

UNIVERSITAS INDONESIA

**PERBANDINGAN STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT
MEKANIS *THIN WALL DUCTILE IRON (TWDI)* DENGAN
*TEST PIECE Y BLOCK***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

IYUS YUSUP
0706200112

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Iyus Yusup

NPM : 0706200112

Tanda Tangan :

Tanggal : 28 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Iyus Yusup

NPM : 0706200112

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis *thin wall ductile iron* (TWDI) dengan *test piece y block*.

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

DEWAN PENGUJI

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

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir Johnny Wahyuadi, DEA ()

Penguji 2 : Rianti Dewi Sulamet Ariobimo ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan kenikmatan-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi yang berjudul **“Perbandingan Struktur Mikro dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) dengan *Test Piece Y Block*”** disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Metalurgi dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tugas skripsi ini.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Prof. Dr.-Ing.Ir. Bambang Suharno, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 2) Ibu Rianti Sulamet Ariobimo, selaku pembimbing dan teman selama pembuatan skripsi, yang telah bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberi pengarahannya dan bimbingan serta diskusi untuk menyelesaikan tugas skripsi ini;
- 4) Orang tua dan keluarga besar saya yang telah memberikan bantuan baik moral maupun material; dan
- 5) Para sahabat saya yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas skripsi ini.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semuanya.

Depok, 28 Desember 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Iyus Yusup
NPM : 0706200112
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 Noneklusif** (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis *thin wall ductile iron*
(TWDI) dengan *test piece y block***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Desember 2009

Yang menyatakan

(Iyus Yusup)

ABSTRAK

Nama : Iyus Yusup
Program Study : Teknik Metalurgi dan material
Judul : Perbandingan Struktur Mikro dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) dengan *Test Piece Y Block*

Aplikasi besi tuang nodular semakin meningkat sejak perkembangannya pada tahun 1940-an karena keunggulannya yang dapat diproduksi dengan biaya rendah dan memiliki sifat mekanis yang baik. Permintaan besi tuang nodular dinding tipis (*thin wall ductile iron*) semakin meningkat karena dapat memberikan komponen dengan kekuatan yang tinggi berbanding berat. Misalnya, dalam industri otomotif banyak menggunakan TWDI untuk menurunkan berat kendaraan sehingga energi yang digunakan menjadi lebih sedikit.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis thin wall ductile iron (TWDI) untuk ketebalan 5, 4, 3, 2 dan 1 mm dengan test piece y block. Sampel plat TWDI dan sampel y block dibuat dengan proses pengecoran logam. Material yang digunakan adalah FCD 45, *carbon equivalent* (CE) logam cair dijaga diatas 4,3%. Cetakan yang digunakan adalah pasir silika dengan pengikat asam furan.

Hasil penelitian menunjukkan sifat mekanis plat TWDI lebih rendah dibandingkan sampel y block. Hal ini membuktikan bahwa sifat mekanis ditentukan oleh struktur mikro yang terbentuk, struktur mikro yang terbentuk ditentukan oleh proses pengecoran logam seperti rancangan komposisi kimia, proses liquid treatment (inokulasi dan nodularisasi) dan sistem saluran untuk menentukan kecepatan pembekuan.

ABSTRACT

Name : Iyus Yusup
Major : Metallurgical and Material Engineering
Title : Comparison of Microstructure and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron (TWDI) with Test Piece Y Block

Application for ductile iron have increased steadily since its development in the 1940s due to its relatively low production cost and have a good mechanical properties. The demand of Thin Wall Ductile Iron (TWDI) is getting increase because it could provide component with high strength to weight ratio. For example, the automotive industries are utilizing thin wall ductile iron to reduce vehicle weight thus reduce energy consumption.

On this research would be conducted analysis on comparison of microstructure and mechanical properties of Thin Wall Ductile Iron (TWDI) for different thickness, which are 5, 4, 3, 2 and 1 mm in size with test piece of y block. Specimen of TWDI and specimen of y block are produced with casting process. Material for this casting is FCD 45, *Carbon Equivalent* (CE) value of molten metal hold out above 4,3%. Molding for the material is silica sand with furan acid as bonding agent.

According to the result of research, mechanical properties of thin wall ductile iron specimen is lower than y block specimen. It indicates that mechanical properties is determined by microstructure. Meanwhile the microstructure is determined by casting process, which are design of chemical composition, liquid treatment process (inoculation and nodularization), and design of getting system for determining cooling rates.

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAE LAMPIRAN	xi
I. PENDAHULUAN 1	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	2
I.3 Tujuan Penelitian	3
I.4 Hipotesis	3
I.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
II. DASAR TEORI 5	
II.1 Pengecoran Logam	5
II.2 Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>)	5
II.3 Besi Tuang Nodular (BTN)	6
II.3. 1 Jenis Besi Tuang Nodular	6
II.3.2 Faktor Pengaruh Pada Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular	7
II.3.3 Pengecoran Besi Tuang Nodular	9
II.3.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular	10
II.3.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)	12
III. METODOLOGI PENELITIAN 18	
III.1 Diagram Alir Penelitian	18
III.2 Alat dan Bahan	20
III.2.1 Alat	20
III.2.2 Bahan	21
III.3 Prosedur Penelitian	22
III.3.1 Pembuatan Desain Sistem Saluran (<i>getting system</i>)	22
III.3.2 Pembuatan Cetakan	23
III.3.3 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam	24
III.3.3.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)	24
III.3.3.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)	25
III.3.4 Penuangan Cairan Logam (<i>Pouring</i>)	26
III.3.5 Preparasi Sampel	26
III.3.5.1 Preparasi Sampel Uji Komposisi Kimia	29

III.3.5.2 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro	29
III.3.5.3 Preparasi Uji Kekerasan	30
III.3.5.4 Preparasi Uji Tarik	30
III.3.6 Pengujian	31
III.3.6.1 Uji Komposisi Kimia	31
III.3.6.2 Pengamatan Struktur Mikro	31
III.3.6.3 Pengujian Tarik	33
III.3.6.4 Pengujian Kekerasan	33
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	35
IV.1 Pengujian Komposisi Kimia	35
IV.2 Pengamatan Visual	37
IV.3 Pengamatan Struktur Mikro	37
IV.3.1 Nodularitas	43
IV.3.2 Jumlah Nodul	45
IV.3.3 Diameter Rata-rata Nodul	46
IV.4 Uji Mekanik	48
IV.4.1 Uji Tarik	48
IV.4.2 Uji Kekerasan	50
V. KESIMPULAN	52
DAFTAR REFERENSI	53
LAMPIRAN	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar I.1 Perbandingan berat relatif terhadap kekuatan luluh beberapa material	1
Gambar II.1 Diagram Fe-Fe ₃ C	5
Gambar II.2 Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN.....	7
Gambar II.3 Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital)	13
Gambar II.4 Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital)	13
Gambar III.1 Desain sistem saluran model T1.....	18
Gambar III.2 Diagram alir penelitian	19
Gambar III.3 Desain pengecoran Stefanescu.....	22
Gambar III.4 <i>Pattern plate</i>	23
Gambar III.5 Penggabungan dua sisi cetakan(<i>merger</i>).....	24
Gambar III.6 Metoda pengambilan sampel pegujian untuk plat.....	27
Gambar III.7 Metode pengambilan sampel pegujian untuk y blok.....	27
Gambar III.8 Metode penamaan sampel.....	28
Gambar III.9 Sampel hasil <i>mounting</i>	29
Gambar III.10 <i>Tensile strength machine</i>	33
Gambar III.11 Skema penjejakan dan pengukuran jejak.....	34
Gambar IV.1 Nilai CE untuk beberapa jenis material.....	36
Gambar IV.2 Struktur mikro (Non-etsa, pembesaran 200X).....	39
Gambar IV.3 Struktur mikro (Etsa nital, pembesaran 200X).....	41
Gambar IV.4 Struktur mikro y <i>block</i> , etsa natal.....	42
Gambar IV.5 Grafik perbandingan nodularitas terhadap ketebalan.....	43
Gambar IV.6 Grafik perbandingan nodularitas P5T1D vs y <i>block</i>	44
Gambar IV.7 Grafik perbandingan jumlah nodul.....	45
Gambar IV.8 Grafik perbandingan jumlah nodul P5T1D dengan y <i>block</i> ..	46
Gambar IV.9 Grafik perbandingan diameter nodul.....	46
Gambar IV.10 Grafik perbandingan diameter nodul P5T1D vs Y <i>block</i>	47
Gambar IV.11 Grafik perbandingan kekuatan tarik	48
Gambar IV.12. Grafik perbandingan kekuatan tarik P5T1D vs Y <i>block</i>	48

Gambar IV.13 Grafik perbandingan elongasi terhadap ketebalan.....	49
Gambar IV.14 Grafik perbandingan elongasi sampel P5T1D terhadap <i>y block</i>	50
Gambar IV.15 Grafik perbandingan nilai kekerasan.....	50
Gambar IV.16 Grafik perbandingan nilai kekerasan P5T1D vs <i>Y block</i>	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil pengecoran sebelum pemotongan	55
Lampiran 2 Sampel hasil pengecoran	57
Lampiran 3 Data Pengujian Dimensi.....	59
Lampiran 4 Struktur Mikro.....	60
Lampiran 5 Data Uji Tarik.....	73
Lampiran 6 Grafik Uji Tarik.....	74
Lampiran 7 Data Uji Kekerasan.....	75

BAB I

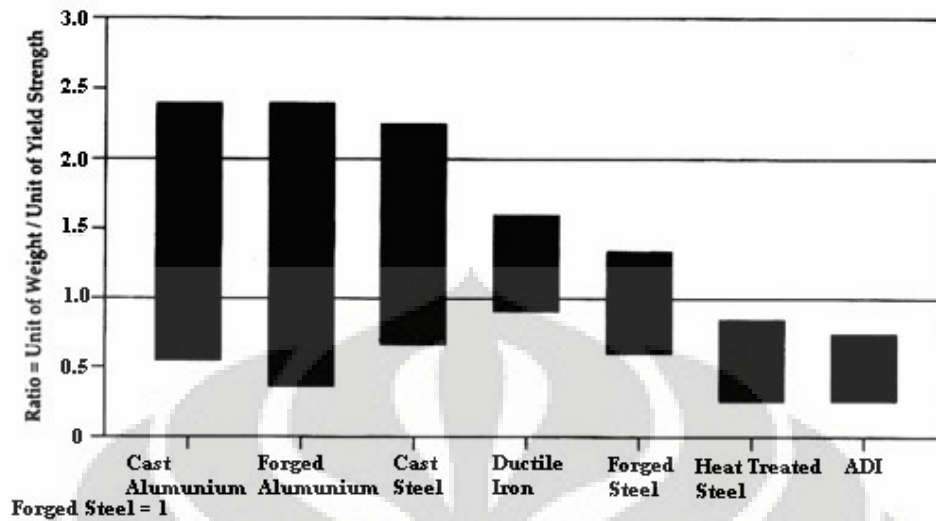
PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Besi tuang nodular adalah besi tuang yang mempunyai grafit bulat yang tersebar dalam matrik ferrit dan perlit. Besi tuang nodular banyak digunakan terutama dalam industri otomotif. Aplikasi besi tuang nodular semakin meningkat sejak perkembangannya pada tahun 1940-an karena keunggulannya yang dapat diproduksi dengan biaya rendah dan memiliki sifat mekanis yang baik^[1].

Seiring dengan adanya isu dunia tentang penghematan energi, maka penggunaan material ringan merupakan salah satu upaya untuk mendukung penghematan energi^{[2][3]}. Dengan pengurangan berat kendaraan sebesar 250 pon (113.6 kg) sama saja dengan menghemat bahan bakar 1 mpg (0.425 km/l)^[1]. Oleh karena itu, sebuah alternatif untuk mengurangi berat benda, dikembangkan industri besi tuang melalui pengecoran yang dikenal dengan pengecoran besi tuang nodular dinding tipis (*thin wall ductile iron-TWDI*). Permintaan untuk besi tuang nodular dinding tipis meningkat pada sebagian besar industri. Hal ini disebabkan karena pengecoran TWDI dapat menghasilkan komponen dengan kekuatan tinggi terhadap rasio beratnya. Proses pengecoran dinding tipis (*thin wall casting-TWC*) yang didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal kurang dari 5 mm^[1]. Ketebalan terakhir yang sudah dapat dicapai oleh TWC untuk FCD adalah 1,4 mm^[4].

Besi tuang nodular tidak hanya material yang ekonomis, tetapi juga tidak kalah dari aluminium dalam sebagian besar bidang, berdasarkan berat relatif per unit kekuatan luluhnya^[2], Gambar 1.3.



Gambar I.1. Perbandingan berat relatif terhadap kekuatan luluh beberapa material

I.2 Perumusan Masalah

Sifat mekanis besi tuang nodular tergantung dari struktur mikro yang terbentuk pada material tersebut. Struktur mikro yang diinginkan dapat kita tentukan dengan cara perancangan komposisi kimia, perancangan proses pengecoran dan perancangan perlakuan panas.

Setiap ketebalan benda tuang mempunyai laju pembekuan yang berbeda sehingga struktur mikro dan sifat mekanis yang terbentuk pun berbeda. Untuk mengetahui pengaruh perbedaan ketebalan benda tuang terhadap sifat mekanis besi tuang nodular (FCD 450), cairan logam FCD 450 dituangkan kedalam cetakan yang berisi plat tipis dan cetakan yang berisi y blok, kemudian dilakukan analisa perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis plat dengan y blok.

Pengecoran benda tipis berkaitan erat dengan kecepatan pembekuan yang tinggi sehingga keberadaan struktur karbida merupakan masalah penting yang harus diperhatikan. Masalah tersebut tentunya akan mempengaruhi sifat mekanis benda. *Carbon equivalent* (CE), adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. *Carbon equivalent* (CE) ditentukan dengan pengaturan komposisi kimia, yaitu unsur karbon dan silikon.

Bentuk (*nodularity*) dan jumlah nodul (*nodule count*) dari grafit menjadi faktor yang harus diperhatikan dalam besi tuang nodular sebagai bahan baku ADI.

Hal ini disebabkan karena untuk mendapatkan ADI yang baik maka harus dihasilkan besi tuang nodular yang baik juga kualitasnya. Bentuk dan jumlah nodul ini dapat menjadi masalah karena berhubungan dengan proses *liquid treatment*, yakni nodularisasi dan inokulasi yang memiliki temperatur dan waktu efektif spesifik. Selain itu, karena penelitian ini merupakan penelitian pengecoran benda tipis maka faktor temperatur tuang (*pouring*) juga harus diperhatikan. Temperatur tuang dinaikan guna mendapatkan benda tipis, agar logam cair mengalir memenuhi cetakan. Oleh karena itu desain pengecoran menjadi sangat penting untuk dapat mengontrol kecepatan pendinginan dan temperatur dalam cetakan.

I.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

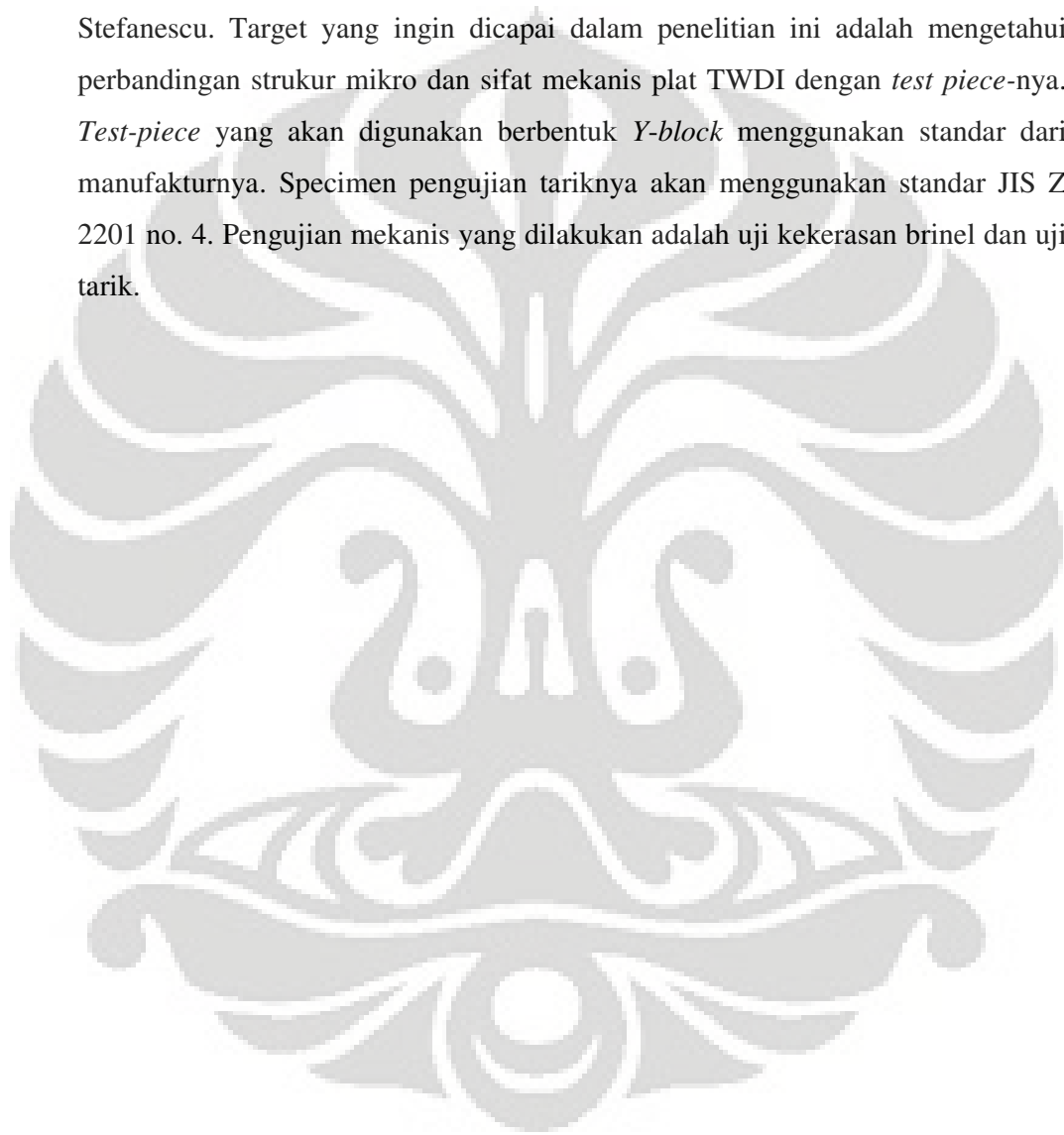
1. Mengetahui pengaruh ketebalan plat pada pengecoran TWDI terhadap struktur mikro dan sifat mekanis.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan ketebalan y block terhadap struktur mikro dan sifat mekanis.
3. Membandingkan struktur mikro dan sifat mekanis plat TWDI dengan y block.

I.4 Hipotesis

Untuk mendapatkan pengecoran TWDI yang mempunyai sifat mekanis yang baik, dapat dicapai dengan beberapa hal diantaranya yaitu; pengaturan komposisi kimia terutama unsur karbon dan silikon, proses nodularisasi, inokulasi dan pengaturan kecepatan pendinginan dengan cara perancangan tata letak sistem saluran masuk. Perbedaan ketebalan benda tuang dalam pengecoran memberikan pola perpindahan panas yang berbeda dan akan dilihat dari struktur mikro yang terbentuk.

I.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini merupakan awal dari penelitian-penelitian lanjutan untuk memperoleh peralatan atau komponen ADI dinding tipis. Pada penelitian ini baru dilakukan penelitian pembuatan material dinding tipis FCD 1 mm menggunakan proses pengecoran vertikal dengan modifikasi dari desain sistim saluran tuang Stefanescu. Target yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mengetahui perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis plat TWDI dengan *test piece*-nya. *Test-piece* yang akan digunakan berbentuk *Y-block* menggunakan standar dari manufakturnya. Specimen pengujian tariknya akan menggunakan standar JIS Z 2201 no. 4. Pengujian mekanis yang dilakukan adalah uji kekerasan brinell dan uji tarik.



