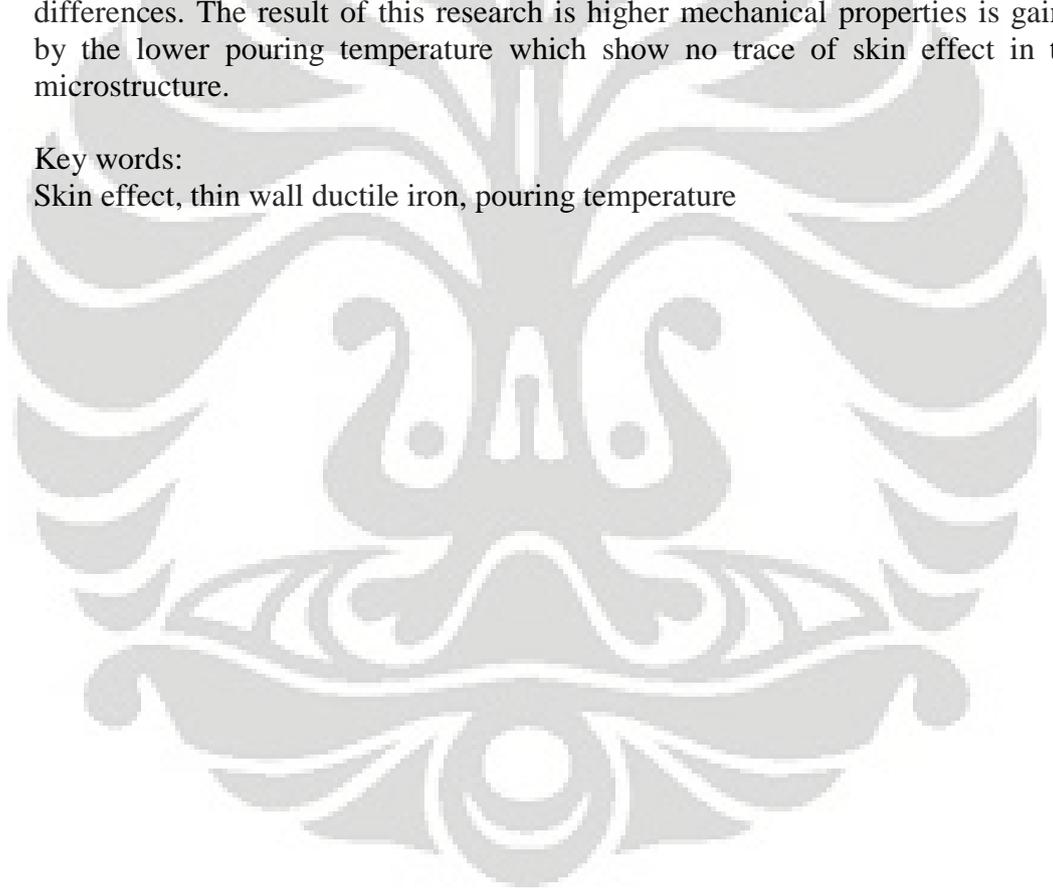
ABSTRACT

Name : Irlinda Desita
Study Program: Metallurgy and Materials Engineering
Title : Influence of Skin Effect in Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron

Application of lightweight material in automotive is one of the effort to reduce the use of energy and emission. Thin wall ductile iron (TWDI) is made to support this aim due to its superior mechanical properties. Production thin wall ductile iron will be associated with the formation of skin in its microstructure. The skin is known as skin effect. The purpose of this research is to see the influence of skin effect to mechanical properties of thin wall ductile iron and finding out the causes. Foundry scale FCD 450 was poured two times with pouring temperatures differences. The result of this research is higher mechanical properties is gained by the lower pouring temperature which show no trace of skin effect in this microstructure.

Key words:

Skin effect, thin wall ductile iron, pouring temperature



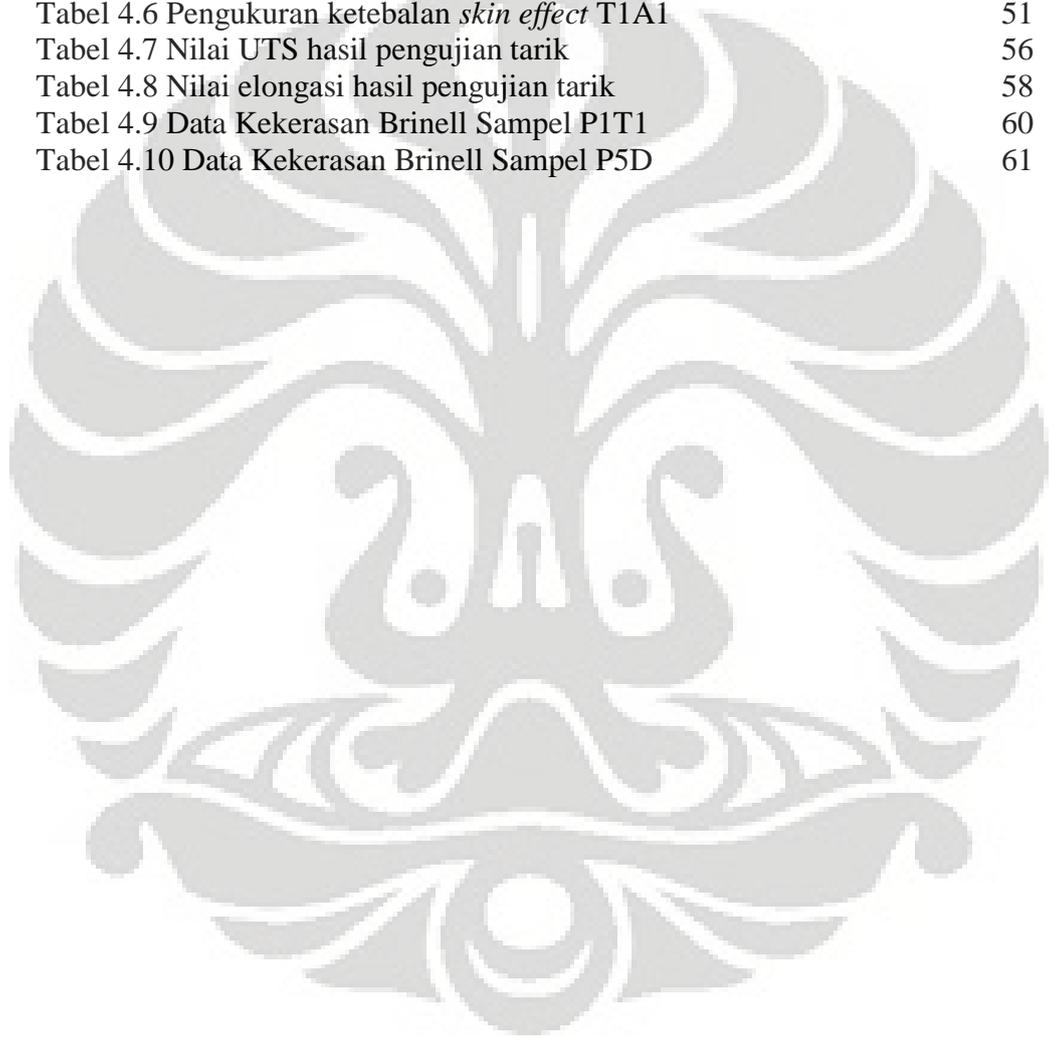
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR RUMUS.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
2. DASAR TEORI.....	5
2.1 Besi Tuang.....	5
2.2 Besi Tuang Nodular.....	5
2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular.....	7
2.2.2 <i>Liquid Treatment</i>	8
2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular.....	10
2.2.4 Pengaruh Elemen Paduan Pada Besi Tuang Nodular.....	12
2.2.5 Nodularitas, Jumlah Nodul dan Diameter Rata-rata Nodul.....	13
2.3 Sistem Saluran Tuang (<i>Gating System</i>).....	15
2.3.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang.....	16
2.3.2 Komponen Saluran Tuang.....	16
2.3.3 Cacat-Cacat Pada Pengecoran.....	18
2.4 Besi Tuang Nodular Austemper (<i>Austemper Ductile Iron-ADI</i>).....	19
2.5 <i>Thin Wall Ductile Iron-Austemper Ductile Iron (TWDI-TWADI)</i>	20
2.5.1 Karbida.....	21
2.5.2 <i>Carbon Equivalent (CE)</i>	22
2.6 Lapisan Kulit (<i>Skin Effect</i>).....	22

3. METODOLOGI PENELITIAN.....	26
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	26
3.2 Alat dan Bahan.....	27
3.2.1 Alat.....	27
3.2.2 Bahan Baku.....	27
3.3 Prosedur Penelitian.....	28
3.3.1 Perbaikan Pola.....	28
3.3.2 Pembuatan Cetakan.....	29
3.3.3 Pembuatan Logam Cair dan <i>Liquid Treatment</i>	30
3.3.4 Pengecoran.....	31
3.3.5 Pengambilan Sampel.....	31
3.3.6 Penamaan Sampel.....	32
3.3.7 Pengamatan Makro.....	32
3.3.8 Pengamatan Struktur Mikro.....	33
3.3.9 Pengujian Sifat Mekanis.....	36
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Pengujian Komposisi Kimia.....	39
4.1.1 <i>Carbon Equivalent (CE)</i>	39
4.2 Pengamatan Visual.....	40
4.3 Pengamatan Struktur Mikro.....	41
4.3.1 Nodularitas dan Jumlah Nodul.....	42
4.3.2 Karakteristik Grafit.....	47
4.3.3 Lapisan Kulit (<i>Skin Effect</i>).....	48
4.3.4 Matrik dan Karbida.....	54
4.4 Pengujian Sifat Mekanis.....	56
4.4.1 Pengujian Tarik.....	56
4.4.2 Pengujian Kekerasan.....	60
5 KESIMPULAN.....	63
REFERENSI.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN	7
Tabel 2.2 Sifat mekanik BTN berdasarkan Standar JIS G 5502	11
Tabel 2.3 Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90	20
Tabel 4.1 Komposisi kimia logam cair standar pabrik	39
Tabel 4.2 Komposisi kimia logam cair	39
Tabel 4.3 Kadar CE logam cair	39
Tabel 4.4 Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata P1T1	45
Tabel 4.5 Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata P5D	46
Tabel 4.6 Pengukuran ketebalan <i>skin effect</i> T1A1	51
Tabel 4.7 Nilai UTS hasil pengujian tarik	56
Tabel 4.8 Nilai elongasi hasil pengujian tarik	58
Tabel 4.9 Data Kekerasan Brinell Sampel P1T1	60
Tabel 4.10 Data Kekerasan Brinell Sampel P5D	61

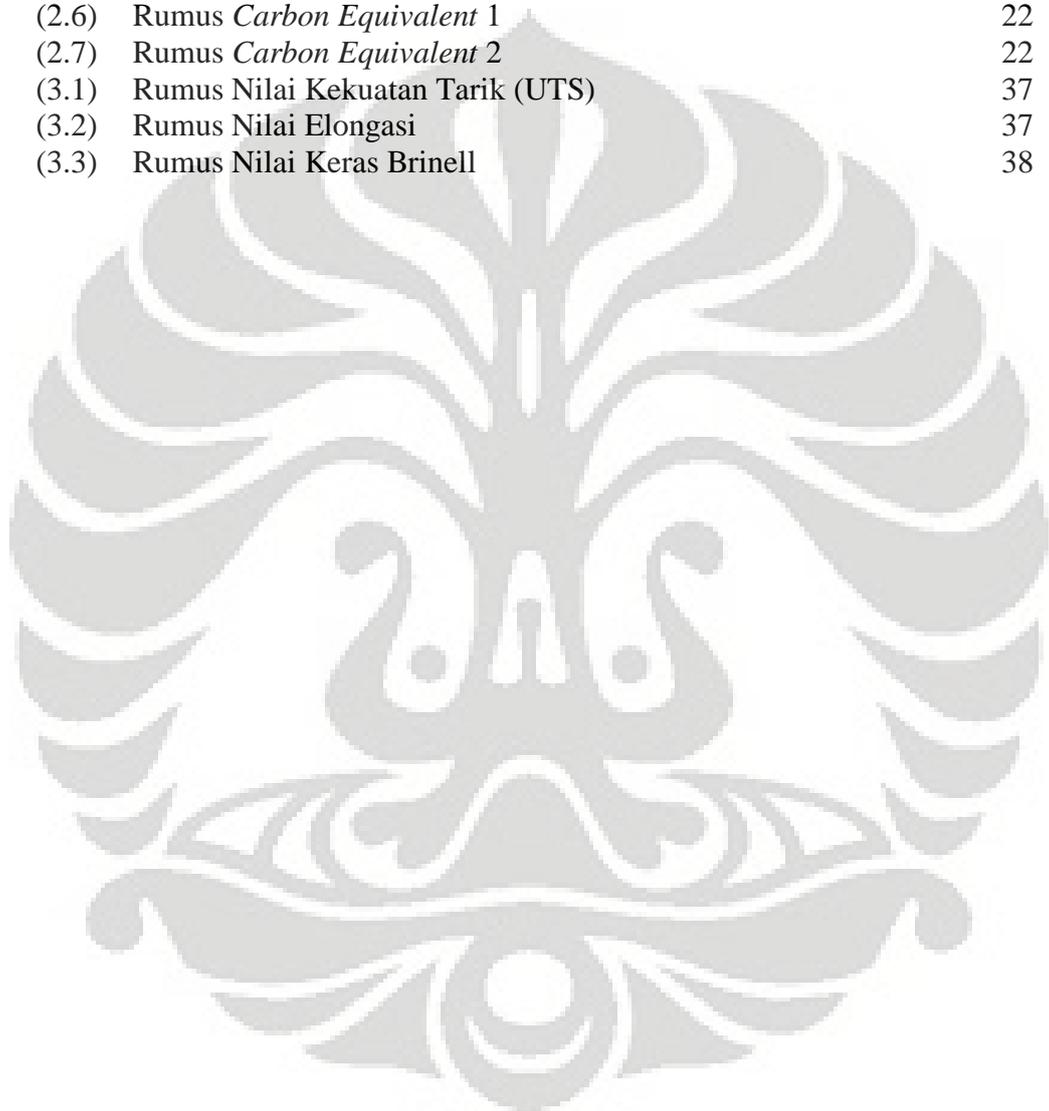


DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material	1
Gambar 1.2 Perbandingan biaya terhadap kekuatan luluh beberapa material	2
Gambar 1.3 Perbandingan berat relatif terhadap kekuatan luluh beberapa material	3
Gambar 2.1 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanis BTN	10
Gambar 2.2 Grafik kekerasan terhadap kekuatan tarik	12
Gambar 2.3 Grafik nodularitas terhadap kekuatan tarik BTN	15
Gambar 2.4 <i>Gating System</i>	16
Gambar 2.5 Diagram pendinginan (temperatur vs waktu)	19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	26
Gambar 3.2 Desain pola pada <i>base plate</i> dan desain pengecoran sampel T1	28
Gambar 3.3 <i>Pattern plate</i> siap digunakan untuk membuat cetakan	29
Gambar 3.4 Proses <i>merger</i> dari pasangan cetakan	29
Gambar 3.5 Sampel	32
Gambar 3.6 Pengambilan sampel uji dari plat P1T1	33
Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat P5D	34
Gambar 3.8 Sampel hasil Mounting (a) P1T1 (b) P5D	34
Gambar 3.9 Mikroskop optik digital	35
Gambar 3.10 Mesin uji tarik	36
Gambar 3.11 (a) Mesin uji keras Brinell (b) <i>Measuring microscope</i>	36
Gambar 4.1 Benda dan saluran tuang hasil pengecoran (a) P1T1 (b) P5D	40
Gambar 4.2 Benda setelah dilakukan proses <i>cutting</i> (a) P1T1 dan (b) P5D	41
Gambar 4.3 Struktur mikro P1T1 plat 2 mm	42
Gambar 4.4 Struktur mikro P1T1 plat 3 mm	42
Gambar 4.5 Struktur Mikro P1T1A1 plat 1 mm, 4 mm, dan 5 mm	43
Gambar 4.6 Struktur mikro P5D plat 2 mm dari dua daerah pengamatan	44
Gambar 4.7 Struktur mikro P5D plat 3 mm dari dua daerah pengamatan	44
Gambar 4.8 Struktur mikro P5D plat (a) 1 mm, (b) 4 mm, (c) dan 5 mm	45
Gambar 4.9 Grafik nodularitas terhadap ketebalan plat	46
Gambar 4.10 Grafik jumlah nodul rata-rata terhadap ketebalan plat	46
Gambar 4.11 <i>Skin Effect</i> pada P1T1 dengan ketebalan plat 2 mm	49
Gambar 4.12 <i>Skin Effect</i> pada P1T1 dengan ketebalan plat 3 mm	49
Gambar 4.13 <i>Skin</i> pada P1T1 plat (a) 1 mm, (b) 4 mm, dan (c) 5 mm	50
Gambar 4.14 Grafik ketebalan <i>skin</i> terhadap ketebalan plat	52
Gambar 4.15 Bagian tepi struktur mikro P5D, ketebalan plat 2 mm dari empat daerah pengamatan	53
Gambar 4.16 Bagian tepi struktur mikro P5D, ketebalan plat 3 mm dari empat daerah pengamatan	53
Gambar 4.17 (a) Struktur mikro P1T1 plat 2 mm (b) Struktur mikro BTN	54
Gambar 4.18 (a) Struktur mikro P1T1 plat 3 mm (b) Struktur mikro BTN	55
Gambar 4.19 Struktur mikro P5D plat 2 mm dari dua daerah pengamatan	55
Gambar 4.20 Struktur mikro P5D plat 2 mm dari dua daerah pengamatan	56
Gambar 4.21 Grafik kekuatan tarik terhadap ketebalan plat	57
Gambar 4.22 Grafik elongasi terhadap ketebalan plat	59
Gambar 4.23 Grafik kekerasan terhadap ketebalan plat	61

DAFTAR RUMUS

(2.1)	Rumus Mg efektif	10
(2.2)	Rumus Nodularitas JIS G5502	14
(2.3)	Rumus Nodularitas <i>image analysis</i>	14
(2.4)	<i>Shape factor sphericity</i>	14
(2.5)	<i>Shape factor compactness</i>	14
(2.6)	Rumus <i>Carbon Equivalent 1</i>	22
(2.7)	Rumus <i>Carbon Equivalent 2</i>	22
(3.1)	Rumus Nilai Kekuatan Tarik (UTS)	37
(3.2)	Rumus Nilai Elongasi	37
(3.3)	Rumus Nilai Keras Brinell	38



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	NODULARITAS DAN JUMLAH NODUL P1T1 DAN P5D	68
Lampiran 2	STANDAR JIS G 5502	69
Lampiran 3	STANDAR JIS Z 2241	70
Lampiran 4	STANDAR JIS Z 2201	71
Lampiran 5	STANDAR ASTM A 247	72
Lampiran 6	STANDAR ASTM E 10	73



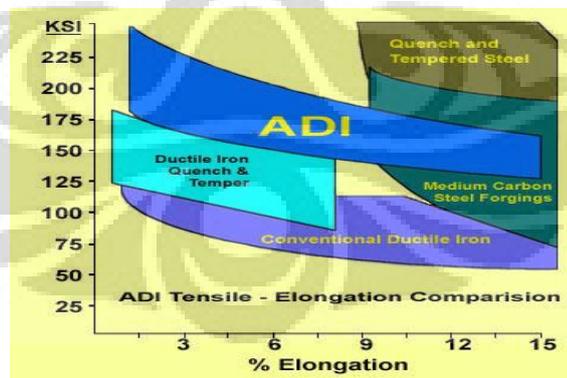
BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aplikasi besi tuang nodular semakin meningkat sejak awal perkembangannya pada tahun 1940-an karena keunggulannya yang dapat diproduksi dengan biaya rendah dan ketahanan terhadap patah, serta sifat mekanis yang memenuhi persyaratan^[1]. Oleh karena keunggulan tersebut, besi tuang nodular telah banyak digunakan dalam berbagai industri, terutama industri otomotif.

Secara umum, besi tuang nodular yang telah memiliki kekuatan dan keuletan tinggi dapat ditingkatkan menjadi besi tuang nodular austemper (*austempered ductile iron-ADI*) melalui proses austempering. Demikian pula besi tuang nodular di Indonesia, tetap dapat dijadikan bahan baku ADI, walaupun tidak memenuhi persyaratan untuk ADI^[2]. Aplikasi besi nodular austemper sebagai material alternatif di dunia terus meningkat setiap tahun dan diperkirakan akan mencapai 300.000 ton per tahun pada Tahun 2020^[3].

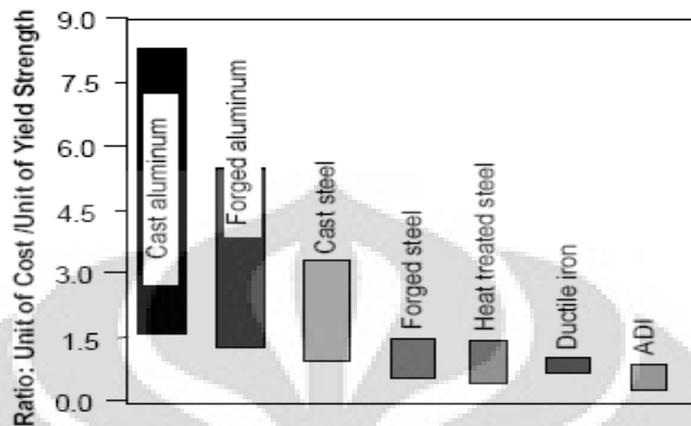
ADI memiliki beberapa keunggulan. Di antaranya adalah biaya produksi yang murah, fleksibilitas design, mampu pemesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik^[4], Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material^[5]

Selain sifat mekanisnya yang unggul dibanding besi tuang lainnya, biaya proses produksi besi tuang nodular austemper sangat ekonomis dan kompetitif terhadap baja dan aluminium, Gambar 1.2. Biaya produksi untuk menghasilkan besi tuang nodular lebih rendah sebesar 20% dari biaya produksi baja tempa dan

hampir 50% dari aluminium. Konsumsi energi yang digunakan untuk memproduksi 1 ton besi nodular austemper adalah 3100 kWh, sedangkan untuk memproduksi baja tempa adalah 5800 kWh-6200 kWh^[6].

