



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENGGUNAAN ISOLATOR TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PENGECORAN DINDING TIPIS BESI
TUANG NODULAR**

SKRIPSI

CHINTYA VIOLA CHAIRANY

0606074691

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PENGGUNAAN ISOLATOR TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIS PENGECORAN DINDING TIPIS BESI
TUANG NODULAR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

CHINTYA VIOLA CHAIRANY

0606074691

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Chintya Viola Chairany

NPM : 0606074691

Tanda Tangan :

Tanggal : 28 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Chintya Viola Chairany
NPM : 0606074691
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Pengaruh Penggunaan Isolator Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. -Ing. Ir. Bambang Suharno ()

Penguji : Prof. Dr.Ir. Johny Wahyuadi M S. DEA ()

Penguji : Rianti Dewi Sulamet-Ariobimo, ST. M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2008

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada 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) PT. X, perusahaan yang telah menyediakan sarana dan prasarana untuk penelitian ini;
- (3) Ibu Rianti Dewi Sulamet Ariobimo selaku pimpinan tim kerja yang telah menyumbangkan pengetahuannya dan membimbing saya selama pengerjaan dan penyusunan skripsi ini;
- (4) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberikan bantuan baik moril maupun materil;
- (5) Irlinda Desita, Lusiana Eka, Didi Darul Fadli, dan Ari Azhari selaku rekan kerja yang telah banyak membantu saya dalam penelitian ini;
- (6) Sahabat dan teman-teman yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

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

Depok, 17 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 : Chintya Viola Chairany
NPM : 0606074691
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 Penggunaan Isolator Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis
Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengaihmedia/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

(Chintya Viola Chairany)

ABSTRAK

Nama : Chintya Viola Chairany
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Penggunaan Isolator Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Permasalahan yang dihadapi pada pengecoran dinding tipis yakni terbentuknya karbida dan lapisan kulit. Masalah ini terjadi karena proses pendinginan yang begitu cepat. Pemasangan isolator pada pengecoran dinding tipis ini diharapkan dapat memperlambat kecepatan pendinginan dan memperlambat proses perpindahan panas yang terjadi pada cetakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan isolator terhadap struktur mikro dan sifat mekanis. Pada penelitian ini, pengecoran plat tipis akan dibuat dengan ketebalan 1 mm melalui dua buah desain cetakan yaitu cetakan yang menggunakan isolator dan cetakan tanpa isolator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak ditemukan adanya lapisan kulit di seluruh plat tipis. Selain itu, kecepatan pendinginan cetakan yang menggunakan isolator lebih lama dan kecepatan pembekuan menjadi lebih rendah.

Kata kunci: pengecoran dinding tipis, besi tuang nodular, perpindahan panas, isolator, kecepatan pendinginan

ABSTRACT

Name : Chintya Viola Chairany
Study Program : Metallurgy and Materials Engineering
Title : The Effect of Insulation Material on Microstructures and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron Casting

Producing thin wall ductile iron casting will be encountered by the formation of carbides and skin effect problems. These problems occur due to the high cooling rate. Inserting insulation material in the casting is expected to reduce the cooling rate by slowing down the heat transfer process in mould. This study aimed to see the effect of using insulation material in microstructures and mechanical properties of thin wall ductile iron casting. A 1 mm thin wall ductile iron plates will be produced using two moulds for single casting design. In one of the moulds insulation material will be inserted. The result showed that the mould with insulation material has longer cooling rate compared to the other mould. This longer cooling rate will slow down the solidification process.

Keywords: thin wall casting, nodular cast iron, heat transfer, insulation material, cooling rate

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	ivv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Besi Tuang Nodular (BTN).....	5
2.1.1 Jenis Besi Tuang Nodular	5
2.1.2 Faktor yang mempengaruhi sifat mekanis BTN	7
2.1.3 <i>Liquid Treatment</i>	10
2.1.4 Nodularitas dan jumlah nodul.....	11
2.2 <i>Austempered Ductile Iron (ADI)</i>	13
2.2.1 Sifat Mekanik ADI.....	14
2.3 Pengecoran Dinding Tipis.....	15
2.3.1 Struktur Mikro TWDI	15

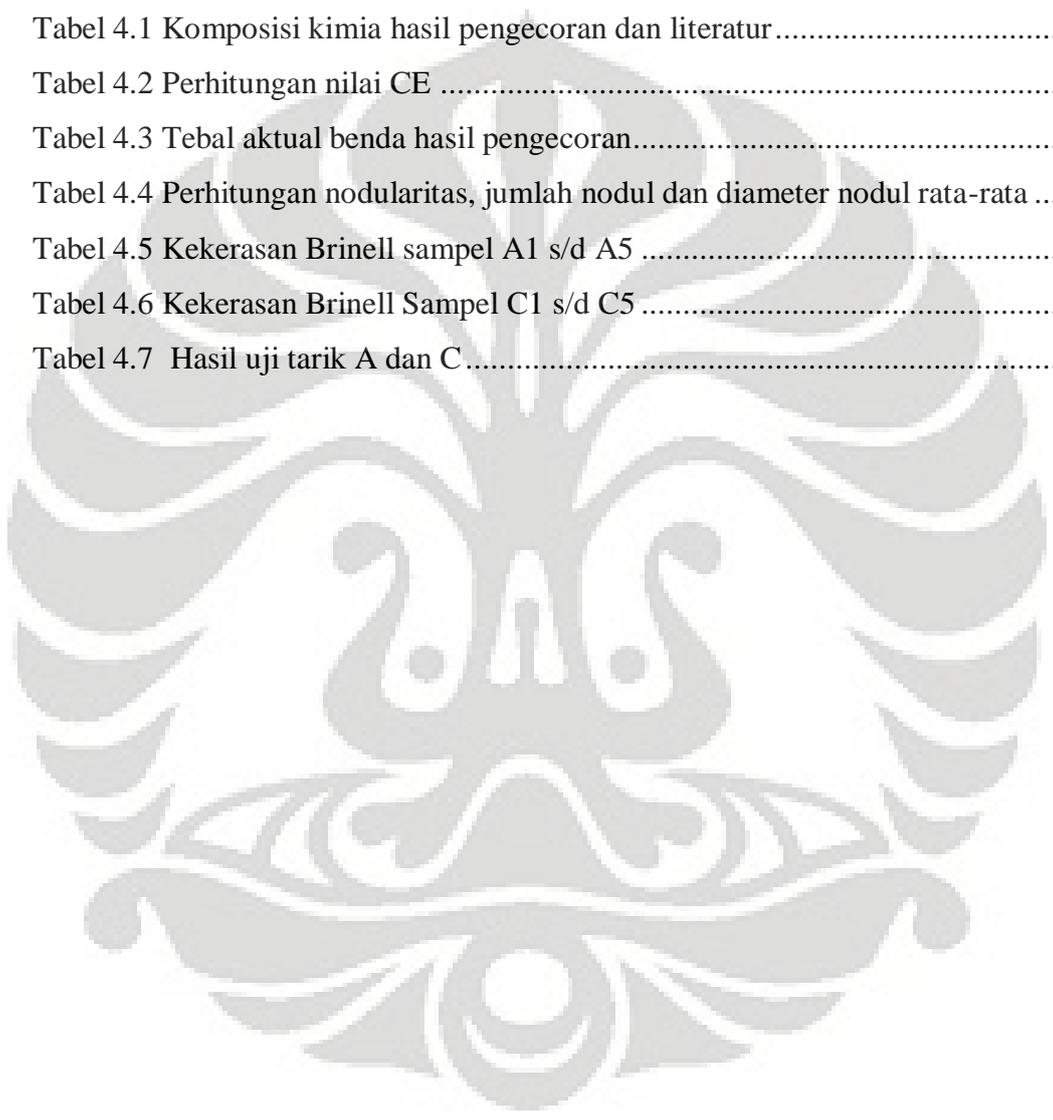
2.3.2	Karbida	19
2.3.3	Nilai <i>Carbon Equivalent</i> (CE)	20
2.3.4	Lapisan Kulit.....	21
2.4	Cacat pada Pengecoran Dinding Tipis	21
2.4.1	<i>Microporosity</i>	21
2.4.2	<i>Inverse chill</i>	22
2.4.3	<i>Flake graphite rim anomaly</i>	22
2.4.4	<i>Graphite alignment</i>	23
2.5	Isolator pada Pengecoran Dinding Tipis	23
2.5.1	Pengertian <i>Glasswool</i>	24
2.5.2	Tujuan Penggunaan <i>Glasswool</i>	24
2.5.3	Pengaruh penggunaan <i>glasswool</i>	25
2.5.4	Jenis isolator lain.....	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		27
3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Alat dan Bahan	29
3.2.1	Alat	29
3.2.2	Bahan.....	30
3.3	Prosedur Penelitian	31
3.3.1	Pembuatan Desain Pengecoran	31
3.3.2	Pembuatan Pola.....	32
3.3.3	Pembuatan Cetakan	34
3.3.4	Pembuatan Logam Cair dan <i>Liquid Treatment</i>	35
3.3.5	Pengecoran.....	37
3.3.6	Preparasi Sampel.....	37
3.3.7	Pengujian	40
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		43
4.1	Komposisi Kimia	43
4.2	Pengamatan Visual	44
4.3	Pengamatan Struktur Mikro	47

4.3.1	Pengaruh Nodularitas, Jumlah nodul dan Diameter rata-rata nodul ..	54
4.4	Pengujian Mekanik	63
4.4.1	Pengujian Kekerasan	63
4.4.2	Pengujian Tarik	67
BAB 5 KESIMPULAN.....		71
REFERENSI.....		72
LAMPIRAN		



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN ^[8]	7
Tabel 2.2 Sifat mekanik besi tuang nodular menurut JIS G 5502-1995 ^[11]	9
Tabel 2.3 Sifat <i>glasswool</i>	25
Tabel 2.4 Sifat LDASC ^[20]	26
Tabel 4.1 Komposisi kimia hasil pengecoran dan literatur	43
Tabel 4.2 Perhitungan nilai CE	43
Tabel 4.3 Tebal aktual benda hasil pengecoran.....	46
Tabel 4.4 Perhitungan nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata ...	59
Tabel 4.5 Kekerasan Brinell sampel A1 s/d A5	64
Tabel 4.6 Kekerasan Brinell Sampel C1 s/d C5	64
Tabel 4.7 Hasil uji tarik A dan C.....	69



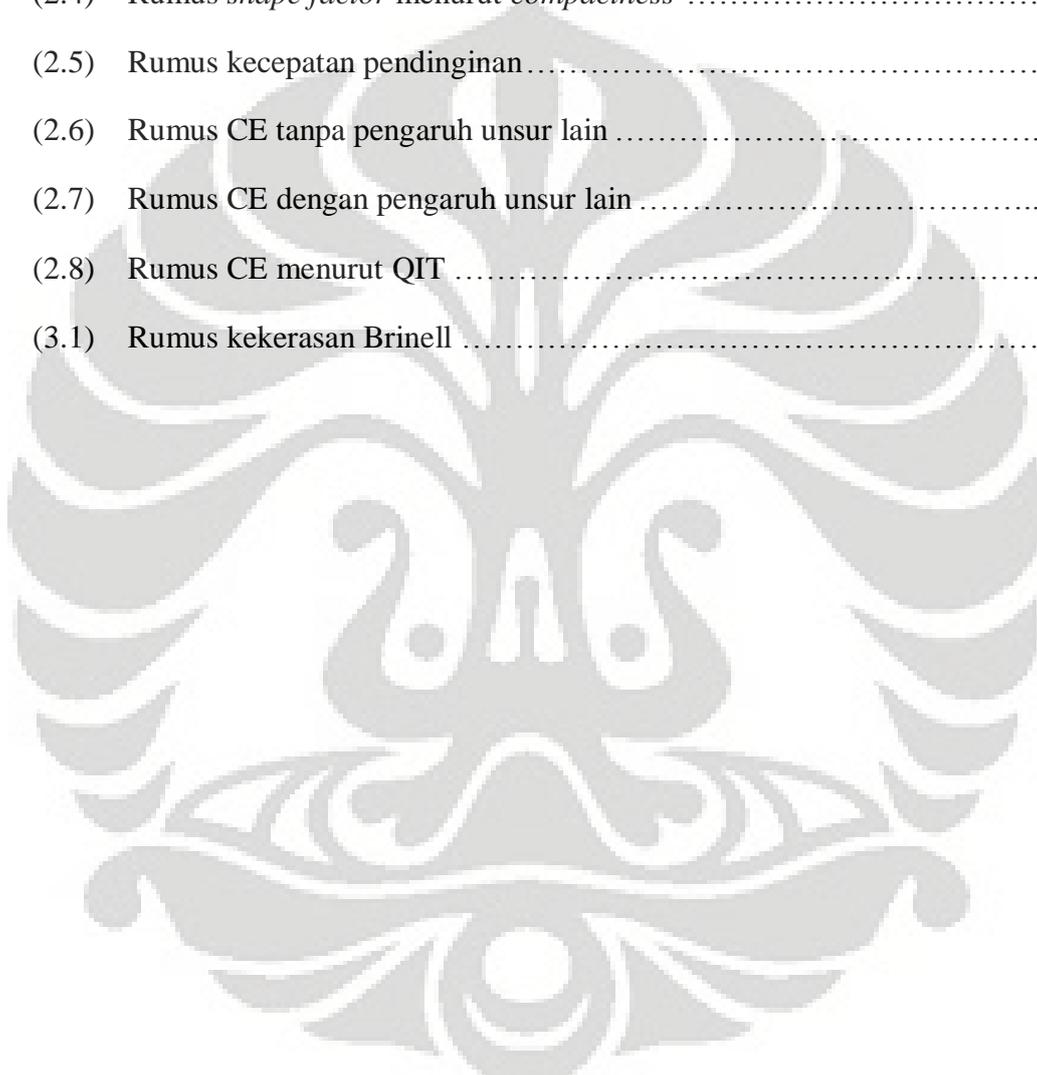
DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Relative weight per unit of yield strength</i> ^[2]	1
Gambar 1.2 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material ^[3]	2
Gambar 2.1 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN ^[10]	7
Gambar 2.2 Pengaruh bentuk grafit pada kurva <i>stress strain</i> beberapa besi cor	8
Gambar 2.3 Klasifikasi bentuk grafit berdasarkan ASTM A 247	12
Gambar 2.4 Stang Piston (<i>connecting rod</i>) terbuat dari ADI dinding tipis, dengan ketebalan 3 mm ^[5]	15
Gambar 2.5 Studi kasus dari dimensi nodul: a) perbedaan ukuran dari nodul; b) beberapa nodul berukuran < 10 μm ^[8]	16
Gambar 2.6 Pengaruh penerimaan jumlah nodul minimum: a) struktur mikro awal b) nodul yang kurang dari 10 μm dileminasi; c) nodul yang kurang dari 5 μm dieliminasi ^[8]	17
Gambar 2.7 Korelasi jumlah nodul dengan ketebalan plat ^[8]	18
Gambar 2.8 Indikasi <i>inverse chill</i> : a) nodul yang membentuk <i>cluster</i> di tengah spesimen; b) partikel grafit membentuk jalur/pola ^[8]	22
Gambar 2.9 <i>Rim flake of graphite</i> ^[8]	23
Gambar 3.1 Desain cetakan penelitian	27
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian	28
Gambar 3.3 Desain pengecoran Stefanescu ^[6]	32
Gambar 3.4 Pola cetakan sebelum dibentuk <i>pattern plate</i>	33
Gambar 3.5 Salah satu sisi <i>pattern plate</i>	34
Gambar 3.6 Sepasang cetakan P5C pada saat <i>waiting time</i>	35
Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat	38
Gambar 3.8 Sampel hasil <i>mounting</i>	39
Gambar 3.9 Penamaan sampel penelitian	40
Gambar 3.10 Mikroskop optik digital.....	41
Gambar 3.12 Pengujian kekerasan brinell	41
Gambar 3.13 Mesin Uji Tarik	42
Gambar 4.1 Nilai CE untuk beberapa jenis material ^[6]	44
Gambar 4.2 Benda dan saluran tuang hasil pengecoran	45

Gambar 4.3 Benda setelah dilakukan proses permesinan	46
Gambar 4.4 Struktur mikro non etsa.....	48
Gambar 4.5 Struktur mikro plat A1 etsa.....	50
Gambar 4.6 Struktur mikro plat A5 etsa.....	51
Gambar 4.7 Struktur mikro plat C1 etsa	51
Gambar 4.8 Struktur mikro plat C5 etsa	52
Gambar 4.9 Struktur mikro besi tuang nodular feritik yang mengandung karbida.....	53
Gambar 4.10 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat A1 (non isolator) sampel 1	55
Gambar 4.11 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat A5 (non isolator) sampel 1	56
Gambar 4.12 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat C1 (isolator) sampel 1	57
Gambar 4.13 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat C5 (isolator) sampel 1	58
Gambar 4.14 Grafik perbandingan nodularitas	60
Gambar 4.15 Grafik perbandingan jumlah nodul.....	62
Gambar 4.16 Grafik perbandingan diameter nodul rata-rata	63
Gambar 4.17 Grafik hubungan nilai kekerasan Brinel terhadap posisi plat	66
Gambar 4.18 Grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap posisi plat.....	67
Gambar 4.19 Grafik kekuatan tarik vs nodularitas P5A	68
Gambar 4.20 Grafik kekuatan tarik vs nodularitas P5C	68

DAFTAR RUMUS

(2.1)	Rumus Nodularitas JIS G 5502	12
(2.2)	Rumus Nodularitas <i>Image Analysis</i>	12
(2.3)	Rumus <i>shape factor</i> menurut <i>sphericity</i>	13
(2.4)	Rumus <i>shape factor</i> menurut <i>compactness</i>	13
(2.5)	Rumus kecepatan pendinginan	18
(2.6)	Rumus CE tanpa pengaruh unsur lain	20
(2.7)	Rumus CE dengan pengaruh unsur lain	21
(2.8)	Rumus CE menurut QIT	21
(3.1)	Rumus kekerasan Brinell	42



DAFTAR LAMPIRAN

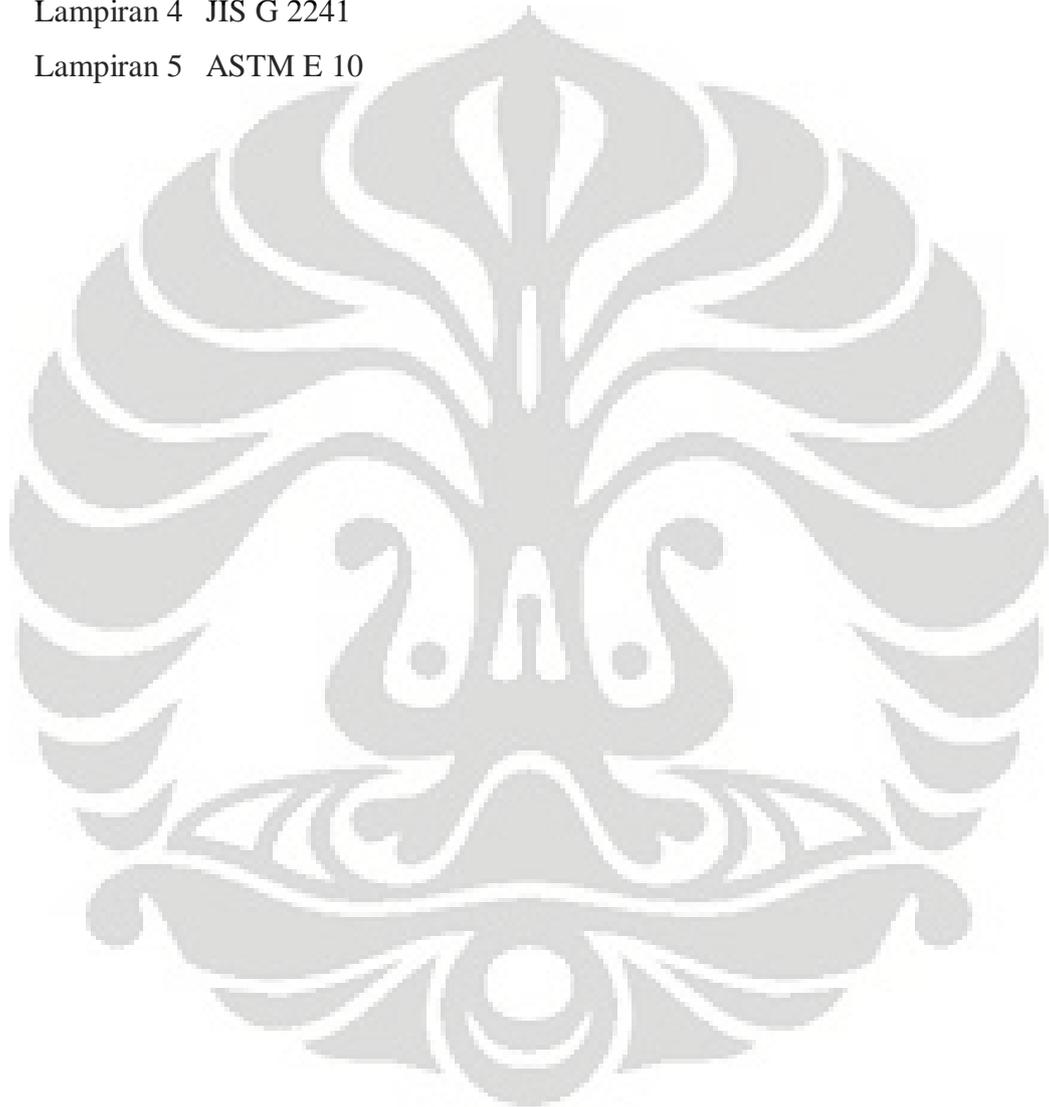
Lampiran 1 Data pengukuran ketebalan aktual P5A dan P5C

Lampiran 2 JIS G 5502

Lampiran 3 JIS G 2201

Lampiran 4 JIS G 2241

Lampiran 5 ASTM E 10



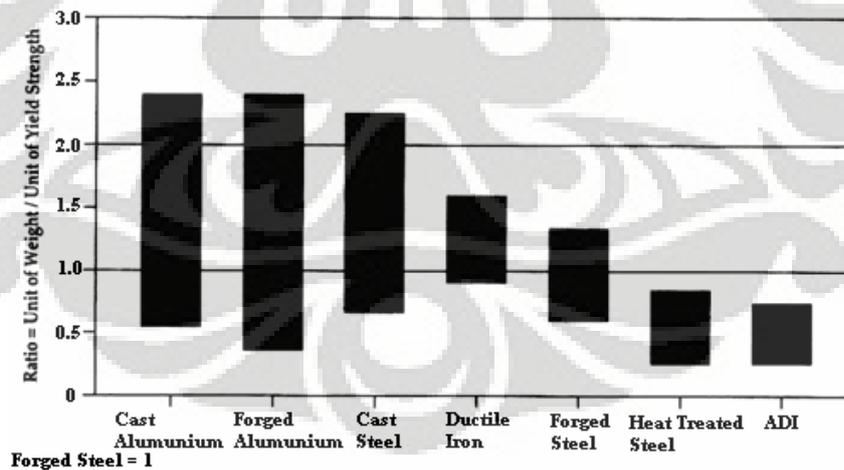
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

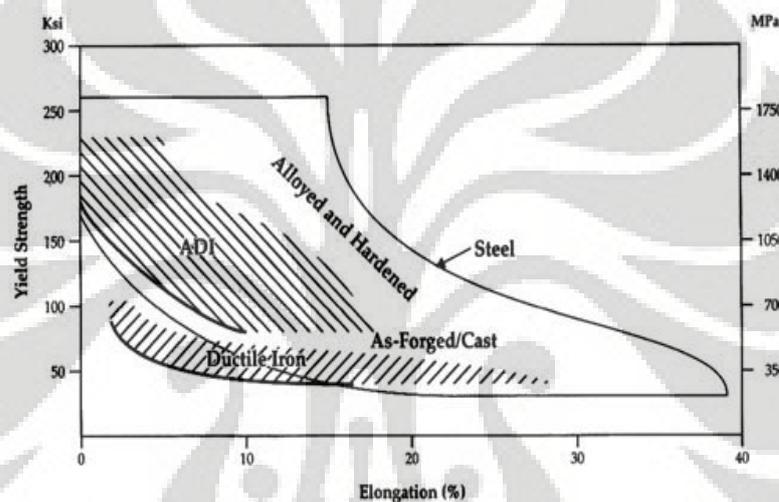
Tantangan yang dihadapi oleh sebagian besar industri otomotif di dunia adalah pengurangan emisi kendaraan dan penghematan bahan bakar. Hal ini erat kaitannya dengan isu dunia tentang penghematan energi, dimana setiap industri harus mampu menghasilkan produk dengan sifat yang lebih unggul dibandingkan sebelumnya. Cara yang saat ini tengah dikembangkan oleh beberapa industri adalah dengan mereduksi berat komponen otomotif karena pengurangan berat komponen sebesar 250 *pounds* (113,6 kg) secara umum dapat meningkatkan penghematan bahan bakar sebesar 1 *mpg* (0,425 km/l)^[1].

