

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR PADA PROSES
ANNEALING TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN
KETANGGUHAN BESI COR KELABU FC25**

(SKRIPSI)

Oleh

**FADHIL AMANULLAH AKBAR
NPM 2015021079**



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR PADA PROSES *ANNEALING* TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN KETANGGUHAN BESI COR KELABU FC25

Oleh

Fadhil Amanullah Akbar

Besi cor kelabu FC25 adalah salah satu material baja karbon tinggi yang sedang banyak digunakan sebagai bahan utama pada pembuatan elemen mesin seperti sambungan perpipaan, poros, engkol, roda gigi, landasan mesin. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur pada proses *annealing* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro Besi Cor Kelabu FC25. Penelitian ini menggunakan spesimen berupa Besi Cor Kelabu FC25 yang diberikan perlakuan panas *annealing* dengan variasi temperatur 750°C, 850°C dan 1000°C dan *holding time* 30 menit, kemudian didinginkan secara lambat didalam *furnace* selama 30 jam. Selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan metode *vickers* dan pengujian impak metode *charpy*. Hasil uji kekerasan didapatkan nilai kekerasan sebelum dilakukan perlakuan panas sebesar 154,739849 kg/mm². Hasil uji kekerasan setelah dilakukan perlakuan panas *annealing* dengan temperatur 750°C, 850°C dan 1000°C sebesar 152,662722 kg/mm², 150,3386871 kg/mm², 146,1269614 kg/mm². Hasil pengujian impak didapatkan energi impak sebelum dilakukan perlakuan panas sebesar 3 joule. Hasil energi impak setelah dilakukan perlakuan panas *annealing* dengan temperatur 750°C, 850°C dan 1000°C sebesar 3,26 joule, 3,8 joule, 4,23 joule. Pada pengamatan struktur mikro menggunakan Optical Microscopy (OM) menunjukkan perubahan fasa grafit flake menjadi grafit nodular dengan butir yang lebih besar.

Kata Kunci : Besi Cor Kelabu FC25, *Annealing*, Temperatur, kekerasan, ketangguhan dan OM.

ABSTRACT

THE EFFECT OF TEMPERATURE VARIATIONS IN THE ANNEALING PROCESS ON THE HARDNESS AND IMPACT STRENGTH FC25 GRAY CAST IRON

By

Fadhil Amanullah Akbar

FC25 gray cast iron is a high carbon steel material that is widely used as the main material in the manufacture of machine elements such as pipe fittings, shafts, cranks, gears, machine bads. This study aimed to determine the effect of temperature variations in the annealing process on the mechanical properties and microstructure of FC25 Gray Cast Iron. This research used specimens in the form of FC25 Gray Cast Iron which were given heat annealing treatment with temperature variations of 750°C, 850°C and 1000°C and a holding time of 30 minutes, then cooled slowly in a furnace for 30 hours. Subsequently, Vickers hardness testing and Charpy method impact testing were carried out. The hardness test results showed that the hardness value before heat treatment was carried out was 154,739849 kg/mm². The hardness test results after annealing heat treatment at temperatures of 750°C, 850°C and 1000°C were 152,662722 kg/mm², 150,3386871 kg/mm², 146,1269614 kg/mm². The impact test results showed that the impact energy before heat treatment was carried out was 3 joules. The impact energy results after annealing heat treatment with temperatures of 750°C, 850°C and 1000°C were 3,26 joules, 3,8 joules, 4,23 joules. Observation of the microstructure using Optical Microscopy (OM) shows a change in the flake graphite phase to become nodular graphite with larger grains.

Keywords: *FC25 Gray Cast Iron, Annealing, Temperature, hardness, toughness and OM.*

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR PADA PROSES
ANNEALING TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN
KETANGGUHAN BESI COR KELABU FC25**

**Oleh
FADHIL AMANULLAH AKBAR**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
PADA PROSES ANNEALING TERHADAP
NILAI KEKERASAN DAN
KETANGGUHAN BESI COR KELABU
FC25**

Nama Mahasiswa : *Fadhil Amanullah Akbar*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021079

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

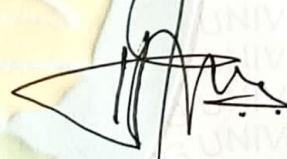
Pembimbing 1



Zulhanif, S.T., M.T.