BAB II

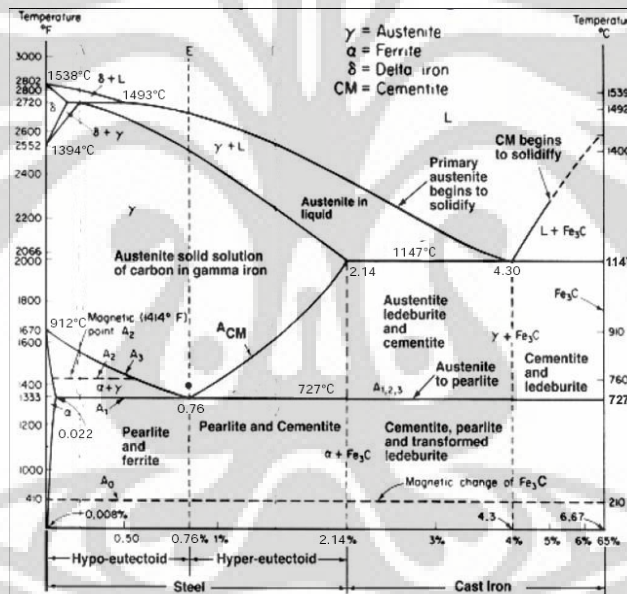
LANDASAN TEORI

II.1 Pengecoran Logam

Pengecoran logam adalah salah satu metode pembentukan logam dengan cara mencairkan logam lalu menuangkannya kedalam rongga cetakan.^[5]

II.2 Besi Tuang (*Cast Iron*)

Besi tuang merupakan kelompok paduan besi dengan kandungan karbon di atas 2,14%, Gambar 2.1, yang dibuat melalui proses pengecoran logam. Namun demikian, kebanyakan besi tuang mengandung karbon antara 3,0 sampai 4,5%, dan ditambahkan dengan unsur paduan yang lain.^[6]



Gambar II.1 Diagram Fe-Fe₃C^[6]

Pada dasarnya, besi tuang (*cast iron*) dikelompokkan menjadi lima jenis,

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

II.3 Besi Tuang Nodular (BTN)

Besi tuang nodular atau *ferro casting ductile* (FCD) adalah besi tuang yang mempunyai bentuk grafit bulat dalam matrik ferrit dan perlit. Jenis besi tuang ini memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang lainnya, karena memiliki bentuk grafit berupa bulatan-bulatan. Besi tuang nodular dapat ditingkatkan kekuatannya melalui proses perlakuan panas menjadi *austempered ductile iron* (ADI). BTN memberikan banyak kombinasi sifat terbaik secara keseluruhan. Keragaman sifat BTN antara lain memberikan pilihan dengan keuletan tinggi, elongasi sebesar 18% (pada *grade* tertentu), atau kekuatan tinggi sampai melampaui 120 ksi (825 MPa). Bahkan, ADI memberikan sifat mekanik yang lebih besar serta ketahanan aus dengan kekuatan tarik melebihi 230 ksi (1600 MPa).^[7]

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.^[8] Berdasarkan standar ASTM A395, kebanyakan spesifikasi standar dari BTN mensyaratkan nilai kekuatan dan keuletan minimum.^[9]

II.3.1 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 bentuk matrik, BTN dikelompokkan menjadi 7 kelompok,^[7] yaitu:

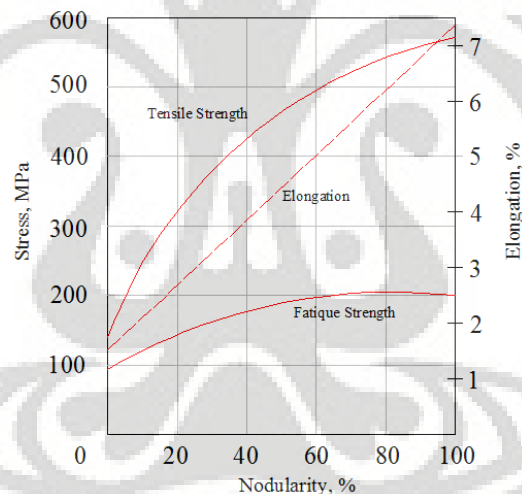
1. Besi Ulet Feritik (*Ferritic Ductile Iron*)
2. Besi Ulet Feritik-Perlitik (*Ferritic-Pearlitic Ductile Iron*)
3. Besi Ulet Perlitik (*Pearlitic Ductile Iron*)
4. Besi Ulet Martensitik (*Martensitic Ductile Iron*)
5. Besi Ulet Bainitik (*Bainitic Ductile Iron*)
6. Besi Ulet Austenitik (*Austenitic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

II.3.2 Faktor Pengaruh Pada Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

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

1. Struktur grafit

Grafit adalah karbon bebas yang berada dalam besi tuang. Grafit mempunyai kekerasan sekitar 1 HB dan masa jenis 2,2 kg/dm³. Bentuk grafit pada besi tuang kelabu berbentuk serpihan tajam. Sedangkan pada besi tuang nodular berbentuk bulat disebabkan oleh penambahan magnesium (atau magnesium dan cerium) pada logam cair. Sifat mekanis material yang mempunyai grafit bulat lebih baik dibandingkan dengan material yang mempunyai grafit dengan bentuk lain. Sifat yang berhubungan dengan kekuatan dan keuletan menurun jika proporsi dari grafit non-nodular meningkat, Gambar II.3.^[10]



Gambar II.2. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik BTN^[11]

2. Jumlah grafit

Ketika jumlah grafit meningkat, kekuatan dan elongasi relatif menurun, serta modulus elastisitas dan densitas yang menurun pula. Pada umumnya, pengaruh-pengaruh ini adalah kecil jika dibandingkan dengan pengaruh dari variabel lainnya, karena kandungan karbon ekuivalen pada besi nodular bukan variabel utama dan pada umumnya dijaga tetap pada nilai eutektik.^[10]

3. Struktur matrik

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi BTN adalah struktur matrik. Pada hasil *as-cast*, matrik akan terdiri dari perlit dan ferit, dan ketika jumlah perlit meningkat, kekuatan dan kekerasan juga meningkat. Struktur matrik dapat diubah dengan perlakuan panas, dan yang sering dilakukan adalah proses anil untuk menghasilkan matrik feritik penuh dan *normalizing* untuk menghasilkan matrik perlitik.^[10] Ferit adalah larutan padat besi α yang mempunyai kekerasan sekitar 60 HB dan mampu tarik sekitar 200 N/mm². Perlit yaitu lapisan ferit dan sementit (88% ferit dan 12% sementit), mempunyai kekerasan sekitar 250 HB. Sementit yaitu senyawa kimia antara besi dan karbon (Fe_3C), mempunyai kekerasan sekitar 800 HV.

4. Ukuran ketebalan

Ketika ukuran ketebalan menurun, kecepatan pendinginan dalam cetakan meningkat. Pada ketebalan yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampumesinan dan menyebabkan kegetasan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inokulan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi.^[10] Sedangkan, ketika ukuran ketebalan meningkat, jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih susah. Hal ini menghasilkan ukuran nodul yang besar, pengurangan jumlah ferit pada hasil *as-cast*, dan peningkatan ketahanan terhadap pembentukan struktur feritik penuh ketika proses anil.^[10]

5. Komposisi Paduan

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

1. Karbon (C)

Jumlah elemen karbon optimum pada 3,4 - 3,8% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Komposisi karbon di atas jangkauan tersebut dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi. Kandungan karbon yang tinggi akan mengurangi deformasi plastik yang

dibutuhkan untuk *void* tumbuh dan bergabung, sedangkan kandungan karbon yang berkurang akan meningkatkan keuletan dan elongasi besi tuang nodular feritik.^[7]

2. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Jumlah kandungan silikon optimum pada 2,0 - 2,8%. Kadar yang lebih rendah menyebabkan keuletan meningkat ketika dilakukan perlakuan panas dan membahayakan karena terbentuk karbida pada bagian yang tipis. Sedangkan, kadar silikon tinggi mempercepat anil dan mencegah pembentukan karbida pada bagian tipis.

3. Mangan (Mn)

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

4. Magnesium (Mg)

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

5. Sulfur (S)

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

II.3.3 Pengecoran Besi Tuang Nodular

Besi tuang nodular dibentuk dari pengecoran besi tuang yang dilakukan proses perlakuan cairan (*liquid treatment*). Proses perlakuan cairan adalah usaha penambahan bahan ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat dari logam yang akan dihasilkan. Pada pembentukan besi tuang nodular ada 2 perlakuan cairan yang dialami, yaitu nodularisasi dan inokulasi.^[11]

1) Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) dan atau sesium (Ce) ke dalam logam cair pada temperatur 1450 - 1510°C yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular.^[10] Nodulan yang sering digunakan adalah unsur magnesium (*Mgtreatment*) karena Mg lebih murah dan mudah diperoleh.

2) Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit, sehingga grafit yang terbentuk semakin banyak. Proses ini dilakukan sebelum nodulasi. Selain untuk pembentukan grafit, inokulasi juga berfungsi dalam:

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

II.3.4 Pengecoran Dinding Tipis Besi Tuang Nodular

Selain dengan cara mengganti material yang berat dengan material yang ringan seperti aluminium dan magnesium, jika dikaitkan dengan kebutuhan untuk penggunaan berat yang ringan – *light weight*, maka salah satu cara untuk memenuhinya adalah dengan menipiskan ketebalan benda cor. Namun, kendala utama yang akan dihadapi pada pengecoran FCD dalam proses penipisan adalah terbentuknya karbida. Pengecoran dinding tipis didefinisikan sebagai pengecoran dengan ketebalan maksimal 5 mm.^[12] 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.^[13] Javaid mencoba untuk melihat hubungan ketebalan cor dengan komposisi kimia terhadap nilai impak. Ketebalan yang digunakannya adalah 12 mm dan 3

mm. Hasil yang diperoleh adalah perubahan komposisi kimia lebih berpengaruh pada ketebalan cor yang tebal, dalam hal ini 12 mm. Dengan menggunakan 2 sistem penuangan (*pouring*), yaitu: penuangan horisontal dan penuangan vertikal, Stefanescu mencoba membuat ketebalan minimal untuk plat (100X25)mm, 1,5 mm untuk penuangan horisontal dan 2,5 mm untuk penuangan vertikal. Setelah dilakukan pengujian dan datanya dibandingkan, ternyata tidak ditemukan karbida pada penuangan vertikal dan sifat mekanis pada penuangan vertikal lebih terjamin dari pada penuangan horisontal.^[2] 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.^[14] Schrems melakukan penelitian untuk melihat hubungan antara ketebalan benda cor dengan sifat-sifat mekanis yang dimiliki benda cor tersebut. Ketebalan minimal yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1,7 mm. Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa tegangan tarik maksimal berbanding terbalik terhadap ketebalan dinding cor dan regangan berbanding lurus dengan ketebalan dinding cor.^[1] Penelitian tentang parameter-parameter yang mempengaruhi sifat mekanik dilakukan oleh Caldera. Dalam penelitiannya, Caldera mengamati pengaruh jumlah nodul terhadap kekuatan fatik pada material besi tuang nodular feritik dengan menggunakan metode pengecoran horisontal dan vertikal. Hasil yang dicapai adalah peningkatan jumlah nodul menyebabkan peningkatan kekuatan fatik.^[12] 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] Pengaruh penambahan logam tanah jarang telah dilakukan oleh Choi. Ketebalan minimal

yang dicapai adalah 2 mm dengan menggunakan cetakan pasir. Hasil yang dicapai adalah penggunaan logam tanah jarang menyebabkan kenaikan jumlah nodul dan nodularitas.^[16] Selain itu, Labreque melakukan optimalisasi sifat mekanik terhadap pengecoran dinding tipis BTN melalui penggunaan komposisi pasir cetak. Jenis cetakan yang digunakan adalah LDASC dan ketebalan yang dicapai 3 mm. Hasil yang dicapai adalah komposisi pasir cetak menjadi salah satu parameter penting untuk membuat dinding tipis.^[17] Ketebalan cor yang paling minim yang pernah dibuat adalah 1,4 mm, dicapai oleh Ruxanda di dalam penelitiannya yang bertujuan melihat pengaruh ketebalan dinding benda cor terhadap struktur mikro. Dari hasil penelitiannya ini diperoleh kesimpulan bahwa jumlah dan ukuran nodul berhubungan erat dengan jarak antar partikel (λG), jika jumlah dan ukuran nodul naik maka λG berkurang.^[4]

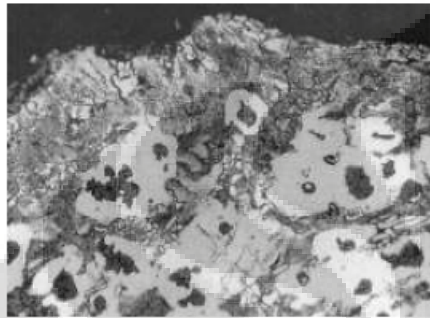
II.3.5 Pengontrolan Sifat Besi Tuang Nodular (BTN)

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

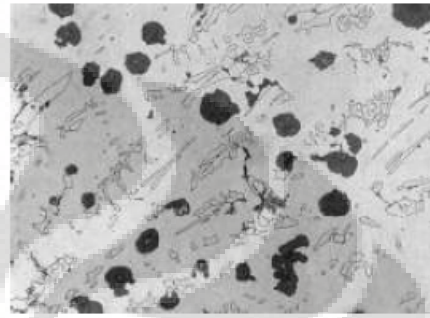
1. Pembentukan Karbida

Dalam proses solidifikasi besi tuang, selain terbentuk grafit bebas juga mempunyai kecenderungan terbentuknya struktur karbida. Pada pengecoran besi tuang nodular (BTN), struktur karbida (Fe_3C) adalah salah satu bentuk cacat secara metalurgi^[18] 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.^[19] 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 dapat dihilangkan dengan melakukan proses perlakuan panas (*heat treatment*) dengan temperatur proses lebih kurang 900°C.^[20] 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*.^[19]



Gambar II.3. Karbida primer dalam bentuk partikel putih di dalam matrik (400X, etsa Nital)^[19]



Gambar II.4. Karbida primer dalam matrik ferit (400X, etsa Nital)^[19]

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.^[19] 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*),

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.^[2] Parameter-parameter yang mempengaruhi tendensi ini menurut

Stefanescu adalah: karakteristik dari logam cair, *liquid treatment*, cetakan, dan desain dari sistem pengecoran. Pada karakteristik logam cair, komposisi kimia dan temperatur tuang (*pouring temperature*) adalah 2 unsur penting yang harus diperhatikan. Sedangkan pada proses *liquid treatment* yang mempengaruhi adalah peristiwa nodulasi dan inokulasi. Untuk cetakan, hal-hal yang harus diperhatikan adalah temperatur cetakan dan kemampuan penghantaran panas dari cetakan dan lapisannya.^[2] Menurut Ruxanda parameter-parameter yang mempengaruhi pembentukan karbida adalah: kecepatan pendinginan yang tinggi dan pemanasan yang terlalu tinggi,^[4] keberadaan unsur pembentuk karbida dalam bahan baku, rendahnya *carbon equivalent* (CE),^[4] 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] Sedangkan menurut Massone untuk memperoleh TWDI yang harus diperhatikan adalah desain cetakan yang memungkinkan terjadinya *soundness casting* dan kondisi logam cair sebelum tuang sehingga dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen dan bersih dari karbida.^[2]

2. Nilai *Carbon Equivalent* (CE)

Pada penelitian-penelitian terdahulu, *carbon equivalent* (CE) adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Menurut Loper, nilai CE untuk ketebalan benda tuang (10-30) mm agar bersih dari struktur karbida adalah (4,35 – 4,65)%.^[2] 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.^[2] Stefanescu dengan menjaga unsur-unsur lain, seperti Mn, P, S, dan Cr, berhasil membuat struktur mikro TWDI bersih dari karbida dengan nilai CE yang lebih rendah.^[2] 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%.^[2] QIT merekomendasikan

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

$$CE = 4,9265 - 0,0425 \times t \quad (\text{II.1})$$

dengan t adalah ketebalan benda.^[2]

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

$$CE = \%C + 0,31\%Si \quad (\text{II.2})$$

Javaid berhasil membuat TWDI bebas karbida dengan ketebalan 3 mm dalam cetakan pasir dengan nilai CE (4,5 – 5,08)%.^[4] Labreque dengan menggunakan inoculan yang mengandung Bi dan Ce berhasil membuat TWDI 3 mm dengan nilai CE (4,6 – 4,9)%.^[17] Sedangkan Dogan membuat plat berketebalan (1,5 – 9) mm dengan menggunakan nilai CE (4,7 – 4,8)%.^[22] Setelah dilakukan suatu *literature review* maka direkomendasikan menggunakan nilai CE (4,45 – 4,9)% untuk membuat TWDI dengan ketebalan di bawah 5 mm dengan menggunakan cetakan pasir.

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

$$CE = \%C + 0,31\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \quad (\text{II.3})$$

TWDI yang menjadi bahan baku untuk pembuatan ADI harus memiliki nilai CE (4,4 – 4,6)%.^[23] 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.^[3]

3. Lapisan Efek Kulit (*Skin Effect*)

Pada bagian tepi, struktur mikro TWDI terbentuk suatu lapisan yang terdiri atas grafit yang berbentuk serpih atau vermikular. Lapisan ini diberi nama *flake graphite rim anomaly*^[4] atau *skin effect*.^[24] Ketebalan lapisan maksimum yang pernah dicapai adalah 200 μm atau 0,2 mm.^[4] Lapisan ini sangat mengganggu sifat tarik dan biasanya dihilangkan dengan proses permesinan.^[25] Pada analisisnya, Ruxanda menemukan adanya perbedaan kadar Mg pada daerah tepi

dengan daerah tengah. Perbedaan inilah yang dianggap bertanggung jawab atas terjadinya perbedaan bentuk grafit. Perbedaan kadar Mg ini diperkirakan terjadi sebagai akibatnya oksidasi Mg. Selain itu ada pula pendapat yang menyatakan bahwa terjadinya efek kulit adalah sebagai akibat berikatannya Mg dengan S.^[4]

Aufderheiden mencoba menghilangkan efek kulit ini dengan mencampurkan *low density alumina silicate ceramic* (LDASC) dengan pasir cetakan. Kesimpulan yang diperolehnya antara lain adalah, untuk kehomogenan struktur mikro pada permukaan dan inti maka kecepatan pendinginan harus dijaga.^[24]

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

Bentuk grafit dalam besi tuang nodular, pada awalnya, ditentukan oleh nodularitas dan jumlah nodulnya. Nodularitas didefinisikan sebagai kebulatan dari grafit. Disebut sebagai nodul bila bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2 kali diameternya.^[25] Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan pada pembesaran mikroskop 100x.^[25] Pada tahap awal keduanya ditentukan dengan membandingkan foto struktur mikro non etsa dengan pembesaran (M) 100X dengan diagram yang dikeluarkan oleh AFS dan DIS. Kenodulan juga dapat ditentukan dengan melihat pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap jenis grafit yang ada dan dinyatakan dalam bentuk persentase.

Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \quad (\text{II,4})$$

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

Kemudian dengan bantuan *image analysis* perhitungan nodularitas dikembangkan menjadi sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{A_{Acc.}}{A_{Acc.} + A_{Un.Acc}} \times 100\% \quad (\text{II},5)$$

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

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

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

1. Menurut *sphericity* (S)

$$S = \frac{4\pi \times A}{(\text{perimeter})^2} \quad (\text{II},6)$$

2. Menurut *compactness* (C)

$$C = \frac{4\pi \times A}{(\text{conveksparameter})^2} \quad (\text{II},7)$$

Berdasarkan konveksi maka untuk dapat dihitung nilai $S > 0,65$ dan nilai $C > 0,7$.^[4]

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. Sedangkan kekerasan meningkat ketika nilai nodularitas dan jumlah nodul menurun.^[7]

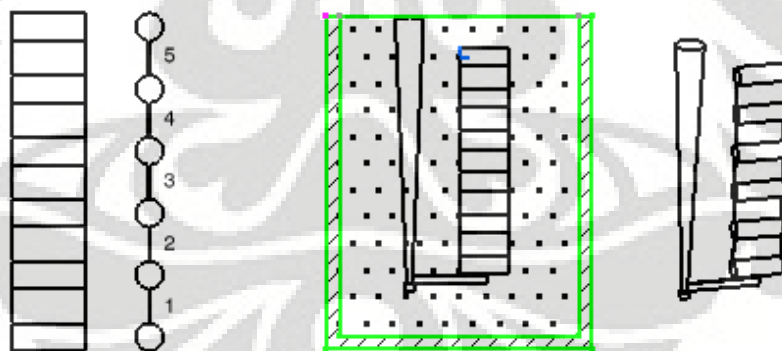
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian tahap kedua dari suatu rangkaian penelitian dengan tujuan pembuatan TWDI yang memiliki persyaratan untuk dijadikan ADI. Selanjutnya penelitian ini difokuskan pada perbandingan struktur mikro dan sifat mekanis TWDI dengan *test piece y block*. Data hasil perbandingan ini akan digunakan untuk menganalisa pengaruh perbedaan ketebalan terhadap struktur mikro dan sifat mekanis besi tuang nodular sehingga didapatkan parameter pengecoran yang tepat untuk pengecoran TWDI selanjutnya.