Komponen otomotif yang biasanya didominasi oleh material aluminium saat ini berangsur-angsur mulai berkurang karena dikembangkannya teknologi pengecoran dengan menggunakan material besi tuang nodular. Alasan utama penggantian material ini karena besi tuang nodular memiliki *yield strength* yang lebih tinggi dibandingkan aluminium jika diproduksi dengan berat yang sama seperti terlihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 *Relative weight per unit of yield strength*^[2]

Selain itu alasan penggunaan besi tuang nodular adalah sifat mekanik seperti kekuatan dan keuletan besi tuang nodular yang lebih tinggi dibandingkan besi tuang lainnya. Teknologi pengecoran yang cocok untuk dikembangkan pada besi tuang nodular ini melalui proses pengecoran dinding tipis (*thin wall ductile iron-TWDI*). Peningkatan lain dilakukan dengan proses austempering pada besi tuang nodular sehingga dihasilkan besi tuang nodular austemper (*austemperd ductile iron-ADI*). ADI ini memiliki fleksibilitas desain yang baik, kemampuan permesinan yang baik, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik yang lebih tinggi dibandingkan aluminium seperti terlihat pada gambar 2.



Gambar 1.2 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material^[3]

Teknologi pembuatan ADI merupakan teknologi yang cukup sederhana. Bahan baku material ADI adalah FCD (*Ferro Casting Ductile*) yang dihasilkan dari material FC (*Ferro Casting*). Faktor yang mempengaruhi peningkatan sifat dari material FC menjadi FCD ini terletak pada proses pengecorannya. Oleh karena itu proses pengecoran dinding tipis (*thin wall casting*) dipilih sebagai metode yang paling tepat dikembangkan pada proses pembuatan ADI. *Thin Wall Casting* atau pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal kurang dari 5 mm, merupakan bentuk perkembangan proses manufaktur yang dibutuhkan ADI^[4].

1.2 Perumusan Masalah

Pengecoran dinding tipis akan menghasilkan produk pengecoran yang ketebalan kurang dari 5 mm. Pada proses pembuatannya maka masalah yang biasanya timbul adalah proses pendinginan yang terlalu cepat sehingga dapat menghasilkan struktur karbida pada produk pengecoran. Hal ini timbul karena semakin tipis benda maka proses pendinginan yang berlangsung akan lebih cepat.

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

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) atau Cerium (Ce) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular atau bola-bola kecil. Banyaknya Mg yang ditambahkan dan larut dalam logam cair tergantung pada kadar sulfur dan kadar oksigen.

Masalah yang ditimbulkan dari pengecoran ini pada dasarnya disebabkan oleh perpindahan panas yang kurang baik sehingga perpindahan panas yang terjadi saat pengecoran menjadi bahan yang patut dipertimbangkan karena proses tersebut akan mempengaruhi proses pendinginannya. Efektifitas ketebalan pengecoran dinding tipis ini ditentukan oleh kemampuan perpindahan panas dan konduktivitas thermal material cor. Salah satu upaya menghambat perpindahan panas adalah dengan penggunaan isolator pada produk pengecoran. Pada penelitian ini, sifat fisik bahan akan diuji menggunakan pengujian mekanis seperti uji tarik dan uji keras untuk memenuhi keuletan yang diinginkan dan memenuhi kebutuhan performa produk akhir.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan isolator terhadap pengecoran dinding tipis, mengetahui pengaruh posisi plat tipis terhadap perbedaan sifat mekanis yang meliputi kekerasan dan kekuatan tarik plat tipis pada cetakan dengan atau tanpa menggunakan isolator, serta mengetahui pengaruh posisi plat tipis terhadap struktur mikro hasil yang meliputi karbida, nodularitas, dan jumlah nodul pada kedua cetakan (dengan atau tanpa isolator).

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini merupakan bagian kecil dari suatu rangkaian penelitian untuk mengembangkan teknologi pengecoran plat dinding tipis ADI. Proses pengecoran yang digunakan adalah pengecoran vertikal (*soundness casting*)^[5] dengan posisi ingate di bawah (*bottom ingate*). Pada tahap pengecoran dinding tipis, ketebalan target yang ingin dicapai adalah 1 mm. Cetakan akan dibuat dari pasir dengan jenis furan. Jenis material yang akan digunakan pada saat pengecoran adalah FCD 450. Penelitian ini merupakan jenis penelitian *foundry scale* (skala pabrik).

Setelah proses pengecoran, akan dilakukan analisa komposisi kimia, struktur mikro, sifat tarik dan nilai keras untuk melihat prosentasi keberhasilan proses pengecoran. Penelitian ini lebih difokuskan pada pengecoran dinding tipis dengan membandingkan sifat mekanis dan struktur mikro plat tipis pada cetakan yang menggunakan isolator dan cetakan tanpa isolator.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 BESI TUANG NODULAR (BTN)

Besi tuang nodular adalah besi tuang kelabu yang telah di inokulasi dan nodulasi sehingga memiliki bentuk grafit yang berubah dari bentuk serpih (*flakes*) menjadi bentuk bulatan (nodular). Sifat mekanis dan kekuatan besi tuang nodular lebih tinggi dibandingkan besi tuang maleabel.

Material dasar untuk pembuatan *Austempered Ductile Iron* (ADI) adalah besi tuang nodular atau *ferro casting ductile*. Besi tuang ini memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari besi tuang lainnya karena bentuk grafitnya yang berbentuk nodular (bulatan). Sifat besi tuang nodular ini antara lain^[8]:

- keuletan tinggi
- elongasi sebesar 18% (pada grade tertentu)
- kekerasan 143-187 HB
- *yield strength* 40.000 psi (275 MPa) untuk jenis ferritik dan lebih dari 90.000 psi (620 MPa) untuk jenis martensitik
- kekuatan tinggi sampai melampaui 120 ksi (825 MPa)
- ketahanan aus dengan kekuatan tarik melebihi 230 ksi (1600 MPa)

Menurut Keough, proses pengecoran BTN menawarkan banyak metode untuk menghasilkan suatu produk yang lebih baik dalam waktu singkat dengan biaya yang rendah^[3]. Berdasarkan ASTM A 395, kebanyakan spesifikasi standar dari BTN mensyaratkan nilai kekuatan dan keuletan minimum^[9].

2.1.1 Jenis Besi Tuang Nodular

Berdasarkan bentuk matriksnya, BTN dikelompokkan ke dalam 7 kelompok, antara lain:

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

Grafit berbentuk bulat dalam matriks ferit sehingga memberikan keuletan dan ketahanan impact yang baik, serta kekuatan tarik dan kekuatan luluh seperti baja karbon rendah.

2. Besi Ulet Ferritik-Perlitik (*Ferritic-Perlitic Ductile Iron*)

Grafit berbentuk bulat dalam matriksferit dan perlit sehingga memberikan sifat kemampukerasan yang baik dan biaya produksi yang rendah.

3. Besi Ulet Perlitik (*Perlitic Ductile Iron*)

Grafit berbentuk buas dalam matriks perlit, memberikan sifat kekuatan yang tinggi, ketahanan aus yang baik, dan keuletan serta ketahanan impak yang cukup baik.

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

Besi tuang nodular jenis ini didapat dari penambahan paduan yang cukup untuk mencegah pembentukan perlit 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 Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)

Didapat dari penambahan paduan dan atau perlakuan panas untuk mencapai struktur yang keras.

6. Besi Ulet Austenitik (*Austeitic Ductile Iron*)

Besi tuang jenis ini memiliki ketahanan korosi dan oksidasi yang baik, sifat megnetik yng baik, dan kekuatan yang baik.

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

Besi tuang ini merupakan kelompok besi tuang yang paling baru dikembangkan dengan perlakuan pans berupa *austemperting*. Sifat yang dihasilkan adalah ketangguhan dan elongasi yang tinggi.

Tabel 2.1 Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis BTN^[8]

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)

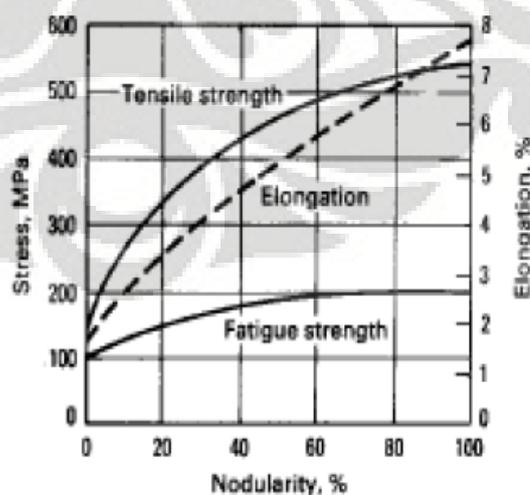
* Approximate ultimate tensile strength 87,000 p.s.i. (600 mPa) Hard, Brittle. (Note that the magnifications are different.)

2.1.2 Faktor yang mempengaruhi sifat mekanis BTN

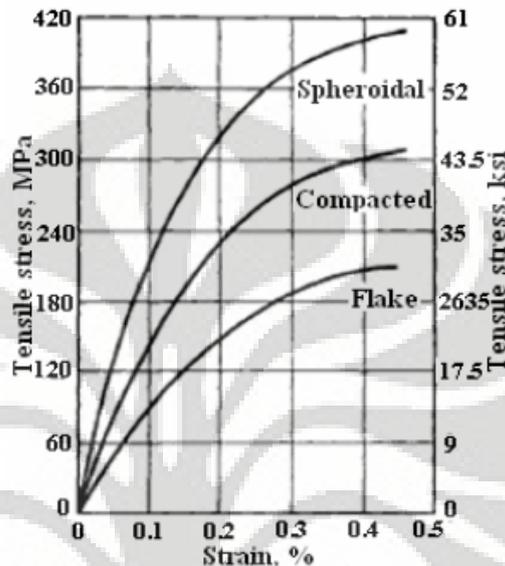
Sifat mekanis besi tuang nodular dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti:

1. Struktur Grafit

Grafit merupakan bentuk stabil dari karbon dalam besi tuang. Grafit ini dapat berbentuk serpihan (*flakes*) dan bulatan. Grafit dengan bentuk nodular pada besi tuang ini didapat dari proses pendinginan yang lambat dan adanya penambahan unsur Mg dan/atau Ce pada logam cair. Kekuatan dan keuletan yang tinggi dapat dihasilkan dari proporsi grafit nodular di besi tuang ini, Gambar 2.2. ^[7]

Gambar 2.1 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN ^[10]

Grafit dengan bentuk serpihan (*flakes*) memiliki pengaruh yang merugikan pada kekuatan besi tuang nodular, gambar 2.3. Presentasi nodular yang rendah dapat menurunkan kekuatan impak, mengurangi kekuatan fatik, meningkatkan konduktivitas panas dan meningkatkan kemampuan peredaman.



Gambar 2.2 Pengaruh bentuk grafit pada kurva *stress-strain* beberapa besi cor^[10]

2. Jumlah grafit

Ketika jumlah grafit meningkat, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang menurun pula. Pada umumnya, pengaruh-pengaruh ini adalah kecil jika dibandingkan dengan pengaruh dari variabel lainnya, karena kandungan karbon ekuivalen pada besi nodular bukan variabel utama dan pada umumnya dijaga tetap pada nilai eutektik^[7].

3. Ukuran ketebalan

Ketika ketebalan menurun maka kecepatan pendinginan dalam cetakan akan meningkat. Ukuran ketebalan yang tipis ini akan meningkatkan kekerasan namun menyebabkan kegetasan akibat struktur karbida yang terbentuk. Oleh karena itu dibutuhkan inoculan untuk membentuk grafit dengan jumlah nodul yang tinggi^[7].

4. Struktur matriks

Hal yang membedakan sifat besi tuang yang satu dengan besi tuang lainnya terletak pada matriks yang dimilikinya. Besi tuang dengan struktur ferit memberikan kekuatan dan kekerasan yang rendah tetapi keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Sedangkan matriks perlit memberikan sifat kekuatan dan keuletan yang tinggi. Pada hasil *as-cast* matriks akan terdiri dari berbagai proporsi perlit dan ferit. Keuletan dan kekuatan impak ditentukan oleh proporsi ferit dan perlit dalam matriks. Jika jumlah ferit meningkat maka kekuatan dan kekerasan juga akan meningkat, tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat mekanik besi tuang nodular menurut JIS G 5502-1995^[11]

JAPAN JIS G 5502-1995								
SPHEROIDAL GRAPHITE IRON CASTINGS								
Mechanical properties of separately cast test sample								
Symbol of grade	Tensile strength N/mm ²	Yield strength N/mm ²	Elongation %	Charpy absorption energy			(Information reference)	
				Test Temp. °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

5. Pengaruh unsur paduan

Penambahan unsur paduan ini bertujuan untuk mengontrol sifat dan performa material sesuai dengan aplikasi yang diinginkan. Beberapa unsur paduan yang biasanya ditambahkan pada besi tuang nodular antara lain:

a. Karbon (C)

Kadar karbon dalam suatu besi tuang nodular optimum pada 3,4-3,8% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Jika komposisi karbon melebihi batas tersebut maka akan mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi serta dapat

mengurangi deformasi plastik. Sedangkan jika komposisi karbonnya rendah maka akan muncul karbida di permukaan benda cor.

Kandungan karbon yang tinggi akan mengurangi deformasi plastik, sedangkan jika kandungan karbonnya berkurang maka akan meningkatkan keuletan dan elongasi besi tuang nodular ferritik^[8].

b. Magnesium

Magnesium dengan kadar 0,04 – 0,06% akan membantu dalam pembentukan grafit bulat. Jika kandungan sulfur awal di bawah 0,015%, maka kandungan mangan juga disesuaikan lebih rendah antara 0,035-0,04% untuk menghasilkan sifat yang diinginkan.

c. Silikon

Silikon ini berasal dari material dasar seperti *scrap*, *pig iron*, paduan besi dan beberapa paduan kecil lainnya yang ditambahkan selama inokulasi. Kadar silikon ini optimum pada 2,0 – 2,8%. Jika kadarnya lebih rendah maka keuletan akan meningkat namun terbentuk karbida pada bagian yang tipis. Sebaliknya, jika kadar silikon tinggi maka dapat mencegah terbentuknya karbida pada bagian yang tipis.

d. Mangan

Mangan berasal dari *scrap* baja. Pada besi cor ferritik kadar mangan harus $\leq 0,2\%$. Mangan merupakan unsur yang dapat menyebabkan segregasi mikro khususnya pada bagian yang tebal, hal ini karena mangan mendorong pembentukan karbida pada batas butir sehingga menghasilkan keuletan dan ketangguhan yang rendah.

e. Sulfur

Kadar sulfur dalam besi tuang nodular biasanya di bawah 0,015%, namun jika ditambahkan serium maka kadarnya akan meningkat karena terbentuk serium sulfida.

2.1.3 Liquid Treatment

Besi tuang nodular dibentuk dari proses perlakuan cairan (*liquid treatment*). Proses ini adalah usaha penambahan bahan suntikan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam

yang akan dihasilkan. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 proses *liquid treatment* yang dilakukan yaitu inokulasi dan nodularisasi.

a. Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan silikon (Si) ke dalam logam cair. Tujuannya adalah untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Fungsi lain inokulan adalah untuk meratakan distribusi grafit di dalam logam, memberikan struktur yang homogen pada setiap ketebalan, memperbaiki sifat mekanis logam.

Dikenal 2 metode pada saat penambahan inokulan ke dalam logam cair, yaitu:

a. Metode Ladel Inokulasi

Pada proses ini inokulan ditambahkan ke dalam ladel. Kelemahan metode ini adalah penurunan suhu yang terjadi cukup besar dan pemudaran inokulan lebih mudah terjadi.

b. Metode *Late* Inokulasi

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

b. Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa Mg atau Ce ke dalam logam cair yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular (bulatan). Untuk memperoleh ADI dibutuhkan suatu kebulatan, nodularitas dan jumlah nodul tertentu. Kebulatan dan jumlah nodul yang terjadi sangat bergantung pada keberhasilan proses nodularisasi. Proses ini mempunyai parameter utama yaitu temperatur dan waktu proses nodularisasi.

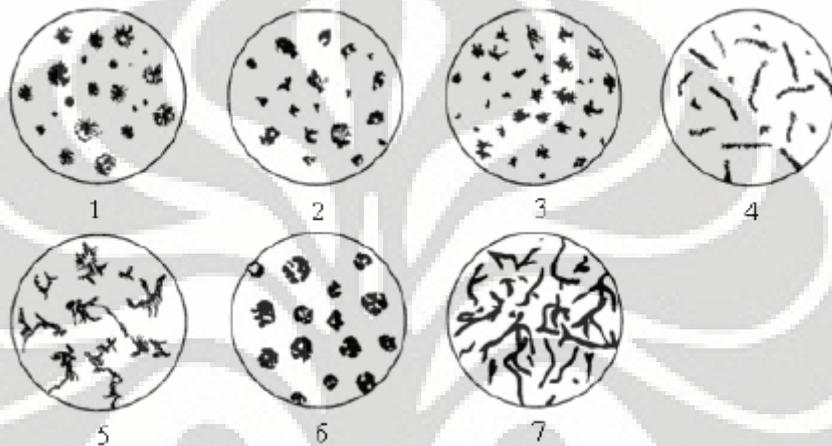
2.1.4 Nodularitas dan jumlah nodul

Nodularitas diartikan sebagai kebulatan dari grafit. Dianggap sebagai nodul jika bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat ini didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2kali diameternya. Nodularitas dapat ditentukan dengan mengacu pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap

jenis grafit yang ada dan dilaporkan dalam bentuk prosentase. Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G 5502 1989 seperti dibawah ini:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \quad (2.1)$$

Dimana n_1, n_2, n_3, n_4, n_5 adalah jenis grafit yang tercantum pada diagram klasifikasi dari bentuk grafit. Namun pada tahun 2001, perhitungan ini dirubah menjadi hanya mempertimbangkan tipe V dan tipe VI saja terhadap keseluruhan jumlah grafit yang ada dengan memperhatikan diameter dari nodul grafit.



Gambar 2.3 Klasifikasi bentuk grafit berdasarkan ASTM A 247

Jumlah nodul diartikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan dengan perbesaran mikroskop 100x. jumlah nodu ini dapat dihitung dengan membandingkan foto mikro struktur non-etsa dengan *Microstructure Rating Chart 1993* yang dikeluarkan oleh *American Foundry Society (AFS)* dan *Graphite Rating in Ductile Iron Chart 1999* yang dikeluarkan oleh *Ductile Iron Society (DIS)*.

Dengan bantuan *image analysis* perhitungan nodularitas dapat dikembangkan menjadi:

$$\text{Nodularitas} = \frac{A_{Acc}}{A_{Acc} + A_{Un.Acc}} \times 100\% \quad (2.2)$$

Dengan:

A_{Acc} = Area dari partikel yang memenuhi syarat untuk dihitung

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

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

- a. Menurut *sphericity* (S)

$$S = \frac{4\pi \times A}{(\text{perimeter})^2} \quad (2.3)$$

- b. Menurut *compactness* (C)

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

Berdasarkan konversi maka dapat dihitung nilai $S > 0,65$ dan nilai $C > 0,7$ ^[11].

Perhitungan jumlah nodul dilakukan setelah ditentukan S, C dan diameter minimal nodul yang akan dihitung. Diameter minimal nodul yang akan dihitung yang biasa digunakan adalah 5 μm . Nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata mempengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan peningkatan nodularitas dan jumlah nodul. Sedangkan kekerasan meningkat ketika nilai nodularitas dan jumlah nodul menurun^[8].

2.2 AUSTEMPERED DUCTILE IRON (ADI)

ADI merupakan salah satu jenis besi tuang nodular yang dilakukan proses *austempering* sehingga dapat meningkatkan kekuatan fatik. Tahap yang dibutuhkan pada proses ini adalah austenisasi dan *quenching*. Austenisasi membutuhkan pemanasan dan penahanan temperatur sampai sekitar 900°C (1650°F), sedangkan *quenching* merupakan proses pendinginan cepat dan penahanan temperatur austemper secara isothermal.

ADI merupakan suatu material yang memiliki kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, kemampuan permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan dan ketahanan aus yang baik^[2]. Syarat yang harus dimiliki oleh ADI adalah nodularitas > 90%, jumlah nodul > 1000/mm², matriks ferrit/perlit dengan perbandingan yang konsisten, minimal level karbida dan bebas dari segregasi^[18].