NIP. 19730402 200003 1 002

Pembimbing 2

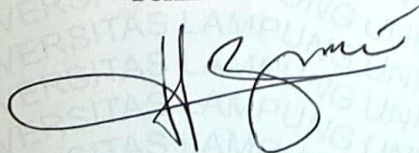


Harnowo Supriadi, S.T., M.T.

NIP. 19690909 199703 1 002

MENGETAHUI

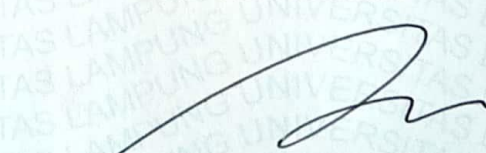
Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T.

NIP. 19710817 199802 1 003

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc.

NIP. 19790821 200312 1 003

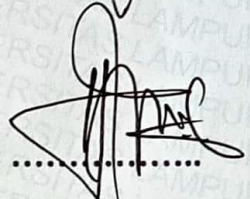
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

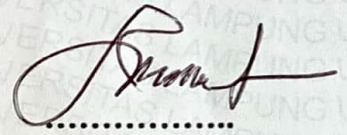
Ketua Penguji : **Zulhanif, S.T., M.T**



Anggota Penguji : **Harnowo Supriadi S.T., M.T**



Penguji Utama : **Prof. Dr. Sugiyanto, M.T**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP. 19750928/200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 9 Juli 2024

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fadhil Amanullah Akbar
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021079
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini disebut dalam daftar pustaka.

Bandar Lampung, 18 Juli 2024

Yang menyatakan,



Handwritten signature of Fadhil Amanullah Akbar over a 20,000 Rupiah revenue stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'SEPLUAS RIBU RUPIAH', '20 METERAI TEMPEL', and the serial number 'BF1BAALX241626073'.

Fadhil Amanullah Akbar

NPM. 2015021079

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Fadhil Amanullah Akbar dilahirkan di Prabumulih pada tanggal 11 April 2003. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Herman dan Ibu Sumiyati. Penulis mengawali pendidikan formal di SD Negeri 18 Prabumulih pada tahun (2008-2014), SMP YPS (2014-2017), SMK YB (2017-2020). Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Material pada tahun 2023-2024 dan mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) Sebagai Anggota bidang Minat dan Bakat periode 2022/2023. Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Tanjung Sakti, Kec. Lemong, Kab, Pesisir Barat pada awal Januari - Februari 2023. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Tirta Investama Tanggamus, Tanggamus, Lampung pada Juli-Agustus 2023, dengan topik Analisis Laju Keausan *Pin* Pada *Table Top Chain Conveyor* Mesin *BARDI* Di PT Tirta Investama Tanggamus. Pada skripsi ini penulis melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul “Pengaruh Variasi Temperatur Pada Proses *Annealing* Terhadap Nilai Kekerasan Dan Ketangguhan Besi Cor Kelabu FC25” dibawah bimbingan Bapak Zulhanif, S.T., M.T dan Bapak Harnowo Supriadi S.T., M.T. serta Prof. Dr. Sugiyanto, M.T sebagai pembahas.

MOTTO

“Tidak ada yang akan menuai kecuali apa yang mereka tabur”

(Qs. Al-An'am : 164)

“Tidak ada pemberian orang tua yang paling berharga kepada anaknya daripada pendidikan akhlak mulia”

(HR. Bukhari)

“Yameru mae ni, naze hajimeta no ka o oboete oite kudasai”

(Sebelum kamu berhenti, ingatlah kenapa kamu memulai)

“Karena kebahagiaan datang dari sebuah penderitaan”

(Fadhil Amanullah Akbar)

PERSEMBAHAN

Atas Ridho Allah SWT dan dengan segala kerendahan hati

Saya persembahkan skripsi ini kepada kedua orang tua saya yaitu Alm. Bapak Herman U.H dan Ibu Sumiyati, yang sangat saya sayangi dan cintai atas segala keikhlasan disetiap pengorbanan, dukungan dan doa untuk anakmu ini sehingga mendapatkan gelar sarjana.