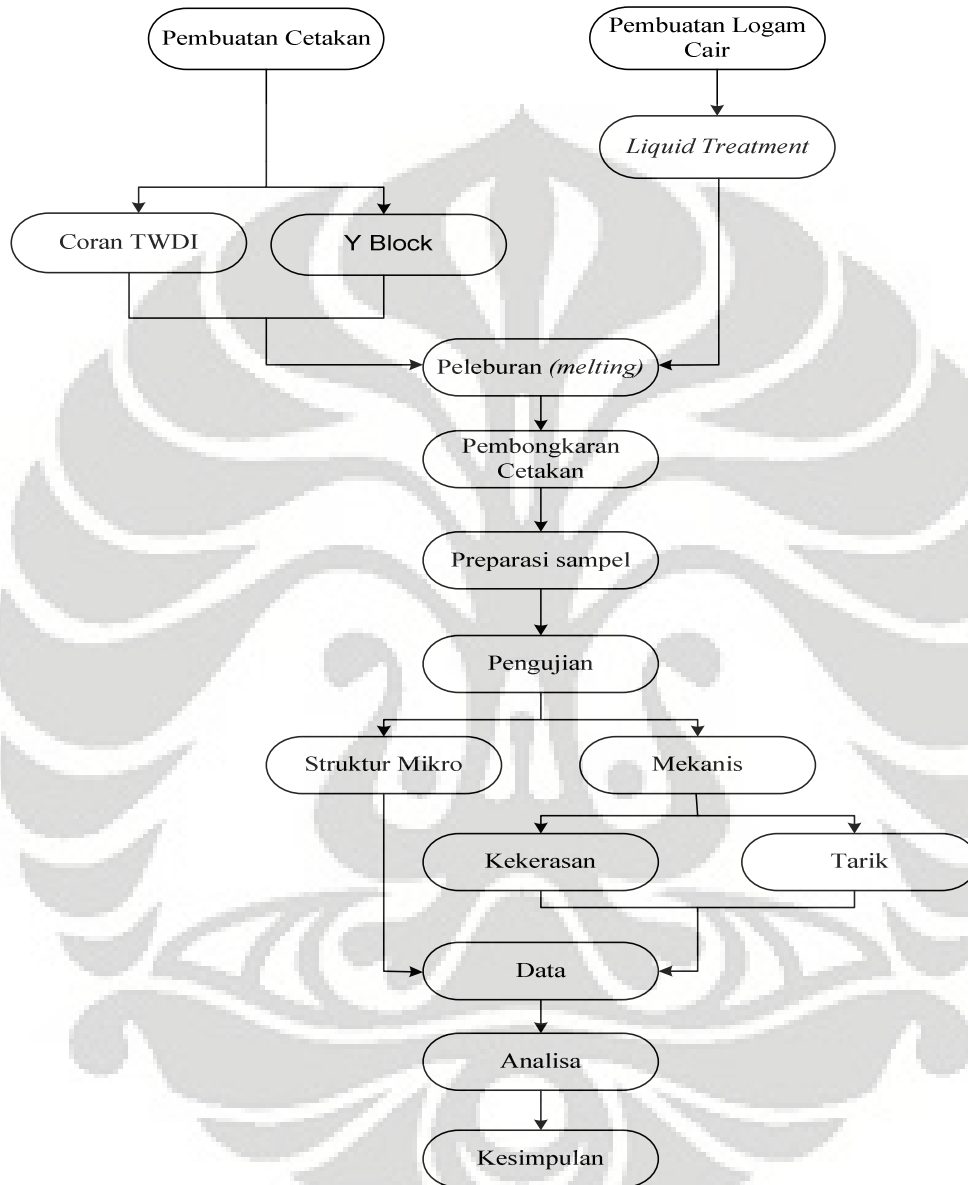
III.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan proses pengecoran *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) dengan ketebalan plat yaitu; 5, 4, 3, 2, dan 1 mm dan pengecoran *test piece y block*. Desain pengecoran yaitu pengecoran vertikal anti grafitasi, dimana posisi saluran masuk berada dibawah benda tuang sehingga cairan yang masuk ke benda tuang alirannya *laminar*. Desain sistem saluran menggunakan model T1, Gambar III.1. Jenis material yang digunakan adalah FCD45. Bahan cetakan yang digunakan adalah pasir furan.



Gambar III.1. Desain sistem saluran model T1

Selanjutnya penelitian akan dilakukan dengan mengikuti diagram alir seperti terlihat pada Gambar III.2



Gambar III.2. Diagram alir penelitian

III.2 Alat dan Bahan

III.2.1 Alat

Peralatan yang digunakan pada saat proses penelitian meliputi:

1. Alat Pembuatan Cetakan (*moulding*)

Alat yang digunakan untuk pembuatan cetakan meliputi:

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

2. Alat Peleburan logam (*melting*)

Alat yang digunakan untuk peleburan logam cair meliputi:

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

4. Alat Penuangan cairan logam (*pouring*)

Alat yang digunakan untuk *pouring* meliputi:

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

5. Alat Pembongkaran (*felling*)

Alat yang digunakan untuk pembongkaran meliputi:

- a) Mesin guncang (*shake out*)
- b) *Shot blasting*

6. Alat Permesinan

- a) Mesin *milling*
- b) Mesin bubut
- c) Mesin gerinda
- d) Mesin gergaji

7. Alat Pengujian

Alat yang digunakan dalam pengujian antara lain:

- a) Spektrometer
- b) *Microskop optic digital*
- c) *Hardness tester*

d) *Tensile strength machine*

III.2.2 Bahan

Bahan 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 seperti pada Tabel III.1. di bawah ini.

Tabel III.1. Pemuatan bahan baku peleburan (charging)

No	Nama Material	Kuantitas	
		Awal (kg)	Penambahan (kg)
1	Return Scrap	400	
2	Steel scrap	800	
3	Carburizer	34	4,5
4	FeSi	10	8,4
5	FeMn	2,4	
6	Inokulan	9	
7	FeSiMg	12	

2. Bahan Baku Cetakan

Cetakan yang digunakan dalam pengecoran adalah cetakan pasir furan.

Adapun bahan baku yang digunakan antara lain:

1) Pasir silika

Pasir silika merupakan bahan baku utama dari cetakan pasir.

2) Asam furan

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

3) Bahan pengikat tambahan

Biasanya ditambahkan 20-50% dari berat pengikat utama.

4) Serbuk arang

Serbuk arang ditambahkan ke dalam pasir cetak agar memiliki sifat mampu ambruk ketika dilakukan pembongkaran sehingga dapat

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

a) *Plating*

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

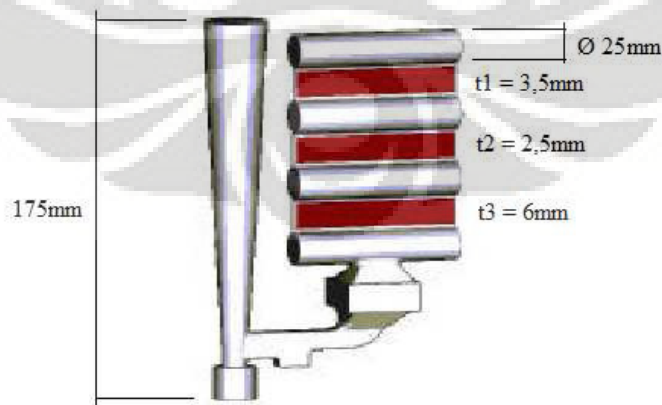
b) *Isomol*

Isomol adalah cairan antara serbuk *coating* dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan cetakan yang baik dan juga menambahkan temperatur sinter dari pasir cetak. Tepat setelah dilakukan pemolesan, campuran ini langsung dibakar untuk menguapkan kandungan alkohol.

III.3 Prosedur Penelitian

III.3.1 Pembuatan Desain Sistem Saluran (*getting system*)

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



Gambar III.3. Desain pengecoran Stefanescu^[2]

Modifikasi desain untuk penelitian ini meliputi:

1. Dimensi plat tipis berukuran 150x75 mm dengan ketebalan berurutan dari bawah ke atas adalah 1, 2, 3, 4, dan 5 mm.
2. Jumlah plat tipis sebanyak 5 buah.
3. Tinggi sprue 855 mm.
4. Posisi ketebalan terkecil (1 mm) paling dekat dengan *ingate*.

III.3.2 Pembuatan Cetakan

Pembuatan cetakan dilakukan dengan menggunakan teknologi *furand sand*. Pembuatan cetakan ini diperlukan *flask* yang diletakkan di atas *pattern plate*, Gambar III.4.



Gambar III.4. *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. Setelah *flask* terpasang di atas *pattern plate*, kemudian dilakukan pengisian pasir cetak. Proses pengisian cukup mudah dan memerlukan waktu yang singkat karena tidak dibutuhkan *ramming* yang kuat untuk memastikan pasir cetak terdistribusi merata dan memadat. *Furand sand* merupakan jenis pasir cetak dengan ikatan yang terjadi secara kimia sehingga dihasilkan daya ikat antar pasir yang baik.

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



Gambar III.5. Penggabungan dua sisi cetakan(*merger*)

III.3.3 Pembuatan Logam Cair dan Perlakuan Cairan Logam

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

III.3.3.1 Pembuatan Besi Tuang Kelabu (FC)

Tahapan ini terdiri dari:

1. Pemuatan bahan baku (*charging*)

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

2. Peleburan (*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.

3. Pengecekan komposisi kimia

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

4. Pengeluaran cairan logam (*tapping*)

Setelah komposisi kimia cairan logam sudah sesuai target dan temperatur *tapping* sudah tercapai, maka cairan logam siap untuk dikeluarkan dari dalam tanur induksi kedalam ladle penuang. Pengeluaran cairan logam dilakukan dengan cara menungkkikan tanur dengan hidrolis secara perlahan sampai cairan logam habis.

III.3.3.2 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

Pembuatan besi tuang nodular dilakukan melalui proses *liquid treatment* untuk mengontrol bentuk grafit berbentuk bulatan atau nodular. Tahapan ini dilakukan bersamaan dengan tahap *tapping*. Tahapan ini terdiri dari dua jenis, yaitu inokulasi dan nodulasi. Inokulasi dilakukan dengan cara menaburkan inokulan pada saat logam cair dituang ke dalam panci tuang, sedangkan nodulasi dilakukan dengan menggunakan metode *sandwich*. Pada metode ini, nodulan diletakkan dalam panci tuang di bawah *steel scrap* sebelum logam cair dituangkan. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya ledakan yang cukup besar akibat reaksi secara langsung dengan logam cair. Selain itu, dengan cara seperti ini jumlah logam Mg yang bereaksi lebih efektif. Pada proses ini, inokulan yang digunakan adalah Fe-Si sedangkan nodulan yang digunakan Fe-Si-Mg. Inokulasi bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Setelah dilakukan inokulasi, kemudian terjadi proses nodulasi ketika logam cair mencapai dasar panci tuang. Ciri-ciri yang tampak pada proses ini adalah terjadi ledakan di dalam panci tuang yang mengeluarkan asap putih dan cahaya. Hal ini

terjadi karena nodulan bersifat eksplosif. Pada proses *liquid treatment* ini, magnesium mengubah grafit dari bentuk serpih menjadi bulatan. Proses ini berlangsung sekitar 10 - 15 menit. Temperatur efektif untuk terjadinya nodulasi adalah sekitar 1380°C.

III.3.4 Penuangan cairan logam (*pouring*)

Proses penuangan cairan logam dilakukan dengan penuangan dari ladle tuang ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin*. Pengontrolan temperatur selalu dilakukan tepat ketika logam cair akan dilakukan penuangan ke dalam rongga cetakan melalui *sprue basin* dengan menggunakan termokopel. Temperatur tuang dijaga sekitar 1390°C sampai 1400°C. Setelah proses pengecoran selesai, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan. Pembongkaran dilakukan setelah benda cor mendingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Proses pembongkaran cetakan dilakukan dalam sebuah ruang bawah tanah dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokkan cetakan pasir. Setelah itu, agar hasil cor-coran bersih dari butiran pasir yang melekat kuat, maka dilakukan *shotblasting*. Metode ini menggunakan bola-bola baja kecil dengan mekanisme penumbukan. *Machining* dilakukan untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip.

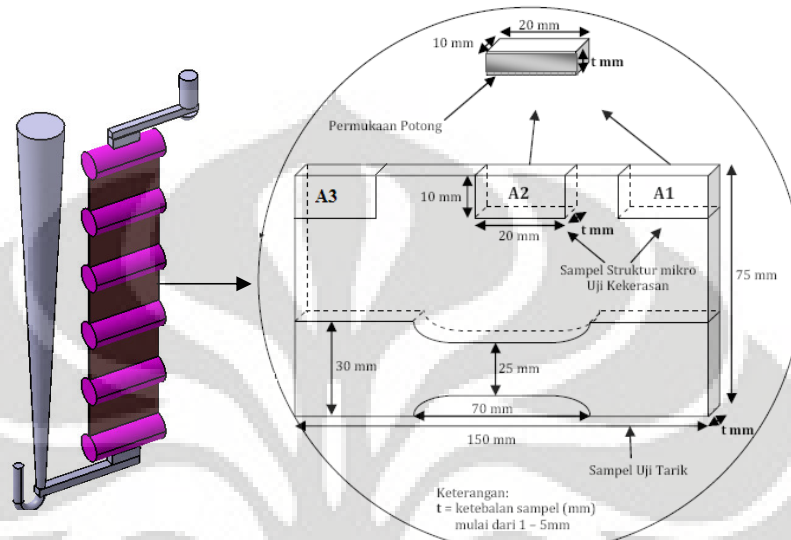
III.3.5 Preparasi Sampel

1. Metode pengambilan sampel

Metode pengambilan sampel untuk uji komposisi kimia dilakukan dengan cara mengambil sedikit cairan logam dan menuangkannya kedalam cetakan uji spektrometer sebelum penuangan logam cair ke dalam rongga cetakan. Cetakan uji spektrometer dibuat dari bahan logam *ferro*, dengan tujuan supaya kecepatan pendinginan tinggi sehingga terjadi pembekuan putih atau tidak terbentuk grafit pada sampel. Sedangkan, produk hasil cor berupa plat dengan ketebalan 1, 2, 3, 4 dan 5 mm, gambar III.6. kemudian dilakukan preparasi sampel untuk dilakukan pengujian, yang terdiri atas: pengujian struktur mikro, pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Untuk *test piece y block* diambil dua bagian yaitu pada

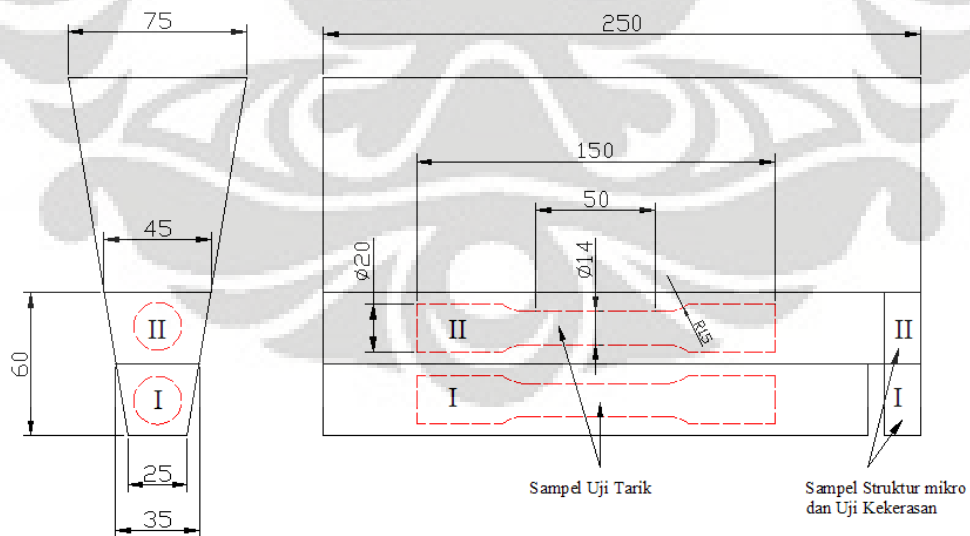
posisi I dan II untuk pengujian struktur mikro, pengujian tarik dan pengujian kekerasan, Gambar III.7.

Berikut metode pengambilan sampel pengujian untuk plat



Gambar III.6. Metode pengambilan sampel pengujian untuk plat

Berikut metode pengambilan sampel pengujian untuk *test piece y block*

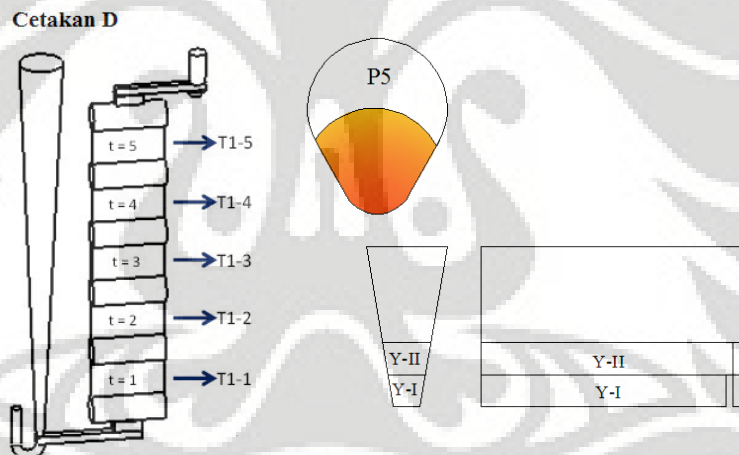


Gambar III.7. Metode pengambilan sampel pengujian untuk y blok

Pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan dan pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.

2. Metode penamaan sampel

Pemberian kode dilakukan pertama kali berdasarkan jumlah proses peleburan logam cair dalam serangkaian penelitian TWDI untuk dijadikan TWADI. Misalnya; peleburan ke-I kode P1, ke-II kode P2, ke-III kode P3 dan seterusnya. Pada penelitian ini adalah peleburan ke-V sehingga kodenya P5. Berikutnya berdasarkan desain sistem saluran, pada penelitian ini menggunakan desain T1. Pada setiap desain sistem saluran ada 4 kali penuangan kedalam cetakan yaitu; cetakan A, B, C, dan D. Pada penelitian ini sampel yang akan diamati yaitu pada cetakan D. Cetakan D terdiri dari 5 plat dengan ketebalan yang berbeda yaitu 1, 2, 3, 4 dan 5. Sehingga, kode sampel yang akan diamati yaitu P5T1D-1 sampai dengan P5T1D-5, Gambar III.8. Pemberian kode pada sampel y block yaitu P5Y-I untuk bagian pertama dan P5Y-II untuk bagian yang kedua, Gambar III.8.



Gambar III.8. Metode penamaan sampel

Pada sampel pengamatan struktur mikro, kode sampel ditambahkan sesuai dengan posisi daerah pengambilan sampel, yaitu: A1, A2 dan A3. Kode A1 dan A3 adalah untuk posisi pengambilan di pinggir sedangkan A2 untuk posisi pengambilan di tengah, Gambar III.6. Sebagai contoh, sampel T1A1-1 adalah sampel 1 mm pada Model T1 dengan posisi pengambilan di pinggir (A1). Untuk sampel uji tarik, karena hanya 1 untuk setiap plat dan kondisi maka kodenya sama dengan kode plat.

III.3.5.1 Preparasi Sampel Uji Komposisi Kimia

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

III.3.5.2 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

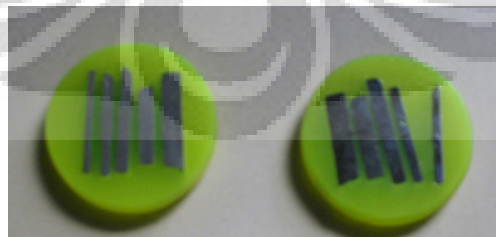
Untuk preparasi sampel pengamatan struktur mikro dilakukan dengan berbagai tahap preparasi antara lain pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan etsa.

1. Pemotongan (*Cutting*)

Pemotongan sampel dilakukan dengan metode penggergajian. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses pemotongan agar dapat mengurangi tingkat deformasi pada permukaan sampel. Pengambilan sampel pada proses ini sesuai dengan Gambar III.6.

2. *Mounting*

Proses *mounting* bertujuan untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media. Sampel dimasukkan ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan. Setelah itu didinginkan dengan media air.



Gambar III.9. Sampel hasil *mounting*

3. Pengamplasan (*Grinding*)

Pengamplasan bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel pada saat pemotongan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas dengan nomor grid #80, #180, #360, #500, #700, #800 dan #1200 yang dilakukan secara bertahap, dimulai dari amplas dengan nomor grid paling kecil (kasar) ke nomor grid yang besar (halus). Pada saat pengamplasan, pemberian air dilakukan untuk menghindari efek pemanasan terhadap struktur mikro dan mengalirkan geram logam yang terkikis. Selain itu, perubahan arah pengamplasan penting dilakukan agar permukaan sampel benar-benar halus dan merata.

4. Pemolesan (*Polishing*)

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

5. Etsa (*Etching*)

Etsa merupakan suatu proses pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak sehingga detail struktur yang akan diamati dapat terlihat dengan jelas dan tajam. Zat etsa yang digunakan adalah Nital 2%. Sampel dicelupkan ke dalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan.

