



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH *CARBON EQUIVALENT* TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS
PADA TWDI (*THIN WALL DUCTILE IRON*)**

SKRIPSI

DIDI DARUL FADLI

0606074741

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI PENGARUH *CARBON EQUIVALENT* TERHADAP
STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIS
PADA TWDI (*THIN WALL DUCTILE IRON*)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

DIDI DARUL FADLI

0606074741

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI DAN MATERIAL

DEPOK

DESEMBER 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Didi Darul Fadli

NPM : 0606074741

Tanda Tangan :

Tanggal : 28 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Didi Darul Fadli
NPM : 0606074741
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Pengaruh *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pada TWDI (*Thin Wall Ductile Iron*).

Telah berhasil dipertahankan dihadapan 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.Ir. Johnny Wahyuadi M S, DEA ()

Penguji 1 : Prof. Dr.-Ing. Ir. Bambang Suharno ()

Penguji 2 : Rianti Dewi Sulamet-Ariobimo, M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjan Teknik Program Studi Teknik Metalurgi dan Material pada Fakultas Teknik 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. Ir. Johny Wahyuadi M S, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikirannya untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 2) Orang tua dan keluarga saya yang senantiasa mendoakan saya, memberi perhatian dan bantuan baik moril maupun materil.
- 3) Ibu Rianti Dewi Sulamet-Ariobimo, M.Eng selaku pimpinan kerja dan pembimbing lapangan yang telah menyumbangkan pengetahuannya dan bimbingannya selama saya mengerjakan dan menyusun skripsi ini.
- 4) Saudara/i Ari Azhari, Chintya Viola, Irlinda Desita, dan Lusiana Eka selaku rekan kerja saya yang telah banyak membantu saya dalam melakukan penelitian.
- 5) 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 Metalurgi dan Meterial di masa depan.

Depok, 23 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 : Didi Darul Fadli
NPM : 0606074741
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 :

Studi Pengaruh *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pada TWDI (*Thin Wall Ductile Iron*)

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

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 28 Desember 2009

Yang menyatakan

(Didi Darul Fadli)

ABSTRAK

Nama : Didi Darul Fadli
Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material
Judul Skripsi : Studi Pengaruh *Carbon Equivalent* Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Pada TWDI (*Thin Wall Ductile Iron*).

Penggunaan *Austempered Ductile Iron* (ADI) sebagai material alternatif di dunia, khususnya pada bidang otomotif semakin tinggi. Seperti telah diketahui, bahan dasar dalam pembuatan *Austempered Ductile Iron* (ADI) itu sendiri berasal dari besi tuang nodular yang selanjutnya di lakukan proses *austempering*. Pengembangan TWDI yang nantinya juga akan menjadikan ADI dan TWADI yang dapat dikategorikan menjadi material yang berberat jenis ringan (*light weight material*).

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh CE (*Carbon Equivalent*) terhadap struktur mikro dan sifat mekanis TWDI. Sedangkan pada pengecoran dinding tipis itu sendiri rentan akan terbentuknya karbida karena kecepatan pembekuan yang tinggi. Untuk mendapatkan nilai CE yang beragam maka diambil data dari tiga penuangan yang berbeda. Nilai CE bervariasi mulai dari 4,17 – 4,67. Pengamatan struktur mikro menunjukkan jumlah nodul rata-rata pada ketiga sampel adalah 399 – 1038/mm², dimana nilai tersebut tidak dipengaruhi secara langsung dengan meningkatnya nilai CE. Hasil akhir dari penelitian ini adalah nilai CE yang berpengaruh terhadap sifat mekanis yang merupakan hasil dari perkembangan mikrostrukturnya.

Kata kunci : Pengecoran dinding tipis, *Carbon Equivalent*, karbida.

ABSTRACT

Name : Didi Darul Fadli
Study Program : Metallurgical and Material Engineering
Title : Effect of CE (carbon equivalent) to Microstructure and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron

The application of Austempered Ductile Iron (ADI) as an alternative material in the word especially in otomotive area is tended to increase. As know, Austempered Ductile Iron (ADI) is developed from ferro casting ductile (FCD). The development of TWDI will also put ADI with its TWADI falls to lighth weight material categories.

The purpose of this research is to study the influence of carbon equivalent (CE) on microstructure and mechanical properties of thin wall ductile iron casting (TWDI). CE is associated with carbide forming. To gain a various CE values 3 pouring are used. The CE varied from 4.17 to 4.67. The observation of microstructure is showing average of nodule count from all sample is 399 – 1038/mm², where the value is not directly influenced with increased of CE. The result of this research is CE has influence in mechanical properties as the result of microstucture development.

Keywords : Thin wall casting, Carbon Equivalent, carbide.

DAFTAR ISI

| | Halaman |
|--|-----------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI..... | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR..... | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH..... | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR..... | x |
| DAFTAR TABEL..... | xii |
| DAFTAR RUMUS..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| 1. PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2. Perumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3. Tujuan Penelitian..... | 4 |
| 1.4. Batasan Masalah..... | 5 |
| 2. DASAR TEORI..... | 6 |
| 2.1. Besi Tuang..... | 6 |
| 2.2. Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 7 |
| 2.2.1. Jenis-jenis Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 7 |
| 2.2.2. Pengecoran Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 9 |
| 2.2.3. Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 11 |
| 2.2.4. Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular (TW-FCD)..... | 17 |
| 2.2.5. Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 19 |
| 2.2.5.1. Pembentukan Karbida..... | 19 |
| 2.2.5.2. Nilai <i>Carbon Equivalent</i> (CE)..... | 22 |
| 2.2.5.3. Perhitungan Nodularitas, Jumlah Nodul dan Diameter Rata-rata Nodul..... | 23 |
| 2.3. Besi Nodular Austemper (<i>Austemper Ductile Iron</i> , ADI)..... | 24 |
| 2.3.1. Sifat Mekanis ADI..... | 25 |
| 2.3.2. Penelitian Terkini Pengecoran Dinding Tipis ADI (TW-ADI)..... | 27 |
| 3. METODOLOGI PENELITIAN..... | 29 |
| 3.1. Diagram Alir Penelitian..... | 29 |
| 3.2. Alat dan Bahan..... | 30 |
| 3.2.1. Alat..... | 30 |
| 3.2.2. Bahan..... | 31 |
| 3.3. Prosedur Penelitian..... | 32 |
| 3.3.1. Perbaikan Pola..... | 32 |
| 3.3.2. Pembuatan Pola..... | 33 |
| 3.3.3. Pembuatan Cetakan..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.4. Pembuatan Logam Cair dan <i>Liquid Treatment</i> | 36 |
| 3.3.4.1. Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)..... | 36 |
| 3.3.4.2. Pembuatan Besi Tuang Nodular (BTN)..... | 37 |
| 3.3.5. Pengecoran..... | 37 |
| 3.3.6. Preparasi Sampel..... | 38 |
| 3.3.7. Pengujian..... | 41 |
| 3.3.7.1. Uji Komposisi Kimia..... | 41 |
| 3.3.7.2. Simulasi Software Z-Cast..... | 41 |
| 3.3.7.3. Pengamatan Struktur Mikro..... | 41 |
| 3.3.7.4. Pengujian Keras..... | 42 |
| 3.3.7.5. Pengujian Tarik..... | 43 |
| 4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN | 45 |
| 4.1. Komposisi Kimia..... | 45 |
| 4.1.1. Persentase Element Pada Logam Cair..... | 45 |
| 4.1.2. <i>Carbon Equivalent</i> (CE)..... | 46 |
| 4.2. Pengamatan Visual..... | 50 |
| 4.3. Simulasi Software..... | 51 |
| 4.4. Pengamatan Struktur Mikro..... | 53 |
| 4.4.1. Karbida..... | 53 |
| 4.4.2. Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul..... | 56 |
| 4.5. Pengujian..... | 60 |
| 4.5.1. Pengujian Kekerasan..... | 60 |
| 4.5.2. Pengujian Tarik..... | 62 |
| 5. KESIMPULAN..... | 65 |
| DAFTAR REFERENSI..... | 67 |
| LAMPIRAN..... | 70 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 1.1 | Perbandingan sifat mekanis ADI dengan beberapa material | 1 |
| Gambar 1.2 | Perbandingan nilai modulus elastisitas (E) ADI dengan material Lain..... | 2 |
| Gambar 2.1 | Diagram Fe-Fe ₃ C..... | 6 |
| Gambar 2.2 | Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada <i>ferritic ductile iron</i> | 12 |
| Gambar 2.3 | Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular..... | 12 |
| Gambar 2.4 | Pengaruh bentuk grafit pada kurva stress-strain beberapa besi cor.... | 13 |
| Gambar 2.5 | Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247 | 13 |
| Gambar 2.6 | Karbida primer dalam bentuk partikel putih didalam matriks (400x, etsa nital)..... | 20 |
| Gambar 2.7 | Karbida primer dalam matriks ferrite (400x, etsa nital)..... | 20 |
| Gambar 2.8 | Karbida primer chill terbalik di dalam BTN pearlitik (200x, etsa nital)..... | 21 |
| Gambar 2.9 | Struktur mikro ADI..... | 27 |
| Gambar 2.10 | Stang piston ADI-TWC..... | 27 |
| Gambar 3.1 | Diagram Alir Proses Penelitian..... | 29 |
| Gambar 3.2 | Desain pengecoran Stefanescu..... | 32 |
| Gambar 3.3 | Desain pengecoran untuk penelitian..... | 33 |
| Gambar 3.4 | Pola cetakan untuk pengecoran (a) pola cetakan sebelum dibentuk <i>pattern plate</i> ; (b) pola cetakan pada <i>base plate</i> disisi kiri; (c) pola cetakan pada sisi kanan..... | 34 |
| Gambar 3.5 | Salah satu sisi <i>pattern plate</i> | 35 |
| Gambar 3.6 | Proses merger dari pasangan cetakan | 35 |
| Gambar 3.7 | Pengambilan sampel uji dari plat..... | 39 |
| Gambar 3.8 | Sampel hasil <i>mounting</i> | 39 |
| Gambar 3.9 | Mikroskop optik digital..... | 42 |
| Gambar 3.10 | <i>Macrohardness tester</i> Brinell | 42 |
| Gambar 3.11 | Pengukuran jejak brinell dengan mikroskop optik..... | 43 |
| Gambar 3.12 | <i>Tensile strength machine</i> | 44 |

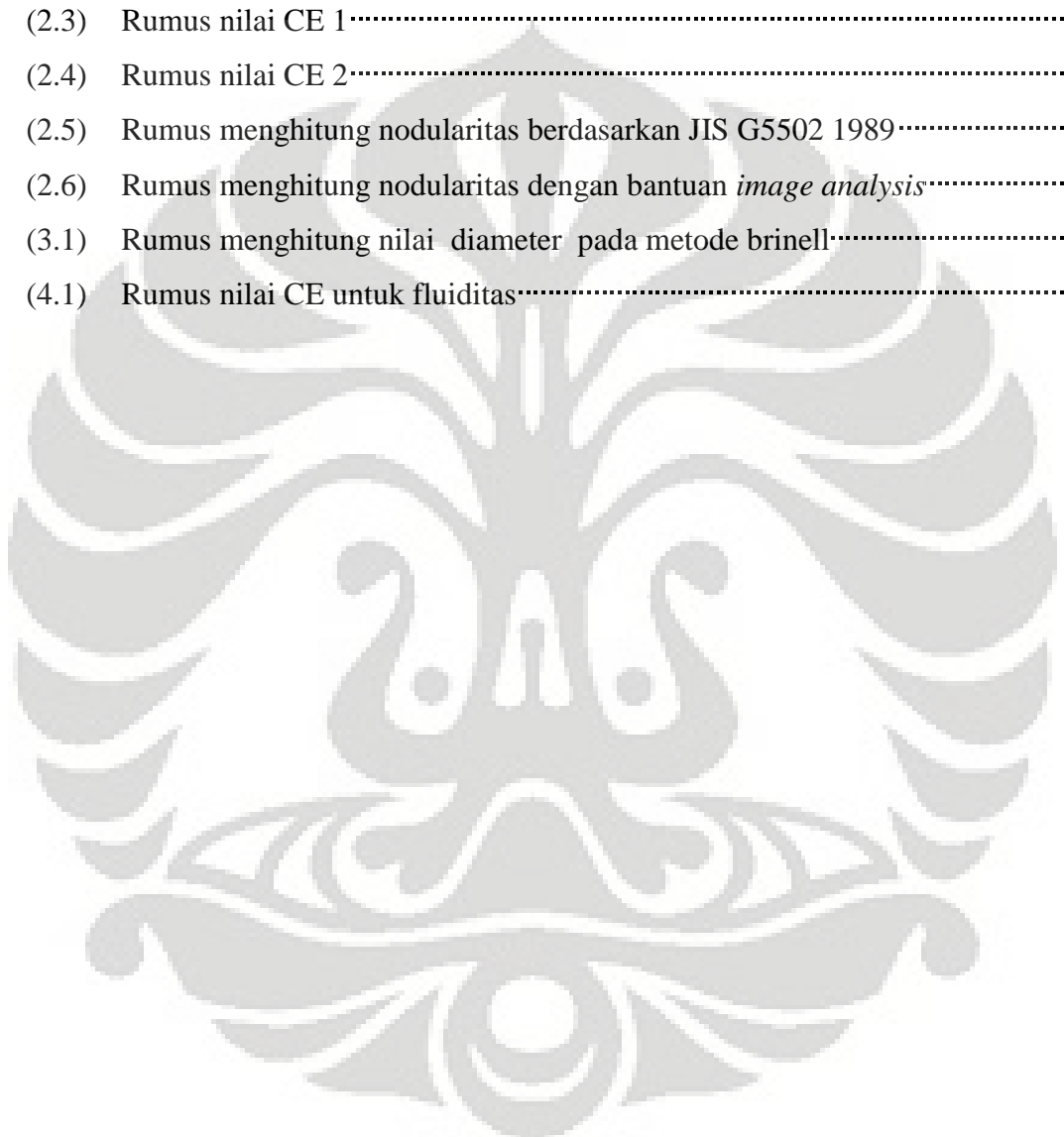
| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.1 | Nilai CE untuk beberapa jenis material..... | 48 |
| Gambar 4.2 | Benda dan saluran tuang hasil pengecoran, (a) hasil pengecoran P1T1, (b) hasil pengecoran P5-D, (c) hasil pengecoran P6-A..... | 51 |
| Gambar 4.3 | <i>Flow result</i> | 52 |
| Gambar 4.4 | <i>Solidification result</i> | 53 |
| Gambar 4.5 | Struktur mikro sampel P1T1 plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 200x..... | 54 |
| Gambar 4.6 | Struktur mikro sampel P5-D plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 100x..... | 54 |
| Gambar 4.7 | Struktur mikro sampel P6-A plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 200x..... | 54 |
| Gambar 4.8 | Struktur mikro Non Etsa dan Etsa P1T1 5 mm pada posisi 3, perbesaran 200x..... | 57 |
| Gambar 4.9 | Struktur mikro Non Etsa P5-D 5mm pada posisi 3, M 100x..... | 57 |
| Gambar 4.10 | Struktur mikro Non Etsa P6-A 5 mm pada posisi 3,M 100x..... | 58 |
| Gambar 4.11 | Grafik perbandingan % nodularitas, jumlah nodul, diameter nodul dan nilai CE dari ketiga sampel pada plat 5 mm..... | 59 |
| Gambar 4.12 | Grafik perbandingan nilai kekerasan dan CE pada ketiga sampel.... | 61 |
| Gambar 4.13 | Grafik perbandingan nilai UTS, %elongasi dan nilai CE dari ketiga sampel pada plat 5 mm..... | 63 |
| Gambar 4.14 | Grafik hubungan % CE dengan nilai tarik dan nodularitas dari ketiga sampel pada plat 5 mm..... | 63 |
| Gambar 4.15 | Pengaruh nodularitas pada <i>yield</i> dan <i>tensile strength</i> yang dikontrol Mg dan Pb pada besi nodular feritik..... | 64 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|---|----|
| Tabel 2.1. | Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular (BTN)..... | 8 |
| Tabel 2.2 | Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995..... | 14 |
| Tabel 2.3 | Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI..... | 25 |
| Tabel 4.1 | Komposisi kimia logam cair FCD 450 standar pabrik..... | 45 |
| Tabel 4.2 | Komposisi kimia logam cair dari ketiga sampel..... | 45 |
| Tabel 4.3 | Kadar CE logam cair..... | 46 |
| Tabel 4.4 | Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT..... | 49 |
| Tabel 4.5 | Perbandingan nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata pada plat 5 mm dari sampel P1, P5 dan P6..... | 58 |
| Tabel 4.6 | Perbandingan nilai UTS dan % elongasi pada plat 5 mm dari sampel P1, P5 dan P6..... | 62 |

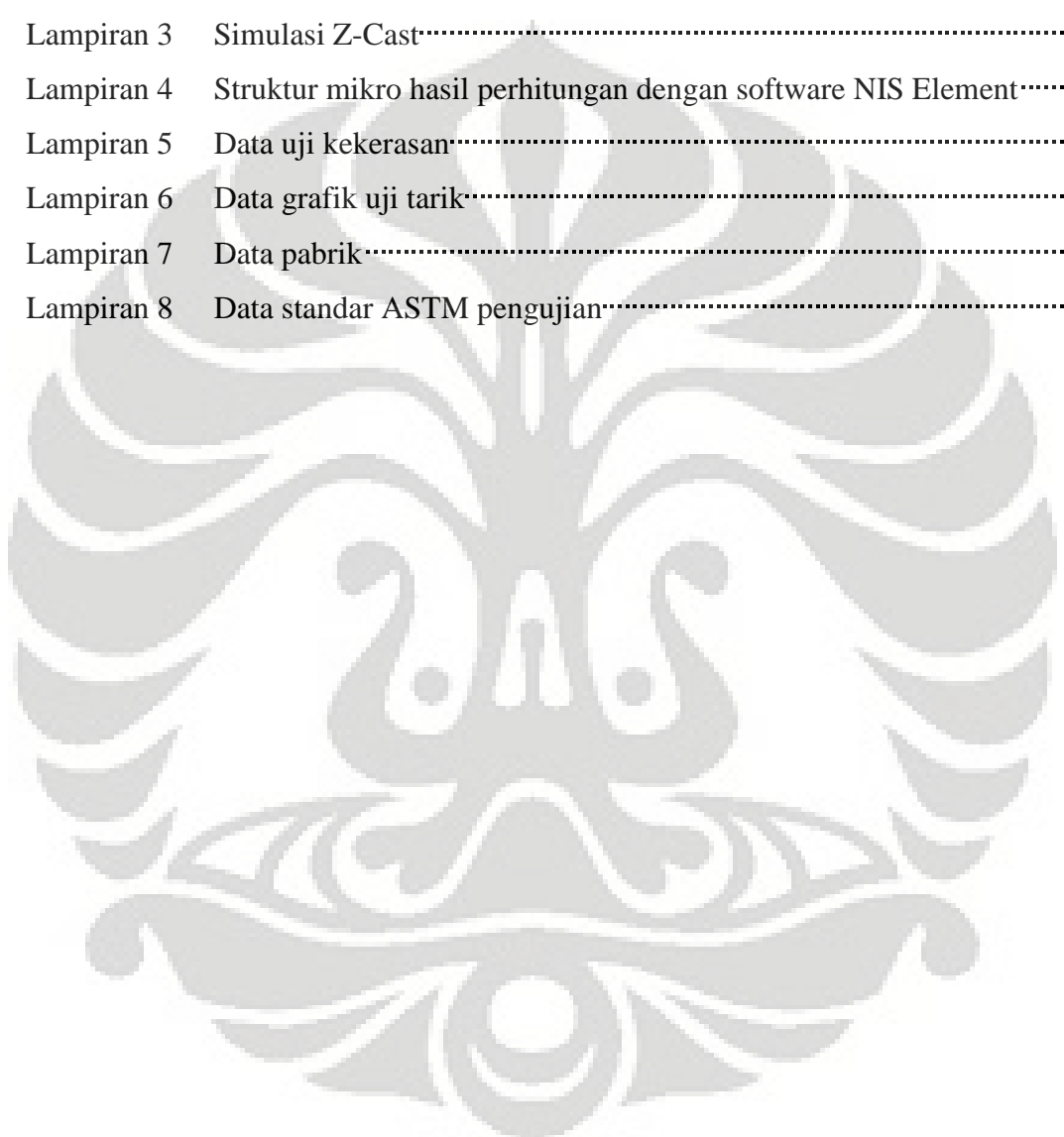
DAFTAR RUMUS

| | |
|---|----|
| (2.1) Rumus Mg efektif..... | 10 |
| (2.2) Rumus nilai CE berdasarkan ketebalan yang direkomendasikan oleh QIT... | 22 |
| (2.3) Rumus nilai CE 1..... | 22 |
| (2.4) Rumus nilai CE 2..... | 23 |
| (2.5) Rumus menghitung nodularitas berdasarkan JIS G5502 1989..... | 24 |
| (2.6) Rumus menghitung nodularitas dengan bantuan <i>image analysis</i> | 24 |
| (3.1) Rumus menghitung nilai diameter pada metode brinell..... | 43 |
| (4.1) Rumus nilai CE untuk fluiditas..... | 47 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|--|----|
| Lampiran 1 | Hasil pengecoran sebelum pemotongan | 70 |
| Lampiran 2 | Sampel hasil pengecoran | 71 |
| Lampiran 3 | Simulasi Z-Cast | 74 |
| Lampiran 4 | Struktur mikro hasil perhitungan dengan software NIS Element | 75 |
| Lampiran 5 | Data uji kekerasan | 84 |
| Lampiran 6 | Data grafik uji tarik | 87 |
| Lampiran 7 | Data pabrik | 92 |
| Lampiran 8 | Data standar ASTM pengujian | 98 |



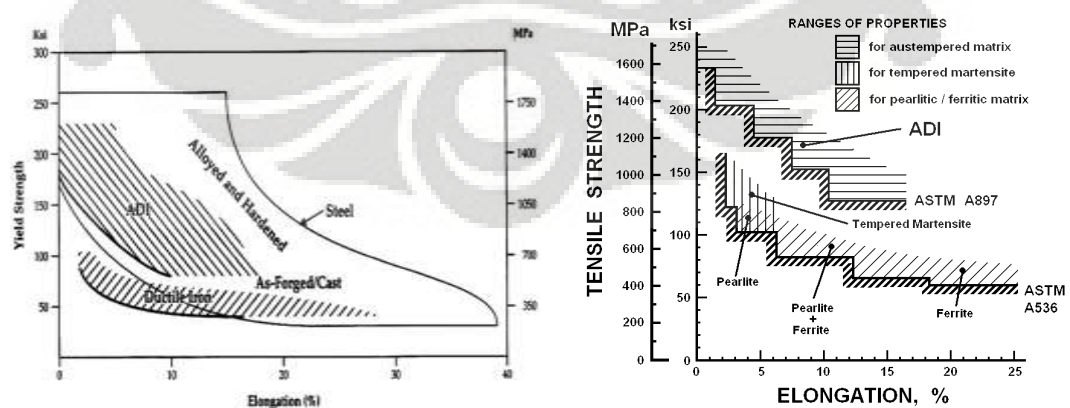
BAB 1

PENDAHULUAN

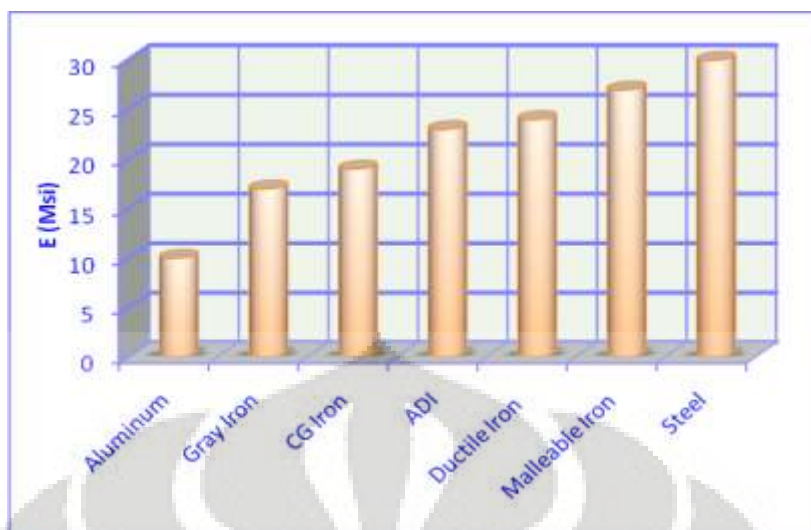
1.1 LATAR BELAKANG

Sungguh sangat ironi bagi dunia *foundry* di Indonesia yang sesungguhnya dapat menghasilkan besi tuang nodular (FCD) yang potensial untuk ditingkatkan menjadi *austempered ductile iron* (ADI) tetapi tidak melakukan hal tersebut, sementara dunia sedang *booming* dalam penggunaan ADI. Keinginan untuk memajukan dan meningkatkan hasil produksi industri pengecoran di Indonesia, dalam hal ini FCD, dan meningkatkan nilai tambah yang dimilikinya, dalam hal ini membuat ADI, serta di dalam usaha untuk meningkatkan perluasan penggunaan hasil produk di segala bidang menyebabkan penelitian ini dilakukan. Dengan dapat dibuktikannya kemampuan proses pengecoran FCD dengan ketebalan minimal dan proses ADI-fikasinya, maka diharapkan industri pengecoran Indonesia dapat menjadi pelopor di dalam perkembangan penggunaan ADI di dunia.

Penggunaan *austempered ductile iron* (ADI) sebagai material alternatif di dunia, khususnya pada bidang otomotif semakin tinggi. Hal ini disebabkan selain karena sifat-sifatnya yang unggul, terutama sifat mekanis, Gambar 1.1 dan nilai uji tarik, Gambar 1.2, juga karena secara proses produksi ADI sangat ekonomis. ADI dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi aluminium.^[1]



Gambar 1.1 Perbandingan sifat mekanis ADI dengan beberapa material^[2]



Gambar 1.2 Perbandingan nilai modulus elastisitas (E) ADI dengan material lain^[2]

Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada jenis besi tuang yang lain, yaitu memiliki keuletan dan kekuatan yang tinggi. Dengan proses austempering, maka besi tuang nodular dapat ditingkatkan menjadi besi tuang nodular austemper (*austempered ductile iron*-ADI). Besi nodular austemper memiliki fleksibilitas desain, kemampuan permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, serta ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik yang baik.

Perkembangan ADI di Indonesia sampai saat ini masih lebih fokus pada tahap penelitian. Tahap produksi sudah dilakukan tetapi masih dalam skala yang sangat kecil dan atas permintaan khusus walaupun sesungguhnya Indonesia sangat potensial untuk memproduksinya. Indonesia potensial karena banyak industri pengecoran di Indonesia yang berbasis pada pengecoran besi tuang kelabu (FC) dan besi tuang nodular (FCD). Hal lain, yang menyebabkan Indonesia potensial untuk menghasilkan ADI adalah FCD yang dihasilkan di Indonesia oleh semua skala industri pengecoran, walaupun tidak memenuhi persyaratan FCD untuk ADI,^[2] ternyata tetap dapat dijadikan ADI.

Munculnya ADI sebagai material alternatif dalam bidang otomotif dunia mendorong perkembangan semua sektor yang mendukung proses produksi ADI termasuk dalam pelaksanaan penelitian-penelitian untuk terus meningkatkan kemampuan ADI. Penelitian yang digiatkan terutama bertujuan untuk mengurangi berat ADI, sehingga dapat digunakan sebagai material untuk *hybrid car*. Pada

Universitas Indonesia

tahun 2002 Martinez, berhasil membuat *connecting rod* (stang piston) dengan ketebalan 3 mm yang akan digunakan mesin 2 silinder yang dihasilkan oleh Pronello I+D.^[3]

Melihat bahwa teknologi yang dibutuhkan untuk meningkatkan FC menjadi FCD adalah teknologi sederhana dan jika ditinjau dari segi biaya juga tidak membutuhkan investasi yang besar dan sungguh sangat disayangkan tidak banyak perusahaan pengecoran yang melakukan hal ini. Dengan melihat pada potensi yang dimiliki oleh Indonesia, maka dirasa sangat perlu untuk lebih memperhatikan industri pengecoran terutama dalam upaya sosialisasi peningkatan FC menjadi FCD sehingga Indonesia dapat menjadi salah satu produsen komponen otomotif dari ADI, lebih-lebih pada saat ini isu dunia adalah konversi energi, yang salah satunya diwujudkan dalam bentuk teknologi *hybrid car*. Komponen ADI, dengan sifat *light weight* –nya akan menjadi alternatif yang baik.

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

Pada penelitian ini pertama-tama akan dilakukan proses pengecoran FCD dengan ketebalan: 5, 4, 3, 2 sampai 1 mm. Proses pengecoran yang digunakan adalah pengecoran vertikal (*soundness casting*) dengan cetakan pasir furan. Kecepatan pendinginan akan diatur oleh ketebalan cetakan. Setelah proses pengecoran, akan dilakukan analisa komposisi kimia, struktur mikro, sifat mekanis yang meliputi pengujian tarik dan pengujian keras.

