



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PROSES *AUSTEMPERING* TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIS *THIN WALL DUCTILE IRON*
(*TWDI*) HASIL PENGECORAN VERTIKAL DENGAN ISOLATOR
DAN TANPA ISOLATOR**

SKRIPSI

**EWALDO ZULFIKAR DAMANIK
0606074804**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PROSES *AUSTEMPERING* TERHADAP STRUKTUR
MIKRO DAN SIFAT MEKANIS *THIN WALL DUCTILE IRON*
(*TWDI*) HASIL PENGECORAN VERTIKAL DENGAN ISOLATOR
DAN TANPA ISOLATOR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**EWALDO ZULFIKAR DAMANIK
0606074804**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI METALURGI DAN MATERIAL
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ewaldo Zulfikar Damanik

NPM : 0606074804

Tanda Tangan :

Tanggal : 6 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ewaldo Zulfikar Damanik

NPM : 0606074804

Program Studi : Teknik Metalurgi dan Material

Judul Skripsi : Pengaruh Proses *Austempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) Hasil Pengecoran Vertikal dengan Isolator dan Tanpa Isolator

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Johny Wahyuadi M, DEA ()

Penguji 1 : Dwi Marta Nurjaya, ST, MT ()

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2010

KATA PENGANTAR

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

1. Prof.Dr.Ir. Johnny Wahyuadi Soedarsono, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ibu Rianti Dewi Sulamet Ariobimo, selaku pembimbing saya di lapangan yang telah mengajarkan banyak hal tentang tema skripsi yang saya buat;
2. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
3. Sahabat saya, Wandi Wahyudi, Wahyu Dwi Haryono, dan Ari Azahari (Almarhum) yang telah bekerja keras bersama untuk dapat menyelesaikan penelitian yang panjang ini.

Saya menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih memiliki banyak kelemahan dan kekurangan. Oleh karenanya saya sangat berharap masukan dan saran terhadap skripsi saya ini supaya bisa menjadi lebih baik lagi.

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

Depok, 23 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Ewaldo Zulfikar Damanik

NPM : 0606074804

Program Studi : Metalurgi dan Material

Departemen : Metalurgi dan Material

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

Pengaruh Proses *Austempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) Hasil Pengecoran Vertikal dengan Isolator dan Tanpa Isolator

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 6 Juli 2010

Yang menyatakan

(Ewaldo Zulfikar Damanik)

v

Universitas Indonesia

ABSTRAK

Nama : Ewaldo Zulfikar Damanik
Program Studi : Metalurgi dan Material
Judul : Pengaruh Proses *Austempering* terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) Hasil Pengecoran Vertikal dengan Isolator dan Tanpa Isolator

Pembuatan besi tuang nodular menjadi ADI menggunakan suatu proses yang disebut proses *austempering*. Proses ini membutuhkan pemilihan suhu dan waktu tahan yang tepat. Jika tidak, maka akan didapatkan struktur mikro bukan seperti yang diinginkan. Penentuan pengaruh proses *austempering* dilakukan dengan cara membandingkan antara TWDI (sebelum proses *austempering*) dengan TWADI (setelah proses *austempering*) pada struktur mikro dan sifat mekanis. Struktur mikro yang didapat setelah proses *austempering* antara lain berupa matriks *ausferrite* yang sebelumnya adalah *ferrite*. Sifat mekanis yang didapat setelah proses *austempering* antara lain nilai kekerasan yang meningkat sebesar 187 HB (103%) untuk pelat A1 dan 213 HB (130%) untuk pelat C1, nilai kekuatan tarik yang meningkat sebesar 47 kg/mm² (152%) untuk pelat A1 dan 44 kg/mm (142%) untuk pelat C1, dan nilai elongasi yang meningkat sebesar 1% untuk keduanya.

Kata kunci: TWDI, TWADI, *Austempering*, Struktur Mikro, Sifat Mekanis.

ABSTRACT

Name : Ewaldo Zulfikar Damanik
Study Program : Metallurgy and Material Engineering
Title : The Effect of Austempering Process into Microstructure and Mechanical Properties Thin Wall Ductile Iron (TWDI) From Vertical Casting with Insulation and without Insulation Material

Process of making ductile iron into ADI take a process called austempering. This process need correct temperature and time. If we do not do that we can not get the microstructure that we want. The effect of austempering take place in microstructure and mechanical properties of TWDI (before austempering) and TWADI (after austempering). After austempering the microstructure of the matrix change into ausferrite which is ferrite before. After austempering the mechanical properties such as hardness which increases 187 HB (103%) for plate A1 and 213 HB (130%) for plate C1, tensile strength which increases 47 kg/mm² (152%) for plate A1 and 44 kg/mm² (142%) for plate C1, and elongation which increases 1% for both of the plate .

Key word: TWDI, TWADI, Austempering, Microstructure, Mechanical Properties

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR RUMUS.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Besi Tuang Nodular (BTN).....	5
2.1.1 Struktur Mikro Besi Tuang Nodular.....	5
2.1.2 <i>Liquid Treatment</i>	7
2.1.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular.....	8
2.1.4 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular.....	14
2.1.5 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul.....	16
2.2 Isolator pada Pengecoran Dinding Tipis.....	17
2.2.1 Pengertian <i>Glasswool</i>	17
2.2.2 Tujuan Penggunaan <i>Glasswool</i>	17
2.2.3 Pengaruh Penggunaan <i>Glasswool</i>	18
2.3 <i>Austempered Ductile Iron (ADI)</i>	18
2.3.1 <i>Fluidized Bed</i>	25

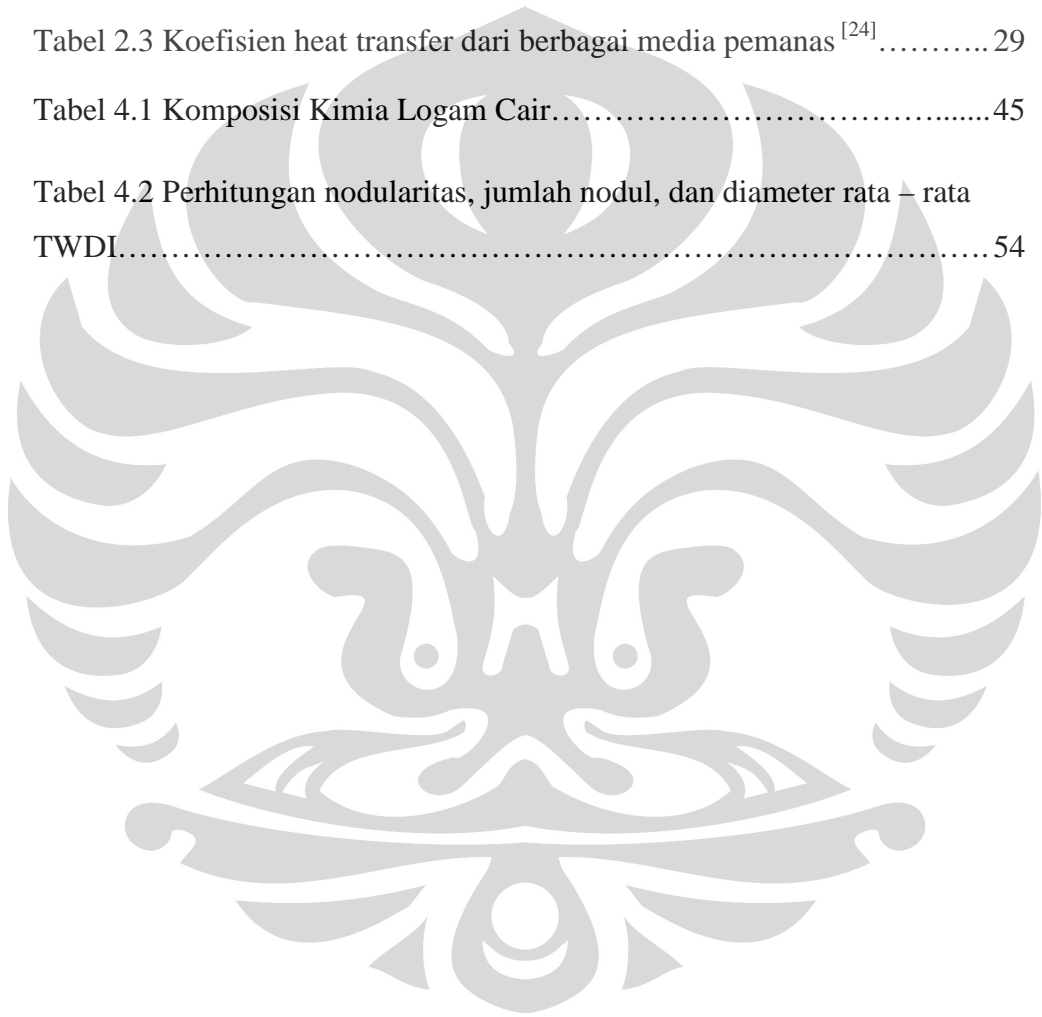
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
3.2 Tahap Pembuatan <i>Thin Wall Ductile Iron</i> (TWDI).....	31
3.2.1 Alat.....	31
3.2.1.1 Tahap Perbaikan Pola.....	31
3.2.1.2 Tahap Pembuatan Cetakan.....	31
3.2.1.3 Tahap Pembuatan Logam Cair.....	31
3.2.1.4 Tahap Pengecoran.....	32
3.2.1.5 Tahap Pembongkaran.....	32
3.2.1.6 Tahap Permesinan.....	32
3.2.2 Bahan Baku.....	32
3.2.2.1 Tahap Perbaikan Pola.....	32
3.2.2.2 Tahap Pembuatan Logam Cair.....	32
3.2.2.3 Tahap Pembuatan Cetakan.....	32
3.2.3 Prosedur Penelitian.....	33
3.2.3.1 Perbaikan Pola.....	33
3.2.3.2 Pembuatan Cetakan.....	34
3.2.3.3 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD).....	35
3.2.3.4 Pengecoran.....	36
3.2.3.5 Pembongkaran.....	36
3.2.3.6 Permesinan.....	36
3.3 Tahap Pembuatan <i>Thin Wall Austempered Ductile Iron</i> (TWADI).....	37
3.3.1 Proses <i>Austempering</i>	37
3.4 Preparasi Sampel.....	39
3.4.1 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro.....	39
3.4.1.1 Pemotongan (<i>Cutting</i>).....	40
3.4.1.2 <i>Mounting</i>	40
3.4.1.3 Pengamplasan (<i>Grinding</i>).....	41
3.4.1.4 Pemolesan (<i>Polishing</i>).....	41
3.4.2 Preparasi Sampel Uji Kekerasan.....	42

3.4.3 Preparasi Uji Tarik.....	42
3.5 Pengujian.....	42
3.5.1 Pengamatan Struktur Mikro.....	42
3.5.2 Pengujian kekerasan.....	43
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	
4.1 Komposisi Kimia.....	45
4.2 Pengamatan Visual.....	46
4.3 Pengamatan Struktur Mikro.....	48
4.3.1 Perhitungan Nodularitas, Jumlah Nodul, dan Diameter Rata-rata Nodul.....	58
4.4 Pengujian Mekanik.....	57
4.4.1 Pengujian Kekerasan.....	57
4.4.2 Pengujian Tarik.....	58
BAB 5 KESIMPULAN.....	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63
LAMPIRAN.....	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pengklasifikasian besi tuang nodular.....	6
Tabel 2.2. Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995.....	12
Tabel 2.3 Koefisien heat transfer dari berbagai media pemanas ^[24]	29
Tabel 4.1 Komposisi Kimia Logam Cair.....	45
Tabel 4.2 Perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata – rata TWDI.....	54



DAFTAR GAMBAR

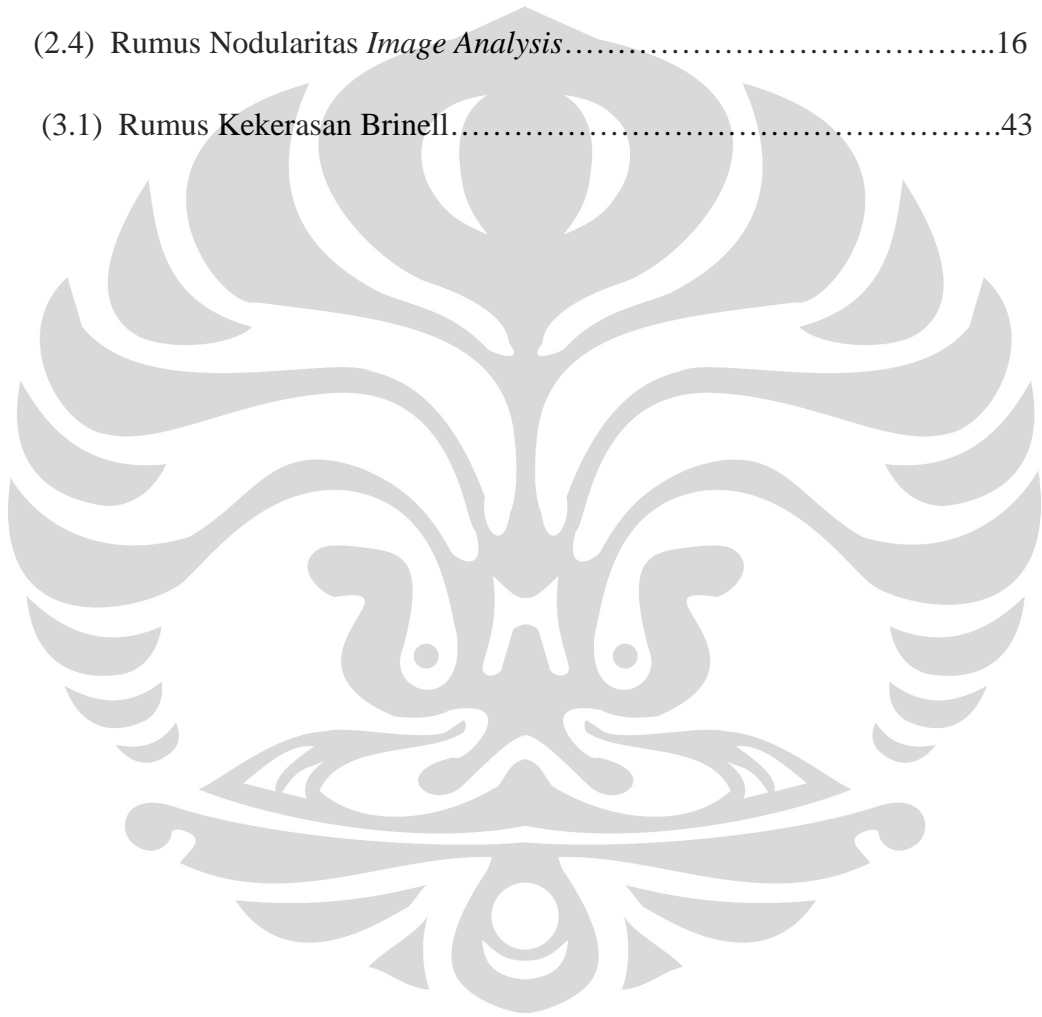
Gambar 1.1 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material (<i>Keough, 1998</i>).....	1
Gambar 1.2 Perbandingan biaya produksi dari beberapa material.....	2
Gambar 2.1. Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada <i>ferritic ductile iron</i>	9
Gambar 2.2. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular..	9
Gambar 2.3. Pengaruh bentuk grafit pada kurva stress-strain beberapa besi cor.....	10
Gambar 2.4. Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247.....	11
Gambar 2.5 Pengaruh temperatur <i>austempering</i> terhadap <i>yield strength</i> ADI ^[13]	20
Gambar 2.6 Pengaruh temperatur <i>austempering</i> terhadap elongasi ADI ^[13]	21
Gambar 2.7 Hubungan antara temperatur <i>austempering</i> , penyerapan energi impak, elongasi dan <i>stabilized austenite</i> ^[13]	21
Gambar 2.8 Pengaruh waktu <i>austempering</i> terhadap elongasi beberapa jenis ADI ^[18]	22
Gambar 2.9 Pengaruh waktu tahan <i>austempering</i> terhadap jumlah <i>stabilized austenite</i> dan kekerasan ADI ^[13]	23
Gambar 2.10 (a) dan (b) contoh metode peletakan material pada rak, (c) metode peletakkan material untuk proses kontinyu antara proses austenisasi dengan proses <i>austempering</i> ^[18]	25
Gambar 2.11 Skema fluidized bed: 1) <i>fluidized bed</i> , 2) keranjang kawat, 3) tempat distribusi udara ^[22]	26

Gambar 2.12 Kurva pendinginan pada bagian tengah sampel dengan beberapa media pendingin: 1) air, 2) oli, 3) salt bath (300°C), 4) <i>fluidized bed</i> dan 5) udara ^[22]	26
Gambar 2.13 Pengaruh media pendingin terhadap bagian dalam material: a) pengaruhnya terhadap perbedaan temperatur antara bagian permukaan dengan inti material; b) pengaruhnya terhadap lamanya pendinginan sampel. 1) air, 2) oli, 3) salt bath (300°C), 4) <i>fluidized bed</i> dan 5) udara ^[22]	26
Gambar 2.14 Hubungan antara kenaikan temperatur dan laju pemanasan terhadap waktu. (From V. Paschkis and J. Persson, <i>Industrial Electric Furnaces and Appliances</i> , Interscience, New York, 1960, pp. 14–25.) hal. 52.....	28
Gambar 2.15 Konduktivitas termal berbagai macam material refraktori ^[24]	28
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.2 Desain Pengecoran Stefansu ^[6]	34
Gambar 3.3 Sepasang Cetakan (<i>cup and drag</i>).....	35
Gambar 3.4 Skema proses <i>austempering</i>	37
Gambar 3.5 Penanganan sampel <i>austempering</i>	38
Gambar 3.6 Sampel sebelum masuk dapur.....	38
Gambar 3.7 Sampel ketika akan dimasukkan ke dapur.....	39
Gambar 3.8 Pengambilan sampel uji dari pelat.....	40
Gambar 3.9 Proses <i>mounting</i>	41
Gambar 3.10 Mikroskop Optik Digital.....	42
Gambar 3.11 Pengujian Kekerasan Brinell.....	43
Gambar 3.12 Mesin Uji Tarik.....	44
Gambar 4.1 TWADI setelah dikeluarkan dari dapur.....	46

Gambar 4.2 TWADI setelah kawat dilepas dan dijajarkan.....	47
Gambar 4.3 Perbandingan visual sampel TWDI dan TWADI.....	47
Gambar 4.4 Struktur mikro non etsa TWDI dan TWADI.....	49
Gambar 4.5 Struktur mikro dengan etsa TWDI dan TWADI.....	50
Gambar 4.6 Struktur mikro ADI pada proses <i>austempering</i> pada suhu 350°C selama 90 menit ^[28]	51
Gambar 4.7 Struktur mikro TWADI pada proses <i>austempering</i> pada suhu 350°C selama 10 menit ^[31]	51
Gambar 4.8 Karbida pada TWDI dan TWADI.....	52
Gambar 4.9 Struktur mikro besi tuang nodular feritik yang mengandung <i>primary carbide</i> ^[31]	53
Gambar 4.10 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas, dan diameter rata – rata TWDI dengan software NIS Element.....	54
Gambar 4.11 Grafik perbandingan nodularitas	55
Gambar 4.12 Grafik perbandingan jumlah nodul.....	55
Gambar 4.13 Grafik perbandingan diameter rata-rata.....	56
Gambar 4.14 Grafik perbandingan kecepatan pendinginan pada cetakan pasir biasa dengan cetakan campuran pasir dan LDASC.....	57
Gambar 4.15 Grafik perbandingan nilai kekerasan.....	58
Gambar 4.16 Grafik perbandingan nilai kekuatan tarik.....	59
Gambar 4.17 Grafik perbandingan elongasi.....	60
Gambar 4.18 Pengaruh suhu austensiasi dan waktu tahan <i>austempering</i> pada kekuatan tarik.....	61
Gambar 4.19 Pengaruh suhu austensiasi dan waktu tahan <i>austempering</i> pada elongasi.....	61