III.3.5.3 Preparasi Uji Kekerasan

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

III.3.5.4 Preparasi Uji Tarik

Preparasi uji tarik dilakukan dengan pemotongan bagian sisi yang berseberangan dengan sisi yang digunakan untuk pengambilan sampel

pengamatan struktur mikro. Pemotongan dilakukan dengan arah memanjang dengan lebar 30 mm. Sampel hasil pemotongan dibentuk sesuai standar JIS Z 2201 dengan menggunakan *milling machine*. Setelah itu, permukaan sampel digerinda untuk menghilangkan *skin effect* karena struktur ini bersifat rapuh sehingga dapat mengganggu pada saat dilakukan pengujian tarik. Cara pengambilan sampel uji tarik seperti pada Gambar III.6

III.3.6 Pengujian

III.3.6.1 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.

III.3.6.2 Pengamatan Struktur Mikro

Identifikasi grafit dilakukan dengan mengambil acuan pada ASTM A247 dan JIS G5502 Sedangkan indentifikasi matriks dilakukan dengan melihat pada *ASM Metal Handbook*, *ASM Handbook*, dan referensi-referensi lain.

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 Canon. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 50x, 100x, 200x, 500x, dan 1000x. Temperatur saat pengambilan gambar sekitar 27⁰C. Sedangkan teknik yang digunakan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.

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

1. Metode perhitungan nodularitas

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

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

2. Metode perhitungan jumlah nodul

Perhitungan jumlah nodul diawali dengan membandingkan foto struktur mikro non etsa dengan *Microstructure Rating Chart 1993* yang dikeluarkan oleh *American Foundry Society* - AFS dan *Graphite Rating in Ductile Iron Chart 1999* yang dikeluarkan oleh *Ductile Iron Society* – DIS. Jumlah nodul maksimum yang ada pada tabel-tabel tersebut hanya mencapai 300 nodul/mm² untuk AFS dan 600 nodul/mm² untuk DIS, sedangkan jumlah nodul yang terjadi pada TWDI melebihi jumlah tersebut. Selain itu, juga digunakan referensi yang dibuat oleh Ruxanda, tetapi tidak dapat digunakan karena pada referensi Ruxanda dicantumkan nilai S.^[4]

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

Kemudian perhitungan jumlah nodul dikoreksi dengan melakukan perhitungan menggunakan program perhitungan jumlah nodul dengan batas minimal diameter grafit adalah 5 μm . Hasil kedua perhitungan lalu dibandingkan.

3. Metode perhitungan diameter rata-rata nodul

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

III.3.6.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan mengacu pada ASTM E-8 “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan mesin uji tarik *Shimadzu Servopulser*. Mesin ini memiliki kapasitas 20 ton (200 KN) dan belum terintegrasi dengan sistem komputerisasi. Sehingga, data yang dihasilkan melalui pembentukan grafik oleh jarum pembaca terdapat pada selembar kertas. Prinsip kerja mesin uji tarik adalah sampel atau benda uji ditarik dengan beban kontinu sambil diukur pertambahan panjangnya. Standar pengujian yang digunakan adalah JIS Z 2201.



Gambar III.10. *Tensile strength machine*

Penghitungan nilai kekuatan tarik menggunakan formula seperti dibawah ini :

$$UTS = \frac{P_{max}}{A_o} = \text{MPa} / \text{mm}^2 \quad (\text{III},1)$$

$$\% \text{ elongasi (dari sampel)} = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100\% = \% \quad (\text{III},2)$$

III.3.6.4 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan mengacu pada standard ASTM E-10 “*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*”. Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahan material terhadap gaya penekanan dari material yang lebih keras. Metode penekanan tersebut dapat berupa goresan, pantulan, ataupun penjejakan. Pada pengujian ini, penentuan kekerasan material dilakukan dengan metode indentasi (penjejakan) dengan metode Brinell. Pada metode ini digunakan indenter berupa bola yang terbuat dari

tungsten carbide yang akan meninggalkan jejak berbentuk lingkaran bulat. Jejak ini nantinya akan diukur menggunakan mikroskop khusus pengukur jejak dan setelah itu akan dihitung nilai kekerasannya sesuai dengan rumus :

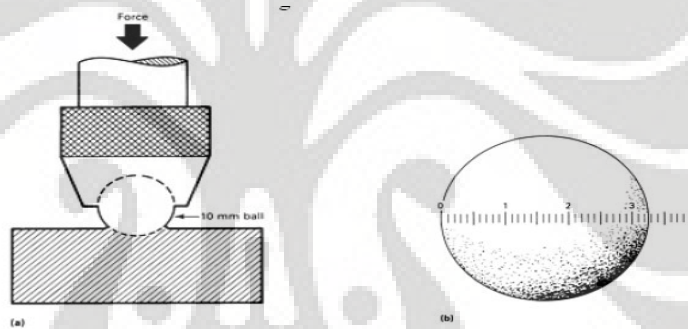
$$Bhn = \frac{\text{Load mass}}{\text{indented area}} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{III,3})$$

dimana :

D : Diameter bola (pengindentasi)

d : Diameter jejak

P : Beban



Gambar III.11. Skema penjejakan dan pengukuran jejak

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

IV.1 Pengujian Komposisi Kimia

Berikut ini adalah komposisi kimia standar manufaktur^[26] dan hasil pengujian komposisi kimia FCD 45, Tabel IV.1.

Tabel IV.1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia P5

Heat No.	Kode	Elemen	Standar Manufaktur ^[26] (%)	Aktual (%)
2808904B	P5	C	3,5 – 3,9	3,819
		Si	2,4 - 2,8	2,764
		Mn	0,3 - 0,5	0,356
		P	0,03 max	0,024
		S	0,02 max	0,023
		Cu	0,15 max	0,021
		Cr	0,15 max	0,054
		Ni	0,15 max	0,026
		Mg	0,03 min	0,068

Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada Tabel IV.1 di atas, komposisi kimia logam cair P5 sesuai dengan standar komposisi kimia FCD 45. Dari data komposisi kimia ini dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan nilai *carbon equivalent* (CE) sebagai parameter untuk memperkirakan struktur mikro yang akan terbentuk. Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0,31\%Si \quad (IV.1)$$

$$CE = \%C + 0,3\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \quad (IV.2)$$

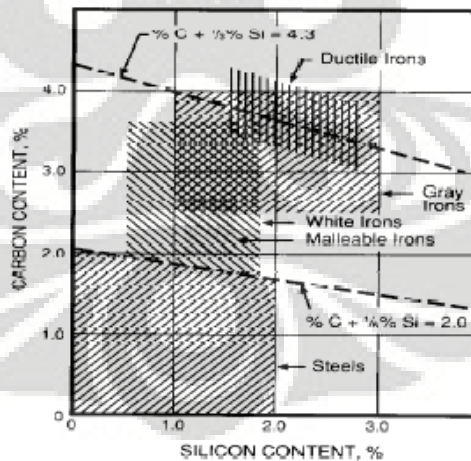
Oleh karena itu, nilai CE yang dimiliki oleh logam cair pada saat pengecoran sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,31\%Si \\ &= 3,819\% + 0,31(2,764\%) \\ &= 4,676\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CE} &= \%C + 0,3\%Si + 0,33\%P - 0,027\%Mn + 0,4\%S \\ &= 3,819\% + 0,3(2,764\%) + 0,33(0,024\%) - 0,027(0,356) + 0,4(0,023) \\ &= 4,656\% \end{aligned}$$

Nilai CE sebesar 4,676% dan 4,656% memenuhi persyaratan CE minimum oleh Loper untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida. Namun nilai CE ini tidak dapat memenuhi persyaratan Loper untuk membuat TWDI dengan ketebalan 3 – 5 mm, nilai CE yang dipersyaratkan loper yaitu 4,79 – 4,92%. Hal ini dibuktikan dengan adanya karbida walaupun dalam jumlah yang sangat sedikit.

Berdasarkan literatur lainnya, nilai CE sebesar 4,676% dan 4,656% memenuhi persyaratan yang dibutuhkan untuk pengecoran dinding tipis berdasarkan Stefanescu ($\text{CE} > 4,3\%$). Nilai CE yang sesuai dengan rencana penelitian ini diharapkan mampu mencegah terbentuknya struktur karbida.



Gambar IV.1. Nilai CE untuk beberapa jenis material

IV.2 Pengamatan Visual

Hasil pengecoran P5T1D menunjukkan cetakan terisi sempurna dan tampak tidak terjadinya *shrinkage* pada benda maupun *gating system*. Jenis cacat yang terjadi pada cetakan P5D adalah berupa cacat sirip pada sisi plat dan sprue bagian bawah. Hal ini terjadi karena ada celah pada belahan cetakan dan posisi plat bagian bawah ini mendapatkan tekanan cairan yang lebih besar dibandingkan plat bagian atas (Lampiran 1).

Permasalahan lain pada pengecoran TWDI yaitu tidak tercapainya dimensi plat sesuai target (Lampiran 3). Perubahan dimensi ini karena cetakan tidak kuat menahan tekanan logam cair. Selain itu perubahan dimensi ini mungkin karena *base plat pattern* yang *bending*.

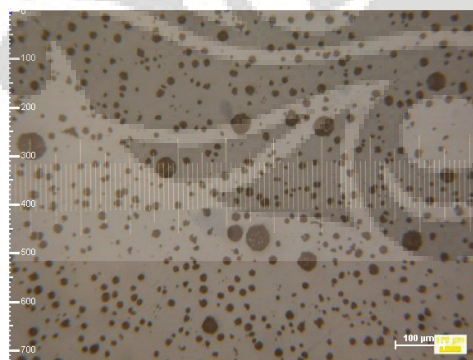
IV.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pada pengamatan struktur mikro untuk sampel TWDI, pembahasan dilakukan dengan mengambil sampel plat P5D. Sampel ini dipilih karena satu-satunya sampel yang mempunyai ketebalan berbeda dalam satu cetakan, yang lainnya ketebalan 1 mm semua dalam satu cetakan.

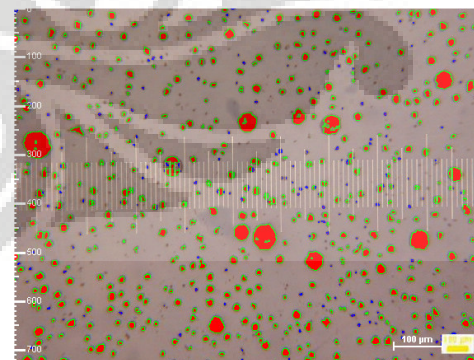
Untuk pengamatan struktur mikro pada sampel y block, pembahasan dilakukan dengan mengambil 2 buah sampel pada bagian I (P5Y-I) dan bagian II (P5Y-II).

Berikut ini struktur mikro dari sampel P5T1D dan sampel y block tanpa etsa :

Ketebalan 1 mm

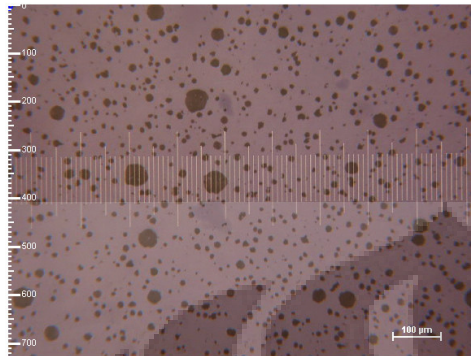


Gambar 1a Posisi 1

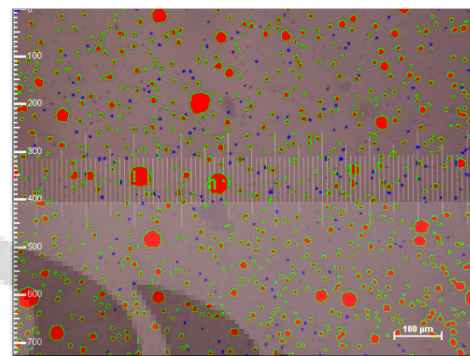


Gambar 1b Posisi 1

Ketebalan 2 mm

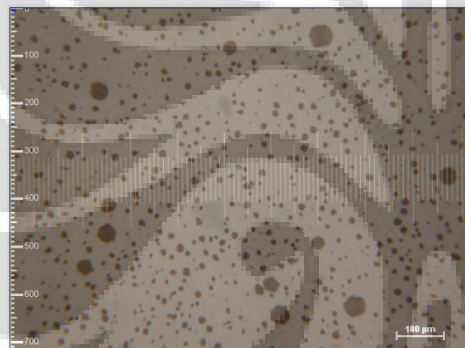


Gambar 1a Posisi 1

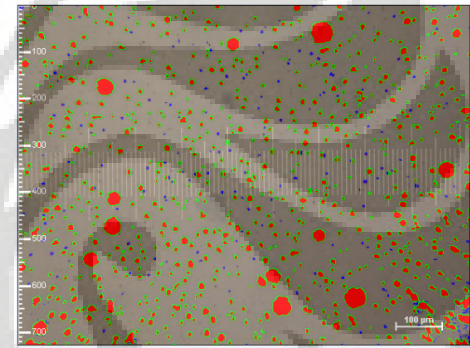


Gambar 1b Posisi 1

Ketebalan 3 mm

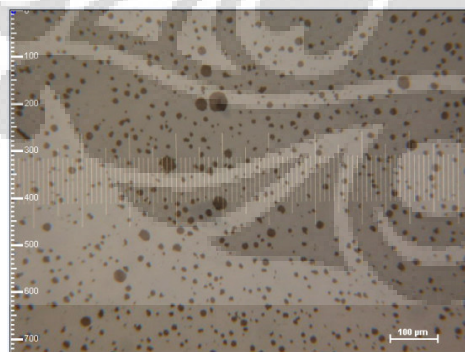


Gambar 1a Posisi 1

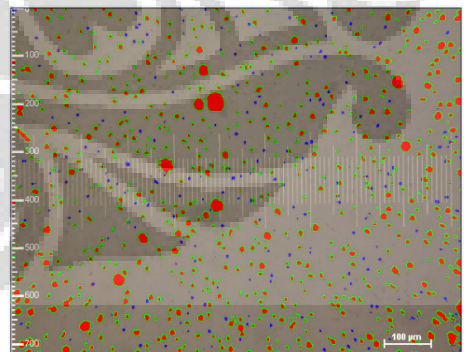


Gambar 1b Posisi 1

Ketebalan 4 mm

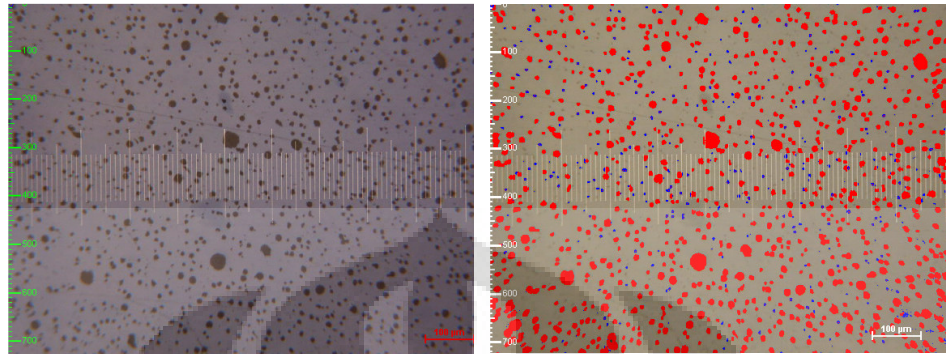


Gambar 1a Posisi 1



Gambar 1b Posisi 1

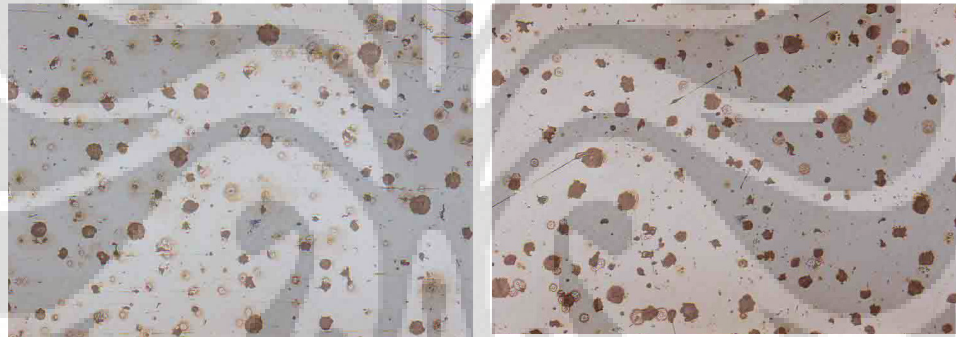
Ketebalan 5 mm



Gambar 1a Posisi 1

Gambar 1b Posisi 1

Y Block



Y-I

Y-II

Gambar IV.2. Struktur mikro (Non-etsa, pembesaran 200X)

Struktur mikro pada Gambar IV.2. di atas yaitu struktur mikro tanpa dilakukan etsa dengan pembesaran 200X yang digunakan untuk perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Penggunaan struktur mikro non- etsa untuk perhitungan nilai-nilai tersebut karena struktur mikro non etsa hanya menampakkan bentuk dan ukuran grafit sehingga struktur-struktur mikro yang lain seperti karbida tidak mengganggu dalam perhitungan. Pengukuran nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul dilakukan dengan menggunakan NIS *software*.

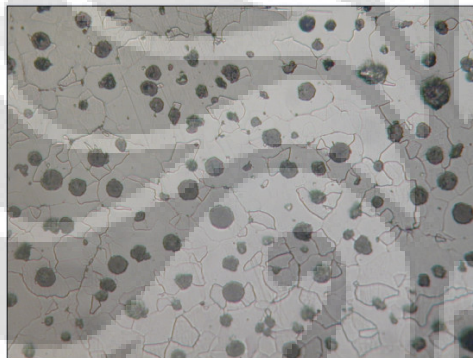
Berikut ini adalah hasil pengukuran nodularitas, jumlah nodul dan diameter rata-rata nodul. Tabel IV.2.

Tabel IV.2. Hasil pengukuran nodularitas, jumlah nodul, diameter rata-rata nodul

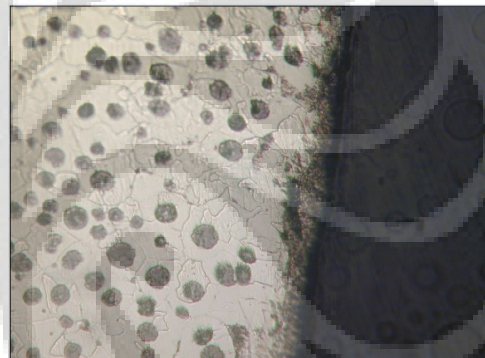
Kode Sampel	Ketebalan	Nodularitas (%)	Jumlah Nodul (nodul/mm ²)	Diameter Nodul (μm)
P5D-1	1	87,9	830,99	9,4
P5D-2	2	86,1	991,36	10
P5D-3	3	85,7	965,48	10,35
P5D-4	4	84,5	1074,68	10,66
P5D-5	5	84,4	1081,2	11,18
P5Y-I	25	80,3	245,34	20,13
P5Y-II	35	79,7	216,44	21,56

Berikut ini struktur mikro dari sampel P5T1D dengan etsa :