Dari penelitian ini diharapkan akan diperoleh FCD dinding tipis, FCD *thin walled*, yang memenuhi persyaratan untuk dijadikan ADI dengan teknologi yang relatif sederhana dan murah. Dengan dapat dibuatnya *light weight* ADI (TWADI) dengan teknologi yang sederhana dan murah tersebut selain kebutuhan akan permintaan *light weight material* dapat dipenuhi, diharapkan juga akan dapat mengembangkan industri kecil pengecoran logam Indonesia.^[4]

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Besi tuang nodular (FCD) yang digunakan sebagai bahan baku pembuatan dinding tipis ADI (TWADI) dalam penelitian ini adalah FCD 45. Untuk proses pengecoran, digunakan pengecoran vertikal (*soundness casting*) dengan modifikasi dari desain sistem saluran tuang Stefanescu. Penelitian pengecoran dinding tipis Stefanescu menyusun plat berturut-turut dari *ingate* 6, 2.5 dan 3.5 mm untuk menghindari terjadinya pembekuan dini pada plat tipis.^[5] Pada penelitian ini modifikasi dilakukan dengan 5 variasi ketebalan plat, berturut-turut dari *ingate* 1, 2, 3, 4 dan 5 mm. Pencegahan terjadinya pembekuan dini pada plat 1 mm di *ingate* memanfaatkan panas dari aliran logam cair yang cepat dan terus-menerus sehingga pembekuan baru terjadi setelah cetakan terisi penuh.

Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi, keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE), kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit, dan rendahnya jumlah nodul (*nodule count*) dan bentuk nodul (*nodularity*).^[4] Jumlah karbida yang sangat besar meningkatkan ketahanan aus dari besi tuang, namun membuatnya getas dan sulit untuk dilakukan permesinan.^[6]

Pada proses pembuatan besi tuang nodular (FCD) resiko pembentukan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan/atau Ce sebagai nodulan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Struktur mikro karbida merupakan struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang memiliki kecepatan pendinginan tinggi atau benda cor yang tipis. Keberadaan struktur karbida, bentuk nodul (*nodularity*) dan jumlah nodul (*nodule count*) dari grafit berkaitan erat dengan kecepatan pendinginan yang tinggi sebagai akibat tipisnya plat.^[5]

Ketika ukuran bidang menurun, kecepatan solidifikasi dan pendinginan dalam cetakan meningkat. Pada bidang yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampu mesin dan

menyebabkan kegetasan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inoculan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Adapun tujuan dari penelitian ini antara lain adalah:

1. Mengetahui pengaruh posisi plat tipis dalam pengecoran dinding tipis terhadap sifat mekanis hasil yang meliputi kekerasan dan kekuatan tarik.
2. Mengetahui pengaruh posisi plat tipis dalam pengecoran dinding tipis terhadap struktur mikro yang meliputi karbida (*presipitate*), nodularitas (*nodularity*) dan jumlah nodule (*nodule count*).
3. Mengetahui pengaruh CE (*Carbon Equivalent*) terhadap sifat mekanis dan struktur mikro dari pengecoran dinding tipis.

1.4 BATASAN MASALAH

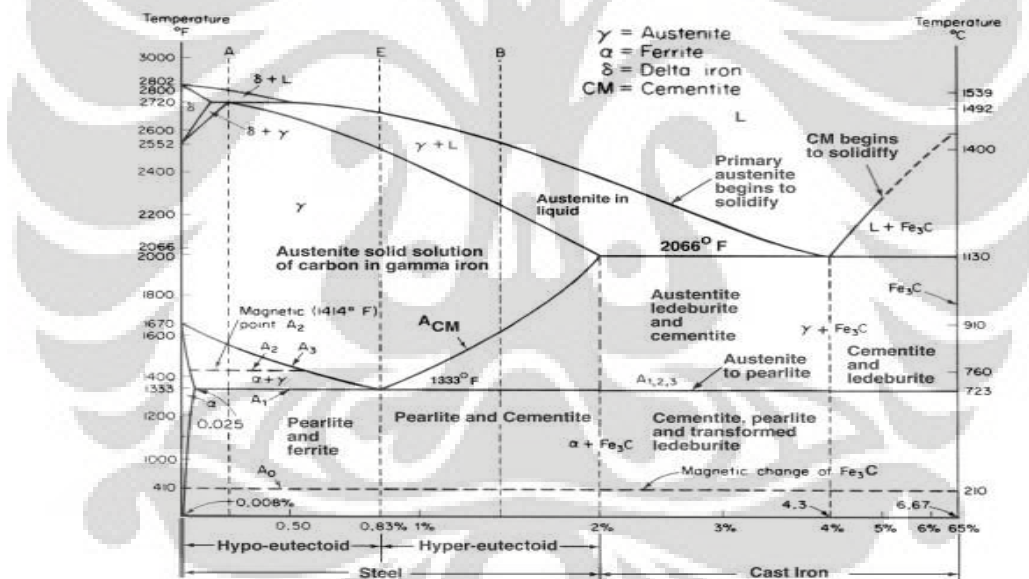
Pada penelitian ini baru dilakukan penelitian pembuatan material TWDI. Penelitian ini akan menjadi awal dari penelitian-penelitian lanjutan untuk memperoleh peralatan atau komponen TWADI. Pada tahap pengecoran dinding tipis ini, ketebalan yang akan dibuat adalah 5, 4, 3, 2, dan 1 mm dengan sistem pengecoran vertikal (*soundness casting*). Target yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mengetahui pengaruh CE (*carbon equivalent*) terhadap sifat mekanis dari TWDI dan struktur mikronya pada plat dinding tipis FCD 5 mm dari penuangan 1, 5 dan 6. Cetakan akan dibuat dari pasir dengan jenis furan dan penelitian dibuat dalam skala pabrik (*foundry scale*). Jenis material yang digunakan untuk pengecoran adalah FCD 45. Pengujian yang akan dilakukan adalah pengujian komposisi kimia dan menghitung nilai CE, pengamatan struktur mikro, dan pengujian mekanis yang terdiri atas uji tarik dan uji keras. Selain itu dilakukan simulasi *software Z-cast* dan perhitungan *nodularity* dan *nodule count* dengan *software NIS Element*.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 BESI TUANG

Logam diklasifikasikan menjadi 2 kelompok besar, yaitu *ferrous* dan *nonferrous*. Untuk *ferrous*, elemen utamanya adalah besi (Fe) dan karbon (C). *Ferrous* terbagi lagi menjadi 2 kelas, yaitu baja dan besi tuang. Keduanya memiliki Fe dan C sebagai elemen utamanya, perbedaan besi tuang dan baja terletak pada kandungan karbonnya. Pada baja, kandungan karbon berkisar antara (0,02–2,14)%, dan pada besi tuang berkisar antara (2,14–6,687)%. Besi tuang merupakan kelompok paduan besi dengan kandungan karbon di atas 2,14%, Gambar 2.1. Namun demikian, kebanyakan besi tuang mengandung karbon antara 3,0 sampai 4,5%, dan ditambahkan dengan unsur paduan yang lain.



Gambar 2.1 Diagram Fe-Fe₃C^[7]

Pada umumnya besi tuang (*cast iron*) terbagi menjadi 5 jenis^[8], yaitu:

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

2.2 BESI TUANG NODULAR (BTN)

Besi tuang nodular atau *ferro casting ductile* (FCD) merupakan material dasar untuk pembuatan ADI. Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang yang lain, antara lain memiliki keuletan yang tinggi (elongasi sebesar 18% pada grade tertentu) dan kekerasan 143-217 HB. Bahkan, ADI memberikan sifat mekanik yang lebih besar serta ketahanan aus dengan kekuatan tarik melebihi 230 ksi (1600 MPa).^[1] *Yield strength* 40.000 psi (275 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 90,000 psi (620 MPa) untuk jenis martensitik. Sementara untuk *tensile strength* mencapai 60,000 psi (414 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 200,000 psi (1380 MPa) untuk jenis martensitik, lihat Tabel 2.1. Sifat mekanik ini dapat dicapai karena besi tuang nodular memiliki jumlah yang tinggi dan bentuk grafit yang bulat pada struktur mikronya.

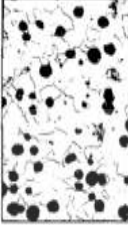
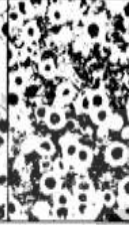

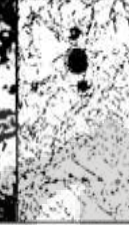



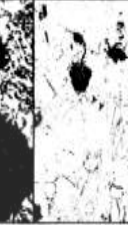
Menurut Keough, proses pengecoran BTN menawarkan banyak metode untuk menghasilkan atau mengembangkan suatu produk menjadi lebih baik dalam waktu yang lebih pendek dan biaya yang lebih rendah.^[2] Berdasarkan standar ASTM A395, kebanyakan spesifikasi standar dari BTN mensyaratkan nilai kekuatan dan keuletan minimum.^[9]

2.2.1 Jenis Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular bukan suatu material tunggal, akan tetapi merupakan bagian kelompok material dimana sifat yang dihasilkan merupakan hasil pengontrolan dari struktur mikronya. Berdasarkan struktur mikronya, besi tuang nodular dikelompokkan menjadi:^[1]

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

Tabel 2.1. Struktur mikro dan kekuatan tarik dari beberapa jenis besi tuang nodular^[1]

| MATRIX | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|--|---|---|
| Ferritic Grade 5 | Ferritic-pearlitic Grade 3 | Pearlitic Grade 1 | Martensitic (With retained austenite) | Tempered Martensitic | ADI Grade 150 | ADI Grade 230 | Austenitic |
| 60,000 p.s.i. (414 mPa) | 80,000 p.s.i. (552 mPa) | 100,000 p.s.i. (690 mPa) | N.A. * | 115,000 p.s.i. (793 mPa) | 150,000 p.s.i. (1050 mPa) | 230,000 p.s.i. (1600 mPa) | 45,000 p.s.i. (310 mPa) |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

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

a) Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)

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

b) Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)

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

c) Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)

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

d) Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)

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

e) Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)

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

f) Besi Ulet Austenitik (*Austenitic Ductile Iron*)

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

g) Besi Ulet Hasil Austemper (*Austempered Ductile Iron*)

ADI merupakan kelompok besi ulet yang paling baru dikembangkan dengan perlakuan panas berupa *austempering*. Sifat yang dihasilkan hampir dua kali kekuatan besi ulet perlitik (*pearlitic ductile iron*). ADI juga memiliki ketangguhan dan elongasi yang tinggi. Kombinasi ini menghasilkan material dengan kekuatan fatik dan ketahanan aus yang sangat tinggi.

2.2.2 Pengecoran Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular dibentuk dari pengecoran besi tuang yang dilakukan proses perlakuan cairan (*liquid treatment*). *Liquid treatment* adalah suatu usaha penambahan bahan suntikan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam yang akan dihasilkan. Penambahan bahan suntikan yang dilakukan pada *liquid treatment* tidak akan mengganggu komposisi dari logam cair tersebut karena bahan tersebut memacu suatu perbaikan dan jumlahnya pun relatif sedikit. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 *liquid treatment* yang dialami, yaitu inokulasi dan nodularisasi.^[10]

a. Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair. 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. Dalam proses inokulasi biasanya silikon ditambahkan dalam bentuk *ferro-silikon* berkisar antara (0,5-1,5) % sesuai dengan kebutuhan. Fungsi lain penambahan inokulan yaitu :

- Memacu pertumbuhan grafit
- Meratakan distribusi grafit di dalam logam
- Memberikan struktur yang homogen pada setiap ketebalan
- Mencegah timbulnya cil
- Memperbaiki sifat mekanis logam
- Mampu menghilangkan karbida eutektik di dalam ladeburit

Ada 2 metode yang dikenal dalam penambahan inokulan ke dalam logam cair, yaitu :

a. Metode *Ladle Inokulasi*

Inokulan ditambahkan ke dalam *ladle*. Kelemahan metode ini adalah penurunan suhu yang terjadi besar dan pemudaran inokulan lebih mudah terjadi.

b. Metode *Late Inokulasi*

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

b. Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) atau Cerium (Ce) ke dalam logam cair pada temperatur 1450 - 1510°C yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular atau bola-bola kecil.^[8] Karena Mg lebih murah dan mudah diperoleh, maka biasanya unsur yang ditambahkan adalah Mg, sehingga biasa disebut *Mg-treatment*. Banyaknya Mg yang ditambahkan dan larut dalam logam cair tergantung pada kadar sulfur dan kadar oksigen. Banyaknya kadar Mg yang efektif dapatdi hitung dengan Rumus 2.1 berikut :

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

Suhu perlakuan berkisar antara 1538°C sampai 1565°C, yaitu suhu di atas titik didih Mg. Biasanya Mg ditambahkan dalam bentuk senyawa karena sifatnya sangat *eksplosif*. Ada 5 cara penambahan Mg ke dalam logam cair yaitu :

- Cara *ladle* terbuka
- Cara *sandwich*
- Cara penambahan permukaan
- Cara *plunging*
- Cara *Vortex*

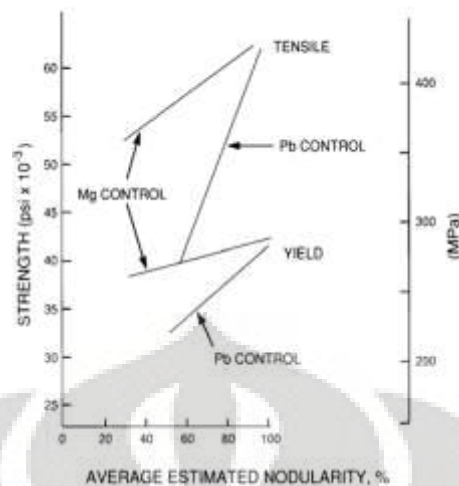
2.2.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

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

- a) Struktur grafit
- b) Jumlah grafit
- c) Struktur matriks
- d) Ukuran ketebalan
- e) Komposisi kimia

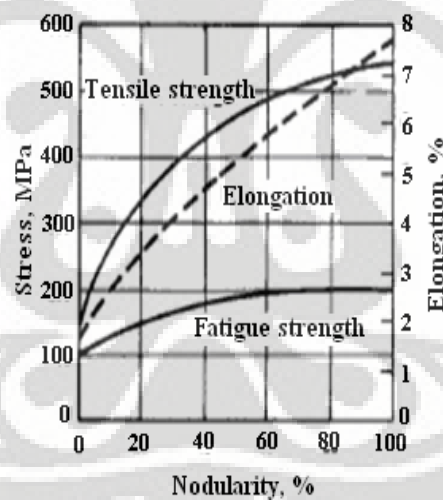
a) Struktur grafit

Grafit adalah bentuk stabil dari karbon murni dalam besi tuang. Sifat fisik yang penting adalah massa jenis yang rendah, kekerasan yang rendah, dan konduktivitas panas dan pelumasan yang tinggi. Bentuk grafit, dapat berupa serpihan hingga bulat, memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanis besi tuang seperti terlihat pada Gambar 2.2. Grafit serpih berperan seperti retakan dalam matrik besi, sementara grafit bulat berperan seperti penangkap retakan, memberikan perbedaan pada sifat mekanis. Kehadiran grafit dalam bentuk bulatan pada besi tuang nodular (pada besi kelabu berbentuk *flakes*) disebabkan oleh penambahan magnesium (Mg) dan atau cerium (Ce) pada logam cair. Jumlah dan bentuk grafit dalam besi tuang nodular ditentukan selama solidifikasi dan tidak dapat diubah oleh perlakuan panas berikutnya.



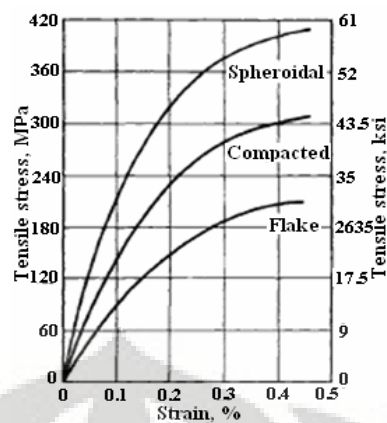
Gambar 2.2 Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada *ferritic ductile iron*^[10]

Semua sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan meningkat jika proporsi dari grafit nodular meningkat. Misalnya adalah kekuatan tarik dan kekuatan fatik seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular.^[10]

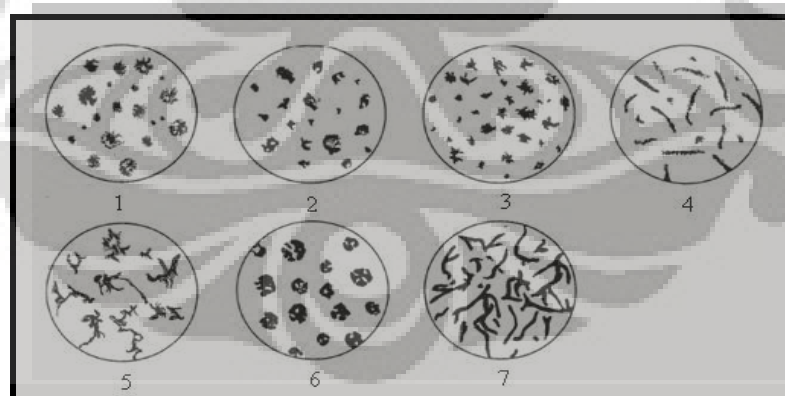
Bentuk dari grafit non-nodular seperti bentuk *flakes* (serpih tipis) dengan sudut yang tajam memiliki pengaruh yang merugikan pada kekuatan besi tuang nodular, lihat Gambar 2.4. Presentasi nodularitas yang rendah juga menyebabkan ketahanan energi impak yang lebih rendah, mengurangi kekuatan fatik, meningkatkan kemampuan peredaman, meningkatkan konduktifitas panas dan mengurangi ketahanan listrik.



Gambar 2.4 Pengaruh bentuk grafit pada kurva *stress-strain* beberapa besi cor.^[10]

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

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



Gambar 2.5 Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247.^[8]

b) Jumlah grafit

Ketika jumlah grafit meningkat, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang menurun pula. Pada umumnya, pengaruh-pengaruh ini kecil jika dibandingkan dengan pengaruh dari variabel

lain, karena kandungan *carbon ekuivalen* (CE) pada besi nodular bukan variabel utama dan dijaga tetap pada nilai eutektik.^[8]

c) Struktur matriks

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi besi tuang nodular adalah struktur matrik. Struktur ferit memberikan kekuatan dan kekerasan yang rendah, tetapi keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Sementara pearlit memberikan kombinasi antara kekuatan yang tinggi dan keuletan yang umumnya memenuhi kebutuhan banyak aplikasi rakayasa.

Pada hasil *as-cast*, matrik akan terdiri dari berbagai proporsi dari perlit dan ferrit. Keuletan dan kekuatan impak ditentukan oleh proporsi dari ferrit dan perlit dalam matrik. Ketika jumlah perlit meningkat, kekuatan dan kekerasan juga meningkat, lihat Tabel 2.2.

Struktur matrik dapat diubah dengan perlakuan panas, dan yang paling sering dilakukan adalah proses anil untuk menghasilkan matrik feritik penuh dan *normalizing* untuk menghasilkan matrik pearlitik. Secara umum, proses anil menghasilkan matrik yang lebih ulet dengan temperatur transisi impak yang lebih rendah dari pada yang dihasilkan dalam besi *as-cast* feritik. *Normalizing* menghasilkan kekuatan tarik dan jumlah elongasi yang lebih tinggi dari pada yang dihasilkan dalam besi *as-cast* perlitik penuh.^[8]

Tabel 2.2 Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995.^[8]

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

d) Ukuran ketebalan

Ketika ukuran bidang menurun, kecepatan solidifikasi dan pendinginan dalam cetakan meningkat. Pada bidang yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampumesinan dan menyebabkan kegetasan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inoculan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi.^[8]

Sedangkan, ketika ukuran bidang meningkat jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih besar. Ini menghasilkan ukuran nodul yang besar, pengurangan jumlah ferit pada hasil *as-cast*, dan meningkatkan ketahanan terhadap pembentukan struktur feritik penuh ketika di anil.^[8]

e) Komposisi kimia

Penambahan elemen paduan pada besi tuang nodular berfungsi untuk mengontrol sifat dan performa material sesuai kebutuhan aplikasi. Beberapa elemen yang dapat ditambahkan dalam komposisi besi tuang nodular antara lain:

- 1) Karbon (C)
- 2) Silikon (Si)
- 3) Mangan (Mn)
- 4) Magnesium (Mg)
- 5) Sulfur (S)

1) Karbon (C)

Elemen karbon dihasilkan dari *pig iron*, *carburizer* dan *scrap* besi cor. Jumlah elemen karbon optimum pada (3,4-3,8)% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Kandungan karbon yang tinggi akan mengurangi deformasi plastik yang dibutuhkan untuk *void* tumbuh dan bergabung, sedangkan kandungan karbon yang berkurang akan meningkatkan keuletan dan elongasi besi tuang nodular feritik.^[1]

2) Silikon (Si)

Silikon merupakan *agen* grafitasi yang kuat. Sumber silikon berasal dari *raw material* yang meliputi *scrap* besi cor, *pig iron*, paduan besi dan sejumlah kecil paduan yang ditambahkan selama inokulasi. Jumlah kandungan silikon optimum pada (2,0-2,8)%. Kadar yang lebih rendah menyebabkan keuletan tinggi ketika dilakukan perlakuan panas dan dapat mempromote terbentuknya karbida pada bagian yang tipis. Sedangkan kadar silikon tinggi mempercepat anil dan mencegah pembentukan karbida pada bagian tipis.^[1]

3) Mangan (Mn)

Sumber utama mangan adalah *scrap* baja. Kadar elemen harus dibatasi untuk menghasilkan keuletan maksimum. Kadar mangan untuk besi cor feritik harus $\leq 0,2\%$. Kadar untuk besi yang akan dilakukan perlakuan panas untuk jenis feritik harus $\leq 0,5\%$ tetapi untuk besi jenis perlitik bisa sampai 1%. Mangan merupakan elemen yang dapat menyebabkan segregasi mikro, khususnya terjadi pada bagian tebal, dimana mangan mendorong pembentukan karbida pada batas butir sehingga dihasilkan keuletan dan ketangguhan yang rendah serta perlit yang keras.

4) Magnesium (Mg)

Elemen ini berfungsi untuk membantu pembentukan grafit bulat dengan kadar (0,04-0,06)%. Jika kandungan sulfur awal dibawah 0,015%, maka kandungan mangan juga disesuaikan lebih rendah antara (0,035-0,04)% untuk menghasilkan sifat yang diinginkan.

5) Sulfur (S)

Sulfur berasal dari muatan material bahan baku. Kandungan sulfur pada besi nodular biasanya di bawah 0,015% tetapi jika cerium ditambahkan, kadarnya meningkat karena terbentuk serium sulfida. Ketika menggunakan kupola, sering terjadi desulfurisasi biasanya dengan *lime* atau kalsium karbida, sebelum perlakuan magnesium sampai level 0,02% atau kurang.

2.2.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular (TW-FCD)

Selain dengan cara mengganti material yang berat dengan material yang ringan seperti aluminium dan magnesium, jika dikaitkan dengan kebutuhan untuk penggunaan berat yang ringan – *light weight*, maka salah satu cara untuk memenuhinya adalah dengan menipiskan ketebalan benda cor. Namun, kendala utama yang akan dihadapi pada pengecoran FCD dalam proses penipisan adalah terbentuknya karbida.

Pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal 5 mm.^[11] Pengecoran dinding tipis dilakukan untuk mengurangi berat yang dimiliki oleh produk tuang sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan *light weight* pada suatu komponen.

Skaland mencoba melihat efek dari ketebalan pengecoran terhadap jumlah nodul yang dihasilkan dengan menggunakan inokulan yang mengandung (Ca-Ce-S-O). Pada percobaannya, Skaland bervariasi ketebalan cornya pada 40, 20, 10, dan 5 mm. Hasil yang diperoleh ternyata jumlah nodul berkurang dengan semakin tipisnya ketebalan cor.^[12] Javaid mencoba untuk melihat hubungan ketebalan cor dengan komposisi kimia terhadap nilai impact. Ketebalan yang digunakannya adalah 12 mm dan 3 mm. Hasil yang diperoleh adalah perubahan komposisi kimia lebih berpengaruh pada ketebalan cor yang tebal, dalam hal ini 12 mm.^[6] Dengan menggunakan 2 sistem penuangan (*pouring*), yaitu: penuangan horisontal dan penuangan vertikal, Stefanescu mencoba membuat ketebalan minimal untuk plat (100 x 25) mm, 1,5 mm untuk penuangan horisontal dan 2,5 mm untuk penuangan vertikal. Setelah dilakukan pengujian dan datanya dibandingkan, ternyata tidak ditemukan karbida pada penuangan vertikal dan sifat mekanis pada penuangan vertikal lebih terjamin dari pada penuangan horizontal.^[5]

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, Showman mencoba meminimalisasi ketebalan benda cor dengan memperbaiki kapasitas panas dan konduktivitas panas dari bahan cetakan. Bahan cetakan yang digunakannya dalam penelitian ini adalah *low density alumina silicate ceramics* (LDASC). Ketebalan minimal yang dibuat adalah 2 mm. Hasil yang diperoleh adalah penggunaan LDASC dapat mengurangi ketebalan benda cor dan dengan meningkatnya

perbandingan LDASC di dalam bahan cetakan semakin mengurangi jumlah karbida yang terbentuk pada bagian tipis.^[13]

Schrems melakukan penelitian untuk melihat hubungan antara ketebalan benda cor dengan sifat-sifat mekanis yang dimiliki benda cor tersebut. Ketebalan minimal yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1,7 mm. Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa tegangan tarik maksimal berbanding terbalik terhadap ketebalan dinding cor dan regangan berbanding lurus dengan ketebalan dinding cor.^[14]

Penelitian tentang parameter-parameter yang mempengaruhi sifat mekanik dilakukan oleh Caldera. Dalam penelitiannya, Caldera mengamati pengaruh jumlah nodul terhadap kekuatan fatik pada material besi tuang nodular feritik dengan menggunakan metode pengecoran horizontal dan vertikal. Hasil yang dicapai adalah peningkatan jumlah nodul menyebabkan peningkatan kekuatan fatik.^[11] Dix mengamati pengaruh sifat kekuatan tarik dan elongasi akibat kekasaran permukaan. Kekasaran permukaan terjadi akibat pengaruh tekanan logam cair dan temperatur tuang. Semakin besar tekanan dan tinggi temperatur maka semakin kasar permukaan yang dihasilkan. Selain itu, diamati pula kecepatan pendinginan terhadap jumlah nodul yang dihasilkan. Jumlah nodul meningkat sejalan dengan meningkatnya kecepatan pendinginan.^[15]

Belum ada standar baku untuk ketebalan benda yang dikategorikan dalam pengecoran dinding tipis (*thin wall casting*). Caldera mendefinisikan ketebalan dinding dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal kurang dari 5 mm.^[11] Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm.^[3] Sedangkan Stefanescu mendefinisikannya sebagai ketebalan yang lebih kecil atau sama dengan 3 mm.^[5]

Ketebalan minimal terakhir yang sudah dapat dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm yang dibuat oleh kelompok Stefanescu.^[5] Sedangkan ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis (TW-FCD) sebagai bahan baku TW-ADI adalah 2 mm yang dicapai oleh kelompok Mourad dalam bentuk benda uji,^[16] dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok

Martinez dalam bentuk komponen *hollow connecting rod* dari design inovatif mesin 2 silinder.