DAFTAR RUMUS

(2.1) Rumus Kadar Mg Efektif.....	8
(2.2) Rumus <i>Carbon Equivalent</i>	13
(2.3) Rumus Nodularitas JIS G5502 1989.....	16
(2.4) Rumus Nodularitas <i>Image Analysis</i>	16
(3.1) Rumus Kekerasan Brinell.....	43



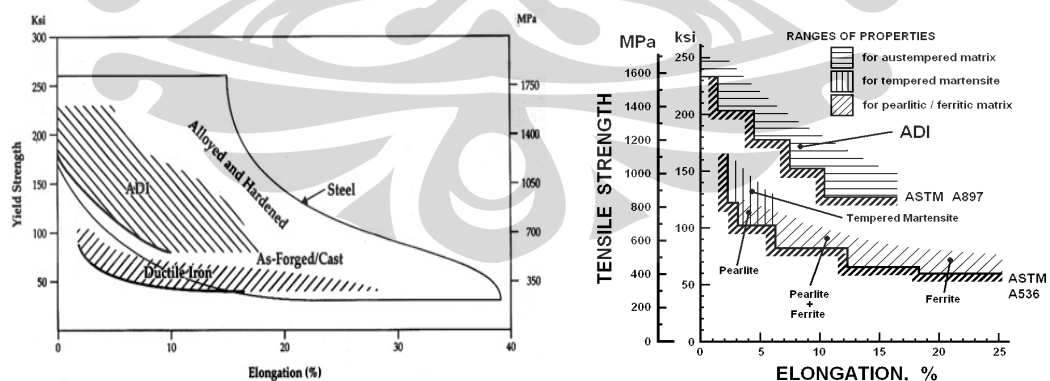
BAB 1

PENDAHULUAN

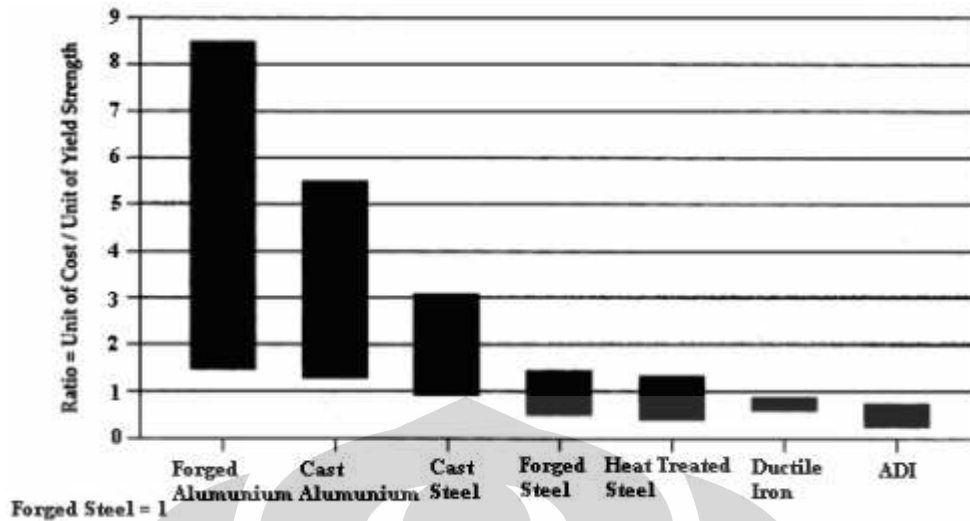
1.1 Latar Belakang

Pemilihan material yang tepat merupakan salah satu faktor keberhasilan dari suatu industri (khususnya industri otomotif). Oleh karena itu faktor ini menjadi sangat penting karena akan sangat menentukan kualitas dan biaya dari produk yang nanti akan dihasilkan. Sudah menjadi rahasia umum bahwasanya pasar, dalam hal ini konsumen, membutuhkan kualitas produk yang baik namun memiliki biaya produksi yang bersaing. Hal ini tentu saja membuat para konsumen terus melakukan perburuan material-material yang dapat memenuhi spesifikasi dan kebutuhan produk tersebut..

Salah satu material yang memiliki kualitas yang baik dan biaya produksi yang rendah adalah besi tuang nodular yang dapat ditingkatkan ketangguhannya menjadi *Astempered Ductile Iron* (ADI). Material ini memiliki kelebihan yang cukup baik dalam sisi sifat mekanis maupun dalam hal keekonomisan. Hal ini dikarenakan selain ADI memiliki kekuatan dan keuletan yang baik, pembuatan ADI pun tidak memerlukan biaya yang tinggi seperti halnya pada aluminium atau baja. Berikut ini merupakan tampilan perbandingan sifat mekanis dan biaya produksi ADI dengan beberapa material lain



Gambar 1.1 Perbandingan sifat tarik ADI dengan beberapa material (*Keough, 1998*)



Gambar 1.2 Perbandingan biaya produksi dari beberapa material

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].

Pembuatan ADI dimulai dari proses pembuatan *ductile iron* yang diawali dengan pembuatan besi tuang nodular. Sebenarnya pembuatan besi tuang nodular ini adalah pengembangan dari versi dari besi tuang kelabu. Besi tuang nodular ini dibuat dengan menambahkan unsur pembentuk nodul, biasanya ditambahkan magnesium atau cerium, sehingga didapatkan bentuk grafit yang berbentuk nodul atau bulatan. Kesitimewaan dari bentuk nodul ini adalah besi tuang menjadi lebih

ductile ketimbang berbentuk *flakes* pada besi tuang kelabu sehingga mudah dibentuk pada bentuk – bentuk yang rumit. Kendatipun lebih *ductile* material ini juga tidak kalah dalam segi kekuatan dibandingkan besi tuang kelabu. Di samping itu ternyata besi tuang kelabu memiliki kecenderungan *strenght-weight ratio* yang lebih baik dibandingkan material aluminium yang sampai saat ini masih menjadi proiritas utama pada industri otomotif dikarenakan *strenght-weight ratio*-nya.

1.2 Perumusan Masalah

Pembuatan FCD 450 yakni dengan cara pengecoran vertikal dan desain pola pelat tipis dari Stefanescu. Desain pola pelat Stefanescu merupakan pola desain pelat yang memperhatikan aspek pendinginan dini^[1]. Proses pendinginan dini yang dimaksud adalah proses pendinginan terlebih dahulu pada produk yang lebih tipis.

Pada proses pengecoran ini akan digunakan pola pelat yang diletakkan secara vertikal dan memiliki ukuran tebal semua 1 mm yang di susun dari bawah ke atas. Hal ini merupakan variasi ketinggian dari peletakan pelat untuk melihat kecepatan pendinginan. Pelat ini nantinya digunakan untuk bahan dasar *Thin Wall Austempered Ductile Iron* (TWADI).

Pelat yang sudah jadi yang selanjutnya disebut sebagai *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) dilakukan proses *austempering* untuk mendapatkan *Thin Wall Austempered Ductile Iron* (TWADI). Proses *austempering* ini menggunakan temperatur 350°C dengan waktu tahan selama 10 menit.

Permasalahan yang timbul dari proses *austempering* ini adalah adanya suatu proses yang disebut *window process*. Proses ini mensyaratkan adanya proses austenisasi yang optimal dan *austempering* pada suhu dan waktu yang tepat. Hal ini dikarenakan jikalau kita salah dalam memilih suhu dan waktu tahan *austempering*, struktur mikro yang terbentuk bukanlah *ausferrite* seperti yang diinginkan namun dapat berupa *bainite* atau *martensite*.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan antara lain:

1. Mengetahui pengaruh *austempering* terhadap struktur mikro pada besi ulet dinding tipis yang meliputi jumlah nodul, nodularitas, dan karbida.
2. Mengetahui pengaruh *austempering* terhadap sifat mekanis pada besi ulet dinding tipis.

1.4 Batasan Masalah

Pembuatan FCD 450 ini menggunakan proses pengecoran vertical desain pola Stefanescu dengan beberapa modifikasi. Pola terbuat dari bahan kayu dan cetakan terbuat dari pasir furan. Ketebalan pelat dari bawah ke atas masing – masing adalah 1 mm. Pelat yang telah jadi kemudian dibagi menjadi dua. Bagian pertama yakni *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI) dilakukan foto mikro, uji tarik, dan uji keras. Bagian kedua dilakukan proses Austempering untuk mendapatkan *Thin Wall Austempered Ductile Iron* (TWADI). Setelah menjadi TWADI, pelat tersebut dilakukan foto mikro, uji tarik, dan uji keras. Setelah proses pengujian kedua pelat selesai (TWDI dan TWADI) dilakukan analisis perubahan struktur mikro dan sifat mekanisnya.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 Besi Tuang Nodular (BTN)

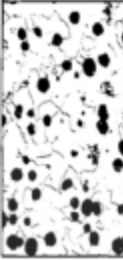


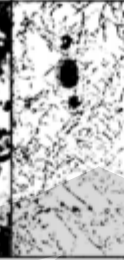
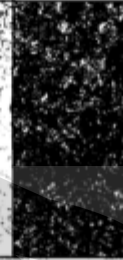


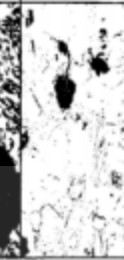
Besi tuang nodular memiliki sifat mekanik yang lebih baik dari pada material besi tuang yang lain, antara lain memiliki keuletan yang tinggi (elongasi sebesar 18% pada grade tertentu) dan kekerasan 143-187 HB. Yield strength 40.000 psi (275 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 90,000 psi (620 MPa) untuk jenis martensitik. Sementara untuk tensile strength mencapai 60,000 psi (414 MPa) untuk jenis feritik dan lebih dari 200,000 psi (1380 MPa) untuk jenis martensitik^[3], lihat Tabel 2.1. Sifat mekanik ini dapat dicapai karena besi tuang nodular memiliki jumlah yang tinggi dan bentuk grafit yang bulat pada struktur mikronya.

2.1.1 Struktur Mikro Besi Tuang Nodular

Berdasarkan struktur mikronya, besi tuang nodular dikelompokkan menjadi^[2] :

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

Tabel 2.1 Pengklasifikasian besi tuang nodular

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.1.2 *Liquid Treatment*

Liquid treatment merupakan usaha menambahkan unsur-unsur ke dalam logam cair yang tentunya sudah memiliki komposisi tertentu. Penambahan unsur-unsur ini dilakukan dengan tujuan untuk memperbaiki struktur ataupun sifat-sifat mekanis dari FCD 45. Penambahan unsur-unsur ini tidak akan mempengaruhi komposisi dari material. Hal ini dikarenakan selain penambahan unsur ini sangat sedikit, unsur-unsur ini akan menguap ke udara tatkala logam cair telah dituang. Ada dua jenis proses *liquid treatment* yang akan dilakukan pada FCD 45 ini yakni proses inokulasi dan proses nodulasi.

Inokulasi

Inokulasi adalah peristiwa penambahan bahan silikon (Si) ke dalam logam cair. Inokulasi bertujuan untuk memicu pertumbuhan grafit sekaligus meratakan persebaran grafit di dalam logam cair. Pertumbuhan grafit terjadi karena sementit dipacu oleh silikon untuk bereaksi menjadi ferit dan grafit. Dalam proses inokulasi biasanya silikon ditambahkan dalam bentuk ferro-silikon berkisar antara (0,5-1,5)% sesuai dengan kebutuhan. Fungsi lain penambahan inokulan yakni memacu pertumbuhan grafit, meratakan distribusi grafit di dalam logam, memberikan struktur yang homogen pada setiap ketebalan, mencegah timbulnya cil, memperbaiki sifat mekanis logam, dan mampu menghilangkan karbida eutektik di dalam ladeburit

Ada 2 metode yang dikenal dalam penambahan inoculan ke dalam logam cair :

a. Metode *Ladle* Inokulasi

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

b. Metode *Late* Inokulasi

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

Nodularisasi

Nodularisasi adalah peristiwa penambahan senyawa magnesium (Mg) atau Cerium (Ce) ke dalam logam cair yang bertujuan untuk mengubah bentuk grafit dari bentuk serpih menjadi bentuk nodular atau bola-bola kecil. Karena Mg lebih murah dan mudah diperoleh, maka biasanya unsur yang ditambahkan adalah Mg, sehingga biasa disebut Mg-treatment. Banyaknya Mg yang ditambahkan dan larut dalam logam cair tergantung pada kadar sulfur dan kadar oksigen. Banyaknya kadar Mg yang efektif dapat dihitung dengan rumus 2.1 berikut :

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

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

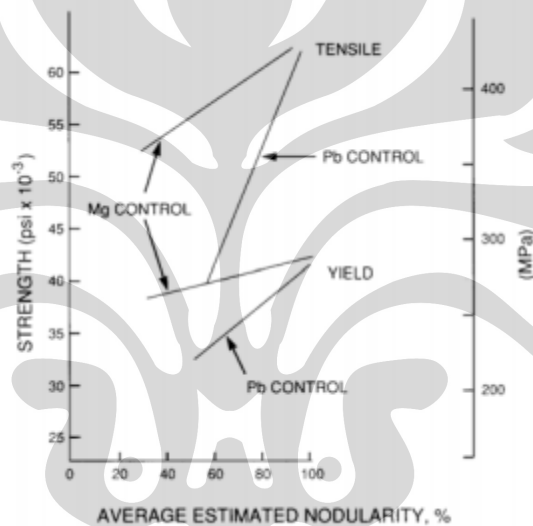
2.1.3 Sifat Mekanis Besi Tuang Nodular

Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat besi tuang antara lain : Struktur grafit, jumlah grafit, struktur matriks, ukuran ketebalan, karbida, dan lapisan kulit

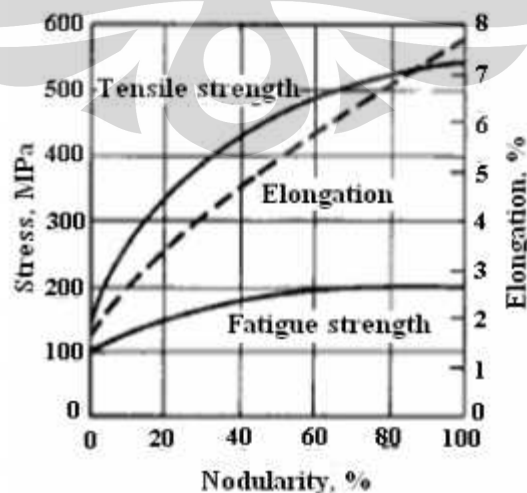
a. Struktur grafit

Grafit adalah bentuk stabil dari karbon murni dalam besi tuang. Sifat fisik yang penting adalah massa jenis yang rendah, kekerasan yang rendah, dan

konduktivitas panas dan pelumasan yang tinggi. Bentuk grafit, dapat berupa serpihan hingga bulat, memainkan peranan penting dalam menentukan sifat mekanis besi tuang seperti terlihat pada gambar 2.1. Grafit serpih berperan seperti retakan dalam matrik besi, sementara grafit bulat berperan seperti penangkap retakan, memberikan perbedaan pada sifat mekanis^[8]. Kehadiran grafit dalam bentuk bulatan pada besi tuang nodular (pada besi kelabu berbentuk *flakes*) disebabkan oleh penambahan magnesium (atau magnesium dan cerium) pada logam cair. Jumlah dan bentuk grafit dalam besi tuang nodular ditentukan selama solidifikasi dan tidak dapat diubah oleh perlakuan panas berikutnya.

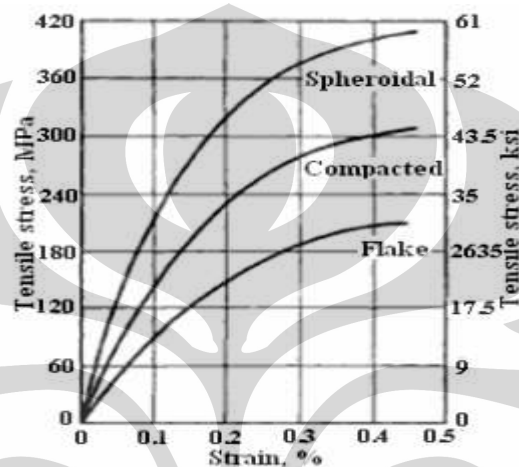


Gambar 2.1. Pengaruh nodularisasi dari Mg dan Pb pada *ferritic ductile iron*



Gambar 2.2. Pengaruh nodularitas pada sifat mekanik besi tuang nodular

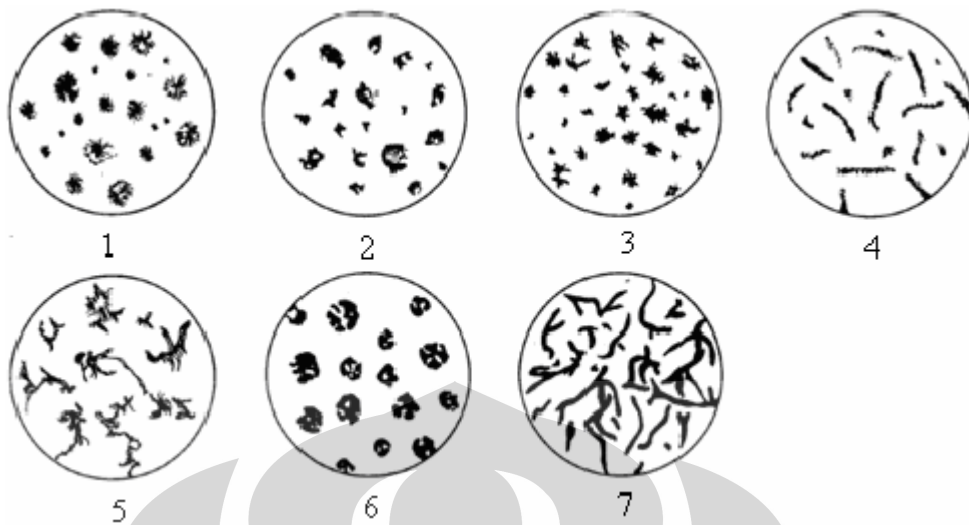
Bentuk dari grafit non-nodular seperti bentuk *flakes* (serpilh tipis) dengan sudut yang tajam memiliki pengaruh yang merugikan pada kekuatan besi tuang nodular, lihat gambar 2.3. Presentasi nodularitas yang rendah juga menyebabkan ketahanan energi impak yang lebih rendah, mengurangi kekuatan fatik, meningkatkan kemampuan peredaman, meningkatkan konduktifitas panas dan mengurangi ketahanan listrik.



Gambar 2.3. Pengaruh bentuk grafit pada kurva stress-strain beberapa besi cor

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

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



Gambar 2.4. Klasifikasi bentuk grafik berdasarkan ASTM A247

b. Jumlah grafit

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

c. Struktur matriks

Faktor utama dalam menentukan tingkat perbedaan dari spesifikasi besi tuang nodular adalah struktur matriks. Struktur *ferrite* memberikan kekuatan dan kekerasan yang rendah, tetapi keuletan dan ketangguhan yang tinggi. Sementara pearlit memberikan kombinasi antara kekuatan yang tinggi dan keuletan yang umumnya memenuhi kebutuhan banyak aplikasi rakayasa. Pada hasil as-cast, matrik akan terdiri dari berbagai proporsi dari *pearlite* dan *ferrite*. Keuletan dan kekuatan impak ditentukan oleh proporsi dari *ferrite* dan *pearlite* dalam matriks. Ketika jumlah *pearlite* meningkat, kekuatan dan kekerasan juga meningkat, lihat Tabel 2.2. Struktur matriks dapat diubah dengan perlakuan panas, dan yang paling sering dilakukan adalah proses anil untuk menghasilkan matrik feritik penuh dan *normalizing* untuk menghasilkan matrik perlitik. Secara umum, proses anil menghasilkan matrik yang lebih ulet dengan temperatur transisi impak yang lebih rendah dari pada yang dihasilkan dalam

Universitas Indonesia

besi as-cast feritik. *Normalizing* menghasilkan kekuatan tarik dan jumlah elongasi yang lebih tinggi dari pada yang dihasilkan dalam besi as-cast perlitik penuh.