Peningkatan sifat mekanis ADI disebabkan adanya perubahan pada struktur mikronya^[18]. Sifat dari ADI dikarenakan struktur matrik yang unik dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit penstabil karbon, yang disebut ausferit. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki oleh ADI disebut sebagai bainit.

Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja. Tetapi, dari hasil-hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan pada *austempering* baja, kemudian berdasarkan ASTM A44-92 disebut sebagai *ausferit*^[18].

2.2.1 Sifat Mekanik ADI

Penelitian yang dikembangkan tentang ADI ini sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersil dalam skala kecil pada tahun 1970-an. Dalam suatu artikel, Spada mengatakan bahwa ADI ideal untuk aplikasi-aplikasi industri yang membutuhkan kekuatan tinggi dengan ketahanan aus yang rendah. Menurut Keough, konsumsi energi yang digunakan untuk memproduksi 1 ton ADI adalah 3100 kWh, sedangkan untuk memproduksi baja tempa adalah 5800 – 6200 kWh^[3]. ADI dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi aluminium^[21].

Peningkatan sifat-sifat, terutama sifat mekanis pada ADI disebabkan adanya perubahan pada struktur mikronya. Sifat dari ADI dikarenakan struktur matrik yang unik dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit penstabil karbon, yang disebut ausferit. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki oleh ADI disebut sebagai bainit. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja. Tetapi, dari hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan proses *austempering* baja, kemudian berdasarkan ASTM A 644-92 disebut sebagai *ausferrite*^[22]. Proses *austempering* telah dikembangkan sejak tahun 1930-an pada besi cor dan *wrought steel*.

Menurut Harding, pada awalnya ADI diaplikasikan untuk bidang otomotif, tetapi dengan melihat kelebihan-kelebihan yang dimilikinya, maka penggunaan ADI diperluas untuk bahan komponen tidak lagi hanya untuk bidang otomotif, tetapi untuk bidang lain seperti konstruksi, pertambangan, pertanian, dan pertahanan^[3]. Selain itu, sifat *light-weight* yang dimiliki ADI juga dapat dimungkinkan untuk dikembangkan sebagai bahan komponen antara lain blok mesin, poros engkol, stang piston dan roda gigi pada *hybrid car*.

Pada tahun 2002, Martinez dan kawan-kawan berhasil membuat stang piston atau *connecting rod* ADI dengan ketebalan cor 3 mm, Gambar



Gambar 2.4 Stang Piston (*connecting rod*) terbuat dari ADI dinding tipis, dengan ketebalan 3 mm^[5]

2.3 PENGECORAN DINDING TIPIS

Pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal 5 mm^[2] merupakan bentuk perkembangan proses manufaktur yang dibutuhkan untuk membuat ADI. Pengecoran dinding tipis dilakukan untuk mengurangi berat yang dimiliki oleh produk tuang sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan *light weight* pada suatu komponen.

Pada tinjauan ilmiah kekinian, belum ada standar baku untuk ketebalan benda yang dikategorikan dalam pengecoran dinding tipis (*thin wall casting*). Caldera mendefinisikan ketebalan dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal kurang dari 5 mm^[4]. Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm^[5]. Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil atau sama dengan 3mm^[6]. Ketebalan minimal terakhir yang sudah dapat dicapai untuk membuat besi tuang nodular dinding tipis adalah 1,4 mm yang dibuat oleh kelompok Stefanescu^[6]. Sementara ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis sebagai bahan baku pembuatan ADI adalah 2 mm yang di capai oleh kelompok Mourad^[7] dalam bentuk uji, dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez^[5] dalam bentuk *hollow connecting rod* dari desain inovatif mesin 2 silinder.

2.3.1 Struktur Mikro TWDI

Pengamatan lebih jauh terhadap struktur mikro plat tipis dilakukan untuk mengevaluasi jumlah nodul serta bentuk dan ukuran grafit, diameter grafit dan

nodularitas. Jumlah dan ukuran nodul pada pengecoran dinding tipis berhubungan dengan jarak antar partikel (*interparticle spacing*) atau λ_c . Korelasi antara keduanya adalah jarak (λ_c) akan semakin kecil jika jumlah nodul dan kecepatan pendinginan meningkat.

Menurut Ruxanda^[8] struktur mikro TWDI terdiri dari:

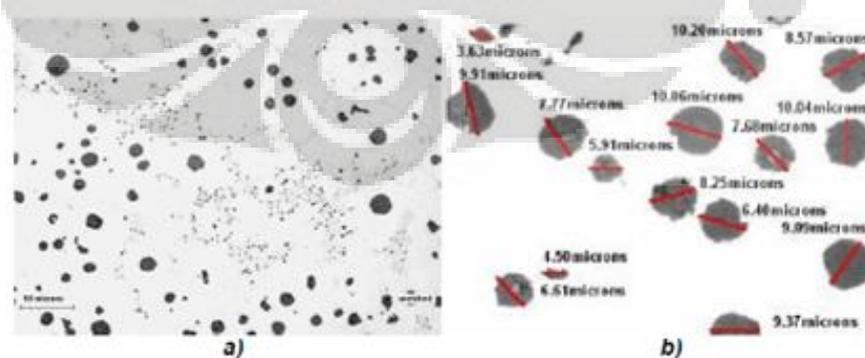
2.3.1.1 Matriks

Matriks yang umumnya terdapat pada pengecoran dinding tipis adalah ferrit, perlit, dan karbida jika ada. Rasio dari setiap matriks ini besar atau jumlahnya tergantung dari beberapa parameter seperti kecepatan pendinginan, *liquid treatment*, komposisi kimia logam cair serta temperatur tuang.

2.3.1.2 Grafit

Jumlah nodul terbanyak yang pernah ada yaitu sebanyak 3500-4400 nodul/mm² dengan ukuran ketebalan plat 1-3 mm (Mampaey, 1197 dan Javaid, 1998). Nilai ini tergantung dari perbesaran yang diambil saat perhitungan dan diameter nodul minimum yang dihitung. Pada tahun 1998 Javaid menghitung diameter rata-rata nodul yang berukuran 3,9-5,9 mm pada plat 1 mm.

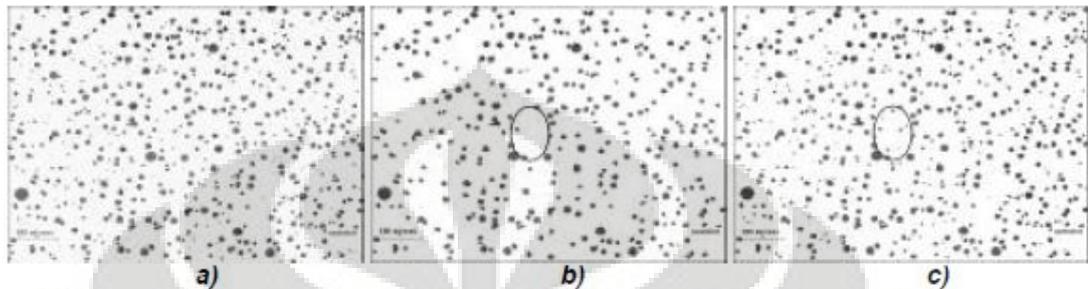
Pada pengecoran besi tuang nodular, ukuran nodul minimum yang dapat diterima sesuai dengan prosedur standar adalah 10 μm . Namun nilai tersebut bukan merupakan nilai minimum yang baik untuk pengecoran dinding tipis karena pada keadaan sebenarnya banyak terdapat nodul-nodul dengan ukuran yang lebih kecil dari 10 μm , gambar 2.4.



Gambar 2.5 Studi kasus dari dimensi nodul: a) perbedaan ukuran dari nodul; b) beberapa nodul berukuran < 10 μm ^[8]

Pada dasarnya ukuran partikel-partikel tersebut kurang dari 10 μm . Oleh karena itu, jika nodul-nodul tersebut diabaikan maka akan diperoleh jumlah nodul yang sedikit.

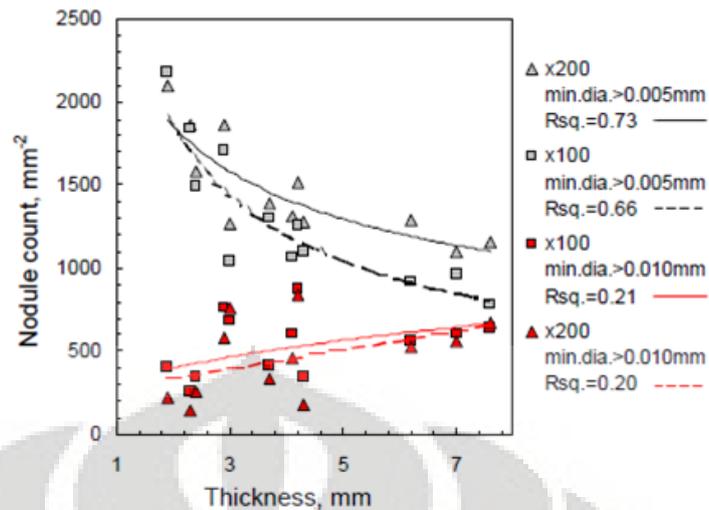
Contoh perhitungan jumlah nodul yang memperhitungkan ukuran nodul yang kecil dari 10 μm dijelaskan pada gambar 2.5



Gambar 2.6 Pengaruh penerimaan jumlah nodul minimum: a) struktur mikro awal; b) nodul yang kurang dari 10 μm dileminasi; c) nodul yang kurang dari 5 μm dieliminasi^[8]

Gambar 2.5 a) merupakan struktur mikro TWDI. Ketika nodul dengan ukuran $< 10 \mu\text{m}$ tidak diperhitungkan maka daerah yang dilingkari menunjukkan nodul yang tidak dihitung, gambar b). Hasil pengukuran jumlah nodul yang didapat adalah 720 nodul/ mm^2 . Namun pada gambar c), dengan menggunakan asumsi diameter terkecil $< 5 \mu\text{m}$ tidak dihitung maka didapatkan jumlah nodul sebesar 1173 nodul/ mm^2 .

Oleh karena itu untuk menetapkan perbesaran optimum dan diameter terkecil dari nodul yang dihitung pada plat hasil pengecoran dinding tipis, maka dibandingkan dua buah plat dengan perbesaran 100x dan 200x. perhitungan ini dilakukan untuk menetapkan perhitungan nodul minimum. Hasil yang didapat diplot kedalam grafik seperti dibawah ini:



Gambar 2.7 Korelasi jumlah nodul dengan ketebalan plat^[8]

Dari grafik terlihat bahwa pada nodul minimum 5 μm , jumlah nodul akan berkurang seiring dengan meningkatnya ketebalan plat. Jumlah nodul yang paling tinggi didapat pada struktur mikro dengan perbesaran 200x. Jika ukuran minimum nodul yang diambil 10 μm maka jumlah nodul akan meningkat seiring dengan meningkatnya ketebalan plat, baik pada perbesaran 100x maupun 200x. Dan hal ini tidak benar. Oleh karena itu ditariklah suatu kesimpulan bahwa pengukuran nodul minimum adalah sebesar 5 μm .

Hubungan antara jumlah nodul dengan kecepatan pendinginan akan mempengaruhi nilai λ_c .

Persamaan untuk menghitung kecepatan pendinginan pada pengecoran vertikal adalah:

$$\frac{dT}{dt} = 41,070 - 0,02036 T_{pour} - 1,374 z \quad (2.5)$$

Dimana: z = ketebalan plat

Faktor-faktor yang menentukan keberhasilan suatu pengecoran dinding tipis ini antara lain:

2.3.2 Karbida

Dalam proses solidifikasi besi tuang selain terbentuk grafit bebas juga mempunyai kecenderungan terbentuknya struktur karbida. Pada pengecoran besi tuang nodular, struktur karbida (Fe_3C) adalah salah satu bentuk cacat metalurgi dimana struktur ini memiliki sifat yang keras dan getas.

Keberhasilan pembuatan komponen dengan pengecoran dinding tipis ini ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida^[6]. Karbida ini merupakan struktur mikro yang secara alami terbentuk pada benda cor yang memiliki kecepatan pendinginan tinggi atau benda cor dengan ketebalan yang tipis.

Parameter-parameter yang mempengaruhi terhadap kecenderungan terbentuknya karbida menurut Stefanescu^[6] adalah:

- Karakteristik logam cair

Pada karakteristik logam cair dua hal yang harus diperhatikan adalah komposisi kimia logam cair dan temperatur tuang.

- *Liquid Treatment*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, yang mempengaruhi proses *liquid treatment* ini adalah inoculasi dan nodularisasi.

- Cetakan

Pada cetakan untuk pengecoran dinding tipis hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.

- Desain dari sistem pengecorannya

Menurut Ruxanda^[8], parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah:

- Kecepatan pendinginan dan pembekuan yang tinggi (Javaid, 1998)
- Keberadaan elemen pembentuk karbida dalam bahan baku dan rendahnya nilai *Carbon Equivalent* (Loper, 1965)
- Kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit (Evans, 1981)
- Jumlah nodul yang rendah, proses inoculasi yang buruk serta nodularitas yang rendah (Evans, 1981 dan Stefanescu, 1981)

Pada pengecoran besi tuang nodular, struktur karbida (Fe_3C) adalah salah satu bentuk cacat secara metalurgi^[12] dimana sifat yang dimilikinya adalah keras dan getas. Struktur ini terbentuk karena rasio permukaan presipitasi grafit yang terbatas terhadap volume fraksi dari jumlah grafit. Oleh karena itu perlu ditambahkan elemen penstabil karbida seperti Mg untuk proses nodulasi.

Faktor lain adalah bahwa kandungan unsur sulfur di dalam besi tuang nodular secara sengaja dikurangi jumlahnya hingga 0,02% untuk memfasiliasi pembentukan grafit^[13]. Pembentukan karbida juga terjadi jika proses inokulasi tidak berjalan dengan efektif. Proses ini dapat mengakibatkan terjadinya *fading* sehingga terbentuk karbida primer. Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas dengan temperatur proses kurang lebih 900°C ^[14].

Pada proses pembuatan besi tuang nodular, resiko pembentukan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan atau CE sebagai nodulan. Kedua unsur tersebut selain akan berfungsi sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida. Kandungan dalam logam cair dapat juga menyebabkan pembentukan karbida primer seperti Mn, Cr, V dan Mo^[20]. Dalam BTN, kromium adalah unsur pembentuk karbida primer yang stabil dan tidak mudah dihilangkan dengan perlakuan panas dan inokulasi. Hidrogen juga dapat menyebabkan terbentuknya karbida primer.

2.3.3 Nilai *Carbon Equivalent* (CE)

Carbon equivalent adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Nilai CE tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Loper mengatakan untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4,3%^[8] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75-4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih dari karbida untuk TWDI dengan ketebalan 3-5 mm^[15].

Karena pengaruhnya terhadap pembentukan grafit, maka unsur-unsur seperti Mn, P dan S juga ditambahkan pada perhitungan CE. Sehingga selain

dengan persamaan di atas, nilai CE ini juga dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \% C + 0.3\% Si + 0.33\% P - 0.027\% Mn + 0.4\% S \quad (2.7)$$

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

$$CE = 4,9265 - 0,0425 \times t \quad (2.8)$$

Dengan t adalah ketebalan benda^[6].

2.3.4 Lapisan Kulit

Struktur mikro TWDI pada bagian tepi akan membentuk suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular. Nama lapisan tersebut adalah *flake graphite rim anomaly*^[8] atau *skin effect*^[16]. Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200µm atau 0,2 mm^[8]. Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik, menurunkan kekuatan dan keuletan karena grafit serpih dapat berperan sebagai konsentrasi tegangan dan menjadi lokasi permulaan retak, lapisan kulit ini biasanya dihilangkan dengan proses permesinan^[17].

Ruxanda menemukan adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi dan daerah tengah. Perbedaan inilah yang dianggap bertanggung jawab atas terjadinya perbedaan bentuk grafit. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi sebagai akibat adanya oksidasi Mg. Sebagian pendapat menyebutkan bahwa terjadinya efek kulit adalah akibat berikatannya Mg dengan S.

2.4 CACAT PADA PENGECORAN DINDING TIPIS

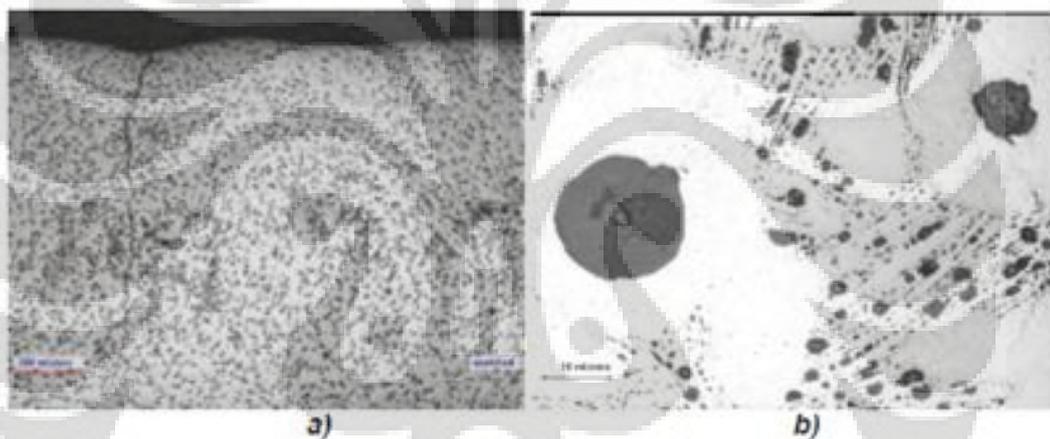
2.4.1 *Microporosity*

Cacat ini terbentuk dari hasil ketidakmampuan logam cair untuk meraih daerah pengecoran saat terbentuknya rongga atau pori. *Microporosity* juga dapat terjadi dibagian tengah pengecoran dinding tipis sebagai hasil dari butiran eutektik yang terlalu luas dan/atau kekuatan cetakan yang rendah (Chebotar, 1993). Untuk menghilangkan cacat ini, hal yang dapat dilakukan adalah dengan menurunkan kecepatan pendinginan melalui pengecoran vertikal.

2.4.2 *Inverse chill*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa masalah dari pengecoran dinding tipis adalah terbentuknya karbida (*white eutectic*). Kehadiran karbida pada plat tipis ini telah lama didiskusikan oleh para peneliti diantaranya Karsay 1965, Yeung 1998, Fargues 1987, Javid 1998, Evans 1981, Loper 1965, Begg 1993, Mampaey 1997, Mueller 1996, Stefanescu 1981, namun hanya sedikit jurnal yang membahas tentang *inverse chill*.

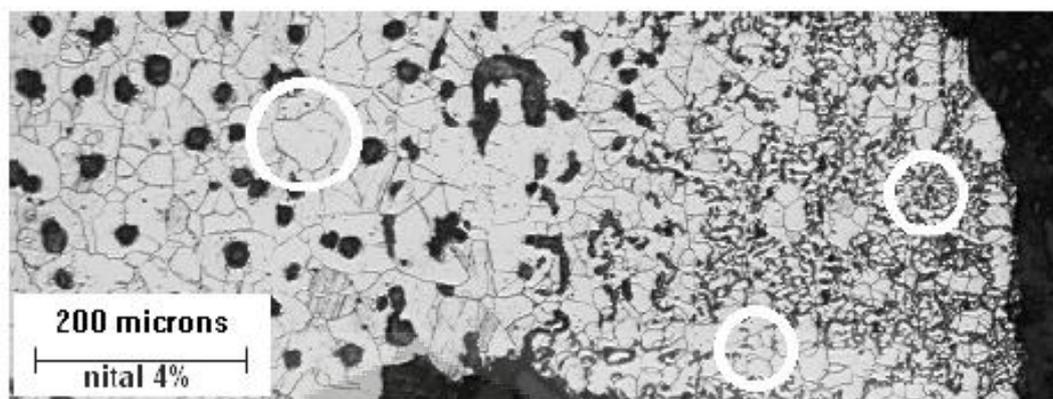
Pada hasil metalografi, *inverse chill* ini dapat dengan mudah dibedakan. Pada sampel non etsa ciri utamanya adalah adanya grafit (nodul) yang membentuk kelompok (*cluster*) dan terletak di tengah-tengah spesimen, gambar 2.7 a). Pada perbesaran yang lebih tinggi lagi maka grafit-grafit tersebut akan membentuk suatu jalur atau pola.



Gambar 2.8 Indikasi *inverse chill*: a) nodul yang membentuk *cluster* di tengah spesimen; b) partikel grafit membentuk jalur/pola^[8]

2.4.3 *Flake graphite rim anomaly*

Dari hasil analisa metalografi plat pengecoran dinding tipis biasanya ditemukan grafit berbentuk serpihan yang interdendritik yang biasa disebut dengan *flake graphite rim anomaly*. Pengukuran kandungan karbon di daerah dendritik mengindikasikan nilai karbon yang tinggi sebagai akibat dari aglomerasi partikel grafit. Namun di daerah interdendritik, karbon yang terlihat pada struktur mikro merupakan matriks ferit-perlit, gambar 2.8.



Gambar 2.9 *Rim flake of graphite*^[8]

Hal ini terjadi karena kandungan Mg di daerah *bulk* lebih tinggi dibandingkan di daerah *rim* sehingga segregasi mikro Mg terjadi di daerah interdendritik. Kesimpulannya adalah kadar Mg yang berbeda dapat merubah bentuk grafit di daerah *bulk* menjadi bentuk serpih di permukaan. Asumsi lain yaitu kandungan Mg yang rendah di daerah *rim* timbul dari hasil oksidasi Mg oleh gas yang terdapat di cetakan. Kandungan Mg yang dianjurkan pada pengecoran dinding tipis adalah $< 1\%$ ^[8].

2.4.4 *Graphite alignment*

Frekuensi cacat jenis ini pada pengecoran dinding tipis memang yang paling jarang ditemukan, namun hal ini bisa saja terjadi. Jika cacat ini terjadi pun maka tidak akan menimbulkan kerusakan secara langsung, namun hanya merubah geometri plat menjadi lebih besar dari geometri awalnya.

2.5 ISOLATOR PADA PENGECORAN DINDING TIPIS

Faktor yang membedakan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah modifikasi cetakan yang dilakukan dengan penggunaan isolator. Di dalam penelitian ini akan dibahas perbedaan sifat mekanis dan struktur mikro plat tipis pada cetakan yang menggunakan isolator dan tanpa isolator.