Ketebalan 1 mm

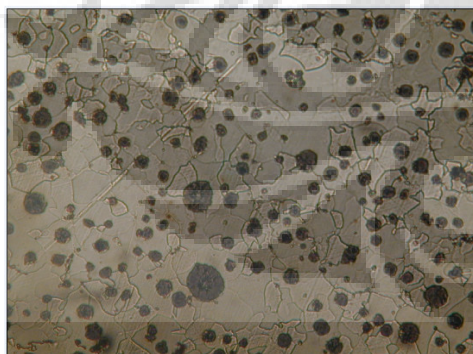


(a) Bagian inti



(b) Bagian kulit

Ketebalan 2 mm

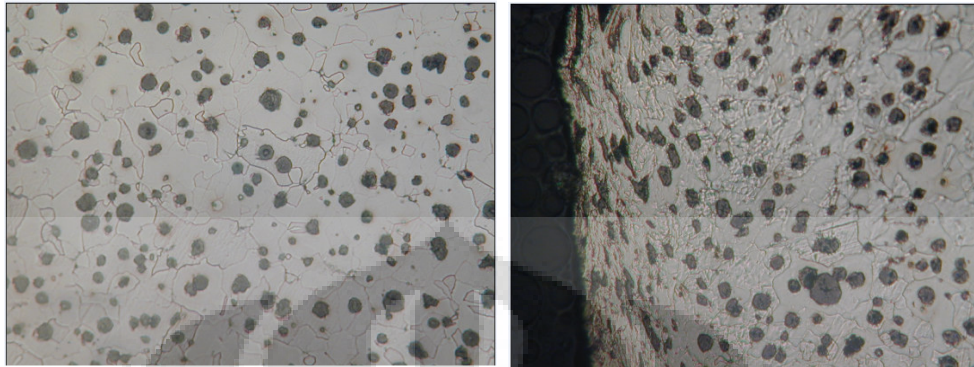


(a) Bagian inti



(b) Bagian kulit

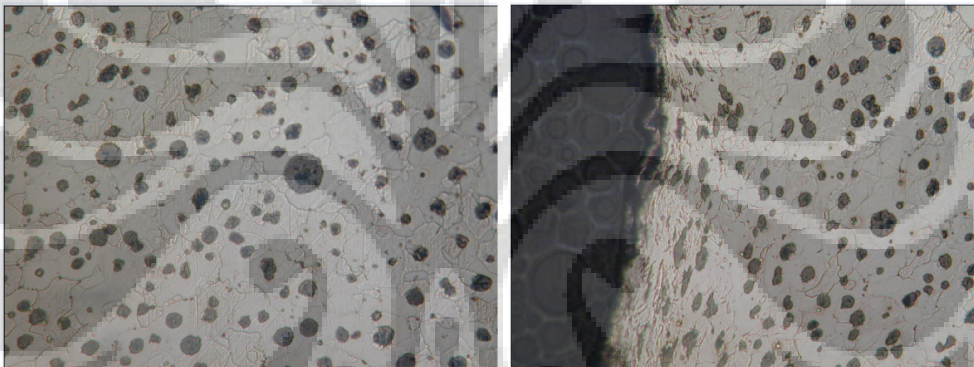
Ketebalan 3 mm



(a) Bagian inti

(b) Bagian kulit

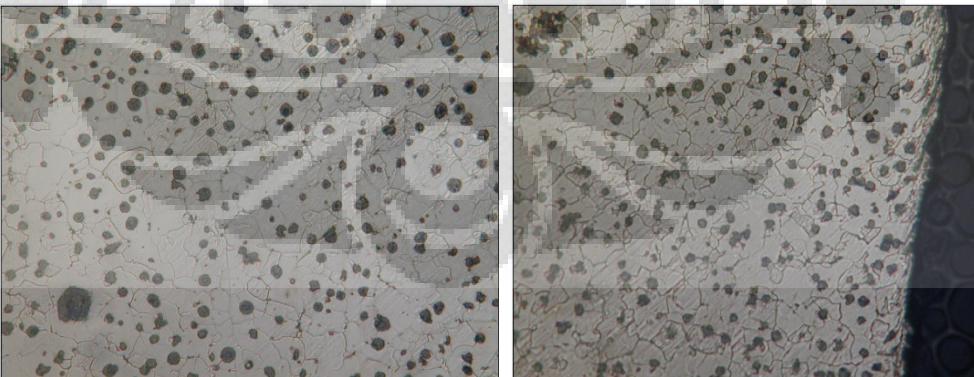
Ketebalan 4 mm



(a) Bagian inti

(b) Bagian kulit

Ketebalan 5 mm



(a) Bagian inti

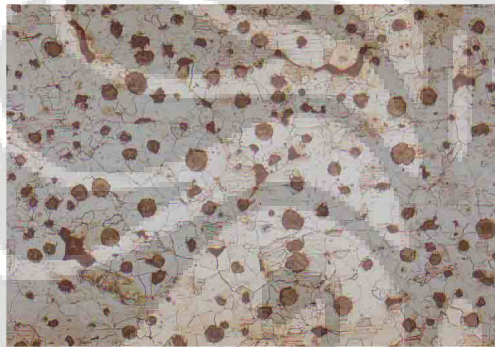
(b) Bagian kulit

(b) Gambar IV.3. Struktur mikro (Etsa nital, pembesaran 200X)

Dengan mengambil referensi pada *ASM Handbook* dan *Atlas of Microstructures of Industrial Alloy*, maka diidentifikasi bahwa struktur mikro yang terbentuk pada sampel P5T1D untuk semua ketebalan adalah grafit dalam matriks ferit, Gambar IV.3. Namun, masih terbentuk struktur karbida walaupun dengan jumlah yang tidak banyak. Secara keseluruhan struktur mikro yang terbentuk pada P5T1D sesuai dengan target yang diharapkan yaitu grafit bulat dalam matrik ferrit. Hasil ini membuktikan bahwa kecepatan pembekuan dan proses *liquid treatment* yang tepat menentukan struktur mikro yang diharapkan.

Berikut ini struktur mikro dari sampel *y block* dengan etsa :

Y Block (Y-I)

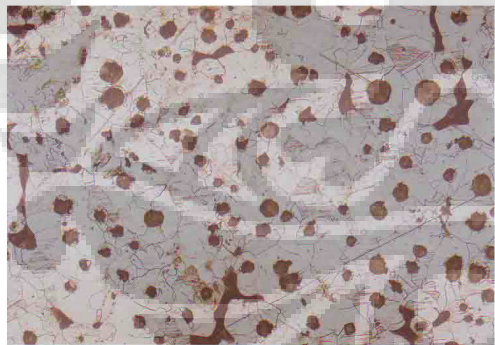


(a) Pembesaran 200X



(b) Pembesaran 500X

Y Block (Y-II)



(a) Pembesaran 200X



(b) Pembesaran 500X

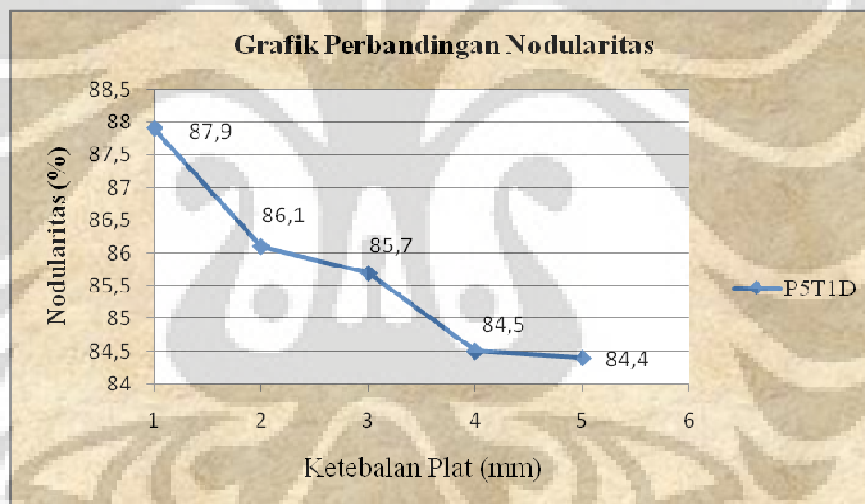
Gambar IV.4. Struktur mikro *y block*, etsa nital

Berdasarkan Gambar IV.4, struktur mikro yang terbentuk pada sampel y block yaitu grafit bulat dalam matrik ferrit dan perlit. Hal ini membuktikan bahwa struktur mikro yang terbentuk pada sampel y block merupakan struktur mikro standar FCD 45. Keberadaan fasa pearlit dalam struktur mikro akan meningkatkan kekuatan tarik dan nilai kekerasan.

Struktur mikro yang terbentuk pada sampel P5T1D untuk semua ketebalan berbeda dengan struktur mikro sampel y block. Hal ini membuktikan bahwa design pengecoran yang berbeda akan menghasilkan struktur mikro yang berbeda pula, walaupun menggunakan cairan logam yang sama.

IV.3.1 Nodularitas

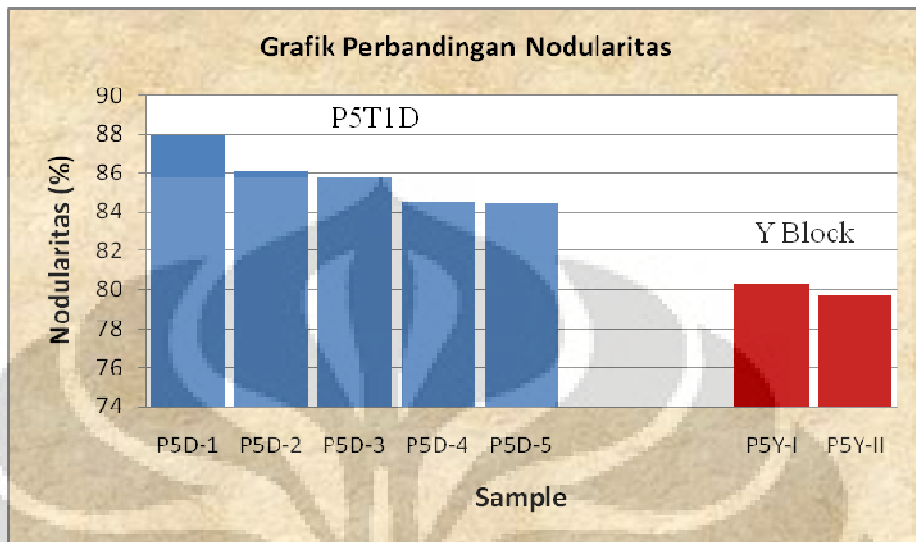
Berikut ini adalah perbandingan nodularitas pada setiap ketebalan. Gambar IV.5



Gambar IV.5. Grafik perbandingan nodularitas terhadap ketebalan

Berdasarkan Gambar IV.5 di atas, nilai nodularitas cenderung mengalami penurunan ketika terjadi peningkatan ketebalan. Ketika ketebalan meningkat, maka kecepatan pendinginan lebih lambat sehingga menghasilkan ukuran grafit yang lebih besar dan lebih sedikit.^[11] Dengan ukuran nodul yang lebih besar lebih sulit untuk menghasilkan grafit dengan nodularitas yang tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan nodulan yang kuat sehingga terbentuk nodul yang sempurna. Namun, penggunaan nodulan juga harus dibatasi karena dapat juga berperan sebagai agen pembentuk karbida.

Berikut ini adalah perbandingan nodularitas sampel plat P5D dengan sampel *y block*. Gambar IV.6



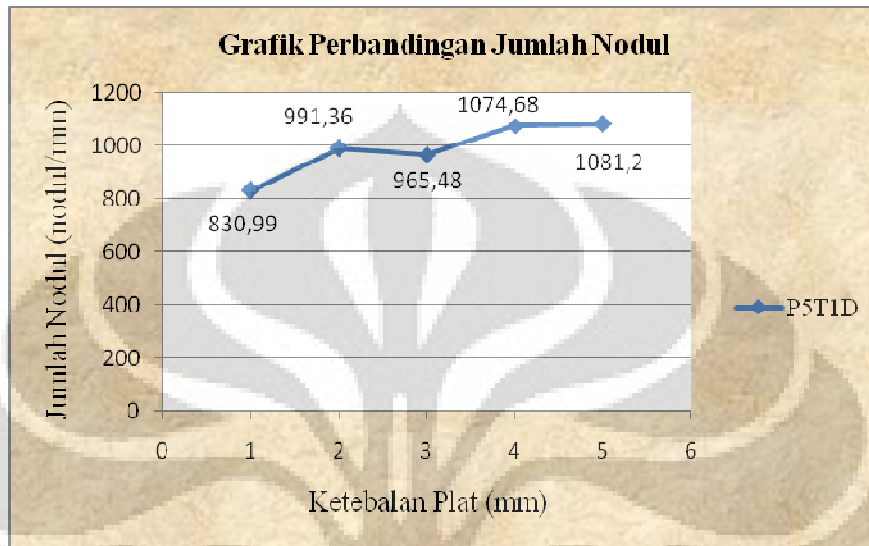
Gambar IV.6. Grafik perbandingan nodularitas P5T1D vs *y block*

Berdasarkan Gambar IV.6, nodularitas sampel P5T1D untuk semua ketebalan lebih tinggi dibandingkan dengan sampel *y block*. Hal ini membuktikan perbedaan *design* pengecoran akan menghasilkan kecepatan pembekuan yang berbeda, kecepatan pembekuan yang tinggi akan menghasilkan nodularitas yang tinggi. Nodularitas sampel P5T1D memenuhi persyaratan yang dibutuhkan oleh *ductile iron data* yaitu tingkat nodularitas diatas 80%^[7].

IV.3.2 Jumlah Nodul

Berikut ini adalah perbandingan jumlah nodul pada setiap ketebalan.

Gambar IV.7

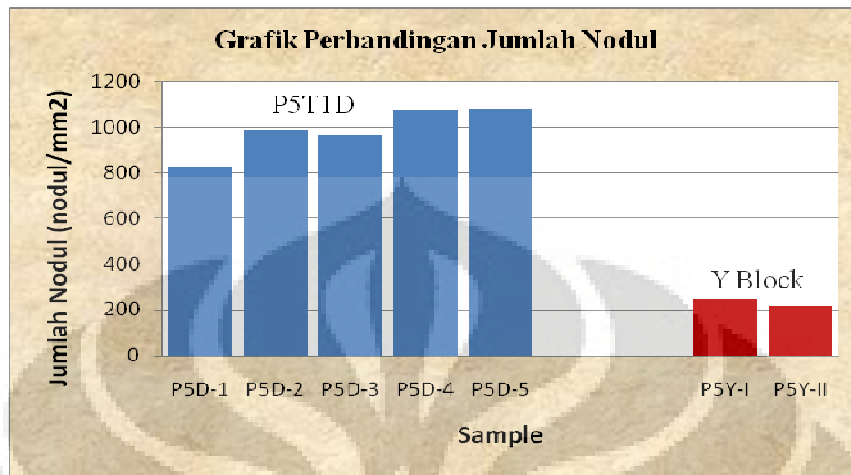


Gambar IV.7. Grafik perbandingan jumlah nodul

Pada Gambar IV.7 di atas, kenaikan ketebalan cenderung menghasilkan jumlah nodul yang lebih banyak. Hal ini berbeda dengan teori dari referensi yang ada, yaitu jumlah nodul berkurang seiring dengan peningkatan ketebalan.^[11]

Pembentukan grafit dipengaruhi oleh proses *liquid treatment* yaitu inokulasi dan nodularisasi. Efektivitas inokulasi dan nodularisasi mempunyai waktu dan temperatur tertentu. Pada penelitian ini, jumlah nodul bertambah seiring dengan peningkatan ketebalan. Hal ini disebabkan, ketika ketebalan berkurang maka kecepatan pembekuan di dalam cetakan meningkat. Sehingga grafit masih banyak yang belum terbentuk dan apabila pendinginan besi tuang sangat cepat maka terjadi pembekuan putih, yaitu pembekuan tanpa terbentuknya grafit. Hal ini sama dengan percobaan yang dilakukan oleh Skaland. 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 corannya pada: 40, 20, 10, dan 5 mm. Hasil yang diperoleh ternyata jumlah nodul berkurang dengan semakin tipisnya ketebalan cor.^[13]

Berikut ini adalah perbandingan jumlah nodul sampel P5T1D dengan sampel *y block*. Gambar IV.8

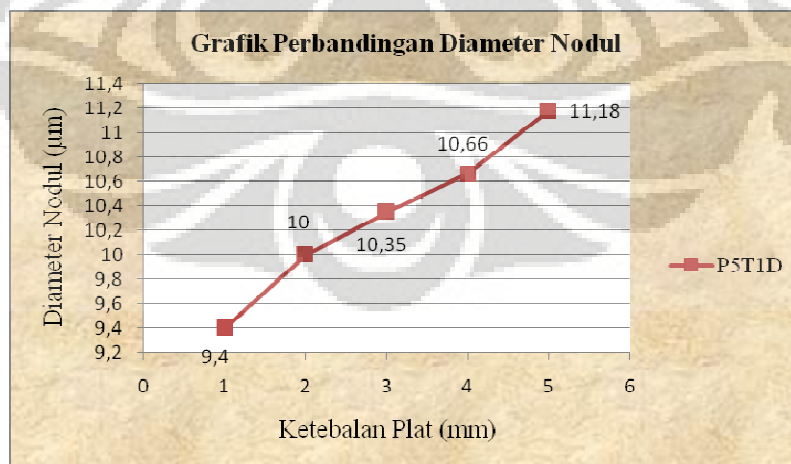


Gambar IV.8. Grafik perbandingan jumlah nodul P5T1D dengan *y block*

Berdasarkan Gambar IV.8, jumlah nodul sampel P5T1D lebih banyak dibandingkan sampel *y block*. Hal ini membuktikan kecepatan pembekuan yang tinggi pada sampel P5T1D memungkinkan jumlah grafit yang terbentuk lebih banyak dibandingkan sampel *y block*. Jumlah grafit sampel P5T1D berada di atas standar FCD 45. Namun, jumlah grafit yang tinggi akan menurunkan kekuatan tarik dan nilai kekerasan^[7].

IV.3.3 Diameter Rata-rata Nodul

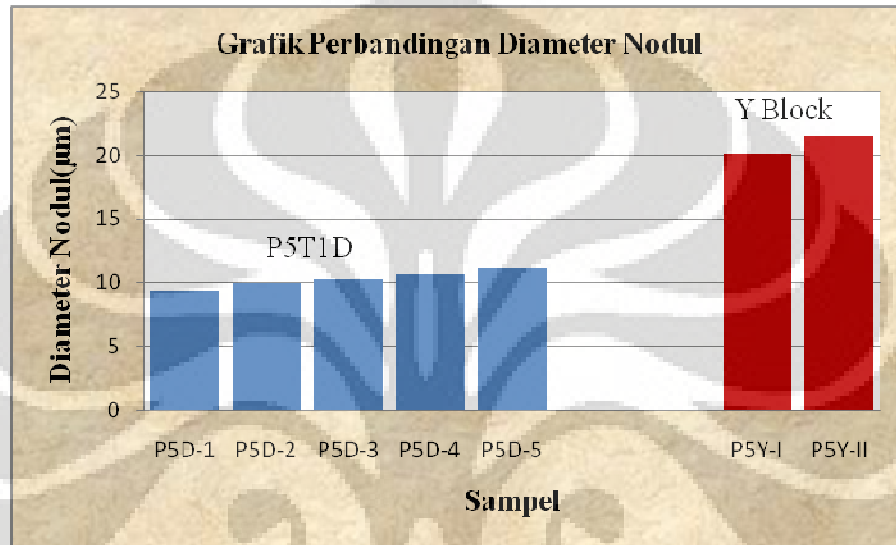
Berikut ini adalah perbandingan diameter rata-rata nodul pada setiap ketebalan. Gambar IV.9



Gambar IV.9. Grafik perbandingan diameter nodul

Berdasarkan Gambar IV.9, diameter rata-rata nodul mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan ketebalan. Hal ini membuktikan bahwa kecepatan pembekuan menurun seiring peningkatan ketebalan sehingga grafit yang berpresipitasi mempunyai kesempatan untuk membentuk bulatan yang lebih besar.

Berikut ini adalah perbandingan diameter rata-rata nodul sampel P5T1D dengan sampel *y block*. Gambar IV.10



Gambar IV.10. Grafik perbandingan diameter nodul P5T1D vs *Y block*

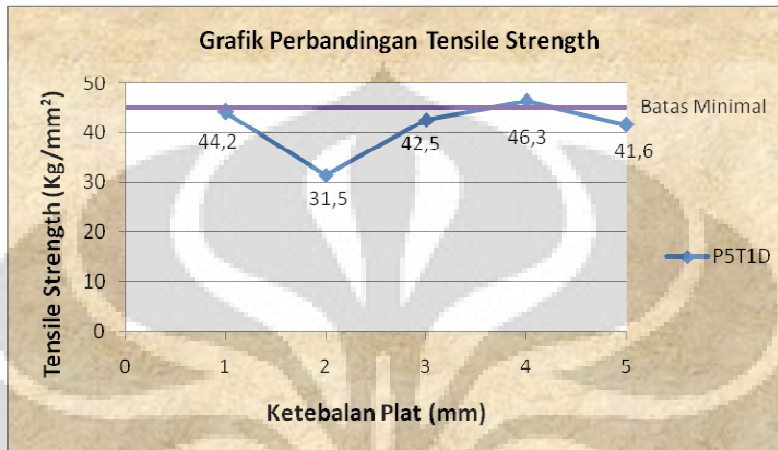
Berdasarkan Gambar IV.10, diameter nodul rata-rata sampel P5T1D lebih kecil dibandingkan dengan sampel *y block*. Hal ini membuktikan bahwa design pengecoran akan memberikan pengaruh terhadap pembentukan diameter nodul, kecepatan pembekuan yang tinggi pada sampel P5T1D mengakibatkan grafit yang berpresipitasi tidak sempat untuk membentuk bulatan yang lebih besar.

IV.4 Uji Mekanik

IV.4.1 Uji Tarik

Berikut ini adalah perbandingan kekuatan tarik pada setiap ketebalan.