Keberhasilan pengecoran dinding tipis ini ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.^[5] Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginannya tinggi atau tipis. Dari hasil penelitiannya ini diperoleh kesimpulan bahwa jumlah dan ukuran nodul berhubungan erat dengan jarak antar partikel (λG), jika jumlah dan ukuran nodul naik maka (λG) berkurang.^[4]

2.2.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)

Pada pengecoran BTN atau *ferro casting ductile (FCD)* yang nantinya akan dibuat menjadi ADI dan TW-ADI, ada beberapa hal yang berkaitan dengan sifat-sifat besi tuang nodular (BTN) yang dihasilkan, antara lain:

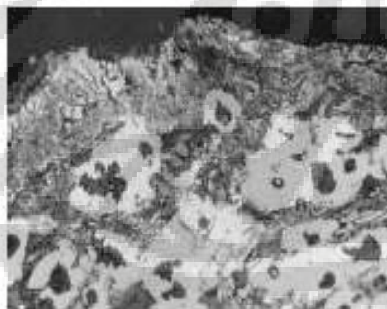
2.2.5.1 Pembentukan Karbida

Dalam proses solidifikasi besi tuang selain terbentuknya grafit bebas dapat juga terbentuk karbida, atau sementit. Pada pengecoran besi tuang nodular (BTN), struktur karbida (Fe_3C) adalah salah satu bentuk cacat secara metalurgi,^[17] dimana struktur ini memiliki sifat keras dan getas. Pembentukan struktur ini disebabkan oleh rasio luas permukaan *presipitasi grafit* yang terbatas terhadap volume fraksi dari jumlah grafit. Oleh karena itu, perlu ditambahkan elemen penstabil karbida seperti Mg untuk proses nodulasi. Faktor yang lain adalah bahwa kandungan unsur S di dalam besi nodular secara sengaja direndahkan sampai lebih kecil dari 0,02%, untuk memfasilitasi pembentukan bulatan grafit.^[18]

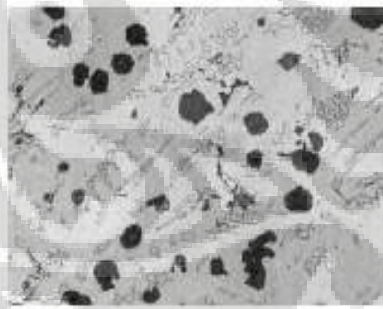
Pembentukan karbida biasanya juga terjadi jika proses inokulasi tidak berjalan dengan efektif atau jika pengecoran dilakukan pada benda-benda tipis. Proses inokulasi yang kurang efektif dapat mengakibatkan terjadinya *fading* sehingga terbentuk karbida primer. Karbida yang terbentuk memiliki beberapa nama antara lain *ladeburit*, *chill*, karbida primer, Fe_3C , karbida sementit, besi

putih dan besi keras (*hard iron*).^[17] Jumlah karbida yang sangat besar meningkatkan ketahanan aus dari besi tuang, namun membuatnya getas dan sulit untuk dilakukan permesinan. Pembentukan karbida biasanya terjadi jika proses inokulasi tidak berjalan dengan benar atau jika pengecoran dilakukan pada benda-benda tipis. Pada proses pembuatan besi tuang nodular (FCD) resiko pembentukan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan/atau Ce sebagai nodulan. Kedua unsur tersebut selain akan berfungsi sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida. Karbida dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) dengan temperatur proses lebih kurang 900°C.^[19]

Langkah utama dalam mengontrol terjadinya karbida primer pada BTN adalah memberikan perhatian terhadap waktu inokulasi dan *fading*. Waktu yang dibutuhkan harus cukup selama proses inokulasi sehingga dapat dipastikan inokulan bekerja secara efektif dan mencegah terjadinya *fading*. Sebagai contoh, pengecoran modern sekarang ini telah menggunakan inokulasi *late-stream* atau inokulasi cetakan untuk meniadakan pengaruh *fading*.^[18]



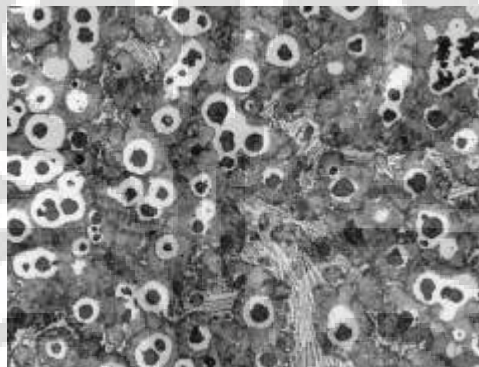
Gambar 2.6 Karbida primer dalam bentuk partikel putih didalam matriks (400x, etsa nital).^[18]



Gambar 2.7 Karbida primer dalam matriks ferrite (400x, etsa nital).^[18]

Pada proses pembuatan BTN, resiko pembentukkan karbida lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi tuang kelabu (FC) karena penggunaan unsur Mg dan atau Ce sebagai nodulan. Kedua unsur tersebut selain akan berfungsi sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida. Kandungan dalam logam cair dapat juga menyebabkan pembentukkan karbida primer seperti

Mn, Cr, V dan Mo.^[18] Dalam BTN, kromium adalah unsur pembentuk karbida primer yang stabil yang tidak mudah dihilangkan dengan perlakuan panas dan inokulasi yang paling sesuai. Hidrogen juga dapat menyebabkan terbentuknya karbida primer. Dalam berbagai hal, karbida primer dapat terjadi di dalam besi yang terakhir membeku sehingga menyebabkan segregasi unsur hidrogen ke cairan selama solidifikasi. Ketika ini terjadi, bentuk karbida khusus dihasilkan, yang dikenal sebagai chill terbalik (*inverse chill*), Gambar 2.8^[18]



Gambar 2.8 Karbida primer chill terbalik di dalam BTN pearlitik (200x, etsa nital).^[18]

Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginan tinggi atau ketebalan benda tipis. Keberhasilan pembuatan komponen dengan dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.^[5] Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistim pengecorannya. Pada karakteristik logam cair komposisi kimia dan temperatur tuang (*pouring temperature*) adalah 2 unsur penting yang harus diperhatikan. Sedangkan pada proses *liquid treatment* yang mempengaruhi adalah peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.^[5]

Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi,^[20] keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya

Universitas Indonesia

carbon equivalent (CE),^[21] kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah flotasi grafit, dan rendahnya jumlah (*nodule count*) dan bentuk nodul (*nodularity*).^[22]

Sedangkan menurut Massone untuk memperoleh TWDI yang harus diperhatikan adalah desain cetakan (*mould*) yang memungkinkan terjadinya *soundness casting* dan kondisi logam cair sebelum tuang sehingga dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen dan bersih dari karbida.^[23]

2.2.5.2 Nilai *Carbone Equivalent* (CE)

Pada penelitian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent* (CE) adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Menurut Loper, nilai CE untuk ketebalan benda tuang (10-30) mm agar bersih dari struktur karbida adalah (4,35 – 4,65)%.^[24] Jika ketebalan ditipiskan maka nilai CE harus dinaikkan. Menurut Rijikov, jika CE mencapai nilai 5,0% maka akan diperoleh struktur mikro bersih dari karbida dengan 40% matriks feritik.^[25] Stefanescu dengan menjaga unsur-unsur lain, seperti Mn, P, S dan Cr, berhasil membuat struktur mikro TWDI yang bersih dari karbida dengan nilai CE yang lebih rendah.^[5] Karsay menyarankan nilai CE sebesar 4,72% untuk memperoleh 100% matriks feritik. Nilai-nilai CE yang direkomendasikan tersebut dibuat berdasarkan bahan baku yang mempunyai kadar mangan (Mn) lebih tinggi dari 0,4% dan kadar fosfor (P) lebih tinggi dari 0,06%.^[26]

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

$$CE = 4,9265 - 0,0425 t \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan t adalah ketebalan benda.^[27]

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

$$CE = \%C + 0,31\%Si \dots\dots\dots(2.3)$$

Universitas Indonesia

Javaid berhasil membuat TWDI bebas karbida dengan ketebalan 3 mm dalam cetakan pasir dengan nilai CE (4,5 – 5,08)%.^[6] Labreque dengan menggunakan inokulan yang mengandung Bi dan Ce berhasil membuat TWDI 3 mm dengan nilai CE (4,6 – 4,9)%.^[29] Sedangkan Dogan membuat plat berketebalan (1,5 – 9) mm dengan menggunakan nilai CE (4,7 – 4,8)%.^[30] Setelah dilakukan suatu *literature review* maka direkomendasikan menggunakan nilai CE (4,45 – 4,9)% untuk membuat TWDI dengan ketebalan di bawah 5 mm dengan menggunakan cetakan pasir.

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

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \dots\dots\dots(2.4)$$

TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.^[3] Selain persyaratan nilai CE, kadar Si dan kadar unsur-unsur paduan seperti Mo dan Ni juga harus dijaga. Untuk kadar Si disarankan oleh Mourad (2,4 – 2,7)% untuk ketebalan (3-10) mm.^[16]

2.2.5.3 Perhitungan Nodularitas, Jumlah Nodul dan diameter nodul rata-rata

Bentuk grafit dalam besi tuang nodular, pada awalnya, ditentukan oleh nodularitas dan jumlah nodulnya. Nodularitas didefinisikan sebagai kebulatan dari grafit. Dianggap sebagai nodul bila bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2 kali diameternya.^[31] Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan dengan pembesaran mikroskop 100x.^[31]

Perhitungan jumlah nodul dapat dilakukan dengan membandingkan foto mikro struktur non-etsa dengan *Microstructure Rating Chart 1993* yang dikeluarkan oleh *American Foundry Society - AFS* dan *Graphite Rating in Ductile Iron Chart 1999* yang dikeluarkan oleh *Ductile Iron Society – DIS*.

Nodularitas dapat ditentukan dengan melihat pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap jenis grafit yang ada dan dilaporkan dalam bentuk prosentase.

Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 seperti terlihat pada Rumus 2.5 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \dots\dots(2.5)$$

dengan $n_1, n_2, n_3, n_4,$ dan n_5 adalah jenis grafit yang tercantum pada diagram klasifikasi bentuk dari grafit. Tetapi pada tahun 2001, perhitungan ini diubah menjadi hanya memperhitungkan tipe V dan tipe VI saja terhadap keseluruhan jumlah grafit yang ada dengan memperhatikan diameter dari nodul grafit. Kemudian dengan bantuan *image analysis* perhitungan nodularitas dikembangkan menjadi Rumus 2.6 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{A_{Acc.}}{A_{Acc.} + A_{Un.Acc}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan : AAcc. : Area dari partikel yang memenuhi syarat untuk dihitung
 AUn.Acc : Area dari partikel yang tidak memenuhi syarat untuk dihitung

Perhitungan jumlah nodul dilakukan setelah ditentukan S, C, dan diameter minimal nodul yang akan dihitung. Diameter minimal nodul yang akan dihitung yang biasa digunakan adalah 5 μm .

Nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul mempengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan. Kekuatan tarik meningkat seiring dengan peningkatan nodularitas dan jumlah nodul. Sedangkan kekerasan meningkat ketika nilai nodularitas dan jumlah nodul menurun.^[1]

2.3 BESI NODULAR AUSTEMPER (AUSTEMPERED DUCTILE IRON)

Austempered ductile iron (ADI) merupakan salah satu jenis besi tuang nodular yang diperlakukan panas (*austempering*) sehingga meningkatkan kekuatan fatik. Proses ini membutuhkan 2 tahap, yaitu austenisasi dan *quenching*. Austenisasi membutuhkan pemanasan dan penahanan temperatur sampai sekitar 900°C (1650°F). Sedangkan *quenching* melibatkan proses pendinginan cepat dan

penahanan temperatur austemper secara isothermal, yang biasanya dilakukan di dalam *salt bath*.^[10] Pemanasan di atas temperatur kritis dapat mengurangi kadar karbon dari struktur mikro hasil *quenching* dan *tempering* sehingga menghasilkan kekuatan tarik serta ketahanan aus yang rendah dari pada hasil cor dengan kekerasan yang sama. ADI memiliki matrik yang merupakan kombinasi dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit yang stabil.

Syarat yang harus dimiliki besi tuang nodular agar dapat dijadikan ADI adalah nodularitas > 90%, jumlah nodul > 1000/mm², matrik ferrit/perlit dengan perbandingan yang konsisten, minimal level karbida, minimal level inklusi dan tidak ada segregasi. Untuk penggunaan langsung maka harus bersih dari karbida.

Penahanan temperatur pada 705°C (1300°F) selama tidak lebih dari 4 jam meningkatkan ketahanan patah (*fracture resistance*). Pemanasan di atas temperatur kritis dapat mengurangi kadar karbon dari struktur mikro hasil *quenching* dan *tempering* sehingga menghasilkan kekuatan tarik serta ketahanan aus yang rendah dari pada hasil cor dengan kekerasan yang sama.

Table 2.3 Standard ASTM A 897-90 and A 897M-90, persyaratan sifat mekanis dari ADI^[10]

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

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

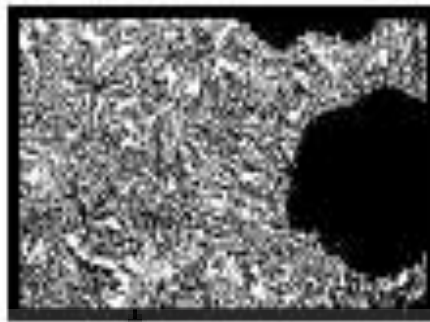
2.3.1 Sifat mekanis ADI

Menurut Harding, Penelitian tentang ADI sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersil dalam skala kecil pada tahun 1970-an. ADI menawarkan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara

biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, mampu permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik.^[2] Selain itu, permintaan ADI yang tinggi di dalam bidang otomotif dan juga di sektor lain disebabkan karena ADI mempunyai sifat mekanis yang unggul jika dibandingkan dengan besi tuang lainnya dan secara ekonomis cukup kompetitif terhadap baja dan aluminium.^[32]

Dalam suatu *reviewed article*, Spada mengatakan, ADI ideal untuk aplikasi-aplikasi industri yang membutuhkan kekuatan tinggi dengan ketahanan aus yang rendah. Menurut Keough, konsumsi energi yang digunakan untuk memproduksi 1 ton ADI adalah 3100 kWh, sedangkan untuk memproduksi baja tempa adalah (5800 – 6200) kWh.^[2] ADI dapat diproduksi dengan biaya 20% lebih rendah dari baja tempa dan hampir setengah dari biaya produksi aluminium.^[33] Meningkatkan penggunaan ADI dapat dikaitkan dengan terjadinya peningkatan permintaan akan besi tuang nodular (BTN) di USA^[34] dan investasi sebesar 1 juta Euro oleh Elkem pada modernisasi pabrik *ferro alloys*, terutama Mg-FeSi, di Islandia.

Peningkatan sifat-sifat, terutama sifat mekanis, yang terjadi pada ADI disebabkan adanya perubahan pada struktur mikronya.^[35] Sifat dari ADI dikarenakan struktur matrik yang unik dari bainit (*acicular ferritic*) dan austenit penstabil karbon, yang disebut *ausferit*. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki oleh ADI disebut sebagai bainit. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja. Tetapi, dari hasil-hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan oleh proses *austempering* baja, kemudian berdasarkan ASTM A644-92 disebut sebagai *ausferrite*.^[35] Proses *austempering* telah dikembangkan sejak 1930-an pada besi cor dan *wrought steel*. Proses *austempering* pertama kali dilakukan secara komersil terhadap besi tuang nodular pada tahun 1972 dan pada 1998 produksi seluruh dunia mencapai 100.000 ton per tahun.



Gambar 2.9 Struktur mikro ADI.^[36]

Menurut Harding, pada awalnya ADI diaplikasikan untuk bidang otomotif dengan adanya pengumuman dari Mazda. Tetapi dengan melihat pada kelebihan-kelebihan yang dimilikinya, maka penggunaan ADI sebagai bahan komponen tidak lagi hanya untuk bidang otomotif, tetapi juga untuk bidang-bidang lain seperti: konstruksi, pertambangan, perkeretaapian, pertanian, dan pertahanan.^[2] Karena sifat *light-weight* sebagai bahan komponen, antara lain: blok mesin, poros engkol, stang piston, dan roda gigi, pada *hybrid car*. Pada tahun 2002, Martinez dan kawan-kawan, berhasil membuat stang piston atau *connecting road* ADI dengan ketebalan cor 3 mm, Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Stang piston ADI-TWC.^[3]

2.3.2 Penelitian Terkini Pengecoran Dinding Tipis ADI (TW-ADI)

Sampai saat ini, belum ada standar baku ketebalan benda yang dikategorikan dalam pengecoran dinding tipis (*thin wall casting*). Caldera mendefinisikan ketebalan dinding dalam pengecoran dinding tipis sebagai maksimal 5 mm.^[11] Martinez mendefinisikannya sebagai kurang dari dan sama dengan 4 mm.^[3] Sedangkan Stefanescu mendefinisikan sebagai ketebalan yang lebih kecil dan sama dengan 3 mm.^[5]

Ketebalan minimal terakhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis adalah 1,4 mm oleh kelompok Stefanescu.^[4] Sedangkan ketebalan akhir yang berhasil dicapai untuk membuat FCD dinding tipis sebagai bahan baku ADI adalah 2 mm yang dicapai oleh kelompok Mourad^[16] dalam bentuk benda uji dan 3 mm yang dicapai oleh kelompok Martinez dalam bentuk komponen *hollow connecting rod* dari desain inovatif mesin 2 silinder.^[3]

Keberhasilan pembuatan komponen dinding tipis ditentukan dengan terbentuknya sebuah benda cor dinding tipis yang memiliki struktur mikro bersih dari karbida.^[5] Struktur mikro karbida adalah struktur yang secara alami akan terbentuk pada benda cor yang kecepatan pendinginan tinggi atau tipis. Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistem pengecorannya. Pada karakteristik logam cair, komposisi kimia dan temperatur tuang, *pouring temperature*, adalah 2 unsur penting yang harus diperhatikan. Sedangkan pada proses *liquid treatment* yang mempengaruhi peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.^[5]

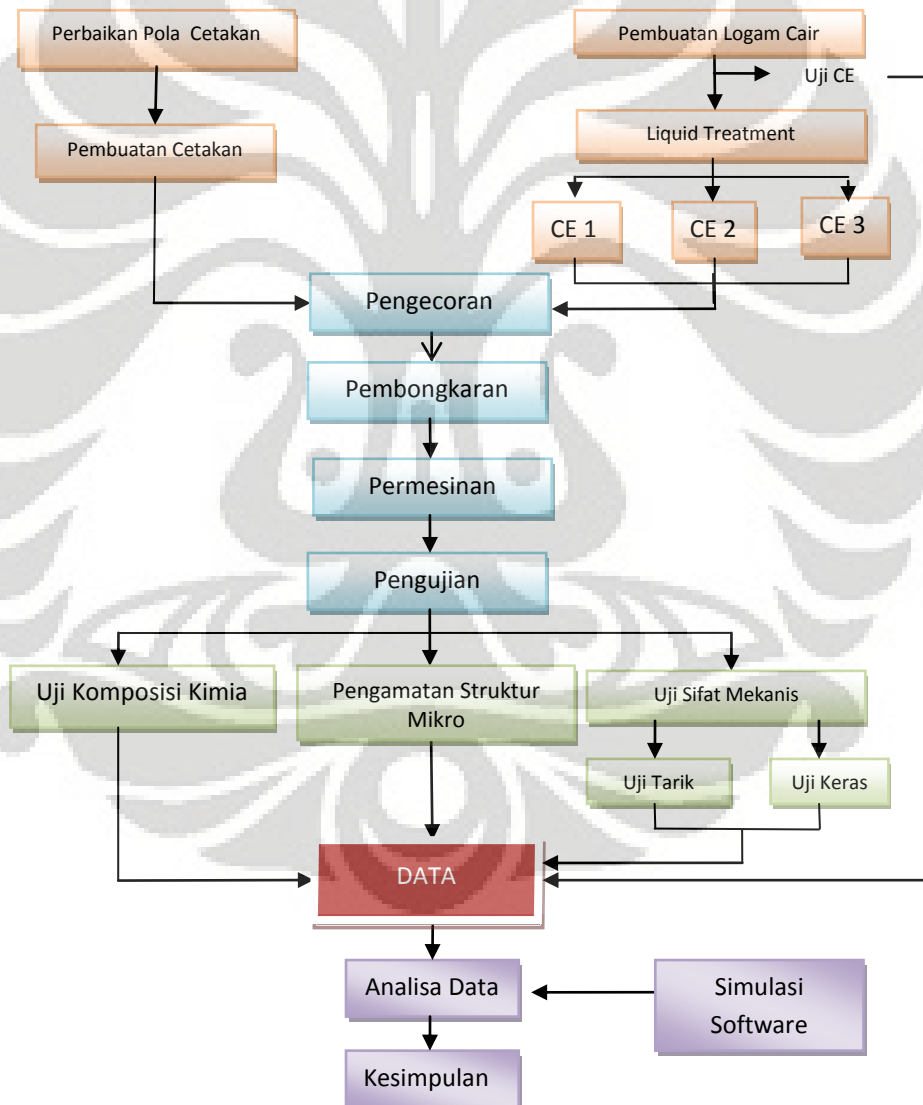
Menurut Ruxanda, parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi, keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE), kadar karbon dan mangan yang tidak lebih dari 4,65% untuk mencegah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

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

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

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



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Penelitian

3.2 ALAT DAN BAHAN

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

3.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

1. Alat Pembuatan Pola

Alat yang digunakan untuk pembuatan pola antara lain: mesin gergaji, mesin bubut kayu, mesin bor, penggaris, jangka sorong, amplas, martil dan pensil.

2. Alat Pembuatan Cetakan

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan meliputi :

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

3. Alat Pembuatan Logam Cair

Alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair meliputi :

- a. Dapur Induksi (*Induction furnace*)
- b. CE meter
- c. Spektrometer
- d. Termokopel

4. Alat Pengecoran

Alat yang digunakan untuk pengecoran meliputi :

- a. Panci Tuang (*Ladel*)
- b. Termokopel
- c. Mesin pengangkut

5. Alat Pembongkaran

Alat yang digunakan untuk melakukan pembongkaran itu hanya berupa alat pengangkut untuk mengangkat benda hasil coran dari *flask* sehingga *flask* terbagi menjadi dua bagian dan selanjutnya dibersihkan. Dan untuk membersihkan produk cor dari pasir-pasir yang melekat, digunakan

mesin *shootblasting*, yaitu ditembakkan dengan bola-bola baja kecil pada ruang tertutup.

6. Alat Permesinan

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

7. Alat Pengujian

Alat yang digunakan dalam pengujian antara lain:

- a. Spektrometer
- b. *Microskop optic digital*
- c. *Macrohardness tester*
- d. *Tensile strength machine*

3.2.2 Bahan Baku

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

1. Bahan Baku Logam Cair

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

2. Bahan Baku Cetakan

Bahan baku yang digunakan untuk membuat cetakan terdiri dari :

- a. Pasir silika
- b. Asam furan
- c. Serbuk arang

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

a. *Coating*

Coating adalah proses pelapisan permukaan cetakan dengan menggunakan isomol.

b. Isomol

Isomol adalah gabungan antara cat dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan

cetakan yang baik. Tepat setelah dilakukan pemolesan, campuran ini langsung dibakar dengan api untuk menguapkan kandungan alkohol.

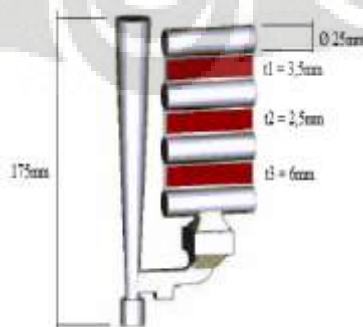
3.3 PROSEDUR PENELITIAN

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

3.3.1 Perbaikan Pola

Pada penelitian ini dilakukan perbaikan pola berupa perbaikan *base plate*. Pola desain yang digunakan masih menggunakan pola desain pada penelitian sebelumnya. Pembuatan pola desain cetakan merupakan modifikasi dari desain sebelumnya yang telah dikembangkan oleh Stefanescu pada tahun 2002, Gambar 3.2. Desain pengecoran Stefanescu merupakan desain pengecoran vertikal dengan *ingate* terletak di bawah (*bottom ingate*), yang terdiri dari 3 plat tipis ukuran 100x25 mm dengan ketebalan (dari bawah ke atas) masing-masing 6 mm, 2,5 mm dan 3,5 mm, dan 4 buah *riser* yang disusun di samping setiap plat (*risered plates*). Besar diameter *riser* adalah 25 mm dan tinggi dari saluran tuang adalah 175 mm.

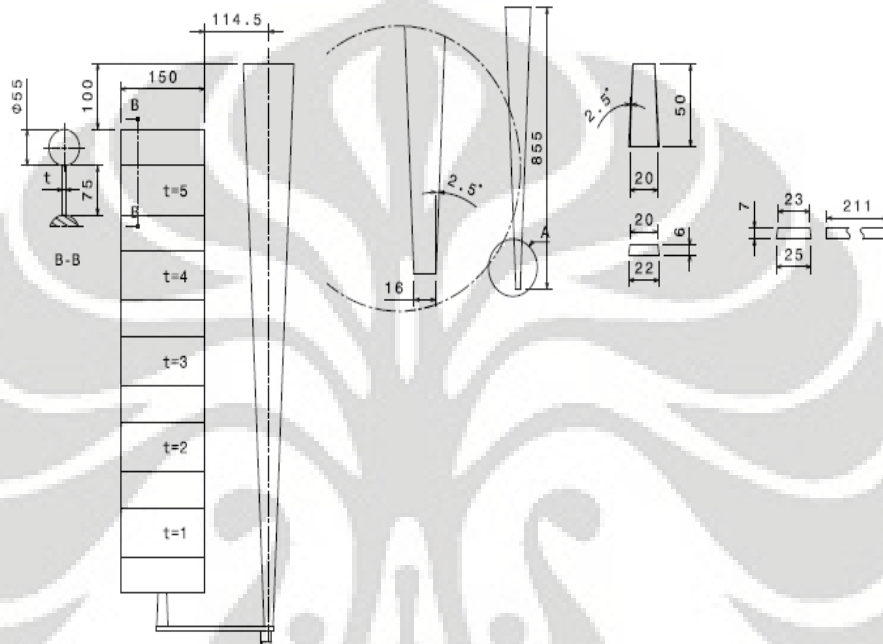
Dengan disusun demikian maka Stefanescu memperlambat kecepatan pendinginan pada plat 2,5 mm. Perlambatan tersebut dilakukan dengan cara memperlambat kecepatan pengisian dengan memperbesar luas permukaan aliran masuk, lalu mempercepat pendinginan pada plat 3,5 mm dengan mempercepat kecepatan pengisian. Kecepatan pengisian dilakukan dengan memperkecil luas permukaan aliran masuk untuk debit yang sama. Kekurangan dari desain ini adalah kemungkinan kecepatan alir yang terlalu tinggi sehingga terbentuk karbida dan kemungkinan terhambatnya aliran.



Gambar 3.2 Desain pengecoran Stefanescu^[5]

Modifikasi desain untuk penelitian ini terlihat pada Gambar 3.3 meliputi:

- Dimensi plat tipis berukuran (150x75) mm dengan ketebalan berurutan dari bawah ke atas adalah 1–5 mm.
- Jumlah plat tipis sebanyak 5 buah.
- Tinggi sprue 855 mm
- Posisi ketebalan terkecil (1 mm) paling dekat dengan *ingate*.

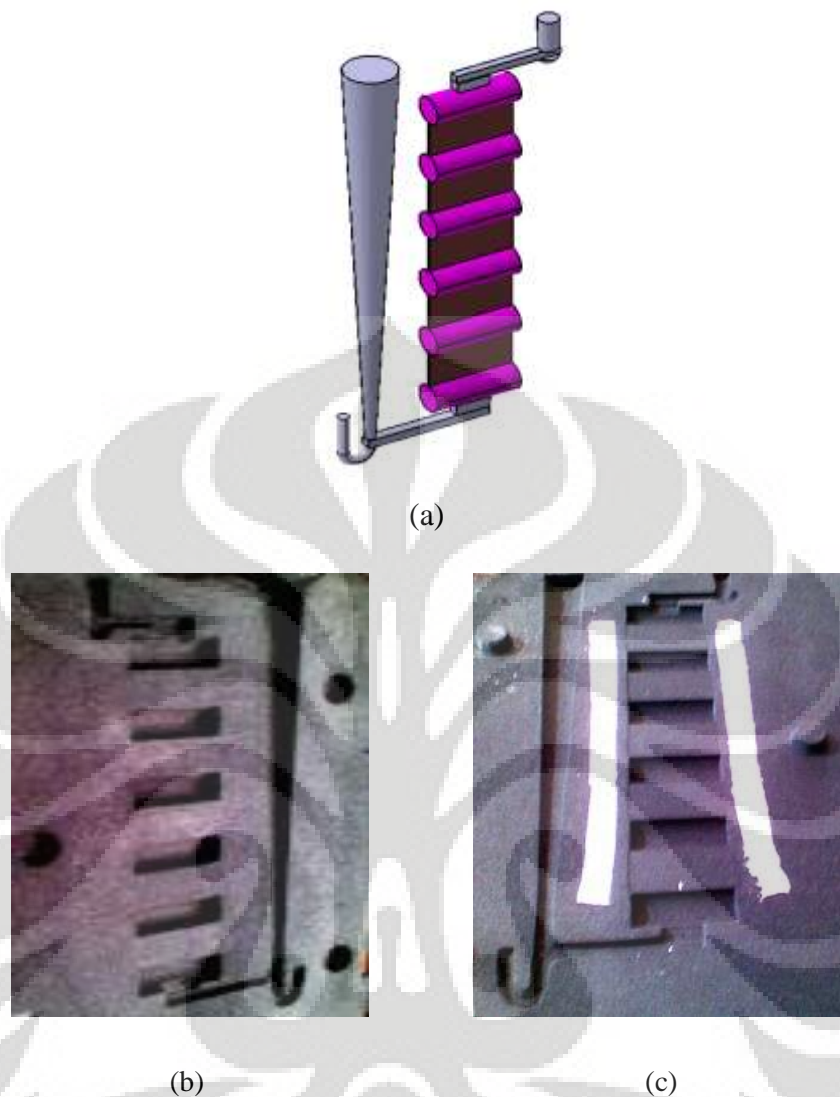


Gambar 3.3 Desain pengecoran untuk penelitian

3.3.2 Pembuatan Pola

Setelah pembuatan desain selesai maka dilanjutkan dengan pembuatan pola. Pola dibuat dengan menggunakan bahan kayu yang terdiri dari 3 kelompok, yaitu: kelompok benda, kelompok *riser*, dan kelompok saluran tuang.