Plat hasil pengecoran dinding tipis biasanya mengalami permasalahan seperti terbentuknya karbida dan lapisan kulit (*skin effect*). Berdasarkan penelitian-penelitian oleh beberapa ahli, upaya yang dilakukan untuk

meminimalisasi terbentuknya karbida dan lapisan kulit ini adalah hanya dengan proses permesinan saja. Kita tahu bahwa faktor penyebab timbulnya masalah tersebut adalah proses pendinginan yang terjadi terlalu cepat sehingga pembekuan pada plat tipis juga berlangsung sangat cepat. Oleh karena itu pada penelitian ini akan dikembangkan suatu modifikasi cetakan menggunakan isolator dengan harapan bahwa isolator tersebut dapat membuat proses kecepatan pendinginan berlangsung lebih lambat sehingga didapatkan struktur akhir benda cor yang bebas dari karbida maupun lapisan kulit. Adapun isolator yang digunakan pada penelitian ini adalah *glasswool*.

2.5.1 Pengertian *Glasswool*

Glasswool merupakan salah satu jenis bahan isolasi yang terbuat dari *borosilicate glass* dengan unsur pokok yang ada didalamnya adalah pasir, soda abu dolomit, *limestone*, *ulexite*, dan anhidrit. Bahan-bahan utam ini kemudian dilebur didalam dapur pada temperatur 1400⁰C kemudian serat tersebut dimasukkan ke dalam *spinners*. *Spinners* ini prinsip kerjanya dengan memutar atau berotasi dengan beribu-ribu lubang kecil yang terdapat di sekelilingnya dimana serat tersebut diberikan gaya sentrifugal sehingga terbentuklah *glass fiber*. Serat ini kemudian di-*spray* dengan penguat resin, *water repellents* dan *mineral oil*.

2.5.2 Tujuan Penggunaan *Glasswool*

Glasswool merupakan salah satu jenis dari material untuk insulasi thermal. Material ini digunakan untuk mengurangi laju kecepatan dari proses perpindahan panas. Perpindahan panas merupakan transisi energi thermal dari objek atau benda dengan temperatur yang tinggi menuju objek atau benda yang temperaturnya lebih rendah. Ketika terdapat perbedaan temperatur suatu benda terhadap kondisi lingkungannya maka pada saat tersebut terjadilah proses perpindahan panas baik dari lingkungan menuju benda maupun dari benda menuju lingkungan. Proses ini berlangsung secara terus menerus sampai tercapainya kondisi kesetimbangan. Adapun kondisi kesetimbangan yang terjadi pada pengecoran ini adalah saat cetakan mulai membeku dan berubah dari *liquid* menjadi *solid*.

2.5.3 Pengaruh penggunaan *glasswool*

Glasswool yang dipasang pada salah satu cetakan akan menunjukkan proses perpindahan panas yang berbeda karena dengan adanya *glasswool* maka semakin kecil perpindahan panas ke atau dari lingkungan. Perpindahan panas terjadi karena perbedaan temperatur. Secara umum kita mengenal tiga buah jenis perpindahan panas yaitu secara konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui medium yang diam misalnya perpindahan panas melalui benda padat. Sementara perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi pada suatu permukaan dengan fluida yang bergerak karena adanya gradien temperatur. Perpindahan panas yang terjadi pada cetakan ini adalah perpindahan secara konveksi.

Glasswool banyak digunakan sebagai material insulasi karena sifatnya yang tidak mudah terbakar dan memiliki temperatur melting yang tinggi. Selain itu *thermal properties* seperti *specific heat*, *thermal diffusivity*, dan konduktivitas *thermal glasswool* yang sangat baik.

Tabel 2.3 Sifat *glasswool*

<i>Specific Heat Capacity</i>	0,84 KJ/kg ⁰ C
<i>Thermal Conductivity</i>	0,04 W/m ⁰ C
<i>Density</i>	16 kg/m ³

2.5.4 Jenis isolator lain

Selain *glasswool*, banyak isolator lain yang dapat digunakan untuk menghambat laju perpindahan panas. Dalam jurnal yang dikemukakan oleh Ralph E Showman dan Ronald C Aufderheide, bahwa salah satu upaya untuk mengurangi cacat yang terjadi pada saat pengecoran dinding tipis dan cara untuk memperlambat solidifikasi pengecoran dinding tipis adalah dengan menggunakan *Low Density Alumina-Silicate Ceramic (LDASC)*. LDASC merupakan suatu bahan aditif yang dapat mengurangi kapasitas panas dan konduktivitas thermal.

Komposisi LDASC terbuat dari 25-40% alumina ditambah dengan 75% pasir silika. Jadi penggunaan aditif ini dengan cara pencampuran antara aditif dengan pasir silika.

Tabel 2.4 Sifat LDASC^[20]

Appearance:	Off-white to gray free-flowing powder
Particle Distribution:	10-350 microns
Mean Diameter:	120-130 microns
Average Wall Thickness:	5-10% of diameter
Bulk Density:	0.35-0.45 g/cc (about 25 lbs./ft ³)
pH:	7.0-9.0
Thermal Conductivity:	0.15-0.25 W/mC
Melting Temperature:	1,200-1,600C (2,192-2,912F)
Specific Heat:	0.6-0.8 J/gC

Namun, penggunaan LDASC ini sebagai salah satu jenis isolator terkendala karena dibutuhkan ketelitian pada saat proses pencampuran antara pasir dengan bahan aditif. Selain itu juga teknik pengecoran menggunakan LDASC membutuhkan inti atau bahan sisipan tambahan sehingga meningkatkan kompleksitas cetakan dan biaya.

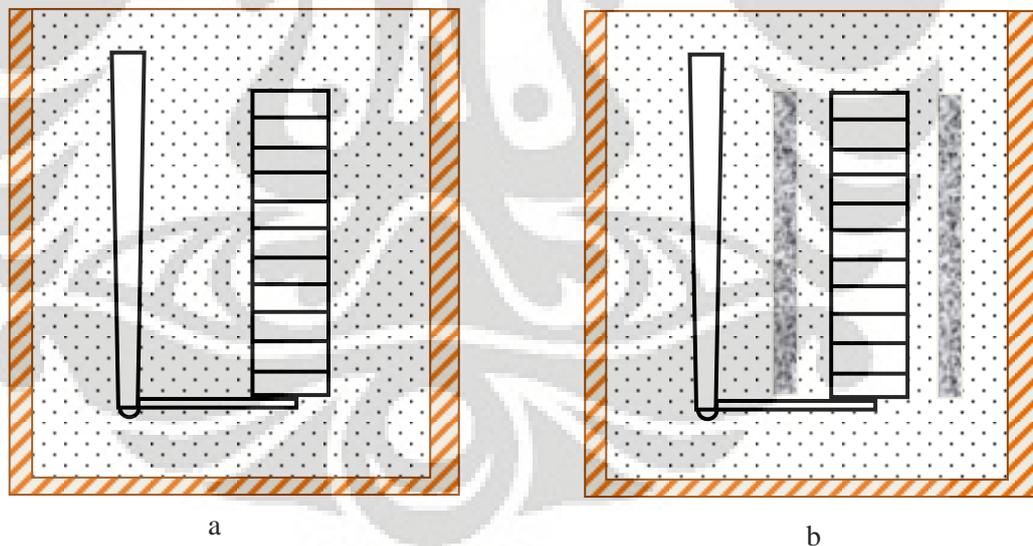
Berdasarkan literatur tersebut maka pada penelitian ini akan dilakukan upaya modifikasi cetakan untuk pengecoran dinding tipis dengan penggunaan isolator yaitu *glasswool*. Penggunaan *glasswool* ini dilakukan mengingat biaya produksi yang relatif lebih murah serta sifat-sifat *glasswool* itu sendiri yang memiliki temperatur lebur yang tinggi, serta konduktivitas thermal dan *thermal diffusivity* yang baik.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian sebelumnya untuk menghasilkan *thin wall austempered ductile iron* (TWADI). Penelitian ini difokuskan pada pengaruh penggunaan isolator pada pengecoran dinding tipis besi tuang nodular dengan sistem saluran tuang vertikal.

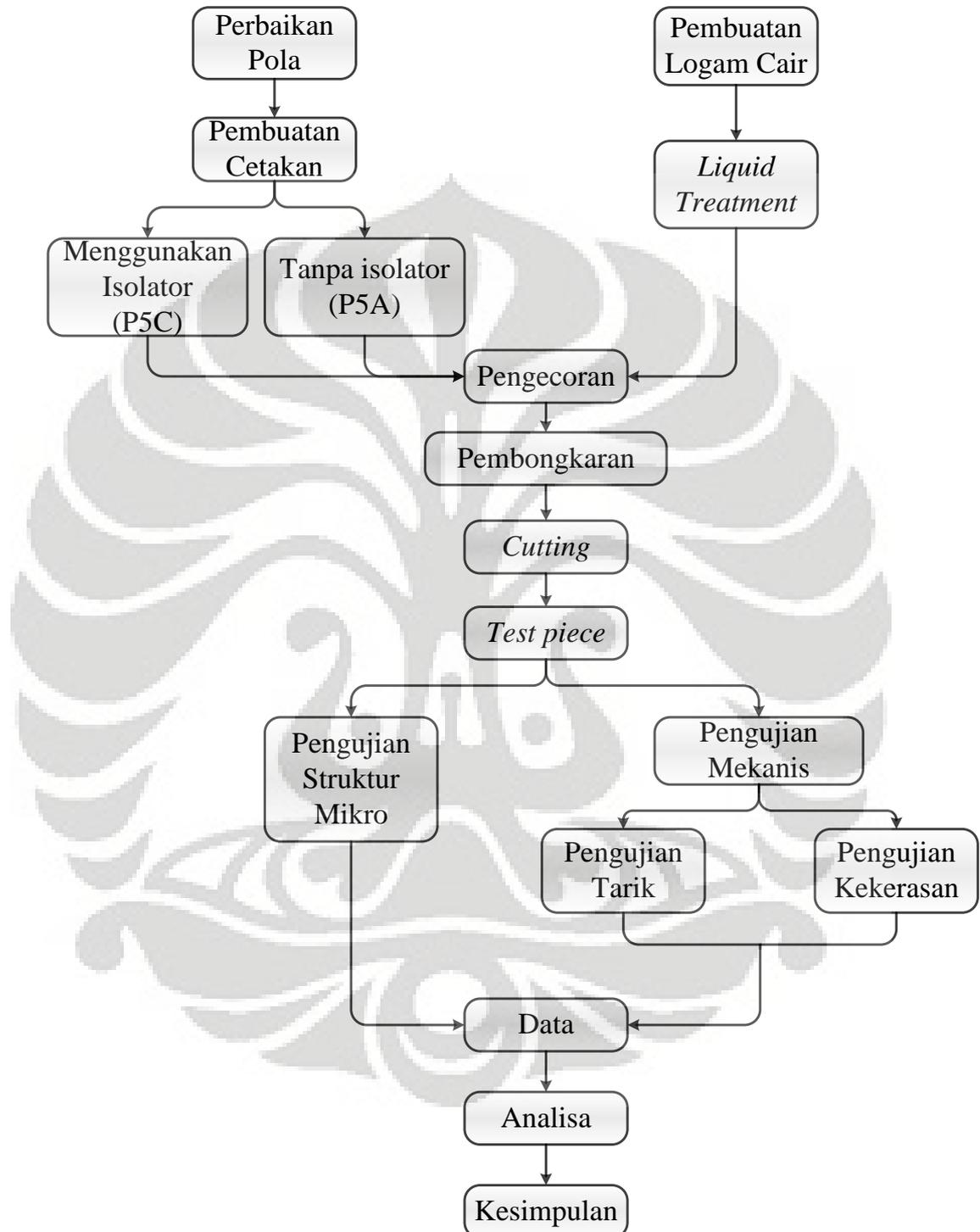
3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dibuat dua buah cetakan dengan desain pengecoran vertikal. Perbedaan antara kedua cetakan adalah salah satu cetakan tanpa menggunakan isolator (P5A) sedangkan cetakan yang lain menggunakan isolator (P5C). Gambar 3.1 Model P5C dengan penambahan isolator diharapkan dapat menghambat proses transfer panas pada cetakan.



Gambar 3.1 Desain cetakan penelitian; a) Model P5A dan b) Model P5C

Penelitian yang difokuskan pada pengaruh penggunaan isolator pada proses pengecorannya secara umum dijelaskan pada diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian ini meliputi:

1. Alat pembuatan pola

Alat yang digunakan saat pembuatan pola antara lain:

- Mesin gergaji
- Jangka sorong
- Martil
- Pensil
- Mesin bubut
- Mesin bor
- Amplas
- Pulpen

2. Alat pembuatan cetakan

Alat yang digunakan saat pembuatan cetakan antara lain:

- Mesin pencampur pasir (*mixer*)
- Sepasang flask tipe Excel karena pengecoran yang dilakukan adalah pengecoran vertikal
- Mesin pengangkut

3. Alat pembuatan logam cair

Alat yang digunakan dalam pembuatan logam cair antara lain:

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

4. Alat pengecoran

Alat yang digunakan dalam proses pengecoran antara lain:

- Ladel atau panci tuang
Ladel adalah tempat untuk menampung logam cair yang telah dilebur untuk selanjutnya dituangkan ke dalam rongga cetakan

- *Thermocople*
- Mesin pengangkut

5. Alat pembongkaran

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

6. Alat pemotongan

Alat yang digunakan saat proses permesinan adalah mesin bor, mesin gergaji, dan mesin gerinda.

7. Alat pengujian

Alat yang digunakan dalam pengujian antara lain:

- *Microscop optic digital*
- *Microhardness tester*
- *Tensile strength machine*

3.2.2 Bahan

Bahan baku yang digunakan saat melakukan pengecoran diantaranya:

1. Bahan baku pembuatan pola

Bahan baku yang digunakan adalah kayu, papan triplek, lem, dempul, dan cat.

2. Bahan baku pembuatan logam cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair berasal dari *scrap* baik *return scrap* dan *steel scrap*.

3. Bahan baku pembuatan cetakan

Bahan baku yang digunakan dalam proses pembuatan cetakan antara lain:

- Pasir silika

Merupakan bahan baku utama untuk pembuatan cetakan pasir.

- Asam furan

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

- Bahan pengikat tambahan

Biasanya ditambahkan 20-50% dari berat pengikat utama.

- Serbuk arang

Serbuk arang digunakan dalam pembuatan cetakan agar sifat mampu ambruk dari cetakan baik, sehingga proses pembongkaran menjadi lebih mudah dan pasir dapat dipakai kembali untuk pembuatan cetakan berikutnya.

Selain bahan baku utama, terdapat beberapa bahan baku tambahan yang digunakan pada proses pembuatan cetakan antara lain:

- *Platting*

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

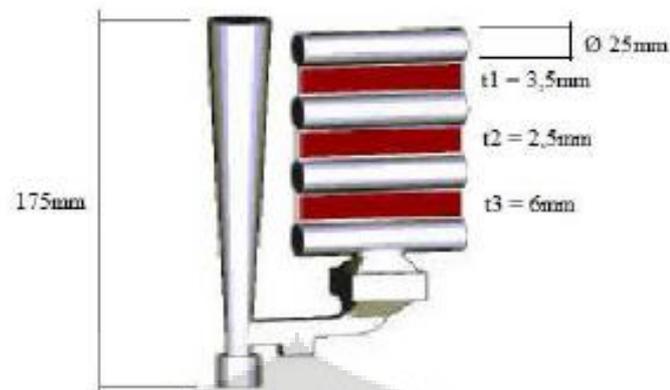
- *Isomol*

Merupakan cairan antara serbuk *coating* dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan. Tujuannya untuk menghasilkan permukaan cetakan yang baik. Setelah dilakukan pemolesan pada cetakan maka segera dibakar untuk menguapkan kandungan alkohol.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Pembuatan Desain Pengecoran

Desain pengecoran pada penelitian ini merupakan desain cetakan yang dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya. Desain yang digunakan adalah desain pengecoran Stefanescu yang merupakan pengecoran vertikal dengan *ingate* terletak di bawah (*bottom ingate*).



Gambar 3.3 Desain pengecoran Stefanescu^[6]

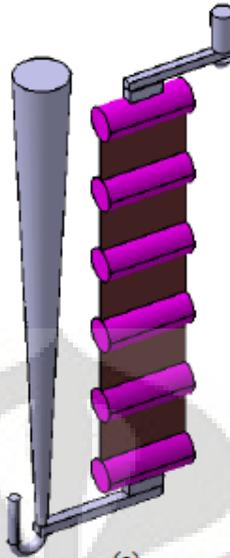
Pada desain ini terdapat modifikasi cetakan untuk penelitian meliputi:

- a. Dimensi plat tipis berukuran 150x75 mm dengan ketebalan sama di semua plat sebesar 1 mm.
- b. Jumlah plat tipis sebanyak 5 buah
- c. Tinggi *sprue* 855 mm
- d. Pada desain P5C dipasang isolator yaitu *glasswool* dengan posisi di samping plat tipis.

3.3.2 Pembuatan Pola

Tahapan berikutnya setelah pembuatan desain selesai adalah pembuatan pola yang terbuat dari kayu. Pola ini terdiri dari 3 kelompok yaitu kelompok benda, kelompok *riser*, dan kelompok saluran tuang.

Kelompok benda terdiri dari 5 plat dengan ukuran 150 X 75 mm dengan ketebalan 1 mm, sedangkan kelompok *riser* terdiri dari 6 buah silinder dan kelompok *gating* terdiri 1 *sprue*, 1 *runner*, 1 *ingate*.



Gambar 3.4 Pola cetakan sebelum dibentuk *pattern plate*

Kegiatan pengecoran dilakukan di PT. X yang terletak di Kawasan Industri Pulo Gadung, dimana pasir yang digunakan untuk pembuatan cetakan adalah jenis pasir furan sehingga pola cetakan dibuatkan *base plate* terlebih dahulu untuk menghasilkan *pattern plate*, Gambar 3.4.

Pattern plate memiliki ukuran 120x120 cm disesuaikan dengan ukuran *flask* yaitu 100x100 cm yang akan digunakan untuk membuat cetakan. Pola cetakan disusun untuk ketebalan yang seragam. *Pattern plate* dilapisi dengan *plating* agar seluruh permukaan merata dan halus sehingga mudah dilakukan pemisahan dengan pasir cetak saat proses pelepasan.



Gambar 3.5 Salah satu sisi *pattern plate*

3.3.3 Pembuatan Cetakan

Pembuatan cetakan dilakukan dengan menggunakan pasir furan. Saat proses pembuatan cetakan ini dibutuhkan *flask* yang akan diletakkan di atas *pattern plate*. *Flask* yang digunakan adalah tipe Excel karena tipe ini merupakan tipe yang dimiliki PT. X, tempat dilakukannya pengecoran. Setelah cetakan dibuat untuk setiap sisi, kemudian cetakan didiamkan beberapa saat (*waiting time*) sebelum dilakukannya proses penggabungan (*merger*). Hal ini dilakukan agar cetakan pasir mengering dan memiliki kekuatan yang cukup agar tidak ambruk saat dilakukan penggabungan.



Gambar 3.6 Sepasang cetakan P5C pada saat *waiting time*

3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan *Liquid Treatment*

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

3.3.4.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)

Tahapan pembuatan besi tuang kelabu ini terdiri dari:

a. Tahap *charging*

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

b. Tahap *melting*

Tahapan ini diawali pemanasan material sampai pada titik leburnya. Setelah semua material melebur, dilakukan penambahan seperti *carbizer* kemudian temperatur pemanasan dinaikkan sampai dapat dilakukan pengangkatan terak. Kemudian logam cair ditaburi *slag remover* untuk mengikat terak agar mudah dilakukan pemisahan dengan logam cair.

Penaburan *slag remover* ini dilakukan sampai terak dalam logam cair diperkirakan habis. Logam cair tetap dipanaskan untuk dilakukan pemeriksaan komposisi dengan spektrometer.

c. Tahap *refining*

Ketika temperatur logam cair mencapai 1400°C , maka dilakukan pengambilan sampel untuk pemeriksaan komposisi kimia dengan spektrometer. Temperatur logam cair masih tetap ditahan pada temperatur ini sampai dihasilkan komposisi kimia logam cair. Jika komposisi kimia yang diinginkan telah tercapai, maka dilakukan proses pengecoran terhadap temperatur logam cair untuk persiapan *tapping*.

d. Tahap *tapping*

Ketika temperatur logam cair mencapai temperatur *tapping*, biasanya dilakukan uji cil. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui jenis FC yang dihasilkan dan tebal cil yang terjadi. Sampel dibuat sesuai spesimen uji cil kemudian sampel didinginkan dengan mencelupkan ke dalam air. Setelah rangkaian pengujian diatas, kemudian dilakukan proses *tapping* yaitu logam cair dituangkan dari dapur peleburan kedalam panci tuang.

3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

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

Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam panci tuang. Sementara nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan di dalam panci tuang di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara langsung dengan logam cair. Proses ini berlangsung sekitar 10-15 menit.

Inokulan yang digunakan pada pengecoran ini adalah FeSi sedangkan nodulan yang dipakai adalah FeMgSi. Inokulasi bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair.

Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Setelah dilakukan inokulasi, kemudian terjadi proses nodulasi ketika logam cair mencapai dasar panci tuang.

Ciri-ciri yang terdapat pada proses ini adalah terjadi ledakan dalam panci tuang yang mengeluarkan asap putih dan cahaya. Hal ini terjadi karena nodulan bersifat eksplosif. Pada proses *liquid treatment* ini, magnesium merubah grafit dari bentuk serpih menjadi bulatan.

3.3.5 Pengecoran

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

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Saat sebelum penuangan, temperatur selalu dikontrol dengan menggunakan *thermocople*. Temperatur pada saat penuangan berkisar antara 1314⁰C. Waktu penuangan diukur dengan menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi logam cair selama 10-12 detik.