Tabel 2.2. Sifat mekanik besi tuang nodular berdasarkan Standar JIS G 5502-1995

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

d. Ukuran ketebalan

Ketika ukuran bidang menurun, kecepatan solidifikasi dan pendinginan dalam cetakan meningkat. Pada bidang yang lebih tipis, dapat terbentuk struktur karbida yang akan meningkatkan kekerasan, menurunkan kemampumesinan dan menyebabkan kegetasan. Struktur ini sangat dihindari dalam pengecoran karena lebih bersifat merugikan. Untuk memperoleh struktur nodular yang halus dalam bidang tipis, inokulan yang kuat diperlukan untuk memicu pembentukan grafit melalui jumlah nodul yang tinggi. Ketika ukuran bidang meningkat, jumlah nodul menurun dan segregasi mikro menjadi lebih besar. Ini menghasilkan ukuran nodul yang besar, pengurangan jumlah ferit pada hasil as-cast, dan meningkatkan ketahanan terhadap pembentukan struktur feritik penuh ketika di anil. Pada bagian yang lebih berat, elemen minor khususnya pembentuk karbida seperti kromium, titanium, dan vanadium, membentuk pola tersendiri yang mengurangi sifat keuletan, ketangguhan, dan kekuatan. Pengaruh pada ketahanan luluh dinyatakan paling sedikit. Pada

bentuk bagian yang besar penting untuk diinokulasi dengan baik dan penambahan elemen-elemen minor dengan komposisi rendah.

e. Karbida

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

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

- Karakteristik logam cair

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

- Liquid Treatment

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

- Cetakan

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

- Desain dari sistem pengecorannya

Pada penelitian-penelitian terdahulu, carbon equivalent, CE, adalah parameter yang harus diperhatikan untuk memperoleh struktur mikro yang bersih dari karbida. Nilai CE tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$CE = \%C + 0.31\%Si \dots \dots \dots (2.2)$$

Loper mengatakan untuk mendapatkan suatu struktur yang bersih dari karbida maka nilai CE minimum adalah 4.3%^[12] dan juga mengusulkan nilai CE (4,75-4,92)% untuk memperoleh struktur mikro bersih karbida untuk TWDI dengan ketebalan (3–5)mm^[13].

f. Lapisan Kulit

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

2.1.4 Pengaruh Elemen Paduan pada Besi Tuang Nodular

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: Karbon (C) , Silikon (Si), Mangan (Mn) , Magnesium (Mg) , Sulfur (S), Karbon (C)

a. Karbon (C)

Karbon dapat mempengaruhi fluiditas dari besi cair dan karakteristik cacat *shrinkage* dari benda cor. Elemen karbon dihasilkan dari pig iron, *carburiizer* dan *scrap* besi cor. Jumlah elemen karbon optimum pada (3,4-3,8)% yang disesuaikan dengan kandungan silikon. Komposisi karbon diatas batas tersebut dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi menyebabkan ketidakkokohan dari cetakan. Sedangkan komposisi dibawah batas tersebut dapat mengakibatkan kekurangan pembenihan (*lack of feeding*) dan pada kandungan yang sangat rendah karbida-karbida dapat muncul di permukaan, khususnya pada benda tipis.

b. Silikon (Si)

Silikon merupakan agen grafitasi yang kuat. Sumber silikon berasal dari *raw material* yang meliputi scrap besi cor, pig iron, paduan besi dan sejumlah kecil paduan yang ditambahkan selama inokulasi. Jumlah kandungan silikon optimum pada (2,0-2,8)%. Kadar yang lebih rendah menyebabkan keuletan tinggi ketika dilakukan perlakuan panas dan membahayakan terbentuknya

karbida pada bagian yang tipis, sementara kadar silikon tinggi mempercepat anil dan mencegah pembentukan karbida pada bagian tipis. Selain itu, silikon meningkatkan temperatur transisi ulet ke getas pada besi feritik dan meningkatkan kekerasan, kekuatan luluh dan kekuatan tarik. Dengan komposisi normal, peningkatan jumlah silikon menghadirkan struktur yang mempunyai jumlah ferit lebih besar. Selain itu juga berpengaruh pada penguatan padatan dan kekerasan dari *ferrite*. Namun, meningkatnya jumlah *ferrite* menyebabkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik menurun meskipun elongasi dan kekuatan dampak meningkat. Struktur *ferrite* yang mengelilingi bulatan grafit pada pearlitic ductile iron mengurangi kekuatan luluh tetapi meningkatkan elongasi, kekuatan dampak dan kekuatan fatik.

c. Mangan (Mn)

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

d. Magnesium (Mg)

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

e. Sulfur (S)

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

2.1.5 Perhitungan Nodularitas dan Jumlah Nodul

Bentuk grafit dalam besi tuang nodular, pada awalnya, ditentukan oleh nodularitas dan jumlah nodulnya. Nodularitas didefinisikan sebagai kebulatan dari grafit. Dianggap sebagai nodul bila bulat atau hampir bulat. Kondisi hampir bulat didefinisikan sebagai panjang grafit kurang dari 2 kali diameternya. Sedangkan jumlah nodul (*nodule count*) didefinisikan sebagai banyaknya grafit nodul per milimeter kuadrat luas permukaan yang pembesaran mikroskop 100x. Perhitungan jumlah nodul dapat dilakukan dengan membandingkan foto mikro struktur non-etsa dengan Microstructure Rating Chart 1993 yang dikeluarkan oleh American Foundry Society - AFS dan Graphite Rating in Ductile Iron Chart 1999 yang dikeluarkan oleh Ductile Iron Society – DIS. Nodularitas dapat ditentukan dengan melihat pada ASTM A 247 dengan cara membandingkan atau menghitung setiap jenis grafit yang ada dan dilaporkan dalam bentuk prosentase.

Perhitungan nodularitas juga ditentukan dalam JIS G5502 1989 seperti terlihat pada rumus 2.2 sebagai berikut:

$$\text{Nodularitas} = \frac{0n_1 + 0,3n_2 + 0,7n_3 + 0,9n_4 + 1n_5}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , dan n_5 adalah jenis grafit yang tercantum pada diagram klasifikasi bentuk dari grafit. Tetapi pada tahun 2001, perhitungan ini diubah menjadi hanya memperhitungkan tipe V dan tipe VI saja terhadap keseluruhan jumlah grafit yang ada dengan memperhatikan diameter dari nodul grafit. Kemudian dengan bantuan image analysis perhitungan nodularitas dikembangkan menjadi rumus 2.3 sebagai berikut^[6]:

$$\text{Nodularitas} = \frac{A_{Acc.}}{A_{Acc.} + A_{Un.Acc.}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

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 .

2.2 Isolator pada Pengecoran Dinding Tipis

Faktor yang membedakan penelitian ini dengan penelitian yg lain adalah modifikasi cetakan yang dilakukan dengan penggunaan isolator. Plat hasil pengecoran dinding tipis biasanya mengalami permasalahan seperti terbentuknya karbida dan lapisan kulit (skin effect). Berdasarkan penelitian-penelitian oleh beberapa ahli, upaya yang dilakukan untuk meminimalisasi terbentuknya karbida dan lapisan kulit ini adalah hanya dengan proses permesinan saja. Kita tahu bahwa faktor penyebab timbulnya masalah tersebut adalah proses pendinginan yang terjadi terlalu cepat sehingga pembekuan pada plat tipis juga berlangsung sangat cepat. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan sampel yang pada proses pembuatan cetakkannya digunakan isolator dengan harapan bahwa isolator tersebut dapat membuat proses kecepatan pendinginan berlangsung lebih lambat sehingga didapatkan struktur akhir benda cor yang bebas dari karbida maupun lapisan kulit. Adapun isolator yang digunakan pada penelitian ini adalah glasswool.

2.2.1 Pengertian *Glasswool*

Glasswool merupakan salah satu jenis bahan isolasi yang terbuat dari borosilicate glass dengan unsur pokok yang ada didalamnya adalah pasir, soda abu dolomit, limestone, ulexite, dan anhidrit. Bahan-bahan utam ini kemudian dilebur didalam dapur pada temperatur 1400°C kemudian serat tersebut dimasukkan ke dalam spinners. Spinners ini prinsip kerjanya dengan memutar atau berotasi dengan beribu-ribu lubang kecil yang terdapat di sekelilingnya dimana serat tersebut diberikan gaya sentrifugal sehingga terbentuklah glass fiber. Serat ini kemudian di-spray dengan penguat resin, water repellents dan mineral oil.

2.2.2 Tujuan Penggunaan *Glasswool*

Glasswool merupakan salah satu jenis dari material untuk insulasi thermal. Material ini digunakan untuk mengurangi laju kecepatan dari proses perpindahan panas. Perpindahan panas merupakan transisi energi thermal dari objek atau benda dengan temperatur yang tinggi menuju objek atau benda yang temperaturnya lebih

Universitas Indonesia

rendah. Ketika terdapat perbedaan temperatur suatu benda terhadap kondisi lingkungannya maka pada saat tersebut terjadilah proses perpindahan panas baik dari lingkungan menuju benda maupun dari benda menuju lingkungan. Proses ini berlangsung secara terus menerus sampai tercapainya kondisi kesetimbangan. Adapun kondisi kesetimbangan yang terjadi pada pengecoran ini adalah saat cetakan mulai membeku dan berubah dari liquid menjadi solid.

2.2.3 Pengaruh Penggunaan *Glasswool*

Glasswool yang dipasang pada salah satu cetakan akan menunjukkan proses perpindahan panas yang berbeda karena dengan adanya *glasswool* maka semakin kecil perpindahan panas ke atau dari lingkungan. Perpindahan panas terjadi karena perbedaan temperatur. Secara umum kita mengenal tiga buah jenis perpindahan panas yaitu secara konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui medium yang diam misalnya perpindahan panas melalui benda padat. Sementara perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi pada suatu permukaan dengan fluida yang bergerak karena adanya gradien temperatur. Perpindahan panas yang terjadi pada cetakan ini adalah perpindahan secara konveksi. *Glasswool* banyak digunakan sebagai material insulasi karena sifatnya yang tidak mudah terbakar dan memiliki temperatur melting yang tinggi. Selain itu thermal properties seperti specific heat, thermal diffusivity, dan konduktivitas thermal *glasswool* yang sangat baik.

2.3 *Austempered Ductile Iron (ADI)*

ADI merupakan suatu material yang mempunyai kombinasi menarik antara biaya produksi yang murah, fleksibilitas desain, kemampuan permesinan yang baik, rasio kekuatan terhadap berat, serta ketangguhan, ketahanan aus dan kekuatan fatik yang baik^[3]. Penelitian tentang ADI sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tetapi baru diproduksi secara komersil dalam skala kecil pada tahun 1970-an karena *variable liquid treatment*, *casting* dan *heat treatment* harus dikontrol secara sangat hati-hati untuk mendapatkan struktur mikro yang sesuai agar mendapatkan sifat yang maksimal.

Universitas Indonesia

Syarat yang harus dimiliki besi tuang nodular agar dapat dijadikan ADI adalah nodularitas $> 90\%$, jumlah nodul $> 1000/\text{mm}^2$, matrik *ferrite/ pearlite* dengan perbandingan yang konsisten, minimal level karbida, minimal level inklusi dan tidak ada segregasi^[5]. Untuk penggunaan langsung maka harus bersih dari karbida^[1].

Sifat dari ADI dikarenakan struktur matriks yang unik dari *acicular ferrite* dan *austenite* penstabil karbon yang disebut *ausferrite*. Pada awalnya, struktur mikro yang dimiliki ADI disebut sebagai *bainite*. Penyebutan ini mengambil dasar pada struktur mikro yang dihasilkan oleh proses austempering baja. Tetapi dari hasil-hasil penelitian selanjutnya ternyata struktur yang dihasilkan pada ADI berbeda dengan yang dihasilkan oleh proses austempering baja, kemudian berdasarkan ASTM A644-92 disebut sebagai *ausferrite*.

Standar proses austempering terdapat pada standar ASTM 897M dan EN156. Martinez menggunakan standar ASTM 897M 850-550-10 ADI untuk proses *austempering* pelat besi tuang nodular dengan ketebalan 3 mm^[21]. Parameter selama proses perlakuan panas sangat menentukan sifat-sifat ADI. Dengan pemilihan parameter proses perlakuan panas yang tepat, dapat diperoleh sifat-sifat mekanis yang baik. Parameter yang mempengaruhi proses austempering adalah:

a. Temperatur austenisasi.

Temperatur austenisasi merupakan faktor yang sangat penting untuk dimulainya transformasi fasa menjadi *austenite*. Temperatur austenisasi yang terlalu rendah tidak memungkinkan seluruh fasa material menjadi *austenite* sehingga pengerasan tidak tercapai. Semakin tinggi temperatur austenisasi akan menggeser kurva TTT ke kanan sehingga proses *austempering* lebih mudah dilakukan. Sedangkan pada temperatur austenisasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya pengasaran butir sehingga sifat mekanis material menjadi buruk.

b. Waktu tahan austenisasi

Bersama dengan temperatur austenisasi, waktu tahan austenisasi menentukan kesempurnaan transformasi fasa menjadi *austenite* dan kandungan karbon di dalam *austenite*. Apabila temperatur dan waktu tahan austenisasi

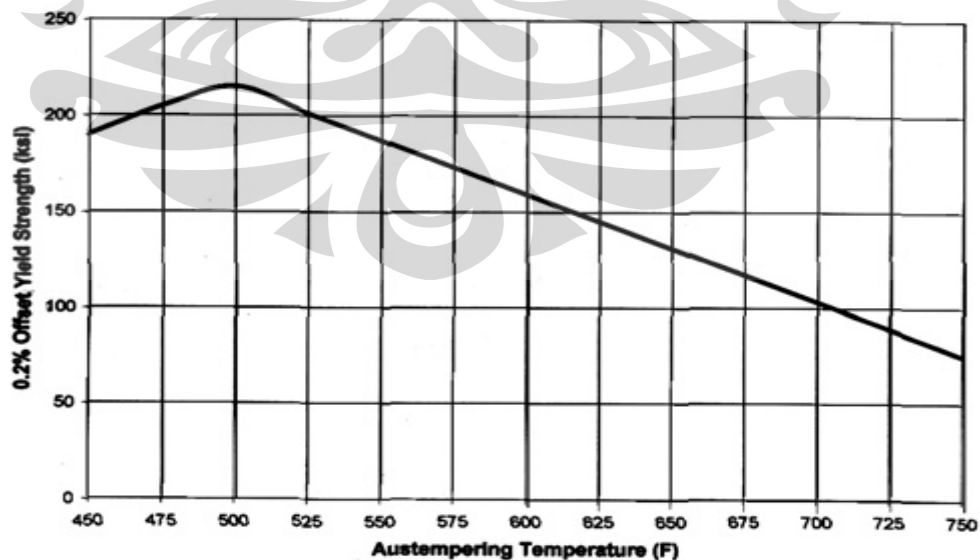
terlalu rendah, pembentukan *austenite* menjadi tidak sempurna dan tidak dapat membuat *austenite* menjadi jenuh dengan karbon. Hal ini bisa mengakibatkan *ausferrite* menjadi tidak stabil, bahkan bisa terjadi pembentukan *martensite*. Sebaliknya, apabila temperatur dan waktu tahan austenisasi terlalu tinggi akan menghasilkan butir-butir *austenite* yang terlalu besar dan mengakibatkan matriks mengandung karbon yang terlalu tinggi sehingga dapat memperlambat terjadinya reaksi *austempering*^[25].

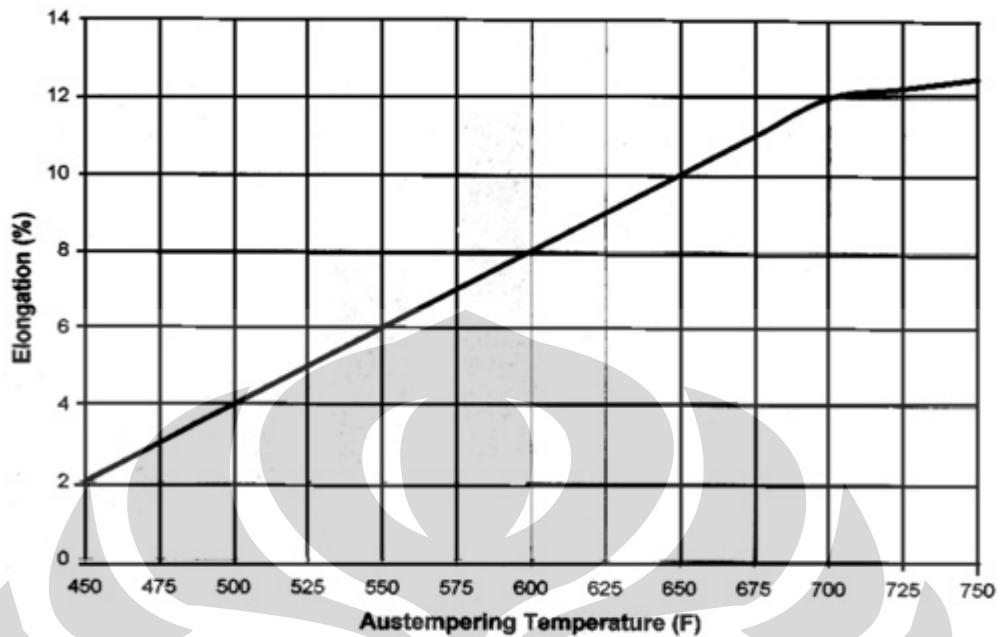
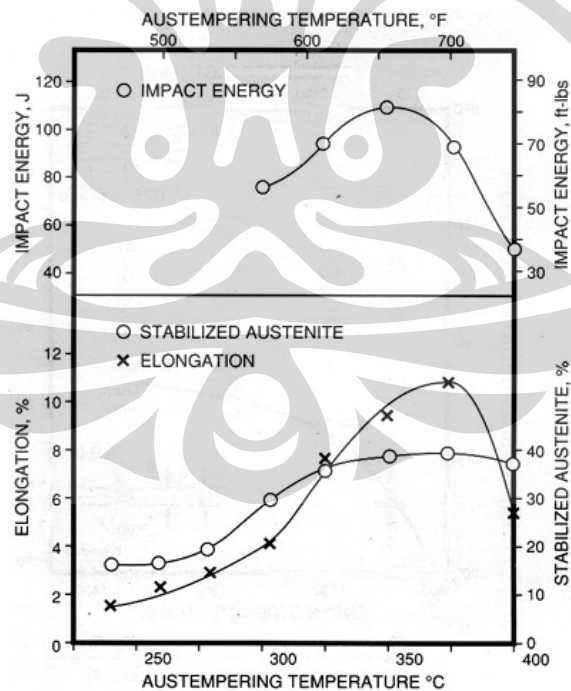
- c. Waktu untuk memindahkan material dari dapur austenisasi menuju dapur tempering (*transfer time*).

Pemindahan material dari dapur austenisasi menuju dapur *tempering* membutuhkan waktu (*transfer time*), sehingga temperatur semakin turun dan dimungkinkan terbentuk pearlit. *Transfer time* yang tepat akan menghasilkan ketangguhan, kekerasan dan struktur mikro yang diinginkan. *Transfer time* berpengaruh terhadap ketangguhan material, yaitu semakin lama *transfer time* maka kekerasan dan ketahanan impak material semakin turun.