Saudari saya Silvia Herma Dewi, Maharani dan Mutiara yang selalu memberikan semangat, dukungan dan doa yang tiada henti-hentinya kepada tuhan dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Untuk yang terkasih ayah saya Alm. Herman Bin Umar Haki yang selalu menjadi penyemangat dan motivator bagi saya, Keluarga Besar Herman U.H yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tiada hentinya.

Untuk sahabat-sahabat saya yang selalu memberikan semangat, dukungan, bantuan dan doa untuk saya selama proses penyelesaian skripsi ini.

Almamaterku, UNIVERSITAS LAMPUNG.

SANWACANA

Puji syukur saya panjatkan ke hadapan Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“PENGARUH VARIASI TEMPERATUR PADA PROSES ANNEALING TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN KETANGGUHAN BESI COR KELABU FC25”**. Skripsi ini ditujukan untuk memenuhi salah satu syarat wajib perkuliahan jenjang Sarjana (S1) Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

Penulis sejatinya menyadari akan kekurangan atau keterbatasan, pengetahuan, pengalaman dan kemampuan yang Penulis miliki. namun terlepas dari itu, Penulis memiliki harapan agar tulisan ini dapat bermanfaat bagi berbagai macam pihak dan dapat memberi sumbangan pemikiran bagi bidang akademis dan bidang lainnya, melalui kesempatan ini pula Penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih atas kritikan, saran, bimbingan, serta petunjuk-petunjuk dari semua pihak yang sangat Penulis harapkan guna kelengkapan dan penyempurnaan Skripsi ini.

Penulis tidak akan berhasil dengan baik tanpa ada bantuan dan dukungan dari berbagai pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Zulhanif, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama atas kesediaannya dalam membimbing serta memberikan masukan dan arahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T selaku dosen pembimbing pendamping Tugas Akhir, atas kesediaan dan keikhlasannya untuk berbagi ilmu, membimbing, memberi

kritik sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan sebaik-baiknya.

3. Prof. Dr. Sugiyanto M.T. selaku dosen pembahas dalam Tugas Akhir ini telah memberi kritik dan masukan yang bermanfaat bagi penulis.
4. Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M.T. selaku dosen Pembimbing Akademik telah membimbing penulis selama melaksanakan perkuliahan serta membantu segala permasalahan akademik yang dialami penulis.
5. Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc. selaku Ketua Program Studi Sarjana S1 Teknik Mesin Universitas Lampung telah memberikan arahan mengenai perkuliahan.
6. Dr. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan kenyamanan selama perkuliahan.
7. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., Selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
8. Kedua orang tersayang Bapak dan Ibu (Herman & Sumiyati) yang selalu memberikan nasehat, motivasi serta selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan.
9. Kakak tersayang (Silvia Herma Dewi, Maharani dan Mutiara) yang selalu mensupport penulis selama masa perkuliahan.
10. Keponakan tercinta (Naura Salsabila Adevia, Navila Zahra Adevia dan Nadhifah Sadiqah Adevia) yang selalu menambah masalah dalam kehidupan penulis selama perkuliahan.
11. Seseorang yang kelak menjadi pendamping hidup penulis dan menjadi alasan penulis selalu bersemangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir, siapapun seseorang itu nantinya penulis berjanji akan selalu berusaha membuatnya menjadi wanita paling beruntung di dunia.
12. Para staf admin Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu sedia dan sigap membantu penyelesaian segala berkas yang diperlukan penulis.
13. Geng KunKun yang terdiri dari Gerino Alpasah Fathieyasina, Rizky Bento Mardius dan Rakhir Tizam Harliz.
14. Saudara seperjuangan kantin mak yang terdiri dari usup, bahrul, jeki, moses, ale, pakde, harico, usman, tegar serta mak tercinta.

15. Material pride yang siap sedia membantu segala urusan dalam penyelesaian laporan.

16. Teman-teman seperjuangan Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2020.

Akhir kata, Penulis sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam penyusunan skripsi ini dari awal sampai akhir.