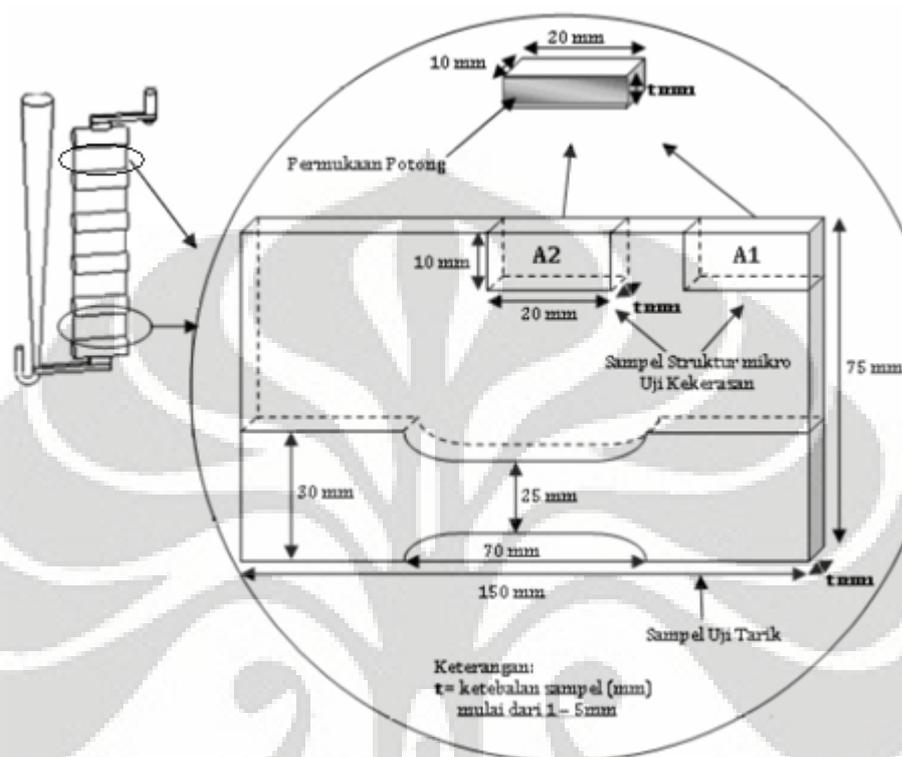
Setelah selesai proses pengecoran, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Pembongkaran dilakukan setelah benda cor dingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Proses pembongkaran cetakan dilakukan dalam sebuah ruangan dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokkan cetakan pasir. Setelah itu agar hasil coran berih dari pasir yang melekat maka dilakukan *shotblasting* kemudian baru dilakukan permesinan untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip.

3.3.6 Preparasi Sampel

1. Metode pengambilan sampel

Sampel hasil coran ini akan dibagi menjadi 3 preparasi sampel. Sampel-sampel tersebut terdiri dari sampel untuk pengujian tarik, pengujian

kekerasan dan struktur mikro. Setiap plat dilakukan pengambilan sampel uji pada posisi yang ditunjukkan pada gambar 3.6. Berikut metode pengambilan sampel pada semua plat untuk pengujian.



Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat

Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi (LUK) Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT) – Serpong kemudian dihitung nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul. Sedangkan pengujian tarik dan kekerasan bertempat di Laboratorium Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

- Preparasi sampel pengamatan struktur mikro

Preparasi ini terdiri dari beberapa tahap antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

- Pemotongan

Dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting untuk mengurangi tingkat deformasi pada permukaan sampel.

- *Mounting*

Bertujuan untuk mempermudah penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Pengamatan struktur mikro ini menggunakan jenis *mounting* seperti *compression mounting* dengan media resin, lihat gambar 3.6



Gambar 3.8 Sampel hasil *mounting*

- *Grinding* (pengamplasan)

Bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan yang terdapat di sepanjang potongan sampel.

- *Polishing* (pemolesan)

Bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkiap.

- *Etching* (etsa)

Merupakan proses pengkisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa.

- Preparasi sampel uji keras

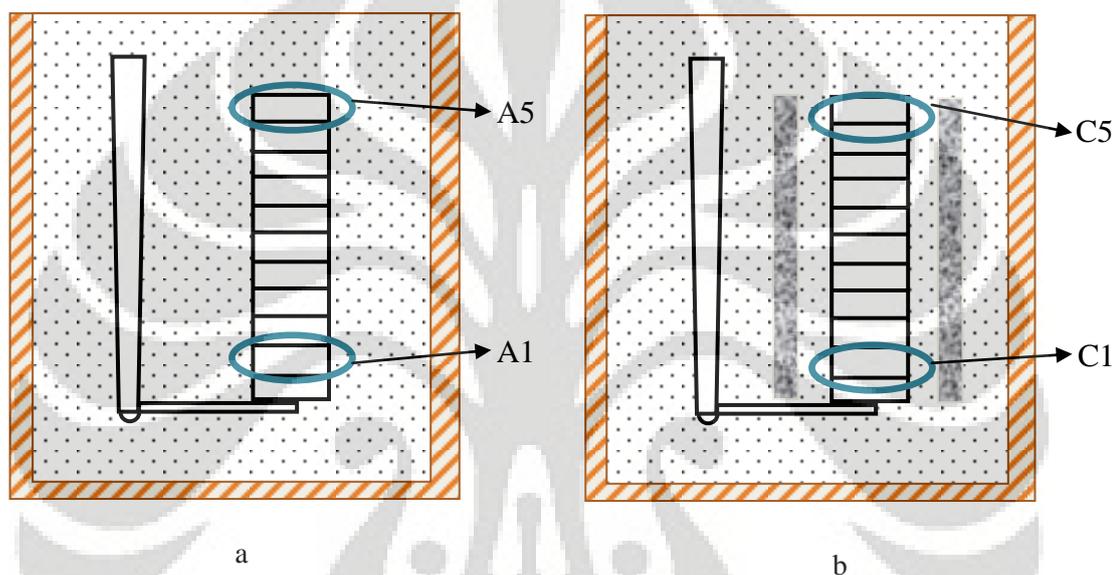
Preparasi sampel uji keras diambil dari sampel hasil perpatahan pada pengujian tarik. Untuk meratakan permukaan sampel pengujian ini maka dilakukan proses pengamplasan menggunakan kertas amplas dengan nomor grid #60 dan beberapa sampel lain diratakan menggunakan gerinda.

- Preparasi sampel uji tarik

Preparasi ini dilakukan dengan memotong bagian yang masih tersisa dari pengambilan sampel untuk pengamatan struktur mikro dan sampel uji kekerasan. Standar yang digunakan adalah JIS 2201.

2. Metode penamaan sampel

Penelitian ini merupakan proses pengecoran P5. Pada setiap penuangan ada 5 buah plat dengan ketebalan sama yakni 1 mm. Sehingga penamaan sampel dilakukan dengan menambahkan angka pada kode sampel. Sebagai contoh: P5A1 untuk plat 1mm dari pengecoran P5 pada *flask* A posisi pertama dan P5C5 untuk plat 1 mm dari pengecoran P5 pada *flask* C posisi kelima.



Gambar 3.9 Penamaan sampel penelitian

3.3.7 Pengujian

1. Pengamatan struktur mikro

Setelah tahap pemolesan selesai, maka semua sampel dilakukan pengambilan gambar struktur mikro berupa struktur grafit bebas. Tujuan pengamatan ini untuk menghasilkan gambar non-etsa yang digunakan untuk menghitung nodulartas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Setelah semua sampel non-etsa selesai diamati kemudian dilanjutkan tahap etsa untuk melihat struktur mikro berupa batas butir dan fasa yang terbentuk.

Pengamatan struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik digital Canon dengan perbesaran 50x, 100x, 200x, 500x dan 1000x.

Teknik pengambilan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.

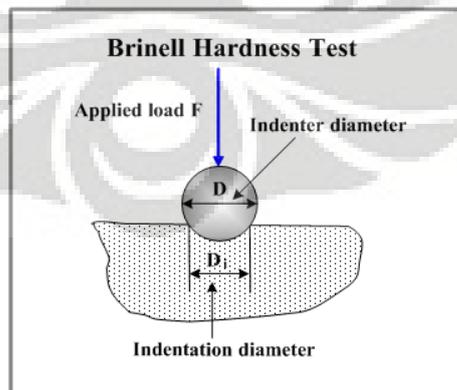


Gambar 3.100 Mikroskop optik digital

2. Pengujian kekerasan

Standar yang digunakan yakni ASTM E 10 “*Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials*”. Sampel untuk pengujian keras ini diambil dari sampel pengujian tarik. Pengujian kekerasan dilakukan dibawah *microhardness tester*. Beban penjejakan yang digunakan adalah sebesar 187,5 kg selama 15 detik. Setelah penjejakan selesai maka besarnya jejak diukur menggunakan *measuring microscope*.

Perhitungan nilai kekerasan ini sesuai dengan rumus^[9]:



Gambar 3.11 Pengujian kekerasan brinell

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

Dimana:

D = diameter indentor (kg)

d = diameter jejak (mm)

P = beban yang diberikan (mm)

3. Pengujian tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Shimadzu Servopulser*. Mesin ini memiliki kapasitas 20 ton (200 KN) dan belum terintegrasi dengan sistem komputerisasi. Sehingga, data yang dihasilkan melalui

pembentukan grafik oleh jarum pembaca terdapat pada selembur kertas. Prinsip kerja mesin uji tarik adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinu sambil diukur pertambahan panjangnya. Standar pengujian yang digunakan adalah JIS Z 2241.



Gambar 3.12 Mesin Uji Tarik

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kimia

Komposisi kimia logam cair hasil pengecoran P5 terlihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Komposisi kimia hasil pengecoran dan literatur

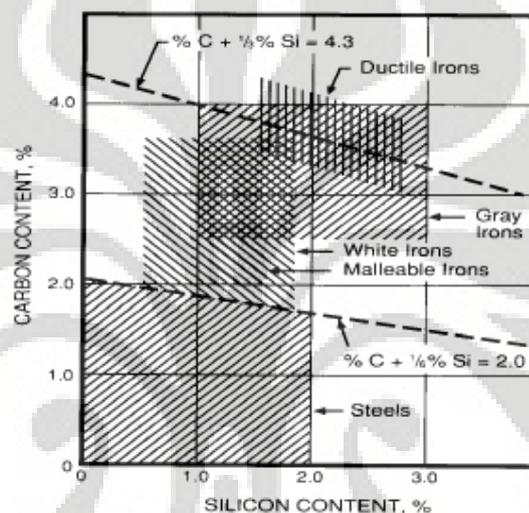
Unsur	Persentase (%)	
	Hasil percobaan	Standar pabrik ^[23]
C	3,819	3,5 – 3,9
Si	2,764	2,4 – 2,8
Mn	0,356	0,3 – 0,5
P	0,024	0,03 max
S	0,023	0,02 max
Cu	0,021	0,15 max
Cr	0,054	0,15 max
Ni	0,026	0,15 max
Mg	0,068	0,03 min

Komposisi kimia yang didapatkan dari hasil pengecoran pada tabel 4.1 telah sesuai dengan komposisi kimia standar untuk FCD 450. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada tabel di atas, unsur yang diperlukan untuk perhitungan nilai CE adalah karbon, silikon, dan fosfor. Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4,3%^[3] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75-4,92%) untuk memperoleh struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3-5)mm^[28]. Nilai CE yang diperoleh dijelaskan pada tabel 4.2 di bawah ini:

Tabel 4.2 Perhitungan nilai CE

Persamaan perhitungan	Nilai CE
a. % C + 0,31% Si	4,67584 %
b. %C + 0.3% Si + 0.33%P - 0.027% Mn + 0.4% S	4,6557 %

Dari kedua perhitungan tersebut, nilai CE sebesar 4,67584% dan 4,6557% telah memenuhi persyaratan CE minimum oleh Loper untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida. Namun menurut persyaratan Loper untuk membuat TWDI pada ketebalan 3-5 mm, nilai CE ini tidak memenuhi, hal ini dibuktikan dari masih terdapatnya karbida walaupun dalam jumlah sangat sedikit. Namun, berdasarkan literatur yang lainnya, nilai CE sebesar 4,65% memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk pengecoran dinding tipis berdasarkan Stefanescu ($CE > 4,3\%$).



Gambar 4.13 Nilai CE untuk beberapa jenis material^[6]

4.2 Pengamatan Visual

Hasil pengecoran, gambar 4.2 menunjukkan bahwa cetakan terisi sempurna dan tampak tidak terjadinya *shrinkage* pada benda maupun *gating system*. Jenis cacat yang terjadi pada cetakan P5A dan P5C adalah berupa cacat sirip pada bagian sisi plat. Cacat sirip ini terjadi karena adanya celah pada cetakan.

Fenomena yang terlihat pada benda adalah terjadi perubahan dimensi pada ketebalan plat. Perubahan dimensi ini karena cetakan tidak kuat menahan tekanan logam cair saat melewati plat tipis. Selain itu perubahan dimensi ini mungkin karena plat yang *bending*.



(a)



(b)

Gambar 4.2 Benda dan saluran tuang hasil pengecoran



Gambar 4.3 Benda setelah dilakukan proses permesinan

Setelah proses pemotongan selesai, gambar 4.3, dilakukan pengukuran ketebalan aktual benda, seperti terlihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.3 Tebal aktual benda hasil pengecoran

Posisi	Tebal aktual (mm)	
	P5A	P5C
1	1,72	1,83
2	1,08	0,92
3	1,31	1,00
4	1,15	0,91
5	1,15	1,02

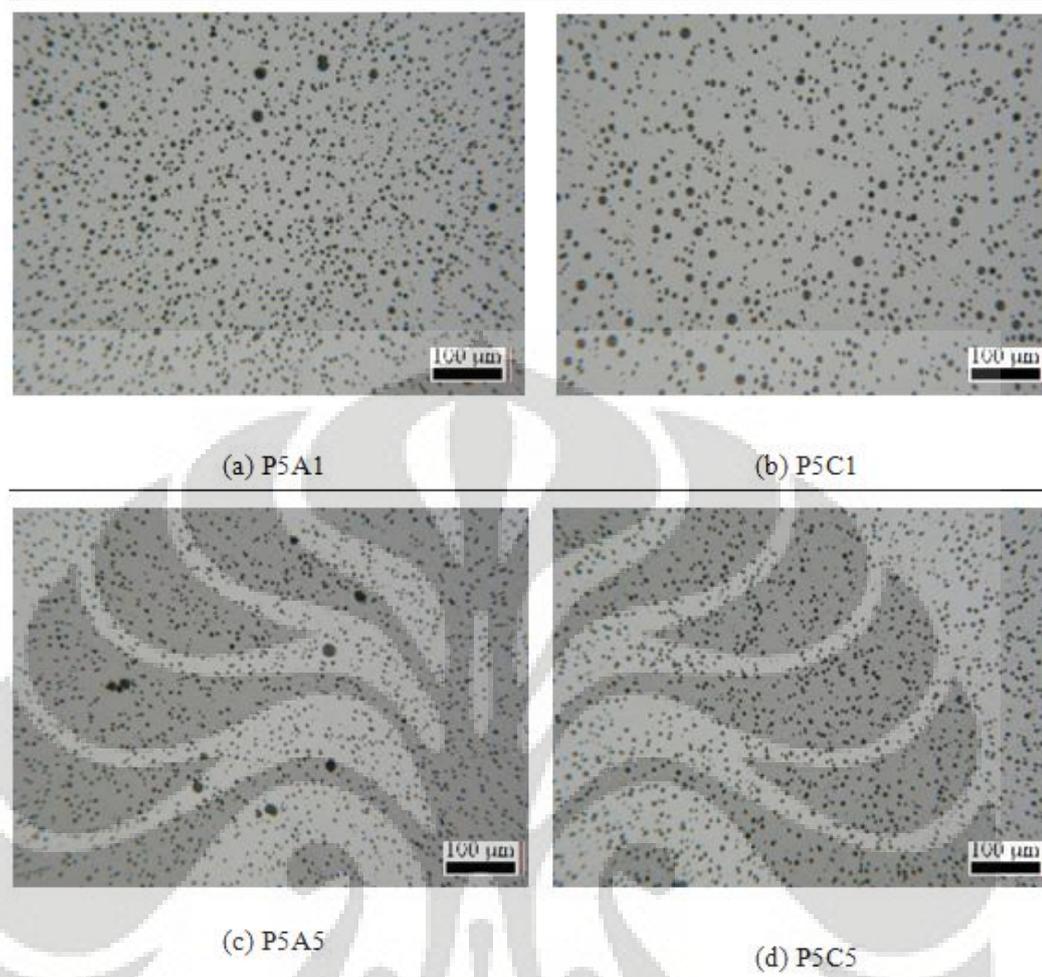
Ketebalan target yang ingin dicapai pada pengecoran ini adalah 1 mm. Plat paling tipis yang berhasil dibuat pada penelitian ini yaitu 0,91 mm dan plat paling tebal sebesar 1,93 mm. Ketebalan benda yang paling mendekati atau sesuai

dengan ketebalan yang diinginkan adalah plat P5C3 yaitu sebesar 1 mm. Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa posisi plat pertama (P5A1 dan P5C1) merupakan plat dengan perubahan dimensi yang paling besar dari dimensi yang diinginkan. Hal ini menandakan bahwa bagian cetakan paling bawah merupakan bagian yang menerima tekanan yang sangat tinggi dari logam cair akibat peletakan plat tipis pada saluran masuk. Logam cair yang masuk kemudian mendorong cetakan pasir sehingga terjadi perubahan dimensi.

4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Identifikasi struktur mikro plat hasil pengecoran dilakukan pada plat non etsa dan plat dengan etsa. Informasi yang didapat pada plat non etsa adalah tentang karakteristik grafit dan mengetahui tentang lapisan kulit yang terbentuk pada plat. Sedangkan pengamatan pada plat etsa dilakukan untuk mengetahui matriks yang terbentuk serta mengetahui apakah plat tersebut bersih dari karbida atau tidak.

Pada pengamatan struktur mikro, pembahasan dilakukan dengan membandingkan struktur mikro pada posisi plat pertama dan kelima dari masing-masing cetakan. Posisi 1 dipilih karena merupakan ketebalan plat yang proses pembekuannya paling terakhir, sementara posisi 5 dipilih untuk mengetahui struktur mikro plat yang pembekuannya paling awal. Kedua kondisi ini merupakan kondisi ekstrim. Berikut ini struktur mikro dari sampel pengecoran P5A dan P5C, Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Struktur mikro non etsa

Struktur mikro pada gambar 4.4 diatas yaitu struktur mikro tanpa etsa yang digunakan untuk perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Penggunaan struktur mikro non etsa untuk perhitungan nilai-nilai tersebut karena struktur mikro non etsa hanya menampilkan bentuk dan ukuran grafit sehingga struktur-struktur mikro yang lain seperti karbida atau inklusi tidak mengganggu dalam perhitungan. Struktur mikro non etsa menunjukkan bahwa tidak terlihat adanya lapisan kulit pada plat hasil pengecoran.

Posisi plat pertama dan kelima pada cetakan non isolator dan non isolator memiliki perbedaan pada jumlah nodul dan diameter nodul rata-ratanya. Hal ini terjadi karena kecepatan pendinginan yang berbeda pada masing-masing plat. Seperti yang kita ketahui plat A5 dan C5 memiliki jumlah nodul yang lebih

banyak dibandingkan A1 dan C1 karena plat-plat tersebut merupakan plat yang paling awal terisi oleh logam cair, sehingga kecepatan pendinginan pada plat ini lebih lambat jika dibandingkan dengan A1. Kecepatan pendinginan yang tinggi akan menyebabkan proses pembekuan logam cair yang cepat sehingga nodul yang didapatkan akan lebih sedikit dengan ukuran nodul yang relatif lebih besar.

Jika plat posisi pertama dari cetakan P5A (non isolator) dan P5C (isolator) dibandingkan, maka secara kasat mata terlihat perbedaan yang cukup signifikan antara kedua buah plat. Persebaran nodul plat C1 relatif lebih seragam daripada plat A1. Salah satu faktor yang menyebabkannya adalah pemasangan isolator berupa *glasswool* di kedua sisi plat C. Isolator yang memiliki konduktivitas thermal yang baik ini dapat menahan laju pendinginan didalam cetakan C sehingga pembekuan yang terjadi akan lebih lambat dibandingkan A. Grafit yang terdapat pada C akan mempunyai rentang waktu yang lebih lama untuk berubah membentuk nodul karena proses perpindahan panas yang dihambat oleh *glasswool*. Akibatnya ukuran nodul yang dihasilkan cenderung lebih seragam. Bentuk nodul yang demikian akan mempengaruhi sifat mekanis dari plat yang dihasilkan. Sementara pada C1 ditemukan perbedaan ukuran nodul karena proses perpindahan panas pada plat berlangsung begitu cepat sehingga setiap nodul yang sudah terbentuk tidak memiliki cukup waktu untuk tumbuh menghasilkan nodul yang ukurannya seragam.

Sama halnya dengan plat posisi pertama dari masing-masing cetakan, struktur mikro yang didapat menunjukkan bahwa bentuk nodul cetakan yang menggunakan isolator (*glasswool*) lebih seragam dibanding cetakan tanpa isolator. Hasil ini dapat memperkuat hipotesa awal bahwa salah satu faktor yang mempengaruhi bentuk grafit dari pengecoran besi tuang nodular adalah dengan mengatur atau menghambat proses perpindahan panas pada saat pembekuan cetakan. Dari sini terlihat bahwa isolator yang kita gunakan dapat menghambat proses tersebut sehingga grafit yang dihasilkan cenderung lebih stabil dan seragam.

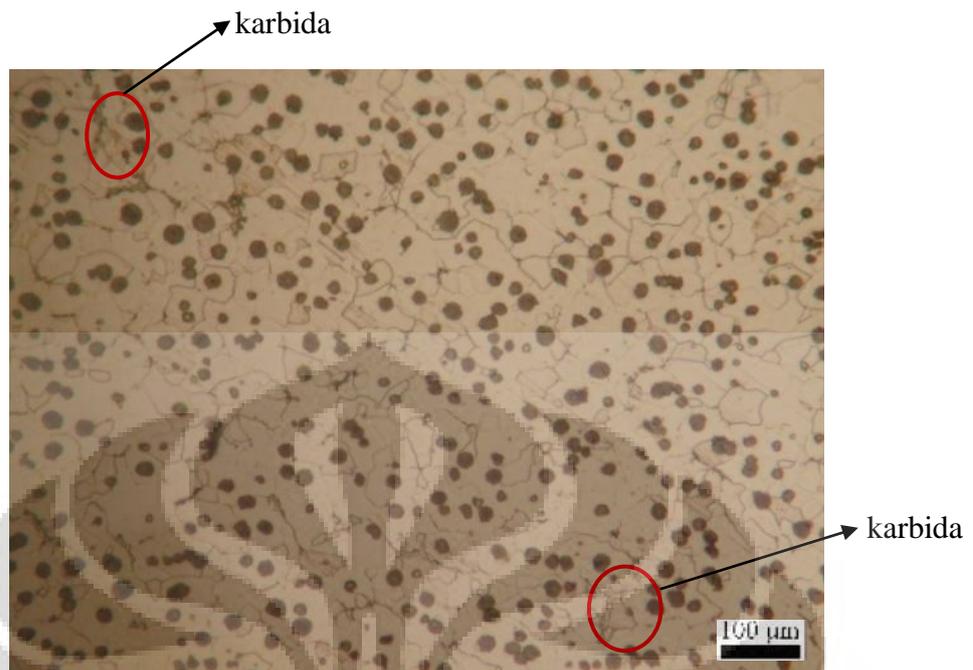
Secara keseluruhan terlihat bahwa struktur mikro pada plat A memiliki perbedaan diameter nodul dimana terdapat nodul primer dengan diameter yang lebih besar dan nodul-nodul dengan diameter yang lebih kecil. Terbentuknya

nodul primer ini akibat dari ketidakseragaman pembekuan pada plat. Daerah pada plat yang membeku paling awal adalah daerah pinggir lalu kemudian mengarah ke dalam plat. Dengan kondisi tersebut nodul terbentuk di bagian tengah tidak memiliki cukup waktu untuk berubah menjadi nodul dengan ukuran yang lebih kecil dan seragam dengan nodul yang berada pada pinggir plat. Ketidakseragaman pembekuan pada plat A ini terjadi karena tidak terdapatnya isolator seperti yang terpasang pada plat C, dimana fungsi isolator ini dapat membuat kecepatan pembekuan antara bagian pinggir dan tengah plat menjadi seragam.