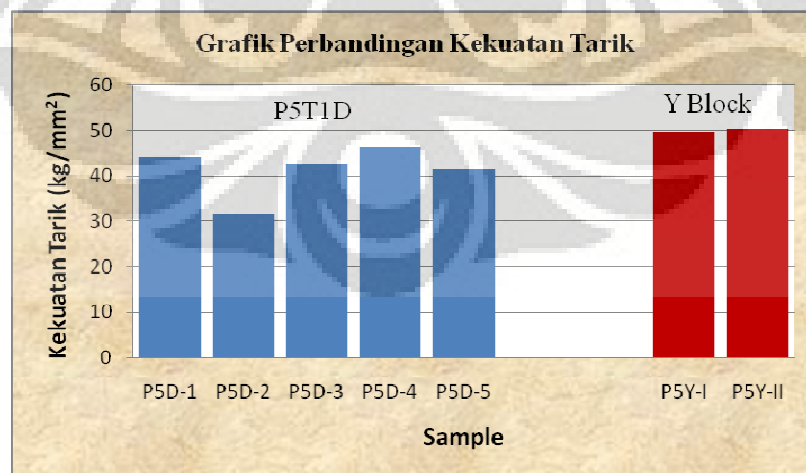
Gambar IV.11



Gambar. IV.11. Grafik perbandingan kekuatan tarik

Berdasarkan Gambar IV.11, Kekuatan tarik cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan ketebalan. Hal ini disebabkan karena setiap peningkatan ketebalan, kecepatan pembekuan akan menurun sehingga nodularitas yang dihasilkan mengalami penurunan. Dengan adanya penurunan nodularitas maka kekuatan tarik akan mengalami penurunan juga. Jika nodularitas tinggi maka kekuatan tarik akan semakin tinggi juga.

Berikut ini adalah perbandingan kekuatan tarik sampel P5T1D dengan sampel *y block*. Gambar IV.12

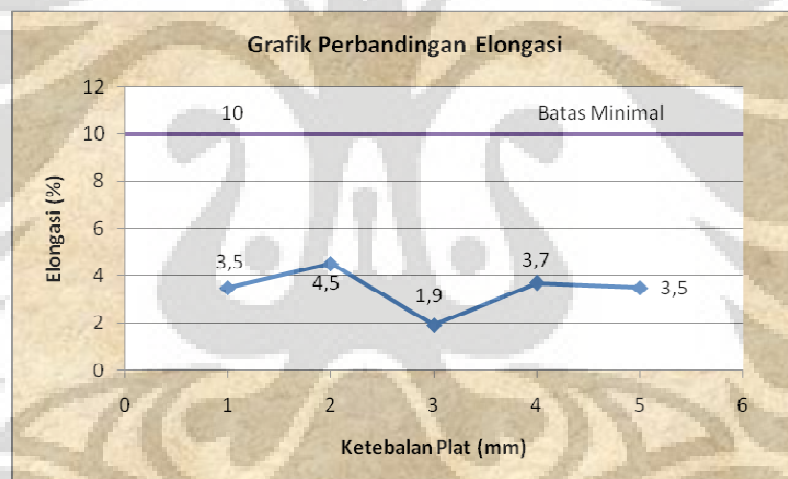


Gambar IV.12. Grafik perbandingan kekuatan tarik P5T1D vs *Y block*

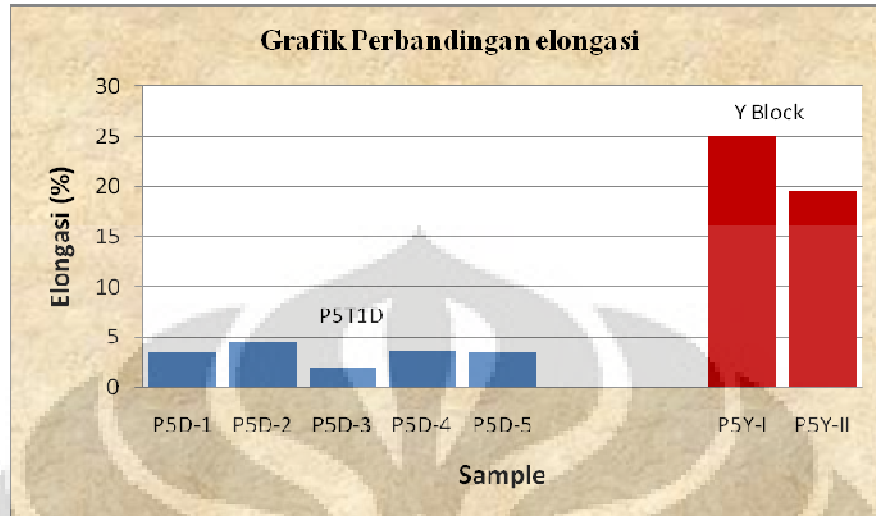
Berdasarkan Gambar IV.12 di atas, kekuatan tarik sampel P5T1D lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan tarik sampel y block meskipun nodularitas sampel P5T1D lebih tinggi dibandingkan sampel y *block*. Hal ini membuktikan bahwa yang menjadi faktor utama yang menentukan sifat mekanis yaitu matrik dasar struktur mikro. Keberadaan fasa perlit dalam matrik sampel y *block* membuat kekuatan tarik y *block* lebih tinggi dibandingkan sampel P5TD. Semakin banyak keberadaan fasa perlit dalam matrik struktur mikro maka kekuatan tarik besi tuang nodular akan semakin tinggi.

Kekuatan tarik sampel plat dengan ketebalan 2 mm selalu rendah dalam serangkaian penelitian TWDI. Untuk mengetahui penyebabnya diperlukan penelitian lebih lanjut.

Berikut ini adalah perbandingan kekuatan tarik sampel P5T1D dengan sampel y *block*. Gambar IV.13



Gambar IV.13. Grafik perbandingan elongasi terhadap ketebalan

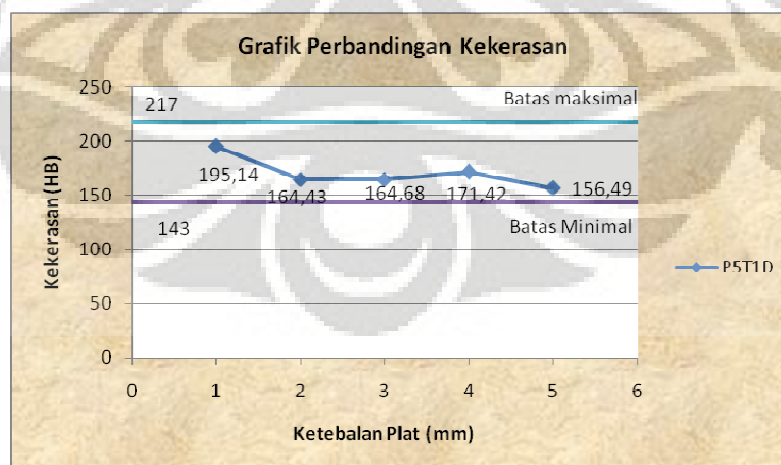


Gambar IV.14. Grafik perbandingan elongasi sampel P5T1D terhadap *y block*

Berdasarkan Gambar IV.14, nilai elongasi P5T1D cenderung acak dan berada dibawah standar FCD 45. Nilai elongasi sampel *y block* lebih tinggi dibandingkan dengan nilai elongasi sampel P5T1D, nilai elongasi *y block* berada diatas nilai elongasi standar FCD 45. Hal ini membuktikan bahwa kecepatan pembekuan yang tinggi pada sampel P5T1D menyebabkan terbentuknya karbida dalam struktur mikro. Keberadaan karbida akan menurunkan nilai elongasi.

IV.4.2 Uji Kekerasan

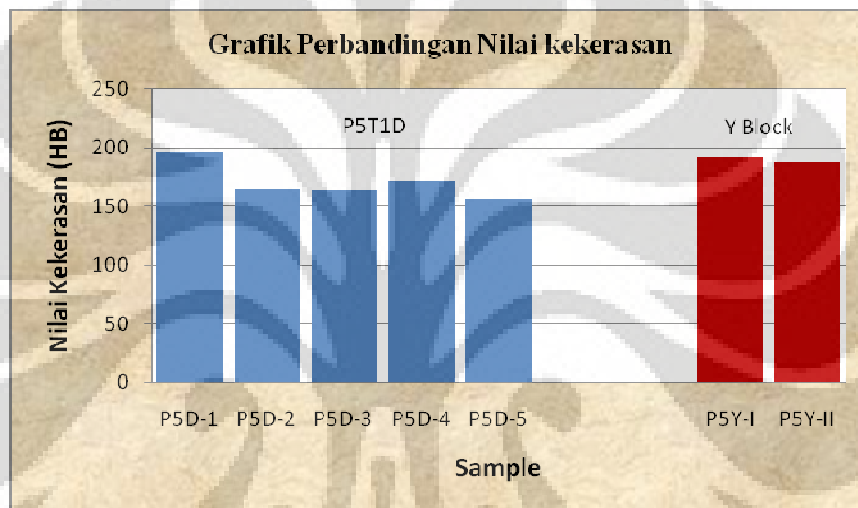
Berikut ini adalah perbandingan kekuatan tarik sampel P5T1D dengan sampel *y block*. Gambar IV.15



Gambar IV.15. Grafik perbandingan nilai kekerasan

Berdasarkan Gambar IV. 15, nilai kekerasan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan ketebalan. Ketika ketebalan meningkat jumlah nodul yang dihasilkan semakin tinggi. Jumlah nodul yang tinggi akan menurunkan nilai kekerasan. Keberadaan grafit dalam besi tuang akan menurunkan Nilai kekerasan karena grafit mempunyai kekerasan yang rendah yaitu sekitar 1 HB. Nilai kekerasan sampel P5T1D pada setiap ketebalan masuk range standar FCD 45.

Berikut ini adalah perbandingan kekuatan tarik sampel P5T1D dengan sampel *y block*. Gambar IV.16



Gambar IV.16. Grafik perbandingan nilai kekerasan P5T1D vs *Y block*

Berdasarkan Gambar IV.16, nilai kekerasan sampel P5T1D rata-rata lebih rendah dibandingkan dengan nilai kekerasan sampel *y block*. Hal ini membuktikan bahwa jumlah grafit yang tinggi pada sampel P5T1D akan menurunkan nilai kekerasan. Keberadaan fasa perlit dalam matrik struktur mikro sampel *y blok* akan menambah nilai kekerasannya.

BAB V

KESIMPULAN

1. Kecepatan pembekuan berkurang seiring dengan penambahan ketebalan.
2. Pada pengecoran dinding tipis, nilai CE harus dijaga $> 4,3\%$ untuk menghasilkan struktur bebas dari karbida.
3. Penurunan ketebalan pada pengecoran dinding tipis mulai dari 5 - 1 mm meningkatkan kecepatan pendinginan sehingga semakin mudah terbentuk karbida.
4. Struktur mikro sampel P5T1D yaitu grafit dalam matrik ferrit. Sedangkan struktur mikro sampel *y block* yaitu grafit dalam matrik ferrit dan pearlit.
5. Nodularitas menurun seiring dengan penambahan ketebalan.
6. Jumlah nodul cenderung meningkat seiring dengan penambahan ketebalan.
7. Diameter nodul cenderung meningkat seiring dengan penambahan ketebalan.
8. Sebagian besar, nilai kekuatan tarik dan elongasi dari setiap sampel P5T1D berada di bawah batas standar FCD 45.
9. Kekuatan tarik dan elongasi sampel *y block* (Y-I dan Y-II) sesuai dengan standar FCD 45.
10. Kekuatan tarik cenderung menurun seiring dengan penambahan ketebalan.
11. Persentase kekuatan tarik sampel P5T1D rata-rata diatas 80% terhadap kekuatan tarik sampel *y block*.
12. Nilai kekerasan cenderung menurun seiring dengan penambahan ketebalan.
13. Persentase nilai kekerasan sampel P5T1D rata-rata diatas 80% terhadap nilai kekerasan *y block*.
14. Sifat mekanis dari material besi tuang nodular dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk, struktur mikro yang terbentuk pada material dipengaruhi oleh ; komposisi kimia material, proses pengecoran yang meliputi desain coran dan *liquid treatment* (inokulasi dan nodularisasi).

DAFTAR REFERENSI

1. Schrems, K.K., dkk, *Statistical analysis of the mechanical properties of thin walled ductile iron casting*. SAE Technical Paper Doc. No. : 2003-01-0828, 2003.
2. Stefanescu, D.M. *Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron* AFS Transaction 02-178, 2002.
3. Mourad, Mohamed M. *Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron* 68th WFC, 7th-10th February 2008, pp.161-166.
4. Ruxanda, F. E., dkk, *Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting*. AFS Transaction, 2002. 02(177).
5. Surdia, Tata Prof. Ir. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta : PT Pradnya Paramita, 2000
6. Callister, William D., (2007). *Material Science and Engineering: An Introduction*. Department of Metallurgical Engineering: The University of Utah. USA.
7. Rio Tinto Iron & Titanium Inc. (1990). *Ductile Iron Data for Design Engineers*. Montreal, Canada: Author.
8. Keough, J. R., dkk, *Carbide Austempered Ductile Iron*. Pada DIS Meeting. 2000, USA: DIS.
9. ASTM E-8M. (2004). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
10. ASM Handbook. (1988). *Casting: Volume 15*. Ohio: ASM International Metal Park.
11. ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01*. Ohio: ASM International Metal Park.
12. 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.
13. Skaland, T., dkk, *Inoculation material improves graphite formation in ductile iron*. Modern Casting, 2001. 91(12): p. 43-45.

14. Showman, R. E. and R. Aufderheide, *Getting to the core of thin-walled casting*. Modern Casting, 2004. 94(4): p. 32-34.
15. Dix, L. P., dkk, *Static Mechanical Properties of Ferritic and Pearlitic Lightweight Ductile Iron Casting*. AFS Transaction, 2003. 03(109).
16. Choi, P., dkk, *Effect of Rare Earth Element on Microstructure Formation and Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron Casting*. Material Science and Engineering A, Vol. 383, Pg. 323-333.
17. Labreque, dkk, *Development of Carbide Free Thin Wall Ductile Iron casting*, AFS Transaction, 2000. Vol. 108: p. 31-38.
18. <http://www.Foundry-Elkem.com>
19. Goodrich, G. M., *Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes*. AFS Transaction, 2002. p. 97-30.
20. 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.
21. 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.
22. Dogan, O.N., dkk, *Verification of Thin Wall Ductile Iron Test methodology*. ASTM Journal, Vol. 30, Iss 1, Pg.
23. Martinez, R. A., dkk, *Application of ADI in high strength thin wall automotive parts*. Pada 2002 World Conference on ADI, 2002.
24. Aufderheiden, dkk, *Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting*, 2005, AFS.
25. Mullins, J. D., *Nodule Count – Why and How!*, Ductile Iron News, 2003. Iss 2: p. 1-2. www.ductile.org
26. Laboratorium PT. Geteka Founindo

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Hasil Pengecoran sebelum pemotongan
P5T1A



P5T1B



-Lanjutan-

P5T1C



P5T1D



LAMPIRAN 2

Sampel hasil pengecoran

P5T1A



P5T1B



-Lanjutan-

P5T1C



P5T1D



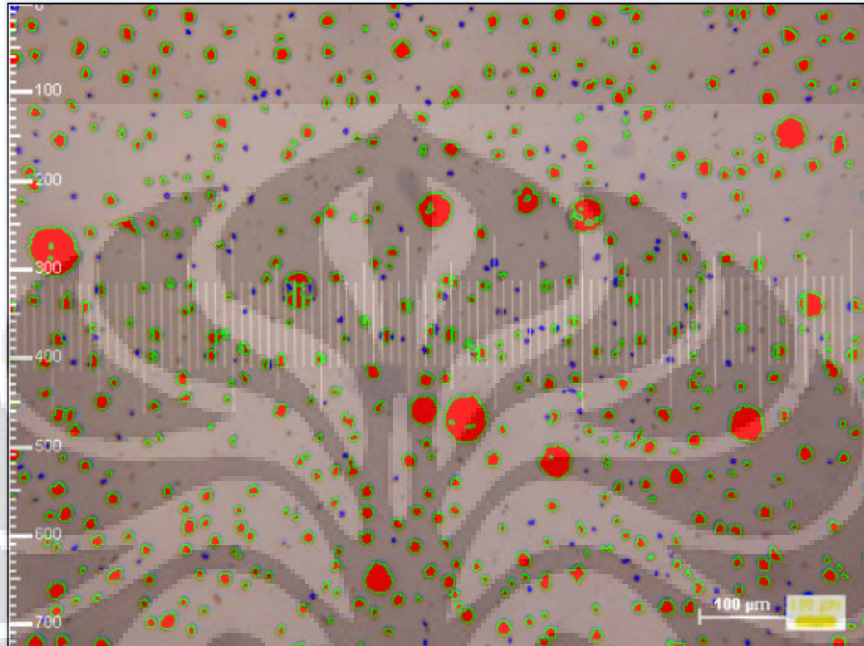
LAMPIRAN 3**Data Pengujian Dimensi**

Posisi	Tebal Target (mm)	Aktual (mm)		
		Minimum	Maksimum	Rata-rata
A1	1	2,2	3,8	2,816667
A2	1	2,04	2,86	2,33
A3	1	2,2	3,1	2,560833
A4	1	2,1	2,6	2,323333
A5	1	2,14	2,66	2,449167
B1	1	2,1	3,4	2,647917
B2	1	1,5	2,65	1,927083
B3	1	2	2,88	2,249583
B4	1	1,58	2,96	1,877917
B5	1	1,5	2,4	1,947727
C1	1	2,2	3,8	2,939583
C2	1	1,5	2,85	2,004167
C3	1	1,1	2,45	1,960417
C4	1	1,75	2,7	2,183333
C5	1	1,65	2,55	2,122917
D1	1	2,26	3,5	2,834167
D2	2	3,7	4,7	4,114583
D3	3	4,7	5,7	5,179167
D4	4	4,4	5,1	4,883333
D5	5	6,3	7,2	6,680833

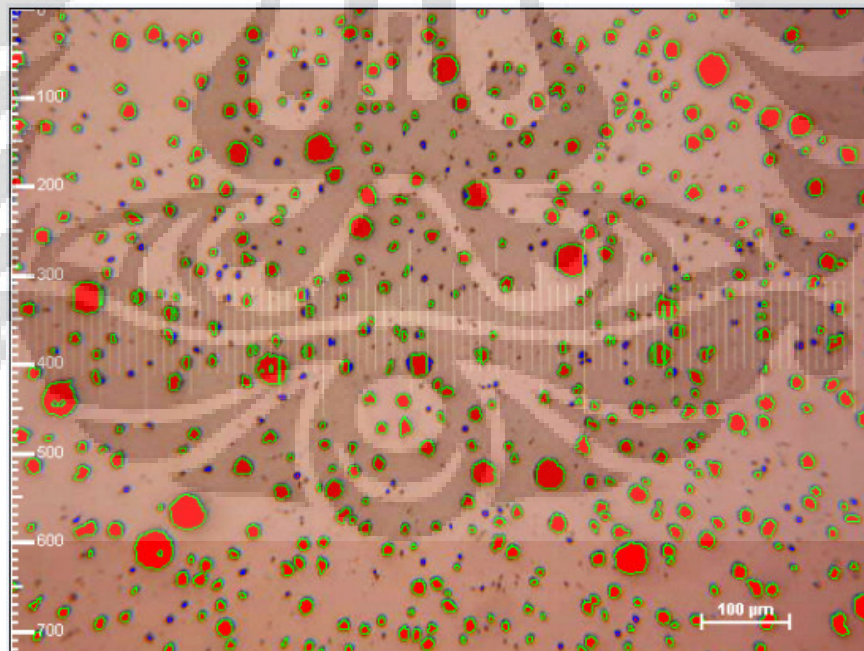
LAMPIRAN 4

Struktur Mikro

P5T1D-1

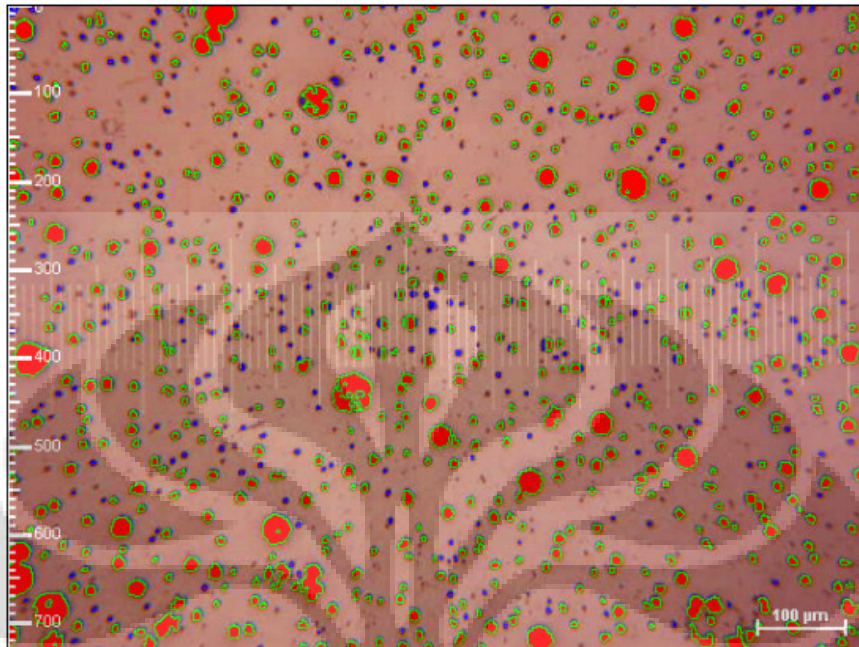


Posisi A1 (tanpa etsa , pembesaran 100X)