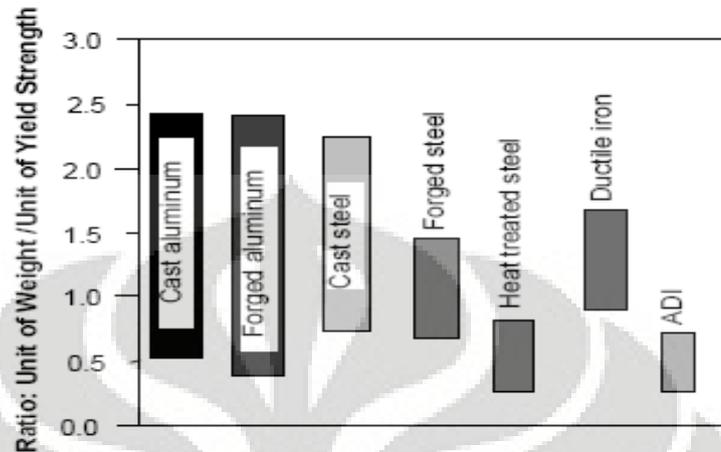


Gambar 1.2 Perbandingan biaya terhadap kekuatan luluh beberapa material^[7]

Pada tahun 1980-an sampai 1990-an, tren industri otomotif berubah. Besi tuang yang awalnya digunakan dalam industri ini, digantikan oleh aluminium yang memiliki berat yang lebih ringan serta dapat mengurangi berat kendaraan, utamanya untuk *cylinder heads*, blok mesin, dan roda dibanding dengan besi tuang^[1]. Seiring dengan adanya isu dunia tentang penghematan energi, maka penggunaan material ringan merupakan salah satu upaya untuk mendukung penghematan energi^[7,8]. Dengan mengurangi berat kendaraan sebesar 250 pon (113.6 kg) sama saja dengan menghemat bahan bakar 1 mpg (0.425 km/l)^[1]. Selain itu juga akan meningkatkan performa, mengurangi konsumsi gas, dan mengurangi emisi^[9].

Saat ini, penggantian aluminium terhadap besi tuang dan baja, dan magnesium terhadap aluminium terus berlanjut. Namun, penggunaan aluminium mengeluarkan biaya lebih besar yang ditawarkan ke konsumen^[1]. Oleh karena itu, sebuah alternatif untuk mengurangi berat dikembangkan industri besi tuang dan baja melalui pengecoran yang dikenal dengan pengecoran besi tuang nodular dinding tipis (*thin wall ductile iron-TWDI*). Permintaan untuk besi tuang nodular dinding tipis meningkat pada sebagian besar industri, terutama industri otomotif. Hal ini disebabkan karena pengecoran TWDI dapat menghasilkan komponen dengan kekuatan tinggi terhadap rasio beratnya. Besi tuang nodular tidak hanya

material yang ekonomis, tetapi juga tidak kalah dari aluminium dalam sebagian besar bidang, berdasarkan rasio berat relatif per unit kekuatan luluhnya^[7], Gambar 1.3.



Gambar 1.3 Perbandingan berat relatif terhadap kekuatan luluh beberapa material^[7]

Seperti halnya dalam besi tuang nodular yang dapat dijadikan ADI, maka TWDI juga dapat ditingkatkan sifat mekanisnya menjadi TWADI dengan tujuan mendapatkan material ringan yang memiliki kekuatan tinggi. TWADI telah sukses digunakan untuk *hollow connecting rod* dari design inovatif mesin 2 silinder.

1.2 Perumusan Masalah

Pengecoran benda tipis berkaitan erat dengan kecepatan pendinginan benda yang tinggi sehingga keberadaan struktur karbida merupakan masalah penting yang harus diperhatikan. Masalah tersebut tentunya akan mempengaruhi sifat mekanis benda. Nodularitas dan jumlah nodul dari grafit menjadi faktor yang harus diperhatikan dalam besi tuang nodular sebagai bahan baku ADI. Hal ini disebabkan karena untuk mendapatkan ADI yang baik maka harus dihasilkan besi tuang nodular yang baik juga kualitasnya. Bentuk dan jumlah nodul ini dapat menjadi masalah karena berhubungan dengan proses *liquid treatment*, yakni nodularisasi dan inokulasi yang memiliki temperatur dan waktu efektif spesifik. Selain itu, karena penelitian ini merupakan penelitian pengecoran benda tipis maka faktor temperatur tuang juga harus diperhatikan.

Selain terbentuknya karbida, permasalahan lain yang muncul pada pengecoran dinding tipis adalah terbentuknya lapisan kulit atau *skin effect* pada

permukaan benda tipis. *Skin effect* ini terjadi akibat kegagalan *liquid treatment* karena kurang sesuainya temperatur dan waktu proses. *Skin effect* yang terbentuk dapat menurunkan sifat mekanis benda. *Skin effect* dapat dihilangkan dengan proses permesinan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh peletakan plat terhadap struktur mikro hasil pengecoran dinding tipis yang meliputi nodularitas, jumlah nodul, karbida, dan *skin effect*.
2. Mengetahui pengaruh *skin effect* terhadap sifat mekanis hasil pengecoran dinding tipis yang meliputi kekuatan tarik dan kekerasan serta faktor-faktor penyebabnya.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Pengecoran dilakukan dalam skala *foundry*. Proses pengecoran dilakukan secara vertikal^[7]. Pola dibuat dari kayu. Cetakan akan dibuat dengan menggunakan pasir furan. Pada penelitian ini dilakukan dengan 5 variasi ketebalan plat, berturut-turut dari saluran masuk 1, 2, 3, 4 dan 5 mm.

Pengecoran vertikal yang digunakan merupakan desain pengecoran T1, dengan membandingkan sifat mekanis plat pada dua flask akibat pengaruh dari *skin effect*. Plat yang akan dianalisa dan dibandingkan adalah plat dengan ketebalan 2 mm dan 3 mm antara penuangan pertama (P1T1) dengan penuangan kelima flask D (P5D) karena dianggap plat pada posisi 2 dan 3 menjadi posisi yang kritis dalam pengecoran dinding tipis. Logam cair yang digunakan pada penelitian ini adalah FCD 450.

Pengujian yang dilakukan meliputi: pengujian komposisi kimia, pengamatan makro, pengamatan struktur mikro, dan pengujian sifat mekanis. Pengamatan struktur mikro dilakukan meliputi: indentifikasi struktur mikro, ketebalan *skin effect*, jumlah grafit nodul dan kenodulan grafit, serta anomali-anomali yang terjadi. Pengujian sifat mekanis yang dilakukan adalah pengujian tarik dan pengujian kekerasan metode Brinell

BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Besi Tuang

Berdasarkan sistem klasifikasi logam, paduan logam dibagi menjadi dua, yaitu ferrous dan non ferrous. Non ferrous merupakan logam berbasis selain besi. Contohnya Cu, Al, Mg, Ti, dan sebagainya. Ferrous merupakan logam berbasis besi dengan elemen penyusun utama adalah besi (Fe) dan karbon (C). Ferrous dibagi menjadi dua, yaitu baja dan besi tuang. Walaupun keduanya disusun dengan elemen utama yang sama, namun terdapat perbedaan dalam komposisi karbon. Komposisi karbon dalam baja maksimal < 1.4 % wt, sedangkan dalam besi tuang antara 3-4.5 % wt. Walaupun kekuatan dan keuletan lebih rendah dari baja, namun dapat ditambahkan unsur-unsur lain untuk meningkatkan sifat tertentu menjadi lebih unggul^[10].

Karena mengandung kadar karbon yang tinggi, besi tuang memiliki grafit bebas di dalam struktur mikro. Pembentukan grafit ini dibantu oleh unsur silikon yang ada di dalam besi tuang. Sifat mekanis dan struktur mikro besi tuang tergantung pada bentuk grafit dan proses perlakuan panasnya. Berdasarkan hal tersebut, besi tuang dapat diklasifikasikan menjadi: (1) Besi tuang putih (*white cast iron*), (2) Besi tuang kelabu (*gray cast iron*), (3) Besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*), dan (4) Besi tuang nodular (*ductile (atau nodular) cast iron*)

1. Besi Tuang Putih (*white cast iron*)

Besi tuang putih mengandung silikon kurang dari 0,1 wt. % dan dibuat melalui proses pembekuan yang relatif cepat di dalam cetakan logam. Akibat pembekuan yang cepat, karbon tidak membentuk grafit bebas, namun membentuk sementit (Fe_3C) yang sangat keras, yang dikelilingi oleh pearlite. Besi tuang putih memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang sangat tinggi, namun di lain pihak sangat rapuh dan tidak dapat dilakukan proses permesinan.

2. Besi Tuang Kelabu (*gray cast iron*)

Besi tuang kelabu biasanya mengandung silikon sebesar 1,0 – 3,0 wt. %. Mikrostruktur terdiri dari grafit berbentuk serpih (*flake*) dikelilingi oleh *ferrite* atau *pearlite*. Grafit berbentuk serpih menyebabkan besi tuang ini sangat rapuh

dan berwarna kelabu jika patah. Namun, grafit berbentuk serpih ini mampu meredam getaran dan menyumbangkan ketahanan aus yang tinggi pada material.

3. Besi Tuang Mampu Tempa (*malleable cast iron*)

Besi tuang mampu tempa dapat diperoleh dengan memanaskan besi tuang putih pada temperatur 800 – 900°C untuk waktu yang cukup lama, sehingga sementit (Fe_3C) akan terdekomposisi menjadi besi dan karbon:



Karbon yang terdekomposisi adalah grafit yang memiliki bentuk berkelompok atau *rossette*

4. Besi Tuang Nodular (*ductile (nodular) cast iron*)

Besi tuang nodular mengandung magnesium atau cerium, yang bertindak sebagai pembulat grafit selama proses pembekuan. Mikrostruktur terdiri dari grafit berbentuk bulat dikelilingi oleh *ferrite* atau *pearlite*. Besi tuang ini lebih kuat dan lebih ulet dibandingkan dengan besi tuang kelabu, dan sifatnya hampir mendekati sifat baja^[10].

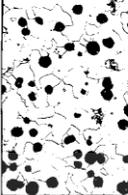
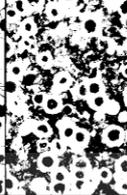
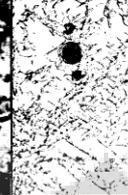
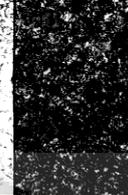
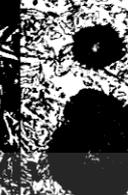
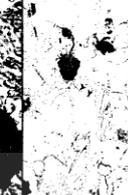
2.2 Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular lebih kuat dan ulet dibanding dengan besi tuang kelabu. Selain itu, besi tuang nodular memiliki sifat yang hampir mencapai sifat baja. Sebagai contoh, besi tuang nodular feritik memiliki kekuatan tarik yang tinggi berkisar antara 380 dan 480 MPa dan keuletan (sebagai % perpanjangan) dari 10 % sampai 20 %. Kekuatan tarik yang lebih tinggi dimiliki oleh besi tuang nodular jenis perlit sekitar 689 MPa dan martensit temper sekitar 827 MPa. Kekuatan luluh besi tuang nodular ferit sekitar 276 MPa, perlit 483 MPa, dan martensit temper 621 MPa. Sedangkan kekuatan tarik untuk besi tuang kelabu jenis tertentu maksimal sekitar 276 MPa dan tidak memiliki keuletan yang dapat diperhitungkan^[11].

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^[12], Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN

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^[12], yaitu:

1. Besi Nodular Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)

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

2. Besi Nodular Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)

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

3. Besi Nodular Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)

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

4. Besi Nodular Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)

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

5. Besi Nodular Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)

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

6. Besi Nodular Austenitik (*Austenitic Ductile Iron*)

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

7. Besi Nodular Austemper (*Austempered Ductile Iron*)

ADI merupakan besi tuang nodular yang mengalami *isothermal heat treatment* yang disebut dengan proses austempering. Tidak seperti besi "as-cast" konvensional, sifat ADI dicapai dengan perlakuan panas, tidak dengan kombinasi paduan khusus. Sifat yang dihasilkan hampir dua kali kekuatan besi ulet perlitik (*pearlitic ductile iron*). ADI juga memiliki ketangguhan dan elongasi yang tinggi. Kombinasi ini menghasilkan material dengan kekuatan fatik dan ketahanan aus yang sangat tinggi. Prasyarat untuk ADI yang baik adalah besi tuang nodular dengan kualitas yang baik^[13].

2.2.2 *Liquid Treatment*

Liquid treatment adalah perlakuan yang diberikan pada saat besi cair. Pemberian perlakuan tersebut umumnya dilakukan di dalam ladle, sebelum besi cair dituang ke dalam cetakan. *Liquid treatment* merupakan salah satu proses yang harus diperhatikan karena berkaitan dengan hasil akhir pengecoran karena menyangkut dengan temperatur dan waktu tertentu. *Liquid treatment* antara lain terdiri dari inokulasi dan nodularisasi^[14]:

2.2.2.1 Inokulasi

Inokulasi merupakan proses penambahan sejumlah unsur (elemen) ke dalam besi cair sewaktu di dalam ladle. Tujuan inokulasi adalah menambah inti/bibit atau nucleus yang akan membantu proses pembekuan besi tuang dan menyebabkan distribusi grafit yang merata di dalam struktur logam. Selain itu, pengaruh inokulasi antara lain adalah memperbaiki sifat-sifat mekanis, yaitu meningkatkan kekuatan tarik dan menurunkan kekerasan, mencegah kecenderungan terjadinya cil pada bagian tipis benda cor, memberikan struktur yang seragam. Pada besi tuang nodular, inokulasi dapat mempertinggi nodularitas^[14].

Inokulan terdiri dari inokulan penggrafitan dan inokulan campuran. Pemberian inokulan sebanyak 0,1 % tidak akan merubah komposisi besi cair atau menyebabkan perubahan sifat mekanis. Inokulan dimasukkan ke dalam ladle sewaktu *tapping* dari dapur (agar tercampur dengan homogen). Pemberian inokulan dilakukan dalam bentuk komponen utama FeSi (sebagai *carrier*) dengan 50 sampai 75% Si dan umumnya kalsium silikat dengan 30 sampai 35% Ca. Selain kalsium elemen inokulan lainnya adalah aluminium, barium, zirconium, dan serium. Serium merupakan inokulan terbaik yang menghasilkan inokulasi paling baik ^[15].

Inokulan mempunyai sifat "*fade*" atau memudar, yakni makin lama akan semakin melemah fungsinya, sehingga akhirnya tidak berfungsi sebagai inokulan. Waktu yang paling efektif sebagai inokulan adalah 2 – 10 menit, sehingga kadang-kadang inokulan dimasukkan ke dalam cetakan (*mould inoculation*) agar fungsinya lebih efektif. Temperatur inokulasi juga harus diperhatikan. Sebaiknya temperatur inokulasi diusahakan setinggi mungkin, karena apabila temperatur di bawah 1400⁰ C maka pengaruh inokulasi kadang-kadang kecil ^[15].

2.2.2.2 Nodularisasi

Nodularisasi adalah proses pembulatan grafit dengan menambahkan Mg, Ca, Ce dan paduan-paduannya ke dalam logam cair. Mg dan paduan Mg merupakan bahan yang paling banyak dipergunakan karena kemampuannya yang baik dalam pembentukkan grafit bulat dan pengurangan belerang. Mg murni memiliki titik didih rendah dan tekanan uap tinggi, sehingga pencampuran langsung sangat berbahaya. Oleh karena itu, Mg biasanya dipadu dengan unsur lain yaitu paduan Fe-Si-Mg dalam kadar 5 sampai 20% dan kadang-kadang mengandung unsur tanah jarang sebagai bahan netral dan penstabil dari grafit bulat. Terdapat empat cara memasukkan Mg dalam logam cair ^[15], yaitu :

1. Cara penambahan permukaan
2. Cara ladle terbuka
3. Cara pencemplungan
4. Cara penambahan dengan tekanan.

Banyaknya Mg yang ditambahkan dan larut dalam logam cair tergantung pada kadar sulfur dan kadar oksigen. Banyaknya kadar Mg yang efektif dapat dihitung dengan rumus 2.1 berikut :

$$\%Mg \text{ efektif} = \frac{0.75\%C \text{ dalam besi cair} \times Mg \text{ sisa}}{\%Mg \text{ yang ditambahkan}} \quad (2.1)$$

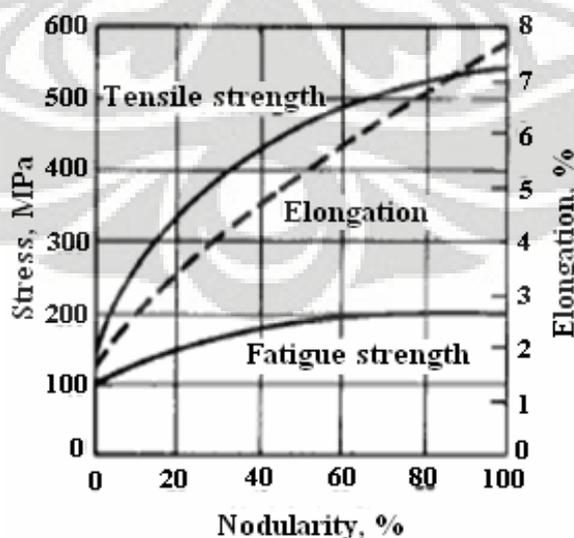
Liquid treatment memerlukan waktu yang banyak. Oleh karena itu, setiap perlakuan perlu diusahakan secepat mungkin. Jumlah kadar Mg dan pengaruhnya pada pembulatan grafit berkurang menurut waktu. Penuangan dalam lima menit sampai dua puluh menit setelah proses penambahan pada temperatur 1400°C menyebabkan grafit bulat, tetapi penuangan yang lebih lambat dari waktu tersebut menyebabkan grafit serpih^[15].

2.2.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

Sifat mekanis besi tuang nodular yang unggul membuat besi tuang nodular banyak digunakan dalam berbagai industri, terutama industri otomotif. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang nodular^[16], antara lain:

1. Struktur grafit

Adanya grafit dalam bentuk bulat pada besi tuang nodular disebabkan oleh penambahan magnesium (magnesium dan cerium) pada logam cair. Sifat mekanik dan fisik dari jenis material ini bergantung pada bentuk grafit nodular. Semua sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan menurun jika proporsi dari grafit non nodular menurun, Gambar 2.3.



Gambar 2.1 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanis BTN^[11]

2. Jumlah grafit

Ketika jumlah grafit meningkat, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang juga menurun. 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.

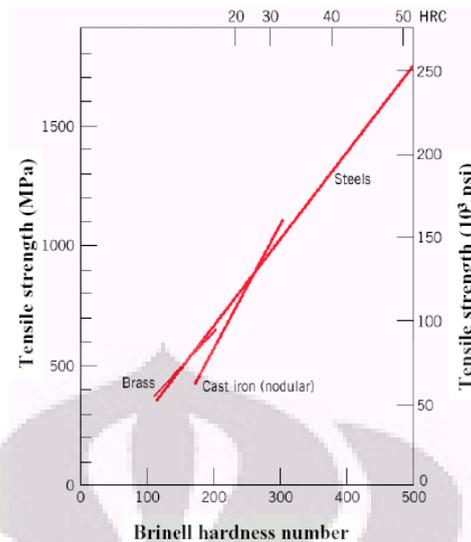
3. Struktur matrik

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.

Tabel 2.2. Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502^[17]

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

Kekerasan dari besi tuang nodular berbanding lurus dengan kekuatan tarikannya. Matrik dan grafit pada besi tuang nodular merupakan gabungan yang mendasari sifat mekanis besi tuang nodular.



Gambar 2.2 Grafik kekerasan terhadap kekuatan tarik^[10]

4. Ukuran ketebalan

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

2.2.4 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular

Penambahan elemen paduan pada besi tuang nodular berfungsi untuk mengontrol sifat dan performa material sesuai aplikasinya. Beberapa elemen yang dapat ditambahkan dalam komposisi besi tuang nodular^[16], 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. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Jumlah kandungan silicon 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.

2.2.5 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^[18]. Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan pada pembesaran mikroskop 100x^[18]. Pada

Universitas Indonesia

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^[19].

Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n1+0.3n2+0.7n3+0.9n4+1n5}{n1+n2+n3+n4+n5} \times 100\% \quad (2.2)$$

dengan n1, n2, n3, n4, dan n5 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^[7]:

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

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)

$$S = \frac{4\pi \times A}{(\text{perimeter})^2} \quad (2.4)$$

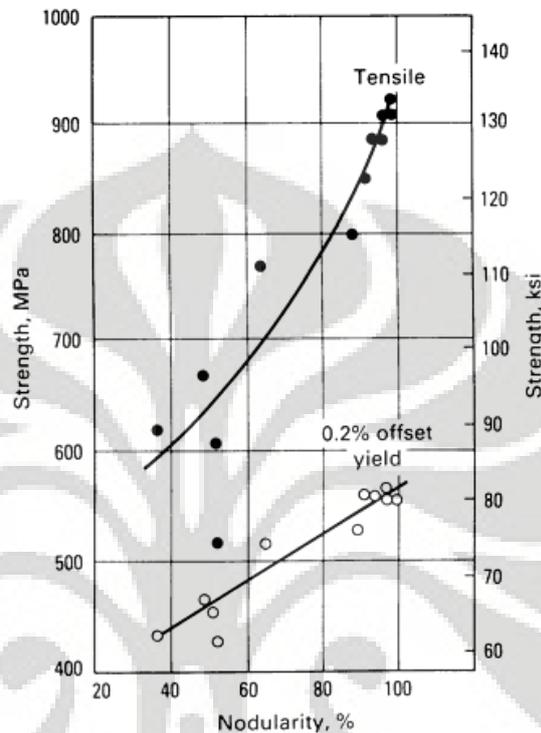
2. Menurut *compactness* (C)

$$C = \frac{4\pi \times A}{(\text{conveksparameter})^2} \quad (2.5)$$

Berdasarkan konversi maka untuk dapat dihitung nilai $S > 0,65$ dan nilai $C > 0,7$ ^[7]. 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 mempengaruhi sifat mekanis yang dihasilkan. Semakin besar nodularitas maka semakin besar kekuatan tariknya^[16].



Gambar 2.3 Grafik nodularitas terhadap kekuatan tarik BTN^[16]

2.3 Sistem Saluran Tuang (*Gating System*)

Gating systems ialah jaringan pipa atau saluran logam cair untuk memasuki cetakan untuk mengisi seluruh rongga cetakan yang diikuti oleh pembekuan logam cair untuk menghasilkan bentuk benda casting

Hukum-hukum aliran fluida yang umum digunakan untuk menghasilkan *gating system* yang optimal antara lain : *Bernoulli's Theorem*, *Law of Continuity*, dan *Momentum Effects (Reynold's Number)*.

Tujuan utama pembuatan *gating system* adalah agar logam cair dapat masuk ke cetakan melalui *gating system* tanpa turbulensi dan penyerapan gas-gas yang minimum. Selain itu logam cair dapat mengisi penuh rongga cetakan dalam waktu yang sesingkat-singkatnya. Dengan menggunakan *gating system* dapat mencegah/meminimalisasi *premature solidification* karena kecepatan alir logam cair yang akan masuk ke rongga cetakan diatur oleh *gating system*. Kemudian

Universitas Indonesia

logam cair dapat masuk ke dalam cetakan dengan gradien temperatur yang tercipta di permukaan cetakan dan di dalam logam cair yang selanjutnya akan menghasilkan *directional solidification* menuju riser^[14].

2.3.1 Klasifikasi Sistem Saluran Tuang

Klasifikasi sistem saluran tuang dibagi menjadi dua berdasarkan arah dari bidang pemisah (*parting plane*)^[20], yaitu sistem saluran tuang horizontal dan sistem saluran tuang vertikal.