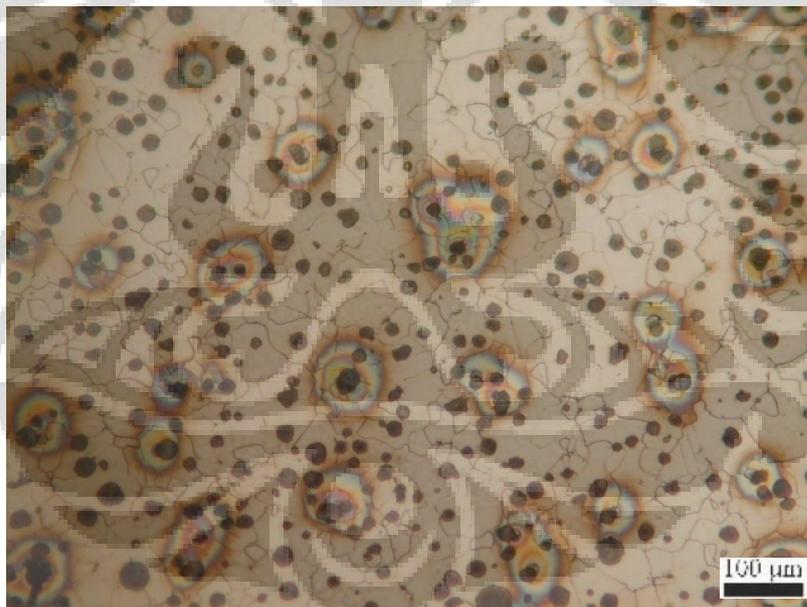
Analisa berikutnya dilakukan pada struktur mikro yang di-etsa, Gambar 4.5 sampai dengan 4.8. Struktur mikro hasil etsa dilakukan untuk mengetahui apakah terbentuk lapisan kulit pada plat tipis hasil pengecoran.



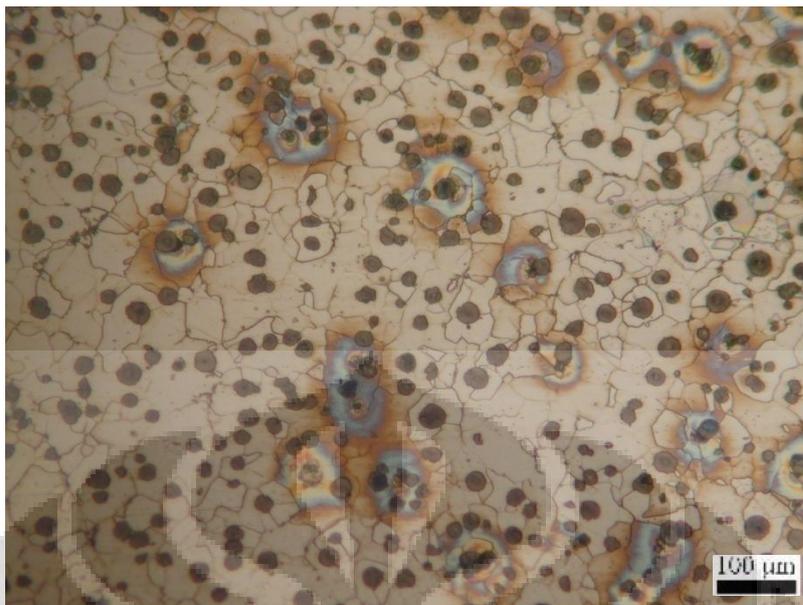
Gambar 4.5 Struktur mikro plat A1 etsa



Gambar 4.6 Struktur mikro plat A5 etsa

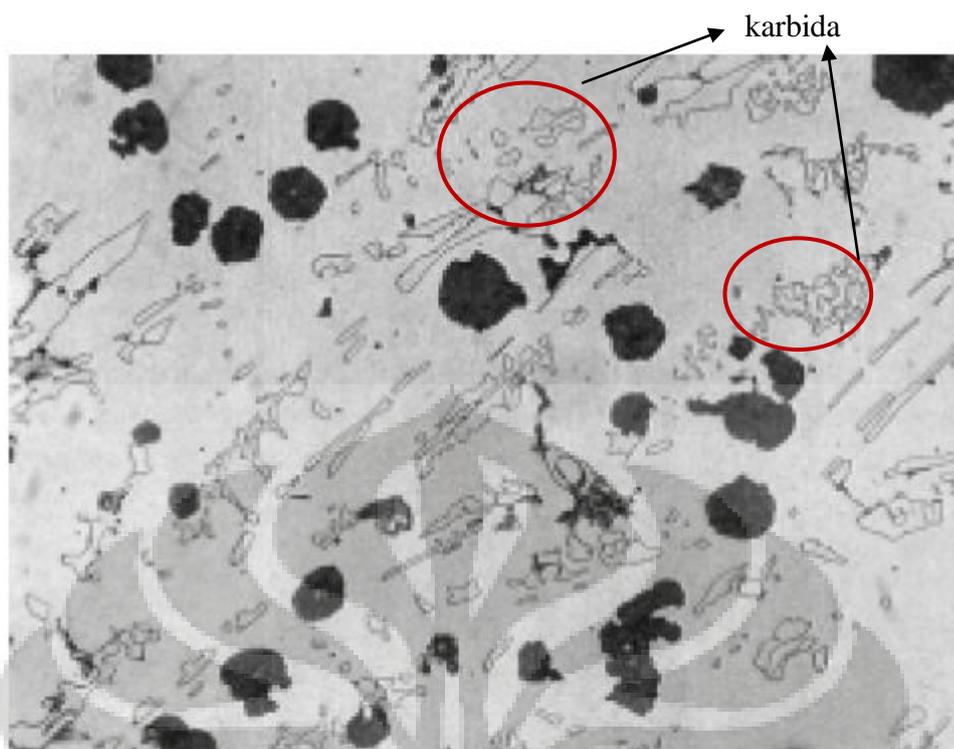


Gambar 4.7 Struktur mikro plat C1 etsa



Gambar 4.8 Struktur mikro plat C5 etsa

Pengamatan struktur mikro yang di-etsa pada gambar 4.5 – 4.8 menunjukkan bahwa memang tidak terdapat adanya lapisan kulit (*skin effect*) pada plat hasil pengecoran. Sesuai dengan tujuan pengamatan struktur mikro plat etsa adalah untuk mengetahui matriks yang terbentuk. Seperti yang tampak pada gambar di atas, struktur matriks yang terdapat pada penelitian ini adalah ferit yang dikelilingi oleh grafit dengan bentuk bulat. Namun dari plat-plat tersebut masih ditemukan adanya karbida walaupun dalam jumlah yang sangat sedikit, gambar 4.6 (lingkaran). Daerah yang dilingkari pada foto tersebut memang merupakan karbida. Analisa bahwa daerah tersebut merupakan karbida diperkuat dengan hasil struktur mikro besi tuang nodular pada literatur dibawah ini:



Gambar 4.9 Struktur mikro besi tuang nodular ferritik yang mengandung *primary carbide* (400X, etsa nital)^[3]

Karbida ini terbentuk selama proses solidifikasi yang disebabkan oleh temperatur penuangan yang cukup tinggi. Seperti yang kita ketahui, ketebalan plat pada penelitian ini sangat tipis yaitu 1 mm dan karbida cenderung terbentuk pada benda dengan bentuk yang tipis. Selain itu faktor yang dapat memicu terbentuknya karbida adalah kandungan Mg yang terdapat dalam logam cair walaupun sesuai dengan nilai optimum untuk membentuk nodul namun unsur ini berperan juga dalam pembentukan karbida.

Karbida yang terdapat pada struktur mikro ini menurunkan sifat mekanis pada plat hasil pengecoran serta juga menurunkan nilai keuletan. Terbentuknya karbida ini juga karena adanya efek *fading* yang terjadi karena pengaruh proses Mg *treatment* dan inokulasi yang semakin berkurang seiring berjalannya waktu. Ketika logam cair didiamkan beberapa saat setelah kedua proses tersebut dilakukan, maka pada saat itu grafit yang terbentuk akan berkurang dan *primary carbide* akan muncul.

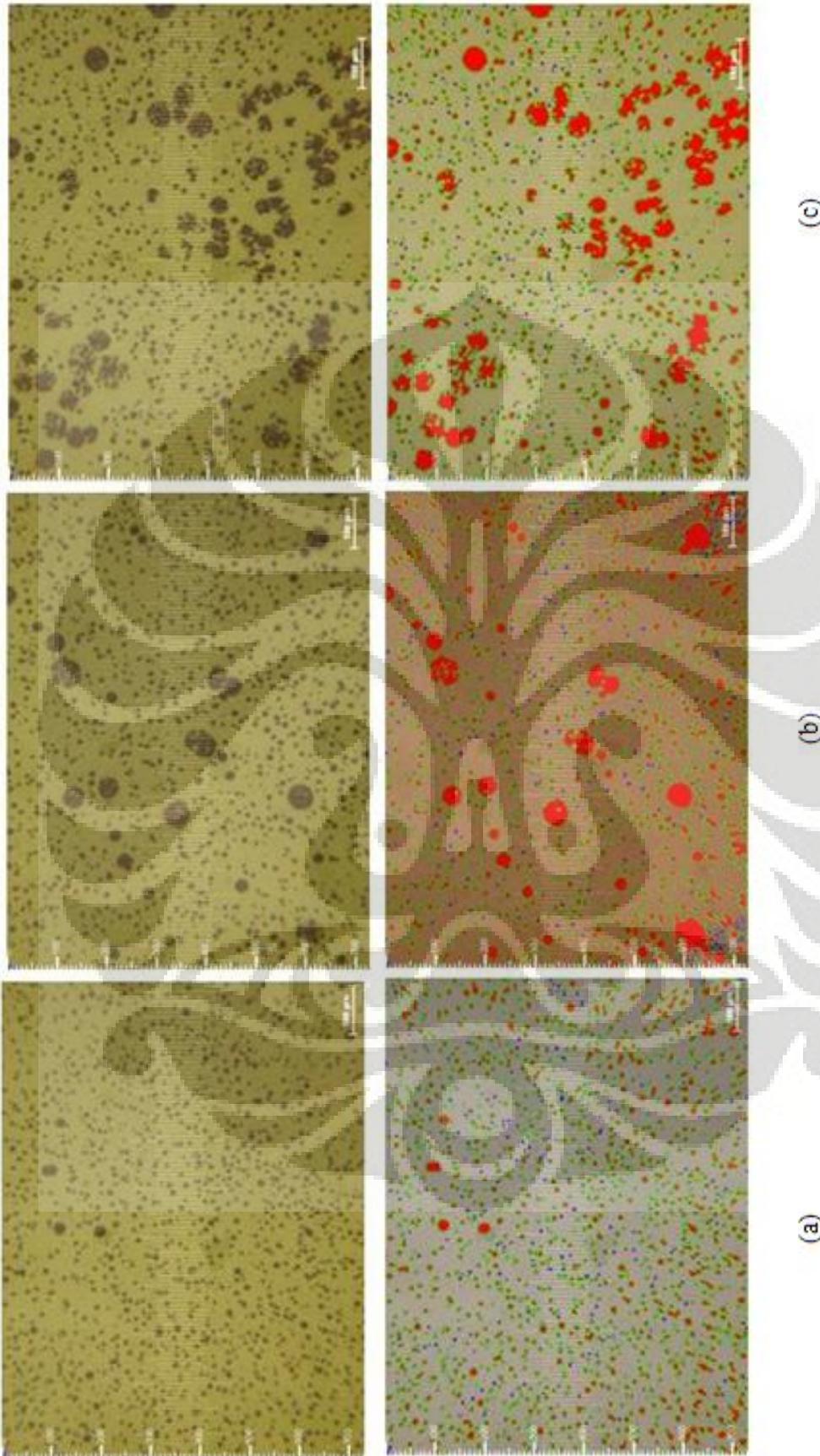
Kandungan karbida ini dapat dihilangkan dengan pemanasan proses austemper pembuatan ADI. Agar dapat menghilangkan karbida sama sekali saat

proses pengecoran maka harus diperhatikan komposisi unsur Mn dan Si agar berada dalam batas optimum.

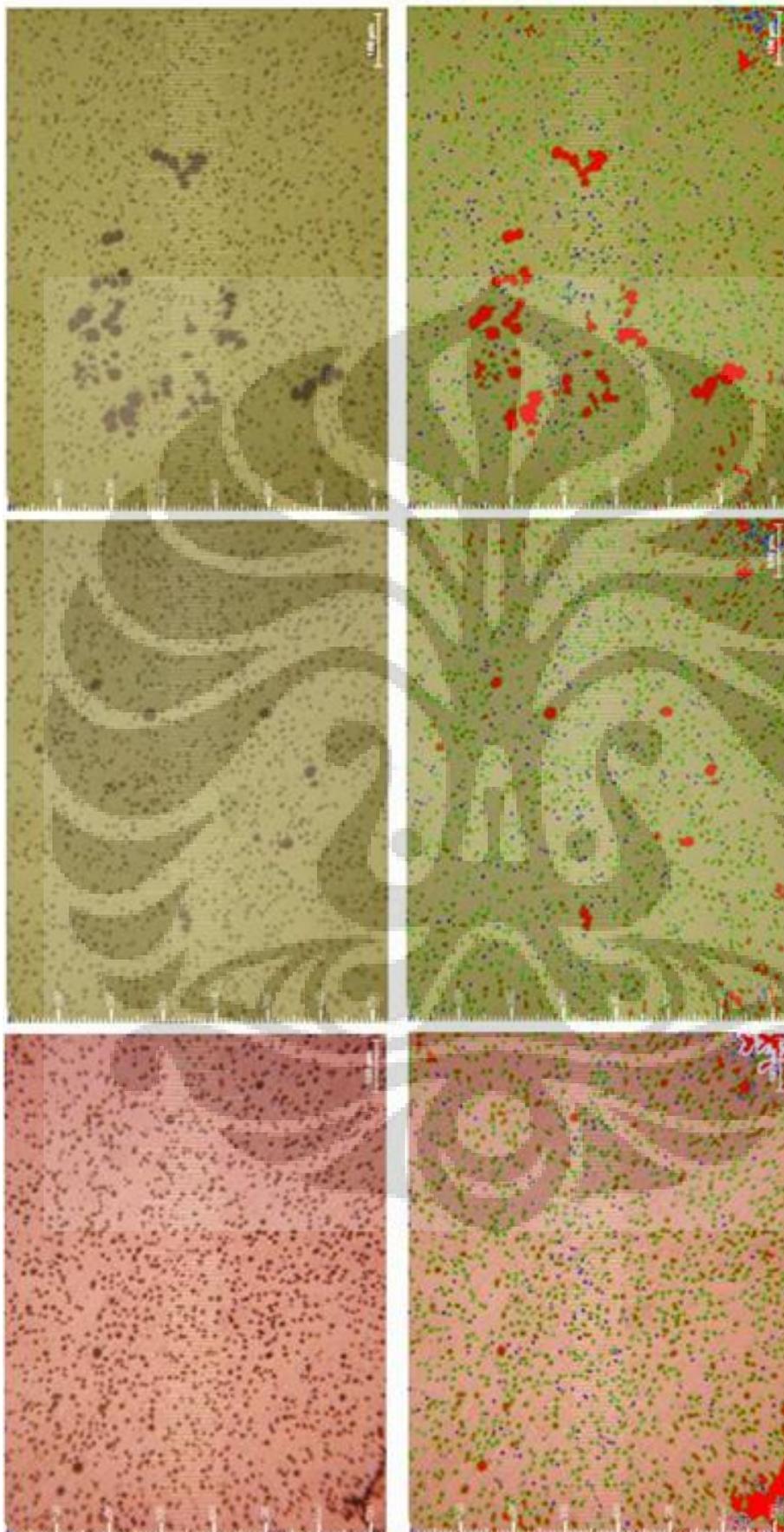
Berdasarkan *ASM Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa struktur mikro yang terbentuk pada penelitian ini adalah grafit dalam matriks ferit, gambar 4.5 – 4.8. Desain pengecoran vertikal dan penggunaan isolator pada pengecoran ini menerangkan bahwa terjadi perlawanan kecepatan logam cair terhadap gravitasi yang bertujuan untuk memperlambat proses pengisian cetakan serta terjadinya proses penghambatan perpindahan panas dari cetakan. Dengan terhambatnya proses perpindahan panas akan berpengaruh pada melambatnya proses pembekuan logam cair sehingga dapat meminimalisir terbentuknya lapisan kulit.

4.3.1 Pengaruh Nodularitas, Jumlah nodul dan Diameter rata-rata nodul

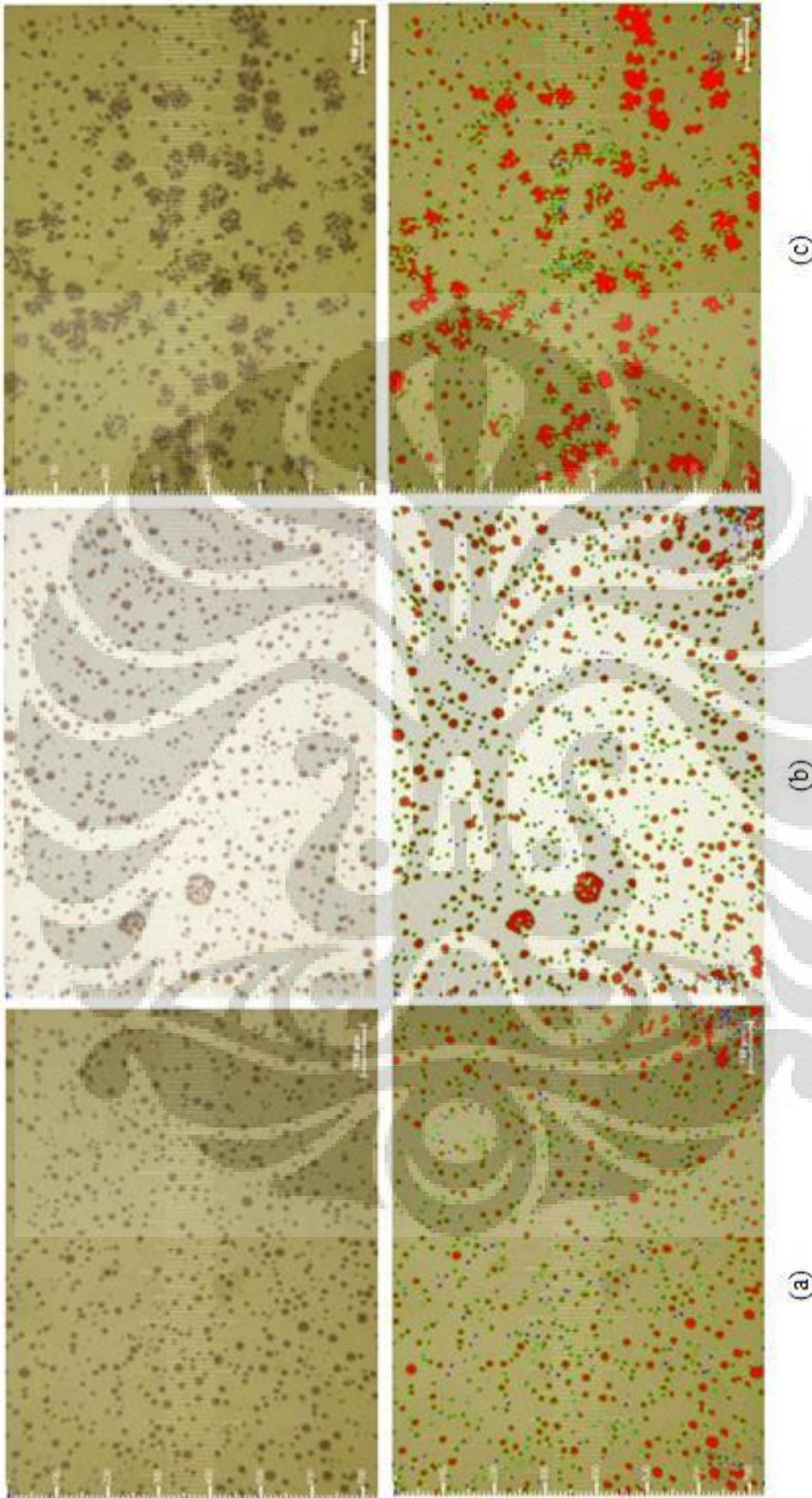
Perhitungan jumlah ndul, nodularitas serta diameter nodul rata-rata dilakukan dengan menggunakan *software* NIS dengan diameter minimal nodul yang dihitung adalah 5 μm .