- d. Suhu proses *austempering*

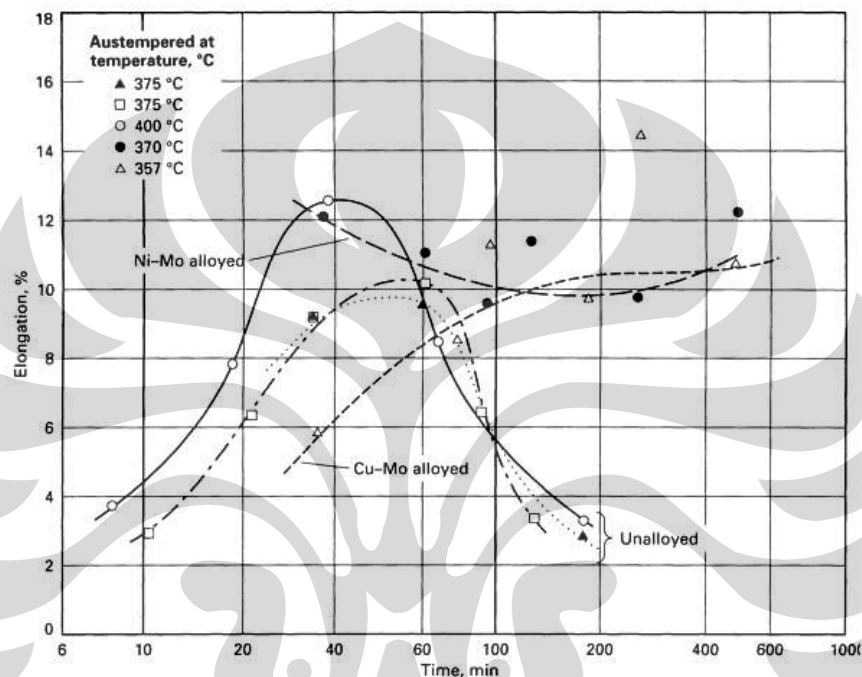
Suhu proses *austempering* akan menentukan kualitas sifat-sifat mekanis yang akan dihasilkan. Batas toleransi temperatur proses *austempering* adalah $\pm 6^{\circ}\text{C}$ (10°F). Berikut ini adalah gambar gambar yang menunjukkan hubungan antara suhu *austempering* sifat mekanis dari ADI.



Gambar 2.5 Pengaruh temperatur *austempering* terhadap *yield strength* ADI^[13]Gambar 2.6 Pengaruh temperatur *austempering* terhadap elongasi ADI^[13]Gambar 2.7 Hubungan antara temperatur *austempering*, penyerapan energi impak, elongasi dan *stabilized austenite*^[13]

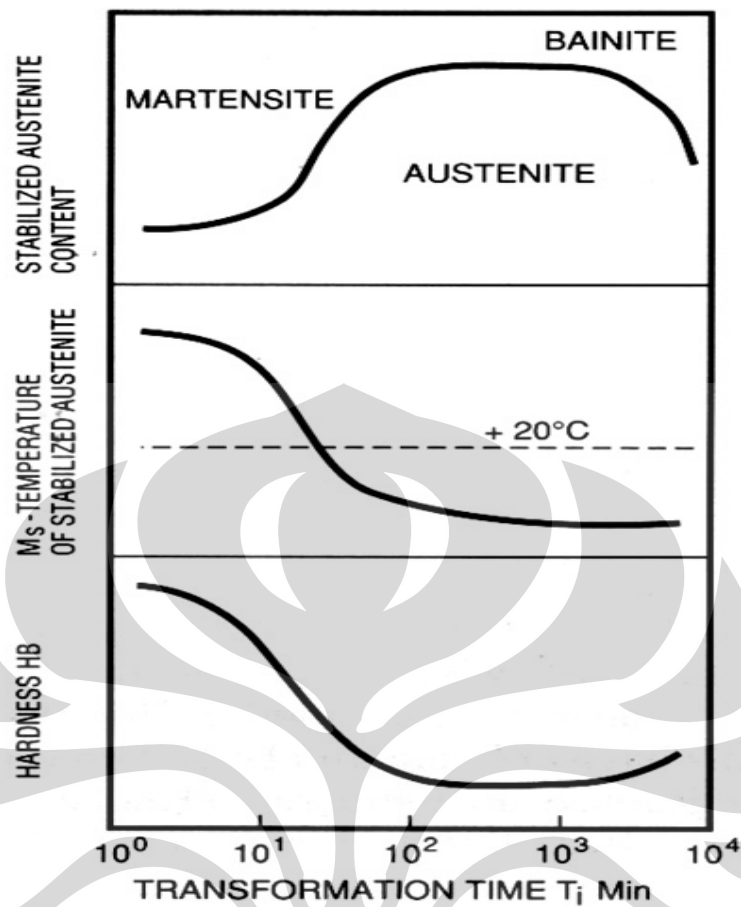
e. Waktu penahanan di dalam dapur *austempering* (*holding time*)

Material harus ditahan di dalam dapur *austempering* sampai terjadi transformasi fasa secara sempurna. Berikut ini adalah gambar yang menunjukkan bahwa waktu tahan *austempering* sangat menentukan keuletan maksimum material.



Gambar 2.8 Pengaruh waktu *austempering* terhadap elongasi beberapa jenis ADI^[18]

Pengaruh waktu *austempering* terhadap stabilitas *ausferrite* diilustrikan oleh Gambar 2.9. Selain itu gambar tersebut juga menunjukkan hubungan antara matriks dengan nilai kekerasannya. Apabila waktu *austempering* terlalu singkat, difusi karbon tidak cukup untuk menstabilkan *austenite* dan *martensite* bisa saja terbentuk selama pendinginan ke temperatur ruang (reaksi *austempering* tahap 1 tidak sempurna)^[25]. Struktur mikro yang dihasilkan akan memiliki *hardness* tinggi namun *ductility* dan *fracture toughness* rendah. Apabila waktu *austempering* terlalu lama, *ausferrite* bisa mengalami dekomposisi menjadi *ferrite* dan karbida (*bainite*) dan memiliki *strength*, *ductility* dan *fracture toughness* yang lebih rendah.



Gambar 2.9 Pengaruh waktu tahan *austempering* terhadap jumlah *stabilized austenite* dan kekerasan ADI^[13]

f. Kecepatan pengadukan media pendingin (*bath agitation*)

Kecepatan pengadukan media pendingin menjadi faktor yang sangat penting karena hal tersebut berhubungan erat dengan kecepatan pendinginan. Kecepatan pendinginan material bisa 2 atau 3 kali lebih besar apabila untuk material berupa pelat tipis.

g. Pemanasan awal (*preheating*)

Kecepatan pemanasan harus dikontrol agar tidak menimbulkan gradien temperatur yang sangat curam antara bagian dalam dan permukaan material. Perbedaan temperatur antara bagian dalam dan permukaan material akibat rambatan panas akan menyebabkan perbedaan pemuaihan volum material. Pemanasan awal (*preheating*) dilakukan pada temperatur sekitar $550 - 650^\circ\text{C}$ untuk mengeliminasi distorsi yang mungkin timbul akibat pemanasan^[18].

h. Ketebalan maksimum material untuk proses *austempering*.

Agar diperoleh hasil *austempering* yang baik, ketebalan material harus diperhatikan. Untuk *austempering* baja AISI 1080, maksimum ketebalan agar dapat diperoleh struktur *bainite* sempurna adalah 5 mm. Baja karbon dengan komposisi karbon lebih rendah dari baja AISI 1080, maksimum ketebalan untuk proses *austempering* lebih rendah. Beberapa jenis baja paduan bisa dilakukan *austempering* hingga ketebalan maksimum 25 mm^[18]. Untuk mendapatkan ADI yang baik, ketebalan maksimum besi tuang nodular yang digunakan adalah 100 mm. ADI dengan ketebalan yang lebih besar sangat sulit didapatkan karena adanya keterbatasan pada *austemperability* material dan adanya struktur mikro yang heterogen akibat pembekuan yang lebih lambat untuk pengecoran material yang berukuran lebih besar^[6].

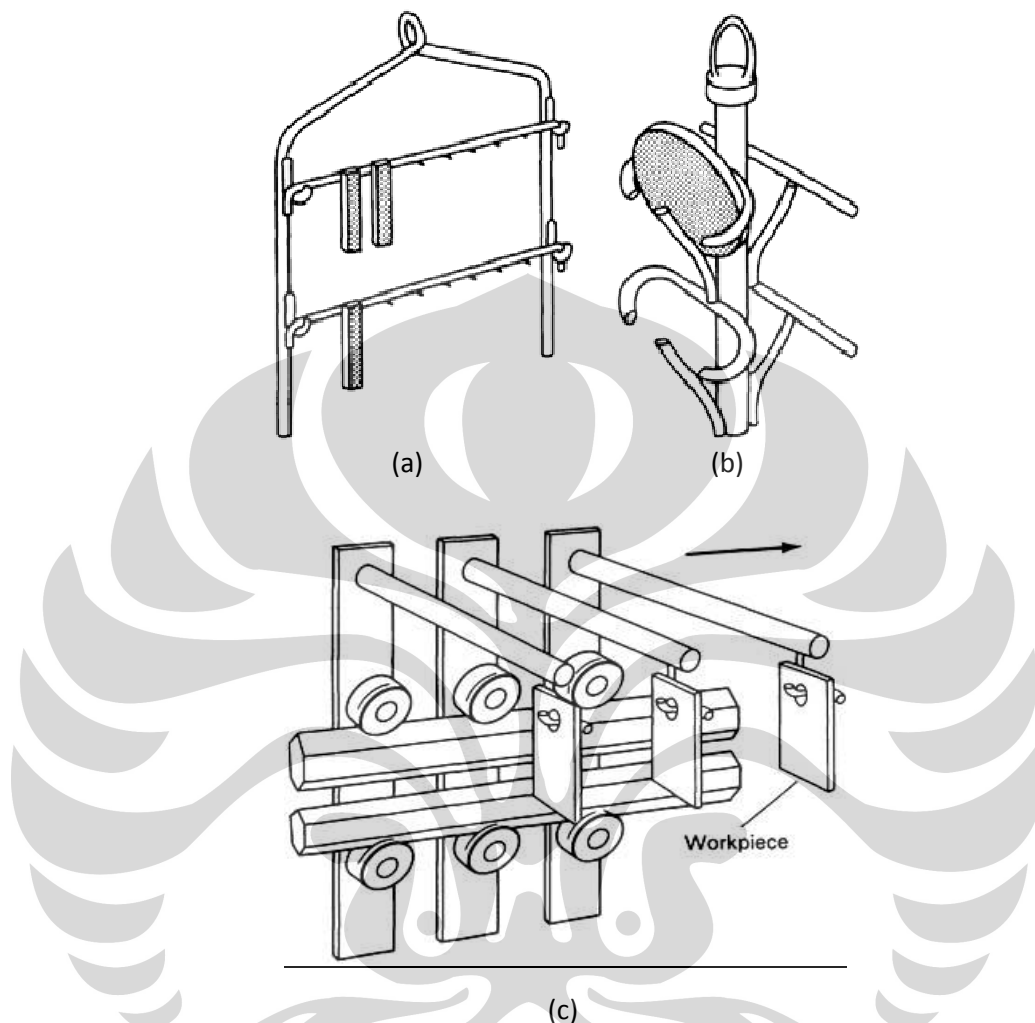
i. Prosedur penempatan material.

Prosedur penempatan material untuk proses *austempering* tidak berbeda dengan proses perlakuan panas lainnya. Biasanya material harus ditempatkan berjauhan, tidak boleh ditumpuk karena dapat mengakibatkan proses pendinginan yang tidak seragam. Biasanya material dimasukan ke dapur *austempering* dengan cara digantungkan pada rak atau diikat dengan menggunakan kawat. Untuk material yang berat, biasanya material dimasukkan ke dalam keranjang.

j. Pengaruh unsur paduan.

Untuk menghindari terbentuknya pearlite, media pendingin lelehan garam (*salt bath*) biasa ditambahkan air atau unsur paduan seperti Cu, Ni, Mn atau Mo. Unsur-unsur paduan tersebut cenderung akan bersegregasi selama pembekuan sehingga akan terjadi ketidakseragaman pada matriks. Hal ini dapat berpengaruh buruk terhadap sifat-sifat mekanis material hasil *austempering*. Mn dan Mo berpengaruh besar terhadap *hardenability* material namun unsur-unsur tersebut akan bersegregasi ke daerah interselular (*pearlite*) dan membentuk karbida. Sebaliknya Ni dan Cu tidak memberikan pengaruh terhadap *hardenability* material namun akan bersegregasi menuju daerah grafit dan tidak membentuk karbida. Apabila Mn, Mo, Ni dan Cu dikombinasikan

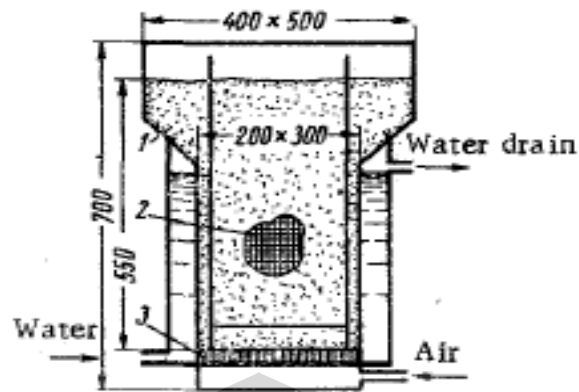
akan terjadi segregasi dengan pola yang berlawanan dan memberikan efek yang baik terhadap *hardenability* material.



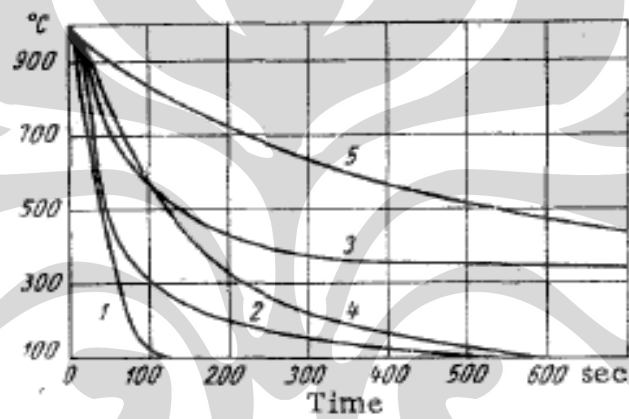
Gambar 2.10 (a) dan (b) contoh metode peletakan material pada rak, (c) metode peletakan material untuk proses kontinu antara proses austenisasi dengan proses *austempering* ^[18]

2.3.1 *Fluidized Bed*

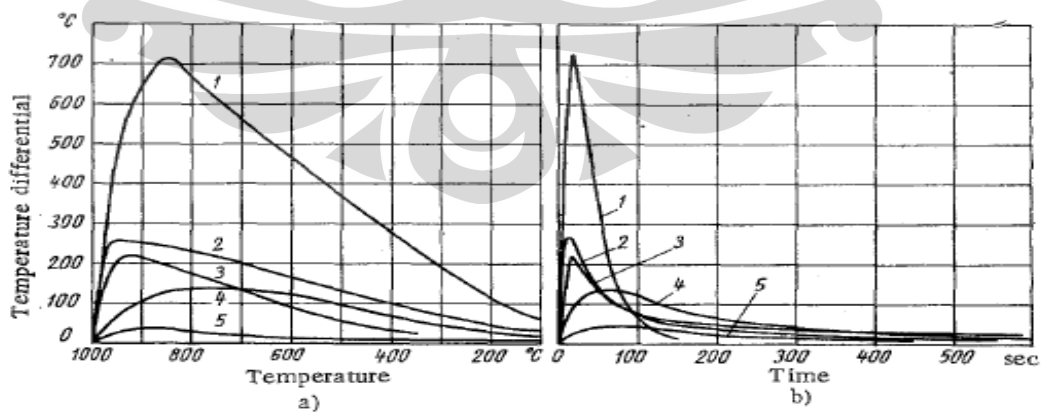
Fluidized bed merupakan media pendingin baru yang memiliki koefisien transfer panas yang tinggi dalam proses perlakuan panas ($200-1000 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg}$) sehingga dengan media pendingin tersebut pemanasan dan laju pendinginan dapat dikontrol dengan mudah.



Gambar 2.11 Skema fluidized bed: 1) *fluidized bed*, 2) keranjang kawat, 3) tempat distribusi udara^[22]



Gambar 2.12 Kurva pendinginan pada bagian tengah sampel dengan beberapa media pendingin: 1) air, 2) oli, 3) salt bath (300°C), 4) *fluidized bed* dan 5) udara^[22]



Gambar 2.13 Pengaruh media pendingin terhadap bagian dalam material: a) pengaruhnya terhadap perbedaan temperatur antara bagian permukaan dengan inti material; b) pengaruhnya terhadap lamanya pendinginan sampel. 1) air, 2) oli, 3) salt bath (300°C), 4) *fluidized bed* dan 5) udara^[22]

Perbedaan temperatur antara permukaan dengan bagian inti material akan menimbulkan tegangan internal material yang dapat menyebabkan distorsi dan retak, oleh karena itu media pendingin merupakan parameter yang penting dalam proses perlakuan panas.

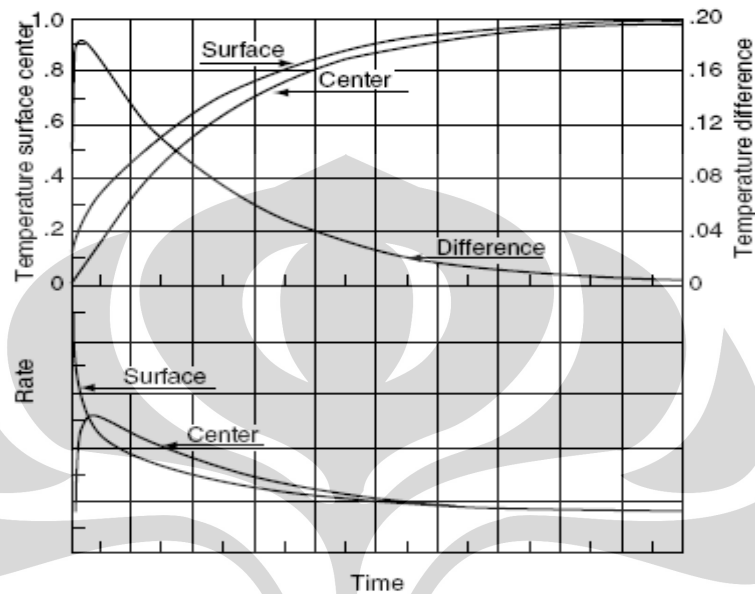
Fluidized bed menggunakan gas yang ditiupkan berupa udara atau nitrogen untuk menggerakkan partikel (aluminium oksida atau pasir silika) sehingga partikel tersebut bergerak seperti fluida yang mendidih. Partikel yang digunakan merupakan partikel inert (tidak bereaksi dengan material), memiliki temperatur lebur (T_m) yang tinggi namun memiliki kemampuan untuk meningkatkan transfer panas antara gas yang difluidisasi dengan material. Partikel yang biasa digunakan adalah aluminium oksida karena memiliki sifat yang sangat baik dalam hal kapasitas transfer panas, stabilitas termal dan keseragaman. Transfer panas yang optimum diperoleh dengan ukuran partikel 100-125 μm . Apabila ukuran partikel lebih kecil dari 100 μm , fluidisasi partikel menjadi tidak seragam. Sedangkan apabila ukuran partikel lebih besar dari 250 μm , penggunaan gas menjadi tidak ekonomis^[24]. Kecepatan transfer panas pada *fluidized bed* ditentukan oleh ukuran partikel, kecepatan fluidisasi gas, jenis gas yang difluidisasi dan temperatur *fluidized bed*. Gas yang ditiupkan ke dalam *fluidized bed* bisa berupa amonia, gas alam, nitrogen dan udara. *Fluidized bed* bisa menghasilkan produk perlakuan panas dengan kualitas yang sama dengan proses salt bath^[26].

Mekanisme perpindahan panas di dalam *fluidized bed* terjadi dengan seragam pada berbagai temperatur sebagaimana terjadi pada gas. Laju pendinginannya dapat direproduksi sehingga tidak berkurang seiring dengan lamanya waktu proses. Laju pemanasan dan pendinginan *fluidized bed* dapat diatur dengan mengubah kondisi operasi di dalam *fluidized bed* yang meliputi ukuran partikel dan volume aluminium oksida, kecepatan fluidisasi gas dan konduktivitas termal gas yang digunakan, biasanya digunakan gas nitrogen.