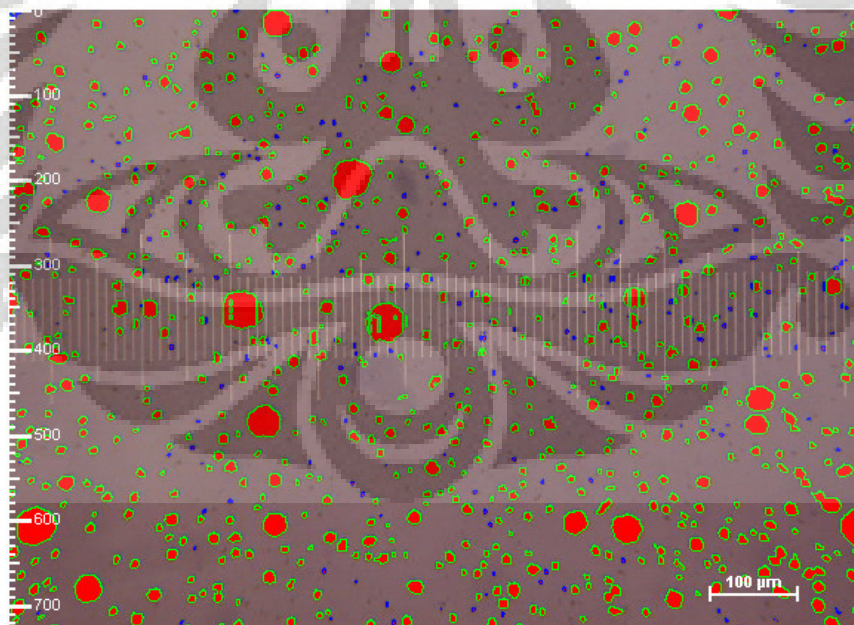
Posisi A2 (tanpa etsa, pembesaran 100X)

-Lanjutan-



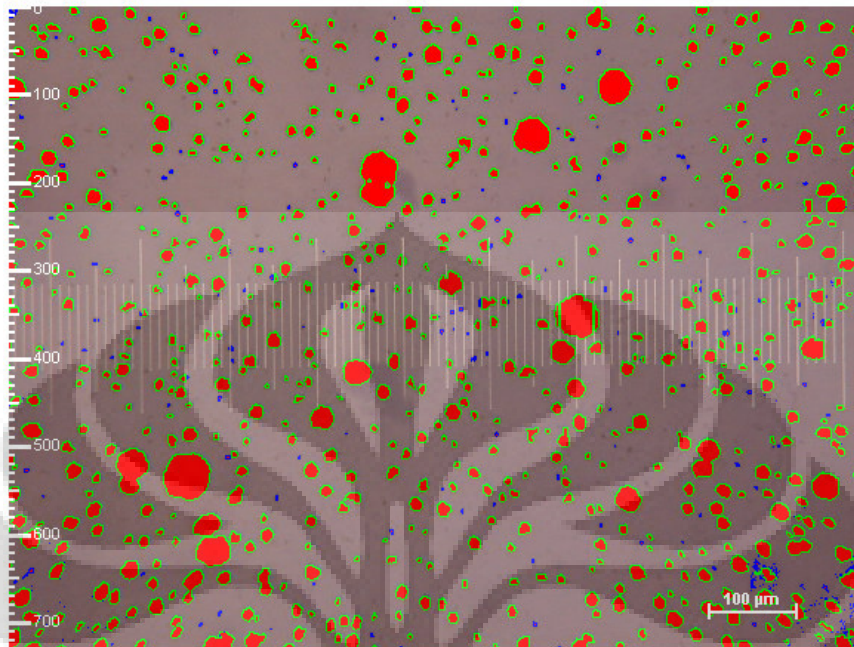
Posisi A3 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

P5T1D-2

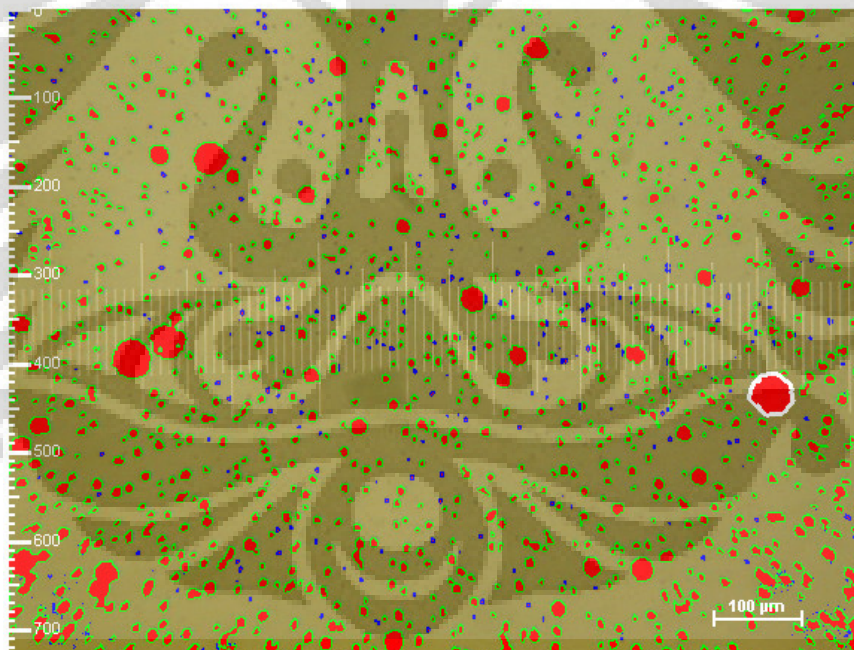


Posisi A1 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-



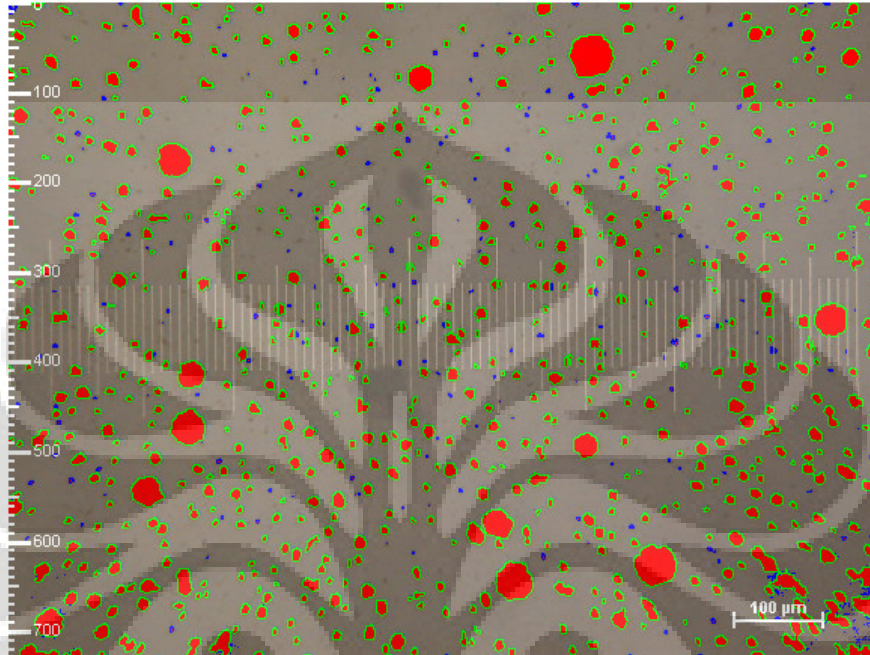
Posisi A2 (tanpa etsa , pembesaran 100X)



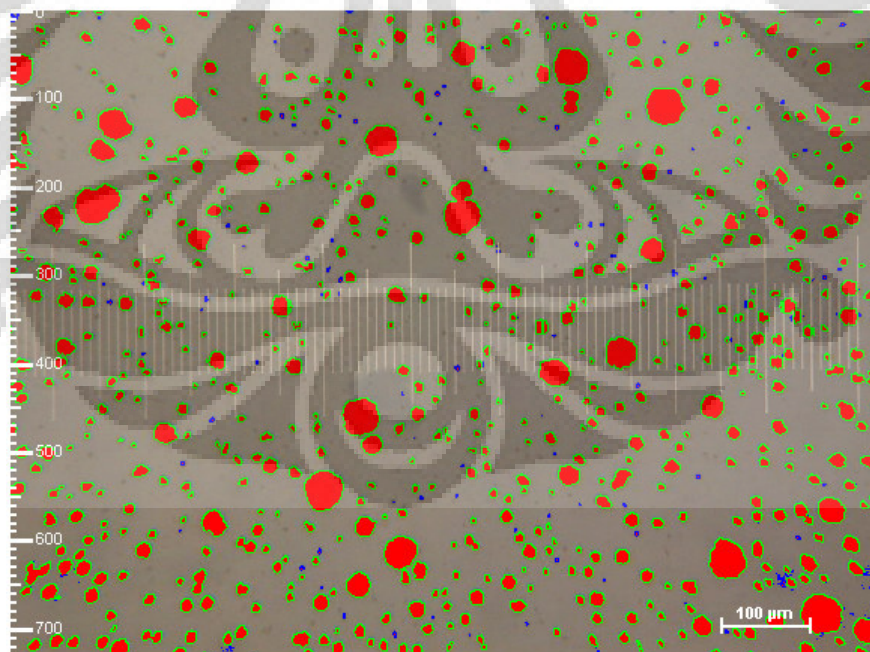
Posisi A3 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-

P5T1D-3

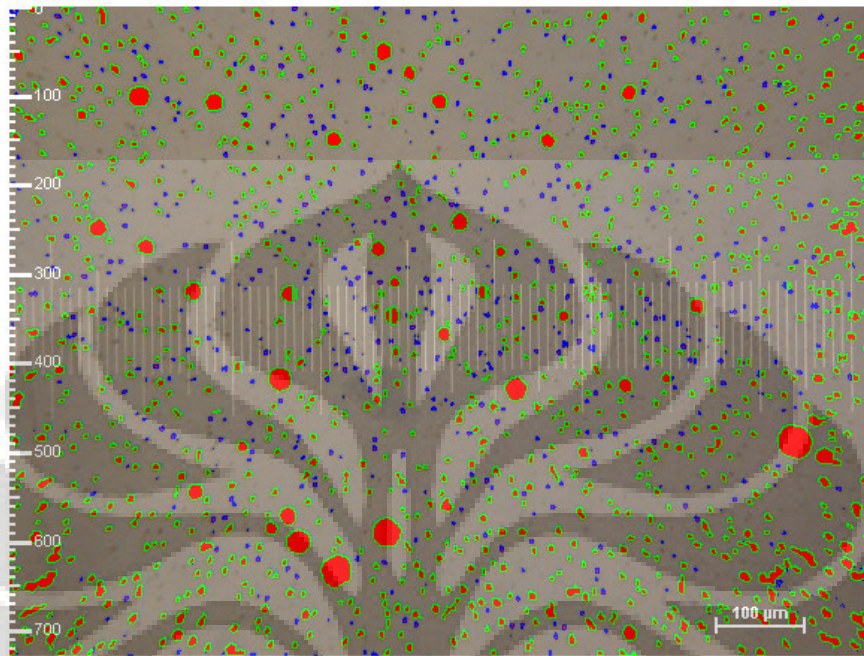


Posisi A1 (tanpa etsa , pembesaran 100X)



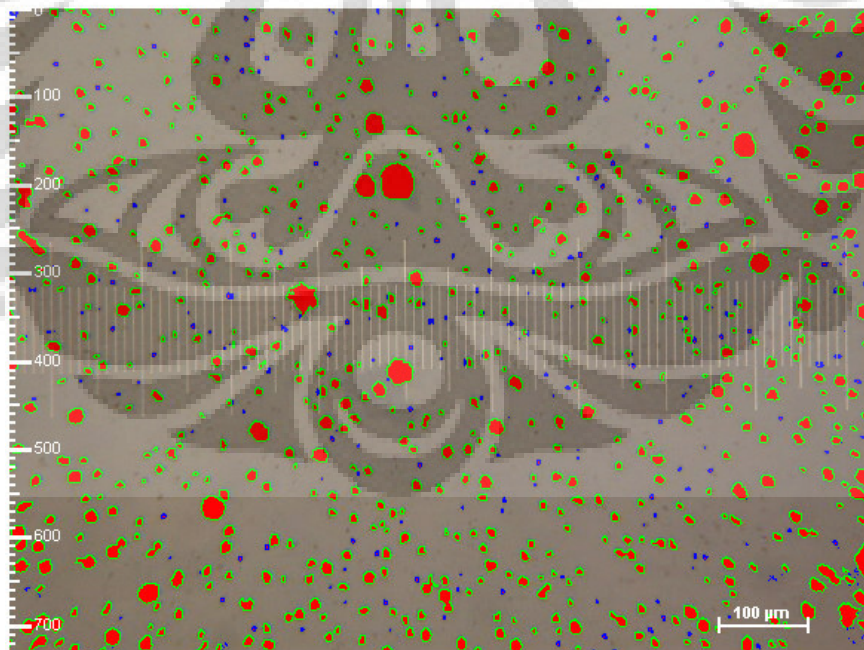
Posisi A2 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-



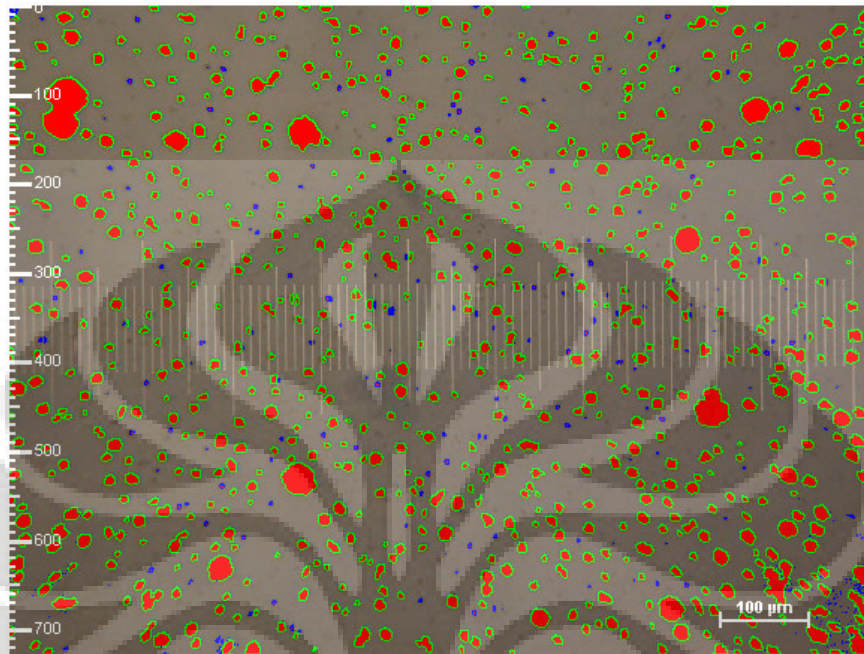
Posisi A3 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

P5T1D-4

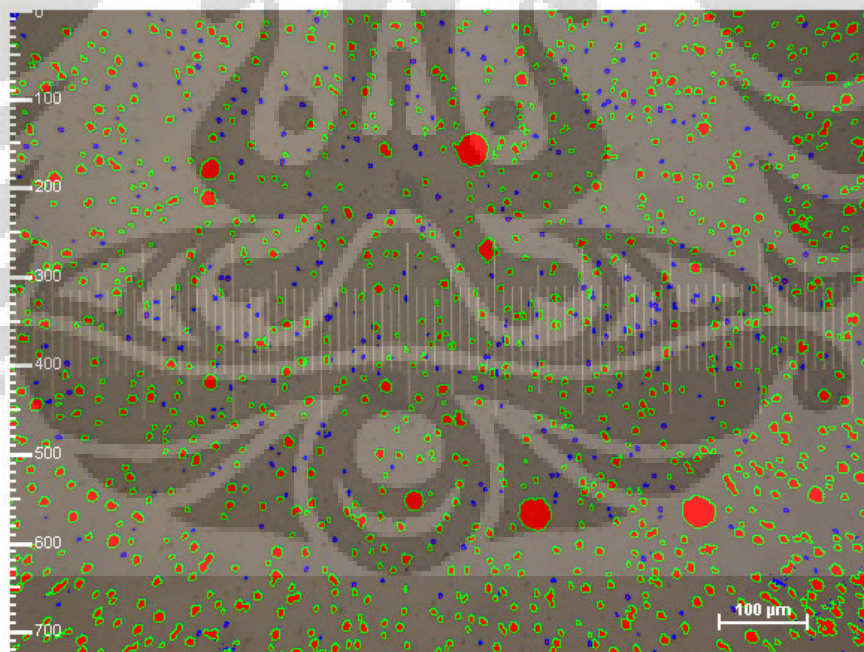


Posisi A1 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-



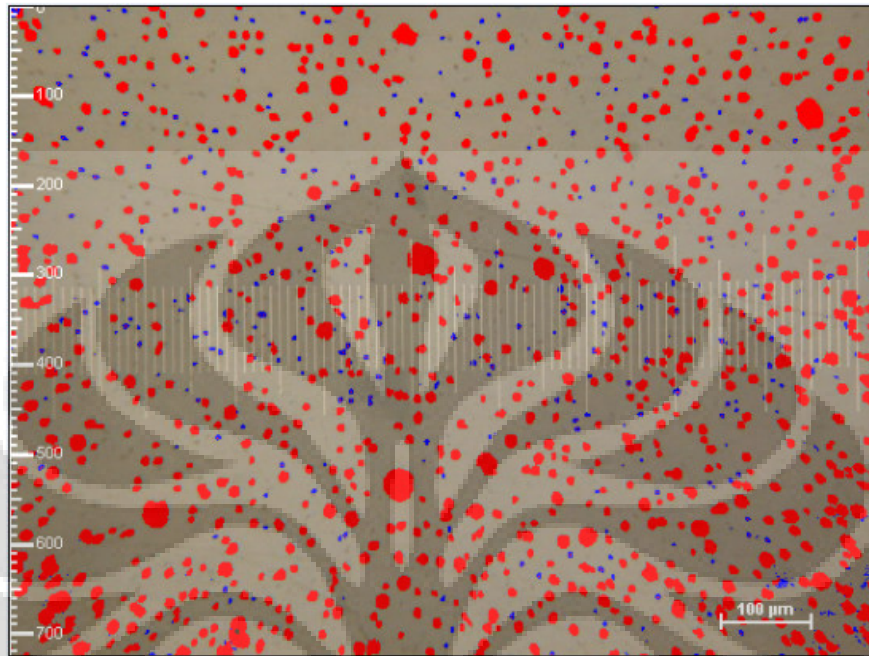
Posisi A2 (tanpa etsa , pembesaran 100X)



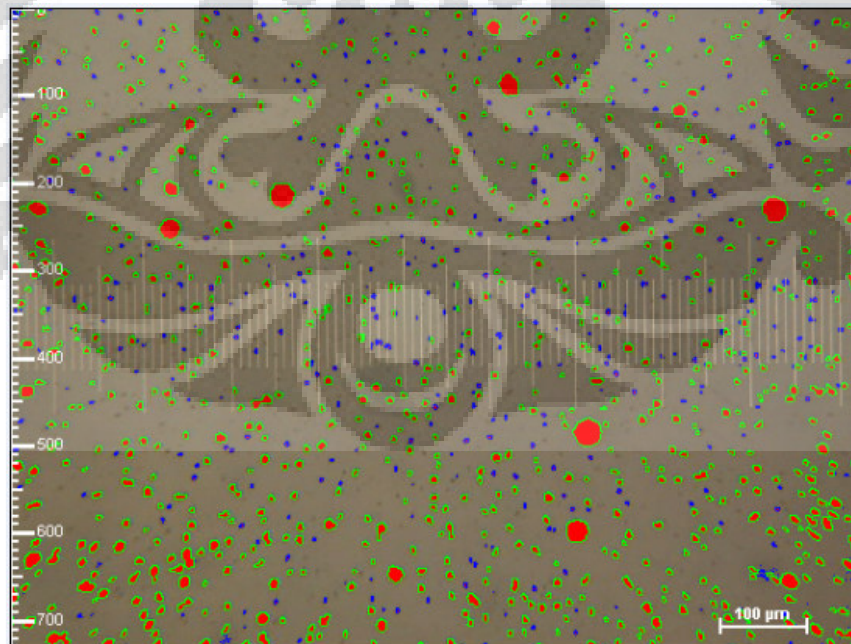
Posisi A3 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-