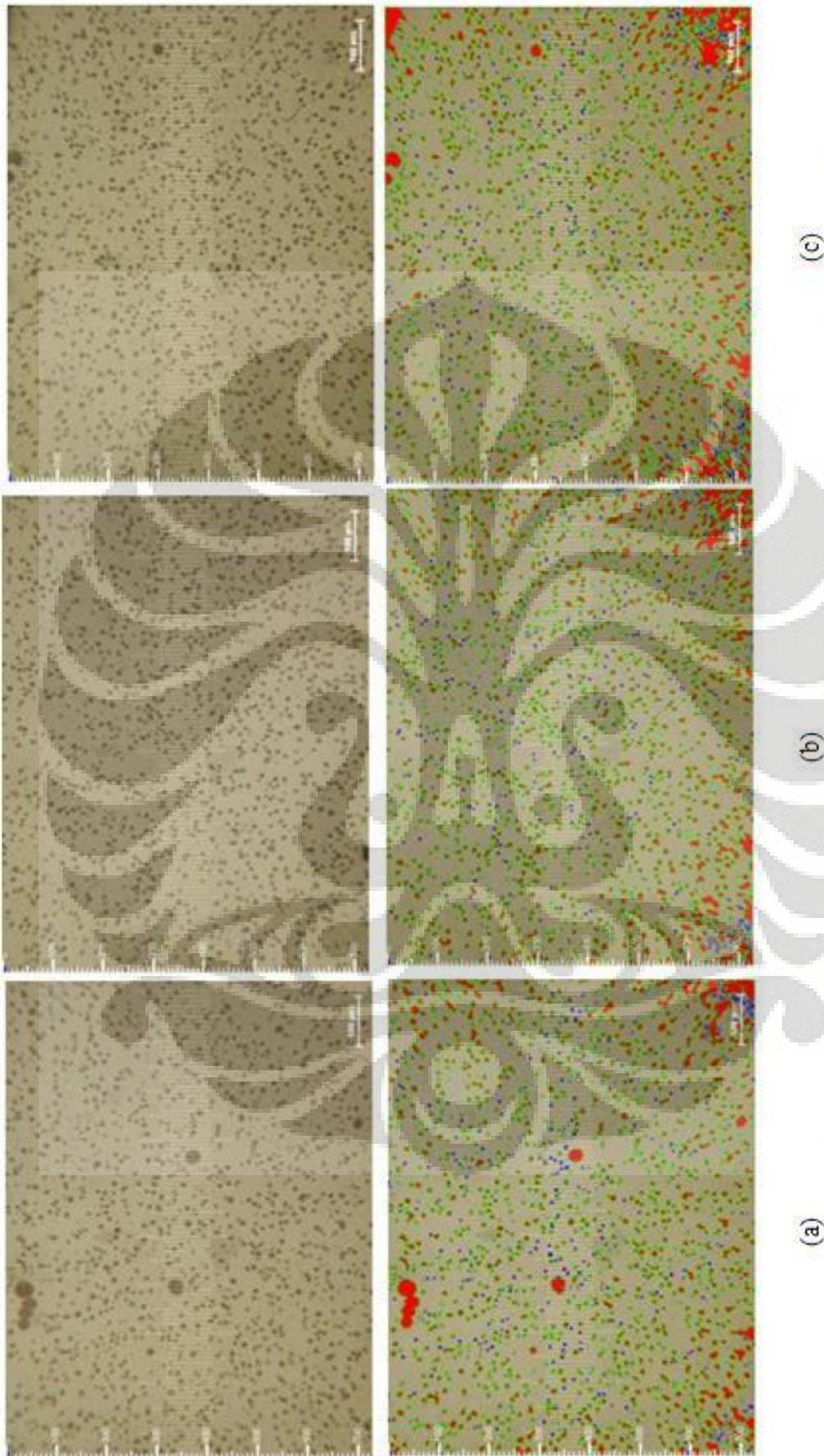
Gambar 4.10 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata rata-rata plat A1 (non isolator) sampel 1:
 (a) posisi 1; (b) posisi 2; (c) posisi 3



Gambar 4.11 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat A5 (non isolator) sampel 1:
 (a) posisi 1; (b) posisi 2; (c) posisi 3



Gambar 4.12 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat C1 (isolator) sampel 1:
 (a) posisi 1; (b) posisi 2; (c) posisi 3



Gambar 4.13 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas dan diameter nodul rata-rata plat C5 (isolator) sampel 1:
 (a) posisi 1; (b) posisi 2; (c) posisi 3]

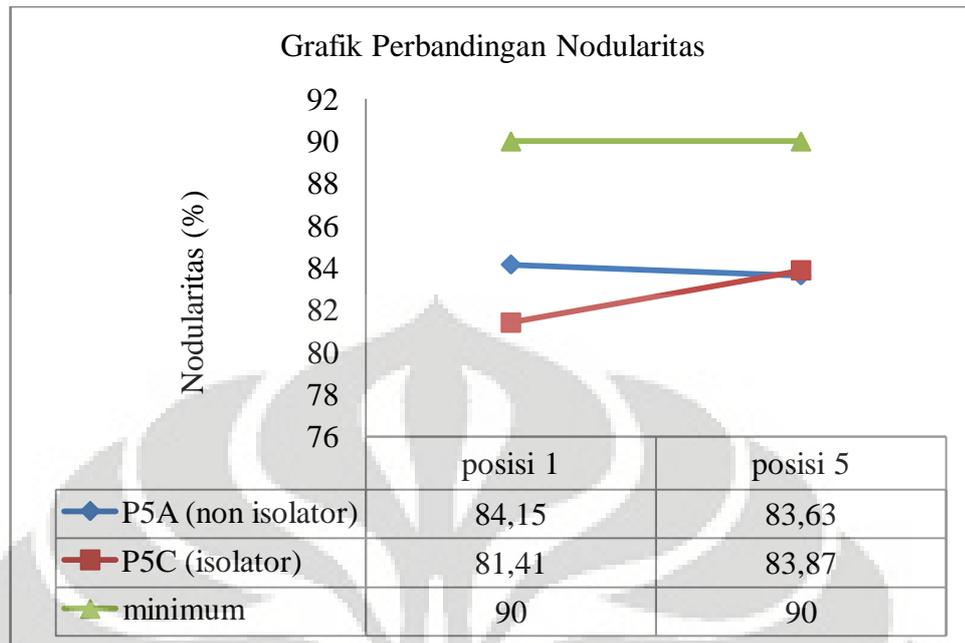
Dari gambar 4.10 sampai dengan 4.13 tersebut kemudian menggunakan *software* NIS diperoleh data perhitungan jumlah nodul, diameter nodul rata-rata serta nodularitas seperti yang terdapat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perhitungan nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata

Cetakan	Urutan sampel	Posisi	Nodularitas (%)	Jumlah nodul (nodul/mm ²)	Diameter rata-rata (μm)
A	1	1	85,45	1720	9,35
		2	82,82	1469	10,95
		3	84,17	1039	11,8
		Rata-rata	84,15	1409	10,697
	5	1	82,75	1832	9,16
		2	84,33	1871	8,66
		3	83,8	1664	8,83
		Rata-rata	83,63	1789	8,88
C	1	1	85,27	1114	11,11
		2	73,42	703	15,28
		3	85,53	1024	11,86
		Rata-rata	81,41	947	12,75
	5	1	83,81	1627	9,48
		2	84	1832	9,56
		3	83,81	1669	9,81
		Rata-rata	83,87	1709	9,62

Perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter nodul rata-rata ini diambil dari foto struktur mikro non etsa.

Nodularitas



Gambar 4.14 Grafik perbandingan nodularitas

Berdasarkan gambar 4.14 di atas, nilai nodularitas P5A cenderung mengalami penurunan ketika peningkatan posisi plat, namun pada P5C nodularitas cenderung semakin meningkat seiring dengan peningkatan posisi plat. Faktor yang menyebabkan nodularitas P5C lebih tinggi daripada P5A adalah karena pengaruh penggunaan *glasswool* pada cetakan C yang membuat kecepatan pendinginan pada cetakan menjadi semakin lambat. Ketika kecepatan pendinginan lebih lambat maka ukuran grafit yang dihasilkan lebih besar dan lebih sedikit. Dengan ukuran nodul yang lebih besar akan sulit untuk menghasilkan grafit dengan nodularitas yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan nodulan yang kuat sehingga terbentuk nodul yang sempurna. Namun penggunaan nodulan ini harus optimum karena dapat juga berperan sebagai agen pemicu terbentuknya karbida.

Penurunan nilai nodularitas mungkin dikarenakan plat pada posisi kelima merupakan plat yang proses pembekuannya lebih cepat sehingga grafit yang terbentuk akan lebih kecil dan lebih banyak. Proses perpindahan panas plat pada posisi kelima tidak dipengaruhi oleh perpindahan plat lainnya karena plat ini merupakan plat yang paling awal membeku. Sementara itu pada plat

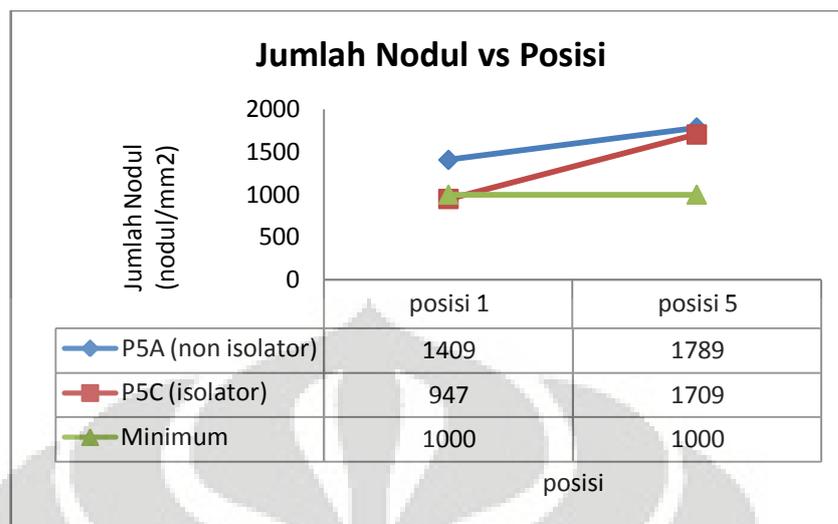
pertama, seperti yang terdapat pada Tabel 4.3, ketebalan aktual plat diposisi pertama mengalami penyimpangan ketebalan yang paling besar dibandingkan plat lainnya, sehingga secara tidak langsung plat ini membutuhkan waktu yang lebih lama untuk membeku. Semakin tebal plat, kecepatan pendinginan juga akan semakin kecil sehingga grafit yang dihasilkan akan lebih bulat namun dalam jumlah yang lebih sedikit

Dalam rangka pengecoran FCD untuk dijadikan ADI, maka persyaratan pertama yang harus dipenuhi adalah nodularitas lebih besar dari 90%. Berdasarkan tabel diatas, nodularitas pada setiap plat tidak ada yang mencapai 90%. Namun, nodularitas tertinggi yang berhasil dicapai yaitu sebesar 84,15% yaitu pada plat A1.

Selain itu fenomena lain yang terjadi adalah nodularitas yang semakin menurun pada posisi plat kelima. Hal ini berlaku pada semua plat dari setiap cetakan kecuali plat C1. Pada plat C1, seperti pada gambar 4.11 (c) struktur mikro plat pada posisi 3 lebih dikuasai oleh grafit atau nodul yang *exploded*. Bentuk grafit ini biasa ditemukan pada benda cor yang tipis dan disertai dengan pendinginan yang lambat. Perpindahan panas pada C dihambat oleh isolator sehingga pendinginan dan solidifikasi menjadi lambat. Inilah yang memicu tumbuhnya *exploded* grafit disebagian besar plat hasil pengecoran.

Exploded grafit akan mengurangi jumlah nodul yang terbentuk dan penurunan nilai nodularitas, tabel 4.3. Selain itu, pada perbesaran tertentu diperoleh data bahwa jumlah *exploded* grafit pada A5 lebih sedikit dibandingkan A1. *Exploded nodule* ini merupakan bentuk grafit yang tidak berhasil membentuk bulatan pada proses nodularisasi sehingga saat logam cair di cetakan sudah membeku, tidak ada kesempatan lagi untuk grafit membentuk bulatan sempurna. Bentuk nodul yang *exploded* ini akan mempengaruhi sifat mekanis dari masing-masing plat.

Jumlah nodul



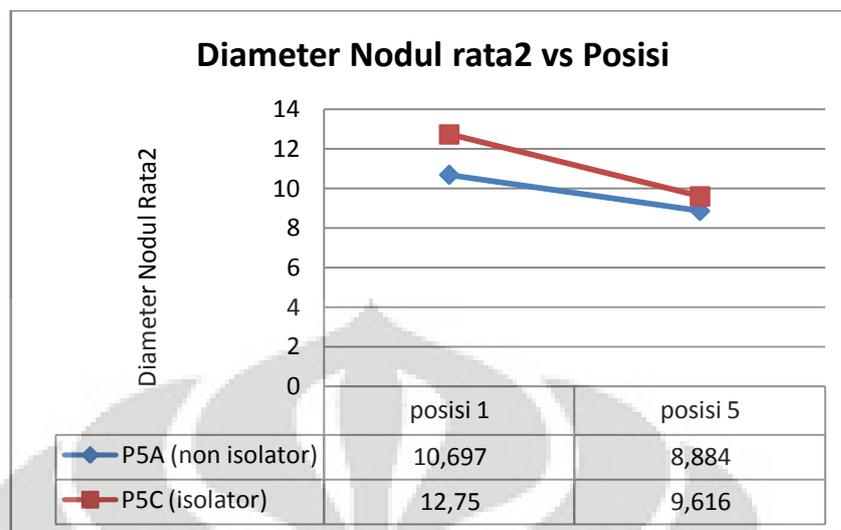
Gambar 4.15 Grafik perbandingan jumlah nodul

Jumlah nodul meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan pendinginan. Hal ini terjadi pada cetakan A dan C dimana plat pada posisi kelima memiliki jumlah nodul yang lebih banyak dibandingkan plat posisi pertama. Hal ini sesuai dengan yang dijelaskan Showman, bahwa jumlah nodul meningkat seiring dengan meningkatnya ketebalan. Walaupun ketebalan masing-masing plat yang diinginkan sebesar 1mm, tetapi nilai ketebalan plat pada setiap posisi mengalami penyimpangan menjadi lebih tebal dari ketebalan awal. Oleh karena itu, peningkatan jumlah nodul pada A dan C diiringi oleh peningkatan ketebalan plat aktual.

Di samping itu, jumlah nodul A5 lebih banyak daripada jumlah nodul C5. Penggunaan isolator *glasswool* pada cetakan P5C membuat kecepatan pendinginan yang lebih lambat sehingga solidifikasi yang terjadi juga semakin lama.

Berdasarkan Tabel 4.4 juga dapat disimpulkan bahwa sebagian besar plat A dan C telah memenuhi persyaratan kedua suatu FCD dapat dijadikan ADI adalah jumlah nodul > 1000 nodul/mm².

Diameter nodul rata-rata



Gambar 4.16 Grafik perbandingan diameter nodul rata-rata

Pada tabel diatas, diameter rata-rata nodul baik pada cetakan A maupun C mengalami peningkatan pada posisi plat pertama. Ketebalan aktual plat A1 dan C1 memang lebih besar sehingga dengan semakin meningkatnya ketebalan maka jumlah nodul yang terbentuk akan menurun sehingga rasio volume ruang untuk grafit berpresipitasi membentuk buatan semakin lebih besar.

Plat C memiliki diameter rata-rata yang lebih besar daripada plat A. Hal ini disebabkan proses perpindahan panas yang tertahan oleh isolator sehingga memberikan toleransi grafit untuk bersegregasi membentuk bulatan lebih besar selama solidifikasi. Terbukti bahwa kecepatan pendinginan pada pengecoran dengan menggunakan isolator panas dapat meningkatkan sifat mekanis dari plat hasil pengecoran.

4.4 Pengujian Mekanik

4.4.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell dengan beban sebesar 187,5 kg dan waktu penjejakan selama 15 detik, seperti terlihat pada tabel 4.5-4.6

Tabel 4.5 Kekerasan Brinell sampel A1 s/d A5

Kode	Sampel	x	y	d	HB	HB rata-rata
A1	1	1,131	1,141	1,136	179	180
	2	1,089	1,128	1,109	188	
	3	1,05	1,09	1,07	203	
	4	1,124	1,126	1,125	183	
	5	1,13	1,149	1,14	178	
	6	1,178	1,181	1,18	166	
	7	1,158	1,182	1,17	168	
	8	1,136	1,145	1,141	178	
A5	1	1,032	1,063	1,048	212	207
	2	1,053	1,068	1,061	206	
	3	1,069	1,052	1,061	206	
	4	1,024	1,064	1,044	213	
	5	1,077	1,067	1,072	202	
	6	1,023	1,088	1,056	208	
	7	1,039	1,091	1,065	205	

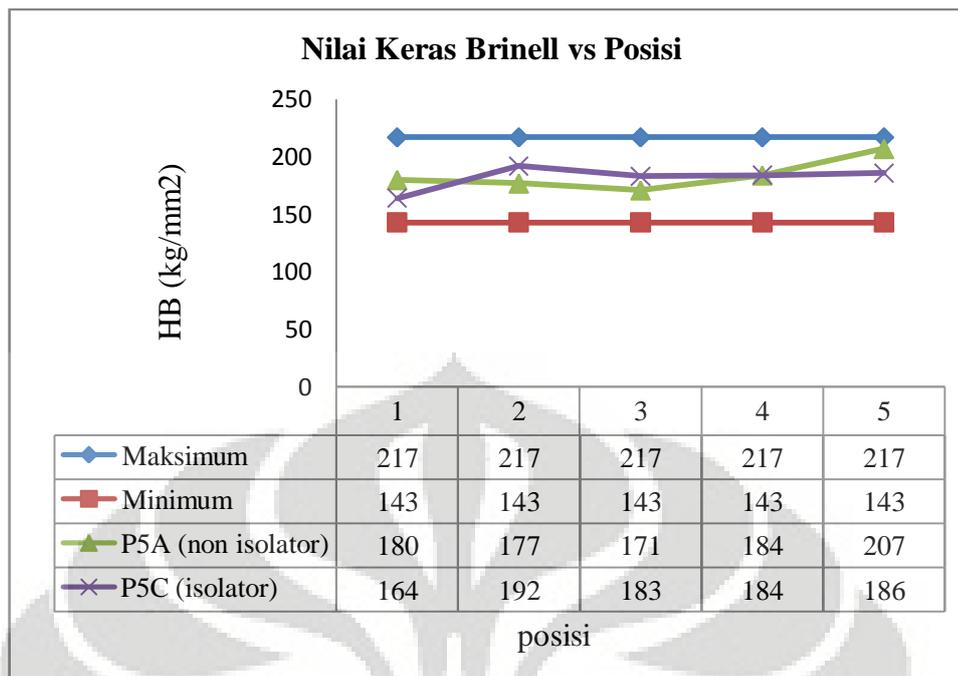
Tabel 4.6 Kekerasan Brinell Sampel C1 s/d C5

Kode	Sampel	x	y	d	HB	HB rata-rata
C1	1	1,148	1,143	1,146	176	164
	2	1,193	1,191	1,192	162	
	3	1,136	1,131	1,134	180	
	4	1,224	1,25	1,237	150	
	5	1,222	1,219	1,221	154	
	6	1,194	1,209	1,202	159	
	7	1,192	1,173	1,183	165	
C5	1	1,109	1,138	1,124	183	186
	2	1,142	1,132	1,137	179	
	3	1,068	1,088	1,078	199	
	4	1,086	1,108	1,097	192	
	5	1,12	1,145	1,133	180	
	6	1,118	1,108	1,113	187	
	7	1,11	1,136	1,123	183	

Berdasarkan ASTM, kekerasan yang mampu dicapai besi tuang nodular adalah 143-187 HB. Hasil pengujian kekerasan yang mampu dicapai berkisar antara 164-207 HB. Dari grafik tersebut tampak nilai kekerasan yang acak dari tiap sampel dikarenakan pengujian diambil di beberapa titik. Dari hasil pengujian seharusnya nilai kekerasan meningkat dari posisi sampe 1 sampai posisi 5, namun terjadi penyimpangan pada posisi A1. Hal ini mungkin akibat beberapa faktor seperti:

- Pengambilan jejak yang kurang mewakili keseluruhan sampel sehingga saat indentor mengenai grafit atau karbida maka nilai kekerasan akan tinggi, sebaliknya saat mengenai fasa ferit maka nilai kekerasan akan lebih rendah.
- Kesalahan paralaks pada saat penghitungan jejak.

Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai kekerasan rata-rata dari setiap sampel. Nilai kekerasan plat C1 lebih rendah dibandingkan kekerasan plat C1 dikarenakan pada plat C1 proses perpindahan panasnya terhambat oleh pemasangan isolator sehingga cetakan C membutuhkan waktu lebih lama untuk membeku dan nilai kekerasan yang diperoleh Hal ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. Pada desain dengan penambahan isolator menyebabkan penurunan kecepatan pendinginan sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih baik sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 4.14 Grafik hubungan nilai kekerasan Brinell terhadap posisi plat

Dari grafik hubungan nilai kekerasan terhadap posisi plat terlihat bahwa plat dengan posisi paling atas (posisi 5) memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan plat pada posisi paling bawah (posisi 1). Perbedaan nilai kekerasan ini berlaku untuk dua jenis cetakan yaitu P5A dan P5C. Plat A-5 dan C-5 lebih keras dibanding plat A-1 dan C-1 karena plat ini merupakan plat yang paling awal membeku dan proses solidifikasi plat tersebut tidak dipengaruhi oleh plat lain yang ada dibawahnya. Berbeda dengan plat paling bawah (posisi 1) sebelum cetakan plat ini terisi penuh, bagian cetakan telah mengalami perpindahan panas cairan logam yang akan menuju plat di bagian atas.

Kecepatan pendinginan yang berbeda ini menghasilkan struktur mikro yang berbeda pula. Pada struktur mikro plat A5 dan C5 ditemukan lebih banyak nodul dengan bentuk yang relatif seragam. Semakin banyak grafit yang terdapat pada plat tipis maka grafit-grafit tersebut akan meningkatkan nilai kekerasannya. Sementara itu, pada plat A1 dan C1 grafit yang terbentuk cenderung lebih sedikit jumlahnya sehingga nilai kekerasannya pun berkurang.

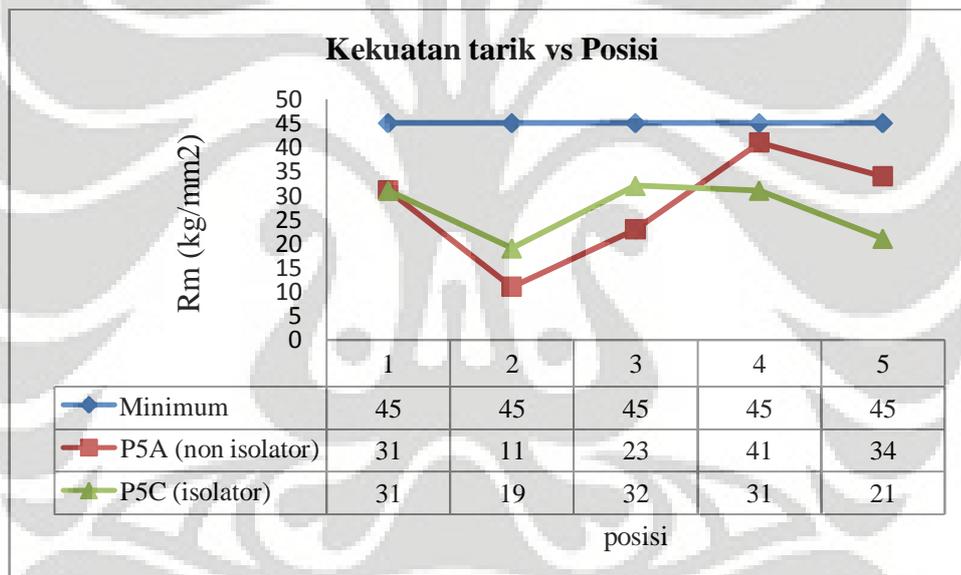
Plat pada posisi paling atas lebih keras karena ketebalan aktual yang dimiliki semua plat pada posisi lebih atas merupakan ketebalan yang paling mendekati ketebalan yang diinginkan yaitu sebesar 1mm. Sedangkan pada posisi

plat yang pertama jauh lebih tebal sehingga waktu yang dibutuhkan plat untuk membeku akan semakin lama. Plat posisi pertama kecepatan pendinginan akan lebih tinggi karena proses pendinginan yang tidak dipengaruhi oleh perpindahan panas plat lainnya, hal ini yang membedakan nilai kekerasan dari setiap plat.