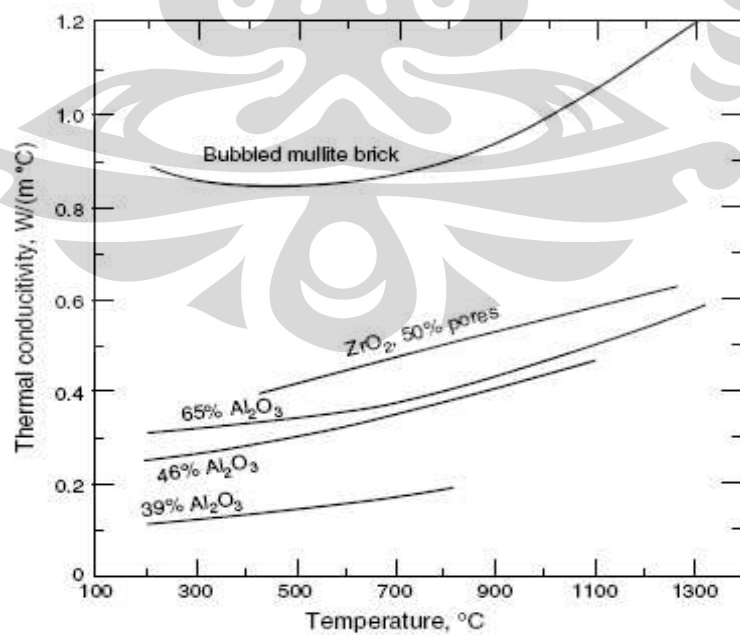
Dibandingkan dengan proses perlakuan panas/pendinginan lainnya, sensitivitas *fluidized bed* terhadap berat dan geometri material tidak terlalu besar

Universitas Indonesia

karena adanya perilaku seperti gas pada *fluidized bed* sehingga seluruh material akan dapat dijangkau oleh partikel aluminium oksida dan kapasitas panas aluminium oksida tidak perlu terlalu tinggi karena panas ditransfer secara konduksi^[23].



Gambar 2.14 Hubungan antara kenaikan temperatur dan laju pemanasan terhadap waktu. (From V. Paschkis and J. Persson, *Industrial Electric Furnaces and Appliances*, Interscience, New York, 1960, pp. 14–25.) hal. 52



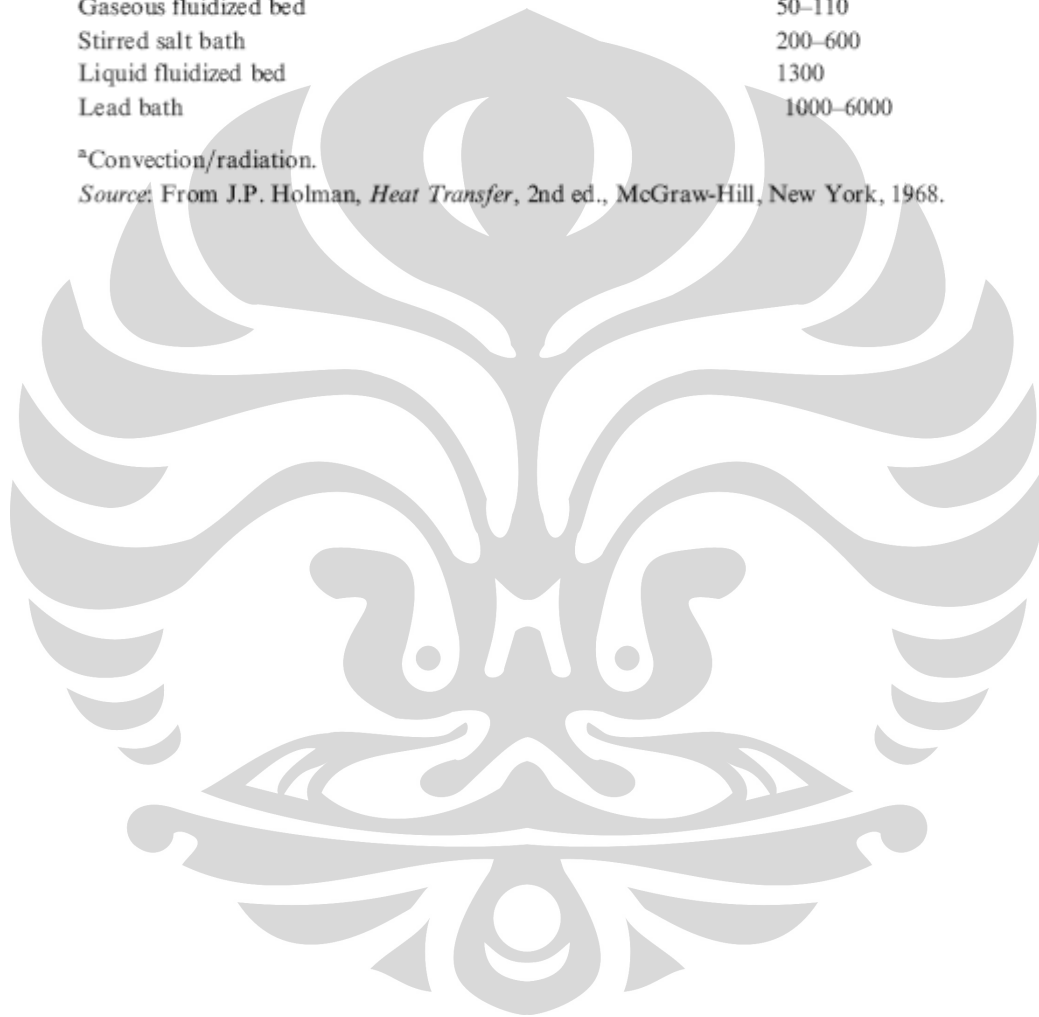
Gambar 2.15 Konduktivitas termal berbagai macam material refraktori^[24]

Tabel 2.3 Koefisien heat transfer dari berbagai media pemanas^[24]

Medium	Heat Transfer Coefficient (Btu/(ft ² h °F))
Air circulation furnace	2–8
Jet heating/cooling	20–50
Batch and pusher furnaces ^a	15–80
Gaseous fluidized bed	50–110
Stirred salt bath	200–600
Liquid fluidized bed	1300
Lead bath	1000–6000

^aConvection/radiation.

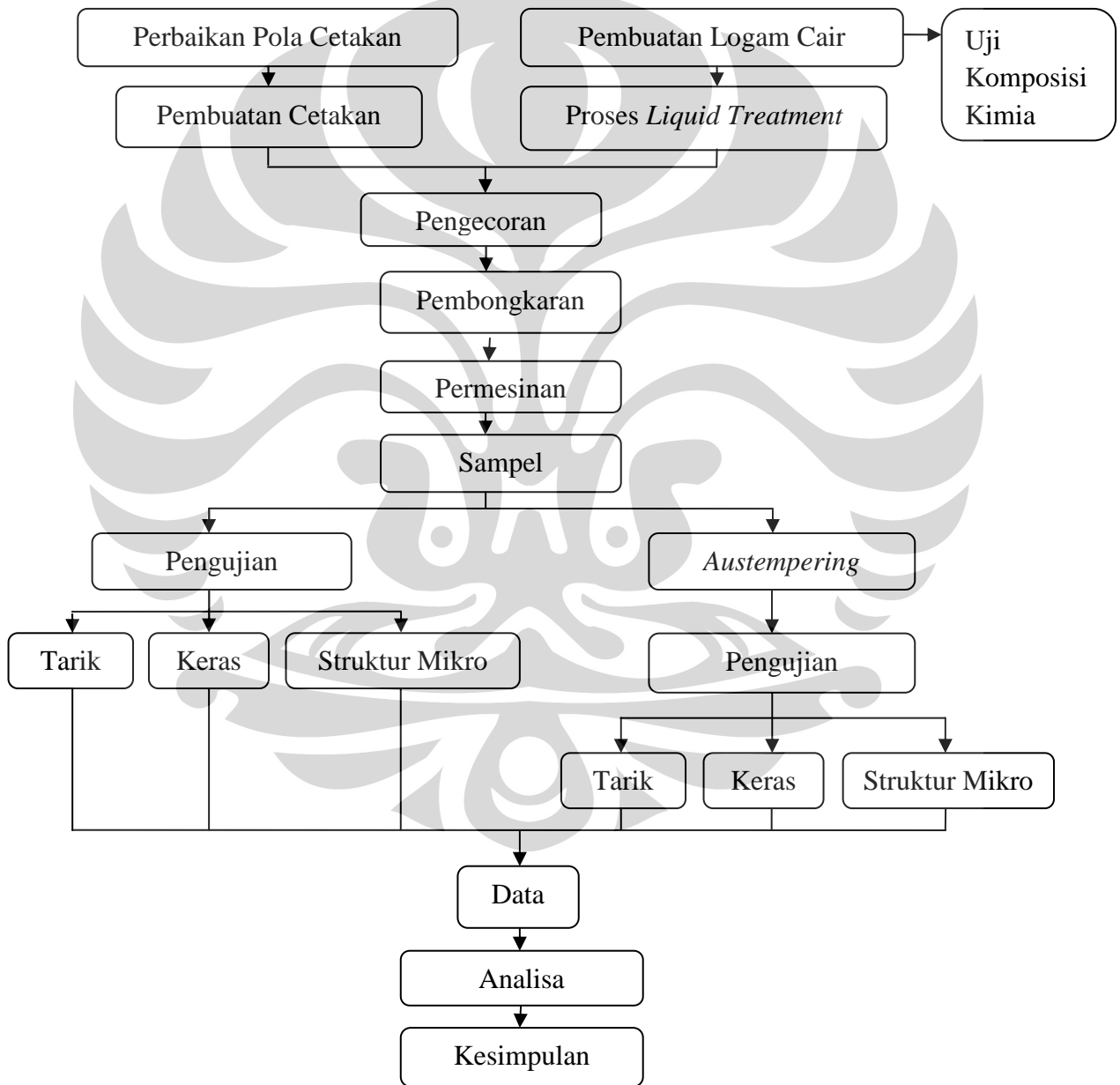
Source: From J.P. Holman, *Heat Transfer*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1968.



BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan sebagai lanjutan dari penelitian sebelumnya yaitu pembuatan besi tuang nodular. Kemudian dengan proses *austempering* didapatkan besi tuang nodular austemper (*Austempered Ductile Iron*).



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahap Pembuatan *Thin Wall Ductile Iron* (TWDI)

3.2.1 Alat

Berikut ini adalah alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini.

3.2.1.1 Tahap Perbaikan Pola

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

3.2.1.2 Tahap Pembuatan Cetakan

Berikut ini adalah alat-alat yang digunakan dalam pembuatan cetakan.

- Mesin Pencampur Pasir (*Mixer*)

Alat ini mencampur pasir dengan bahan aditif lainnya.

- Sepasang *Flask*

Flask yang digunakan adalah tipe excel karena metode pengecoran yang dilakukan vertical.

- *Craine*

Digunakan untuk memindahkan cetakan ketika sudah jadi karena cukup berat.

3.2.1.3 Tahap Pembuatan Logam Cair

Berikut ini adalah alat-alat yang digunakan untuk pembuatan logam cair.

- *Induction Furnace*

Induction Furnace merupakan jenis dapur peleburan yang menggunakan prinsip transformator yang mengakibatkan induksi untuk pemanasan.

- Spektrometer

Spektrometer adalah uji komposisi kimia untuk mengontrol kandungan logam cair.

- *Thermocouple*

Thermocouple merupakan alat untuk mengukur temperatur logam cair.

3.2.1.4 Tahap Pengecoran

Berikut ini adalah alat yang digunakan untuk pengecoran.

- Ladel
- *Thermocouple*
- *Craine*

3.2.1.5 Tahap Pembongkaran

Alat yang digunakan untuk melakukan pembongkaran berupa mesin guncang yang diletakkan di bawah tanah. Selain itu, untuk membersihkan produk cor dari pasir-pasir yang melekat digunakan mesin *shootblasting*.

3.2.1.6 Tahap Permesinan

Alat yang digunakan untuk melakukan permesinan berupa mesin gerinda.

3.2.2 Bahan Baku

Berikut ini adalah Bahan baku yang digunakan pada saat dilakukan pengecoran.

3.2.2.1 Tahap Perbaikan Pola

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

3.2.2.2 Tahap Pembuatan Logam Cair

Bahan baku yang digunakan untuk pembuatan logam cair utama yaitu *return scrap* dan *steel scrap*. Sedangkan bahan baku tambahan yaitu Fe-Si (inokulan) dan Fe-Si-Mg (nodulan).

3.2.2.3 Tahap Pembuatan Cetakan

Berikut ini adalah bahan baku yang digunakan untuk membuat cetakan.

- Pasir silika

Pasir merupakan bahan baku utama dari cetakan pasir. Pasir ini berikatan secara kimia.

- Asam furan

Asam furan (*furfuryl alcohol*) merupakan bahan pengikat yang dilakukan katalisasi tanpa pemanasan.

- Serbuk arang

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

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

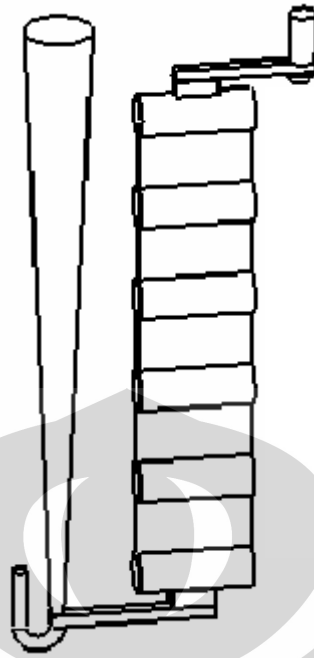
- *Isomol*

Isomol adalah gabungan antara cat dengan alkohol yang dioleskan pada dinding cetakan yang bertujuan untuk menghasilkan permukaan cetakan yang baik. Tepat setelah dilakukan pemolesan, campuran ini langsung dibakar dengan api untuk menguapkan kandungan alkohol.

3.2.3 Prosedur Penelitian

3.2.3.1 Perbaikan Pola

Tahapan berikutnya setelah pembuatan desain selesai adalah pembuatan pola yang terbuat dari kayu. Pola ini terdiri dari 3 kelompok yaitu kelompok benda, kelompok riser, dan kelompok saluran tuang. Kelompok benda terdiri dari 5 plat dengan ukuran 150 X 75 mm dengan ketebalan 1 mm, sedangkan kelompok riser terdiri dari 6 buah silinder dan kelompok gating terdiri 1 sprue, 1 runner, 1 ingate.



Gambar 3.2 Desain Pengecoran Penelitian

3.2.3.2 Pembuatan Cetakan

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



Gambar 3.3 Sepasang Cetakan (*cup and drag*)

3.2.3.3 Pembuatan Besi Tuang Nodular (FCD)

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

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

3.2.3.4 Pengecoran

Sebelum dilakukannya tahapan pengecoran, maka cetakan pasir dari kedua sisi *flask (cup and drag)* dilakukan *merger*. Proses ini membutuhkan ketelitian agar posisi rongga cetakan sesuai dengan bentuk benda. Proses pengecoran dilakukan dengan penuangan dari ladle ke rongga cetakan melalui *sprue basin*. Saat sebelum penuangan, temperatur selalu dikontrol dengan menggunakan *thermocouple*. Temperatur pada saat penuangan berkisar antara 1314°C. Waktu penuangan diukur dengan menggunakan *stopwatch* mulai dari logam dituangkan sampai seluruh rongga cetakan terisi logam cair selama 10-12 detik. Setelah selesai proses pengecoran, benda cor dalam cetakan didiamkan selama beberapa jam agar terjadi solidifikasi dan pendinginan.

3.2.3.5 Pembongkaran

Pembongkaran dilakukan setelah benda cor dingin dan siap untuk dilakukan permesinan. Proses pembongkaran cetakan dilakukan dalam sebuah ruangan dengan menggunakan gaya getaran untuk merontokkan cetakan pasir. Setelah itu agar hasil coran berih dari pasir yang melekat maka dilakukan *shotblasting*.

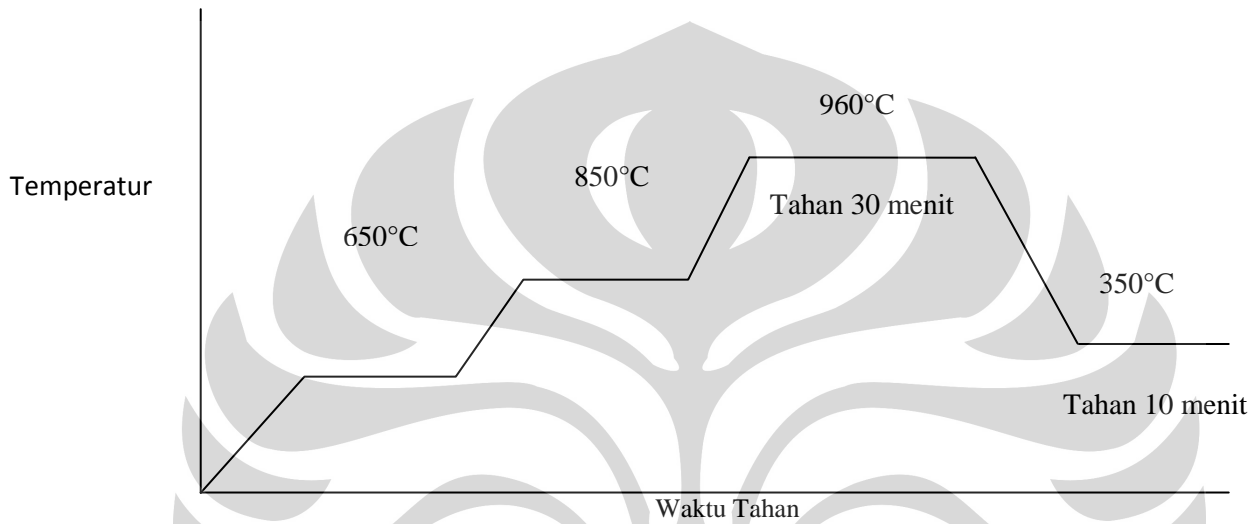
3.2.3.6 Permesinan

Permesinan untuk memisahkan bagian plat dengan saluran tuang, *riser* dan cacat sirip.

3.3 Tahap Pembuatan *Thin Wall Austempered Ductile Iron* (TWADI)

3.3.1 Proses *Austempering*

Proses *austempering* yang akan dilakukan dapat dilihat pada bagan berikut.

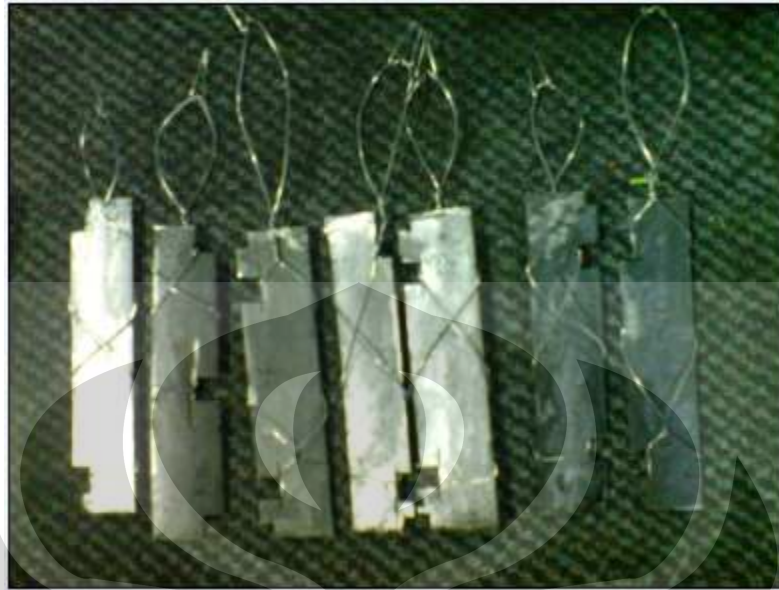


Gambar 3.4 Skema proses *austempering*

Alur proses *austempering* terdiri dari 3 tahap yaitu *Pre Heating*, *Austenisasi*, dan *Austempering*. *Pre Heating* dimulai pada suhu dari suhu 550°C-650°C selama 60 menit. *Austenisasi* dilakukan secara bertahap. Pertama pada suhu 850°C dan kedua pada suhu 960°C. Pada suhu *austenisasi* optimal yakni 960°C, dilakukan proses *holding* selama 30 menit. *Austempering* dilakukan pada suhu 350°C selama 10 menit.