1. Sistem Saluran Tuang Horizontal

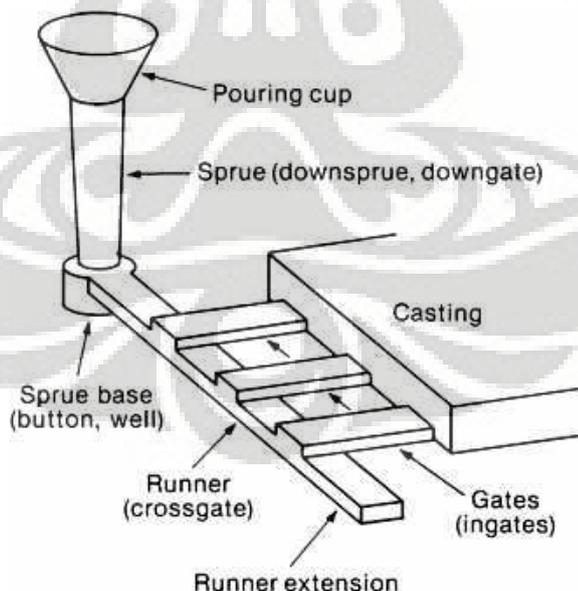
Sistem saluran tuang horizontal cocok untuk pengecoran datar dengan pengaruh gaya gravitasi dalam pengisian. Aplikasi cukup luas dalam pengecoran pasir logam besi dan *gravity die casting* untuk logam *non-ferrous*.

2. Sistem Saluran Tuang Vertikal

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

2.3.2 Komponen Saluran Tuang

Saluran tuang atau *gating system* terdiri dari komponen-komponen yang berfungsi untuk mengalirkan logam cair menuju ke cetakan.



Gambar 2.4 *Gating System*

Komponen-komponen dalam *gating system* antara lain:

1. *Pouring Basin*

Pouring basin ialah semacam corong yang ditempatkan di atas *sprue* pada bagian kup. Desain yang baik dari *pouring basin* akan mengatur laju masuknya logam cair ke dalam *sprue*, menghasilkan aliran logam cair yang halus di dalam *sprue* dan mencegah turbulensi. *Pouring basin* harus diletakkan dekat dengan tepi flask agar cetakan bisa terisi penuh dengan cepat dengan menjaga cetakan tetap terisi penuh dengan logam cair selama proses *pouring* berlangsung.

2. *Sprue*

Sprue adalah saluran yang mengalirkan logam cair dari *pouring basin* ke *ingate*. Desain dari *sprue* sangat krusial untuk mencegah inisiasi aliran turbulen dalam *gating system*. Aliran turbulen menyebabkan peningkatan daerah yang terekspos terhadap udara luar yang selanjutnya akan meningkatkan proses oksidasi logam cair dan menyebabkan erosi pada cetakan pasir.

3. *Runner*

Runner merupakan suatu saluran yang membawa logam cair dari *sprue* menuju *ingate* yang selanjutnya akan masuk ke dalam rongga cetakan. Pada pengecoran perlu digunakan *runner extension (blind ends)* karena logam cair yang pertama-tama masuk ke dalam *gating system* umumnya adalah yang paling terkontaminasi / rusak karena kontak dengan dinding cetakan dan bereaksi dengan gas selama logam cair tersebut mengalir. *Momentum effect* digunakan untuk membawa logam cair yang rusak itu melewati *ingate* dan menuju *runner extension* sehingga logam cair yang lebih bersih masuk ke *ingate* menuju rongga cetakan dan dapat dihasilkan benda casting yang lebih baik.

4. *Ingate*

Ingate ialah jalan atau saluran yang menghubungkan antara *runner* dan rongga cetakan. *Ingate* harus dibuat menuju daerah yang tebal dari benda casting. *Gate* yang paling sering digunakan umumnya berbentuk persegi panjang. Penempatan *ingate* harus dibuat sedemikian rupa untuk meminimalisasi agitasi dan mencegah erosi cetakan. Oleh karena itu harus mengorientasikan *ingate* pada arah natural dari logam cair.

5. Riser

Riser adalah *reservoir* logam cair yang dihubungkan ke benda cor untuk menyediakan/mensupply logam cair tambahan yang dibutuhkan oleh benda cor selama proses solidifikasi. Riser didesain untuk membeku paling akhir dan menarik *shrinkage voids* keluar dari benda casting. Riser juga berfungsi sebagai pintu keluar bagi gas-gas dan dross yang terperangkap di dalam logam cair.

2.3.3 Cacat-Cacat Pada Pengecoran

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

1. Porositas (Gas terperangkap)

Penyebab porositas dapat digolongkan menjadi dua, yaitu disebabkan gas dari logam cair dan disebabkan gas dari cetakan. Penyebab utamanya antara lain tidak cukup kering peralatan pengecoran, temperatur penuangan yang rendah serta terlalu banyak gas yang timbul dari cetakan^[15]. Sifat permeabilitas pasir cetakan yang rendah berakibat udara/gas yang berasal dari cairan logam sulit untuk keluar dari cetakan juga berdampak terjadinya cacat porositas atau *gas-hole* yang semakin besar. Selain karena sifat dari pasir, udara yang terperangkap akan selalu ada mengingat turbulensi pada saat pengisian. Oleh karena itu turbulensi harus dikurangi dengan penanganan dan transportasi yang baik^[14].

2. Inklusi padatan (*solid inclusion*)

Cacat ini disebabkan oleh turbulensi dalam logam cair, misalnya inklusi pasir atau slag. Pasir yang terlepas karena erosi atau turbulensi dari permukaan cetakan bergerak ke dalam rongga cetakan yang mengakibatkan inklusi pasir. Inklusi slag dapat disebabkan oleh turbulensi permukaan sepanjang aliran logam cair, menyebabkan penyampuran lapisan oksida permukaan dengan logam cair.

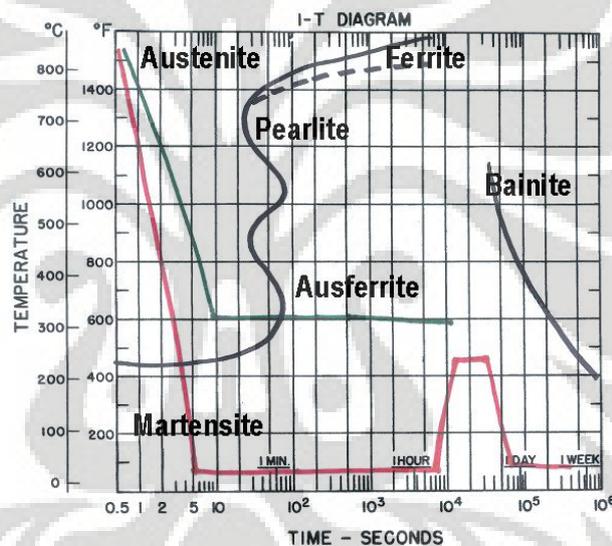
3. Pengisian tidak penuh (*incomplete filling*)

Fluiditas cairan logam yang buruk menyebabkan cacat seperti misrun dan cold shut. *Misrun* terjadi ketika logam cair tidak mengisi bagian rongga cetakan secara penuh, biasanya pada bagian ujung rongga yang sempit. Sedangkan *cold shut* terjadi ketika dua aliran logam cair yang datang dari arah berlawanan bertemu, tetapi tidak menyatu secara sempurna.

2.4 Besi Tuang Nodular Austemper (*Austemper Ductile Iron-ADI*)

ADI merupakan besi tuang nodular yang mengalami *isothermal heat treatment* yang disebut dengan proses austempering. Tidak seperti besi "as-cast" konvensional, sifat ADI dicapai dengan perlakuan panas, tidak dengan kombinasi paduan khusus. Prasyarat untuk ADI yang baik adalah besi tuang nodular dengan kualitas yang baik^[13].

Austempering merupakan perlakuan panas secara isothermal yang dapat diaplikasikan ke material berbasis besi untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan. Austempering terdiri dari austenisasi diikuti oleh pendinginan cepat pada temperatur sekitar 260-385°C dimana material berubah secara isothermal untuk membentuk ausferrit^[21] menurut ASTM A644-92^[22].



Gambar 2.5 Diagram pendinginan (temperatur vs waktu)^[21]

Selain keunggulan dalam hal biaya, keunggulan dalam hal performa juga sangat baik, yaitu kekuatan dapat dibandingkan dengan baja. Oleh karena kekuatannya yang sebanding, mendekati 80% dari keseluruhan baja cor dan tempa dapat digantikan dengan beberapa grade ductile iron atau ADI. Densiti rendah dibanding baja karena komponen ADI 10% lebih ringan dari baja. Beratnya yang lebih ringan dari aluminium, kekuatan ADI tiga kali lebih besar dari aluminium tempa atau cor dan beratnya hanya 2.5 kalinya, kekuatan fatik yang tinggi, dan meningkatkan kapasitas damping karena kehadiran grafit dalam matriks ADI meningkatkan kapasitas damping menjadi lebih diam dan lebih halus serta

memiliki ketahanan abrasi dan aus yang tinggi. Persyaratan sifat mekanis dari ADI berdasarkan standard ASTM A 897-90 dan A 897M-90 dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2.3. Standard ASTM A 897-90 dan A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI^[23]

SI units	Grade 900/650/09	Grade 1050/750/07	Grade 1200/850/04	Grade 1400/1100/02	Grade 1600/1300/01
Tensile strength, min, MPa	900	1050	1200	1400	1600
Yield strength, min, MPa	650	750	850	1100	1300
Elongation in 50 mm, min, %	9	7	4	2	1
Impact energy, J ^A	100	80	60	35	20
Typical hardness, HBW, kg/mm ²	269-341	302-375	341-444	388-477	402-512

Syarat yang harus dimiliki besi tuang nodular agar dapat dijadikan ADI adalah nodularitas > 80%, jumlah nodul > 100/mm², matrik *ferrit/pearlit* dengan perbandingan yang konsisten, minimal level karbida, minimal level inklusi^[24] dan tidak ada segregasi^[3]. Untuk penggunaan langsung maka harus bersih dari karbida^[7].

2.5 Thin Wall Ductile Iron-Austemper Ductile Iron (TWDI-TWADI)

Belum ada standar baku untuk ketebalan benda yang dikategorikan dalam pengecoran dinding tipis (*thin wall casting*). Caldera mendefinisikan ketebalan dinding dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal kurang dari 5 mm^[25]. Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm^[26]. Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil dan sama dengan 3 mm^[7]. Ketebalan minimal terakhir yang sudah dapat dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm yang dibuat oleh kelompok Stefanescu^[26]. Sedangkan ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis sebagai bahan baku ADI adalah 2 mm yang dicapai oleh kelompok Mourad dalam bentuk benda uji^[8] dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez dalam bentuk komponen *hollow connecting rod* dari design inovatif mesin 2 silinder yang dikeluarkan oleh Pronello I+D^[26].

Keberhasilan pengecoran dinding tipis ini ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida dan *skin effect*

2.5.1 Karbida

Pengecoran benda tipis berkaitan erat dengan kecepatan pendinginan benda yang tinggi sehingga keberadaan struktur karbida merupakan masalah penting yang harus diperhatikan. Oleh karena itu, pada pengecoran besi tuang nodular karbida yang terbentuk lebih banyak dari besi tuang besi tuang kelabu. Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas, *heat treatment*, dengan temperatur proses lebih kurang 900°C ^[28]. Keberhasilan pembuatan komponen dengan dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida^[7]. 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^[7].

Javaid, Labrecque dan Gagne, serta Stefanescu bersama Universitas Alabama memproduksi pengecoran bebas karbida dengan tebal plat sebesar 2.5 mm. Pembentukan karbida dipengaruhi komposisi, *liquid treatment*, material dan metode, metalografi, struktur mikro, sifat dan teknik cetakan. Karbida terjadi karena kecepatan pendinginan yang tinggi, dengan variabel pengontrol yaitu komposisi, waktu dan temperatur penuangan, media cetakan, Mg treatment dan inokulasi^[27].

Dalam pengecoran dinding tipis, pengurangan karbida dan mikroporositas merupakan tantangan yang harus dihadapi. Faktor terbentuknya karbida antara lain^[27]:

1. Kecepatan pendinginan pembekuan tinggi dan superheat tinggi.
2. Pembentuk karbida : CE rendah atau kadar Si rendah dan kelebihan Mg. Minimum 4.3% CE akan mencegah karbida ($\text{CE} = \% \text{C} + 0.31 \% \text{Si}$)

3. Jumlah nodul yang rendah (inokulasi buruk) dan nodularitas rendah akan menambah karbida.

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^[29].

2.5.2 Carbon Equivalent (CE)

Pada penelitian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent*, CE, adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida.

Loper mengatakan untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4,3%^[27,30] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5) mm^[29,30]. Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si \quad (2.6)$$

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

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \quad (2.7)$$

TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%^[25]. Selain persyaratan nilai CE, kadar Si dan kadar dari unsur-unsur paduan seperti Mo dan Ni. Untuk kadar Si disarankan oleh Mourad (2,4 – 2,7)% untuk ketebalan (3-10) mm.

Apabila struktur mikro dan sifat mekanis TWDI yang dihasilkan baik maka dapat dihasilkan pula TWADI yang akan memiliki sifat mekanis yang sangat unggul dengan melakukan proses *austempering* seperti pembuatan besi tuang nodular austemper dari besi tuang nodular.

2.6 Lapisan Kulit (*Skin Effect*)

Pada besi tuang nodular dinding tipis terbentuk suatu lapisan pada bagian tepi struktur mikro yang tidak diharapkan. Kehadiran lapisan ini dalam hasil pengecoran akan menurunkan sifat mekanis material, yaitu menurunkan kekuatan

tarik dan keuletan. Lapisan ini dikenal dengan *flake graphite rim anomaly*^[27] atau *skin effect*^[20]. Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200 μm atau 0,2 mm^[27].

Kelompok Stefanescu mendemonstrasikan bahwa saat melakukan pengecoran dinding tipis didasarkan pada pengisian cetakan dan pembekuan dengan parameter proses yang tepat maka sifat mekanis dari plat sama atau unggul terhadap tingkat spesifikasi minimum standar besi nodular. Titik ini mengarah terhadap pentingnya kualitas permukaan dari *test piece* dalam evaluasi sifat mekanis. Permukaan *test piece* yang belum dilakukan permesinan (*as-cast*) memiliki *skin* yang dapat membuat perubahan terhadap kekuatan dan elongasi. Oleh karena itu, anomali pembekuan seperti terbentuknya *skin* ini sama berpengaruhnya dengan kualitas permukaan terhadap sifat mekanis^[31].

Stefanescu pada demonstrasinya menyebutkan bahwa kualitas permukaan sangat berpengaruh terhadap sifat mekanis material tipis, khususnya fasa ferit. Kualitas permukaan plat yang telah dilakukan proses permesinan memiliki sifat mekanis yang lebih baik dari plat "*as-cast*". Kualitas permukaan, salah satunya seperti kekasaran permukaan juga dapat menyebabkan sifat mekanis material menurun. Pengaruh ini sama dengan pengaruh yang dihasilkan material yang memiliki *skin effect* dalam struktur mikronya.

Kekasaran permukaan bergantung dari tekanan metalostatik dan temperatur penuangan. Tekanan metalostatik diberikan dengan nilai $\rho g h$ dimana ρ adalah densitas logam, g adalah gaya gravitasi bumi dan h adalah tinggi dari lintasan logam cair di atas titik pengisian. Semakin tinggi tekanan metalostatik maka semakin tinggi velositas dari cairan logam dan fluiditas juga semakin tinggi. Semakin tinggi tekanan metalostatik dan temperatur penuangan, maka kekasaran permukaan yang didapat semakin tinggi. Saat temperatur tuang di bawah nilai tertentu, pengaruh tekanan metalostatik berkurang. Sifat mekanis akan menurun secara signifikan di atas kekasaran kritis tertentu.

Besi tuang nodular dengan fasa ferit "*as cast*" memiliki sifat mekanis di bawah standar minimum ASTM. Stefanescu mengatakan bahwa berdasarkan pengisian cetakan dan simulasi pendinginan, besi tuang nodular fasa ferit hasil permesinan memiliki sifat mekanis di atas standar minimum ASTM. Kekasaran

permukaan dipengaruhi oleh faktor tekanan metalostatik dan temperatur penuangan, serta kecepatan pendinginan. Faktor temperatur tuang dan kecepatan pendinginan tidak bisa dipisahkan satu sama lain. Kekasaran permukaan menurun dengan kenaikan kecepatan pendinginan karena menurunkan fluiditas dan waktu cetakan terbuka terhadap *liquid*. Semakin tinggi kekasaran permukaan dapat menurunkan UTS dan elongasi^[31].

Menurut Aufderheiden, pengecoran besi tuang nodular sering menunjukkan lapisan tipis "*skin*" pada permukaan *as-cast* yang terdiri dari grafit serpih atau *vermicular*. *Skin effect* ini dapat menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih dapat bertindak sebagai pusat tegangan dan daerah inisiasi retak. Pada pengecoran dinding tipis, *skin effect* ini dapat menjadi sangat penting. Ketidaktepatan kecil dalam bagian tipis menjadi kritis terhadap keseluruhan dari performa pengecoran^[20].

Aufderheiden menyebutkan bahwa *skin effect* berpotensi menjadi fokus untuk diperhatikan. Beberapa spesifikasi untuk pengecoran besi tuang nodular memperbolehkan maksimum 0.4 mm untuk kedalaman skin. Pada benda tebal (200 mm), *skin effect* diabaikan, tetapi sangat kritis untuk benda tipis (2 mm). Tingkat penurunan kualitas permukaan dapat menyebabkan sesuatu yang tidak dapat diterima yang pada akhirnya akan menjadi *scrap casting*. Pada percobaannya, Aufderheiden menggunakan beberapa variabel sebagai pengontrolan terhadap pembentukan *skin effect*, antara lain: *binder*, *mold coating*, dan pasir dengan beberapa variabel.

Binder dipercaya menjadi sangat penting karena memiliki kemungkinan interaksi antara binder dan logam. Contohnya *binder* sistem seperti furan yang mengandung sulfur dalam tingkat yang tinggi dapat bereaksi dengan magnesium dalam logam, yang dapat menyebabkan grafit serpih terbentuk pada cetakan/ permukaan logam dari pada grafit nodul.

Coating memiliki kemampuan untuk mengurangi atau mengubah berbagai reaksi pada cetakan atau permukaan logam. *Coating* dapat bertindak sebagai penghalang untuk mencegah reaksi gas pada permukaan. *Coating* dapat meningkatkan *surface finish* yang berpengaruh terhadap sifat mekanis hasil pengecoran dinding tipis. Kecepatan pembekuan memiliki efek terhadap sifat

mekanis hasil pengecoran dinding tipis. Kecepatan pendinginan ini dikontrol oleh densitas dan konduktifitas termal dari material cetakan. Aufderheide dan Showman telah menunjukkan bahwa dengan menggunakan *low density alumina silicate ceramics* (LDASC) ke dalam cetakan pasir secara dramatis dapat menurunkan kecepatan pembekuan sehingga dapat mengurangi karbida dan meningkatkan grafit nodul.

Satu teori dari pembentukan *skin* mengatakan bahwa Mg dapat hilang pada permukaan logam sebagai hasil dari oksidasi melalui kontak dengan udara. Tingkat *binder* yang tinggi mengontrol generasi gas pada cetakan atau permukaan logam dan dapat menyebabkan berbagai reaksi gas. Tingkat *binder* yang lebih tinggi, lebih mengurangi oksidasi.

Sehingga dapat disimpulkan, *skin* yang ditemukan pada hasil pengecoran besi tuang nodular dinding tipis disebabkan oleh beberapa faktor. Tipe dari pasir memiliki kontribusi yang paling besar terhadap pembentukan *skin defect* diikuti dengan tingkat Mg. Selain *skin defect*, besi tuang nodular dinding tipis juga mengandung karbida atau grafit serpih atau memperlihatkan kekasaran permukaan. Oleh karena itu, variabel-variabel ini harus dikontrol^[20].

Analisis Ruxanda mengatakan lapisan yang terbentuk pada tepi struktur mikro karena terjadinya perbedaan kadar Mg antara daerah tengah dan tepi sehingga terjadi perbedaan bentuk grafit. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi akibat oksidasi Mg atau berikatnya Mg dengan S^[27].

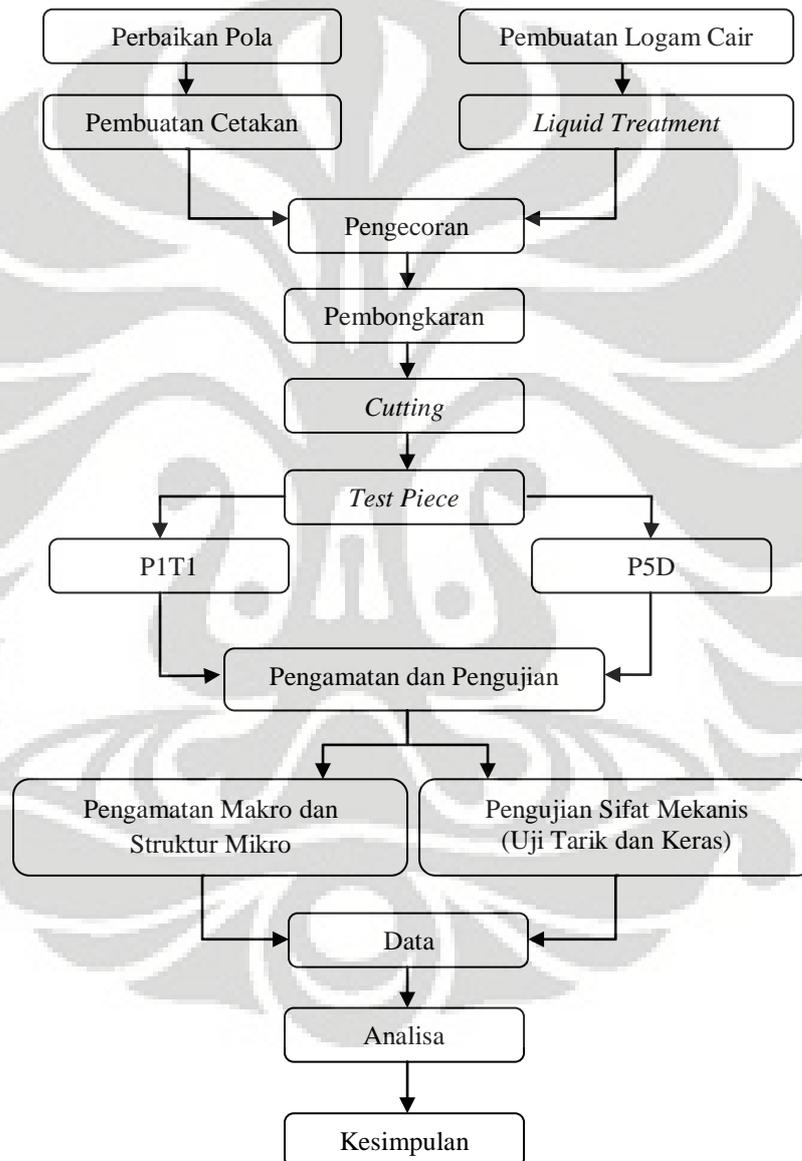
Istilah lapisan kulit menurut Ruxanda adalah lapisan *flake grafit rim anomaly* dengan ketebalan maksimum 200 μm atau 0,2 mm. Kadar karbon pada daerah dendritik tinggi sebagai partikel aglomerasi grafit merupakan ciri khas daerah masing-masing. Kandungan Mg pada daerah tengah lebih besar dan lebih tinggi pada daerah dendritik dibanding dengan daerah interdendritik (daerah tepi). Interdendritik positif mengalami segregasi mikro Mg. Perbedaan kandungan Mg bertanggung jawab mengubah bentuk grafit dari spheroidal di daerah bulk menjadi serpih pada permukaan. Kandungan Mg yang lebih rendah pada daerah interdendritik merupakan hasil oksidasi Mg oleh gas dari cetakan. *Flake grafit rim anomaly* (grafit interdendritik) terjadi karena adanya segregasi mikro Mg yang dapat mengubah bentuk grafit. Susunan grafit berperan dalam penjalaran retak^[27].