Namun, sesuai dengan paparan di atas dapat dilihat bahwa plat tipis hasil pengecoran ini telah memenuhi persyaratan untuk di proses lebih lanjut untuk dijadikan ADI.

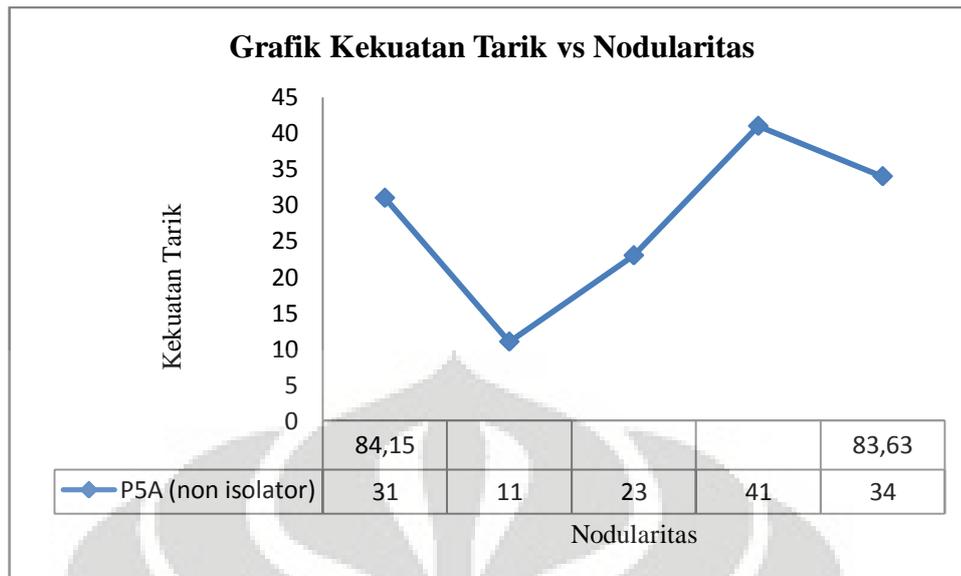
4.4.2 Pengujian Tarik

Berdasarkan grafik perbandingan nilai *tensile strength* di bawah, kekuatan tarik P5A dan P5C berada di bawah kekuatan tarik minimum yaitu sebesar 45 kg/mm².

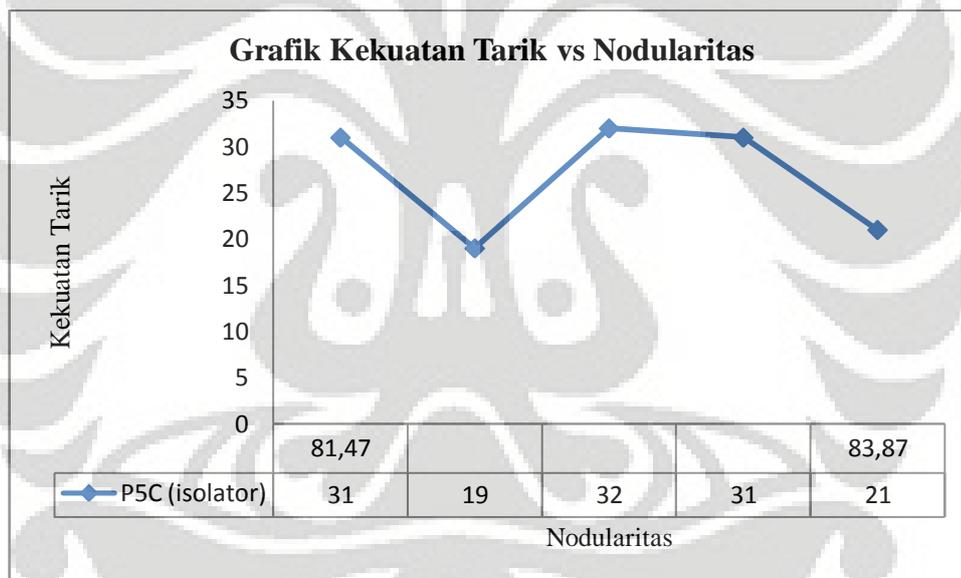


Gambar 4.15 Grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap posisi plat

Berdasarkan grafik hubungan nilai kekuatan tarik terhadap posisi plat didapatkan suatu kesimpulan bahwa kekuatan tarik plat pada penelitian ini masih dibawah nilai kekuatan tarik minimum yang merupakan syarat pembuatan TWDI.



Gambar 4.16 Grafik kekuatan tarik vs nodularitas P5A



Gambar 4.20 Grafik kekuatan tarik vs nodularitas P5C

Nodularitas memiliki pengaruh yang signifikan pada kekuatan tarik. Setiap penambahan nodularitas maka akan meningkatkan nilai kekuatan tarik material. Walaupun nilai kekerasan plat A dan C telah sesuai dengan nilai kekerasan yang dibutuhkan, namun hal ini bertolak belakang dengan hasil kekuatannya. Rendahnya nilai kekuatan tarik ini plat yang dihasilkan sangat tipis sehingga kemampuan plat tersebut untuk menyerap beban yang diberikan sangat sedikit.

Tabel 4.7 Hasil uji tarik A dan C

Posisi plat	t	w	A	P_u	σ_u	P_y	σ_y	l_o	Δl	e	
A	1	2,23	24,85	55,4155	1700	30,67734	0	0	50	0	0
	5	2,367	25,2	59,6484	2000	33,52982	0	0	50	0	0
C	1	3,1	18,95	58,745	1865	31,74738	0	0	50	0	0
	5	2,4	22,1	53,04	1160	21,87029	0	0	50	0	0

Keterangan:

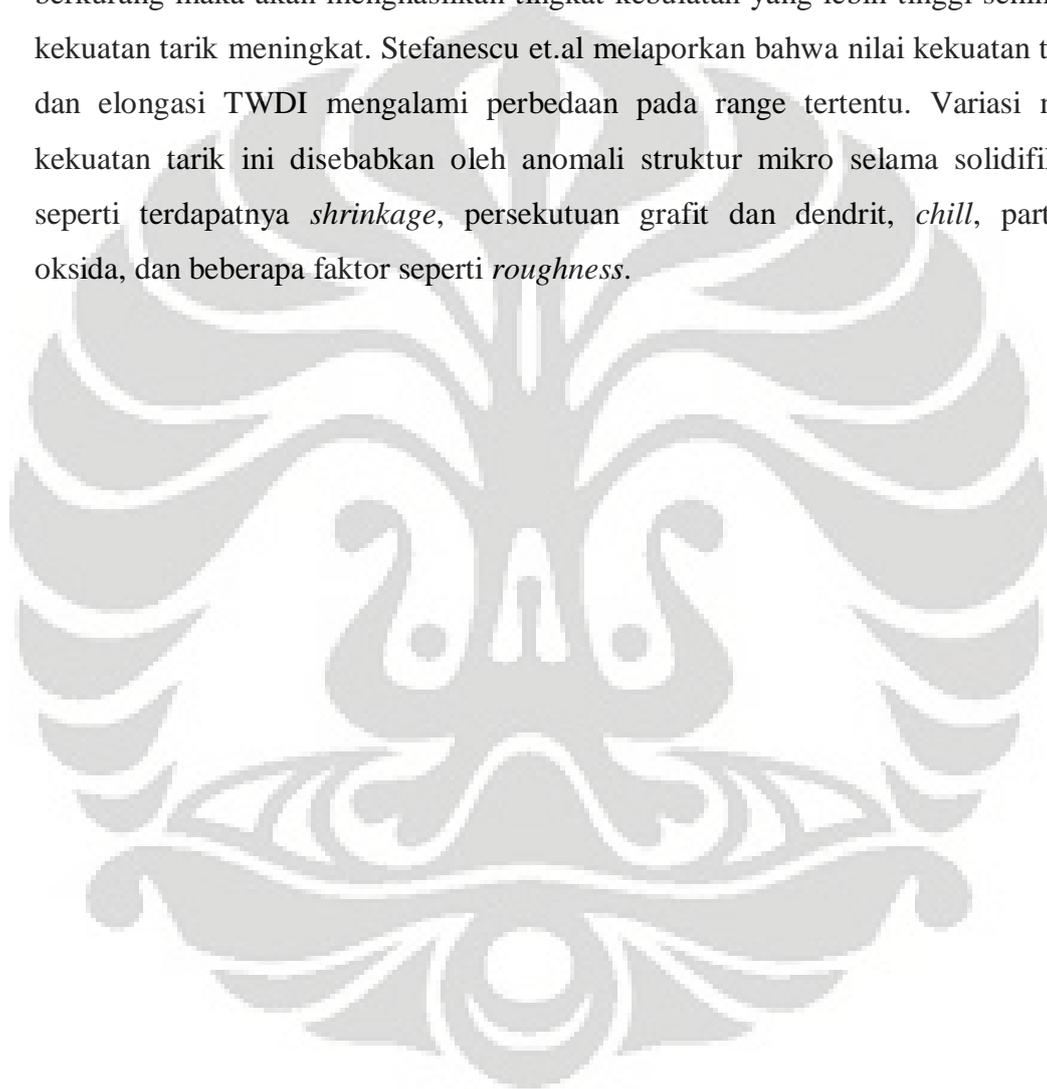
- t = lebar sampel
- w = panjang spesimen uji
- A = luas spesimen uji
- P = nilai beban
- σ_u = nilai UTS
- l_o = panjang awal
- Δl = pertambahan panjang
- e = elongasi

Tabel 4.7 menjelaskan bahwa plat A dan C ini tidak memiliki nilai elongasi. Hal ini berarti plat tersebut tidak mampu menahan deformasi yang diberikan hingga terjadi perpatahan. Nilai elongasi ini berhubungan dengan keuletan material dimana semakin tinggi nilai elongasi suatu material maka semakin tinggi keuletan material tersebut. Dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa plat A dan C sifat keuletannya masih rendah.

Selain itu, faktor yang menyebabkan rendahnya nilai kekuatan tarik ini adalah kehadiran karbida pada struktur mikro dan bentuk grafit yang *exploded*. *Exploded* grafit ini membuat grafit tidak membentuk bulatan sempurna sehingga jika ada gaya yang diberikan pada material, grafit tersebut tidak memiliki kekuatan yang tinggi untuk menahan gaya yang diberikan padanya. Karbida yang terdapat pada plat juga meningkatkan nilai kekerasan material namun membuat material ini juga menjadi getas. Faktor-faktor inilah mungkin yang menyebabkan rendahnya nilai tarik plat A dan C.

Fenomena kekuatan tarik ini berbeda untuk setiap plat, namun plat yang pembekuannya paling awal merupakan plat yang memiliki nilai kekerasan paling tinggi. Hal ini terjadi pada kedua plat A5 dan C5 yang nilai UTS nya lebih tinggi dibandingkan plat A1 dan C1.

Selain itu, semakin tebal suatu benda maka nilai kekuatan tariknya juga akan semakin menurun. Hal ini terjadi karena dengan ketebalan yang semakin berkurang maka akan menghasilkan tingkat kebulatan yang lebih tinggi sehingga kekuatan tarik meningkat. Stefanescu et.al melaporkan bahwa nilai kekuatan tarik dan elongasi TWDI mengalami perbedaan pada range tertentu. Variasi nilai kekuatan tarik ini disebabkan oleh anomali struktur mikro selama solidifikasi seperti terdapatnya *shrinkage*, persekutuan grafit dan dendrit, *chill*, partikel oksida, dan beberapa faktor seperti *roughness*.



BAB 5

KESIMPULAN

1. Komposisi kimia hasil pengecoran sesuai dengan standar pabrik untuk pengecoran FCD 450
2. Cacat hasil pengecoran yang terdapat pada penelitian ini berupa cacat sirip karena terdapatnya celah diantara kedua cetakan
3. Perbedaan antara cetakan isolator dan non isolator terdapat pada perbedaan kecepatan pendinginan dari kedua cetakan
4. Kecepatan pendinginan ini menimbulkan perbedaan terhadap struktur mikro dan sifat mekanis plat seperti nilai keras dan kekuatan tarik
5. Struktur mikro cetakan isolator menunjukkan persebaran grafit (nodul) yang lebih seragam sehingga nilai kekuatan tarik dan kekerasannya meningkat
6. Jumlah nodul plat non isolator cenderung lebih banyak dibandingkan plat isolator, namun nodularitasnya semakin menurun
7. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu plat tipis maka semakin tinggi pula nilai kekuatan tarik plat tersebut
8. Nilai kekuatan tarik pada penelitian ini masih berada di bawah standar nilai uji tarik FCD 450 yaitu 45 kg/mm^2
9. Tidak ditemukan adanya elongasi dari masing-masing plat tipis hasil pengecoran. Hal ini mengindikasikan bahwa keuletan plat tersebut rendah
10. Plat hasil pengecoran pada penelitian ini bebas dari lapisan kulit walaupun masih ditemukan adanya karbida.
11. Karbida yang terbentuk cenderung disebabkan oleh bentuk plat yang tipis dan temperatur tuang yang tinggi.

REFERENSI

- [1] Schrems, K.K., dkk, *Statistical analysis of the mechanical properties of thinwalled ductile iron casting*. SAE Technical Paper Doc. No. : 2003-01-0828, 2003.
- [2] Ductile Iron Society. *A Design Engineer's Digest of Ductile Iron*. 9th Edition. <http://www.Ductile.org>
- [3] Keough, 1998; www.steelinch.com, 2007; Keough, 2007
- [4] 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.
- [5] Martinez, R.A. *Aplications of ADI in Hogh Strength Thin Wall Automotive Parts*. World Conference on ADI, 2002.
- [6] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178)
- [7] Mourad, Mohamed M. *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron* 68th WFC, 7th-10th February 2008, pp.161-166.
- [8] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction. 02(177), 2002.
- [9] ASTM E10. *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. United States: ASTM International. 2001
- [10] ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
- [11] JIS G5502 1989
- [12] <http://www.Foundry-Elkem.com>
- [13] Goodrich, G. M., *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. p. 97-30.
- [14] 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.

- [15] Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. Vol. 44(7): p. 1180-1187. ISIJ Int., 2004.
- [16] Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*, 2005, AFS.
- [17] Mullins, J. D., Nodule Count – Why and How!, *Ductile Iron News*, 2003. Iss 2: p. 1-2. www.ductile.org
- [18] 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
- [19] Showman, Ralph E; Aufderheide, Ronald C. *Getting to the Core of Thin-Walled Castings*. *Modern Casting*. April 2004. Pg.32. ABI/INFORM Trade & Industry
- [20] Goodrich, G.M. *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. Casti Iron Quality Control Committee 5J Report. Bodycote Taussig, Inc.
- [21] Kovacs, B. V., *On The Terminology and Structure of Austempered Ductile Iron*. Pada 98th Casting Congress. 1994, Hamilton, Ontario, Canada : American Foundrymen's Society Inc



LAMPIRAN 1

Pengukuran Ketebalan Aktual P5A dan P5C

1. Pengukuran tebal aktual P5A

Sampel	t diukur	t rata2	t target	selisih	persentase	selisih per bagian	persentase
A1	3,46	2,71958	1	1,71958	171,95833	2,46	246
	3,3		1			2,3	230
	3,09		1			2,09	209
	2,47		1			1,47	147
	2,16		1			1,16	116
	2,24		1			1,24	124
	2,28		1			1,28	128
	2,5		1			1,5	150
	2,03		1			1,03	103
	2,4		1			1,4	140
	2,39		1			1,39	139
	2,24		1			1,24	124
	2,54		1			1,54	154
	2,42		1			1,42	142
	2,39		1			1,39	139
	2,51		1			1,51	151
	2,66		1			1,66	166
	2,72		1			1,72	172
	2,87		1			1,87	187
	3,09		1			2,09	209
3,13		1			2,13	213	
3,37		1			2,37	237	
3,16		1			2,16	216	
3,85		1			2,85	285	
A2	2,08	2,08583	1	1,08583	108,58333	1,08	108
	2		1			1	100
	2,05		1			1,05	105
	2,14		1			1,14	114
	2		1			1	100
	2,09		1			1,09	109
	2,46		1			1,46	146
	2,87		1			1,87	187
	2,88		1			1,88	188
	2,81		1			1,81	181
	2,61		1			1,61	161
	2,57		1			1,57	157

	2,04		1			1,04	104
	1,91		1			0,91	91
	1,79		1			0,79	79
	1,95		1			0,95	95
	1,83		1			0,83	83
	1,99		1			0,99	99
	1,98		1			0,98	98
	2,15		1			1,15	115
	1,6		1			0,6	60
	1,48		1			0,48	48
	1,41		1			0,41	41
	1,37		1			0,37	37
A3	2,25	2,30917	1	1,30917	130,91667	1,25	125
	2,11		1			1,11	111
	2		1			1	100
	2		1			1	100
	2,19		1			1,19	119
	2,56		1			1,56	156
	2,49		1			1,49	149
	2,52		1			1,52	152
	2,13		1			1,13	113
	2,34		1			1,34	134
	2,44		1			1,44	144
	2,47		1			1,47	147
	2,6		1			1,6	160
	2,51		1			1,51	151
	2,29		1			1,29	129
	2,12		1			1,12	112
	1,95		1			0,95	95
	2,27		1			1,27	127
	2,45		1			1,45	145
	2,49		1			1,49	149
2,07		1			1,07	107	
2,38		1			1,38	138	
2,32		1			1,32	132	
2,47		1			1,47	147	
A4	1,9	2,15083	1	1,15083	115,08333	0,9	90
	2,29		1			1,29	129
	2,08		1			1,08	108
	2,22		1			1,22	122
	2,16		1			1,16	116

			2,2			1,2	120
			2,46			1,46	146
			2,3			1,3	130
			2,14			1,14	114
			2,07			1,07	107
			2,17			1,17	117
			2,21			1,21	121
			2,42			1,42	142
			2,39			1,39	139
			2,53			1,53	153
			2,36			1,36	136
			2,2			1,2	120
			2,08			1,08	108
			1,91			0,91	91
			1,98			0,98	98
			1,93			0,93	93
			1,94			0,94	94
			1,81			0,81	81
			1,87			0,87	87
			2,17	2,15375	1	1,15375	115,375
			2,1			1,1	110
			2,16			1,16	116
			2,16			1,16	116
			2,37			1,37	137
			2,38			1,38	138
			2,33			1,33	133
			2,29			1,29	129
			2,09			1,09	109
			2,07			1,07	107
A5			2,01			1,01	101
			2,09			1,09	109
			2,39			1,39	139
			2,12			1,12	112
			2,39			1,39	139
			2,38			1,38	138
			2,21			1,21	121
			2,13			1,13	113
			2,23			1,23	123
			2,32			1,32	132
			1,77			0,77	77

	1,86		1			0,86	86
	1,84		1			0,84	84
	1,83		1			0,83	83

2. Pengukuran tebal aktual P5C

Sampel	t diukur	t rata2	t target	selisih	persentase	selisih per bagian	persentase
C1	3,27	2,82958	1	1,82958	182,958333	2,27	227
	2,9		1			1,9	190
	2,7		1			1,7	170
	2,23		1			1,23	123
	2,14		1			1,14	114
	1,98		1			0,98	98
	2,18		1			1,18	118
	2,28		1			1,28	128
	2,04		1			1,04	104
	2,09		1			1,09	109
	1,96		1			0,96	96
	2,48		1			1,48	148
	3,16		1			2,16	216
	3,01		1			2,01	201
	2,95		1			1,95	195
	3,03		1			2,03	203
	3,09		1			2,09	209
	3,3		1			2,3	230
	3,38		1			2,38	238
	3,65		1			2,65	265
3,58		1			2,58	258	
3,47		1			2,47	247	
3,63		1			2,63	263	
3,41		1			2,41	241	
C2	1,94	1,90708	1	0,90708	90,708333	0,94	94
	1,92		1			0,92	92
	1,8		1			0,8	80
	1,72		1			0,72	72
	1,81		1			0,81	81
	1,89		1			0,89	89
	2,19		1			1,19	119
	2,24		1			1,24	124
	2,61		1			1,61	161

			1			1,47	147
			1			1,32	132
			1			1,24	124
			1			0,89	89
			1			0,45	45
			1			0,39	39
			1			0,51	51
			1			0,67	67
			1			0,7	70
			1			0,67	67
			1			0,79	79
			1			0,73	73
			1			0,93	93
			1			0,9	90
			1			0,99	99
			1			1,08	108
			1			1,19	119
			1			1,26	126
			1			0,99	99
			1			1,02	102
			1			0,59	59
			1			0,84	84
			1			0,72	72
			1			1,09	109
			1			0,84	84
			1			0,93	93
			1			1,09	109
			1			1,2	120
			1			1,39	139
			1			1,2	120
			1			1,11	111
			1			1,04	104
			1			0,98	98
			1			1,12	112
			1			1	100
			1			0,95	95
			1			0,78	78
			1			0,91	91
			1			0,88	88
			1			1,06	106
			1			0,89	89

	1,8		1			0,8	80
	1,7		1			0,7	70
	1,62		1			0,62	62
	1,61		1			0,61	61
	1,73		1			0,73	73
	1,97		1			0,97	97
	1,97		1			0,97	97
	1,9		1			0,9	90
	2,05		1			1,05	105
	1,75		1			0,75	75
	1,98		1			0,98	98
	1,31		1			0,31	31
	1,79		1			0,79	79
	1,64		1			0,64	64
	1,87		1			0,87	87
	2,22		1			1,22	122
	2,32		1			1,32	132
	2,32		1			1,32	132
	2,34		1			1,34	134
	2,22		1			1,22	122
	2,18		1			1,18	118
	1,74		1			0,74	74
C5	1,86	2,02875	1	1,02875	102,875	0,86	86
	2,06		1			1,06	106
	2,23		1			1,23	123
	2,18		1			1,18	118
	2,33		1			1,33	133
	2,12		1			1,12	112
	1,92		1			0,92	92
	1,82		1			0,82	82
	1,95		1			0,95	95
	1,85		1			0,85	85
	1,91		1			0,91	91
	1,96		1			0,96	96
	2,16		1			1,16	116
	2,13		1			1,13	113
	2,19		1			1,19	119
	2,31		1			1,31	131
	2,27		1			1,27	127
	2,22		1			1,22	122

2,14		1			1,14	114
2,24		1			1,24	124
1,8		1			0,8	80
1,84		1			0,84	84
1,52		1			0,52	52
1,68		1			0,68	68