P5T1D-5

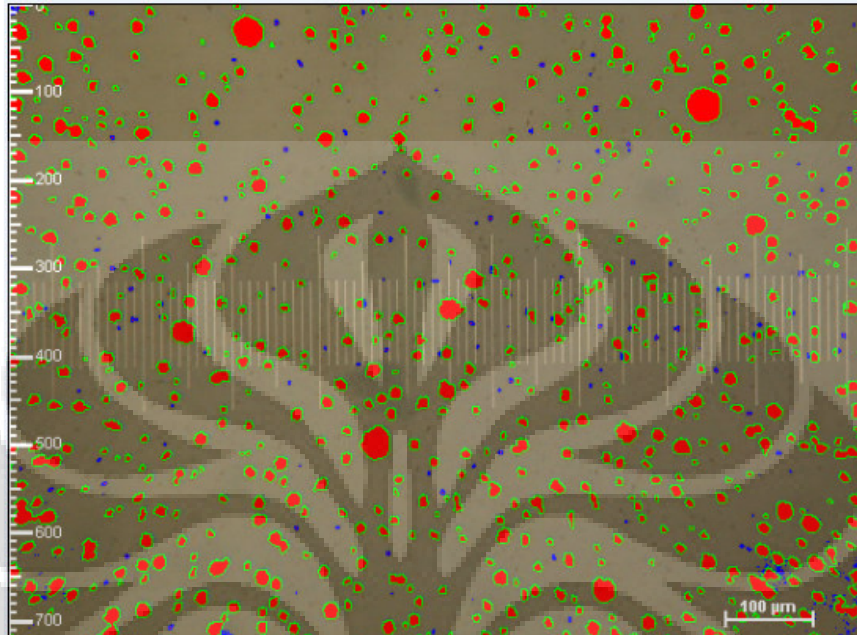


Posisi A1 (tanpa etsa, pembesaran 100X)



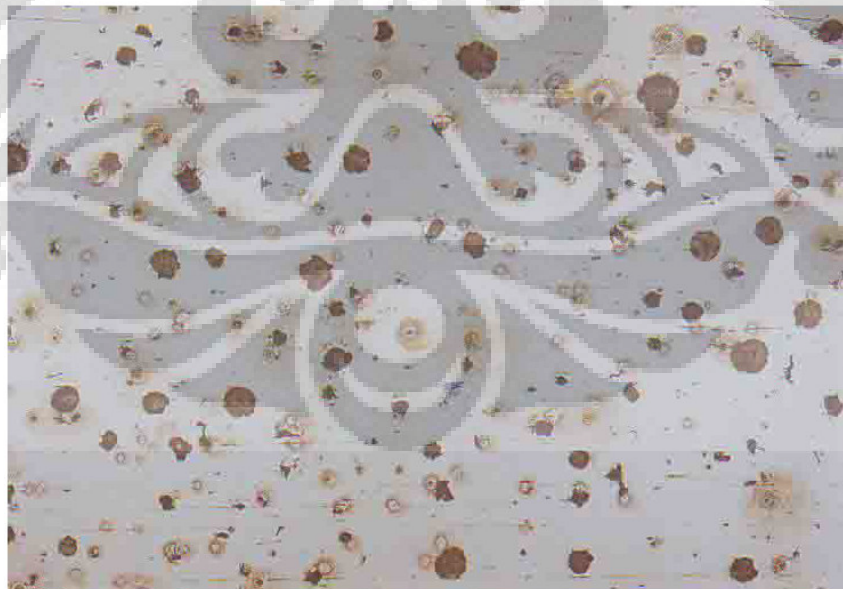
Posisi A2 (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-



Posisi A3 (tanpa etsa, pembesaran 100X)

Y Block



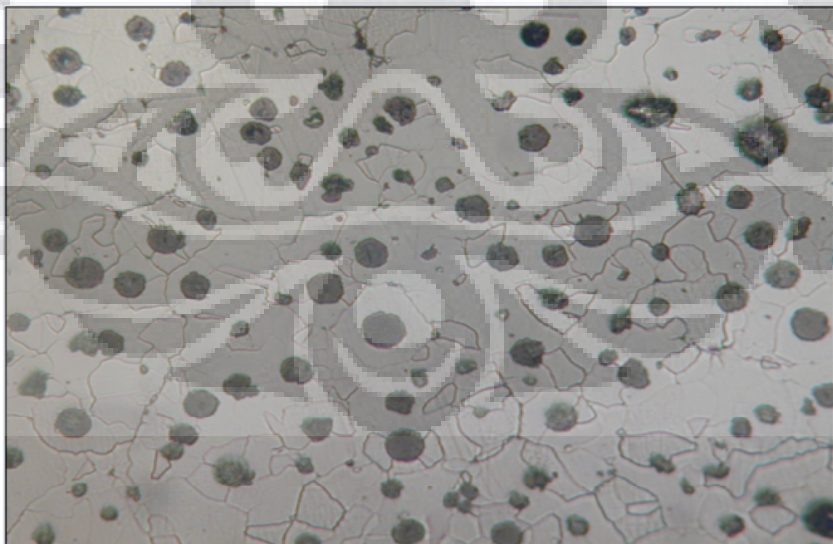
P5Y-I (tanpa etsa , pembesaran 100X)

-Lanjutan-



P5Y-II (tanpa etsa, pembesaran 100X)

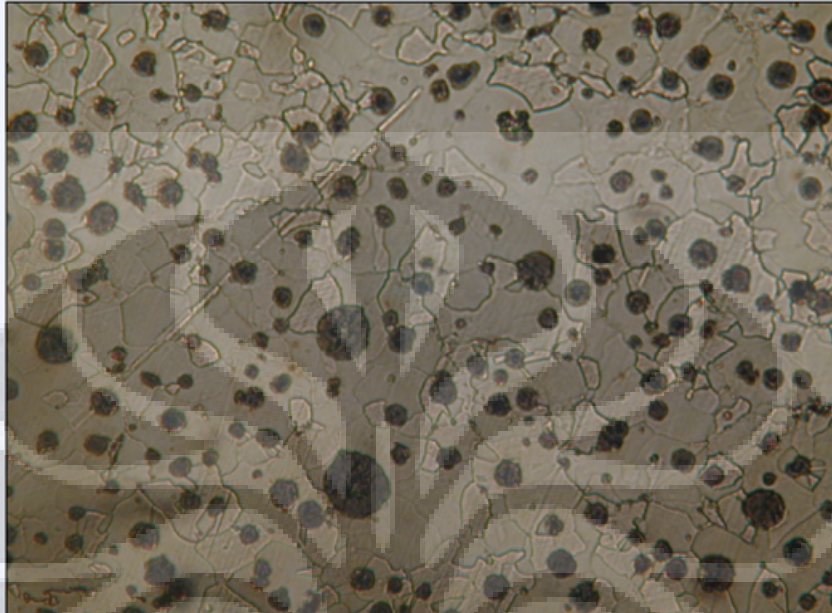
P5T1D-1



Etsa nital 2%, pembesaran 200X

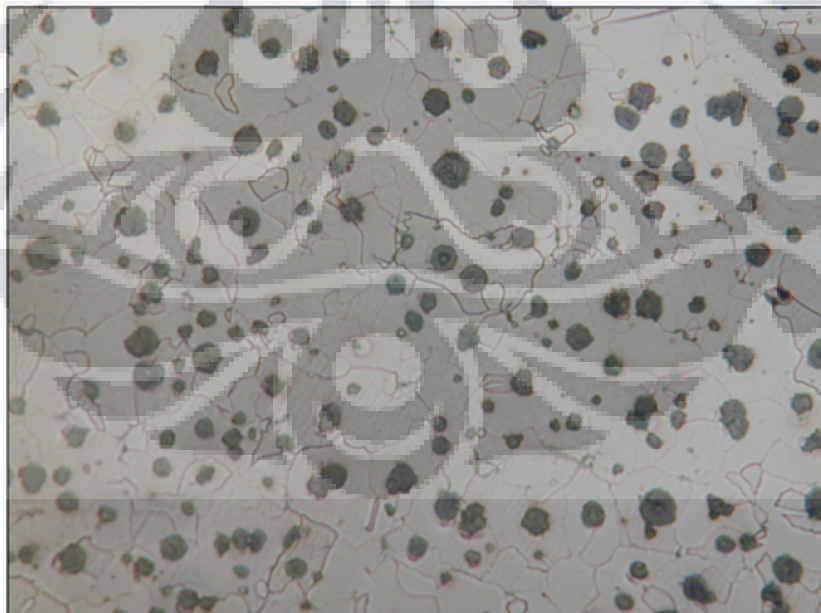
-Lanjutan-

P5T1D-2



Etsa nital 2%, pembesaran 200X

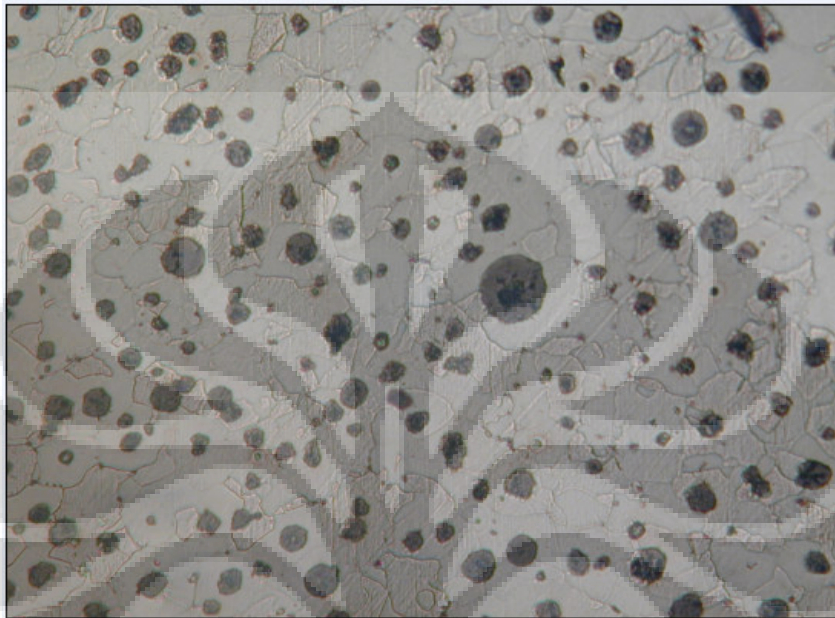
P5T1D-3



Etsa nital 2%, pembesaran 200X

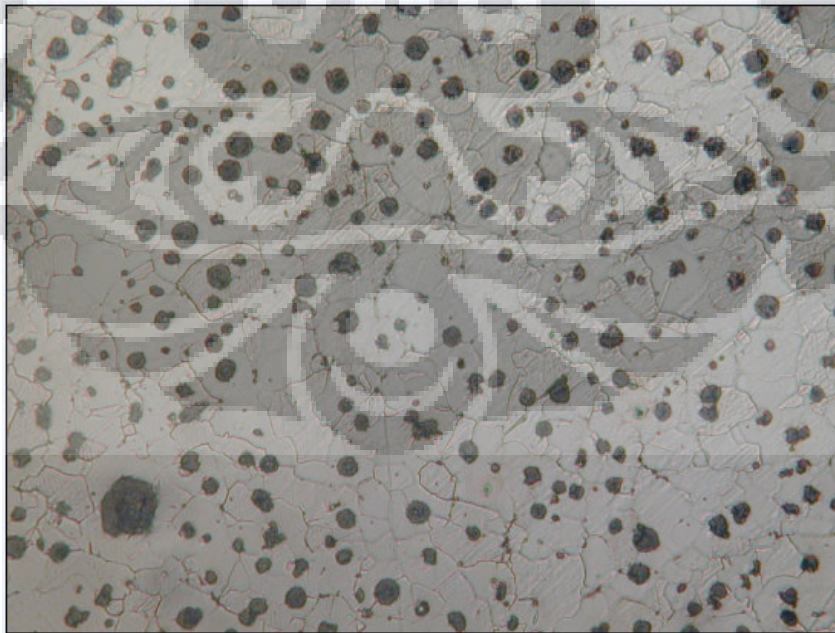
-Lanjutan-

P5T1D-4



Etsa nital 2%, pembesaran 200X

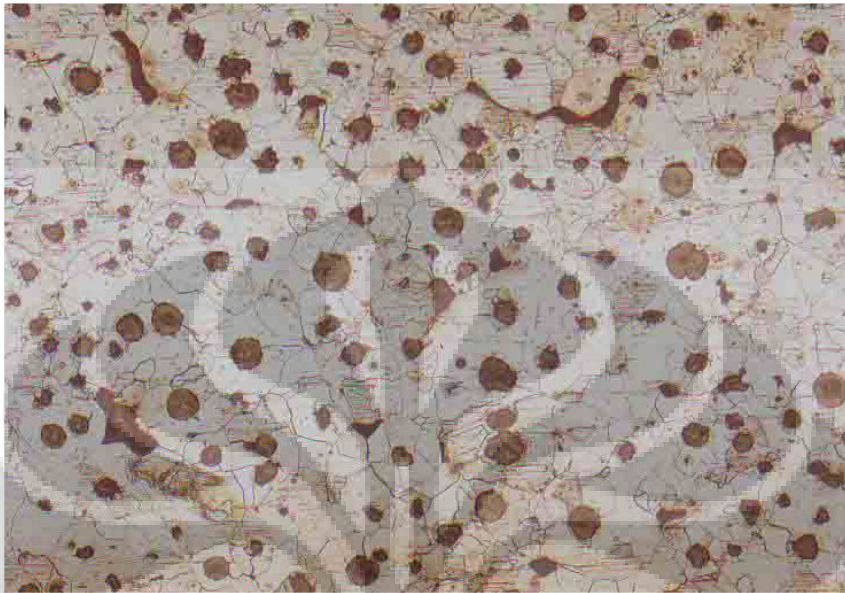
P5T1D-5



Etsa nital 2%, pembesaran 100X

-Lanjutan-

Y Block



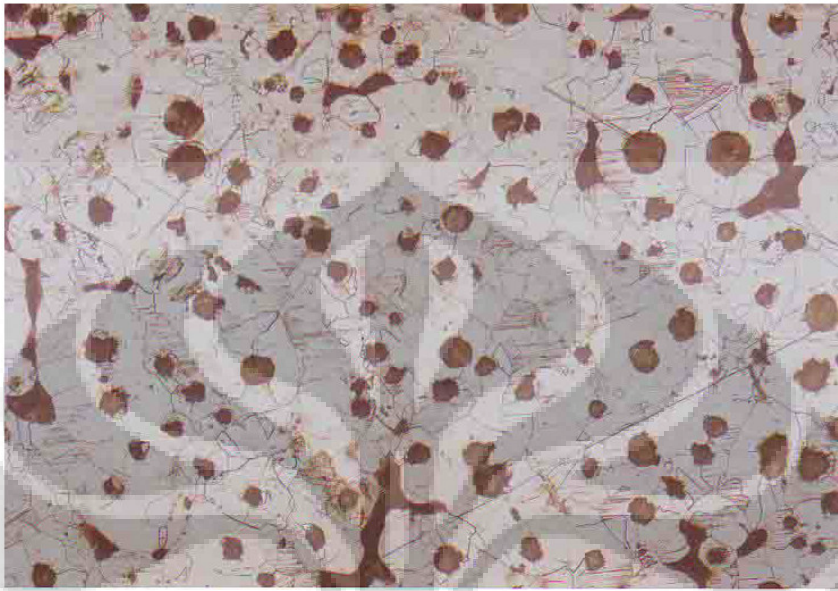
P5Y-I(etsa nital 2%, pembesaran 100X)



P5Y-I(etsa nital 2%, pembesaran 500X)

-Lanjutan-

Y Block



P5Y-II(etsa nital 2%, pembesaran 100X)



P5Y-II(etsa nital 2%, pembesaran 500X)

LAMPIRAN 5

Data Uji Tarik

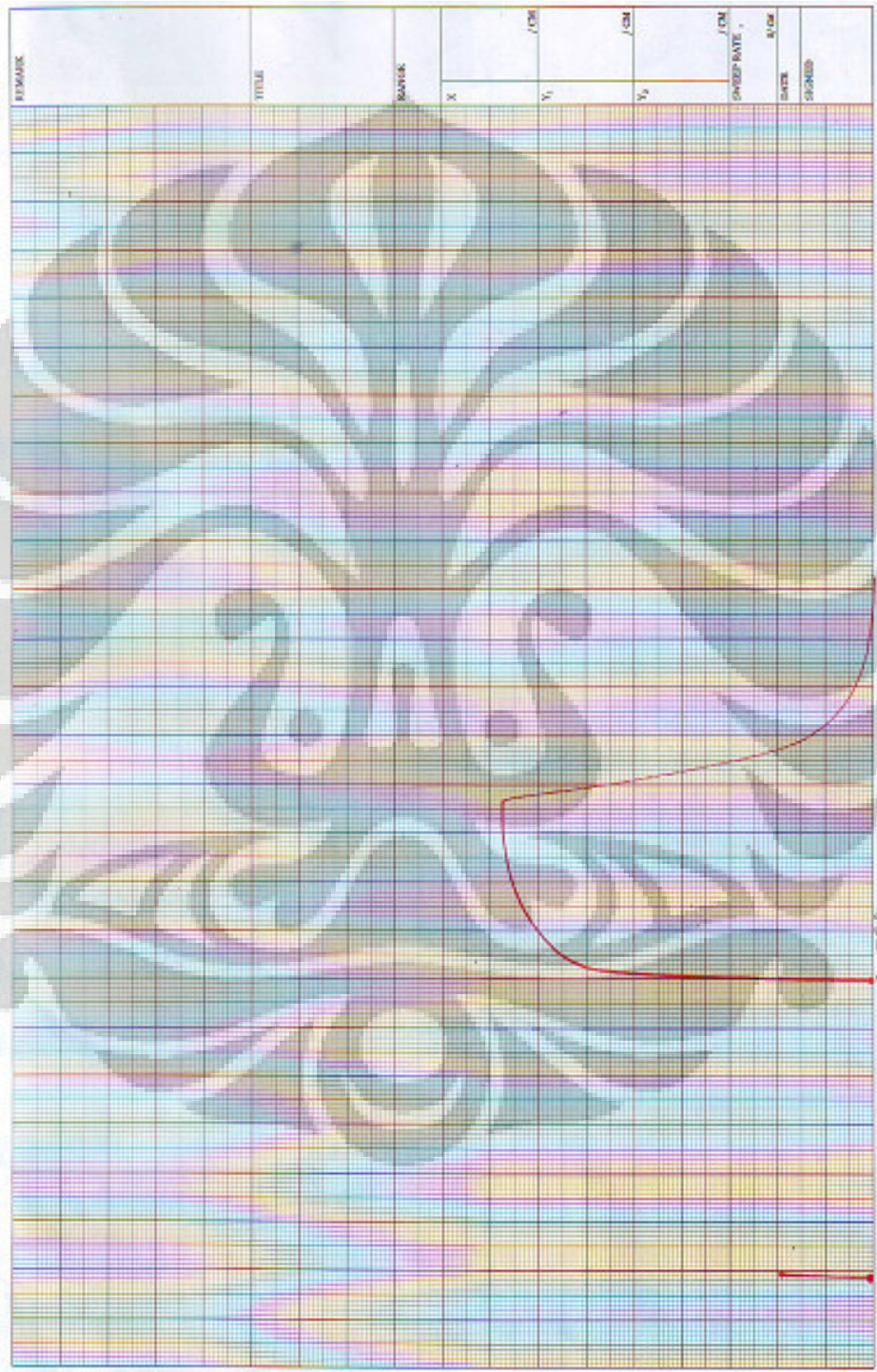
PLAT TWDI										
Sampel	t	w	A	Pu	σ_u	Py	σ_y	lo	Δl	e
D1	1.74	20.15	35.061	1550	44.20866	1300	37.07824	50	1.75	3.5
D2	2.85	20.05	57.1425	1800	31.5002	1200	21.00013	50	2.25	4.5
D3	3.7	19.99	73.963	3150	42.58886	2750	37.18075	50	0.95	1.9
D4	3.78	18.01	68.0778	3150	46.27059	2650	38.92605	50	1.85	3.7
D5	4.86	19.68	95.6448	3975	41.56002	3300	34.50266	50	1.75	3.5

Y BLOCK										
Sampel	Diameter	A	Pu	σ_u	Py	σ_y	lo	Δl	e	
P5Y-I	14.2	158.2874	7850	49.59333	4500	28.4293	49	12.25	25	
P5Y-II	14	153.86	7750	50.37047	5850	38.02158	50	9.8	19.6	

LAMPIRAN 6

Grafik Uji Tarik

Y Block



LAMPIRAN 7

Data Uji Kekerasan

P = 187.5kg		Dia bola Brinell = 3.2 mm			Waktu : 15 detik	
Kode	sampel	x	y	d	HB	HB Rata-rata
P5T1D-1	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	
P5T1D-2	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	
P5T1D-3	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	
P5T1D-4	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	
P5T1D-5	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	
P5Y-I	1	1.08	1.12	1.1	191.3849	191.589
	2	1.13	1.12	1.125	182.7001	
	3	1.08	1.07	1.075	200.6818	
P5Y-II	1	1.12	1.1	1.11	187.8406	187.8485
	2	1.09	1.12	1.105	189.6008	
	3	1.11	1.12	1.115	186.1041	