Universitas Indonesia

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan meliputi alat dan bahan saat proses pembuatan pola, pengecoran dan pengujian.

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

a. 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.

b. Alat Pembuatan Cetakan

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan antara lain: mesin pencampur (*mixer*) pasir, sepasang flask vertikal, dan mesin pengangkut

c. Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi antara lain: *induction furnace*, *CE meter*, dan *thermocouple*

d. Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk pengecoran antara lain: ladle, *thermocouple* dan mesin pengangkut (*crane*)

e. Alat Pembongkaran

Alat yang digunakan untuk pembongkaran berupa batang pengangkat untuk melepas produk cor dari cetakan pasir. Selain itu, untuk membersihkan produk cor dari pasir-pasir yang melekat, digunakan mesin *shotblasting*.

f. Alat Permesinan

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

3.2.2 Bahan Baku

Bahan baku yang digunakan pada saat dilakukan pengecoran meliputi:

a. Bahan Baku Pembuatan Logam Cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair adalah *return scrap* dan *steel scrap*.

b. Bahan Baku Cetakan Pasir

Bahan baku yang digunakan untuk membuat cetakan terdiri dari: pasir silica, asam furan (*furfulyl alcohol*) dan serbuk arang.

c. Bahan Tambahan

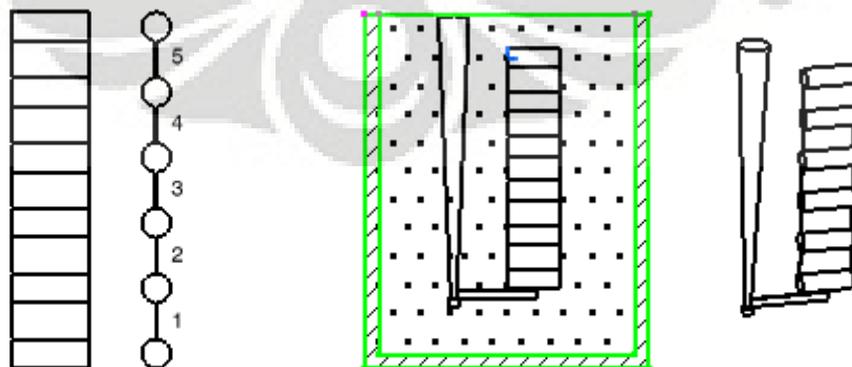
Bahan tambahan yang digunakan untuk mendukung proses pengecoran antara lain *coating* dengan menggunakan *isomol*.

3.3 Prosedur Penelitian

Rancangan awal penelitian adalah membuat TWDI dengan melakukan modifikasi pada desain sistem saluran tuang pengecoran vertikal Stefanescu. Penelitian ini merupakan pengecoran vertikal dengan menggunakan desain T1, dengan ketebalan 1 mm sampai 5 mm dari saluran masuk, Gambar 3.1. Plat yang akan dianalisa dan dibandingkan adalah plat posisi 2 dan 3 antara penuangan pertama (P1T1) dengan penuangan kelima flask D (P5D)

3.3.1 Perbaikan Pola

Penelitian ini diawali dengan perbaikan pola, dimana pola pada penelitian sebelumnya dilakukan perbaikan berupa perbaikan *base plate*. Desain pola yang dipakai tetap menggunakan desain Stefanescu^[7] dengan melakukan modifikasi yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Pola dibuat dengan menggunakan bahan kayu yang terdiri dari 3 kelompok, yaitu: Kelompok benda terdiri dari 5 plat dengan ukuran 150 X 75 mm dengan ketebalan 1, 2, 3, 4, dan 5 mm, kelompok *riser* terdiri dari 6 buah silinder dan kelompok sistem saluran tuang terdiri dari 1 *sprue*, 1 *runner*, dan 1 *ingate*. Setelah itu pola dipasang pada *base plate*, Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Desain pola pada *base plate* dan desain pengecoran sampel T1

3.3.2 Pembuatan Cetakan

Semua pola ditempelkan pada *base plate* yang berukuran sebesar *flask* yang akan digunakan untuk membuat cetakan. *Base plate* yang telah dipasangi pola disebut *pattern plate*, Gambar 3.3.



Gambar 3.3 *Pattern plate* siap digunakan untuk membuat cetakan

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



Gambar 3.4 Proses *merger* dari pasangan cetakan

Sebelum dilakukan pengecoran, cetakan pasir dari kedua sisi *flask* dilakukan *merger*, Gambar 3.4. Proses ini membutuhkan ketelitian agar posisi rongga cetakan sesuai bentuk benda dengan menggabungkan *dowel* yang telah

Universitas Indonesia

dibuat antara sisi positif dan negatifnya. Selain itu ditambahkan juga perekat agar kedua sisi *flask* tidak mengalami kebocoran

3.3.3 Pembuatan Logam Cair dan *Liquid Treatment*

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

3.3.3.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)

Tahap ini terdiri dari:

a. Tahap *charging*

Charging merupakan tahapan pengisian bahan baku pertama kali sebelum dapur dinyalakan. Selain itu, tahapan ini juga terjadi ketika dilakukan peleburan berikutnya dengan kondisi dapur induksi yang masih panas. Material bahan baku meliputi *return scrap* dan *steel scrap*.

b. Tahap *melting*

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

c. Tahap *refining*

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

d. Tahap *tapping*

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

3.3.3.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

Pembuatan besi tuang nodular dilakukan melalui proses *liquid treatment* untuk mengontrol bentuk grafit membentuk bulatan-bulatan atau nodular. Tahapan ini dilakukan bersamaan dengan tahap *tapping*. Tahap ini terdiri dari dua jenis, yaitu inokulasi dan nodulasi. Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam ladle pada temperatur 1480⁰C, sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam ladle di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara langsung dengan logam cair. Selain itu, dengan cara seperti ini jumlah logam Mg yang bereaksi lebih efektif. Proses ini berlangsung sekitar 10- 15 menit. Pada proses ini, inokulan yang digunakan adalah Fe-Si sedangkan nodulan yang digunakan Fe-Si-Mg.

3.3.4 Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Pengontrolan temperatur selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dilakukan penuangan ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan *thermocouple*.

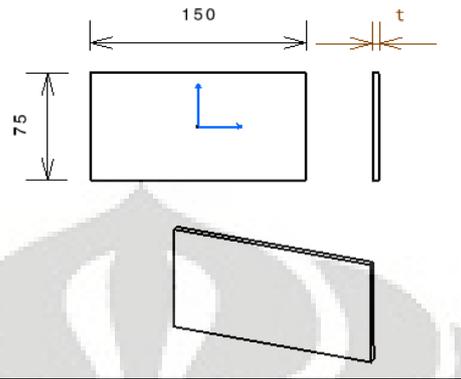
Penuangan ke dalam cetakan dilakukan pada temperatur 1393⁰C dengan waktu penuangan 11 detik untuk P1T1, serta temperatur tuang sekitar 1298⁰C dengan waktu penuangan 10 detik untuk P5D. Perhitungan waktu menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair. Setelah itu didiamkan agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Kemudian dilakukan pembongkaran setelah semua logam cair membeku dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokan pasir, setelah dilakukan pembersihan pasir yang masih menempel dengan *shoot blasting* yang menggunakan bola-bola baja kecil dengan mekanisme penumbukan.

3.3.5 Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan dengan cara memotong plat dari saluran tuang dan riser serta cacat sirip sehingga plat menjadi terpisah. Sampel untuk pengujian diambil dari semua plat hasil pengecoran, Gambar 3.5. Struktur mikro sampel diambil di beberapa bagian dari plat untuk dilakukan pengamatan dan juga

Universitas Indonesia

pada plat-plat tertentu untuk kondisi-kondisi/ anomali-anomali lain yang ada. Pengujian keras dilakukan pada semua plat. Sampel untuk pengujian tarik juga diambil dari semua plat pada bagian lainnya yang tersisa.



Gambar 3.5 Sampel

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

3.3.6 Penamaan Sampel

Pemberian kode dilakukan di awal proses pengecoran. Pada pengecoran tahap satu, penuangan pertama memiliki kode lengkap, yaitu P1T1. Pada tahap kedua, penuangan kelima, proses penuangan dilakukan sebanyak 4 kali ke dalam 4 flask berbeda, dengan desain pengecoran T1, maka kode ditambah lagi dengan kode flask, yaitu: A, B, C, dan D. Sehingga kode sampel lengkap menjadi, sebagai contoh: T1P5- (kode terakhir dimasukkan kode flask).

Pada penelitian ini, sampel yang digunakan P1T1 dengan ketebalan plat 2 mm dan 3 mm dengan kode P1T1-2 dan P1T1-3. Sedangkan sampel lainnya dari P5 pada flask D dengan ketebalan plat 2 mm dan 3 mm dengan kode P5D2 dan P5D3

3.3.7 Pengamatan Makro

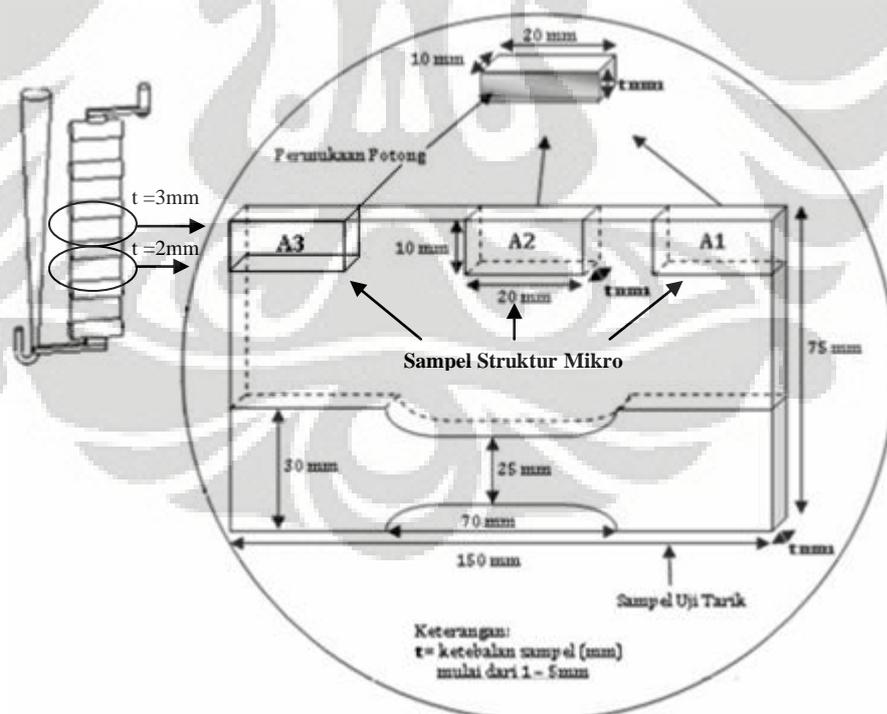
Pengamatan makro dilakukan sesaat setelah benda cor dibongkar dari cetakan dan dibersihkan. Tujuan pengamatan makro ini adalah untuk melihat kondisi dari benda cor sebelum dan sesudah dilakukan proses-proses lanjut seperti

machining yaitu pembuangan saluran tuang dan riser. Kondisi tersebut dilaporkan dalam bentuk foto.

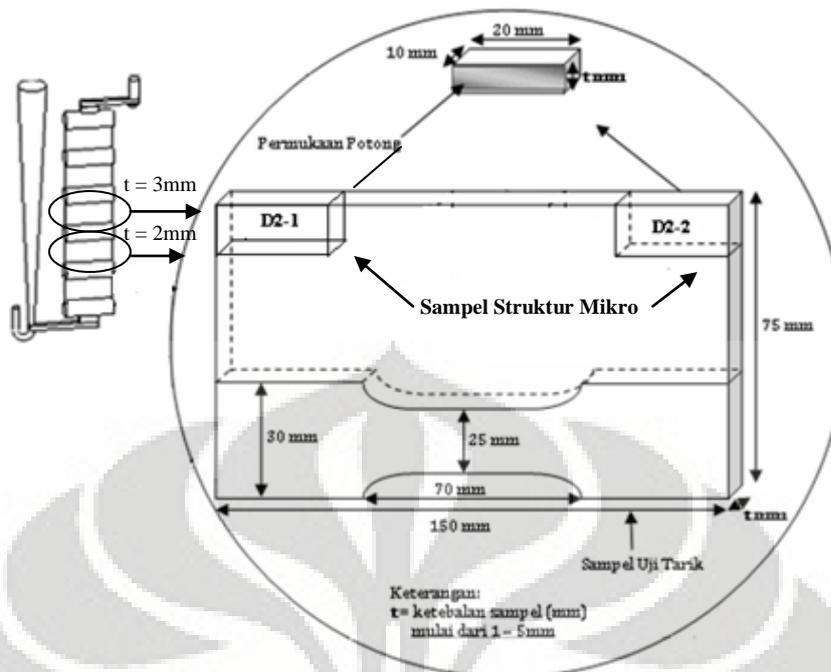
3.3.8 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro secara umum pada tahap awal, yaitu mengidentifikasi jenis grafit dan matriks yang dihasilkan pada plat hasil cor dengan menggunakan mikroskop optik digital. Kelompok yang memenuhi persyaratan akan dilakukan pengamatan lebih lanjut, yang meliputi: pengukuran ketebalan *skin effect*, perhitungan jumlah nodul dan nodularitas. Pengambilan sampel untuk pengamatan struktur mikro dilakukan pada setiap plat. Preparasi sampel pengamatan struktur mikro dilakukan dengan berbagai tahap preparasi antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

1. Pemotongan (*Cutting*) dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong. Untuk sampel P1T1 pengamatan dilakukan pada tiga daerah potong lihat Gambar 3.6. Sementara untuk P5D pengamatan dilakukan pada empat daerah potong di setiap ujung plat, Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Pengambilan sampel uji dari plat P1T1



Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat P5D

2. *Mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media, Gambar 3.8. Terlebih dahulu sampel dimasukkan ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan selama kurang lebih 8 menit. Setelah itu didinginkan selama kurang lebih 6 menit dengan media air.



(a)



(b)

Gambar 3.8 Sampel hasil Mounting (a) P1T1 (b) P5D

3. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas berturut-turut dengan nomor grit #80, #180, #360, #500, #700, #800 dan #1200. Pada saat

pengamplasan, pemberian air dilakukan untuk menghindarkan efek pemanasan terhadap struktur mikro dan mengalirkan geram logam yang terkikis. Selain itu, perubahan arah pengamplasan yang baru adalah 45° atau 90° terhadap arah sebelumnya.

4. Setelah dilakukan pengamplasan, maka dilakukan pemolesan dengan menggunakan alumina. Proses pengerjaannya sama dengan pengamplasan.
5. Setelah permukaan telah rata, dilakukan proses etsa. Sampel dicelupkan ke dalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan. Dengan menggunakan etsa Nital, fasa ferit dan karbida terlihat berwarna terang dan perlit berwarna gelap.

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



Gambar 3.9 Mikroskop optik digital

Selain melakukan pengamatan juga dilakukan perhitungan jumlah nodul dengan diameter minimal nodul yang akan dihitung yaitu $5\ \mu\text{m}$ dan perhitungan nodularitas dengan *software* berdasarkan perhitungan *image analysis*^[7].

3.3.9 Pengujian Sifat Mekanis

Sampel uji tarik diambil dari semua plat. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia, Gambar 3.10. Spesimen tarik dibuat dengan mengikuti JIS Z2201 No. 13.B^[32].

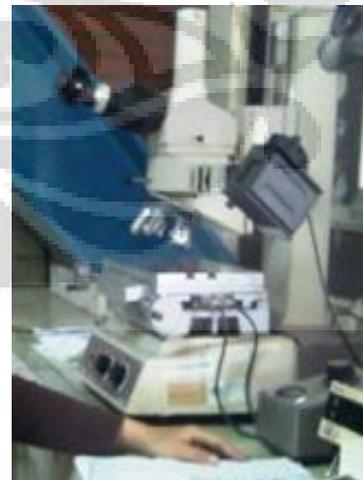


Gambar 3.10 Mesin uji tarik

Sampel uji keras diambil dari semua plat. Pengujian keras dilakukan dengan menggunakan mesin uji keras Brinell dan pengukuran diameter jejak dengan *measuring microscope* di Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia Gambar 3.11



(a)



(b)

Gambar 3.11 (a) Mesin uji keras Brinell (b) *Measuring microscope*

3.3.9.1 Prinsip Dasar Pengujian

Identifikasi grafit dilakukan dengan mengambil acuan pada ASTM A247^[19] dan JIS G5502^[17]. Sedangkan identifikasi matriks dilakukan dengan melihat pada ASM Handbook^[11,16,33] dan referensi-referensi lain. Untuk identifikasi anomali digunakan *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*^[34].

Pengujian mekanis untuk pengujian tarik mengikuti pada standar JIS Z2241^[35]. Sedangkan pengujian keras menggunakan metode metode Brinell yang mengacu pada ASTM E-10 “*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*”^[36].

3.3.9.2 Teknik Pengolahan Data

1. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan *tensile strength machine*. Prinsip kerja mesin uji tarik adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinyu sambil diukur pertambahan panjangnya. Beban yang digunakan sebesar 20 ton kemudian ditarik sampai putus. Dari pengujian didapatkan grafik beban (P) terhadap perubahan panjang (dL). Dari data yang didapat kemudian diolah sehingga didapatkan nilai kekuatan tarik serta elongasi dari masing-masing plat. Grafik diplot untuk mendapatkan nilai UTS dengan menggunakan Rumus 3.1,

$$UTS = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

dan untuk mendapatkan nilai elongasi dengan menggunakan Rumus 3.2,

$$\% \text{ elongasi} = \frac{dL}{L_0} \times 100 \% \quad (3.2)$$

Dimana,

- P = beban yang diberikan (kg)
- A₀ = luas permukaan spesimen uji tarik awal (mm²)
- dL = perubahan panjang (mm)
- L₀ = panjang spesimen awal (mm)

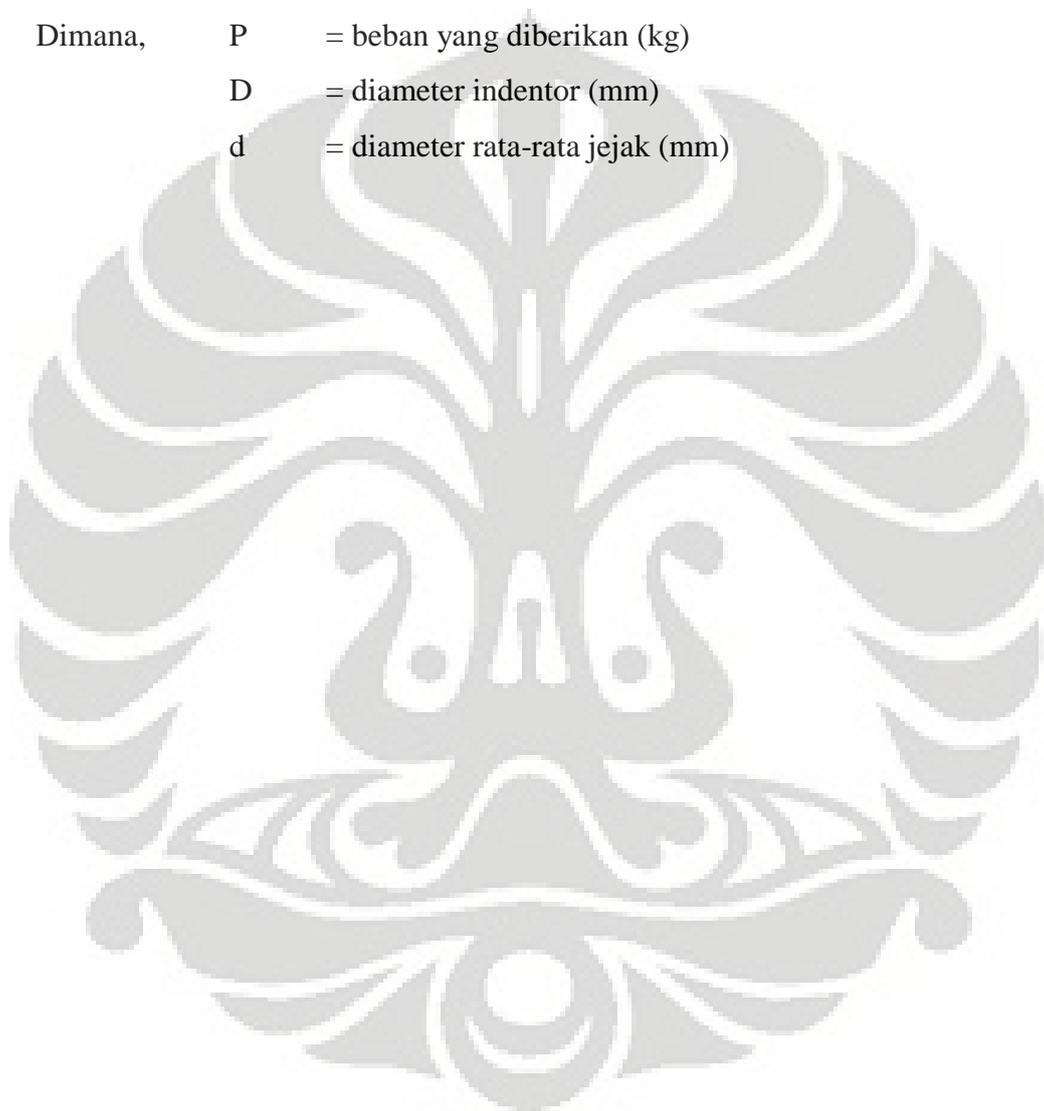
2. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metode Brinell dengan pengukuran jejak menggunakan *measuring microscope*. Indentor yang digunakan adalah berbentuk bola, sehingga jejak yang dihasilkan adalah lingkaran. Beban yang diberikan 187.5 kg selama 15 detik. Didapatkan dua pengukuran diameter jejak

sumbu x dan sumbu y yang kemudian dirata-ratakan menjadi diameter rata-rata. Diameter rata-rata jejak yang diukur kemudian diolah dengan dimasukkan ke dalam rumus 3.3. Sehingga didapatkan sifat mekanis berdasarkan kekerasan material.

$$\text{BHN} = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (3.3)$$

Dimana, P = beban yang diberikan (kg)
D = diameter indentor (mm)
d = diameter rata-rata jejak (mm)



BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Komposisi Kimia

Komposisi kimia untuk FCD 450 berdasarkan standar pabrik dapat dilihat pada Tabel 4.1. Hasil pengujian komposisi kimia terlihat pada Tabel 4.2 kemudian dibandingkan dengan standar pabrik.