Kelompok benda terdiri dari 5 plat dengan ukuran 150 x 75 mm dengan ketebalan 1, 2, 3, 4, dan 5 mm, kelompok *riser* terdiri dari 6 buah silinder dan kelompok sistem saluran tuang terdiri dari 1 *sprue*, 1 *runner*, dan 1 *ingate*. Setelah itu, pola dipasang pada *base plate*, lihat Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Pola cetakan untuk pengecoran (a) pola cetakan sebelum dibentuk *pattern plate*; (b) pola cetakan pada *base plate* disisi kiri; (c) pola cetakan pada sisi kanan.

3.3.3 Pembuatan Cetakan

Pembuatan cetakan dilakukan dengan menggunakan teknologi pasir furan (*furan sand*). Pembuatan cetakan ini diperlukan *flask* yang diletakkan di atas *pattern plate*. Tipe *flask* yang digunakan adalah tipe Excel. Tipe Excel digunakan karena tipe ini adalah satu-satunya tipe *flask* yang dimiliki oleh PT. X yang dapat digunakan untuk pengecoran vertikal. Karena keterbatasan *flask* jenis Excel, maka cetakan dibuat sesuai dengan jumlah 1 set setiap hari. Semua pola di tempelkan pada *base plate* yang berukuran sebesar *flask* yang akan digunakan untuk

membuat cetakan. *Base plate* yang telah dipasang pola disebut *pattern plate* seperti terlihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Salah satu sisi *Pattern plate*

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



Gambar 3.6 Proses *merger* dari pasangan cetakan

Sebelum dilakukan pengecoran, cetakan pasir dari kedua sisi *flask* dilakukan *merger*, Gambar 3.6. Proses ini membutuhkan ketelitian yang tinggi agar posisi rongga cetakan sesuai bentuk benda sehingga tidak terjadi rongga pada cetakan dengan menggabungkan dowel yang telah dibuat antara sisi positif dan

Universitas Indonesia

negatifnya. Selain itu ditambahkan juga perekat agar kedua sisi *flask* tidak mengalami kebocoran.

3.3.4 Pembuatan Logam Cair dan Liquid Treatment

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

3.3.4.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)

Tahap ini terdiri dari:

a) Tahap *charging*

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

b) Tahap *melting*

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

c) Tahap *refining*

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

d) Tahap *tapping*.

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

3.3.4.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

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

Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam *ladle* pada temperatur 1480°C , sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam ladle di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara langsung dengan logam cair. Selain itu, dengan cara seperti ini jumlah logam Mg yang bereaksi lebih efektif. Proses ini berlangsung sekitar 10-15 menit. Pada proses ini, inokulan yang digunakan adalah Fe-Si sedangkan nodulan yang digunakan Fe-Si-Mg.

3.3.5 Pengecoran

Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari *ladle* ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Pengontrolan temperatur selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dilakukan penuangan ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan *thermocouple*. Temperatur tuang dijaga sekitar 1393°C sampai 1450°C . Pada sampel pertama (P1T1) temperatur penuangan adalah 1393°C dengan waktu *pouring* 11 detik. Pada sampel kedua (P5-D) dilakukan penuangan dengan temperature 1298°C dengan waktu *pouring* 10 detik. Sedangkan untuk sampel ketiga (P6-A) temperatur penuangannya adalah 1385°C dengan waktu *pouring* 9 detik. Waktu penuangan diukur dengan

menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi oleh logam cair, lamanya antara 8 sampai 15 detik.

Setelah proses pengecoran selesai, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Pembongkaran dilakukan setelah benda cor mendingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Proses pembongkaran cetakan dilakukan hanya dengan membuka *flask* menjadi dua bagian setelah itu benda coran diangkat dengan menggunakan sebuah alat pengangkut yang selanjutnya akan dibersihkan dengan menggunakan alat *shootblasting* untuk menghilangkan pasir-pasir yang melekat kuat pada benda coran dengan mekanisme penumbukan oleh bola-bola baja kecil. *Machining* dilakukan hanya untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip (*Spin*).

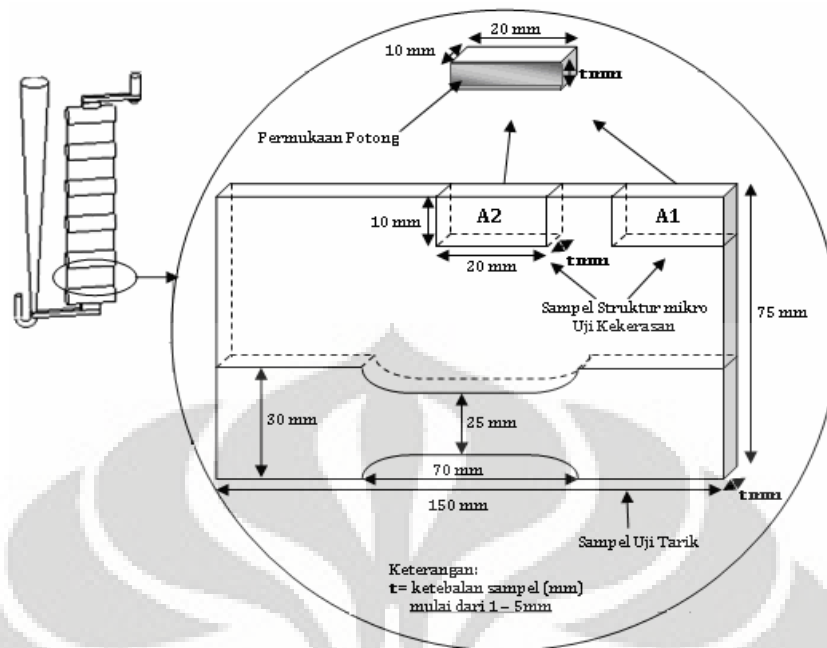
3.3.6 Preparasi Sampel

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

a) Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

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

- Pemotongan (*Cutting*) dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses *cutting* agar dapat mengurangi tingkat deformasi pada permukaan sampel, lihat Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pengambilan sampel uji dari plat

- *Mounting* bertujuan untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media, lihat Gambar 3.8. Terlebih dahulu sampel dimasukkan ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan selama kurang lebih 10 menit. Setelah itu didinginkan selama kurang lebih 6 menit dengan media air.



Gambar 3.8 Sampel hasil *Mounting*

- Pengamplasan (*Grinding*) bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel pada saat pemotongan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas berturut-turut dengan nomor grid #80, #180, #360, #500, #800, #1000 dan #1200. Pada saat pengamplasan, pemberian air dilakukan untuk menghindarkan efek pemanasan terhadap struktur mikro dan mengalirkan geram logam yang terkikis. Selain itu, perubahan arah pengamplasan penting dilakukan agar permukaan sampel benar-benar halus dan merata.
- Pemolesan (*Polishing*) bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkilap seperti cermin serta menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde $0.01 \mu\text{m}$ dengan menggunakan *diamond paste* dengan ukuran berturut-turut 6, 3, 1, dan $\frac{1}{4}$ mikron. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata agar cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan kembali secara fokus.
- Etsa (*Etching*) merupakan suatu proses pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak sehingga detail struktur yang akan diamati dapat terlihat dengan jelas dan tajam. Sampel dicelupkan kedalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan.

b) Preparasi Uji Kekerasan

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

c) Preparasi Uji Tarik

Preparasi uji tarik dilakukan dengan memotong pada bagian sisi yang bersebrangan dengan sisi yang digunakan untuk pengambilan sampel pengamatan struktur mikro dan uji kekerasan. Pemotongan dilakukan dengan arah memanjang dengan lebar 30 mm. Sampel hasil pemotongan

dibentuk sesuai standar JIS Z 2201 dengan menggunakan *milling machine*. Cara pengambilan sampel uji tarik seperti terlihat pada Gambar 3.7.

3.3.7 Pengujian

Pengujian yang dilakukan meliputi Uji komposisi kimia, simulasi software *Z-Cast*, pengamatan struktur mikro, uji kekerasan dan uji tarik.

3.3.7.1 Uji Komposisi Kimia

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

3.3.7.2 Simulasi Software *Z-Cast*

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

3.3.7.3 Pengamatan Struktur Mikro

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

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



Gambar 3.9 Mikroskop optik digital

Selain melakukan pengamatan juga dilakukan perhitungan jumlah nodul dengan diameter minimal nodul yang akan dihitung yaitu 5 μm dan perhitungan nodularitas dengan software NIS berdasarkan perhitungan *image analysis*.

3.3.7.4 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dibawah *macrohardness tester* dengan metode brinell, Gambar 3.10. Metode brinell ini menggunakan indentor bola baja yang berdiameter 3,2 mm dengan bentuk penjejakan berbentuk lingkaran yang akan diukur diameter jejaknya menggunakan mikroskop optik seperti terlihat pada Gambar 3.12. Pada saat penjejakan, beban yang digunakan sebesar 187,5 kg, lamanya penjejakan selama $\pm 15 - 20$ detik, dan temperatur berkisar 27 $^{\circ}\text{C}$. Standard pengujian kekerasan yang digunakan adalah ASTM E 10.



Gambar 3.10 *Macrohardness tester* Brinell

Penjejakan dilakukan pada seluruh bagian plat yang mewakili nilai keras dari seluruh bagian plat yang diuji. Penjejakan dilakukan sebanyak 7x dengan arah dan posisi yang berbeda-beda untuk mendapatkan nilai keras di semua daerah plat. Pada ketebalan 1 mm sampai 5 mm berturut-turut 1,2, 3, 4, 5, 6, dan 7 titik. Hal ini dilakukan untuk menghasilkan data kekerasan yang representatif.



Gambar 3.11 Pengukuran jejak brinell dengan mikroskop optik

Metode perhitungan nilai diameter pada metode brinell seperti rumus 3.1, yaitu:

$$d = \frac{x + y}{2} \dots\dots\dots (3.1)$$

Hasil perhitungan kemudian dimasukkan kedalam rumus perhitungan brinell untuk menghitung nilai kekerasan dari sampel.

3.3.7.5 Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah pengujian yang bertujuan untuk mengevaluasi sifat-sifat mekanis suatu material yang akan digunakan dalam desain dan untuk memprediksi performa material dibawah pembebanan. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Shimadzu Servopulser*. Prinsip pengujian tarik ini yaitu pemberian tegangan satu arah (*uniaksial*) berupa tarikan pada kedua ujungnya dengan beban kontinyu hingga putus. Hasil pengujian berupa perubahan panjang dan beban ditampilkan pada grafik tegangan vs regangan untuk melihat sifat mekanisnya. Beban yang digunakan sebesar 20 ton (200 KN) kemudian ditarik sampai putus. Standard yang digunakan untuk melakukan pengujian tarik ini adalah JIS Z 2241, *Method of Tension Test for Metallic Materials*.



Gambar 3.12 *Tensile strength machine*



BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 KOMPOSISI KIMIA

Komposisi kimia logam cair setelah dilakukan penambahan terlihat pada Tabel 4.2. Dimana Kadar C memiliki kadar yang berbeda-beda dari ketiga sampel tetapi masih dalam batas optimumnya, sedangkan kadar P berada pada batas bawah kadar optimum. Sementara elemen-elemen lain masih berada pada kadar optimumnya.

4.1.1 Persentase Elemen pada Logam Cair

Tabel 4.1 Komposisi kimia logam cair FCD 450 standar pabrik^[37]

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

Tabel 4.2 Komposisi kimia logam cair dari ketiga sampel

| Penuangan ke- | No. Heat | %C | %Si | %Mn | %P | %S | %Cu | %Cr | %Ni | %Mg |
|---------------|----------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| P1T1 | 2411808B | 3,84 | 2,595 | 0,37 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,04 |
| P5-D | 2808904B | 3,82 | 2,764 | 0,36 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,07 |
| P6-A | 0109904B | 3,51 | 2,137 | 0,34 | 0,02 | 0,02 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,02 |

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada Tabel 4.2, kadar dari kelima sampel dibandingkan dengan komposisi kimia logam cair FCD 450 standard pabrik pada Tabel 4.1. Dimana kadar ketiga unsur penting yaitu karbon (C), silikon (Si), fosfor (P), mangan (Mn) dan sulfur (S), dari ketiga sampel yang diuji hampir semua unsur penting masuk kedalam standar kadar unsur yang disyaratkan oleh pabrik. Hanya untuk kadar fosfor yang memiliki nilai lebih kecil dari standar yang diberikan. Nilai kadar karbon lebih dari 3.9% dalam logam cair dapat mengakibatkan *flotasi grafit* dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi sehingga menyebabkan ketidakkokohan cetakan.

4.1.2 Carbon Equivalent (CE)

Nilai CE yang diperoleh dari Tabel 4.3 itu ada tiga jenis berdasarkan penggunaan rumus perhitungan CE yang berbeda. Pada nilai CE-A dan CE-B itu tidak terdapat perbedaan yang signifikan dari kedua nilai tersebut. Nilai CE-A pada sampel P1T1 sebesar 4,64% dan nilai P5-D sebesar 4,67% sedangkan nilai P6-A sebesar 4,17%. Pada sampel P1 dan P5 nilai CE tersebut masuk dalam jangkauan yang dianjurkan, yaitu (4,35 - 4,68)%, untuk mencegah terbentuknya struktur karbida.^[24] Sedangkan pada sampel P6 nilai CE diluar jangkauan yang dianjurkan, dan kolom terakhir nilai CE yang didapat digunakan untuk mengetahui fluiditas dari logam cair.

Tabel 4.3 Kadar CE logam cair

| Sampel | Nilai CE-A | Nilai CE-B | Nilai CE-untuk fluiditas |
|--------------|---|------------|--------------------------|
| P1/CE1 | 4,64 | 4,62 | 4,50 |
| P5/CE2 | 4,67 | 4,65 | 4,52 |
| P6/CE3 | 4,17 | 4,16 | 4,06 |
| Keterangan: | | | |
| CE-A | $\%C + 0.31 \%Si$ | | |
| CE-B | $\%C + 0.31 \%Si + 0.33 \%P - 0.027 \%Mn + 0.4 \%S$ | | |
| CE-fluiditas | $\%C + 0.25 \%Si + 0.5 \%P$ | | |

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada Tabel 4.1, kadar unsur-unsur penting yang mempengaruhi nilai CE yaitu karbon (C), silikon (Si), fosfor (P), mangan (Mn) dan sulfur (S). Unsur-unsur diatas adalah elemen penting yang akan mempengaruhi perhitungan CE baik untuk mengetahui nilai CE itu sendiri juga untuk menentukan nilai fluiditas berdasarkan grafik dan unsur-unsur lain yang jumlahnya sangat kecil akan mempengaruhi terhadap pembentukan sifat dan struktur mikro pada plat tipis.

Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4,3%,^[21] dan juga mengusulkan nilai

CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5) mm.^[28] Nilai CE tersebut dihitung berdasarkan Persamaan 2.3. Oleh karena itu, nilai CE yang dimiliki oleh logam cair pada saat pengecoran sebagai berikut:

- Untuk sampel P1T1/CE1, nilai CE adalah:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,31\%Si \\ &= 3,84\% + 0,31(2,595\%) \\ &= 4,64\% \end{aligned}$$

- Untuk sampel P5-D/CE2, nilai CE adalah:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,31\%Si \\ &= 3,82\% + 0,31(2,764\%) \\ &= 4,67\% \end{aligned}$$

- Untuk sampel P1-A/CE3, nilai CE adalah:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,31\%Si \\ &= 3,51\% + 0,31(2,137\%) \\ &= 4,17\% \end{aligned}$$

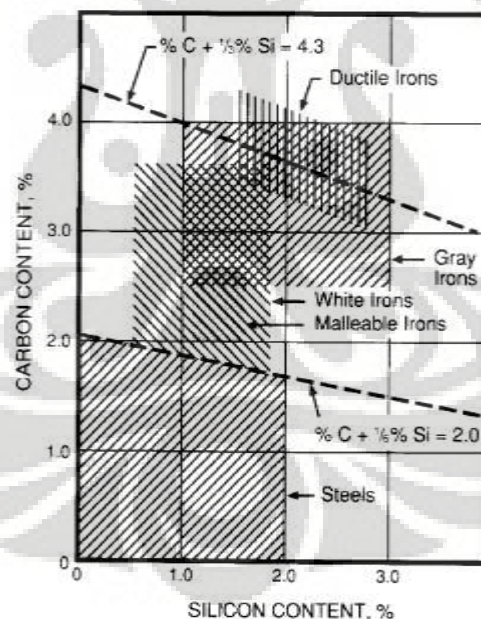
Karena pengaruhnya terhadap pembentukan grafit maka Mn, P dan S kemudian juga ditambahkan pada perhitungan CE, sehingga rumusnya akan mengikuti Persamaan 2.4.

Oleh karena itu, nilai CE yang dimiliki oleh logam cair pada saat pengecoran akan mengalami perbedaan tapi tidak secara signifikan seperti terlihat pada Tabel 4.3 yaitu pada sampel P1T1 nilai CE-nya sebesar 4,62% dan pada sampel P5-D dan P6-A secara berturut-turut adalah 4,65% dan 4,16%. Yang mana nilai-nilai tersebut tidak mengalami perubahan yang jauh berbeda bila menggunakan Persamaan 2.3, dimana unsur yang sangat dominan dalam mempengaruhi nilai CE adalah carbon (C), silikon (Si) dan posfor (P) tidak mengalami perubahan. Sedangkan, perhitungan nilai CE untuk fluiditas dari ketiga sampel berturut-turut adalah 4,50%, 4,52% dan 4,06% dimana perhitungan tersebut dihitung berdasarkan Persamaan berikut:

$$\text{CE untuk fluiditas} = \%C + 0.25 \%Si + 0.5 \%P \dots\dots\dots(4.1)$$

Nilai CE pada sampel P1T1 dan P5-D lebih dari 4,6% baik menggunakan rumus (2.3) maupun rumus (2.4) dimana nilai tersebut memenuhi persyaratan CE minimum oleh Loper untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida yang nilai CE minimum adalah 4,3%.^[21] Sedangkan pada sampel P6-A tidak memenuhi persyaratan minimum loper karena nilainya kurang dari 4,3%. Akan tetapi, nilai yang didapat pada sampel P1T1 dan P5-D ini tidak cukup untuk memenuhi persyaratan struktur bebas dari karbida pada ketebalan 3 – 5 mm untuk TWDI (4,75 – 4,92%).^[23] Karena nilai CE yang dimiliki masih sedikit berbeda dari nilai CE minimum yang dianjurkan. Hal ini dibuktikan masih adanya struktur karbida pada hasil pengecoran dari ketiga sampel tersebut.

Disisi lain, nilai CE yang lebih besar dari 4,6% memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk pengecoran dinding tipis berdasarkan Stefanescu ($CE > 4,3\%$).^[5] Nilai CE yang sesuai dengan rencana penelitian ini diharapkan mampu mencegah terbentuknya struktur karbida. Dibawah ini adalah grafik perbandingan nilai CE antar beberapa jenis besi tuang lainnya dan sampel lain seperti baja.



Gambar 4.1 Nilai CE untuk beberapa jenis material^[8]

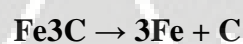
Selain itu, perhitungan nilai CE yang dibutuhkan untuk setiap ketebalan berdasarkan rekomendasi QIT^[27] adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4 Perhitungan nilai CE menurut rekomendasi QIT^[27]

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

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

Data komposisi kimia pada Tabel 4.1 di atas juga menunjukkan bahwa sebagian besar unsur pepadu berada pada standar yang ditetapkan kecuali Si. Kelebihan unsur silikon (Si) disebabkan pengaruh proses inoculasi yang dilakukan terhadap logam cair untuk memicu pertumbuhan grafit, sehingga grafit yang terbentuk semakin banyak. Seperti pada reaksi pembentukan grafit bebas berikut ini.



Adanya penambahan unsur Si menyebabkan pembentukan cementit (Fe_3C) menjadi lebih sulit sehingga mengijinkan unsur karbon (C) membentuk grafit bebas. Hal ini berfungsi untuk menyediakan grafit yang cukup dalam besi tuang nodular dan mencegah terbentuknya struktur karbida yang merugikan. Dan sebaliknya, jika nilai silikon (Si) yang dihasilkan lebih rendah dari pada standar yang digunakan, maka akan mudah sekali terbentuk struktur karbida. Hal ini juga ditunjukkan dengan nilai CE yang akan menjadi lebih rendah. Dari kandungan unsur paduan di atas dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu:

- 1) Elemen pembentuk ferrit, yaitu: Si, P, Mo dan Cr.
- 2) Elemen pembentuk perlit, yaitu : Ni, Mn dan Cu

Universitas Indonesia

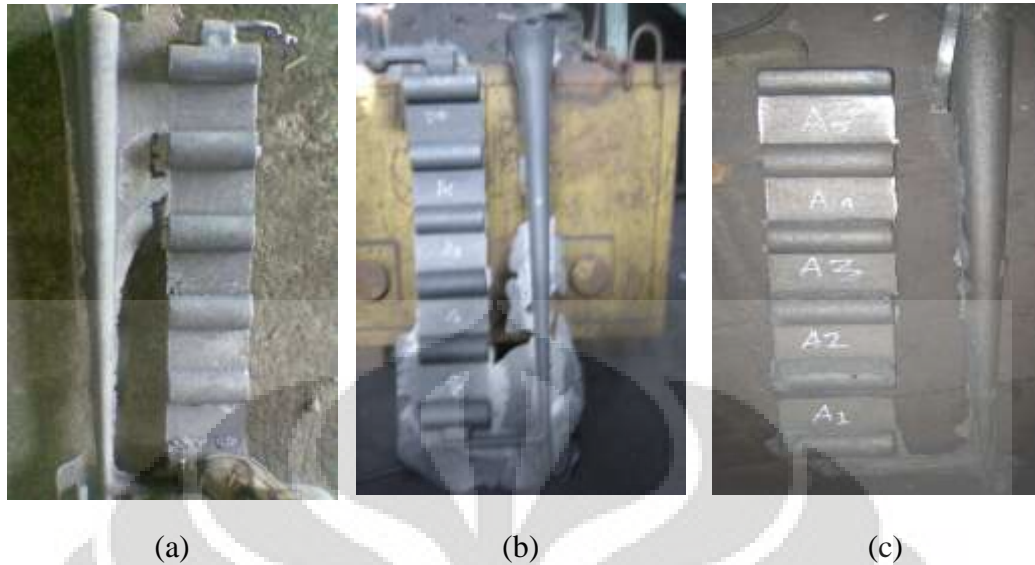
3) Elemen pembentuk karbida, yaitu: Cr dan Mn.

Kadar magnesium dalam paduan sebesar 0.04%. Hal ini penting untuk dijaga antara 0,04 – 0,06% agar memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk menghasilkan bulatan-bulatan grafit. Dengan kandungan sulfur (S) yang sesuai standar, pembentukan bulatan grafit berlangsung dengan baik karena masih dalam jangkauan 0,02% – max. Namun, jika kandungan unsur sulfur (S) berada di bawah 0,015% maka kandungan magnesium antara 0,035 – 0,04% dapat memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk membentuk bulatan grafit.

4.2 PENGAMATAN VISUAL

Hasil pengecoran, Gambar 4.2, menunjukkan cetakan terisi sempurna walaupun terjadi perubahan dimensi ketebalan plat. Pada penuangan pertama (P1) terjadi perubahan dimensi, terutama terjadi pada plat 1 mm dan 2 mm, karena cetakan tidak kuat menahan tekanan logam cair saat melewati bagian tipis. Cacat sirip (*spin*) sepanjang *sprue* bagian atas disebabkan terbantuknya celah antara *parting line*. Celah ini terbentuk karena *sprue* tidak kuat menahan beban logam cair saat memasuki *sprue*. Pada bagian benda juga terjadi cacat sirip tetapi merupakan imbas dari celah pada *sprue*, yaitu pada plat dengan ketebalan 3 mm, 4 mm dan 5 mm.

Pada sampel P5-D cetakan pun terisi sempurna sampai ke riser. Dan terdapat cacat sirip yang terjadi pada sampel P1T1 yaitu dibagian *sprue* dan plat ke 1mm. Hal ini disebabkan karena terdapat celah antara *parting line* di bagian tersebut dan *sprue* yang tidak kuat menahan beban logam cair saat dituangkan ke dalam *sprue*. Sedangkan pada sampel P6 cetakan pun terisi sempurna sampai ke riser. Namun cacat sirip lebih sedikit dibandingkan dengan sampel P1 dan sampel P5. Bahkan di platnya tidak terdapat cacat sirip sama sekali hanya terdapat sedikit cacat sirip (*spin*) di bagian *sprue* atau saluran masuk. Hal tersebut dikarenakan penempatan *parting line* yang baik yang dapat mengurangi terjadinya kebocoran pada pola cetakan sehingga tidak banyak terjadi cacat sirip.



Gambar 4.2 Benda dan saluran tuang hasil pengecoran, (a) hasil pengecoran P1T1, (b) hasil pengecoran P5-D, (c) hasil pengecoran P6-A

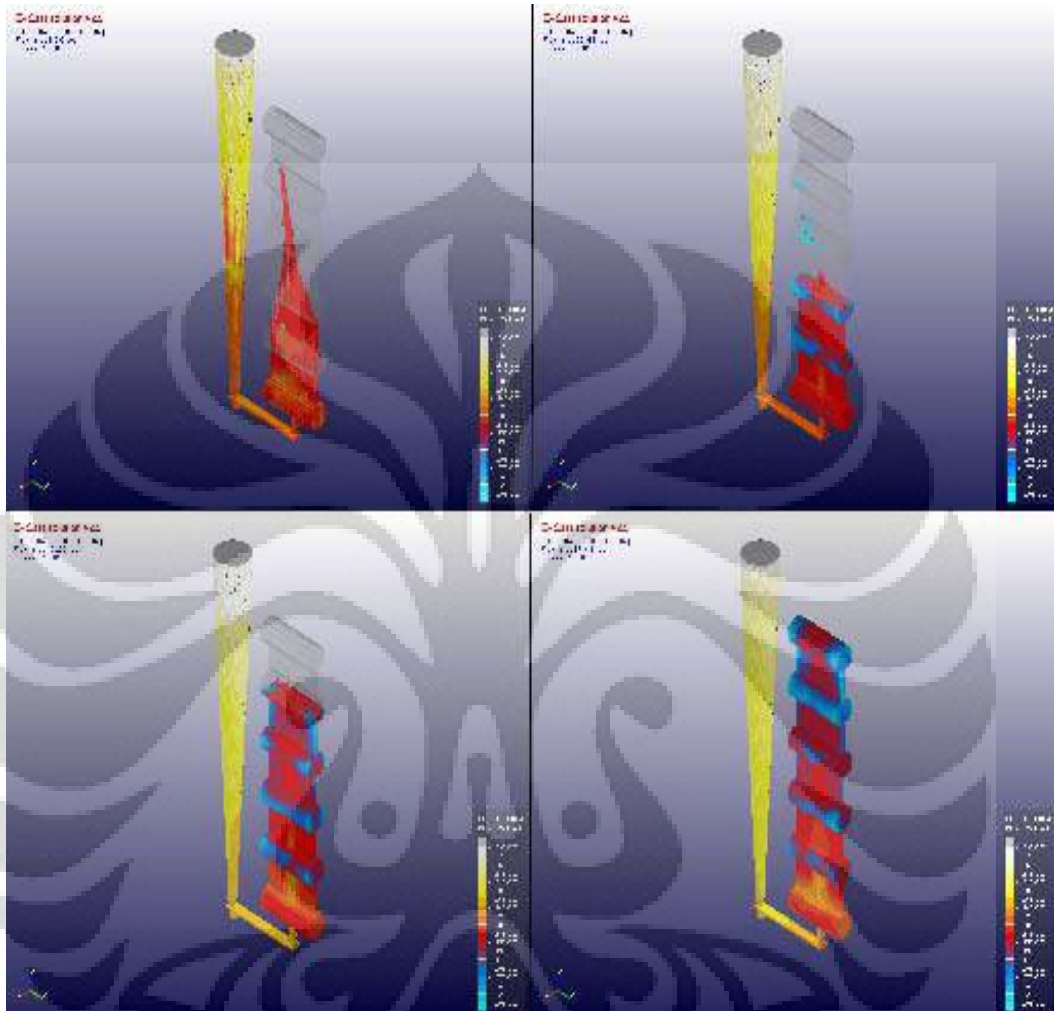
Cacat-cacat lain yang terjadi adalah terdapat *shrinkage* dan inklusi padatan pada plat 1 mm sampel P1T1. Sementara pada plat lain tidak terdapat *shrinkage* dan inklusi padatan. *Shrinkage* kemungkinan terjadi akibat riser yang tidak bekerja maksimal pada plat 1 mm.

4.3 SIMULASI SOFTWARE

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

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

mengarah pada solidifikasi dini yang memungkinkan terjadinya penutupan saluran masuk utama.