Sampel yang digunakan adalah sampel TWADI yang terlebih dahulu dilakukan pengamplasan untuk menghilangkan oksida pada permukaannya. Kemudian penanganan sampel dilakukan dengan cara mengikatkan sampel tersebut pada sebuah kawat. Sampel tersebut disusun rapi sehingga tidak saling bertumpuk pada saat *austempering*. Hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi

ketidaktepatan dalam proses *austempering*. Proses tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.5 Penanganan sampel austenisasi dan *austempering*

Setelah itu sampel yang telah diikat digantung dengan sebuah kawat untuk selanjutnya dimasukkan ke dalam dapur untuk proses austenisasi.



Gambar 3.6 Sampel sebelum masuk dapur



Gambar 3.7 Sampel ketika akan dimasukkan ke dapur

Setelah dikeluarkan dari dapur untuk proses austenisasi kemudian sampel masuk dimasukkan ke dalam dapur untuk proses *austempering*. Dapur yang digunakan adalah dapur yang menggunakan metode *fluidized bed*.

3.4 Preparasi Sampel

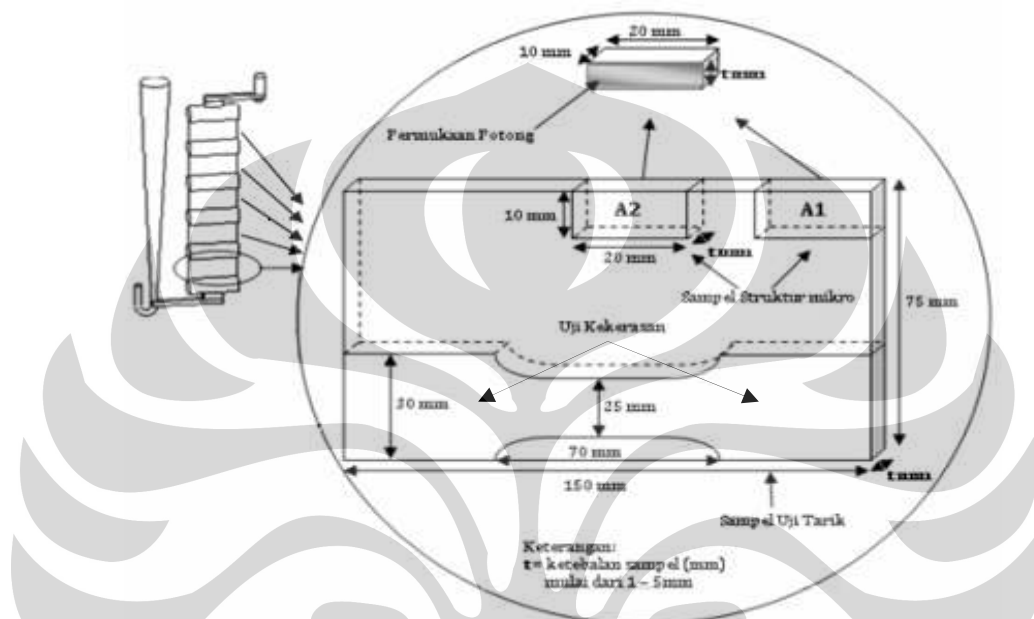
Setelah dilakukan permesinan kemudian dilakukan preparasi sampel untuk dilakukan pengujian, yang terdiri atas: pengujian struktur mikro, pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Pengujian struktur mikro dilakukan di Laboratorium Uji Konstruksi (LUK) Badan Pengkajian dan Pengembangan Teknologi (BPPT),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

3.4.1 Preparasi Sampel Pengamatan Struktur Mikro

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

3.4.1.1 Pemotongan (*Cutting*)

Dilakukan dengan metode penggergajian menggunakan mesin pemotong. Pemilihan metode pemotongan atau alat potong yang tepat sangat penting dalam proses *cutting* agar dapat mengurangi tingkat deformasi pada permukaan sampel, lihat Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Pengambilan sampel uji dari pelat

3.4.1.2 *Mounting*

Tahap ini bertujuan untuk memudahkan penanganan sampel yang berukuran kecil dan tidak beraturan tanpa merusak sampel. Jenis *mounting* yang digunakan untuk pengamatan struktur mikro adalah *compression mounting* dengan menggunakan resin sebagai media, lihat Gambar 3.9. Terlebih dahulu sampel dimasukkan ke dalam cetakan mesin *compression mounting*, kemudian ditambahkan resin dan dipanaskan serta diberi tekanan selama kurang lebih 8 menit. Setelah itu didinginkan selama kurang lebih 6 menit dengan media air.



Gambar 3.9 Proses *mounting*

3.4.1.3 Pengamplasan (*Grinding*)

Tahap ini bertujuan untuk mendapatkan kehalusan permukaan dan menghilangkan goresan-goresan kasar pada permukaan sampel pada saat pemotongan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas berturut-turut dengan nomor grid #80, #180, #360, #500, #700, #800 dan #1200. 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.

3.4.1.4 Pemolesan (*Polishing*)

Tahap ini bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus, bebas goresan dan mengkilap seperti cermin serta menghilangkan ketidakrataan sampel hingga orde $0.01 \mu\text{m}$ dengan menggunakan diamond paste dengan ukuran berturut-turut 6, 3, 1, dan $\frac{1}{4}$ mikron. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata agar cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan kembali secara fokus.

3.4.1.5 Etsa (*Etching*)

Tahap ini merupakan suatu proses pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan mencelupkan sampel ke dalam larutan pengetsa baik

menggunakan listrik maupun tidak sehingga detail struktur yang akan diamati dapat terlihat dengan jelas dan tajam. Sampel dicelupkan kedalam larutan Nital 2% selama kurang lebih 60 detik kemudian dicuci dengan air mengalir dan dikeringkan.

3.4.2 Preparasi Sampel Uji Kekerasan

Preparasi untuk uji kekerasan diambil dari sampel yang digunakan untuk pengamatan uji tarik, lihat Gambar 3.8.

3.4.3 Preparasi Uji Tarik

Preparasi uji tarik dilakukan dengan memotong pada bagian sisi yang bersebrangan dengan sisi yang digunakan untuk pengambilan sampel pengamatan struktur mikro, lihat Gambar 3.8. Standar yang digunakan adalah JIZ 2201.

3.5 Pengujian

Berikut ini adalah beberapa pengujian yang dilakukan untuk penelitian ini.

3.5.1 Pengamatan Struktur Mikro

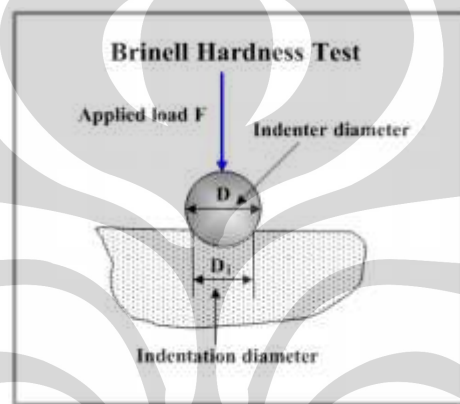
Pengamatan struktur mikro dilakukan di bawah mikroskop optik digital Canon, Gambar 3.10. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran 100x, 200x , dan 500x. Pada saat pengambilan gambar, temperatur dijaga pada temperatur sekitar 270°C. Sedangkan teknik yang digunakan adalah teknik polikrom untuk menghasilkan gambar berwarna.



Gambar 3.10 Mikroskop Optik Digital

3.5.2 Pengujian kekerasan

Standar yang digunakan yakni JIZ 2241. Sampel untuk pengujian keras ini diambil dari sampel pengujian tarik. Pengujian kekerasan dilakukan dibawah microhardness tester. Beban penjejakan yang digunakan adalah sebesar 187,5 kg selama 15 detik. Setelah penjejakan selesai maka besarnya jejak diukur menggunakan *measuring microscope*.



Gambar 3.11 Pengujian Kekerasan Brinell

Adapun rumus untuk menghitung nilai kekerasan adalah sebagai berikut.

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

Dimana:

D = diameter indenter (kg)

d = diameter jejak (mm)

P = beban yang diberikan (mm)

3.5.3 Pengujian Tarik

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

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



Gambar 3.12 Mesin Uji Tarik

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Komposisi Kimia

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Logam Cair

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

- Karbon (C)

Jumlah elemen karbon optimum pada besi tuang nodular adalah (3,4-3,8)%. Kadar karbon sebesar 3,819% dalam logam cair dapat mengakibatkan flotasi grafit dan peningkatan ekspansi termal selama solidifikasi sehingga menyebabkan ketidakkokohan cetakan.

- Silikon (Si)

Jumlah elemen silikon optimum pada besi tuang nodular adalah (2,0-2,8)%. Dengan kadar silikon 2,764% didapat struktur feritik pada mikrostruktur besi tuang nodular. Struktur *ferrite* menyebabkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik rendah meskipun elongasi cukup tinggi.

- Mangan (Mn)

Kadar Mn untuk besi yang akan dilakukan perlakuan panas untuk jenis feritik harus $\leq 0,5\%$. Kadar mangan sebesar 0,356% dalam logam cair

mencegah pembentukan karbida pada bagian tebal yang menyebabkan keuletan rendah.

- Magnesium (Mg)

Kadar magnesium dalam logam cair sebesar 0,068% berada di luar batas optimum dalam membantu pembentukan grafit bulat yaitu antara (0,04-0,06)%. Penggunaan unsur Mg selain sebagai nodulan juga akan berperan sebagai promotor terbentuknya karbida.

- Sulfur (S)

Kandungan sulfur pada besi nodular biasanya di bawah 0,015%, dengan kandungan sulfur berlebih sebesar 0,02% kemungkinan menyebabkan terikatnya sulfur dengan Mg sehingga menyebabkan terjadinya efek kulit.

Dari perhitungan dengan menggunakan komposisi kimia pada Tabel 4.1 didapatkan nilai CE yakni 4.67584%. Nilai ini terdapat dalam rentang CE yang dianjurkan yakni 4.04-4.68% sehingga cukup baik untuk mencegah terbentuknya struktur karbida.

4.2 Pengamatan Visual

Berikut ini adalah gambar sampel setelah proses *austempering*.



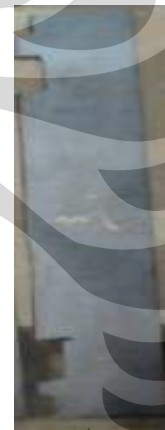
Gambar 4.1 TWADI setelah dikeluarkan dari dapur



Gambar 4.2 TWADI setelah kawat dilepas dan dijajarkan



TWDI A1



TWADI A1



TWDI C1



TWADI C1

Gambar 4.3 Perbandingan visual sampel TWDI dan TWADI

Dari hasil pengamatan visual di atas, tidak terdapat kerusakan atau cacat pada sampel. Hanya saja terdapat perbedaan yang mencolok pada warna saat sebelum sampel dimasukkan ke dalam dapur dan setelah sampel dikeluarkan dari dapur.

Pada waktu sampel belum dimasukkan ke dalam dapur, sampel berwarna putih mengkilap (setelah diampelas). Sedangkan setelah dikeluarkan dari dapur, sampel menjadi berwarna abu-abu terang. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh proses *austempering* dengan menggunakan metode *fluidized bed* di mana aluminium oksida yang berfungsi sebagai partikel-partikel kecil penghantar panas bersentuhan dengan sampel.

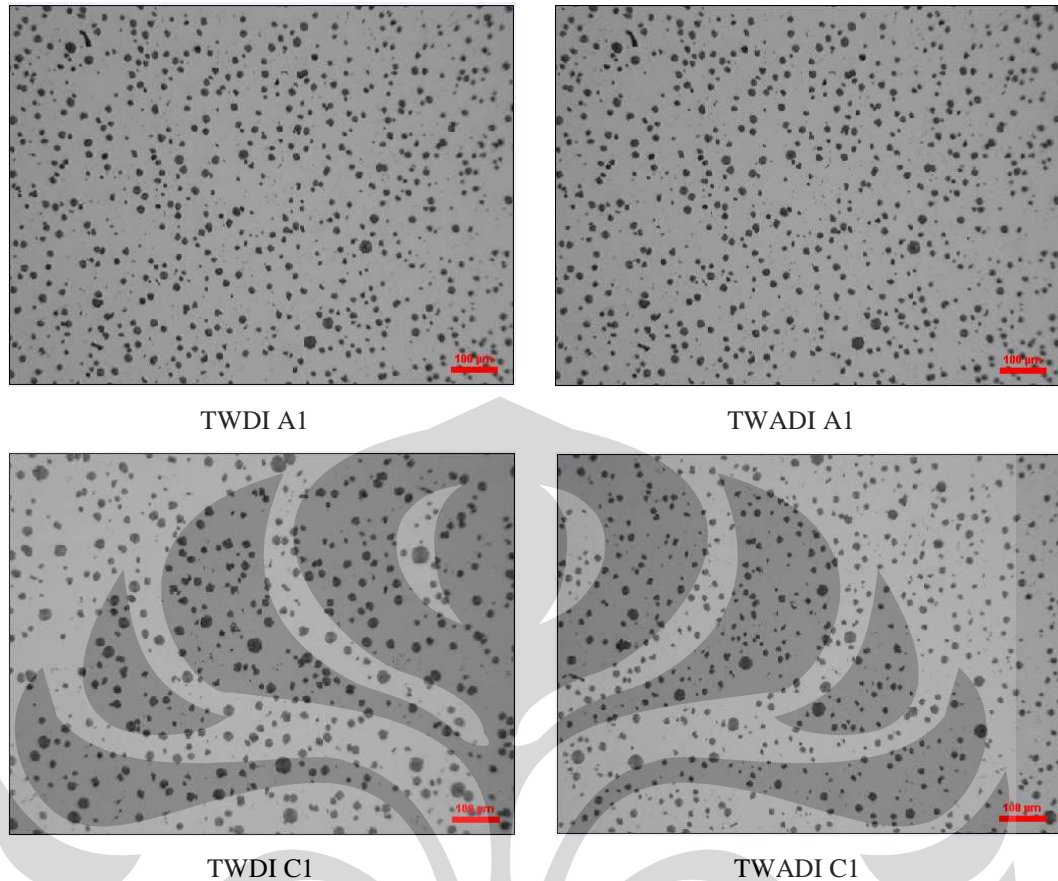
Selain itu dapat dilihat juga permukaan kedua sampel. Sampel TWDI memiliki profil permukaan yang kasar sedangkan TWADI memiliki profil permukaan yang halus. Hal ini disebabkan oleh pengaruh pengamplasan sampel pada saat sebelum dimasukkan ke dalam dapur proses *austempering*.

4.3 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro ditujukan untuk melihat apakah ada perbedaan struktur mikro sebelum *austempering* (TWDI) dan setelah *austempering* (TWADI). Pengamatan ini dilakukan pada sampel TWDI A1, C1 dan TWADI A1, C1.

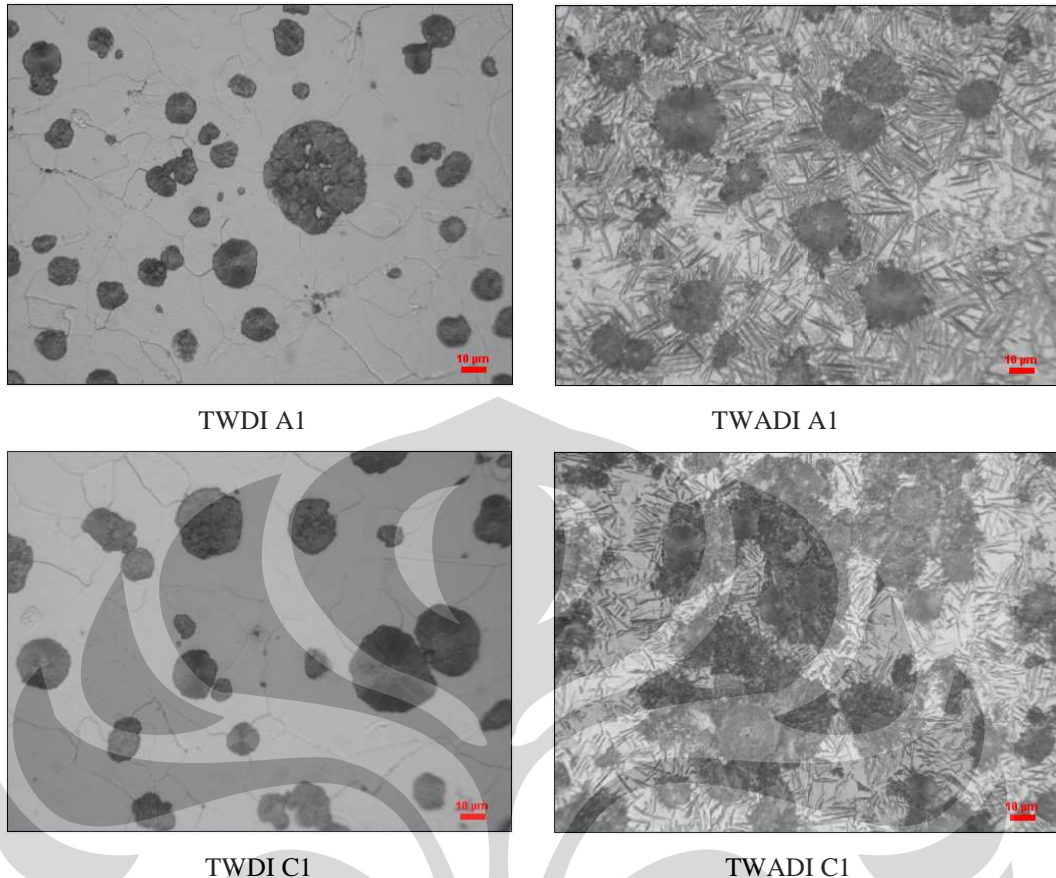
Pengamatan struktur mikro TWDI dan TWADI dapat dilakukan dengan non etsa dan etsa. Metode non etsa digunakan hanya untuk melihat karakteristik grafit (nodularitas, jumlah dan persebaran) yang terbentuk. Sedangkan metode etsa digunakan untuk melihat matriks dan karbida yang terdapat pada struktur mikro tersebut.

Berikut ini adalah gambar struktur mikro TWDI dan TWADI tanpa menggunakan etsa.



Gambar 4.4 Struktur mikro non etsa TWDI dan TWADI

Dari gambar di atas terlihat bahwasanya tidak terjadi perbedaan persebaran grafit yang signifikan antara TWDI dan TWADI. Persebaran grafit pada gambar di atas tersebar secara merata. Hal tersebut dikarenakan grafit adalah struktur kristal pada matriks sehingga ia tidak dapat dirubah dengan menggunakan proses *austempering*. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa proses *austempering* tidak dapat merubah struktur kristal grafit yang sudah terbentuk sebelumnya pada saat pembentukan besi tuang nodular^[18].