Tabel 4.1. Komposisi kimia logam cair standar pabrik^[36]

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Cr	%Ni	%Mg
3.5-3.9	2.4-2.8	0.3-0.5	0.03 max	0.02 max	0.15 max	0.15 max	0.15 max	0.03 min

Tabel 4.2. Komposisi kimia logam cair

Penuangan	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Cr	%Ni	%Mg
P1	3.84	2.60	0.37	0.02	0.023	0.04	0.04	0.03	0.04
P5	3.82	2.77	0.36	0.02	0.023	0.02	0.05	0.03	0.07

Secara umum, komposisi kimia logam cair kedua penuangan, P1 dan P5 masuk ke dalam range komposisi kimia logam cair untuk FCD 450. Namun, kandungan sulfur untuk kedua penuangan berada sedikit di atas standar pabrik yang kemungkinan menyebabkan terikatnya sulfur dengan Mg sehingga menyebabkan terjadinya *skin effect*^[27].

4.1.1 Carbon Equivalent (CE)

Dari hasil komposisi kimia, didapatkan nilai Carbon Equivalent (CE) yang dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Kadar CE logam cair

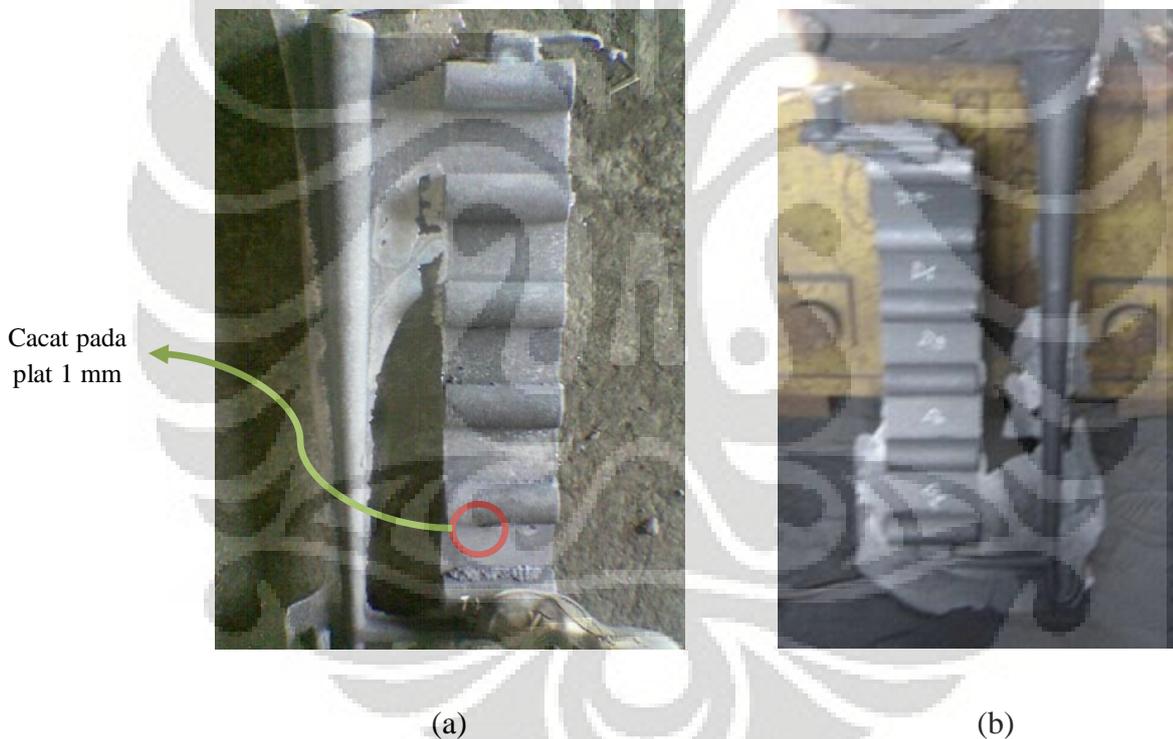
Penuangan	%C+0.31%Si	%C+0.3%Si+0.33%P-0.027%Mn+0.4%S	%C+0.25%Si+0.50%P
P1	4.65	4.63	4.50
P5	4.68	4.66	4.52

Jika melihat pada nilai CE yang diperoleh dari tabel 4.3, P1 dengan nilai CE 4,65 % dan P5 dengan nilai CE 4,68 %. Sedangkan, perhitungan nilai CE untuk fluiditas (%C+0,25%Si+0,50%P) dihasilkan sebesar 4,50% untuk P1 dan 4,52% untuk P5.

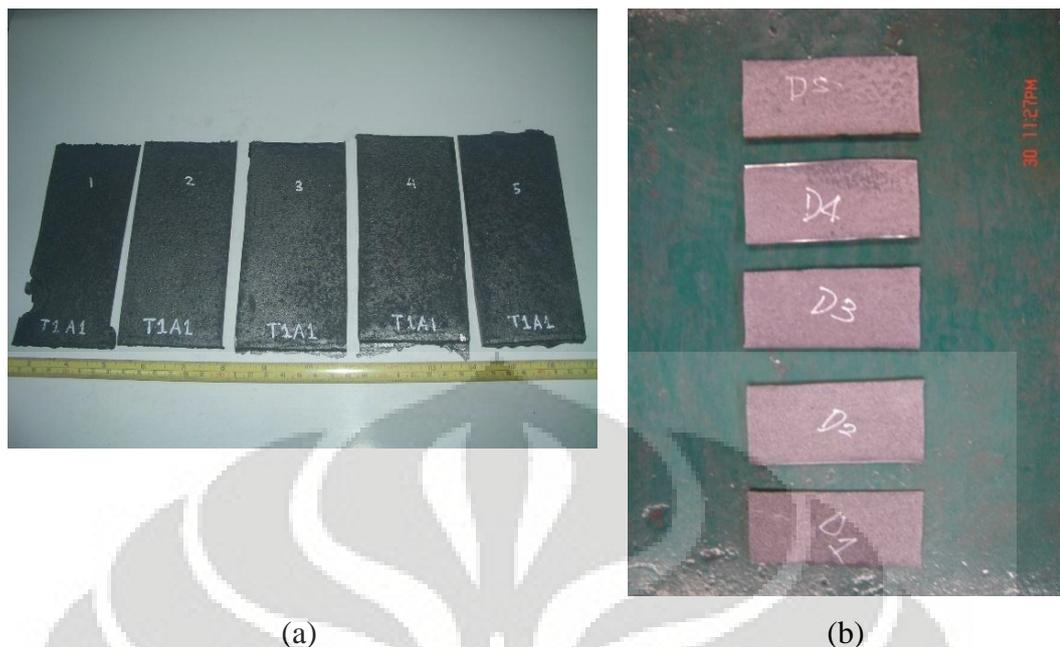
Nilai CE sebesar 4,65% dan 4,68% memenuhi persyaratan CE minimum oleh Loper untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida. Akan tetapi, nilai ini tidak cukup untuk memenuhi persyaratan struktur bebas dari karbida pada ketebalan 3 – 5 mm untuk TWDI (4,75 – 4,92%). Hal ini dibuktikan masih ada struktur karbida pada hasil pengecoran pada plat dengan ketebalan 1-5 mm pada PIT1. Namun, karbida tidak ditemui pada P5 dengan ketebalan 1- 5 mm. Di lain pihak, Nilai CE sebesar 4,65% dan 4,68% 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.

4.2 Pengamatan Visual

Hasil pengecoran PIT1 dan P5D dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Benda dan saluran tuang hasil pengecoran
(a) PIT1 (b) P5D



Gambar 4.2 Benda setelah dilakukan proses *cutting* (a) P1T1 dan (b) P5D

Hasil pengecoran P1T1 menunjukkan cetakan terisi sempurna. Ditemukan cacat sirip sepanjang sprue atas yang menyatu dengan plat posisi 5 dan sebagian posisi 4 dikarenakan kemungkinan terbentuknya celah antara *parting line* karena tidak kuat menahan beban logam cair saat memasuki *sprue* sehingga cetakan menjadi bergeser dan tidak rapat, Gambar 4.1(a). Cacat lain yang terjadi adalah kemungkinan terdapat *shrinkage* atau inklusi padatan pada plat 1 mm. Namun, cacat ini tidak mempengaruhi pengambilan sampel uji.

Hasil pengecoran P5D menunjukkan cetakan terisi sempurna. Namun, berkebalikan dengan P1T1, cacat sirip yang terjadi pada hasil pengecoran P5D berada di sepanjang *sprue* bagian bawah menempel dengan plat posisi 1 dan *riser* posisi 1 dan posisi 2. Cacat ini kemungkinan terjadi akibat adanya celah pada *parting line* karena tidak kuatnya cetakan pada bagian bawah menerima tekanan yang sangat tinggi akibat peletakan plat tipis setelah *ingate*, Gambar 4.1 (b). Tidak ditemukan cacat lain pada hasil pengecoran.

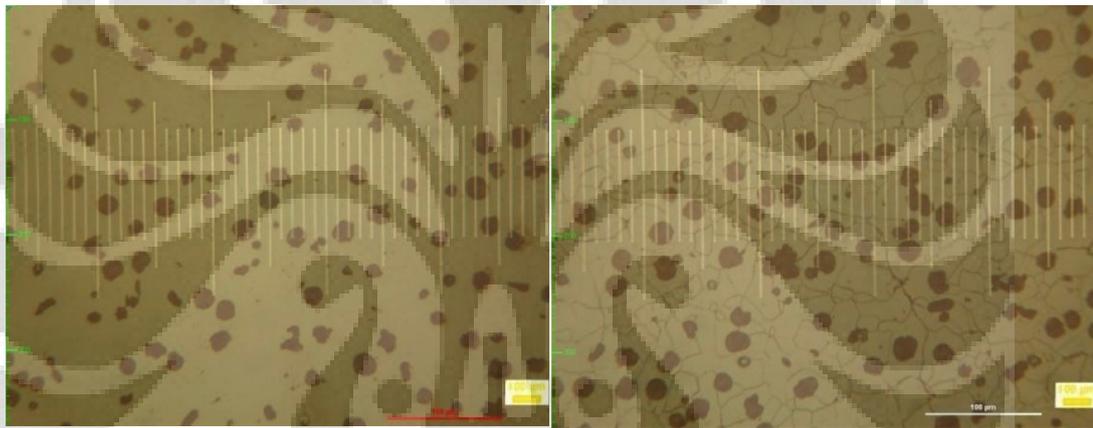
4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro meliputi indentifikasi grafit dilakukan dengan mengambil acuan pada ASTM A247^[19] dan JIS G5502^[17]. Sedangkan indentifikasi matriks dilakukan dengan melihat pada ASM Handbook^[11,16,33] dan

referensi-referensi lain. Untuk indentifikasi anomali digunakan *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*^[34].

4.3.1 Nodularitas dan Jumlah Nodul

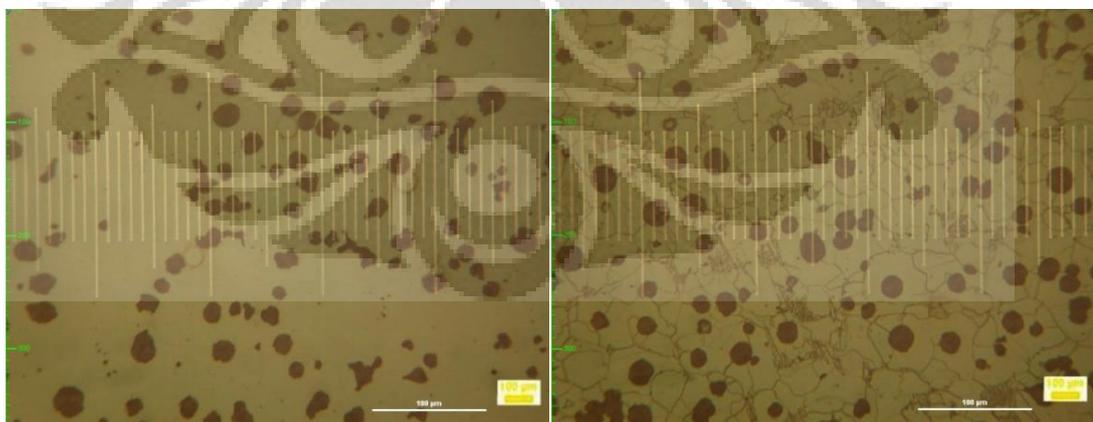
. Perhitungan nodularitas dan jumlah nodul menggunakan perhitungan *image analysis* dengan diameter minimal yang dihitung adalah 5 μm , seperti terlihat pada gambar 4.3 dan 4.4 untuk plat 2 mm dan 3 mm P1T1 dan Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 untuk plat 2 mm dan 3 mm P5D. Sebagai pembanding untuk plat 2 mm dan 3 mm, nodularitas pada plat 1 mm, 4 mm, dan 5 mm ditunjukkan pada Gambar 4.5 untuk P1T1 dan Gambar 4.8 untuk P5D. Perhitungan dilakukan menggunakan NIS *software*.



(a) P1T1A1 gambar 1

(b) P1T1A1 gambar 2

Gambar 4.3 Struktur mikro P1T1 plat 2 mm

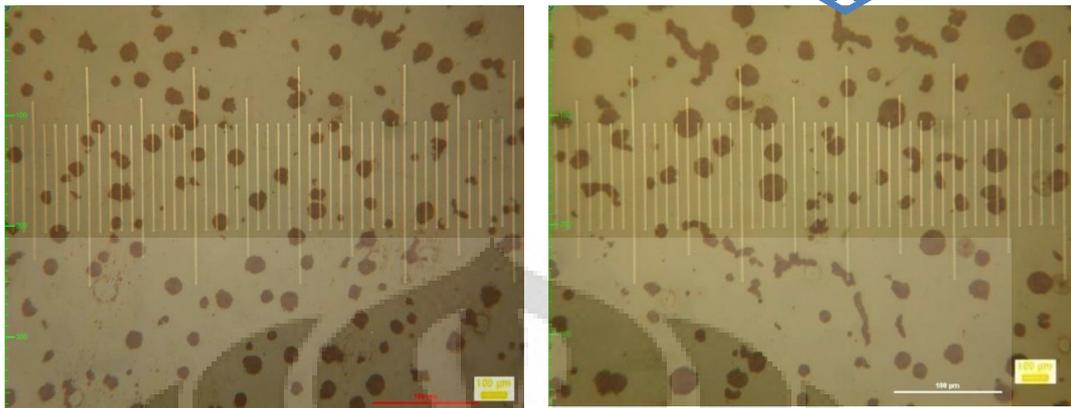


(a) P1T1A1 gambar 1

(b) P1T1A1 gambar 2

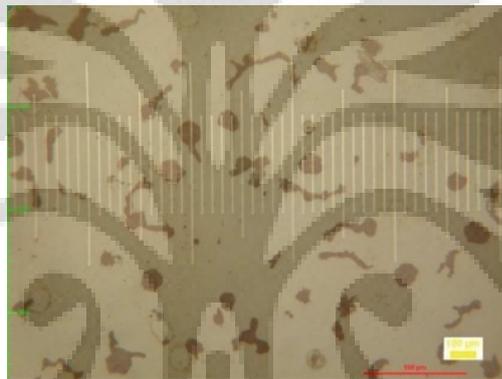
Gambar 4.4 Struktur mikro P1T1 plat 3 mm

Grafit Serpih



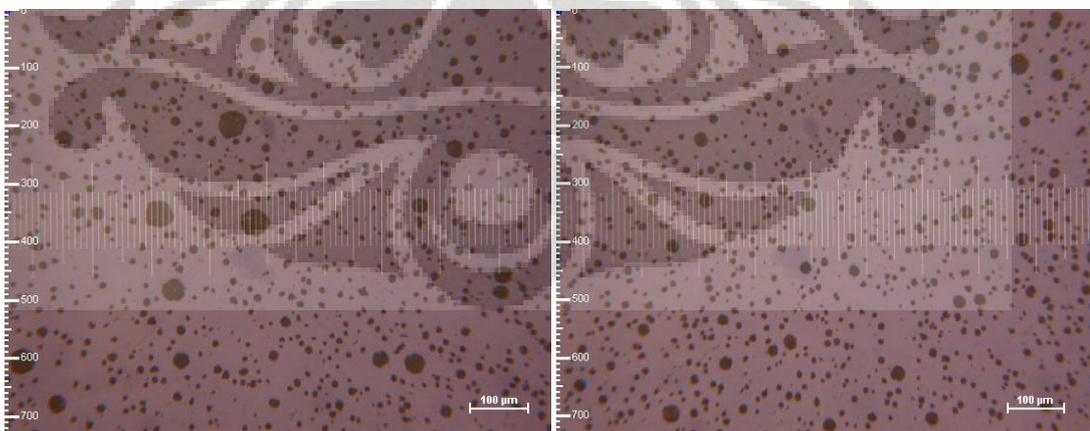
(a) P1T1A1 plat 1 mm

(b) P1T1A1 plat 4 mm



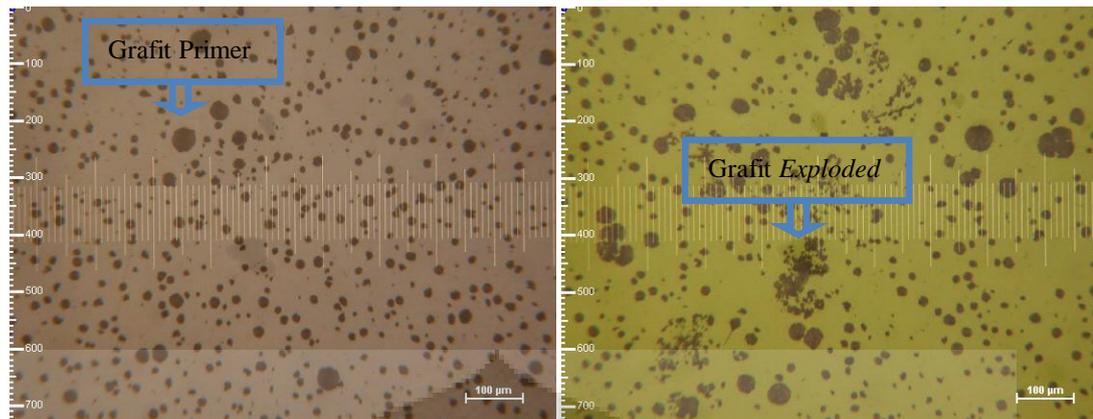
(c) P1T1A1 plat 5 mm

Gambar 4.5 Struktur Mikro P1T1A1 plat 1 mm, 4 mm, dan 5 mm



(a) D2-1 gambar 1

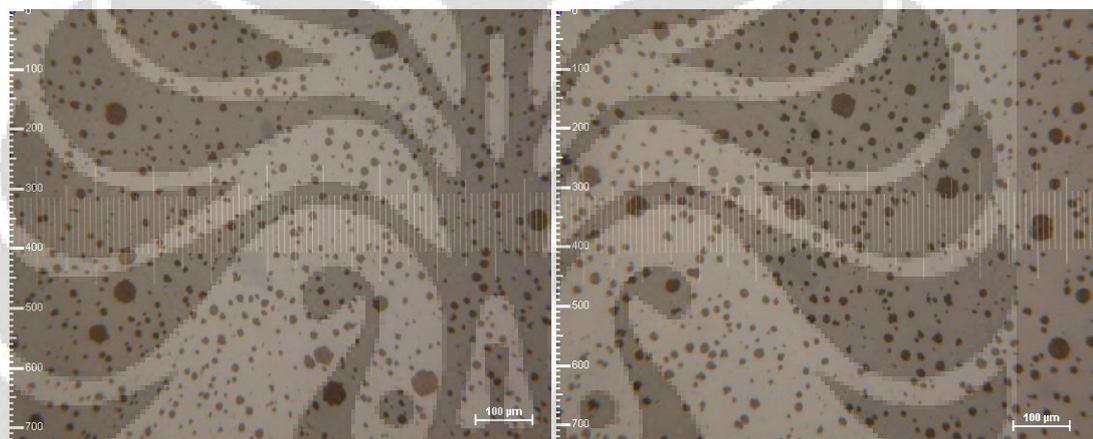
(b) D2-1 gambar 2



(c) D2-2 gambar 1

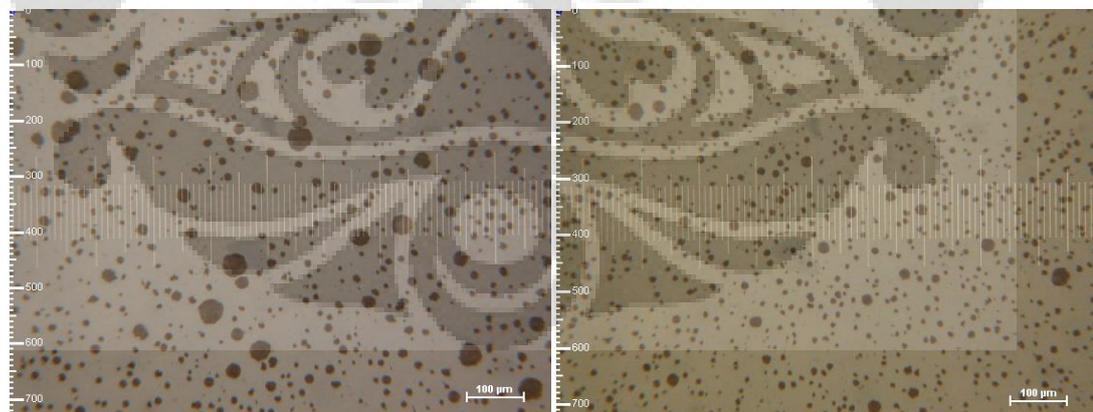
(d) D2-2 gambar 2

Gambar 4.6. Struktur mikro P5D plat 2 mm dari dua daerah pengamatan



(a) D3-1 gambar 1

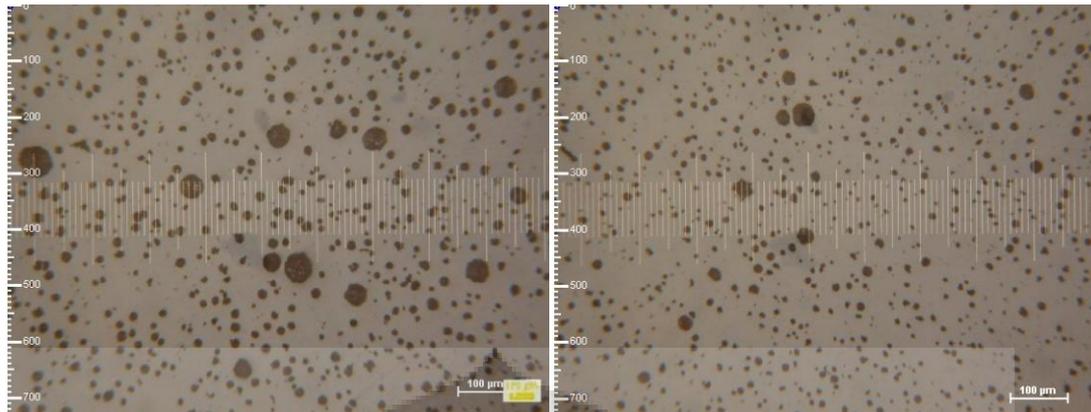
(b) D3-1 gambar 2



(c) D3-2 gambar 1

(d) D3-2 gambar 2

Gambar 4.7 Struktur mikro P5D plat 3 mm dari dua daerah pengamatan



(a) Struktur mikro P5D1

(b) Struktur mikro P5D4



(c) Struktur mikro P5D5

Gambar 4.8 Struktur mikro P5D plat (a) 1 mm, (b) 4 mm, (c) dan 5 mm

Hasil perhitungan nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata dengan menggunakan NIS *software* dapat dilihat pada Tabel 4.4 untuk P1T1 dan Tabel 4.5 untuk P5D.