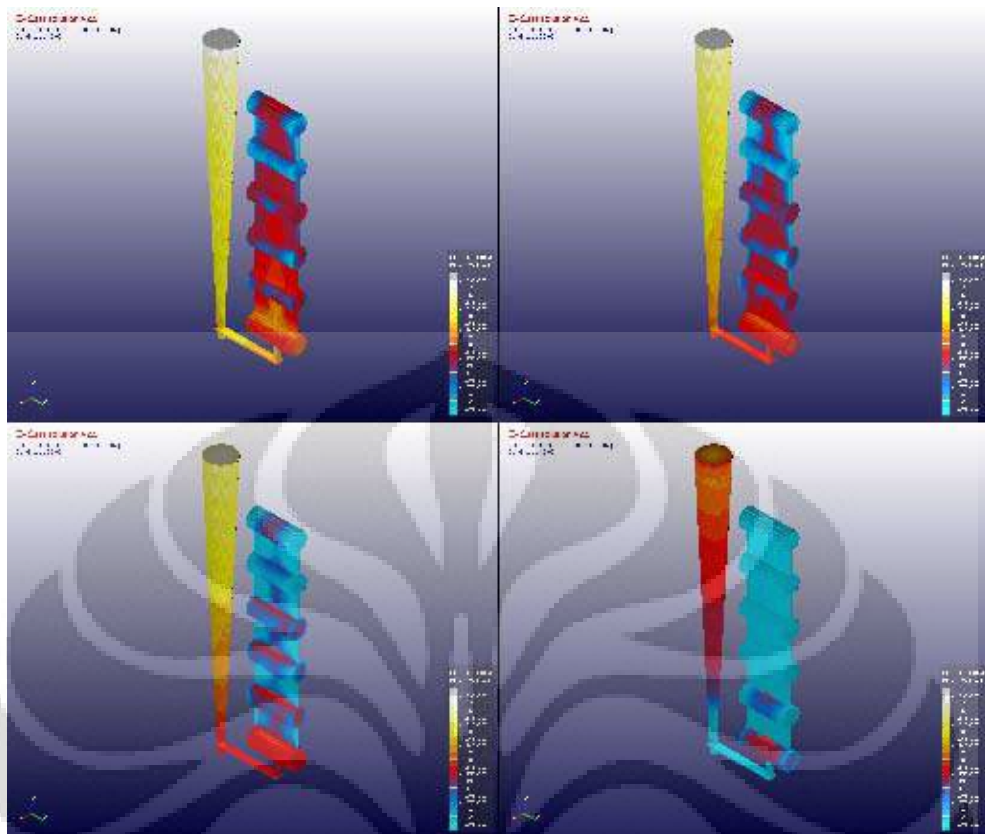


Gambar 4.3 Flow result

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

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

Universitas Indonesia



Gambar 4.4 *Solidification result*

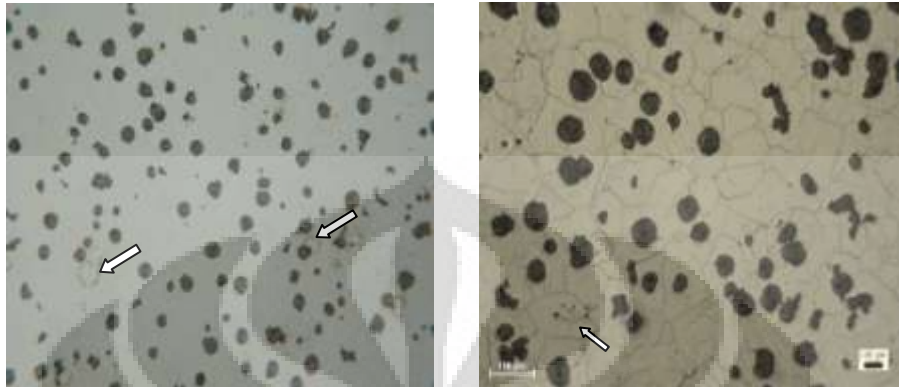
4.4 PENGAMATAN STRUKTUR MIKRO

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

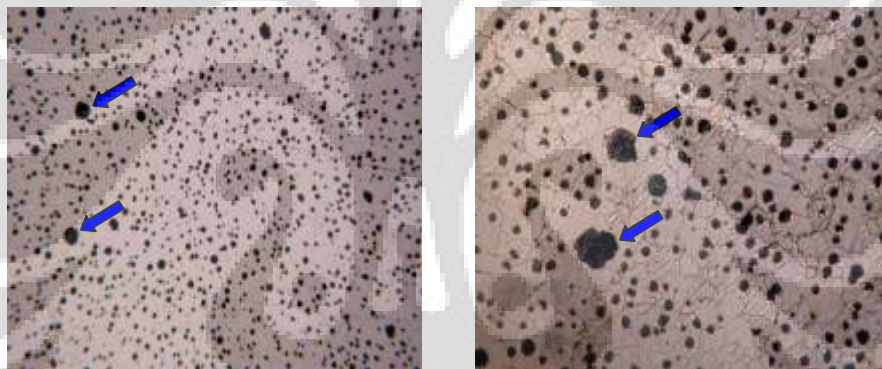
4.4.1 Karbida

Pada pengamatan struktur mikro, pembahasan dilakukan dengan mengambil 3 jenis sampel yang berbeda penuangan sehingga menghasilkan nilai CE yang berbeda. Namun, memiliki ketebalan yang sama pada Model T1, ketebalan yang diambil adalah 5 mm. Ketebalan 5 mm dipilih karena merupakan batas ketebalan maksimal untuk pengecoran dinding tipis. Berikut ini struktur mikro dari sampel P1T1, P5-D dan P6-A pada ketebalan 5 mm seperti terlihat

pada Gambar 4.5 – 4.7. Gambar ini menunjukkan keberadaan karbida pada struktur mikro yang terbentuk dari ketiga sampel yang memiliki nilai CE yang berbeda yang ditandai dengan tanda panah putih.



Gambar 4.5 Struktur mikro sampel PIT1 plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 200x.



Gambar 4.6 Struktur mikro sampel P5-D plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 100x.



Gambar 4.7 Struktur mikro sampel P6-A plat 5 mm Non Etsa dan Etsa pada posisi 3 dengan pembesaran 200x.

Dari struktur mikro pada Gambar 4.5 sampai 4.7 terlihat jelas adanya perbedaan dari ketiga sampel tersebut. Pada sampel P1T1 dengan nilai CE 4,64% struktur grafit nodul yang terbentuk dengan pembesaran 200x terlihat tersebar merata dengan diameter yang tidak jauh berbeda satu dengan lainnya (*homogen*). Pada struktur mikro P5-D dengan nilai CE yang hampir sama yaitu 4,67% struktur grafit nodul terbentuk dengan baik dan dilihat dengan pembesaran 100x seperti pada P1T1 hanya ada grafit nodul primer yang memiliki diameter cukup besar jika dibandingkan dengan diameter grafit nodul normalnya yang ditunjukkan dengan panah biru.

Sedangkan pada struktur P6-A yang dengan nilai CE 4,17% juga terlihat terbentuknya grafit nodul tetapi tidak semua grafit secara sempurna menjadi nodul, banyak grafit yang berbentuk tidak teratur (*irregular*) seperti yang ditunjukkan oleh panah merah. Hal itu terjadi karena masih banyak bagian grafit yang belum membentuk nodul sempurna akibat tidak cukup waktu untuk membentuk nodular sebelum akhirnya terjadi pembekuan. Selain itu, bentuk grafit pada bagian ini juga dapat menggambarkan teori pembentukan grafit nodular yaitu hipotesa percabangan inti grafit dan hipotesa pengaktif unsur-unsur pengaktif tegangan permukaan. Dengan mengambil referensi pada ASM *Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa struktur mikro yang terbentuk pada ketiga sampel baik P1T1, P5-D dan P6-A adalah grafit dalam matriks ferit. Hasil ini membuktikan bahwa kecepatan pendinginan ditentukan oleh desain pengecoran. Pada desain vertikal dimana terjadi mekanisme perlawanan kecepatan logam cair terhadap gravitasi, *counter gravity* bertujuan untuk memperlambat proses pengisian cetakan. Dengan melambatnya proses pengisian diharapkan akan memperlambat juga proses pengisian dan kecepatan pendinginannya.

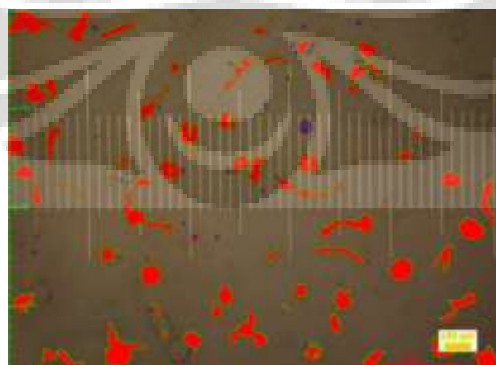
Pada perbandingan struktur mikro dari sampel P1T1, P5-D dan P6-A dengan ketebalan 5 mm dimana pada sampel P5-D5 struktur mikronya jauh lebih bersih dari karbida dan hampir tidak ditemukan karbida di dalam struktur mikronya dibandingkan pada sampel P1T1-5. Sedangkan pada sampel P6-A5

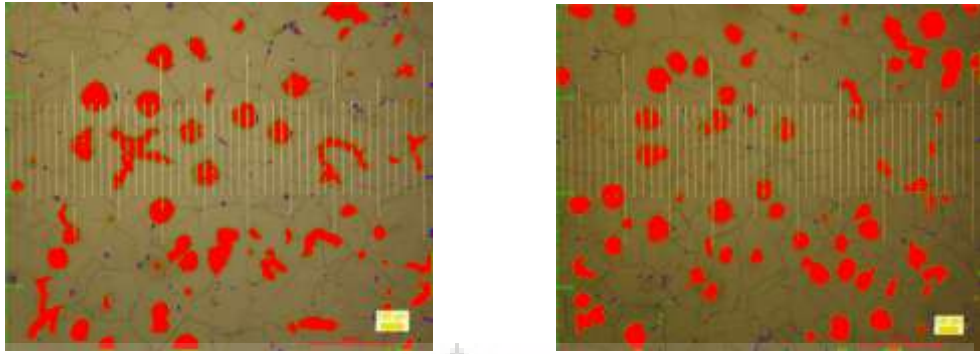
struktur mikro yang didapat banyak terdapat karbida dan ada fasa perlit di dalam struktur mikronya selain fasa ferrit.

Dimana hal ini berhubungan dengan nilai CE dari setiap sampel tersebut. Pada Tabel 4.2, dimana nilai CE pada sampel P1T1 dan P5-D mencapai nilai lebih dari 4,6%, sedangkan pada sampel P6-A nilai CE yang diperoleh hanya sekitar 4,16 - 4,17%. Dimana nilai tersebut masih jauh dari nilai CE yang dianjurkan baik oleh loper maupun stefanescu. Loper mengatakan bahwa untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4,3%,^[21] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75 – 4,92)% untuk memperoleh satu struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3 – 5) mm.^[23] Oleh karena itu, hal ini sesuai dengan teori diatas bahwa nilai CE akan mempengaruhi struktur mikro dari sampel dan pastinya akan mempengaruhi juga terhadap sifat dari material tersebut. Selain itu, posisi dan ketebalan juga akan mempengaruhi struktur mikro suatu sampel dimana semakin tipis dan cepat pembekuannya maka karbida yang akan terbentuk secara alami akan semakin banyak.

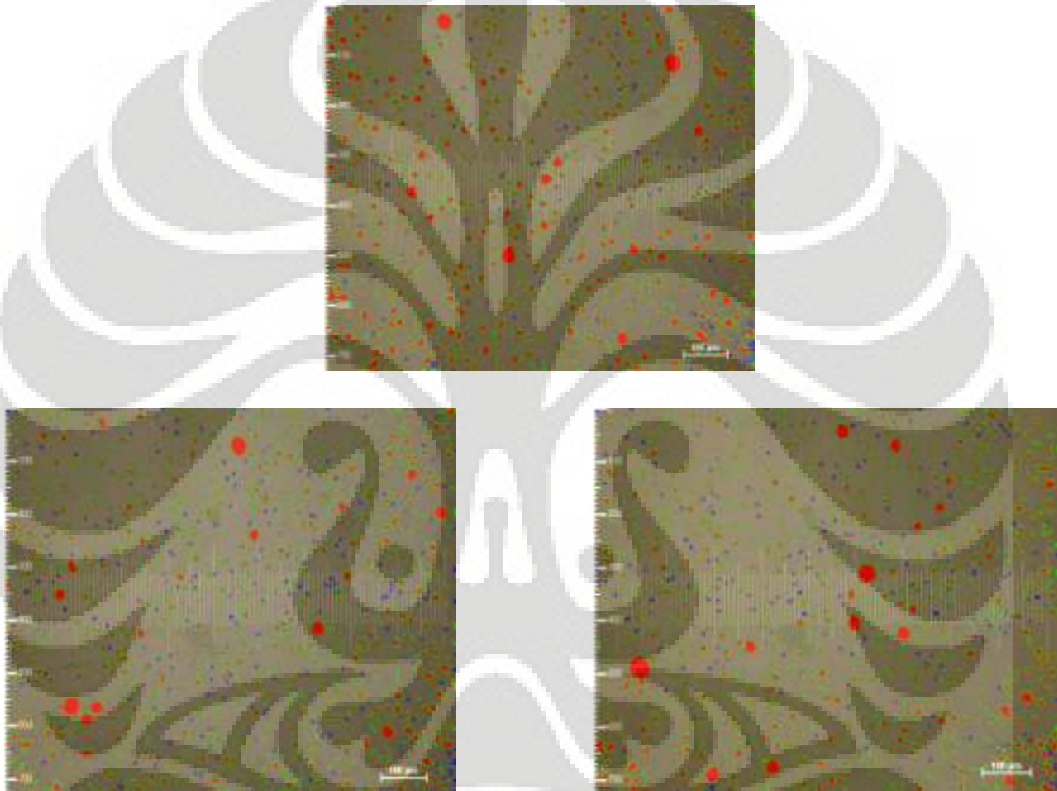
4.4.3 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul

Perhitungan jumlah nodul menggunakan perhitungan *image analysis* dengan diameter minimal yang dihitung adalah 5 μm , seperti terlihat pada Gambar 4.8 – 4.10 Perhitungan dilakukan menggunakan *software* NIS Element. Didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:



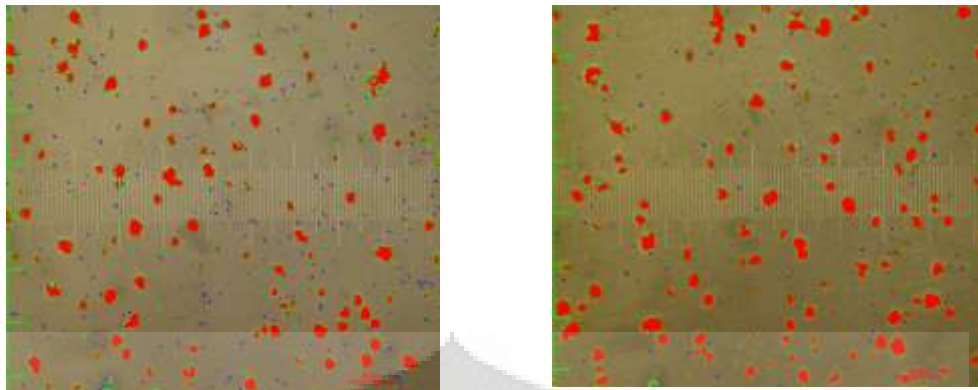


Gambar 4.8 Struktur mikro Non Etsa dan Etsa P1T1 5 mm pada posisi 3, perbesaran 200x



Gambar 4.9 Struktur mikro Non Etsa P5-D 5mm pada posisi 3, perbesaran 100x



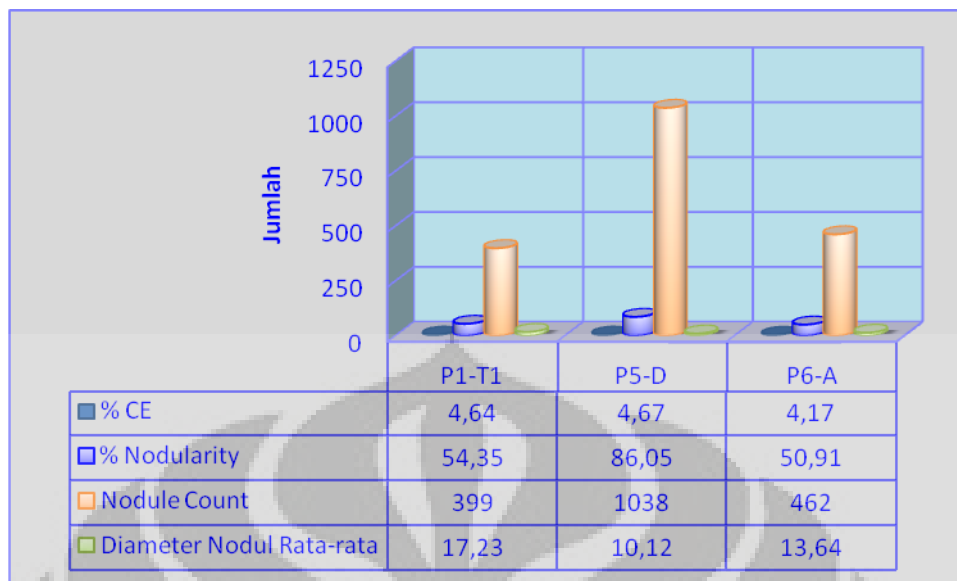


Gambar 4.10 Struktur mikro Non Etsa P6-A 5 mm pada posisi 3, perbesaran 100x

Perhitungan *nodularity* dan *nodule acount* dilakukan pada sampel P1T1, P5-D dan P6-A dengan ketebalan 5 mm, didapatkan nilai *nodularity* dan *nodule acount* dari *software* NIS Element yang digunakan. Dari *software* NIS Element tersebut didapatkan jumlah nodule/mm² dengan diameter minimum 5 μ m. Pada Gambar diatas menunjukkan bahwa plot yang berwarna merah dan hijau artinya grafit nodul termasuk kedalam hitungan sebagai satu buah grafit nodul. Sedangkan plot berwarna biru artinya grafit nodul tidak masuk kedalam hitungan karena ukuran diameter nodulnya kurang dari 5 μ m. Hal ini dilakukan karena untuk dapat dibuat menjadi ADI diameter nodulnya paling kecil adalah 5 μ m, karena diindikasikan bila nodul yang kurang dari 5 μ m dianggap sebagai pengotor (*inklusi*) atau cacat *mikro pitting*. Sehingga perhitungan jumlah nodul itu sendiri dibatasi dengan diameter nodul minimum adalah 5 μ m. Setelah melakukan perhitungan didapatkan data-data dari *software* NIS yang tertera pada Tabel 4.5 berikut ini:

Tabel 4.5 Perbandingan nodularitas, jumlah nodul dan diameter nodul rata-rata pada plat 5 mm dari sampel P1, P5 dan P6

| Model | %CE | Tebal (t) | Nodularity (%) | Nodule Count (nodule/mm ²) | Aver. Nodule Dia (μ m) |
|-------|------|-----------|----------------|--|-----------------------------|
| P1-T1 | 4,64 | 5 mm | 54,35 | 399 | 17,23 |
| P5-D | 4,67 | 5 mm | 86,05 | 1038 | 10,12 |
| P6-A | 4,17 | 5 mm | 50,91 | 462 | 13,64 |



Gambar 4.11 Grafik perbandingan % nodularitas, jumlah nodul, diameter nodul dan nilai CE dari ketiga sampel pada plat 5 mm

Dari data diatas menggambarkan perbandingan plat 5 mm terhadap jumlah nodul (*nodule account*), *nodularity* dan diameter nodul rata-rata dari sampel P1T1, P5-D dan P6-A. Dimana kita ketahui semakin cepat laju pendinginan maka jumlah grafit nodul yang terbentuk akan semakin banyak dan ukurannya lebih kecil. Selain itu kadar CE akan mempengaruhi terhadap *nodularity*. Dimana semakin tinggi nilai CE maka *nodularity* akan semakin baik, sedangkan jumlah nodule tidak secara signifikan dipengaruhi oleh nilai CE. Jumlah nodule akan berbanding lurus dengan diameter rata-rata nodul. Semakin kecil ukuran diameter dari grafit nodul maka jumlah nodul/mm² akan semakin banyak. Sehingga didapat data-data yang digunakan untuk menentukan apakah FCD bisa dibuat menjadi ADI.

Syarat FCD untuk ADI adalah^[3]:

- Nodularitas > 90%

Nodularitas pada setiap plat baik untuk sampel P1T1, P5-D dan P6-A hampir tidak ada yang mencapai 90%. Akan tetapi, hanya pada plat 5 mm sampel P5-D nodularitasnya bisa mencapai 86,05%. Sedangkan kedua sampel yang lain nilai nodularitasnya hanya mencapai nilai 50 – 60%. Hal ini dipengaruhi oleh nilai CE dari ketiga sampel yang berbeda-beda,

Universitas Indonesia

dimana pada sampel P1T1 dan P5-D memiliki nilai CE lebih dari 4,6%. Sedangkan pada sampel P6-A nilai CE hanya sebesar 4,17 %. Sehingga hal tersebut akan mempengaruhi terhadap pembentukan bentuk nodul (*nodularity*). Dimana semakin tinggi nilai CE maka nodularitas dari grafit akan semakin baik tergantung dari kecepatan pendinginan plat tersebut.

- Jumlah nodul $> 1000/\text{mm}^2$

Jumlah nodul dari ketiga sampel sangatlah berbeda-beda. Ada yang bisa mencapai $> 1000/\text{mm}^2$. Namun ada juga yang tidak sama sekali jumlahnya mencapai $> 500/\text{mm}^2$. Pada sampel P5-D yang jumlah nodulnya mencapai $> 1000/\text{mm}^2$ yaitu $1038/\text{mm}^2$, sedangkan pada sampel P1T1 dan P6-A nilai jumlah nodule/ mm^2 tidak mencapai nilai 500, nilai jumlah nodule / mm^2 secara berturut-turut yaitu $399/\text{mm}^2$ dan $462/\text{mm}^2$. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah nodul tidak dipengaruhi oleh kadar CE dari sampel tersebut, karena terjadi anomali hasil pada sampel P1T1 dimana nilai CE mencapai 4,62% namun nilai jumlah nodule/ mm^2 hanya mencapai 399. Dimana nilai tersebut masih jauh berbeda dengan nilai jumlah nodul yang dimiliki oleh sampel P6-A yang hanya memiliki nilai CE sebesar 4,17%. Banyak faktor lain yang mempengaruhi terbentuknya grafit nodul selain CE, mis: komposisi kimia logam cair, laju pendinginan, ketebalan plat, *Liquid Treatment* ,dll.

4.5 PENGUJIAN

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kekerasan dan *tensile strength* dari plat tipis hasil pengecoran P1T1, P5-D dan P6-A. Pengujian ini dilakukan di Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

4.5.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode Brinell. Berdasarkan ASTM E 10, kekerasan yang mampu dicapai besi tuang nodular adalah 143-217 HB.

- Hasil pengujian kekerasan dari ketiga sampel, yaitu:

Universitas Indonesia



Gambar 4.12 Grafik perbandingan nilai kekerasan dan CE pada ketiga sampel

Berdasarkan ASTM, kekerasan yang mampu dicapai besi tuang nodular adalah 143-217 HB atau sama dengan 150-197 HV. Dari Gambar 4.12 menunjukkan nilai kekerasan dari ketiga sampel. Pada Gambar 4.12 menunjukkan grafik uji keras sampel P1T1 hasil yang ditunjukkan sangat baik yaitu 155 yang mana nilai tersebut masuk kedalam standar nilai uji tarik besi tuang nodular. Hal ini disebabkan karena nilai CE dari sampel tersebut yaitu 4,64% yang masuk kedalam standar nilai CE menurut loper dan stefanescu. Dimana dengan nilai CE tersebut maka struktur mikro dari sampel akan bersih dari karbida. Yang mana karbida itu sendiri merupakan penyebab material menjadi keras dan getas.

Hasil pengujian kekerasan untuk sampel P5-D yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menggambarkan nilai kekerasan yang sangat baik karena nilai kekerasan yang dihasilkan yaitu 157 dimana nilai tersebut masuk kedalam standar nilai kekerasan dari besi tuang nodular. Hal ini disebabkan oleh nilai CE dari sampel yang mencapai 4,67% dimana dengan nilai CE tersebut diasumsikan akan bersih dari karbida dan hal tersebut dibuktikan pada Gambar 4.6, struktur mikro dari sampel P5-D dimana tidak ditemukannya karbida pada struktur mikronya. Sehingga tidak ada penyimpangan nilai kekerasan pada sampel tersebut.

Sedangkan pada sampel P6-A. Hasil nilai uji keras yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 menunjukkan nilai kekerasan yang jauh diatas standar kekerasan besi

tuang nodular. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan nilai 261 yang mana nilai tersebut jauh dari standar nilai kekerasan untuk besi tuang nodular. Hal ini disebabkan karena nilai CE dari sampel tersebut hanya 4,17%, dimana nilai tersebut masih jauh dari standar nilai CE yang dianjurkan oleh looper untuk membentuk struktur mikro yang bersih dari karbida. Sehingga banyak karbida yang ditemukan pada struktur mikronya dan bentuk dari nodul itu sendiri yang tidak sempurna (*irregular*) dan banyak terdapat percabangan inti nodul. Yang menyebabkan nilai kekerasan pada sampel P6 menjadi tinggi karena saat pengujian dilakukan pada sampel penjejukan mengenai grafit atau karbida, sebaliknya saat mengenai fasa ferit maka nilai kekerasan merupakan nilai kekerasan ferit yang lebih rendah.

Secara umum nilai kekerasan dari ketiga sampel identik seragam, terkecuali untuk sampel P6-A. Hal ini dikarenakan keberadaan karbida sebagai struktur keras yang menyebabkan nilai kekerasan menjadi meningkat dengan nilai CE yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CE akan berpengaruh terhadap kebersihan struktur mikro sampel dari pembentukan karbida dan secara otomatis akan mempengaruhi sifat mekanis dari sampel khususnya nilai kekerasan.

4.5.2 Pengujian Tarik

Hasil yang didapat dari pengujian tarik berupa nilai UTS dan elongasi seperti yang terlihat pada Tabel 4.6 dan Gambar 4.13, yaitu:

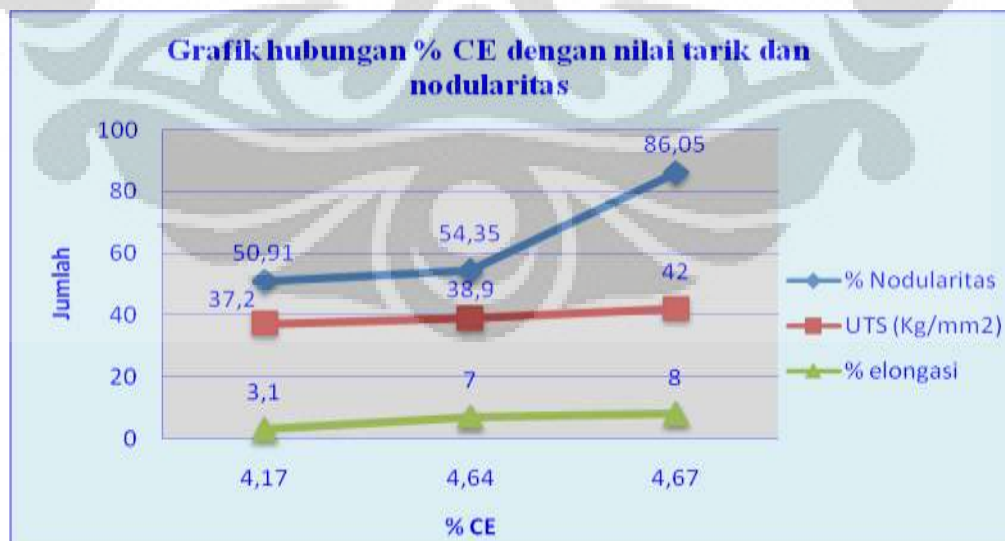
Tabel 4.6 Perbandingan nilai UTS dan % elongasi pada plat 5 mm dari sampel P1, P5 dan P6

| sampel | %CE | UTS (Kg/mm ²) | e (%) |
|--------|------|------------------------------|-------|
| P1T1 | 4,64 | 38,9 | 7 |
| P5-D | 4,67 | 42 | 8 |
| P6-A | 4,17 | 37,2 | 3,1 |



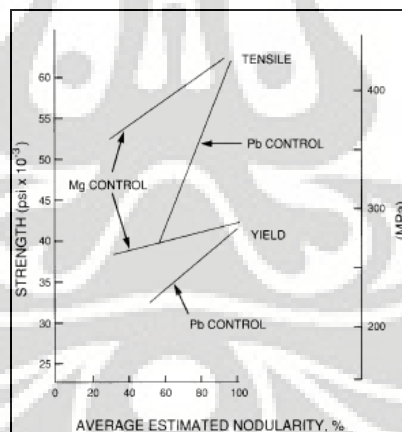
Gambar 4.13 Grafik perbandingan nilai UTS, %elongasi dan nilai CE dari ketiga sampel pada plat 5 mm

Dari data grafik di atas didapatkan nilai batas minimum *ultimate tensile strength* (UTS) dari besi tuang nodular dengan matrik ferit berdasarkan ASTM adalah 45 kg/mm². Dimana pada grafik terlihat data UTS dari sampel P1T1 dan P5-D yang masih di bawah batas minimum uji tarik untuk besi tuang nodular. Nodularitas memiliki pengaruh yang signifikan pada *tensile strength* dan elongasi. Dimana pertambahan nodularitas akan meningkatkan nilai UTS besi tuang seperti terlihat pada Gambar 4.14. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin tinggi nilai nodularitas sampel maka *tensile strength* dan %elongasinya semakin meningkat.