TWDI A1

TWADI A1

TWDI C1

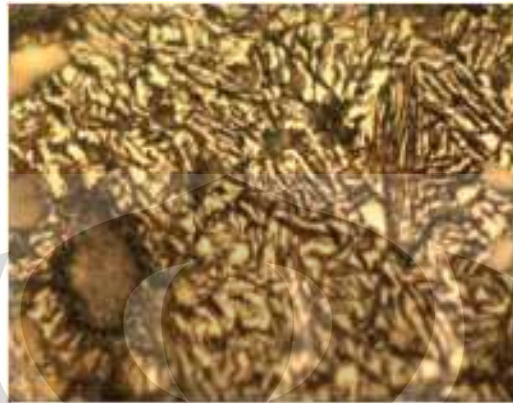
TWADI C1

Gambar 4.5 Struktur mikro dengan etsa TWDI dan TWADI

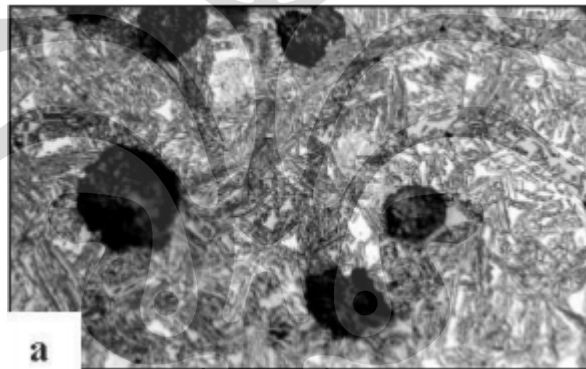
Pada TWDI A1 terlihat adanya matriks *ferrite* yang dikelilingi oleh grafit. Di sana juga terdapat *primary graphite* yang berbentuk bulat dan lebih besar dari pada grafit yang lain. Adanya *primary* grafit ini, diduga akan menurunkan kekuatan tarik dari material karena menyebabkan tegangan akan memusat pada *primary graphite* tersebut sehingga distribusi tegangan menjadi tidak rata. Pada TWDI C1 terlihat juga adanya matriks *ferrite* yang dikelilingi oleh grafit. Namun pada gambar tersebut tidak terlihat adanya *primary graphite* sepertinya TWDI A1.. Grafit pada TWDI C1 terlihat lebih seragam. Hal ini disebabkan oleh penggunaan isolator yang berfungsi untuk melambatkan kecepatan pendinginan sehingga mengakibatkan grafit terbentuk dengan bulat dan seragam.

Setelah proses *austempering* dilakukan pada TWDI A1 dan C1 terlihat perubahan matriks yang sangat mencolok (lihat TWADI A1 dan C1). Terlihat adanya perubahan matriks dari *ferrite* biasa menjadi matriks *ausferrite* (*acicular ferrite* dan *austenite* sisa).

Identifikasi matriks di atas sebagai *acicular ferrite* dapat dibuktikan dengan beberapa foto struktur mikro yang diambil dari beberapa jurnal lain yang juga telah melakukan proses *austempering* terhadap besi tuang nodular. Berikut ini adalah beberapa contohnya.



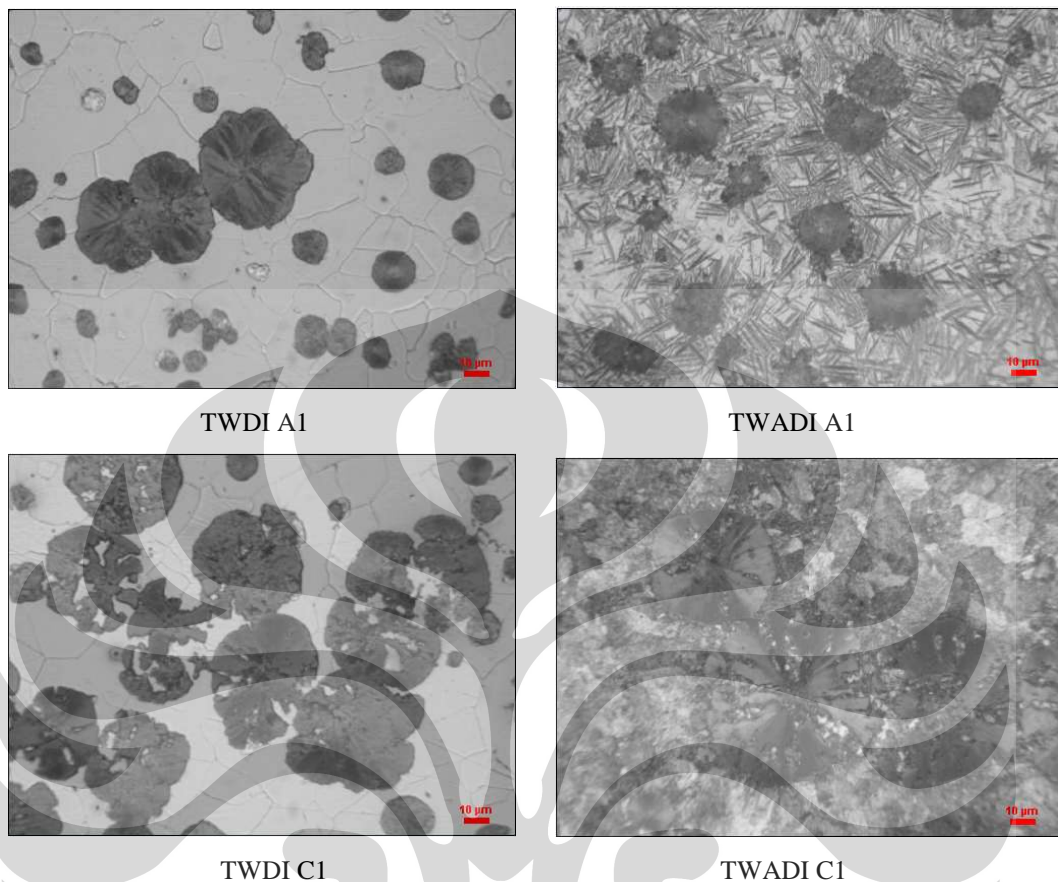
Gambar 4.6 Struktur mikro ADI pada proses *austempering* pada suhu 350°C selama 90 menit^[28]



Gambar 4.7 Struktur mikro TWADI pada proses *austempering* pada suhu 350°C selama 10 menit^[31]

Kedua penulis tersebut mengatakan bahwa struktur mikro yang terdapat dalam foto mikro mereka adalah grafit dengan matriks *ausferrite* (*acicular ferrite* dan *austenite* sisa). Dengan membandingkan hasil foto mikro tersebut, struktur matriks hasil penelitian ini dapat diidentifikasi dengan matriks *ausferrite*.

Karbida

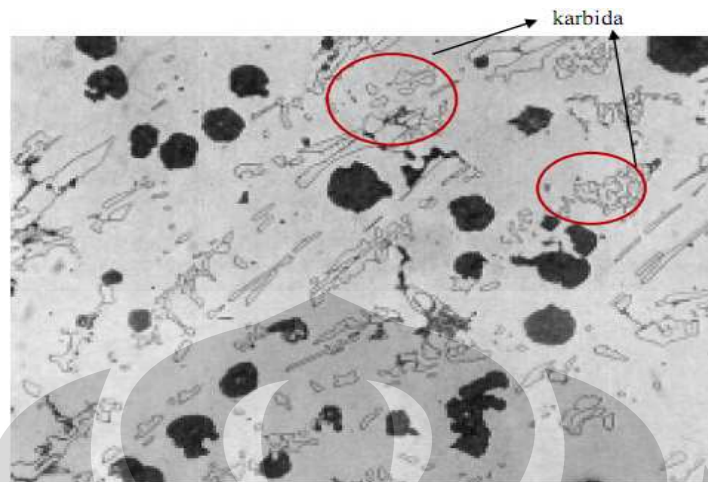


Gambar 4.8 Karbida pada TWDI dan TWADI

Pada gambar TWDI A1 dan C1 tidak terlihat adanya karbida. Walaupun karbida pada TWDI A1 dan C1 tidak terlihat, bukan berarti tidak terjadi karbida sama sekali. Hal ini dikarenakan penggunaan Magnesium sebagai nodulan yang sangat berperan besar terhadap terbentuknya karbida. Hal ini dikarenakan Magnesium merupakan *strong carbide former*^[8].

Ketebalan plat yang sangat tipis (1 mm) pada penelitian ini juga semakin membuat karbida cenderung terbentuk^[6]. Semakin tipis benda maka semakin cepat pula proses pendinginannya. Hal ini mengakibatkan kerja inokulan pada logam cair untuk memecah karbida menjadi besi dan grafit menjadi tidak optimal. Selain itu karbida juga dapat disebabkan oleh efek *fading*. Efek *fading* terjadi sedangkan tugas daripada inokulan belum selesai.

Berikut ini adalah salah satu contoh foto struktur mikro besi tuang nodular yang mengandung karbida.



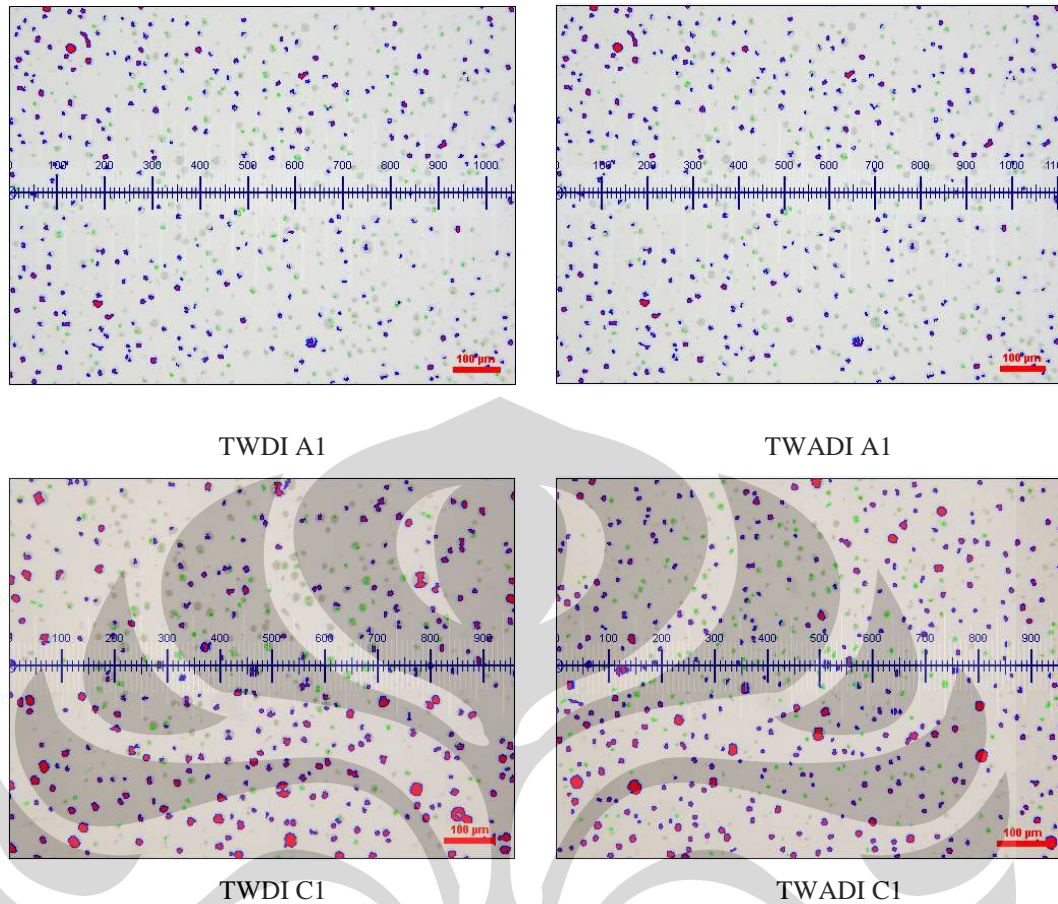
Gambar 4.9 Struktur mikro besi tuang nodular feritik yang mengandung *primary carbide*^[3]

Pada gambar pembanding di atas, keberadaan karbida dapat diidentifikasi dengan adanya struktur serpih panjang seperti *dendrite* pada matriks *ferrite* dan/atau *pearlite*. Sedangkan pada gambar struktur mikro TWDI A1 dan C1 tidak didapatkan struktur seperti itu.

Proses *austempering* yang dilakukan pada TWDI A1 dan C1 akan merubah matriks menjadi *ausferrite*. Dengan perubahan struktur matriks ini maka dapat dikatakan bahwa karbida pada TWDI A1 dan C1 juga ikut berubah menjadi matriks *ausferrite*. Hal ini menyebabkan struktur matriks pada TWADI A1 dan C1 bersih dari karbida.

4.3.1 Perhitungan Nodularitas, Jumlah Nodul, dan Diameter Rata – rata Nodul

Berikut merupakan foto mikro, tabel dan grafik dari nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul TWDI. Perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul menggunakan *software NIS Element*.



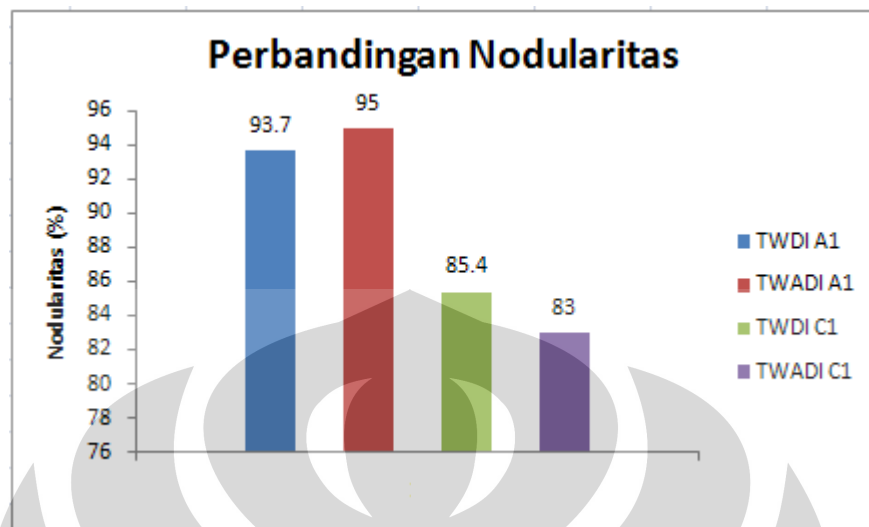
Gambar 4.10 Perhitungan jumlah nodul, nodularitas, dan diameter rata-rata TWDI dengan software *NIS Element*

Tabel 4.2 Perhitungan nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata TWDI

Sampel	Nodularitas	Jumlah Nodul	Diameter Rata-rata
	(%)	(nodul/mm ²)	(μm)
TWDI A1	93.7	416	2.91
TWADI A1	95	353	2.85
TWDI C1	85.4	499	1.97
TWADI C1	83	448	2.56

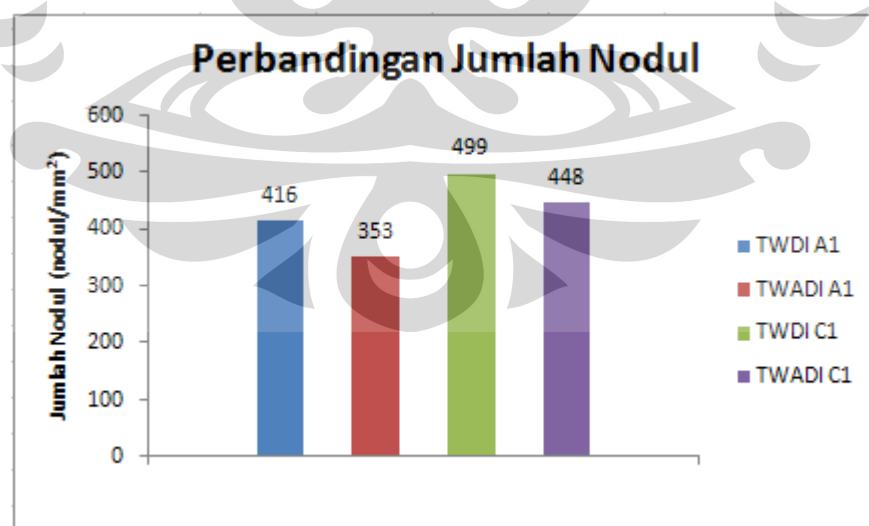
Berdasarkan tabel di atas, proses *austempering* yang dilakukan tidak mengakibatkan perubahan yang signifikan pada nodularitas, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul. Hal ini dikarenakan proses *austempering* hanya merubah matriks saja. Sedangkan nodul di sini sudah menjadi kristal padat pada

pembentukan TWDI sebelumnya. Oleh karena itulah sifat dan karakteristik nodul bersifat tetap.



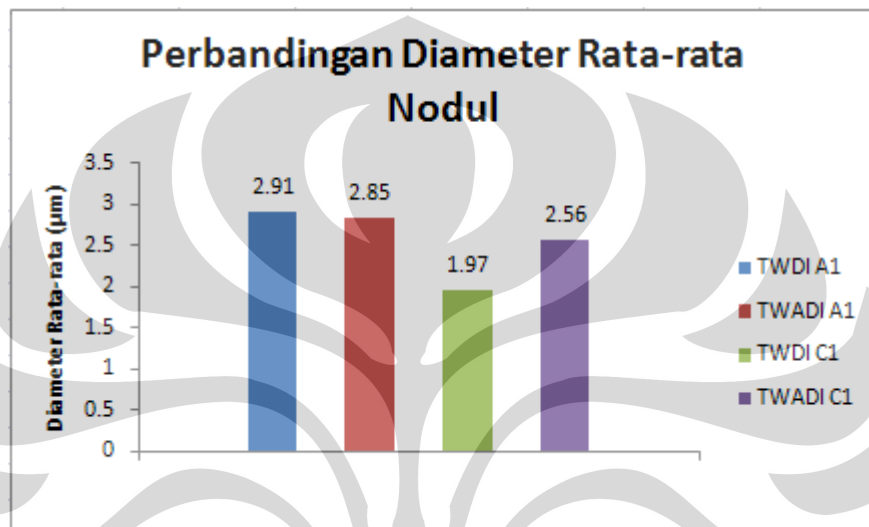
Gambar 4.11 Grafik perbandingan nodularitas

Pada grafik di atas terlihat adanya perbedaan nilai nodularitas. Sampel TWDI dan TWADI A1 memiliki nilai nodularitas yang lebih tinggi dibandingkan sampel TWDI dan TWADI C1. Rendahnya nilai nodularitas TWDI dan TWADI C1 disebabkan oleh banyaknya *exploded graphite*. *Exploded Graphite* ini disebabkan oleh adanya flotasi grafit dikarenakan unsur karbon yang cukup tinggi. Struktur mikro *exploded graphite* dapat dilihat pada Gambar 3.8



Gambar 4.12 Grafik perbandingan jumlah nodul

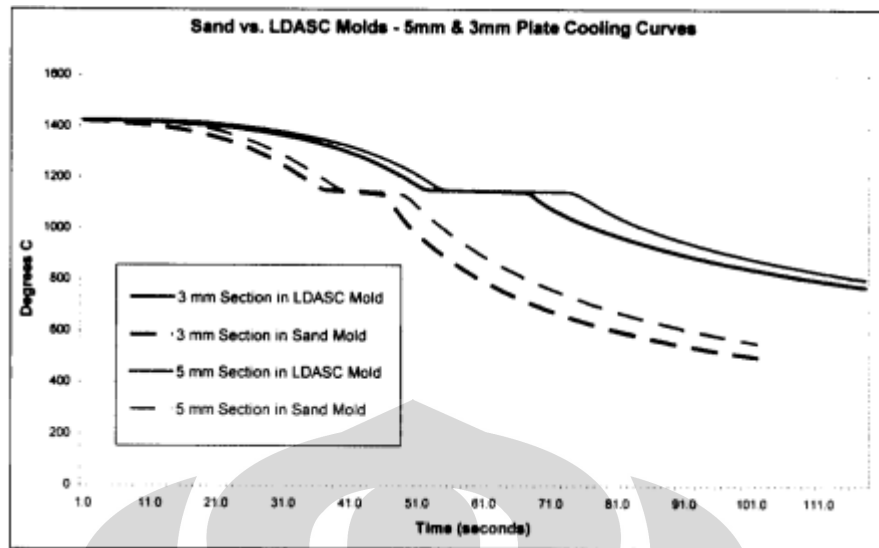
Pada grafik di atas terlihat adanya perbedaan jumlah nodul antara TWDI dan TWADI A1 dengan TWDI dan TWADI C1 di mana jumlah nodul TWDI dan TWADI C1 lebih banyak dibandingkan TWDI dan TWADI A1. Hal ini disebabkan efek penggunaan isolator pada sisi tepi benda cor yang mengakibatkan panas dari *sprue* tidak dapat menghambat kecepatan pendinginan dari benda cor. Akibatnya, kecepatan pendinginan pada sampel C1 menjadi lebih cepat dibandingkan sampel A1 dan mengakibatkan jumlah nodul menjadi lebih banyak.