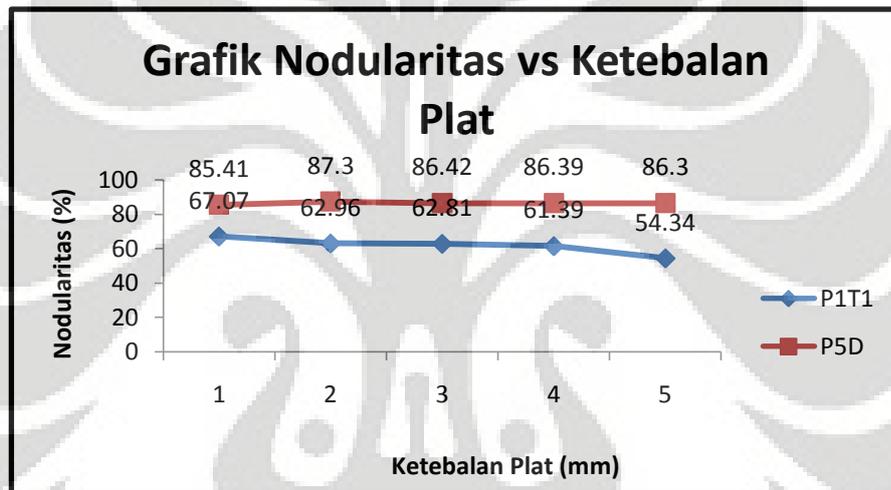
Tabel 4.4. Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata P1T1

Ketebalan (mm)	Nodularitas Rata-Rata (%)	Jumlah Nodul Rata-Rata (nodul/mm ²)	Diameter Nodul Rata-Rata (μm)
1	67.07	811	13.34
2	62.96	835	13.27
3	62.81	826	13.20
4	61.39	660	14.77
5	54.34	399	17.23

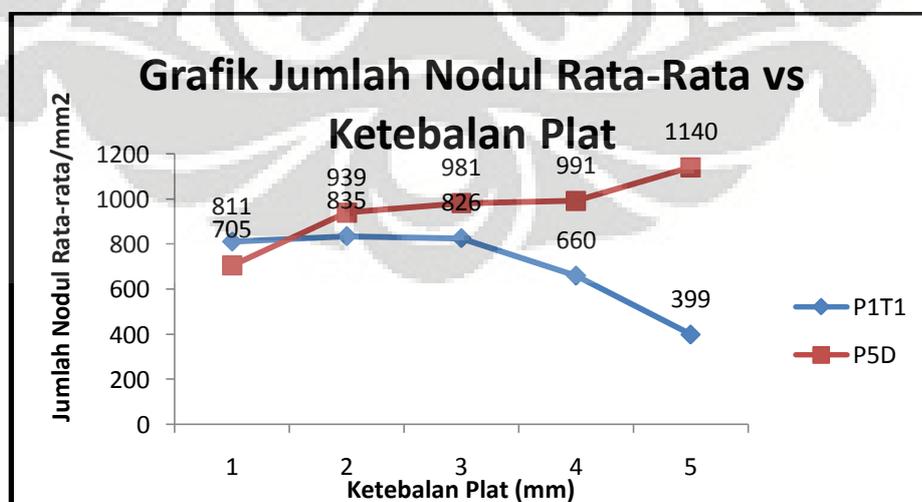
Tabel 4.5. Nodularitas dan jumlah nodul rata-rata P5D

Ketebalan (mm)	Nodularitas Rata-Rata (%)	Jumlah Nodul Rata-Rata (nodul/mm ²)	Diameter Nodul Rata-Rata (μm)
1	85.41	705	10.97
2	87.30	939	11.01
3	86.42	981	11.01
4	86.39	991	10.26
5	86.30	1140	8.67

Data nodularitas dan jumlah nodul pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 di plot ke dalam grafik, Gambar 4.9 dan Gambar 4.10.



Gambar 4.9. Grafik nodularitas terhadap ketebalan plat



Gambar 4.10. Grafik jumlah nodul rata-rata terhadap ketebalan plat

Secara umum nodularitas menurun seiring dengan pertambahan ketebalan plat. Hal ini disebabkan karena proses *liquid treatment* berlangsung optimal pada waktu dan temperatur yang spesifik. Liquid treatment yang berlangsung optimal akan menghasilkan nodularitas yang tinggi.

Dari data pengamatan P1T1, didapatkan bahwa semakin tebal plat maka nodularitas yang didapat semakin menurun. Begitupun dengan jumlah nodul menurun seiring pertambahan ketebalan plat. Sementara diameter nodul rata-rata meningkat seiring pertambahan ketebalan plat.

Dari data pengamatan P5D, didapatkan bahwa secara umum semakin tebal plat maka nodularitas yang didapat semakin menurun. Begitupun dengan diameter nodul rata-rata semakin menurun. Namun jumlah nodul semakin meningkat seiring pertambahan ketebalan plat.

Nodularitas yang didapat pada sampel P5D lebih tinggi dibanding dengan sampel P1T1. Hal ini disebabkan karena *liquid treatment* pada P5D lebih baik daripada P1T1. Terbukti dengan adanya grafit serpih pada struktur mikro P1T1 yang menyebabkan nodularitas menurun.

Nodularitas akan mempengaruhi sifat mekanis plat meliputi kekuatan tarik dan elongasi. Namun dari data kedua penuangan tidak menunjukkan adanya hubungan antara nodularitas dan jumlah nodul karena masing-masing berdiri sendiri. Nodularitas berhubungan dengan bentuk grafit dan jumlah nodul berhubungan dengan jumlah grafit.

4.3.2 Karakteristik Grafit

Pada sampel P5D ditemukan grafit primer dan grafit *exploded*, Gambar 4.6. Grafit primer terbentuk karena terdapatnya kelebihan Si. Grafit primer ini akan mempengaruhi sifat mekanis karena menyebabkan distribusi tegangan menjadi tidak merata. Sedangkan grafit *exploded* terjadi akibat kurangnya kecepatan pendinginan sehingga masih adanya panas yang tertahan akibat gradient temperatur pendinginan yang tidak signifikan. Hal ini pun dapat mempengaruhi nodularitas. Oleh karena itu, nodularitas P5D tidak begitu besar.

FCD yang dapat dijadikan memiliki persyaratan yang harus dipenuhi^[24]. Syarat FCD untuk ADI adalah:

1. Nodularitas > 80%

Nodularitas untuk P1T1 tidak mencapai > 80%. Nodularitas pada P1T1 yang dimiliki setiap plat berkisar antara (54-67)%. Pada ketebalan plat (1-5) mm nodularitas semakin menurun. Nodularitas yang dimiliki oleh plat 2 mm sebesar 62.96% dan plat 3 mm sebesar 62.81%.

Nodularitas untuk semua plat P5D mencapai > 80%. Nodularitas pada P5D yang dimiliki setiap plat berkisar antara (86-87)%. Pada ketebalan plat (2-5) mm nodularitas semakin menurun. Nodularitas yang dimiliki oleh plat 2 mm sebesar 87.3% dan merupakan yang tertinggi. Sedangkan plat 3 mm memiliki nodularitas sebesar 86.42%.

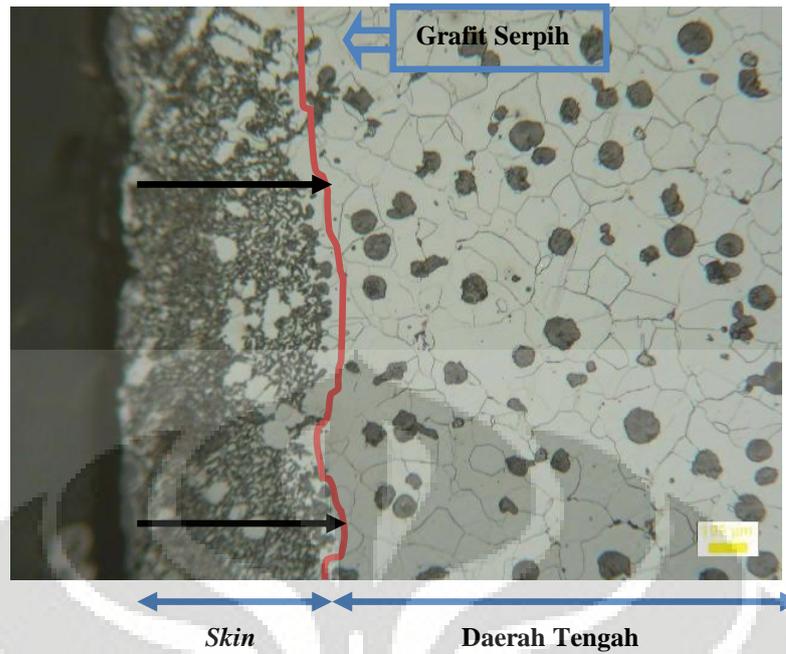
2. Jumlah nodul > 100 nodul/mm²

Jumlah nodul untuk semua plat P1T1 dan P5D melebihi 100 nodul/mm². Jumlah nodul P1T1 berkisar antara (800-300) nodul/mm². Jumlah nodul rata-rata untuk plat 2 mm dan plat 3 mm antara 830-an nodul/mm² dan 820-an nodul/mm². Secara umum, semakin tebal plat jumlah nodul yang didapat semakin berkurang.

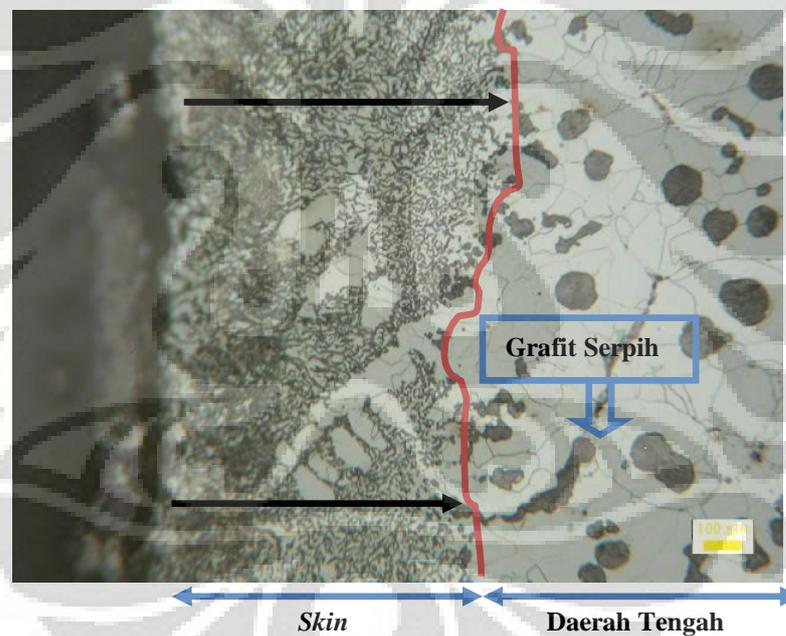
Jumlah nodul untuk P5D pada dua bagian tepi dapat dikategorikan merata. Jumlah nodul P5D berkisar antara (700-1100) nodul/mm². Jumlah nodul pada plat 2 mm dan 3 mm mencapai (930-980) nodul/mm². Berbeda dengan sampel P1T1, Jumlah nodul pada P5D lebih besar dibanding P1T1 dan secara umum pada sampel P5D terlihat bahwa jumlah nodul meningkat seiring pertambahan ketebalan plat.

4.3.3 Lapisan Kulit (*Skin Effect*)

Dari pengamatan struktur mikro P1T1, ditemukan adanya grafit serpih pada bagian tepi struktur mikro. Fenomena ini disebut sebagai *skin effect*. Lapisan kulit ini merupakan kumpulan grafit yang berbentuk serpihan dalam matriks. Pengamatan lapisan kulit pada penelitian ini diambil dari plat dengan ketebalan 2 mm dan 3 mm, Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.

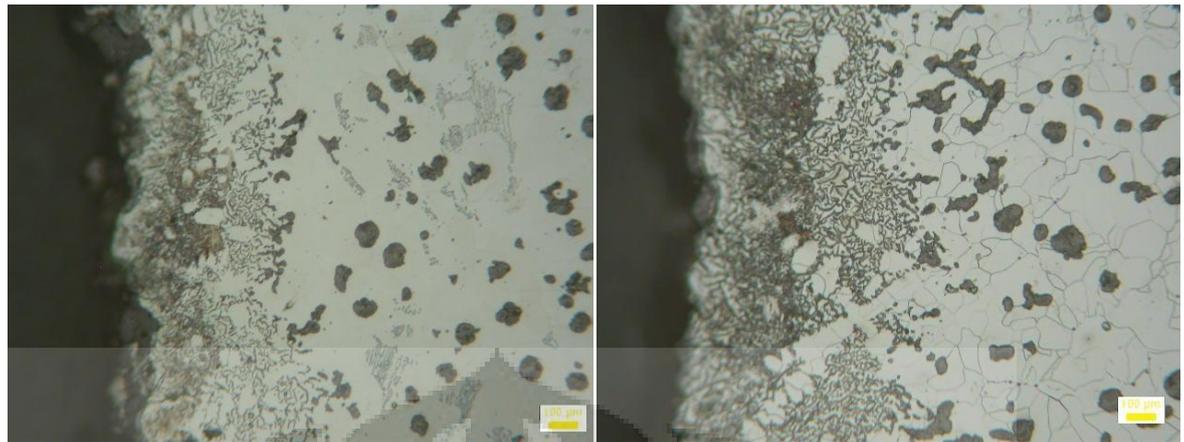
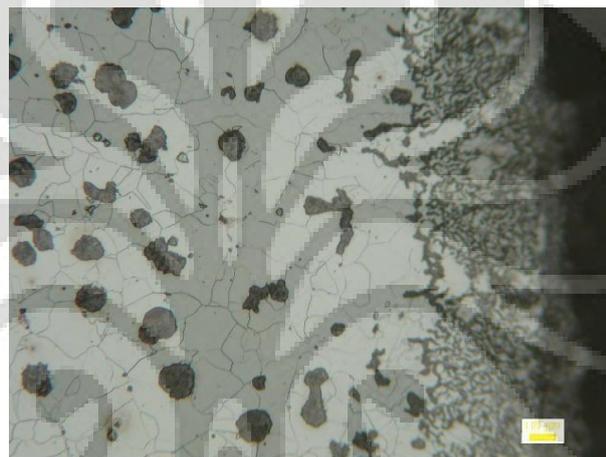


Gambar 4.11 *Skin Effect* pada PIT1-plat 2 mm



Gambar 4.12 *Skin Effect* pada PIT1-plat 3 mm

Sebagai pembanding untuk plat 2 mm dan 3 mm, *skin* pada plat 1 mm, 4 mm, dan 5 mm ditunjukkan pada Gambar 4.13.

(a) *Skin* pada plat 1 mm(b) *Skin* pada plat 4 mm(c) *Skin* pada plat 5 mmGambar 4.13 *Skin* pada PIT1 plat (a) 1 mm, (b) 4 mm, dan (c) 5 mm

Dari pengamatan struktur mikro terlihat bahwa pada bagian tepi struktur mikro terdapat grafit berbentuk serpih dengan ketebalan yang dapat diperhitungkan. Di bagian menuju ke tengah terdapat campuran grafit antara grafit serpih dan grafit nodul. Pada daerah tengah (*bulk*) menunjukkan terbentuknya grafit nodul.

Perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dengan daerah tengah kemungkinan merupakan penyebab terjadinya perbedaan bentuk grafit serpih. Bagian tepi positif mengalami segregasi mikro Mg. Perbedaan kandungan Mg bertanggung jawab mengubah bentuk grafit dari spheroidal di daerah tengah menjadi serpih pada permukaan. Kandungan Mg yang lebih rendah pada daerah tepi merupakan hasil oksidasi Mg oleh gas dari cetakan. Kadar sulfur yang berlebih pada logam cair juga merupakan faktor terbentuknya *skin effect*, dimana sulfur kemudian

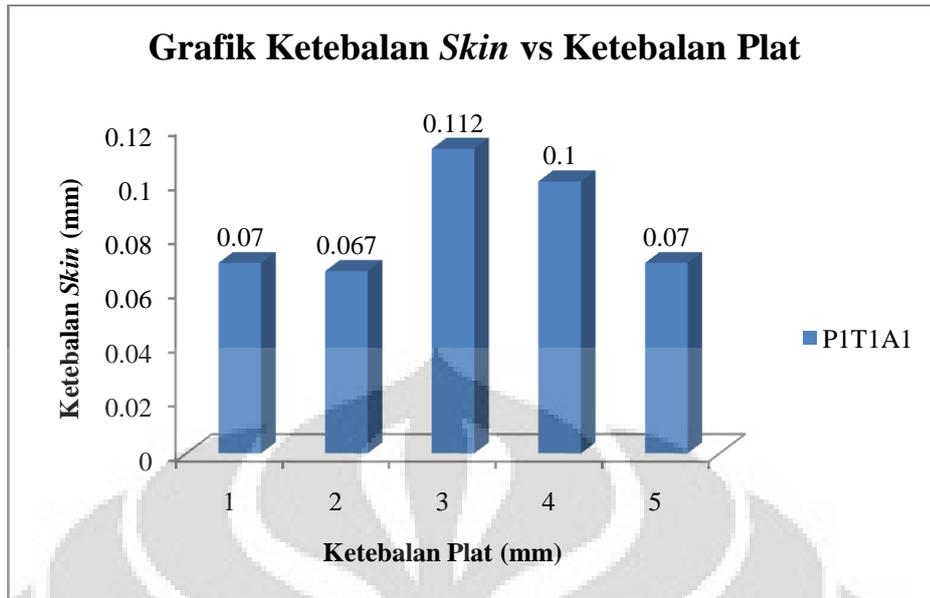
berikatan dengan Mg. Hal ini menyebabkan *liquid treatment* tidak berjalan dengan baik sehingga terbentuk grafit serpih pada permukaan benda. Sulfur juga dapat berasal dari sistem binder seperti furan dalam jumlah yang tinggi, sehingga dapat bereaksi dengan magnesium dalam logam cair. *Skin effect* ini dapat menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih dapat bertindak sebagai pusat tegangan dan daerah inisiasi retak.

Data pengukuran ketebalan *skin effect* menggunakan data penelitian sebelumnya, dimana untuk mengukur ketebalan *skin effect* yang terbentuk dilakukan pengukuran pada 9 titik sepanjang permukaan sampel tepi (A1). Pengukuran dilakukan pada gambar perbesaran 200x, maka hasil pengukuran dalam satuan millimeter (mm). Kemudian dibagi 200 untuk mendapatkan hasil sebenarnya. Hasil ketebalan *skin* terlihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Pengukuran ketebalan *skin effect* T1A1

n ke	P1T1A1-1 (mm)	P1T1A1-2 (mm)	P1T1A1-3 (mm)	P1T1A1-4 (mm)	P1T1A1-5 (mm)
1	0.085	0.063	0.115	0.088	0.060
2	0.080	0.073	0.118	0.105	0.060
3	0.055	0.063	0.110	0.083	0.080
4	0.065	0.073	0.103	0.095	0.075
5	0.075	0.078	0.095	0.110	0.068
6	0.060	0.100	0.118	0.105	0.065
7	0.070	0.060	0.113	0.098	0.073
8	0.058	0.053	0.123	0.103	0.075
9	0.078	0.045	0.118	0.108	0.068
Mean	0.070	0.067	0.112	0.100	0.070

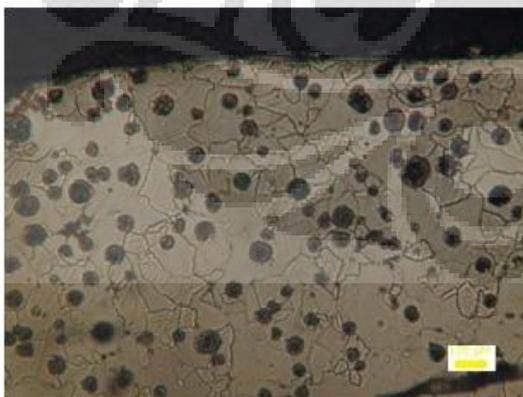
Data-data tersebut lalu di plot ke dalam grafik, Gambar 4.14.



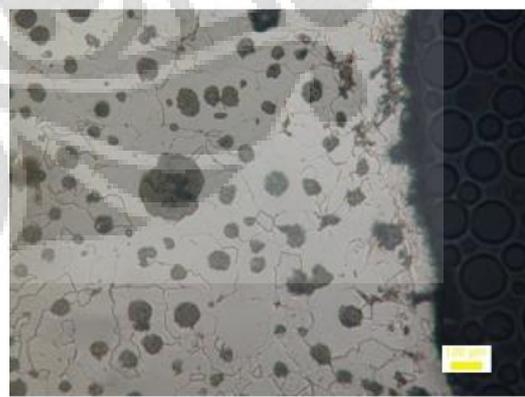
Gambar 4.14 Grafik ketebalan *skin* terhadap ketebalan plat

Dari data pengukuran *skin effect* pada sampel tepi, ketebalan *skin effect* hampir seragam tetapi ketebalan *skin effect* yang berbeda terlihat pada sampel 3 mm dan 4 mm. Sejauh pengamatan penelitian, *skin effect* yang terjadi tidak berhubungan terhadap perubahan ketebalan benda cor dinding tipis.