Gambar 4.14 Grafik hubungan % CE dengan nilai tarik dan nodularitas dari ketiga sampel pada plat 5 mm.

Sedangkan dari perbandingan nilai CE terhadap nilai UTS dari ketiga sampel pada plat 5 mm yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 didapatkan hasil yang sesuai dengan teori. Dari sampel P1T1 didapatkan nilai UTS sebesar 38,9 kg/mm², sedangkan pada sampel P5-D memiliki nilai UTS sebesar 42 kg/mm². Dimana nilai CE dari kedua sampel ini tidak terlalu jauh perbedaannya. Sedangkan pada sampel P6-A dengan nilai CE 4,17 memiliki nilai UTS 37,2 kg/mm². Sehingga semakin tinggi nilai CE maka akan semakin memperbaiki nilai ketangguhan dan keuletan dari sampel karena struktur mikro bersih dari karbida dan nodularitasnya semakin baik sehingga material akan semakin tangguh dan kuat. Namun dengan hadirnya struktur karbida pada plat dengan nodularitas yang tinggi menyebabkan elongasi justru menurun. Hal ini disebabkan plat tipis memungkinkan secara alami terjadi pembentukan karbida dan pendinginan cepat. Dimana dengan ketebalan yang semakin berkurang menghasilkan tingkat kebulatan (*nodularity*) yang lebih tinggi, jumlah nodul/mm² yang dihasilkan semakin besar, dan bentuk butir yang lebih halus, sehingga kekuatan tarik meningkat.



Gambar 4.15 Pengaruh nodularitas pada *yield* dan *tensile strength* yang dikontrol Mg dan Pb pada besi nodular feritik^[10]

Pada Gambar 4.15 di atas, menunjukkan hubungan antara kekuatan dengan nodularitas yang telah diubah nilainya melalui kontrol Mg dan Pb. Hal ini menunjukkan bahwa ketika nodularitas berkurang maka kekuatan yang dihasilkan juga berkurang.. Penambahan unsur Mg sebagai nodulan menghasilkan tingkat nodularitas yang tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN

- 1) Komposisi kimia dari proses pengeoran sangat menentukan terhadap struktur mikro dan sifat mekanisnya. Karena komposisi kimia dari logam cair akan mempengaruhi terhadap nilai CE dari suatu sampel.
- 2) Nilai CE yang didapat pada penelitian ini adalah 4,17 – 4,67 %. Nilai tersebut masuk kedalam nilai CE yang disyaratkan oleh looper dan stefanescu. Dimana semakin tinggi nilai CE suatu sampel maka akan semakin baik pula nodularitasnya dan jumlah nodul rata-rata yang terbentuk per mm² adalah 399 – 1038/mm² dengan nilai diameter rata-rata nodul adalah 10,1 – 17,2 µm. Dengan nilai diameter semakin kecil maka jumlah nodul yang dibentuk akan semakin banyak.
- 3) Syarat untuk pembuatan ADI adalah jumlah nodul/mm² harus >1000 dan persentase nodularitasnya mencapai > 90%. Dari hasil penelitian ini hanya sampel P5-D yang memenuhi persyaratan tersebut dengan nilai nodularitasnya 86,05% dan jumlah nodul rata-rata 1038/mm². Sehingga sampel P5-D ini bisa digunakan sebagai bahan dasar pembuatan ADI dengan ketebalan ≤ 5mm atau dikenal dengan *thin wall austempered ductile iron* (TWADI).
- 4) Dengan nilai CE yang didapat berkisar 4,17 – 4,67% didapatkan nilai uji tarik yang semakin meningkat yaitu 37,2 – 42 Kg/mm². Namun nilai tersebut masih dibawah nilai minimum standar pengujian tarik besi tuang nodular (BTN) FCD 45 yaitu 45 Kg/mm². Sedangkan nilai kekerasan yang dihasilkan yaitu 155 – 261 HB. Pada sampel P1T1 dan sampel P5-D selisih nilai kekerasannya hanya 2 digit atau hanya < 1% sehingga pada sampel tersebut dianggap memiliki nilai kekerasan yang sama. Sedangkan untuk sampel P6-A, nilai kekerasan yang dihasilkan memiliki selisih dengan sampel P1T1 dan sampel P5-D yaitu sebesar 114 digit atau sekitar

>70%. Dimana nilai tersebut sangat jauh berbeda dari sampel yang lain. Akan tetapi, standar pengujian keras menurut ASTM adalah 143 -217 HB. Sedangkan untuk nilai pengujian keras sampel P6-A masih jauh diatas nilai standar pengujian keras besi tuang nodular (BTN) yaitu 261 HB.

- 5) Nilai kekuatan tarik akan semakin meningkat seiring bertambahnya nilai CE dan nodularitasnya. Karena nilai CE akan mempengaruhi terhadap nodularitas dari sampel. Sedangkan pada kekuatan keras tidak ada hubungan yang saling terkait antara kenaikan nilai CE dengan nilai kekerasan.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (1990). *Ductile Iron Data for Design Engineers*. Montreal, Canada: Author.
- [2] Keough, J. R., dkk, *Carbidic Austempered Ductile Iron*. Pada DIS Meeting. 2000, USA: DIS.
- [3] Martinez, R. A., dkk, *Application of ADI in high strength thin wall automotive parts*. Pada 2002 World Conference on ADI, 2002.
- [4] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wal Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177).
- [5] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178).
- [6] Javaid, A., dkk, *Mechanical properties in thin wall ductile iron casting*. Modern Casting, 2000. 90(6): p. 39-41.
- [7] Callister, William D., (2007). *Material Science and Engineering: And Introduction*. Department of Metallurgical Engineering: The University of Utah. USA.
- [8] ASM Handbook. (1988). *Casting: Volume 15*. Ohio: ASM International Metal Park.
- [9] ASTM E-8M. (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- [10] ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
- [11] 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.
- [12] Skaland, T., dkk, *Inoculation material improves graphite formation in ductile iron*. Modern Casting, 2001. 91(12): p. 43-45.
- [13] Showman, R. E. and R. Aufderheide, *Getting to the core of thin-walled casting*. Modern Casting, 2004. 94(4): p. 32-34.

- [14] Schrems, K.K., dkk, *Statistical analysis of the mechanical properties of thinwalled ductile iron casting*. SAE Technical Paper Doc. No. : 2003-01-0828, 2003.
- [15] Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction, 2003. 03(109).
- [16] Mourad, M. M., dkk, *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron*. Pada 68th World Foundry Congress, 2008, Chennai, India: WFO.
- [17] <http://www.Foundry-Elkem.com>
- [18] Goodrich, G. M., *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. p. 97-30.
- [19] Dawson, J. V., *Carbides in As-cast Nodular (SG) Iron-Their Causes and Prevention*. British Cast Iron Research Association, 1976. BCIRA Report 1221: p. 153-158.
- [20] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Javaid, 1998).
- [21] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Loper, 1965).
- [22] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (Evans, 1981).
- [23] Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. ISIJ Int., 2004. Vol. 44(7): p. 1180-1187.
- [24] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Loper, 1965).
- [25] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Rijikov, 1965).
- [26] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Karsay, 1965).
- [27] Stefanescu, D.M., dkk, *Tensile properties of thin wall ductile iron*. AFS Transactions, 2002. 02(178). (Henning, 1999).

- [28] Massone, D. P., dkk, *Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution*. ISIJ Int., 2004. Vol. 44(7): p. 1180-1187. (Loper, 1969).
- [29] Labreque, dkk, *Development of Carbide Free Thin Wall Ductile Iron Casting*, AFS Transaction, 2000. Vol. 108: p. 31-38.
- [30] Dogan, O.N., dkk, *Verification of Thin Wall Ductile Iron Test methodology*. ASTM Journal, Vol. 30, Iss 1, Pg.
- [31] Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177). (*Image pro Plus Reference Guide, 1998; Omnimet Enterprise Handbook, 1998; UTHSCSA Image Tool Handbook, 1995*).
- [32] Thomson, R. C., dkk, *Modeling Microstructure Evaluation and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron*. Journal Material Science and Technology, 2000. 16: Pg.1412 – 1419.
- [33] www.steelinc.com.au
- [34] Metal Bulletin Monthly, vol.345, Pg.90, September 1999.
- [35] Sulamet-Ariobimo, R. D., *Austempered Ductile Iron Production Technology from Based Material Produced by Ferro-Casting Industry in Indonesia*, Faculty of Engineering and Physical System. 2003 : Rockhampton, Australia : Central Queensland University.
- [36] 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.
- [37] Laboratorium PT Geteka Founindo.
- [38] Atlas of casting defect: Institute of British Foundrymen. (<http://www.industrial metalcasting.com/gating-system-analysis>).

LAMPIRAN

Lampiran 1

Hasil pengecoran sebelum pemotongan

Sampel P1T1



Sampel P5-D

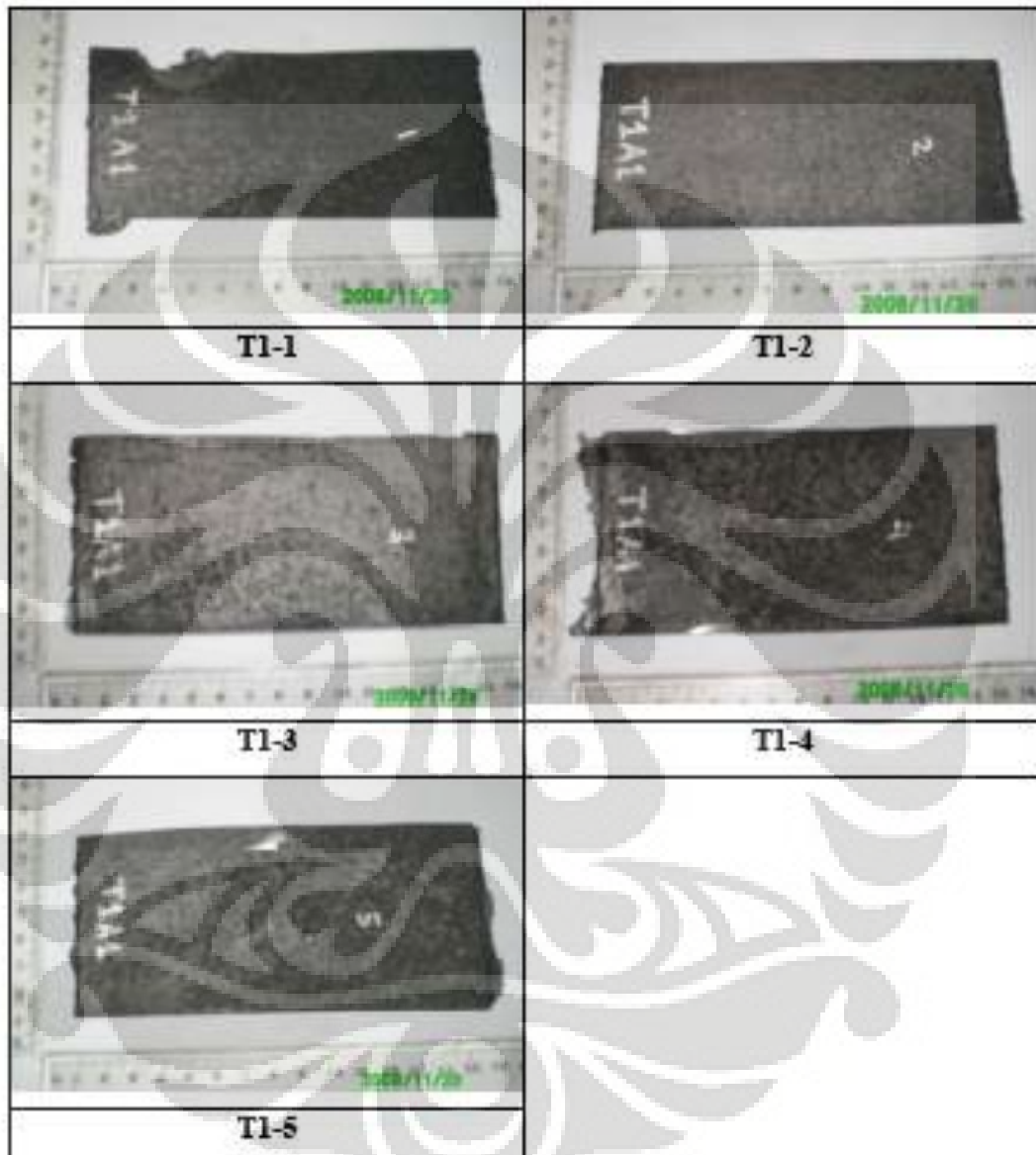


Sampel P6-A



Lampiran 2
Sampel hasil pemotongan

Sampel P1T1



- Lanjutan -

Sampel P5-D



Universitas Indonesia

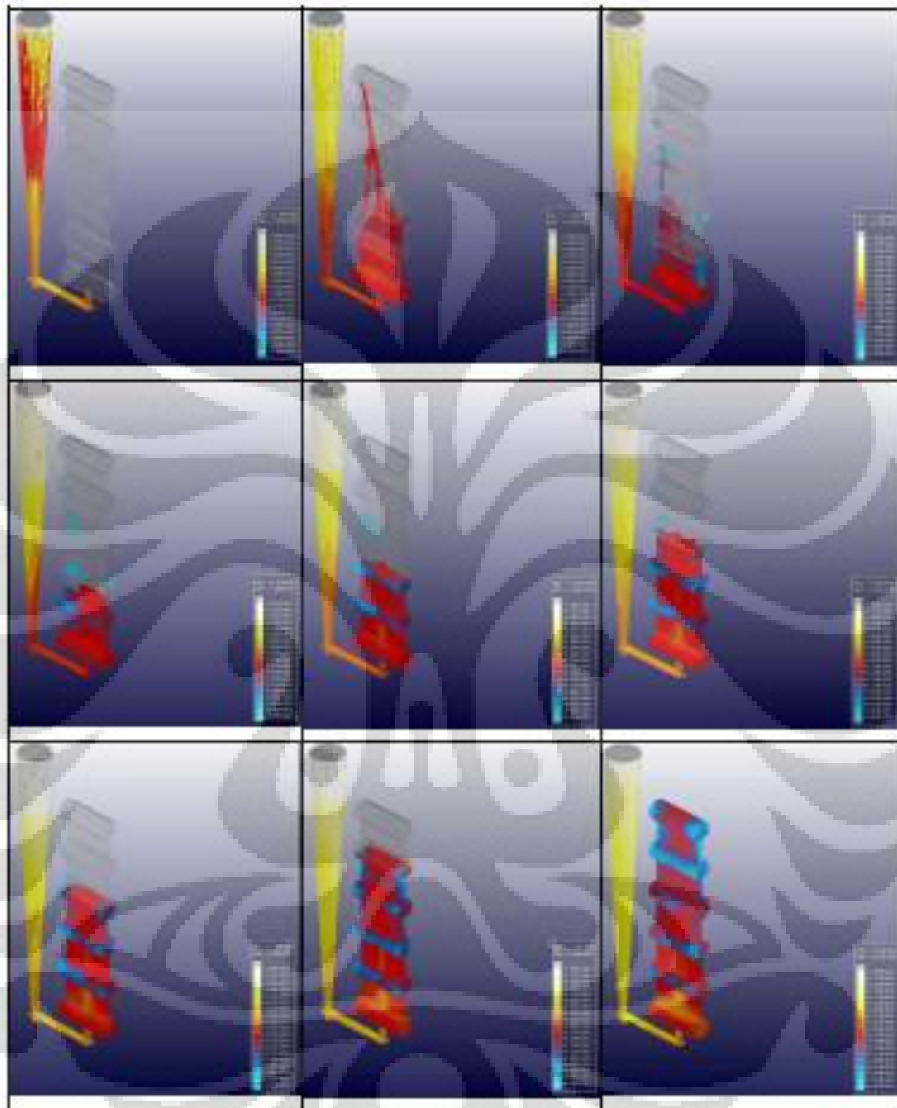
- Lanjutan -

Sampel P6-A



Lampiran 3
Simulasi Z-Cast

Model T1



Lampiran 4

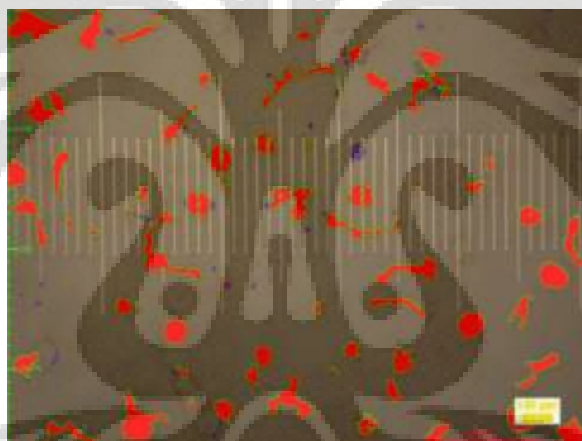
Struktur mikro dan hasil perhitungan dengan software NIS element

Sampel P1T1-5mm gambar 1

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

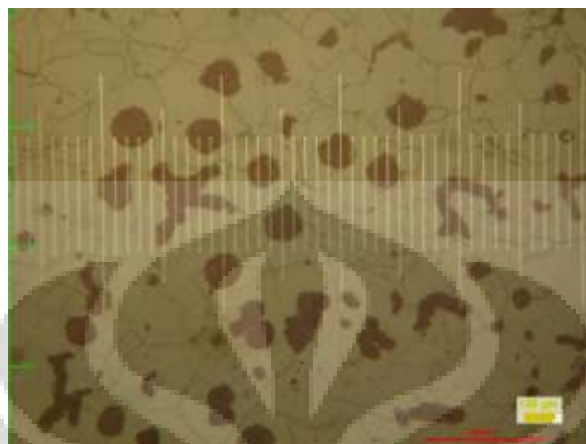
| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 224,91 | 172,04 | 20,96 | 730,5 |
| EqDiameter | 15,51 | 6,76 | 5,17 | 30,5 |
| Circularity | 0,4635 | 0,216 | 0,0975 | 0,9365 |
| MeanIntensity | 72,72 | 7,57 | 56,68 | 98,85 |

| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm2 |
|--------|-----------|------------|
| 67 | 181300 | 369,553 |

Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P1T1-5mm gambar 2

Sebelum
DihitungSetelah
Dihitung

Ket:

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|-------|--------|---------|---------|
| Area | 344,8 | 321,69 | 20,23 | 1386,19 |
| EqDiameter | 18,63 | 9,59 | 5,07 | 42,01 |
| Circularity | 0,541 | 0,2522 | 0,0867 | 0,9734 |
| MeanIntensity | 76,96 | 8,73 | 63,85 | 114,99 |

| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm ² |
|--------|-----------|------------------------|
| 66 | 181300 | 364,037 |

Universitas Indonesia

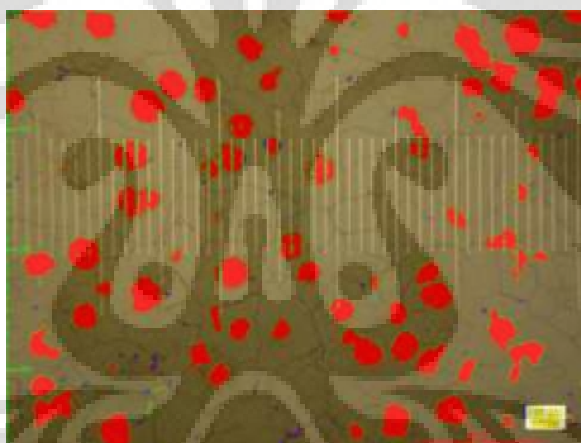
- Lanjutan -

Sampel P1T1-5mm gambar 3

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 300,11 | 267,05 | 20,22 | 1255,85 |
| EqDiameter | 17,55 | 8,61 | 5,07 | 39,99 |
| Circularity | 0,6259 | 0,2202 | 0,1299 | 0,9956 |
| MeanIntensity | 78,83 | 9,47 | 63,78 | 117,23 |

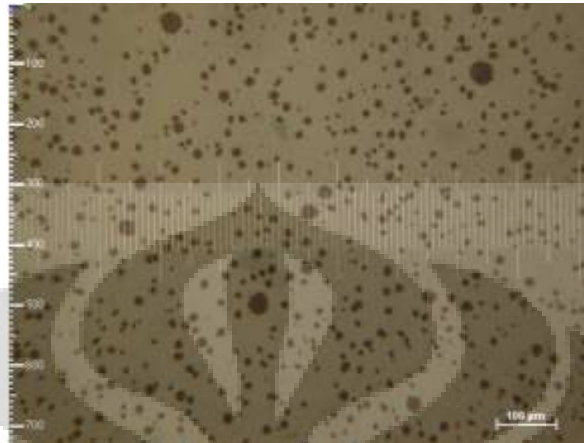
| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm ² |
|--------|-----------|------------------------|
| 84 | 181300 | 463,321 |

Universitas Indonesia

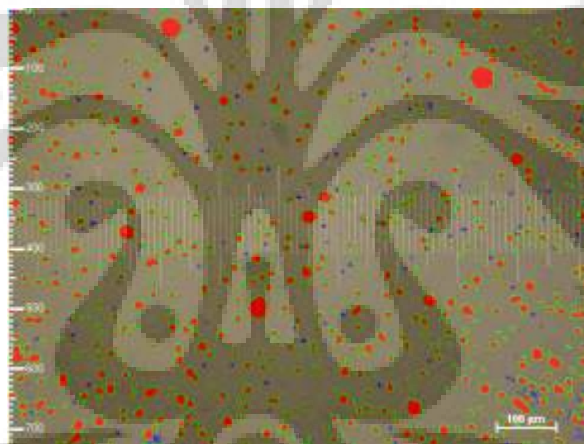
- Lanjutan -

Sampel P5D-5mm gambar 1

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 118,37 | 112,98 | 19,66 | 1282,76 |
| EqDiameter | 11,42 | 4,51 | 5 | 40,41 |
| Circularity | 0,8493 | 0,1491 | 0,1022 | 1 |
| MeanIntensity | 93,38 | 14,84 | 57,18 | 150,92 |

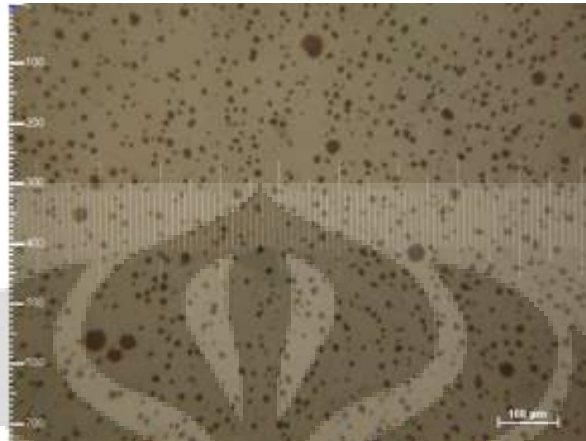
| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm2 |
|--------|-----------|------------|
| 666 | 708100 | 940,545 |

Universitas Indonesia

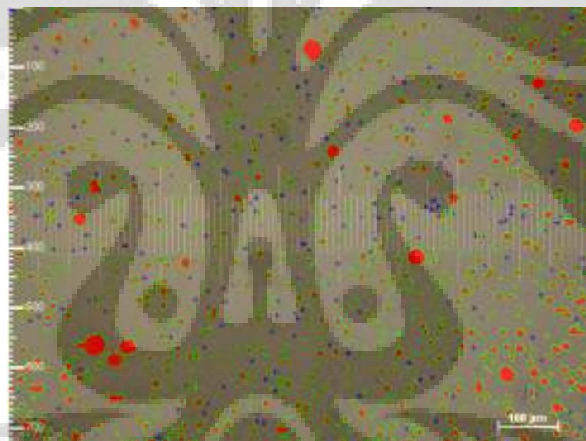
- Lanjutan -

Sampel P5D-5mm gambar 2

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 82,04 | 92,22 | 19,67 | 1211,43 |
| EqDiameter | 9,5 | 3,78 | 5 | 39,27 |
| Circularity | 0,8687 | 0,1378 | 0,0647 | 1 |
| MeanIntensity | 98,01 | 13,46 | 58,57 | 156,2 |

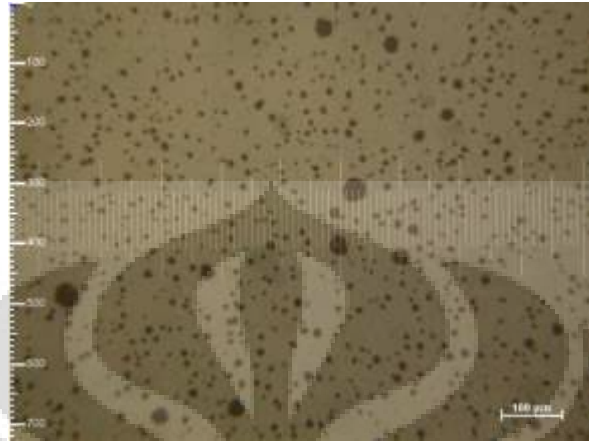
| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm2 |
|--------|-----------|------------|
| 827 | 708100 | 1167,914 |

Universitas Indonesia

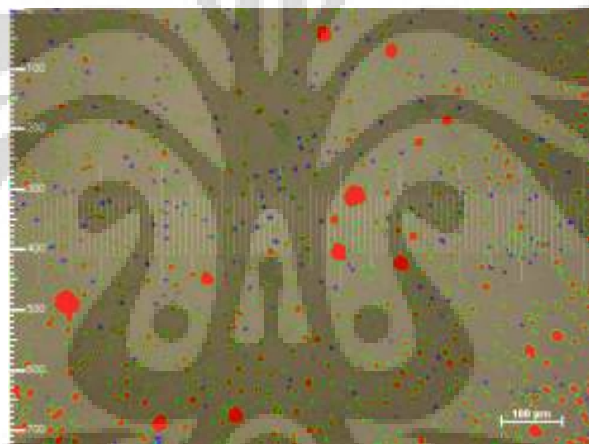
- Lanjutan -

Sampel P5D-5mm gambar 3

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 83,69 | 109,9 | 19,91 | 1669,14 |
| EqDiameter | 9,46 | 4,14 | 5,04 | 46,1 |
| Circularity | 0,8635 | 0,1384 | 0,1005 | 1 |
| MeanIntensity | 98,76 | 14,36 | 55,71 | 150,24 |

| Jumlah | Luas area | Jumlah/mm2 |
|--------|-----------|------------|
| 713 | 708100 | 1006,919 |

Universitas Indonesia

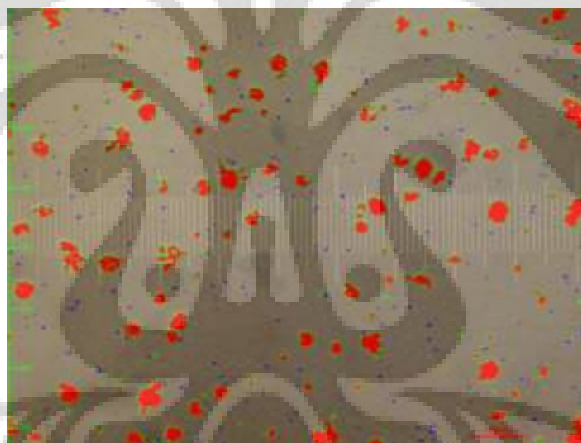
- Lanjutan -

Sampel P6A-5mm gambar 1

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket:

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 263,43 | 298,12 | 19,66 | 1708,82 |
| EqDiameter | 15,69 | 9,45 | 5 | 46,64 |
| Circularity | 0,4236 | 0,2647 | 0,0223 | 0,9796 |
| MeanIntensity | 106,17 | 8,95 | 81,22 | 149,26 |

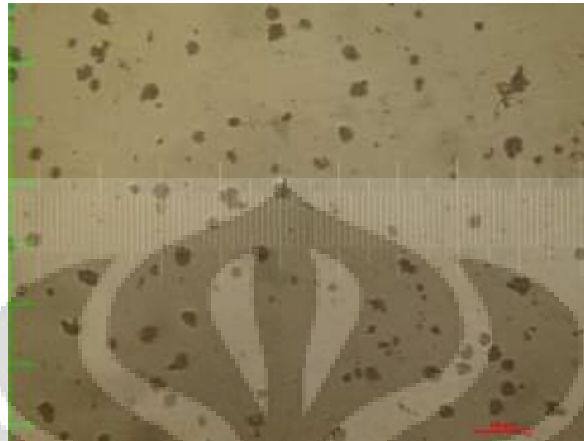
| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm ² |
|--------|-----------|------------------------|
| 307 | 708100 | 433,554 |

Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P6A-5mm gambar 2

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 206,62 | 221,45 | 19,93 | 1462,07 |
| EqDiameter | 14,11 | 8 | 5,04 | 43,15 |
| Circularity | 0,4753 | 0,2382 | 0,0384 | 1 |
| MeanIntensity | 109,24 | 8,52 | 91,73 | 134,97 |

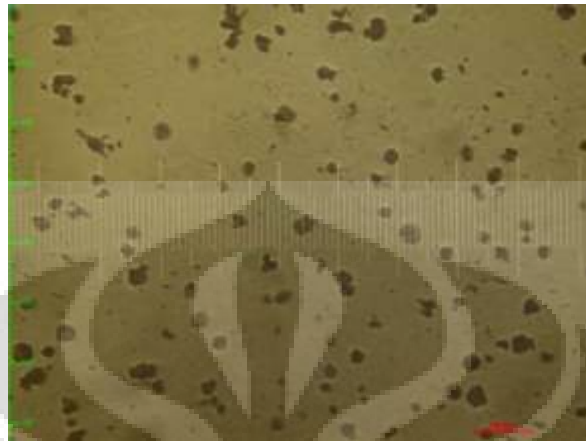
| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm ² |
|--------|-----------|------------------------|
| 339 | 708100 | 478,746 |

Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P6A-5mm gambar 3

Sebelum
Dihitung



Setelah
Dihitung



Ket :

| Feature | Mean | St.Dev | Minimum | Maximum |
|---------------|--------|--------|---------|---------|
| Area | 260,54 | 254,33 | 19,75 | 1492,75 |
| EqDiameter | 16,12 | 8,49 | 5,02 | 43,6 |
| Circularity | 0,6285 | 0,2069 | 0,0402 | 0,9826 |
| MeanIntensity | 112,35 | 10,14 | 88,49 | 142 |

| Jumlah | Luas Area | Jumlah/mm ² |
|--------|-----------|------------------------|
| 337 | 708100 | 475,921 |

Universitas Indonesia

Lampiran 5

Data uji kekerasan

Sampel P1T1

| Kode | sampel | x | y | d | HB | HB Rata2 |
|------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|
| 5mm | 1 | 1,185 | 1,218 | 1,2015 | 159,4038 | 154,549 |
| | 2 | 1,168 | 1,265 | 1,2165 | 155,3426 | |
| | 3 | 1,215 | 1,346 | 1,2805 | 139,5852 | |
| | 4 | 1,222 | 1,215 | 1,2185 | 154,8124 | |
| | 5 | 1,199 | 1,191 | 1,195 | 161,2112 | |
| | 6 | 1,254 | 1,171 | 1,2125 | 156,4109 | |
| | 7 | 1,196 | 1,239 | 1,2175 | 155,0772 | |
| 4mm | 1 | 1,195 | 1,193 | 1,194 | 161,4919 | 154,2317 |
| | 2 | 1,216 | 1,21 | 1,213 | 156,2768 | |
| | 3 | 1,238 | 1,228 | 1,233 | 151,045 | |
| | 4 | 1,228 | 1,234 | 1,231 | 151,5568 | |
| | 5 | 1,214 | 1,22 | 1,217 | 155,2098 | |
| | 6 | 1,258 | 1,187 | 1,2225 | 153,7598 | |
| | 7 | 1,243 | 1,229 | 1,236 | 150,282 | |
| 3mm | 1 | 1,112 | 1,1 | 1,106 | 189,2468 | 164,6999 |
| | 2 | 1,242 | 1,217 | 1,2295 | 151,9422 | |
| | 3 | 1,209 | 1,22 | 1,2145 | 155,8754 | |
| | 4 | 1,208 | 1,156 | 1,182 | 164,9157 | |
| | 5 | 1,234 | 1,174 | 1,204 | 158,7164 | |
| | 6 | 1,224 | 1,147 | 1,1855 | 163,9064 | |
| | 7 | 1,241 | 1,1 | 1,1705 | 168,296 | |
| 2mm | 1 | 1,229 | 1,168 | 1,1985 | 160,2343 | 149,8731 |
| | 2 | 1,228 | 1,216 | 1,222 | 153,8908 | |
| | 3 | 1,169 | 1,06 | 1,1145 | 186,2767 | |
| | 4 | 1,293 | 1,285 | 1,289 | 137,6666 | |
| | 5 | 1,377 | 1,318 | 1,3475 | 125,4292 | |
| | 6 | 1,373 | 1,303 | 1,338 | 127,3082 | |
| | 7 | 1,136 | 1,275 | 1,2055 | 158,306 | |
| 1mm | 1 | 1,032 | 1,063 | 1,0475 | 211,6859 | 207,4874 |
| | 2 | 1,053 | 1,068 | 1,0605 | 206,3774 | |
| | 3 | 1,069 | 1,052 | 1,0605 | 206,3774 | |
| | 4 | 1,024 | 1,064 | 1,044 | 213,1491 | |
| | 5 | 1,077 | 1,067 | 1,072 | 201,8413 | |
| | 6 | 1,023 | 1,088 | 1,0555 | 208,396 | |
| | 7 | 1,039 | 1,091 | 1,065 | 204,5849 | |

Ket :

| Perhitungan Brinell | Sampel P1T1 | |
|---------------------|---------------------------|----------------|
| P = 187.5 kg | dia bola Brinell = 3.2 mm | waktu 15 detik |

Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P5-D

| Kode | sampel | x | y | d | HB | HB Rata2 |
|------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|
| D1 | 1 | 1,191 | 1,186 | 1,1885 | 163,0483 | 195,1412 |
| | 2 | 1,127 | 1,1 | 1,1135 | 186,6226 | |
| | 3 | 1,03 | 1,036 | 1,033 | 217,8448 | |
| | 4 | 1,017 | 1,014 | 1,0155 | 225,6316 | |
| | 5 | 1,07 | 1,1 | 1,085 | 196,886 | |
| | 6 | 1,12 | 1,079 | 1,0995 | 191,5647 | |
| | 7 | 1,105 | 1,135 | 1,12 | 184,3907 | |
| D2 | 1 | 1,247 | 1,205 | 1,226 | 152,8471 | 164,4345 |
| | 2 | 1,187 | 1,168 | 1,1775 | 166,2267 | |
| | 3 | 1,169 | 1,15 | 1,1595 | 171,6237 | |
| | 4 | 1,167 | 1,168 | 1,1675 | 169,1942 | |
| | 5 | 1,184 | 1,156 | 1,17 | 168,4452 | |
| | 6 | 1,206 | 1,18 | 1,193 | 161,7733 | |
| | 7 | 1,216 | 1,176 | 1,196 | 160,9312 | |
| D3 | 1 | 1,216 | 1,198 | 1,207 | 157,8971 | 164,6821 |
| | 2 | 1,184 | 1,173 | 1,1785 | 165,934 | |
| | 3 | 1,172 | 1,178 | 1,175 | 166,9615 | |
| | 4 | 1,173 | 1,165 | 1,169 | 168,7443 | |
| | 5 | 1,187 | 1,169 | 1,178 | 166,0803 | |
| | 6 | 1,184 | 1,171 | 1,1775 | 166,2267 | |
| | 7 | 1,193 | 1,199 | 1,196 | 160,9312 | |
| D4 | 1 | 1,145 | 1,152 | 1,1485 | 175,0473 | 171,4151 |
| | 2 | 1,152 | 1,144 | 1,148 | 175,2053 | |
| | 3 | 1,165 | 1,193 | 1,179 | 165,788 | |
| | 4 | 1,165 | 1,153 | 1,159 | 171,7772 | |
| | 5 | 1,165 | 1,181 | 1,173 | 167,5527 | |
| | 6 | 1,161 | 1,171 | 1,166 | 169,646 | |
| | 7 | 1,157 | 1,141 | 1,149 | 174,8895 | |
| D5 | 1 | 1,257 | 1,192 | 1,2245 | 153,2373 | 156,49 |
| | 2 | 1,224 | 1,201 | 1,2125 | 156,4109 | |
| | 3 | 1,207 | 1,186 | 1,1965 | 160,7915 | |
| | 4 | 1,215 | 1,221 | 1,218 | 154,9447 | |
| | 5 | 1,218 | 1,21 | 1,214 | 156,0091 | |
| | 6 | 1,221 | 1,204 | 1,2125 | 156,4109 | |
| | 7 | 1,23 | 1,186 | 1,208 | 157,6254 | |

Ket :

| Perhitungan Brinell | Sampel P5-D | |
|---------------------|--------------------------------|----------------|
| P = 187.5 kg | diameter bola Brinell = 3.2 mm | waktu 15 detik |

Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P6-A

| Kode | sampel | x | y | d | HB | HB Rata2 |
|------|--------|-------|-------|--------|----------|----------|
| A1 | 1 | 1,006 | 1,044 | 1,025 | 221,355 | 164,2623 |
| | 2 | 1,069 | 1,091 | 1,08 | 198,7707 | |
| | 3 | 1,38 | 1,384 | 1,382 | 118,9271 | |
| | 4 | 1,34 | 1,338 | 1,339 | 127,1085 | |
| | 5 | 1,359 | 1,333 | 1,346 | 125,7233 | |
| | 6 | 1,207 | 1,199 | 1,203 | 158,9908 | |
| | 7 | 1,089 | 1,07 | 1,0795 | 198,9607 | |
| A2 | 1 | 0,947 | 1,006 | 0,9765 | 244,5143 | 210,342 |
| | 2 | 0,976 | 0,975 | 0,9755 | 245,0284 | |
| | 3 | 1,112 | 1,106 | 1,109 | 188,1908 | |
| | 4 | 1,136 | 0,984 | 1,06 | 206,578 | |
| | 5 | 1,096 | 1,073 | 1,0845 | 197,0733 | |
| | 6 | 1,184 | 1,114 | 1,149 | 174,8895 | |
| | 7 | 1,065 | 1,009 | 1,037 | 216,12 | |
| A3 | 1 | 0,858 | 0,872 | 0,865 | 313,2849 | 217,1737 |
| | 2 | 1,007 | 1,009 | 1,008 | 229,0935 | |
| | 3 | 1,062 | 1,018 | 1,04 | 214,8394 | |
| | 4 | 1,059 | 1,044 | 1,0515 | 210,0316 | |
| | 5 | 1,111 | 1,142 | 1,1265 | 182,1973 | |
| | 6 | 1,12 | 1,176 | 1,179 | 165,788 | |
| | 7 | 1,072 | 1,056 | 1,064 | 204,9813 | |
| A4 | 1 | 1,058 | 1,115 | 1,0865 | 196,3256 | 194,3425 |
| | 2 | 1,13 | 1,11 | 1,12 | 184,3907 | |
| | 3 | 1,139 | 1,148 | 1,1435 | 176,6362 | |
| | 4 | 1,208 | 1,137 | 1,1725 | 167,701 | |
| | 5 | 1,122 | 1,1 | 1,111 | 187,4915 | |
| | 6 | 1,039 | 1,046 | 1,0425 | 213,7807 | |
| | 7 | 0,999 | 0,996 | 0,9975 | 234,0719 | |
| A5 | 1 | 0,918 | 0,895 | 0,9065 | 284,7139 | 261,8735 |
| | 2 | 0,954 | 0,997 | 0,9755 | 245,0284 | |
| | 3 | 1,015 | 0,984 | 0,9995 | 233,1115 | |
| | 4 | 0,998 | 1,047 | 1,0225 | 222,4689 | |
| | 5 | 1,023 | 1,037 | 1,03 | 219,1515 | |
| | 6 | 0,913 | 0,833 | 0,873 | 307,4589 | |
| | 7 | 0,833 | 0,876 | 0,8545 | 321,1811 | |

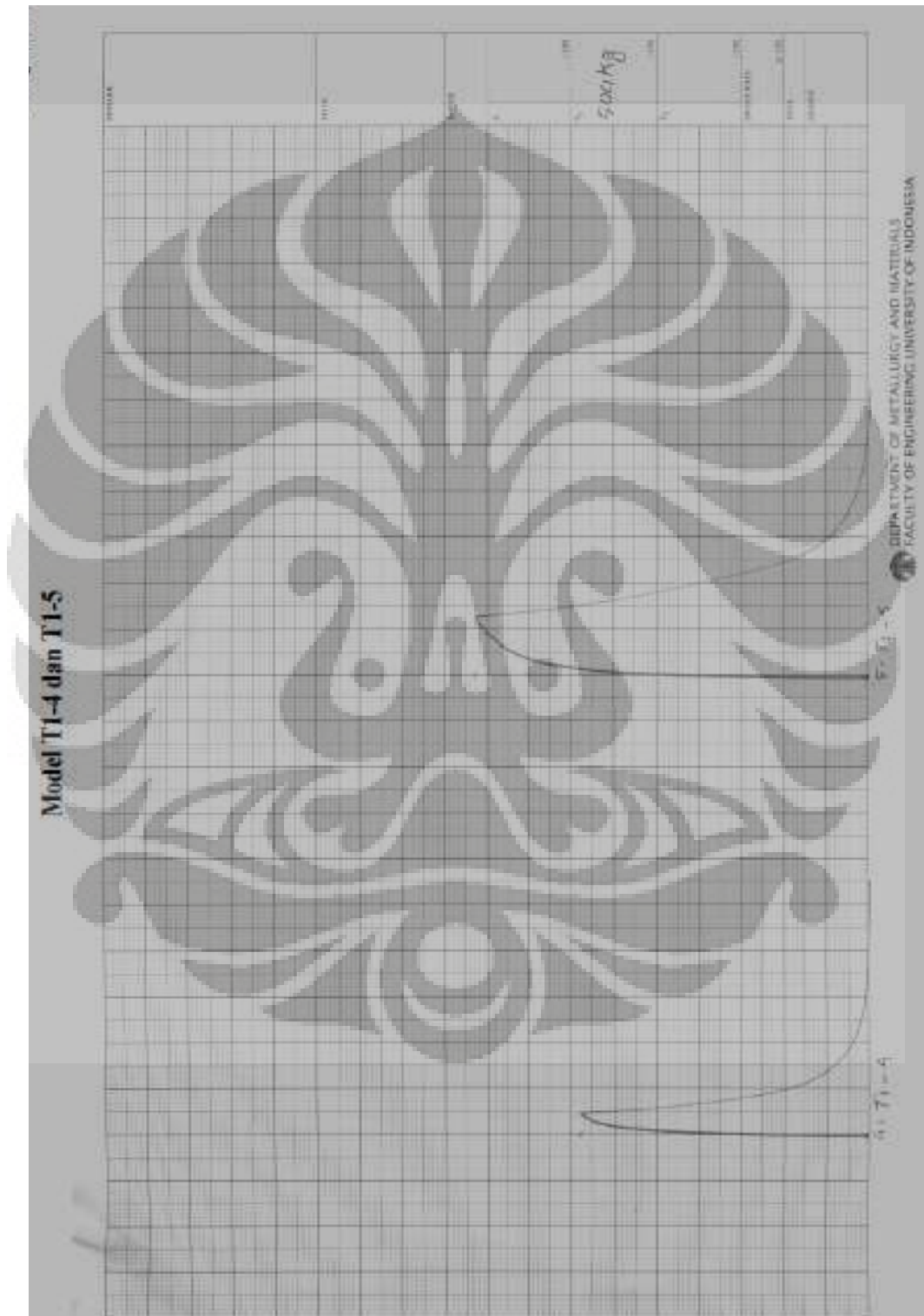
Ket:

| Perhitungan Brinell | Sampel P6-A | |
|---------------------|--------------------------------|----------------|
| P = 187.5 kg | diameter bola Brinell = 3.2 mm | waktu 15 detik |

Universitas Indonesia

Lampiran 6
Data uji tarik


Sampel P1T1-5mm



Universitas Indonesia

- Lanjutan -

Sampel P5D- 5mm


CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS
UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL
LABORATORIUM UJI MATERIAL
 Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia
 Phone: 021 - 713 4043, 705 3118 Fax: 021 - 787 2350
 E-mail: cmpt@ui.ac.id

Lembar Data Pengujian Tarik
(Tensile Testing Data Sheet)

Tanggal Uji: 4-11-2009
 Pelekat Tabung: JMS
 Tanggal Status diberikan: 4-11-09

No. Kontrak: SHIMAZU
 Teknis Penguji: NUSWIN
 Standar/Metode Uji: Z-2201

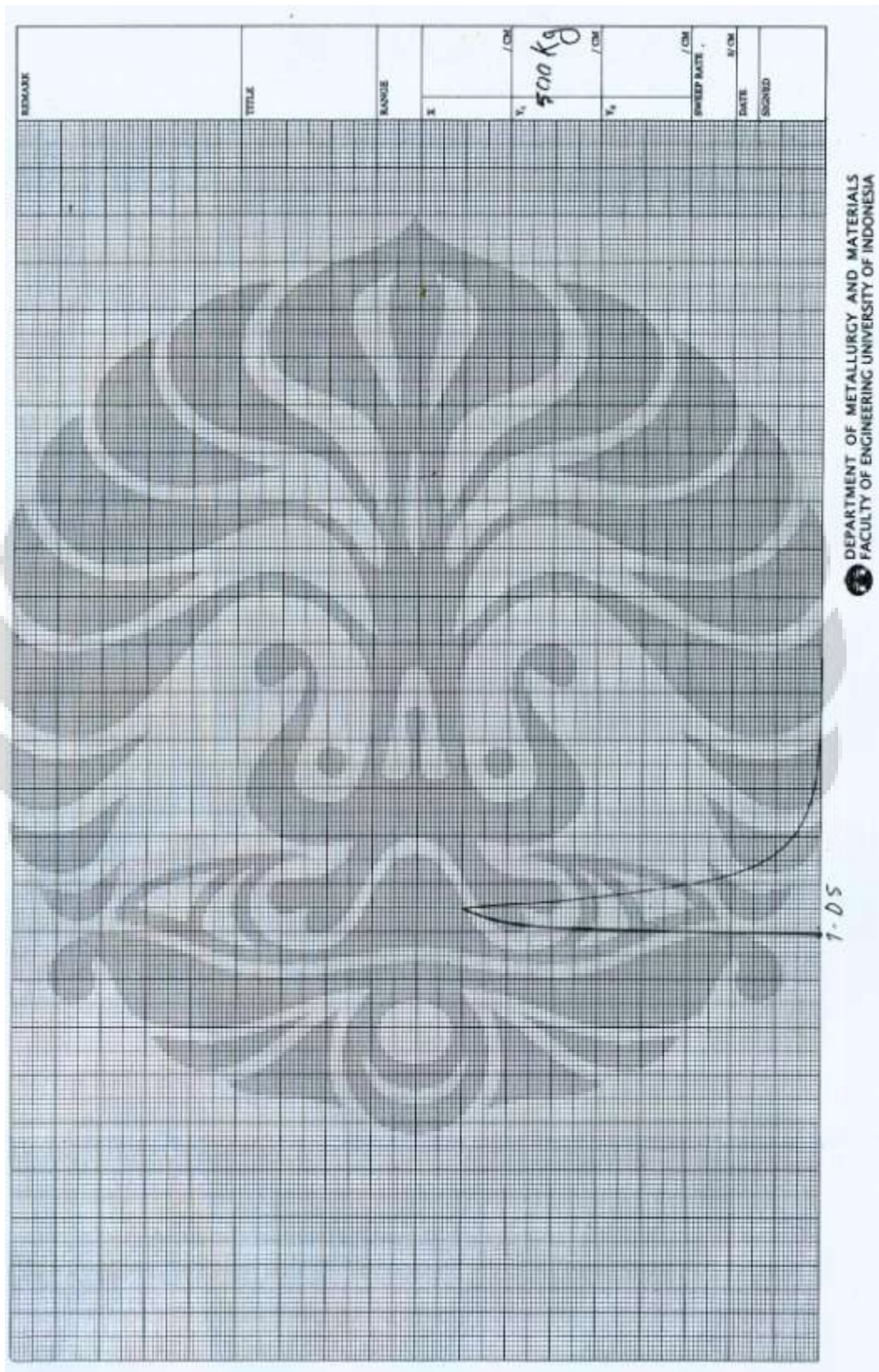
Masia Uji: BAJA
 Bahan: PLAT

| No | Kode Sampel | Bentuk Sampel | Dimensi Sampel (mm) | Luas penampang (mm ²) | Panjang Ujar (mm) | Pu (kg) | Pt (kg) | AL (mm) | ou (Regimen) | oy (kg/mm ²) | o (%) | Ket. |
|----|-------------|---|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------|---------|---------|--------------|--------------------------|-------|------|
| 1 | D5 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat | $t = 4,86$ $w = 19,68$ | 95,64 | 50 | 3975 | 3300 | 1,75 | 41 | 34 | 3,50 | |
| 2 | D4 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat | $t = 3,78$ $w = 18,01$ | 68,07 | 50 | 3650 | 2650 | 1,85 | 46 | 38 | 3,70 | |
| 3 | D3 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat | $t = 3,70$ $w = 19,99$ | 73,96 | 50 | 3480 | 2750 | 0,95 | 42 | 37 | 1,90 | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat | | | | | | | | | | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Flat | | | | | | | | | | |

* Coret yang tidak perlu

FE-27/Met-1/1 Rev 0


- Lanjutan -



DEPARTMENT OF METALLURGY AND MATERIALS
FACULTY OF ENGINEERING UNIVERSITY OF INDONESIA

- Lanjutan -

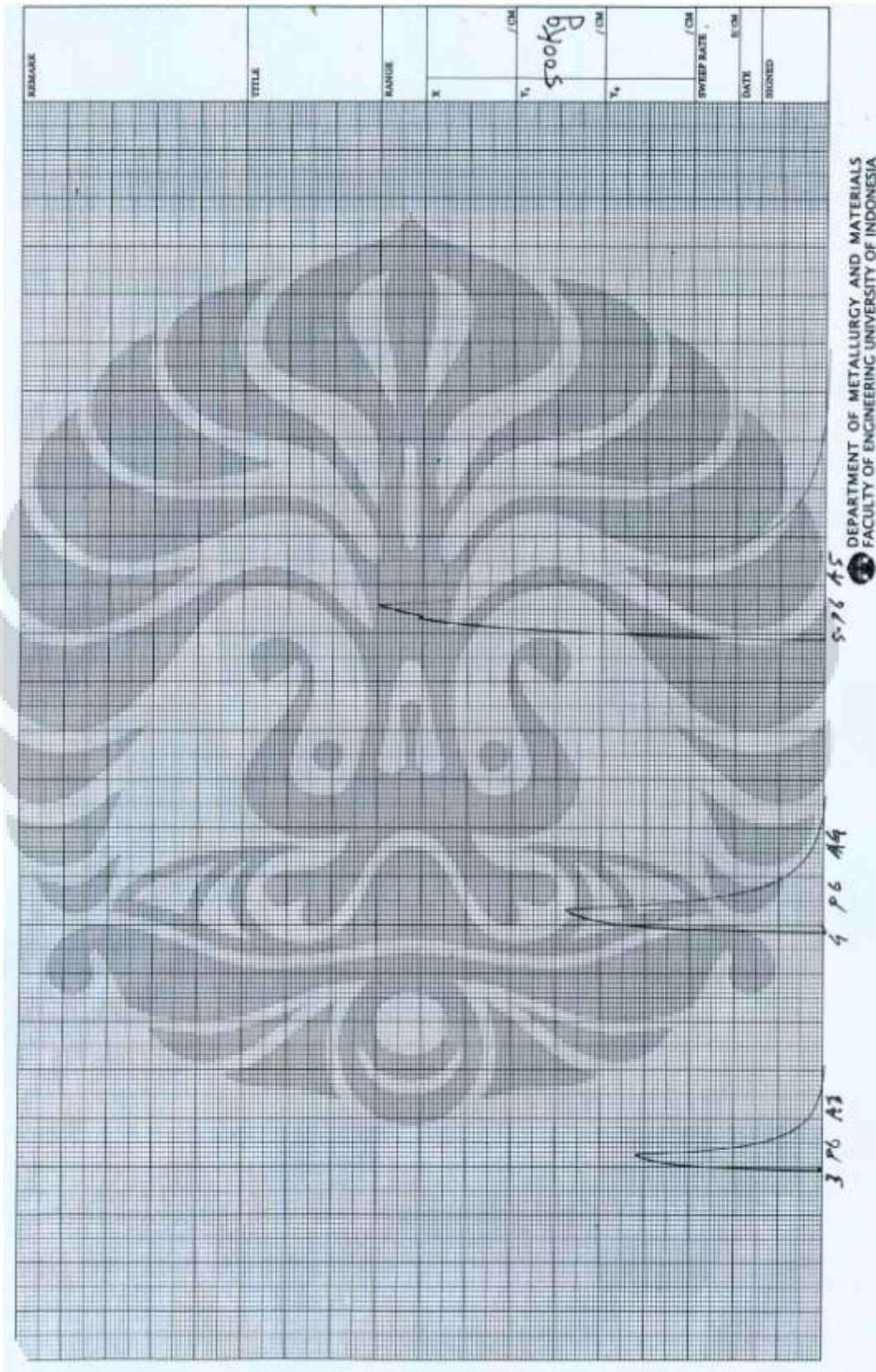
Sampel P6A- 5mm

|  | | CENTER FOR MATERIAL PROCESSING AND FAILURE ANALYSIS UNIVERSITAS INDONESIA - DEPARTEMEN TEKNIK METALURGI & MATERIAL LABORATORIUM UJI MATERIAL Kampus Baru UI - Depok 16424 - Indonesia Phone : 021 - 781 5945, 785 3110 Fax: 021 - 787 2130 E-mail : omp@ugm-stm.ui.ac.id | | | | | | | | | | Lembar Data Pengujian Tarik (Tensile Testing Data Sheet) | |
|---|-------------|--|------------------------|----------------------|-------------------|---------|---------|---------|--------------------------|--------------------------|-------|---|--|
| Mekanis Uji | | No. Kontrak: | | | | | | | | | | Tanggal Uji: 8 - 12 - 2009 | |
| Bahan | | Teknis Penguj: | | | | | | | | | | Paraf Teknis: <i>[Signature]</i> | |
| Identitas Bahan | | Simulas/Metode Uji: | | | | | | | | | | Tanggal Bahas (hari/mn): 7 - 12 - 09 | |
| No | Kode Sampel | Bentuk Sampel | Diameter Sisi-pel (mm) | Lebar penampang (mm) | Panjang Ular (mm) | Fu (kg) | Py (kg) | ΔL (mm) | σu (kg/mm ²) | σy (kg/mm ²) | e (%) | Ket. | |
| 1 | P6 A1 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat | t = 1,95 W = 15,96 | 31,12 | 90 | 420 | - | 0,50 | 13 | - | 1,00 | | |
| 2 | P6 A2 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat | t = 3,10 W = 15,95 | 49,44 | 90 | 1970 | - | 0,90 | 39 | - | 1,80 | | |
| 3 | P6 A3 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat | t = 3,95 W = 12,90 | 90,95 | 90 | 2100 | 1750 | 1,25 | 41 | 34 | 2,5 | | |
| 4 | P6 A4 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat | t = 4,80 W = 14,10 | 67,60 | 90 | 2900 | 2450 | 1,30 | 42 | 36 | 2,60 | | |
| 5 | P6 A5 | <input type="checkbox"/> Rod <input checked="" type="checkbox"/> Plat | t = 5,80 W = 17,35 | 100,63 | 90 | 5000 | 3750 | 1,95 | 47 | 37 | 3,10 | | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat | | | | | | | | | | | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat | | | | | | | | | | | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat | | | | | | | | | | | |
| | | <input type="checkbox"/> Rod <input type="checkbox"/> Plat | | | | | | | | | | | |

* Coret yang tidak perlu

FF-27/Mes-11 Rev 0

- Lanjutan -



Universitas Indonesia

Lampiran 7
Data pabrik

Sampel P1

MELTING REPORT

PT. GETEKA FOUNINDO

DAILY REPORT : *MIRZAHERI + ANUG + YOKES*
 DAY / DATE : *SEP 10 2014 11.08*
 QTY : *1400 kg*

NO. CHARGING : *3rd. 11.08*
 MATERIAL : *FCU450*
 Melting No : *03*
 Batch No : *11808A*

NO. CHARGING : _____
 MATERIAL GRADE : _____
 FURNACE NO. : _____
 MELT NO. : _____

| NO | NAMA MATERIAL | QTY KG | Action | FURNACE POWER PANEL | | | | | Kg | % | |
|----|-------------------------|------------|------------|---------------------|----|----|---|----|----|---|-----|
| | | | | TIME | MI | Pa | V | in | | | Amp |
| 1 | PIG IRON | | | | | | | | | | |
| 2 | RETURN SCRAP | <i>400</i> | | | | | | | | | |
| 3 | STEEL SCRAP | <i>800</i> | | | | | | | | | |
| 4 | FORGING | | | | | | | | | | |
| 5 | CARBURIZER | <i>34</i> | | | | | | | | | |
| 6 | Fe Si | <i>10</i> | <i>4.5</i> | | | | | | | | |
| 7 | Fe Mn | <i>2</i> | <i>8.7</i> | | | | | | | | |
| 8 | INNOCULANT | <i>9</i> | <i>2.4</i> | | | | | | | | |
| 9 | Co | | | | | | | | | | |
| 10 | Fe Si Mg | | | | | | | | | | |
| 11 | Fe Mo | | | | | | | | | | |
| 12 | SLAG REMOVER | | | | | | | | | | |
| 13 | FERROGEN | | | | | | | | | | |
| 14 | TEM TIP | | | | | | | | | | |
| 15 | TEC TIP | | | | | | | | | | |
| 16 | TOTAL (No. 01 - No. 11) | | | | | | | | | | |