Gambar 4.13 Grafik perbandingan diameter rata-rata

Dari grafik di atas terlihat adanya perbedaan diameter rata-rata sampel TWDI dan TWADI A1 dengan sampel TWDI dan TWADI C1, di mana sampel TWDI dan TWADI C1 memiliki diameter rata-rata nodul yang lebih kecil daripada sampel TWDI dan TWADI A1. Hal ini disebabkan efek penggunaan isolator pada sampel C1 sehingga panas dari *sprue* tidak dapat menghambat kecepatan pendinginan dari sampel C1. Akibatnya, kecepatan pendinginan menjadi lebih cepat dan menghasilkan diameter rata-rata nodul yang lebih kecil.

Media lain yang dapat digunakan dan telah teruji untuk menghambat panas pada pengecoran adalah LDASC (Low Density Aluminium Silicate Ceramic). Dalam jurnalnya, Showman menggunakan LDASC sebagai penghambat panas dengan mencampurkannya dengan pasir untuk membuat cetakan^[29]. Dengan mencampurkan LDASC dengan pasir, terjadi penurunan kecepatan pendinginan yang signifikan pada logam cair.



Gambar 4.14 Grafik perbandingan kecepatan pendinginan pada cetakan pasir biasa dengan cetakan campuran pasir dan LDASC

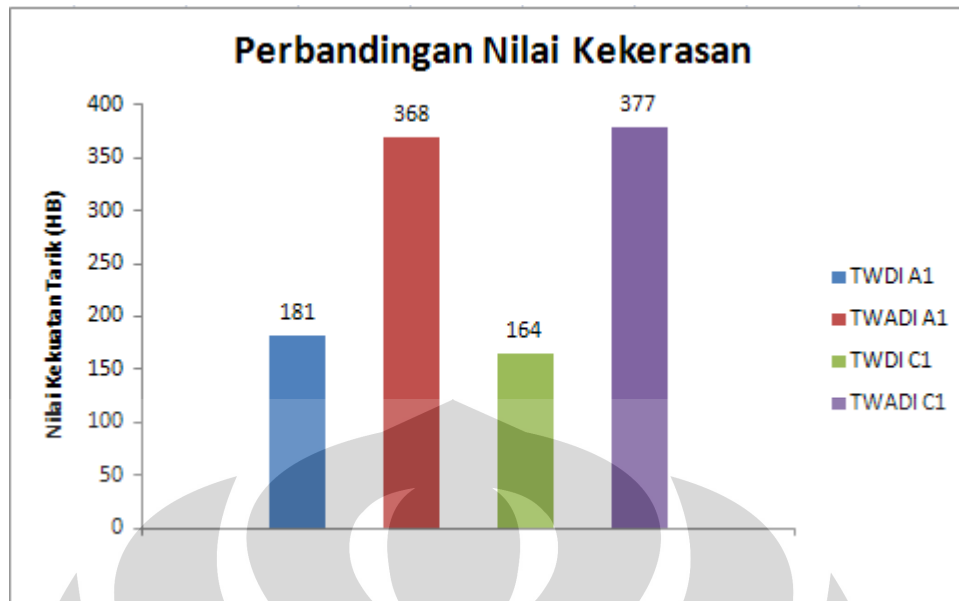
4.4 Pengujian Mekanik

4.4.1 Pengujian Kekerasan

Berikut adalah tabel hasil penjejakan brinell kepada sampel TWDI dan TWADI (A1 dan C1). Penjejakan dilakukan sebanyak tujuh kali dengan jarak yang tidak terlalu rapat untuk menghindari terjadinya *strain hardening*.

Dari hasil penjejakan, dapat diketahui nilai kekerasan rata-rata TWDI A1 sebesar 181 HB, TWDI C1 sebesar 164 HB, TWADI A1 sebesar 368 HB dan TWADI C1 sebesar 377 HB.

Agar lebih terlihat *trend*-nya, maka dapat disajikan dalam bentuk grafik berikut ini.



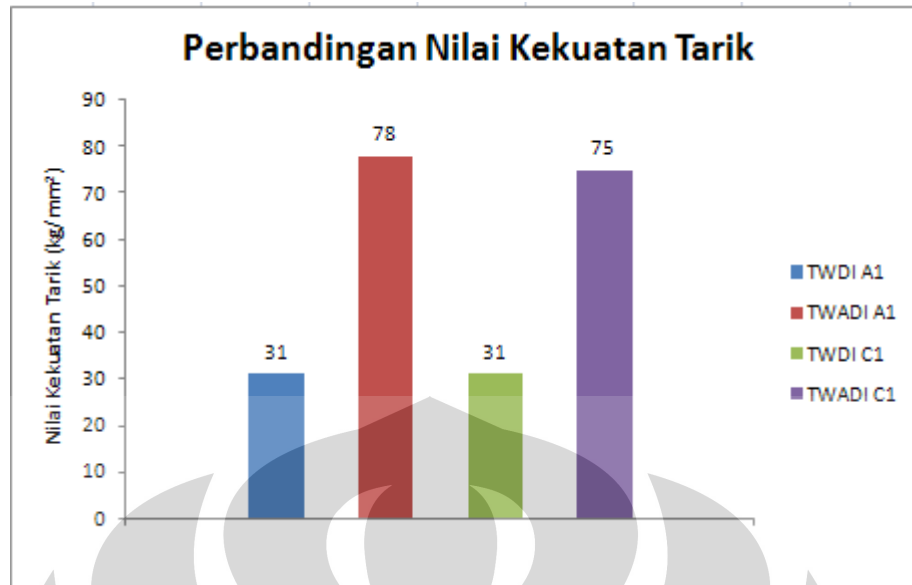
Gambar 4.15 Grafik perbandingan nilai kekerasan

Berdasarkan Gambar 4.15 nilai kekerasan meningkat dari sebelum *austempering* (TWDI) dan setelah *austempering* (TWADI) pada sampel A1 dan C1. Grafik di atas memperlihatkan terjadinya kenaikan nilai kekerasan yang signifikan yaitu sebesar 187 HB atau sekitar 103% pada sampel A1 dan 213 HB atau sekitar 130% pada sampel C1. Kedua sampel tersebut mengalami kenaikan nilai kekerasan di atas 100%.

Analisis yang dihasilkan dari kenaikan kekerasan adalah dikarenakan adanya perubahan struktur matriks dari *ferrite* menjadi *ausferrite* (*acicular ferrite* dan *austenite*). *Acicular ferrite* yang terbentuk menyerupai jarum atau pecahan kaca. Bentuk ini diidentifikasi menyerupai *martensite temper*^[30]. Hal inilah yang kemudian menyebabkan TWADI memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi.

4.4.2 Pengujian Tarik

Dari hasil pengujian didapatkan nilai kekuatan tarik pada TWDI A1 sebesar 31 kg/mm², TWDI C1 sebesar 31 kg/mm², TWADI A1 sebesar 78 kg/mm², dan TWADI C1 sebesar 75 kg/mm². Agar lebih terlihat *trend*-nya, maka disajikan dalam bentuk grafik berikut ini.

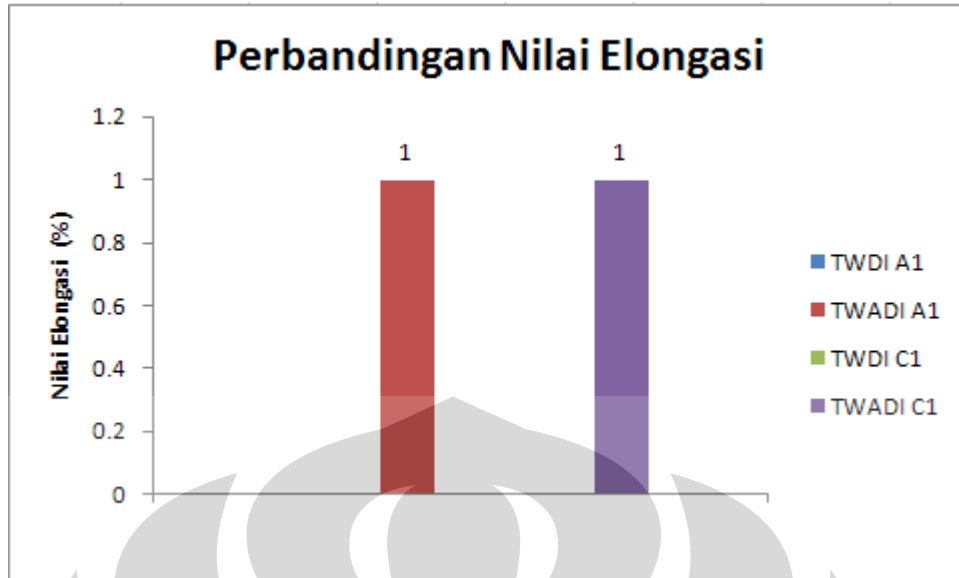


Gambar 4.16 Grafik perbandingan nilai kekuatan tarik

Berdasarkan Gambar 4.16 kekuatan tarik meningkat dari sebelum *austempering* (TWDI) dan setelah *austempering* (TWADI). Grafik di atas memperlihatkan terjadinya kenaikan nilai kekuatan tarik yang signifikan yakni sebesar 47 kg/mm^2 atau sekitar 152% pada sampel A1 dan sebesar 44 kg/mm^2 atau sekitar 142% pada sampel C1. Kedua sampel memiliki nilai kenaikan kekuatan tarik di atas 100%.

Analisis yang dihasilkan dari kenaikan grafik di atas adalah dikarenakan adanya struktur matriks yang berubah dari *ferrite* biasa menjadi *acicular ferrite* dan *austenite*. *Acicular ferrite* memiliki kekuatan tarik yang lebih besar dibandingkan *ferrite* pada bentuk biasa. Hal ini dikarenakan struktur morfologi dari *acicular ferrite* yang berbentuk seperti jarum.

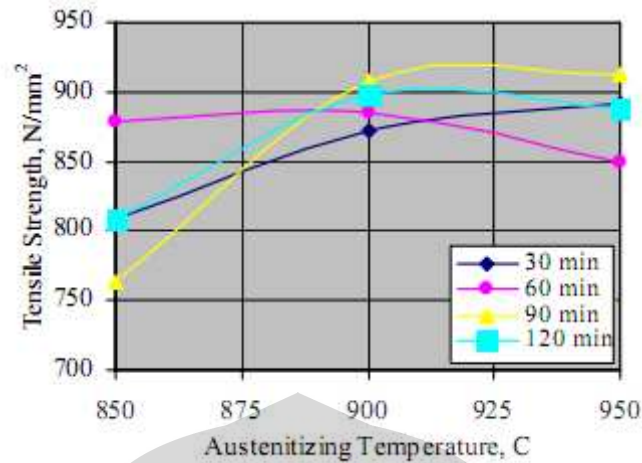
Kenaikan nilai kekuatan tarik dan kekerasan pada penelitian ini berbanding lurus yaitu memiliki trend kenaikan 100%. Hal ini sesuai dengan literatur yang menyebutkan bahwa kenaikan nilai kekuatan tarik dibarengi dengan kenaikan nilai kekerasan^[27].



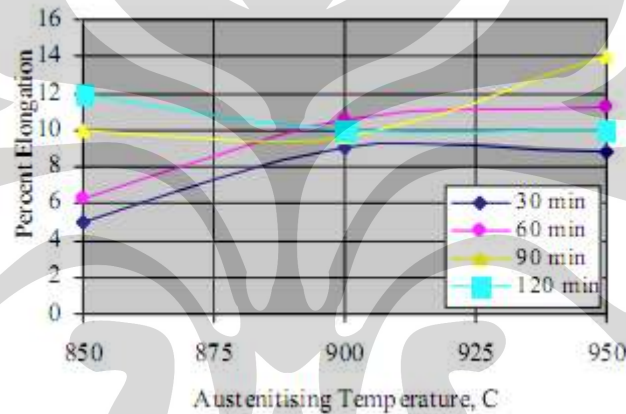
Gambar 4.17 Grafik perbandingan elongasi

Berdasarkan Gambar 4.17 dapat dilihat bahwasanya nilai elongasi TWDI A1 sebesar 0%, TWDI C1 sebesar 0%, TWADI A1 sebesar 1%, dan TWADI C1 sebesar 1%. Dari nilai tersebut dapat kita simpulkan bahwa TWDI A1 dan C1 memiliki sifat getas sedangkan pada TWADI A1 dan C1 memiliki sifat yang lebih ulet. Hal ini disebabkan oleh proses *austempering* yang dilakukan sehingga mengakibatkan perubahan matriks *ferrite* menjadi *ausferrite*. Namun demikian, kenaikan elongasi tersebut tidaklah terlalu signifikan karena perubahannya kurang dari 10%.

Secara umum kenaikan kekuatan tarik pada material diikuti dengan penurunan elongasi. Sedangkan pada penelitian ini tidaklah demikian. Kenaikan nilai kekuatan tarik justru diikuti dengan kenaikan nilai elongasi juga. Hal ini dikarenakan ADI memiliki sifat-sifat istimewa terhadap sifat mekanisnya di mana terjadi kombinasi antara kekuatan dan elongasi yang cukup baik. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik pada jurnal berikut ini^[28].



Gambar 4.18 Pengaruh suhu austensiasi dan waktu tahan *austempering* pada kekuatan tarik



Gambar 4.19 Pengaruh suhu austensiasi dan waktu tahan *austempering* pada elongasi

Terlihat pada grafik Gambar 4.18 dan 4.19 bahwa kenaikan kekuatan tarik pada ADI diikuti oleh kenaikan nilai elongasi. Dari grafik tersebut THUN dan Kay Thi LWIN menemukan waktu tahan optimal ADI pada proses *austempering* adalah 30 menit yang akan berdampak baik pada kekuatan tarik dan persen elongasi. Sedangkan pada pelat tipis, waktu tahan optimal pada proses *austempering* adalah 10 menit^[31].

BAB 5

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Terjadi perubahan matriks pada besi tuang nodular setelah dilakukan proses *austempering* dari *ferrite* menjadi *acicular ferrite* dan *austenite (ausferrite)*.
2. Efek penggunaan isolator pada sampel C1 mengakibatkan nilai nodularitas dan diameter rata-rata nodul lebih kecil dibandingkan sampel A1. Sedangkan jumlah nodul pada sampel C1 lebih banyak dibandingkan sampel A1.
3. Terjadi perubahan nodul, jumlah nodul, dan diameter rata-rata nodul pada proses *austempering* yang tidak terlalu signifikan karena nodul yang terbentuk merupakan kristal padat.
4. Terjadi kenaikan nilai kekerasan setelah proses *austempering* sebesar 187 HB atau sekitar 103% pada sampel A1 dan 213 HB atau sekitar 130% pada sampel C1. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai kekerasan rata-rata setelah proses *austempering* adalah di atas 100%
5. Terjadi kenaikan nilai kekuatan tarik setelah proses *austempering* sebesar 47 kg/mm² atau sekitar 152% pada sampel A1 dan sebesar 44 kg/mm² atau sekitar 142% pada sampel C1. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan nilai kekuatan tarik rata-rata setelah proses *austempering* adalah di atas 100%.

Terjadi kenaikan nilai elongasi setelah *austempering* dari 0% menjadi 1% pada sampel A1 dan C1.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Schrems, K.K., dkk, Statistical analysis of the mechanical properties of thinwalled ductile iron casting. SAE Technical Paper Doc. No. : 2003-01- 0828, 2003.
- [2] Ductile Iron Society. A Design Engineer's Digest of Ductile Iron. 9th Edition. <http://www.Ductile.org>
- [3] Keough, 1998; www.steelinch.com, 2007; Keough, 2007
- [4] Caldera, M., dkk, Influence of nodule count on fatigue properties of ferritic thin wall ductile iron. Materials Science and Engineering, 2007. 23(8): p.1000- 1004.
- [5] Martinez, R.A. Applications of ADI in High Strength Thin Wall Automotive Parts. World Conference on ADI, 2002.
- [6] Stefanescu, D.M., dkk, Tensile Properties of Thin Wall Ductile Iron. AFS Transactions, 2002. 02(178)
- [7] Mourad, Mohamed M. Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron 68th WFC, 7th-10th February 2008, pp.161-166.
- [8] Ruxanda, F. E., dkk, Microstructure Characterization of Ductile Thin Wall Iron Casting. AFS Transaction. 02(177), 2002.
- [9] ASTM E10. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. United States: ASTM International. 2001
- [10] ASM Handbook. (1990). Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys: Volume 01. Ohio: ASM International Metal Park.
- [11] JIS G5502 1989
- [12] <http://www.Foundry-Elkem.com>
- [13] www.ductile.org, Section III dan Section IV. download 07/6/2010

- [14] Dawson, J. V., Carbides in As-cast Nodular (SG) Iron-Their Causes and Prevention. British Cast Iron Research Association, 1976. BCIRA Report 1221: p. 153-158.
- [15] Massone, D. P., dkk, Mechanical Properties of Thin Wall Ductile Iron – Influence of Carbon Equivalent and Graphite Distribution. Vol. 44(7):p.1180-1187. ISIJ Int., 2004.
- [16] Aufderheiden, dkk, Controlling the Skin Effect on Thin Wall Ductile Iron Casting, 2005, AFS.
- [17] Mullins, J. D., Nodule Count – Why and How!, Ductile Iron News, 2003. Iss 2: p. 1-2. www.ductile.org
- [18] Sulamet-Ariobimo, R. D., Austempered Ductile Iron Production Technology from Based Material Produced by Ferro-Casting Industry in Indonesia, Faculty of Engineering and Physical System. Rockhampton, Australia : Central Queensland University, 2003
- [19] Showman, Ralph E; Aufderheide, Ronald C. Getting to the Core of Thin-Walled Castings. Modern Casting. April 2004. Pg.32. ABI/INFORM Trade & Industry
- [20] Goodrich, G.M. Cast Iron Microstructure Anomalies and Their Causes. Casting Iron Quality Control Committee 5J Report. Bodycote Taussig, Inc.
- [21] Kovacs, B. V., On The Terminology and Structure of Austempered Ductile Iron. Pada 98th Casting Congress. 1994, Hamilton, Ontario, Canada : American Foundrymen's Society Inc
- [22] Kurbatov, V. P. dan V. I. Murav'ev. Quenching Tool Steels in a Fluidized Bed. New York.1970.
- [23] Dinunsi, A. Advances in Fluidized Bed Quenching, p 71, ASM Conference Proceeding, Quenching and Distortion Control, ASM International, 1992.
- [24] Brandenburg, Kristin. Machining Austempered Ductile Iron. Livonia-MI. Vol. 128 No.5. 2002.

- [25] Achary, J. Tensile Properties of Austempered Ductile Iron under Thermomechanical Treatment. Fort Wayne. 1999.
- [26] Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Iron and Steel. ASM International. 1995.
- [27] ASM Handbook. (1990). Casting : Volume 15. Ohio: ASM International Metal Park.
- [28] Thein THUN dan Kay Thi LWIN. Optimizing the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron for Automobile for Differential Gear. Journal Metals, Materials, and Minerals. 2009.
- [29] Showman, Ralph, dkk. Ironing Out Thin-Wall Casting Defects. ABI/INFORM Trade and Industry pg.29. 2006.
- [30] Wahyu Purwo Raharjo dan Eko Surojo. Pengaruh Temperatur dan Waktu Austempering Terhadap Kekerasan ADI Hasil Austempering FCD 55. Gema Teknik. 2007.
- [31] Mourad, Mohammed, dkk. Optimizing the Properties of Thin Wall Austempered Ductile Iron. 68th World Foundry Congress. 2008.