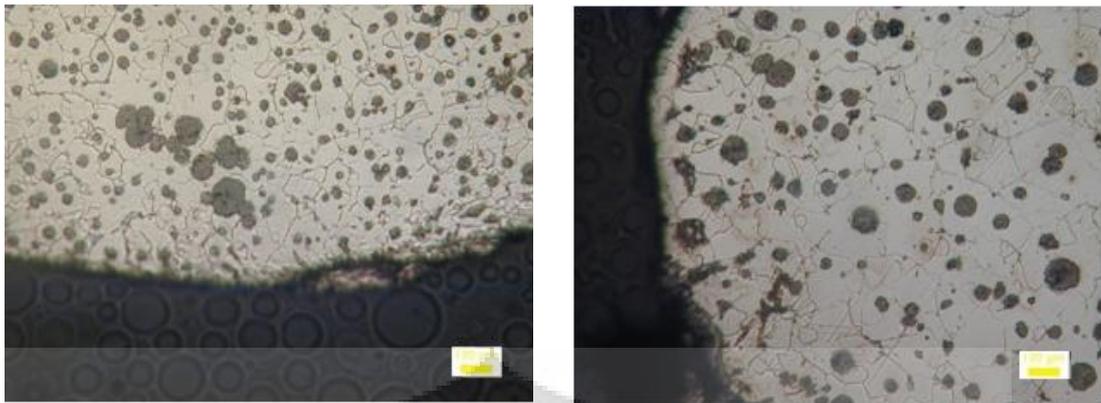
Dari hasil pengamatan struktur mikro PSD, secara umum tidak ditemukan adanya lapisan kulit. Pengamatan *skin effect* dilakukan pada plat dengan ketebalan 2 mm dan 3 mm dengan empat daerah pengamatan yang berbeda, Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



(a) D2-1



(b) D2-2



(c) D2-3

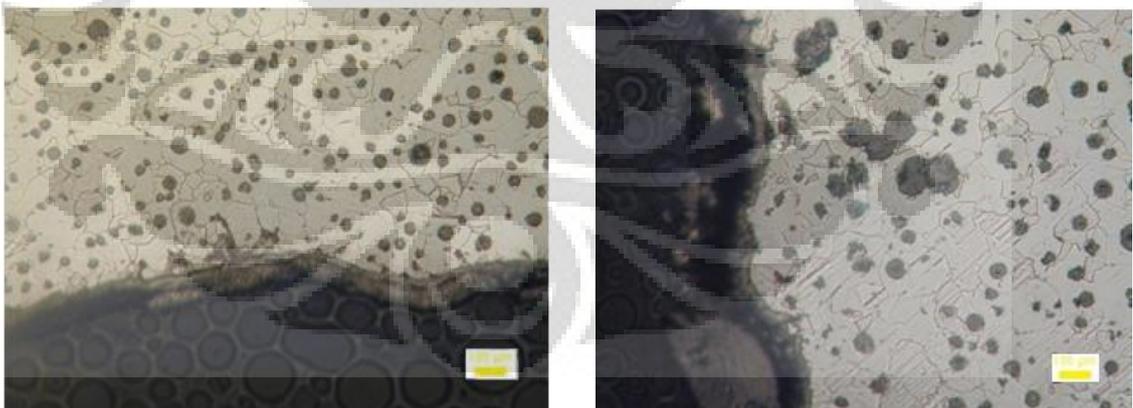
(d) D2-4

Gambar 4.15 Bagian tepi struktur mikro P5D, ketebalan plat 2 mm dari empat daerah pengamatan



(a) D3-1

(b) D3-2



(c) D3-3

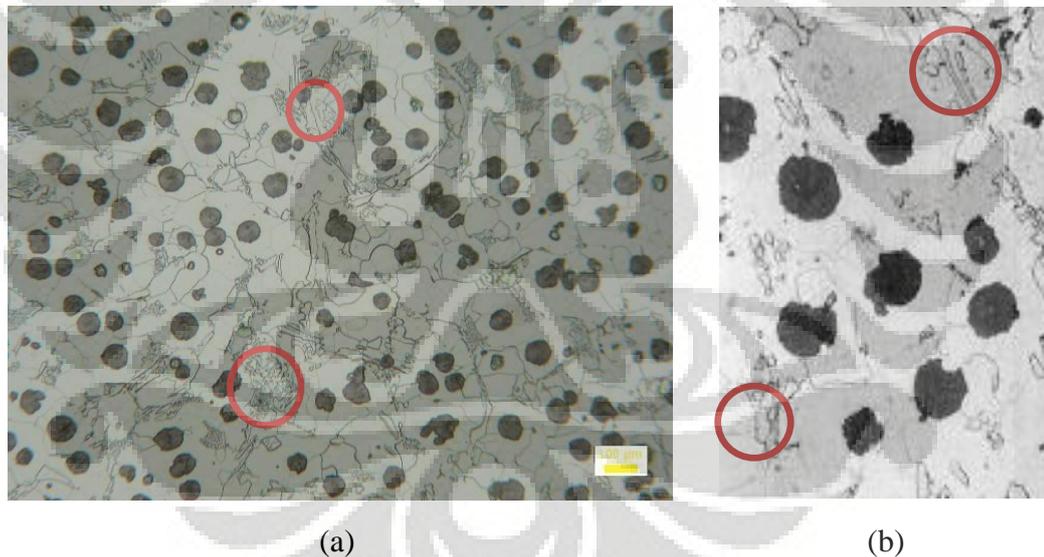
(d) D3-4

Gambar 4.16 Bagian tepi struktur mikro P5D, ketebalan plat 3 mm dari empat daerah pengamatan

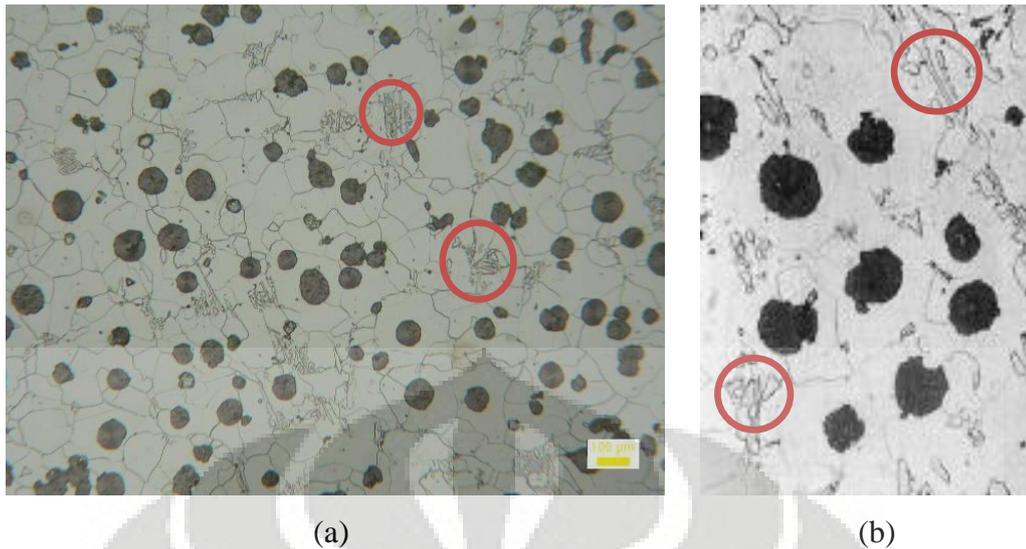
Tidak terbentuknya lapisan kulit ini dapat terjadi karena tepatnya proses *liquid treatment* sehingga grafit dapat membulat tanpa adanya grafit serpih akibat kegagalan dalam proses *liquid treatment*. Selain itu, kadar S dalam logam cair ataupun dalam furan yang tidak berikatan dengan Mg menyebabkan *liquid treatment* berjalan dengan baik dan Mg tidak mengalami oksidasi oleh gas dari cetakan.

4.3.4 Matrik dan Karbida

Seluruh plat dari P1T1 dan P5D menghasilkan matrik ferit. Dari struktur mikro P1T1 ditemukan adanya karbida dalam matriks ferit. Karbida dalam matriks ferit dapat dilihat pada semua plat untuk berbagai ketebalan. Karbida terbentuk akibat kecepatan pendinginan yang tinggi serta karakteristik logam cair dan *liquid treatment* yang kurang baik dan optimal. Pada penelitian ini diambil plat dengan ketebalan 2 mm dan 3 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18.



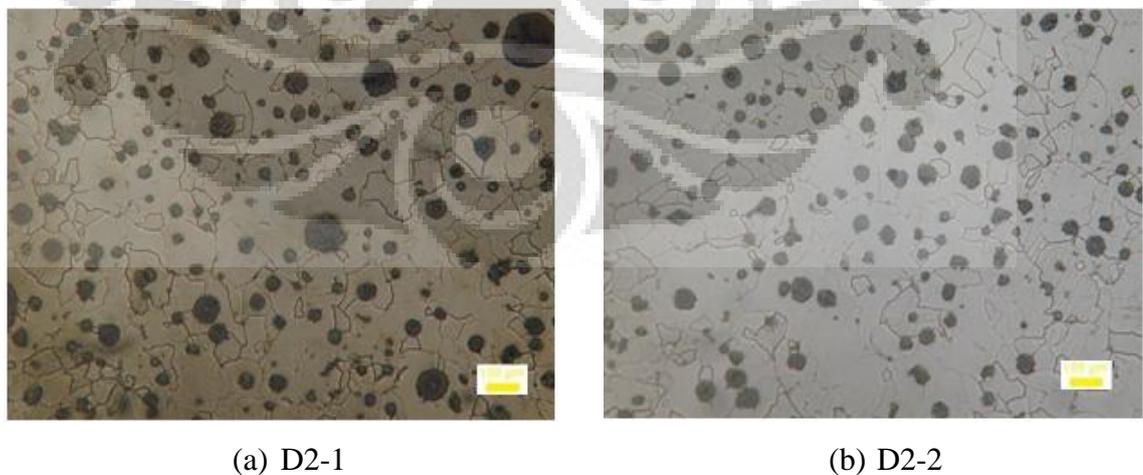
Gambar 4.17 (a) Struktur mikro P1T1 ketebalan plat 2 mm (b) Struktur mikro besi tuang nodular^[33]. Karbida (lingkaran merah) di dalam matriks ferit



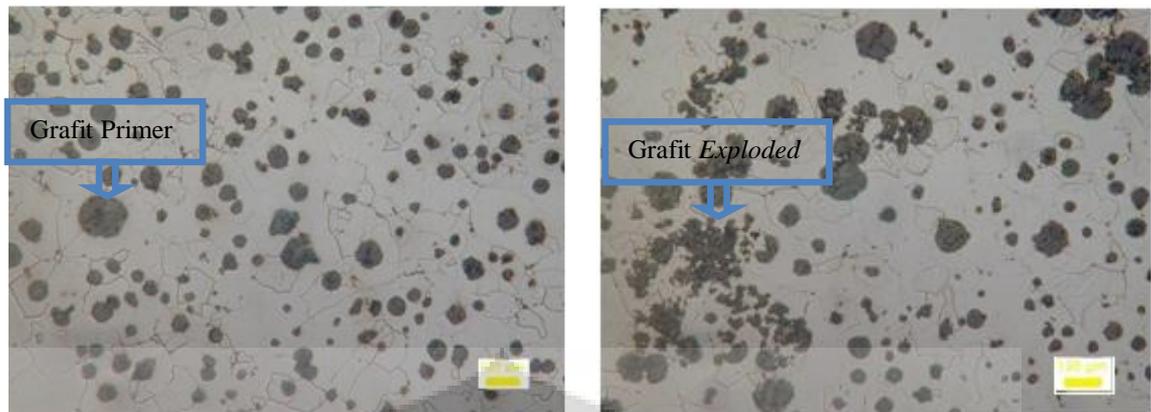
Gambar 4.18 (a) Struktur mikro PIT1 ketebalan plat 3 mm (b) Struktur mikro besi tuang nodular^[33]. Karbida (lingkaran merah) di dalam matriks ferit

Dari pengamatan struktur mikro, secara umum dapat dikatakan bahwa makin tebal plat maka karbida yang terbentuk akan semakin sedikit. Hal ini sesuai dengan teori pembentukan karbida yang menyatakan bahwa karbida akan terbentuk secara alami dan semakin mudah terbentuk pada plat tipis^[16].

Dari struktur mikro yang didapat, semua plat untuk sampel P5D bebas dari karbida termasuk plat dengan ketebalan dengan 2 mm dan 3 mm dari dua daerah pengamatan, Gambar 4.19 dan Gambar 4.20. Hal ini terjadi karena temperatur penuangan yang pas, sehingga kecepatan pendinginan tidak terlalu tinggi.



Gambar 4.19 Struktur mikro P5D ketebalan plat 2 mm dari dua daerah pengamatan



(c) D3-1

(d) D3-2

Gambar 4.20 Struktur mikro P5D ketebalan plat 2 mm dari dua daerah pengamatan

4.4 Pengujian Sifat Mekanis

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat mekanis berupa kekuatan tarik dan kekerasan dari plat tipis hasil pengecoran.

4.4.1 Pengujian Tarik

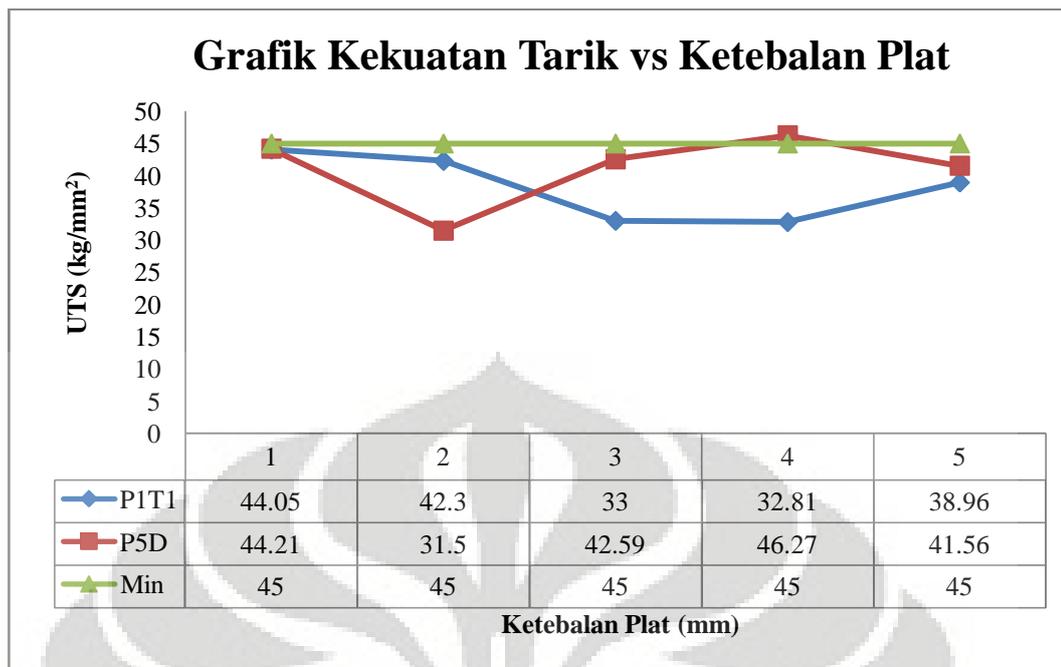
Hasil yang didapat dari pengujian tarik berupa nilai UTS dan elongasi seperti yang terlihat pada tabel 4.7 dan tabel 4.8.

4.4.1.1 Kekuatan Tarik

Tabel 4.7. Nilai UTS hasil pengujian tarik

Tebal (mm)	UTS (kg/mm ²)	
	P1T1	P5D
1	44.05	44.21
2	42.3	31.5
3	33	42.59
4	32.81	46.27
5	38.96	41.56

Dari data tabel di atas kemudian di plot ke dalam grafik, Gambar 4.21.



Gambar 4.20 Grafik kekuatan tarik terhadap ketebalan plat

Dari hasil pengecoran P1T1, data yang didapat bahwa semakin tebal plat maka semakin menurun kekuatan tariknya. Hal ini dapat disebabkan karena pada P1T1, benda yang semakin tebal, nodularitas yang dihasilkan semakin berkurang. Jika % nodularitas menurun, maka kekuatan tarik yang dihasilkan juga menurun. Nilai tarik untuk plat 2 mm dan 3 mm sebesar 42.3 kg/mm² dan 33 kg/mm². Namun, terjadi penyimpangan pada plat 5 mm, kemungkinan dikarenakan jumlah karbida yang terbentuk lebih sedikit dari plat-plat lain sehingga nilai kekuatan tarik yang dihasilkan meningkat. *Skin effect* yang terbentuk pada P1T1 juga dapat menyebabkan sifat mekanis material menurun. Pada plat dengan ketebalan 3 mm dan 4 mm, memiliki ketebalan *skin effect* yang besar, sehingga kekuatan tarik yang dihasilkan rendah.

Menurut data hasil pengecoran P5D dapat dilihat bahwa data yang didapat cenderung acak. Dari data ini belum dapat diambil suatu kesimpulan apakah dengan penambahan tebal, kekuatan tarik semakin meningkat atau menurun. Pada plat dengan ketebalan 2 mm memiliki nilai UTS yang terkecil dan berbeda jauh dari ketebalan plat lainnya sebesar 31.5 kg/mm². Sementara plat 3 mm menghasilkan kekuatan tarik 42.59 kg/mm². Seharusnya dengan nodularitas yang tinggi, kekuatan tarik yang dihasilkan juga tinggi^[16].

Dari perbandingan kedua penuangan di atas, secara umum dapat dikatakan bahwa nilai kekuatan tarik P5D lebih tinggi dibandingkan dengan P1T1. Hal ini sesuai dengan literatur bahwa struktur mikro yang bebas dari *skin effect* memiliki sifat mekanis yang lebih tinggi yaitu memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibanding dengan sampel yang memiliki *skin effect* pada struktur mikronya^[20,27,31]. Selain itu struktur mikro yang dihasilkan P5D lebih baik dari P1T1, baik dari segi nodularitas dan jumlah nodul, grafit, matriks dan bebas dari karbida. Namun terdapat pengecualian pada plat dengan ketebalan 2 mm yang memiliki nilai kekuatan tarik untuk P5D lebih rendah dari P1T1. Hal ini kemungkinan dikarenakan pada plat posisi 2 dengan ketebalan 2 mm mengalami pola pendinginan yang dipengaruhi peletakan plat-plat di atasnya dan plat di bawahnya lebih besar dari plat posisi lain sehingga posisi ini menjadi kritis.

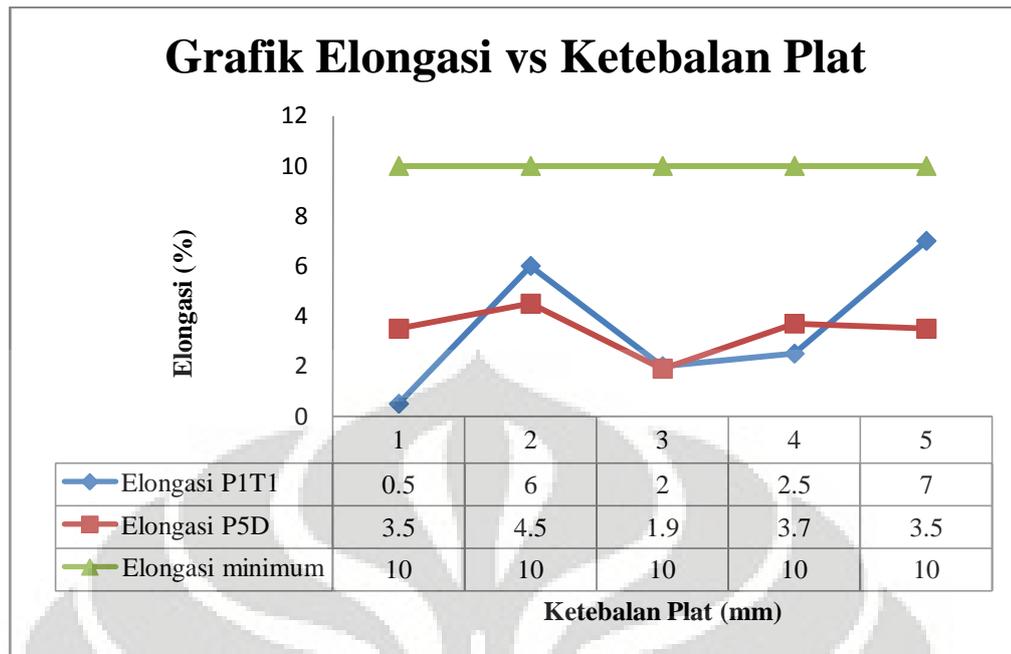
Berdasarkan JIS, nilai kekuatan tarik untuk FCD 450 adalah 45 kg/mm^2 . Dari data pengujian menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik plat 2 mm dan 3 mm dan sebagian besar plat untuk kedua penuangan di bawah standar besi tuang nodular, hanya plat dengan ketebalan 4 mm pada P5D yang nilai tersebut.

4.4.1.2 Elongasi

Tabel 4.8. Nilai elongasi hasil pengujian tarik

Tebal (mm)	Elongasi (%)	
	P1T1	P5D
1	0.5	3.5
2	6	4.5
3	2	1.9
4	2.5	3.7
5	7	3.5

Dari data tabel di atas kemudian di plot ke dalam grafik, Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik elongasi terhadap ketebalan plat

Dari data elongasi P1T1, secara umum didapatkan bahwa semakin tebal plat maka semakin tinggi % elongasi. Elongasi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan kekuatan tarik. Hal ini disebabkan akibat pengaruh karbida yang menyebabkan keuletan rendah dan kekerasan meningkat sehingga elongasi menurun.

Kadar nodularitas yang semakin tinggi maka kekuatan tarik dan elongasi akan meningkat pula. Namun dengan hadirnya struktur karbida pada plat dengan nodularitas yang tinggi menyebabkan elongasi justru menurun. Hal ini disebabkan plat tipis memungkinkan tercapainya nodularitas sekaligus secara alami terjadi pembentukan karbida. Contohnya pada plat dengan ketebalan 1 mm memiliki kekuatan tarik paling tinggi namun elongasinya paling rendah karena banyaknya karbida yang terbentuk. Namun secara umum pada plat 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm nilai elongasi yang didapat sebanding dengan nilai kekuatan tarik yang didapat. Hal ini dapat menunjukkan bahwa nodularitas mempengaruhi nilai kekuatan tarik dan elongasi. Pada plat 3 mm dan 4 mm menunjukkan adanya ketebalan *skin effect* yang besar sehingga kekuatan tarik dan elongasi yang diperoleh lebih rendah dibanding plat-plat lain karena adanya grafit serpih yang dapat bertindak sebagai pusat tegangan dan daerah inisiasi retak.

Dari data elongasi P5D, didapatkan bahwa secara umum semakin tebal plat maka semakin rendah % elongasi. Hal ini disebabkan karena secara umum nodularitas semakin rendah seiring dengan semakin ketebalan plat sehingga elongasi yang didapat semakin menurun. Pada plat 2 mm, nodularitas yang dapat paling tinggi diantara plat-plat yang lain sehingga menghasilkan nilai elongasi yang tertinggi.

Berdasarkan nilai elongasi dari P1T1 dan P5D tidak menunjukkan adanya elongasi yang lebih baik pada plat yang tidak memiliki *skin effect*. Hal ini dapat terjadi karena yang mempengaruhi sifat mekanis besi tuang nodular tidak hanya *skin effect* dan karbida namun juga grafit dan matriks.