Melt Down : *15.10 / 15.35*
 Tip. Temp : *19.30 / 17.45*

Power Consumption
 kWh Start : *4908.98*
 kWh Finish : *4910.62*
 TOTAL : _____ kWh

Target Composition in Furnace
 C : *0.95* Si : *1.6* Mn : *0.2* P : *0.02* S : *0.02*
 Result From Q.E Metall Test

| Element | Standard | Actual |
|---------|-------------|-------------|
| C | 3.90 - 4.00 | <i>3.63</i> |
| Si | 1.50 - 1.70 | <i>1.11</i> |
| Mn | 0.30 - 0.50 | <i>0.21</i> |
| P | 0.05 Max | <i>0.10</i> |
| S | 0.05 Max | <i>0.02</i> |
| Cu | 0.15 Max | <i>0.03</i> |
| Cr | 0.15 Max | <i>0.02</i> |
| Ni | 0.15 Max | <i>0.02</i> |
| Mg | 0.03 Min | <i>0.02</i> |

LAB : _____

MATERIAL NOTE : _____
 HEEL / SISA CAIRAN : _____
 INGGOT / STARTING BLOCK : _____

CC : _____ WH : _____ SPV : _____
 Master : *1. Eko AP*
 2. *Unky - D*

F17.5-01/05-03-4

- Lanjutan -

PT GETEKA FOUNINDO

Page 1

| Group:FCD | | Kind:2 | | Date 11/25/08 | | Time 03:43 | | | | | | |
|-----------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Index | | (2411808B)(FCD45) | | (2411808B)(FCD45) | | | | | | | | |
| Fe1 | Fe2 | C | Si | Mn | P | S | Cu1 | Ni1 | Cr | Mo1 | Al | Mg |
| .2298 | 5.0230 | 3.7834 | 2.5791 | .37240 | .02086 | .02334 | .03787 | .02694 | .03615 | .00197 | .01539 | .03593 |

| Group:FCD | | Kind:1 | | Date 11/25/08 | | Time 03:40 | | | | | | |
|-----------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Index | | (2411808B)(FCD45) | | (2411808B)(FCD45) | | | | | | | | |
| Fe1 | Fe2 | C | Si | Mn | P | S | Cu1 | Ni1 | Cr | Mo1 | Al | Mg |
| .1062 | 4.8876 | 3.9000 | 2.6116 | .37175 | .02324 | .02318 | .03825 | .02703 | .03526 | .00205 | .01523 | .03571 |

| Group:FCD | | Kind:Ave. | | Date 11/25/08 | | Time 03:40 | | | | | | |
|-----------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|------------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| Index | | (2411806B)(FCD45) | | (2411806B)(FCD45) | | | | | | | | |
| Fe1 | Fe2 | C | Si | Mn | P | S | Cu1 | Ni1 | Cr | Mo1 | Al | Mg |
| .10752 | 4.7668 | 3.5180 | 2.6086 | .34734 | .02361 | .02373 | .07778 | .02896 | .03722 | .00210R | .01658 | .04509R |

- Lanjutan -

Sampel P5

MELTING REPORT

PT. GETEKA FOUNINDO

DAILY REPORT : Jumat, 28 08 2009
 DAY / DATE : 500-F9
 CITY :

| NO | NAMA MATERIAL | QTY KG | Addition | START | TIME 09:20 | M Pwr 100 | V. in V. in | FURNACE POWER | |
|----|-------------------------|-----------|-----------------------|-------|---------------|--------------|----------------|---------------|--------------|
| | | | | | | | | Armp Armp | Watt Watt |
| 1 | PIG IRON | | | | | | | | |
| 2 | RETURN SCRAP | | | | | | | | |
| 3 | STEEL SCRAP | 500 | 100 | | | | | | |
| 4 | FORGING | | | | | | | | |
| 5 | CARBURIZER | 30 | 9.8 + 2.2 + 0.8 + 0.9 | | | | | | |
| 6 | Fe Si | 8 | 3.2 | | | | | | |
| 7 | Fe Mn | 1 | 0.7 | | | | | | |
| 8 | INNOCLANT | 285 | 249 | | | | | | |
| 9 | Cu | | | | | | | | |
| 10 | Fe Si Mg | | 3.6 + 4.98 | | | | | | |
| 11 | Fe Mn | | | | | | | | |
| 12 | SLAG REMOVER | | | | | | | | |
| 13 | FERROGEN | | | | | | | | |
| 14 | TEM TIP | | | | | | | | |
| 15 | TEC TIP | | | | | | | | |
| 16 | TOTAL (No. 01 - No. 11) | | | | | | | | |

MATERIAL NOTE :
 HEEL / SISA CARAN : F 50 F9
 INGOT / STARTING BLOCK :

| Veget Composition at furnace | | Powder Comp | |
|------------------------------|------|-------------|------|
| Si | Mn | P | S |
| 1.6 | 0.35 | 0.02 | 0.02 |
| Result From OE Melter Test | | TOTAL | |
| C | G | CE | PC |
| 3.45 | 2.46 | 1.65 | 1.82 |
| | 3.85 | 1.60 | 1.77 |
| | 3.35 | 1.32 | 1.57 |
| | | 3.62 | 3.60 |
| | | 3.62 | 3.60 |

WH :
 SW :
 Panel Op :

FI 7.5-01/05-03

- Lanjutan -

| Elemen | Standard | Actual | | |
|--------|-------------|--------|------|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| C | 3.50 - 3.80 | 3.54 | 3.51 | |
| Si | 1.40 - 1.60 | 1.56 | 1.58 | |
| Mn | 0.40 - 0.60 | 0.47 | 0.47 | |
| P | 0.03 Max | 0.02 | 0.02 | |
| S | 0.02 Max | 0.02 | 0.01 | |
| Cu | 0.30 - 0.60 | 0.06 | 0.47 | |
| Cr | 0.15 Max | 0.07 | 0.07 | |
| Ni | 0.15 Max | 6.39 | 6.33 | |
| Mg | 0.03 Min | - | - | |
| MO | | 0.17 | 0.16 | |

Target A

LAB

Dies

| Elemen | Standard | Actual | | |
|--------|-------------|--------|--|--|
| | | 4 | | |
| C | 3.90 - 4.00 | 4.02 | | |
| Si | 1.50 - 1.70 | 1.76 | | |
| Mn | 0.30 - 0.50 | 0.33 | | |
| P | 0.03 Max | 0.02 | | |
| S | 0.02 Max | 0.01 | | |
| Cu | 0.15 Max | 0.01 | | |
| Cr | 0.15 Max | 0.03 | | |
| Ni | 0.15 Max | 0.02 | | |
| Mg | 0.03 Min | - | | |

Target A

LAB

Out Rigger

- Lanjutan -

Sampel P6

PT. GETEKA FOUNINDO

MELTING REPORT

DAILY REPORT: *Nose / Valve / Air*
 DAY / DATE: *01.05.09*
 CITY: *Bojonegara*

NO. CHARGES: *214*
 MATERIAL GRADE: *FCB 91*
 FURNACE NO: *83*
 MELT NO: *214*

TIME: *10.30* h
 FURNACE POWER SAVER: *300* kW
 ROSTER INCH: *150* mm

AVAILABILITY: *38* kg
 CITY X13: *880*
 CITY X14: *880*
 CITY X15: *87*
 CITY X16: *37*
 CITY X17: *(1.2)* AD

AVG DUMP: *12.0*
 FULL KILN: *13.0*

Wt: *67*
 Tmp: *1002*
 Tmp: *1002*

Wt: *3.0*
 Tmp: *700*

Wt: *5.0*
 Tmp: *700*

Wt: *6.0*
 Tmp: *700*

Wt: *7.0*
 Tmp: *700*

Wt: *8.0*
 Tmp: *700*

Wt: *9.0*
 Tmp: *700*

Wt: *10.0*
 Tmp: *700*

Wt: *11.0*
 Tmp: *700*

Wt: *12.0*
 Tmp: *700*

Wt: *13.0*
 Tmp: *700*

Wt: *14.0*
 Tmp: *700*

Wt: *15.0*
 Tmp: *700*

Wt: *16.0*
 Tmp: *700*

Wt: *17.0*
 Tmp: *700*

Wt: *18.0*
 Tmp: *700*

Wt: *19.0*
 Tmp: *700*

Wt: *20.0*
 Tmp: *700*

Wt: *21.0*
 Tmp: *700*

Wt: *22.0*
 Tmp: *700*

Wt: *23.0*
 Tmp: *700*

Wt: *24.0*
 Tmp: *700*

Wt: *25.0*
 Tmp: *700*

Wt: *26.0*
 Tmp: *700*

Wt: *27.0*
 Tmp: *700*

Wt: *28.0*
 Tmp: *700*

Wt: *29.0*
 Tmp: *700*

Wt: *30.0*
 Tmp: *700*

Wt: *31.0*
 Tmp: *700*

Wt: *32.0*
 Tmp: *700*

Wt: *33.0*
 Tmp: *700*

Wt: *34.0*
 Tmp: *700*

Wt: *35.0*
 Tmp: *700*

Wt: *36.0*
 Tmp: *700*

Wt: *37.0*
 Tmp: *700*

Wt: *38.0*
 Tmp: *700*

Wt: *39.0*
 Tmp: *700*

Wt: *40.0*
 Tmp: *700*

Wt: *41.0*
 Tmp: *700*

Wt: *42.0*
 Tmp: *700*

Wt: *43.0*
 Tmp: *700*

Wt: *44.0*
 Tmp: *700*

Wt: *45.0*
 Tmp: *700*

Wt: *46.0*
 Tmp: *700*

Wt: *47.0*
 Tmp: *700*

Wt: *48.0*
 Tmp: *700*

Wt: *49.0*
 Tmp: *700*

Wt: *50.0*
 Tmp: *700*

Wt: *51.0*
 Tmp: *700*

Wt: *52.0*
 Tmp: *700*

Wt: *53.0*
 Tmp: *700*

Wt: *54.0*
 Tmp: *700*

Wt: *55.0*
 Tmp: *700*

Wt: *56.0*
 Tmp: *700*

Wt: *57.0*
 Tmp: *700*

Wt: *58.0*
 Tmp: *700*

Wt: *59.0*
 Tmp: *700*

Wt: *60.0*
 Tmp: *700*

Wt: *61.0*
 Tmp: *700*

Wt: *62.0*
 Tmp: *700*

Wt: *63.0*
 Tmp: *700*

Wt: *64.0*
 Tmp: *700*

Wt: *65.0*
 Tmp: *700*

Wt: *66.0*
 Tmp: *700*

Wt: *67.0*
 Tmp: *700*

Wt: *68.0*
 Tmp: *700*

Wt: *69.0*
 Tmp: *700*

Wt: *70.0*
 Tmp: *700*

Wt: *71.0*
 Tmp: *700*

Wt: *72.0*
 Tmp: *700*

Wt: *73.0*
 Tmp: *700*

Wt: *74.0*
 Tmp: *700*

Wt: *75.0*
 Tmp: *700*

Wt: *76.0*
 Tmp: *700*

Wt: *77.0*
 Tmp: *700*

Wt: *78.0*
 Tmp: *700*

Wt: *79.0*
 Tmp: *700*

Wt: *80.0*
 Tmp: *700*

Wt: *81.0*
 Tmp: *700*

Wt: *82.0*
 Tmp: *700*

Wt: *83.0*
 Tmp: *700*

Wt: *84.0*
 Tmp: *700*

Wt: *85.0*
 Tmp: *700*

Wt: *86.0*
 Tmp: *700*

Wt: *87.0*
 Tmp: *700*

Wt: *88.0*
 Tmp: *700*

Wt: *89.0*
 Tmp: *700*

Wt: *90.0*
 Tmp: *700*

Wt: *91.0*
 Tmp: *700*

Wt: *92.0*
 Tmp: *700*

Wt: *93.0*
 Tmp: *700*

Wt: *94.0*
 Tmp: *700*

Wt: *95.0*
 Tmp: *700*

Wt: *96.0*
 Tmp: *700*

Wt: *97.0*
 Tmp: *700*

Wt: *98.0*
 Tmp: *700*

Wt: *99.0*
 Tmp: *700*

Wt: *100.0*
 Tmp: *700*

Wt: *101.0*
 Tmp: *700*

Wt: *102.0*
 Tmp: *700*

Wt: *103.0*
 Tmp: *700*

Wt: *104.0*
 Tmp: *700*

Wt: *105.0*
 Tmp: *700*

Wt: *106.0*
 Tmp: *700*

Wt: *107.0*
 Tmp: *700*

Wt: *108.0*
 Tmp: *700*

Wt: *109.0*
 Tmp: *700*

Wt: *110.0*
 Tmp: *700*

Wt: *111.0*
 Tmp: *700*

Wt: *112.0*
 Tmp: *700*

Wt: *113.0*
 Tmp: *700*

Wt: *114.0*
 Tmp: *700*

Wt: *115.0*
 Tmp: *700*

Wt: *116.0*
 Tmp: *700*

Wt: *117.0*
 Tmp: *700*

Wt: *118.0*
 Tmp: *700*

Wt: *119.0*
 Tmp: *700*

Wt: *120.0*
 Tmp: *700*

Wt: *121.0*
 Tmp: *700*

Wt: *122.0*
 Tmp: *700*

Wt: *123.0*
 Tmp: *700*

Wt: *124.0*
 Tmp: *700*

Wt: *125.0*
 Tmp: *700*

Wt: *126.0*
 Tmp: *700*

Wt: *127.0*
 Tmp: *700*

Wt: *128.0*
 Tmp: *700*

Wt: *129.0*
 Tmp: *700*

Wt: *130.0*
 Tmp: *700*

Wt: *131.0*
 Tmp: *700*

Wt: *132.0*
 Tmp: *700*

Wt: *133.0*
 Tmp: *700*

Wt: *134.0*
 Tmp: *700*

Wt: *135.0*
 Tmp: *700*

Wt: *136.0*
 Tmp: *700*

Wt: *137.0*
 Tmp: *700*

Wt: *138.0*
 Tmp: *700*

Wt: *139.0*
 Tmp: *700*

Wt: *140.0*
 Tmp: *700*

Wt: *141.0*
 Tmp: *700*

Wt: *142.0*
 Tmp: *700*

Wt: *143.0*
 Tmp: *700*

Wt: *144.0*
 Tmp: *700*

Wt: *145.0*
 Tmp: *700*

Wt: *146.0*
 Tmp: *700*

Wt: *147.0*
 Tmp: *700*

Wt: *148.0*
 Tmp: *700*

Wt: *149.0*
 Tmp: *700*

Wt: *150.0*
 Tmp: *700*

Wt: *151.0*
 Tmp: *700*

Wt: *152.0*
 Tmp: *700*

Wt: *153.0*
 Tmp: *700*

Wt: *154.0*
 Tmp: *700*

Wt: *155.0*
 Tmp: *700*

Wt: *156.0*
 Tmp: *700*

Wt: *157.0*
 Tmp: *700*

Wt: *158.0*
 Tmp: *700*

Wt: *159.0*
 Tmp: *700*

Wt: *160.0*
 Tmp: *700*

Wt: *161.0*
 Tmp: *700*

Wt: *162.0*
 Tmp: *700*

Wt: *163.0*
 Tmp: *700*

Wt: *164.0*
 Tmp: *700*

Wt: *165.0*
 Tmp: *700*

Wt: *166.0*
 Tmp: *700*

Wt: *167.0*
 Tmp: *700*

Wt: *168.0*
 Tmp: *700*

Wt: *169.0*
 Tmp: *700*

Wt: *170.0*
 Tmp: *700*

Wt: *171.0*
 Tmp: *700*

Wt: *172.0*
 Tmp: *700*

Wt: *173.0*
 Tmp: *700*

Wt: *174.0*
 Tmp: *700*

Wt: *175.0*
 Tmp: *700*

Wt: *176.0*
 Tmp: *700*

Wt: *177.0*
 Tmp: *700*

Wt: *178.0*
 Tmp: *700*

Wt: *179.0*
 Tmp: *700*

Wt: *180.0*
 Tmp: *700*

Wt: *181.0*
 Tmp: *700*

Wt: *182.0*
 Tmp: *700*

Wt: *183.0*
 Tmp: *700*

Wt: *184.0*
 Tmp: *700*

Wt: *185.0*
 Tmp: *700*

Wt: *186.0*
 Tmp: *700*

Wt: *187.0*
 Tmp: *700*

Wt: *188.0*
 Tmp: *700*

Wt: *189.0*
 Tmp: *700*

Wt: *190.0*
 Tmp: *700*

Wt: *191.0*
 Tmp: *700*

Wt: *192.0*
 Tmp: *700*

Wt: *193.0*
 Tmp: *700*

Wt: *194.0*
 Tmp: *700*

Wt: *195.0*
 Tmp: *700*

Wt: *196.0*
 Tmp: *700*

Wt: *197.0*
 Tmp: *700*

Wt: *198.0*
 Tmp: *700*

Wt: *199.0*
 Tmp: *700*

Wt: *200.0*
 Tmp: *700*

Wt: *201.0*
 Tmp: *700*

Wt: *202.0*
 Tmp: *700*

Wt: *203.0*
 Tmp: *700*

Wt: *204.0*
 Tmp: *700*

Wt: *205.0*
 Tmp: *700*

Wt: *206.0*
 Tmp: *700*

Wt: *207.0*
 Tmp: *700*

Wt: *208.0*
 Tmp: *700*

Wt: *209.0*
 Tmp: *700*

Wt: *210.0*
 Tmp: *700*

Wt: *211.0*
 Tmp: *700*

Wt: *212.0*
 Tmp: *700*

Wt: *213.0*
 Tmp: *700*

Wt: *214.0*
 Tmp: *700*

Wt: *215.0*
 Tmp: *700*

Wt: *216.0*
 Tmp: *700*

Wt: *217.0*
 Tmp: *700*

Wt: *218.0*
 Tmp: *700*

Wt: *219.0*
 Tmp: *700*

Wt: *220.0*
 Tmp: *700*

Wt: *221.0*
 Tmp: *700*

Wt: *222.0*
 Tmp: *700*

Wt: *223.0*
 Tmp: *700*

Wt: *224.0*
 Tmp: *700*

Wt: *225.0*
 Tmp: *700*

Wt: *226.0*
 Tmp: *700*

Wt: *227.0*
 Tmp: *700*

Wt: *228.0*
 Tmp: *700*

Wt: *229.0*
 Tmp: *700*

Wt: *230.0*
 Tmp: *700*

Wt: *231.0*
 Tmp: *700*

Wt: *232.0*
 Tmp: *700*

Wt: *233.0*
 Tmp: *700*

Wt: *234.0*
 Tmp: *700*

Wt: *235.0*
 Tmp: *700*

Wt: *236.0*
 Tmp: *700*

Wt: *237.0*
 Tmp: *700*

Wt: *238.0*
 Tmp: *700*

Wt: *239.0*
 Tmp: *700*

Wt: *240.0*
 Tmp: *700*

Wt: *241.0*
 Tmp: *700*

Wt: *242.0*
 Tmp: *700*

Wt: *243.0*
 Tmp: *700*

Wt: *244.0*
 Tmp: *700*

Wt: *245.0*
 Tmp: *700*

Wt: *246.0*
 Tmp: *700*

Wt: *247.0*
 Tmp: *700*

Wt: *248.0*
 Tmp: *700*

Wt: *249.0*
 Tmp: *700*

Wt: *250.0*
 Tmp: *700*

Wt: *251.0*
 Tmp: *700*

Wt: *252.0*
 Tmp: *700*

Wt: *253.0*
 Tmp: *700*

Wt: *254.0*
 Tmp: *700*

Wt: *255.0*
 Tmp: *700*

Wt: *256.0*
 Tmp: *700*

Wt: *257.0*
 Tmp: *700*

Wt: *258.0*
 Tmp: *700*

Wt: *259.0*
 Tmp: *700*

Wt: *260.0*
 Tmp: *700*

Wt: *261.0*
 Tmp: *700*

Wt: *262.0*
 Tmp: *700*

Wt: *263.0*
 Tmp: *700*

Wt: *264.0*
 Tmp: *700*

Wt: *265.0*
 Tmp: *700*

Wt: *266.0*
 Tmp: *700*

Wt: *267.0*
 Tmp: *700*

Wt: *268.0*
 Tmp: *700*

Wt: *269.0*
 Tmp: *700*

Wt: *270.0*
 Tmp: *700*

Wt: *271.0*
 Tmp: *700*

Wt: *272.0*
 Tmp: *700*

Wt: *273.0*
 Tmp: *700*

Wt: *274.0*
 Tmp: *700*

Wt: *275.0*
 Tmp: *700*

Wt: *276.0*
 Tmp: *700*

Wt: *277.0*
 Tmp: *700*

Wt: *278.0*
 Tmp: *700*

Wt: *279.0*
 Tmp: *700*

Wt: *280.0*
 Tmp: *700*

Wt: *281.0*
 Tmp: *700*

Wt: *282.0*
 Tmp: *700*

Wt: *283.0*
 Tmp: *700*

Wt: *284.0*
 Tmp: *700*

Wt: *285.0*
 Tmp: *700*

Wt: *286.0*
 Tmp: *700*

Wt: *287.0*
 Tmp: *700*

Wt: *288.0*
 Tmp: *700*

Wt: *289.0*
 Tmp: *700*

Wt: *290.0*
 Tmp: *700*

Wt: *291.0*
 Tmp: *700*

Wt: *292.0*
 Tmp: *700*

Wt: *293.0*
 Tmp: *700*

Wt: *294.0*
 Tmp: *700*

Wt: *295.0*
 Tmp: *700*

Wt: *296.0*
 Tmp: *700*

Wt: *297.0*
 Tmp: *700*

Wt: *298.0*
 Tmp: *700*

Wt: *299.0*
 Tmp: *700*

Wt: *300.0*
 Tmp: *700*

Wt: *301.0*
 Tmp: *700*

Wt: *302.0*
 Tmp: *700*

Wt: *303.0*
 Tmp: *700*

Wt: *304.0*
 Tmp: *700*

Wt: *305.0*
 Tmp: *700*

Wt: *306.0*
 Tmp: *700*

Wt: *307.0*
 Tmp: *700*

Wt: *308.0*
 Tmp: *700*

Wt: *309.0*
 Tmp: *700*

Wt: *310.0*
 Tmp: *700*

Wt: *311.0*
 Tmp: *700*

Wt: *312.0*
 Tmp: *700*

Wt: *313.0*
 Tmp: *700*

Wt: *314.0*
 Tmp: *700*

Wt: *315.0*
 Tmp: *700*

Wt: *316.0*
 Tmp: *700*

Wt: *317.0*
 Tmp: *700*

Wt: *318.0*
 Tmp: *700*

Wt: *319.0*
 Tmp: *700*

Wt: *320.0*
 Tmp: *700*

Wt: *321.0*
 Tmp: *700*

Wt: *322.0*
 Tmp: *700*

Wt: *323.0*
 Tmp: *700*

Wt: *324.0*
 Tmp: *700*

Wt: *325.0*
 Tmp: *700*

Wt: *326.0*
 Tmp: *700*

Wt: *327.0*
 Tmp: *700*

Wt: *328.0*
 Tmp: *700*

Wt: *329.0*
 Tmp: *700*

Wt: *330.0*
 Tmp: *700*

Wt: *331.0*
 Tmp: *700*

Wt: *332.0*
 Tmp: *700*

Wt: *333.0*
 Tmp: *700*

Wt: *334.0*
 Tmp: *700*

Wt: *335.0*
 Tmp: *700*

Wt: *336.0*
 Tmp: *700*

Wt: *337.0*
 Tmp: *700*

Wt: *338.0*
 Tmp: *700*

Wt: *339.0*
 Tmp: *700*

Wt: *340.0*
 Tmp: *700*

Wt: *341.0*
 Tmp: *700*

Wt: *342.0*
 Tmp: *700*

Wt: *343.0*
 Tmp: *700*


Wt: *344.*

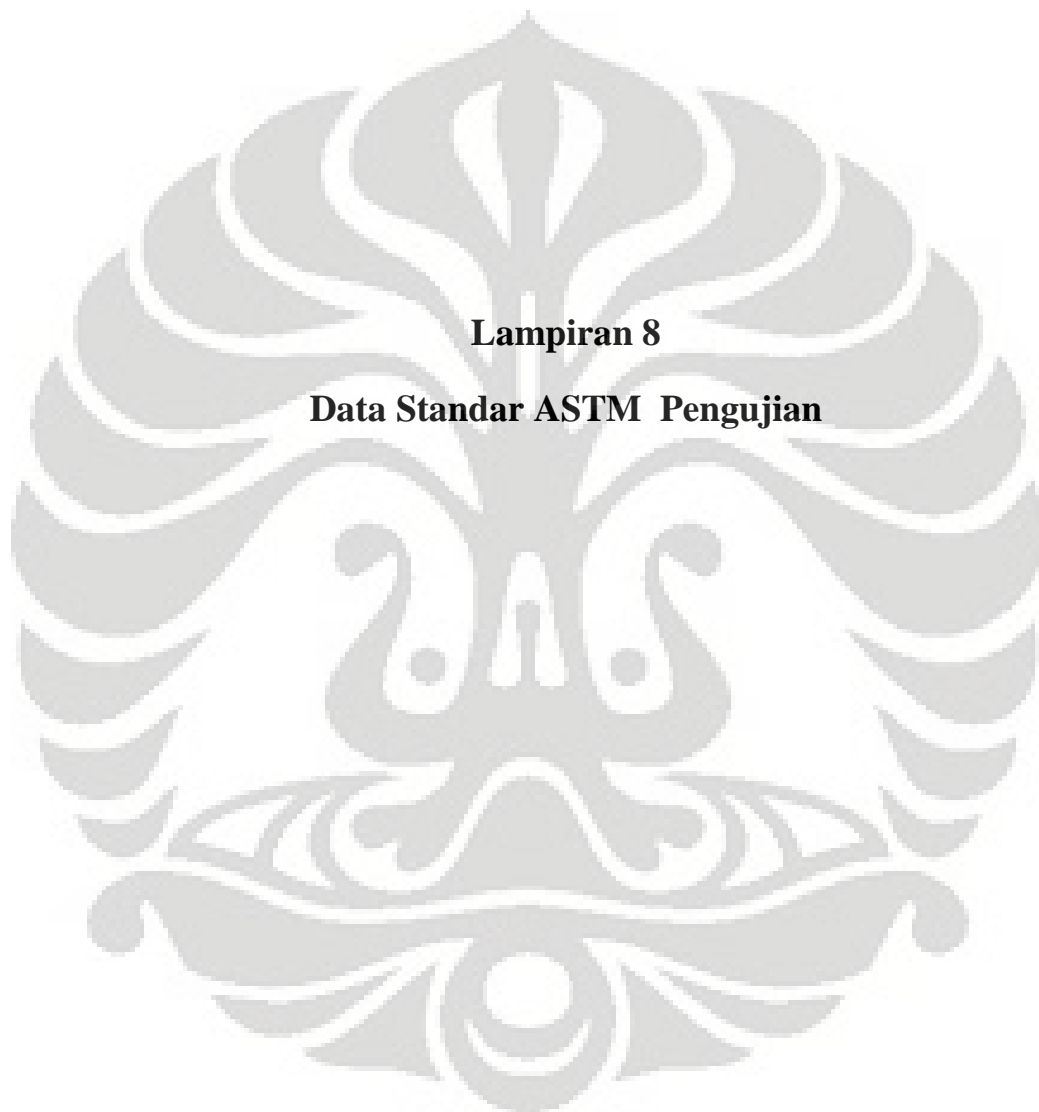
- Lanjutan -

Tanggal :
 Material : FCD 450
 Melting No :
 Batch No : 010990A

Target A

| Elemen | Standard | Actual | | |
|--------|-------------|--------|------|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| C | 3.70 - 3.80 | 3.76 | 3.86 | |
| Si | 1.30 - 1.60 | 1.46 | 1.52 | |
| Mn | 0.30 - 0.50 | 0.32 | 0.33 | |
| P | 0.03 Max | 0.02 | 0.02 | |
| S | 0.02 Max | 0.02 | 0.02 | |
| Cu | 0.15 Max | 0.12 | 0.12 | |
| Cr | 0.15 Max | 0.09 | 0.09 | |
| Ni | 0.15 Max | 0.06 | 0.06 | |
| Mg | 0.03 Min | | | |

wing Bracket




Lampiran 8
Data Standar ASTM Pengujian