Elongasi besi tuang nodular seharusnya minimum mencapai 10%, namun data pengujian menunjukkan bahwa plat 2 mm dan 3 mm dan plat-plat lain dari kedua penuangan tidak ada yang mencapai nilai tersebut. Nilai elongasi untuk plat 2 mm dan 3 mm P1T1 sebesar 6 % dan 2 %, sementara untuk P5D sebesar 4.5% dan 1.9%.

4.4.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode Brinell didapatkan diameter penjejakan yang kemudian diolah dengan menggunakan rumus Brinell sehingga didapatkan data pengujian pada Tabel 4.9 untuk sampel P1T1 dan Tabel 4.10 untuk sampel P5D

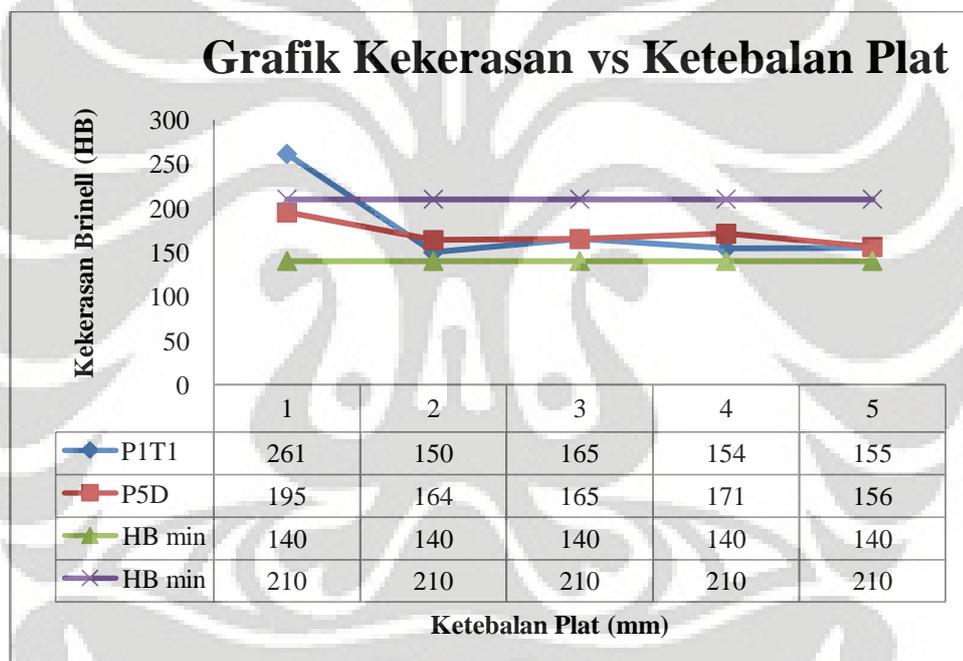
Tabel 4.9. Data Kekerasan Brinell Sampel P1T1

Tebal plat	Kekerasan Brinell							HB
	1	2	3	4	5	6	7	Rata-rata
1 mm	153	201	302	290	240	299	242	261
2 mm	160	154	186	138	125	127	158	150
3 mm	189	152	156	165	159	164	168	165
4 mm	161	156	151	152	155	154	150	154
5 mm	159	155	140	155	161	156	155	155

Tabel 4.10. Data Kekerasan Brinell Sampel P5D

Tebal plat	Kekerasan Brinell							HB
	1	2	3	4	5	6	7	Rata-rata
1 mm	163	187	218	226	197	192	184	195
2 mm	153	166	172	169	168	162	161	164
3 mm	158	166	167	169	166	166	161	165
4 mm	175	175	166	172	168	170	175	171
5 mm	153	156	161	155	156	156	158	156

Hasil rata-rata pengujian pada beberapa titik di plot ke dalam grafik ketebalan vs kekerasan pada gambar 4.23.



Gambar 4.23 Grafik kekerasan terhadap ketebalan plat

Secara teori, kekuatan tarik memiliki nilai yang sebanding dengan kekerasan. Dari data kekerasan hasil pengecoran P1T1 terlihat bahwa data yang didapat acak dan tidak menunjukkan hubungan antara ketebalan plat dengan nilai kekerasan yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena sifat mekanis pada besi tuang nodular didapat dari penggabungan grafit dengan matriks. Namun secara umum data yang didapat sesuai dengan literatur bahwa kekuatan tarik sebanding dengan nilai keras. Hasil kekerasan yang dihasilkan masih masuk ke dalam range

kekerasan untuk FCD 450, kecuali pada plat 1 mm, nilai kekerasan yang didapat di atas range kekerasan untuk FCD 450 disebabkan pengaruh banyaknya karbida yang terbentuk pada plat 1 mm. Nilai keras untuk plat 2 mm dan 3 mm adalah 150 HB dan 165 HB.

Dari data kekerasan hasil pengecoran P5D terlihat bahwa data yang didapat acak dan tidak menunjukkan hubungan antara ketebalan plat dengan nilai kekerasan yang dihasilkan. Namun secara umum, data yang didapat sesuai dengan literatur bahwa kekuatan tarik sebanding dengan nilai keras. Terlihat pada plat dengan ketebalan 1 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. Nilai kekerasan yang didapat dapat sebanding dengan nilai kekuatan tarik. Namun terdapat penyimpangan pada plat 2 mm. Plat 2 mm memiliki nilai tarik yang paling kecil di antara plat-plat yang lain namun memiliki kekerasan yang masuk ke dalam standard. Hal ini disebabkan karena kekerasan tidak hanya bergantung dari kekuatan tariknya namun juga bergantung dari penggabungan grafit dan matriknya. Namun, kekerasan yang dihasilkan tetap masuk ke dalam range kekerasan FCD 450. Nilai kekerasan untuk plat 2 mm dan 3 mm sebesar 164 HB dan 165 HB.

Nilai kekerasan untuk kedua penuangan di atas masuk dalam rentang sifat mekanis FCD 450 yang memiliki rentang kekerasan Brinell sebesar 140-210 HB. Berdasarkan hasil perbandingan kekerasan antara sampel P1T1 dan P5D dapat dikatakan bahwa secara umum nilai kekerasan P5D lebih tinggi dibandingkan dengan P1T1. Sehingga sampel P5D memiliki sifat mekanis yang lebih baik daripada P1T1. Hal ini terjadi karena struktur mikro yang dihasilkan P5D lebih baik dari P1T1, baik dari segi *skin effect*, karbida, nodularitas dan jumlah nodul, grafit dan matriks pada material.

BAB 5 KESIMPULAN

1. Komposisi kimia logam cair untuk kedua penuangan secara umum masuk ke dalam range untuk FCD 450. Namun, jumlah kandungan sulfur melebihi jumlah optimum sulfur dalam logam cair. Nilai *Carbon Equivalent* (CE) untuk kedua penuangan memenuhi persyaratan minimum CE menurut Loper dan Stefanescu ($CE > 4.3 \%$)
2. Cetakan terisi sempurna pada kedua penuangan, namun terjadi cacat sirip pada kedua penuangan dan cacat lain yang diakibatkan kemungkinan karena shrinkage atau rontokan cetakan pada P1T1
3. Nilai nodularitas menurun seiring dengan pertambahan ketebalan plat. Namun nodularitas tidak memiliki hubungan terhadap jumlah nodul. Plat dengan ketebalan 2 mm dan 3 mm dari P1T1 tidak memiliki nilai nodularitas $> 80\%$ sedangkan dari P5D memiliki nilai nodularitas $> 80\%$ dan memiliki jumlah nodul > 100 nodul/mm² untuk kedua penuangan. Nodularitas dan jumlah nodul berkisar antara 60% - 87% dan 800 nodul/mm² - 900 nodul/mm². Ditemukannya grafit primer dan exploded pada P5D.
4. Matrik yang terbentuk adalah ferit, dan ditemukan karbida pada sampel P1T1 serta terlihat jelas adanya *skin effect*. Keberhasilan *liquid treatment* menghasilkan struktur mikro bebas dari *skin effect* pada sampel P5D sementara kegagalan *liquid treatment* menghasilkan *skin effect* pada sampel P1T1 dengan ketebalan antara 0.067 mm sampai 0.112 mm. Ketebalan *skin* terkecil dimiliki oleh plat 2 mm dan terbesar pada plat 3 mm.
5. Kekuatan tarik sampel P1T1 menurun seiring pertambahan ketebalan plat, sementara untuk P5D cenderung acak. Kekuatan tarik untuk plat 2 mm dan 3 mm sebesar 42.3 kg/mm² dan 33 kg/mm² untuk P1T1 sedangkan untuk P5D sebesar 31.5 kg/mm² dan 42.59 kg/mm². Namun, secara umum kekuatan tarik P5D yang tidak memiliki *skin effect* berada di atas dari kekuatan tarik P1T1 yang memiliki *skin effect*. Hanya plat 4 mm pada P5D yang memiliki nilai kekuatan tarik di atas standar FCD 450 > 45 kg/mm², yaitu 46.27 kg/mm².

6. Secara umum elongasi sampel P1T1 meningkat dengan penambahan ketebalan plat, sementara sampel P5D menurun dengan penambahan ketebalan plat. Elongasi untuk plat 2 mm dan 3 mm P1T1 sebesar 6% dan 2%. Sedangkan untuk P5D sebesar 4.5% dan 1.9%. Namun, berdasarkan nilai elongasi tidak menunjukkan adanya elongasi yang lebih baik pada plat yang tidak memiliki *skin effect*. Semua plat P1T1 dan P5D memiliki nilai elongasi antara (0.5-7)% sehingga belum ada yang mencapai elongasi minimum untuk FCD 450 sebesar 10%.
7. Secara umum nilai kekerasan untuk sampel P1T1 dan P5D sebanding dengan kekuatan tarik yang dihasilkan. Nilai kekerasan plat 2 mm dan 3 mm P1T1 adalah 150 HB dan 165 HB. Sedangkan untuk P5D sebesar 164 HB dan 165 HB. Secara umum nilai kekerasan untuk sampel P1T1 dan P5D masuk ke dalam rentang kekerasan untuk FCD 450 sebesar 140-210 HB. Secara umum nilai kekerasan untuk P5D lebih tinggi dibandingkan dengan P1T1.

REFERENSI

1. Schrems, K.K., dkk, *Statistical Analysis of the Mechanical Properties of Thin-walled Ductile Iron Casting*. SAE Technical Paper, 2003
2. Sulamet-Ariobimo, R.D., *Austempered Ductile Iron Production Technology from Based Material Produced by Ferro-Casting Industry in Indonesia*, Faculty of Engineering and Physical System. Rockhampton, Australia : Central Queensland University, 2003
3. Hayrynen, K.L., dkk., *Austempered Ductile Iron – The State of the Industry in 2003*. Keith D. Millis Symposium, 2003.
4. www.ductile.org, download 19/11/2007, revised by J. R. Keogh, Agustus 1998
5. www.advancedcast.com/adi-advantages.htm, download 28/11/2009
6. www.steelinc.com.au, download 19/11/2007
7. Stefanescu, D.M. *Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron* AFS Transaction 02-178, 2002.
8. Mourad, Mohamed M., dkk, *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron* 68th WFC, 7th-10th February 2008, pp.161-166.
9. Showman, R.E., dkk, *Ironing Out Thin-wall Casting Defects*. Modern Casting, 2006. 96(7): p. 29-32.
- 10 Callister Jr., William D. *Materials Science and Engineering an Introduction*. 6th Edition. New York : John Willey and Sons, Inc., 2003.
- 11 ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
- 12 Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (1990). *Ductile Iron Data for Design Engineers*. Montreal, Canada: Author.
- 13 Jurnal *Austemper Ductile Iron versus Aluminium : No Contest!*. Dowload 28/04/2008
- 14 Bahan Kuliah Pengecoran Logam Teknik Metalurgi dan Material. Universitas Indonesia, 2009
- 15 Surdia, Tata Prof .Ir. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta : PT Pradnya Paramita, 2000

- 16 ASM Handbook. (1988). *Casting: Volume 15*. Ohio: ASM International Metal Park.
17. JIS, *JIS G5502-2000, Spheroidal Graphite Iron Casting*, 2000, Tokyo, Japan: Japanese Standard Association.
18. Mullins, J. D., *Nodule Count – Why and How!*, Ductile Iron News, 2003. Iss 2: p.1-2. www.ductile.org
19. ASTM A247-67 “*Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*”
20. Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*, 2005, AFS
21. Jurnal *ADI Transport-ADI Solutions Aid Vehicle Design*. Download 25/06/2008
22. ASTM A644-98 “*Standard Terminology Relating to Iron Castings*”
23. ASTM A897/A897M-03 “*Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings*”
24. Ductile Iron Society. *A Design Engineer’s Digest of Ductile Iron*. 9th Edition. <<http://www.Ductile.org>>
25. 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.
26. Martinez, R. A., dkk, *Application of ADI in High Strength Thin Wall Automotive Parts*. Pada *2002 World Conference on ADI*, 2002.
27. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177).
28. 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.
29. 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

30. Loper, C. R., dkk, *Method and Additive for Improving the Properties of Thin-wall Castings*. Technology Summary, Wisconsin Alumni Research Foundation, 2007.
31. Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction, 2003. 03(109).
32. JIS, *JIS Z2201-2000, Tension Test Pieces for Metallic Materials*, 2000, Tokyo, Japan: Japanese Standard Association.
33. ASM, *Atlas of Microstructures of Industrial Alloys, Handbook Vol. 7*, 1972, Metals Park, Ohio, USA: American Society for Metals.
34. Goodrich, G.M, *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. 19980332A.
35. JIS, *JIS Z2241-2000, Method of Tension Test for Metallic Materials*, 2000, Tokyo, Japan: Japanese Standard Association.
36. ASTM E-10 “*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*”
37. Laboratorium Geteka Founindo, Kawasan Industri Pulo Gadung, Jakarta Timur



LAMPIRAN I
(NODULARITAS DAN JUMLAH NODUL P1T1 dan P5D)

P1T1A1-1 mm Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	125.4	78.58	19.76	345.52	148	181300	816.3265
EqDiameter	11.98	4	5.02	20.97			
Circularity	0.7298	0.1984	0.1176	0.9899			
MeanIntensity	83.93	10.27	67.4	139.07			

P1T1A1- 1 mm Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	174.24	157.92	19.75	1068.56	147	181300	810.8108
EqDiameter	13.52	6.25	5.02	36.89			
Circularity	0.6193	0.2545	0.023	0.9676			
MeanIntensity	85.47	15.91	64.01	139.51			

P1T1A1-1 mm Gambar 3

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	190.23	141.25	19.85	820.52	146	181300	805.2951
EqDiameter	14.53	5.57	5.03	32.32			
Circularity	0.663	0.228	0.1023	0.9787			
MeanIntensity	81.72	9.65	66.94	135.27			

P1T1A1-2 mm Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	141.16	84.4	19.94	359.11	127	181300	700.4964
EqDiameter	12.76	4.12	5.04	21.38			
Circularity	0.7077	0.1936	0.2318	0.9902			
MeanIntensity	74.95	7.21	56.85	99.35			

P1T1A1-2 mm Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	184.89	150.2	19.75	1001.85	142	181300	783.2322
EqDiameter	14.12	6.01	5.02	35.72			
Circularity	0.6338	0.2459	0.0473	0.9697			
MeanIntensity	83.27	12.59	65.21	127.09			

P1T1A1-2 mm Gambar 3

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	160.88	153.84	19.66	1281.66	185	181300	1020.408
EqDiameter	12.93	6.14	5	40.4			
Circularity	0.5473	0.3009	0.0426	0.9862			
MeanIntensity	87.68	15.55	67.84	124.13			

P1T1A1-3 mm Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	163.14	115.02	19.84	604.02	119	181300	656.3707
EqDiameter	13.46	5.14	5.03	27.73			
Circularity	0.7234	0.2013	0.1966	1			
MeanIntensity	72.95	8.43	58.17	114.18			

P1T1A1-3 mm Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	179.86	150.2	20.31	912.21	133	181300	733.5907
EqDiameter	13.84	6.12	5.09	34.08			
Circularity	0.5668	0.2815	0.0392	0.9761			
MeanIntensity	87.46	14.76	67.03	130.07			

P1T1A1-3 mm Gambar 3

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	141.06	114.06	19.76	586.44	197	181300	1086.597
EqDiameter	12.29	5.34	5.02	27.33			
Circularity	0.5878	0.2616	0.0703	0.9725			
MeanIntensity	88.31	14.61	70.14	128.47			

P1T1A1-4 mm Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	163.95	135.58	20.12	769.07	124	181300	683.9493
EqDiameter	13.33	5.56	5.06	31.29			
Circularity	0.6648	0.2265	0.1715	0.9773			
MeanIntensity	77.51	8.24	60.2	106.94			

P1T1A1-4 mm Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	214.06	208.87	19.66	1302.9	130	181300	717.0436
EqDiameter	14.73	7.45	5	40.73			
Circularity	0.5837	0.2575	0.0619	0.9688			
MeanIntensity	83.59	15.52	62.89	130.63			

P1T1A1-4 mm Gambar 3

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	262.35	247.86	19.75	1228.99	105	181300	579.1506
EqDiameter	16.25	8.37	5.01	39.56			
Circularity	0.5934	0.2517	0.0865	0.9586			
MeanIntensity	84.12	13.9	70.44	132.91			

P1T1A1-5 mm Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	224.91	172.04	20.96	730.5	67	181300	369.5532
EqDiameter	15.51	6.76	5.17	30.5			
Circularity	0.4635	0.216	0.0975	0.9365			
MeanIntensity	72.72	7.57	56.68	98.85			

P1T1A1-5 mm Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	344.8	321.69	20.23	1386.19	66	181300	364.0375
EqDiameter	18.63	9.59	5.07	42.01			
Circularity	0.541	0.2522	0.0867	0.9734			
MeanIntensity	76.96	8.73	63.85	114.99			

P1T1A1-5 mm Gambar 3

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	300.11	267.05	20.22	1255.85	84	181300	463.3205
EqDiameter	17.55	8.61	5.07	39.99			
Circularity	0.6259	0.2202	0.1299	0.9956			
MeanIntensity	78.83	9.47	63.78	117.23			

D1-1 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	108.002	181.254	19.734	2323.799	497	708100	701.8783
EqDiameter	10.471	5.278	5.013	54.394			
Circularity	0.8506	0.1388	0.2302	1			
MeanIntensity	71.877	10.921	38.161	117.292			

D1-1 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	116.926	178.661	19.874	2399.528	507	708100	716.0006
EqDiameter	10.941	5.401	5.03	55.274			
Circularity	0.8538	0.1371	0.2611	1			
MeanIntensity	68.991	11.775	41.602	115.117			

D1-2 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	125.775	159.328	19.965	1415.676	450	708100	635.5035
EqDiameter	11.372	5.552	5.042	42.456			
Circularity	0.857	0.1439	0.2024	1			
MeanIntensity	68.595	11.078	42.063	118.385			

D1-2 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	116.459	155.354	19.965	1834.944	542	708100	765.4286
EqDiameter	11.102	5.002	5.042	48.336			
Circularity	0.8548	0.1479	0.1063	1			
MeanIntensity	68.352	11.625	42.139	122.833			

D2-1 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	96.084	150.238	19.937	1633.35	699	708100	987.1487
EqDiameter	9.878	4.976	5.038	45.603			
Circularity	0.888	0.1311	0.1195	1			
MeanIntensity	80.879	12.353	47.217	129.775			

D2-1 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	81.153	83.806	19.641	941.295	754	708100	1064.821
EqDiameter	9.424	3.809	5.001	34.619			
Circularity	0.8972	0.1157	0.3314	1			
MeanIntensity	81.893	12.568	55.444	133.761			

D2-2 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	139.142	192.762	19.641	2304.321	625	708100	882.6437
EqDiameter	11.994	5.772	5.001	54.166			
Circularity	0.8488	0.151	0.0742	1			
MeanIntensity	92.787	14.985	54.629	147.422			

D2-2 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	149.736	148.464	19.641	1641.708	583	708100	823.33
EqDiameter	12.747	5.306	5.001	45.72			
Circularity	0.8578	0.1368	0.3009	1			
MeanIntensity	89.797	13.915	59.007	150.628			

D3-1 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	108.04	156.53	19.91	1901.84	698	708100	985.7365
EqDiameter	10.56	5.1	5.04	49.21			
Circularity	0.8601	0.1489	0.1586	1			
MeanIntensity	96.99	12.97	59.85	149.5			

D3-1 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	127.75	148.22	19.91	1500.97	608	708100	858.6358
EqDiameter	11.65	5.19	5.04	43.72			
Circularity	0.8612	0.1418	0.3433	1			
MeanIntensity	93.04	14.1	52.54	150.57			

D3-2 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	142.82	213.83	19.67	1805.64	614	708100	867.1092
EqDiameter	11.86	6.43	5	47.95			
Circularity	0.8664	0.1341	0.2817	1			
MeanIntensity	94.02	14.6	57.29	145.16			

D3-2 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	84.69	83.89	19.91	999.79	859	708100	1213.105
EqDiameter	9.66	3.81	5.04	35.68			
Circularity	0.8689	0.1422	0.0879	1			
MeanIntensity	97.83	13.07	65.6	148.63			

D4-1 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	126.84	185.53	19.67	2101.07	615	708100	868.5214
EqDiameter	11.32	5.77	5	51.72			
Circularity	0.8427	0.1545	0.1871	1			
MeanIntensity	95.65	15.12	58.55	148.72			

D4-1 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	94.49	97.83	19.67	1362.86	644	708100	909.4761
EqDiameter	10.17	4.11	5	41.66			
Circularity	0.8758	0.1254	0.2857	1			
MeanIntensity	95.33	13.58	62.2	151.53			

D4-2 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	69.32	83.8	19.67	1268.96	796	708100	1124.135
EqDiameter	8.73	3.47	5	40.2			
Circularity	0.8842	0.1215	0.4055	1			
MeanIntensity	99.97	13.24	61.19	147.98			

D4-2 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	133.52	221.32	19.67	2539.77	677	708100	956.0796
EqDiameter	11.29	6.52	5	56.87			
Circularity	0.8071	0.1891	0.065	1			
MeanIntensity	97.11	15.66	53.16	150.86			

D5-1 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	66.46	94.5	19.9	2262.65	836	708100	1180.624206
EqDiameter	8.57	3.34	5.03	53.67			
Circularity	0.8688	0.1335	0.2504	1			
MeanIntensity	101.45	12.92	59.03	145.32			

D5-1 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	71.96	68.94	19.67	912.28	876	708100	1237.113
EqDiameter	9	3.26	5	34.08			
Circularity	0.8651	0.1319	0.3118	1			
MeanIntensity	98.13	13.61	51.21	141.53			

D5-2 Gambar 1

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	59.37	62.89	19.67	810.96	781	708100	1102.952
EqDiameter	8.16	2.99	5	32.13			
Circularity	0.8746	0.1282	0.2974	1			
MeanIntensity	101.69	14.05	65.19	153.18			

D5-2 Gambar 2

Feature	Mean	St.Dev	Minimum	Maximum	Jumlah	Luas Area	Jumlah/mm2
Area	73.95	87.66	19.79	1004.12	736	708100	1039.401
EqDiameter	8.95	3.75	5.02	35.76			
Circularity	0.8436	0.1576	0.0707	1			
MeanIntensity	101.19	14.2	64.42	145.92			