DAFTAR ISI

BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	5
C. Batasan Maslaah	5
D. Sistematika Penulisan	6
BAB II	8
TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Besi Cor	8
B. Jenis-jenis Besi Cor.....	10
1. Besi Cor Nodular	10
2. Besir Cor Kelabu.....	11
3. Besi Cor Mampu Tempa	12
4. Besi Cor Putih.....	13
C. Sifat Mekanik Besi Cor.....	13
D. Perlakuan Panas	15
1. <i>Annealing</i> (Pelunakan Coran).....	17
2. <i>Normalizing</i>	17
3. Pengerasan (<i>Hardening</i>).....	18
E. Variasi Temperatur	18
F. <i>Annealing</i>	19
1. <i>Full Annealing</i>	20
2. <i>Annealing Process</i>	22
3. <i>Stress Relieving</i>	23
4. <i>Ishotermal Annealing</i>	23
5. <i>Recrystallization Annealing</i>	23
6. <i>Bright Annealing</i>	24
G. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ c	24
H. Pengujian Kekerasan.....	29
I. Pengujian Impak	33

J. Jenis-jenis Metode Impak	34
K. Perhitungan Kekuatan Impak.....	34
BAB III.....	37
METODOLOGI PENELITIAN	37
A. Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
B. Bahan yang Digunakan	37
C. Metode Penelitian	46
D. Diagram Alir	50
BAB IV	51
HASIL DAN PEMBAHASAN	51
A. Pengujian Komposisi Bahan	51
B. Data Pengujian Kekerasan Metode <i>Vickers</i>	52
C. Data Pengujian <i>Impact</i> Metode <i>Charpy</i>	55
D. Data Hasil Pengamatan Struktur Mikro	60
BAB V.....	66
SIMPULAN DAN SARAN	66
A. Simpulan	66
B. Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	68

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi besi cor	9
Tabel 2. <i>Mechanical properties</i> untuk besi cor	15
Tabel 3. Spesifikasi <i>Furnace</i>	39
Tabel 4. Spesifikasi <i>Hardness Tester</i>	40
Tabel 5. Spesifikasi <i>Profile Projector</i>	41
Tabel 6. Spesifikasi <i>Impact Testing Machine</i>	44
Tabel 7. Spesifikasi Optical Emmision Spectrometer.....	45
Tabel 8. Spesifikasi Mikroskop <i>Olympus BX53M</i>	46
Tabel 9. Hasil Pengujian Kekerasan	49
Tabel 10. Hasil Pengujian Impak	49
Tabel 11. Pengujian komposisi Besi Cor Kelabu FC25	51
Tabel 12. Data hasil pengujian <i>Vickers</i>	53
Tabel 13. Data hasil pengujian <i>Impact</i>	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Struktur mikro besi cor nodular	10
Gambar 2. Grafit pada besi cor kelabu	12
Gambar 3. Struktur mikro besi cor mampu tempa.....	12
Gambar 4. Struktur mikro besi cor putih	13
Gambar 5. <i>Annealing</i>	20
Gambar 6. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ c	25
Gambar 7. Diagram fasa pemanasan <i>Annealing</i>	28
Gambar 8. Alat uji kekerasan.....	30
Gambar 9. Prinsip uji kekerasan <i>Brinell</i>	31
Gambar 10. Prinsip uji kekerasan <i>Rockwell</i>	32
Gambar 11. Prinsip uji kekerasan <i>Vickers</i>	33
Gambar 12. Ilustrasi pengujian impak	35
Gambar 13. Ilustrasi metode Uji impak.....	36
Gambar 14. Besi Cor Kelabu FC25	38
Gambar 15. Spesimen uji kekerasan.....	38
Gambar 16. Spesimen uji impak standar ASTM E-23.....	38
Gambar 17. <i>Furnace</i>	39
Gambar 18. <i>Hardness Tester</i>	40
Gambar 19. <i>Profile Projector</i>	41
Gambar 20. Gerinda Potong	42
Gambar 21. Amplas	42
Gambar 22. Autosol	43
Gambar 23. <i>Impact Testing Machine</i>	43
Gambar 24. <i>Optical Emission Spectrometer</i>	45
Gambar 25. Mikroskop Olympus BX53M	45
Gambar 26. Grafik hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i>	54
Gambar 27. Grafik hasil pengujian impak.....	57
Gambar 28. Hasil patahan uji impak.....	58
Gambar 29. Pengamatan struktur mikro <i>raw material</i> tanpa perlakuan panas perbesaran 200X dan 1000X.....	60

Gambar 30. Pengamatan struktur mikro dengan perlakuan panas <i>annealing</i> temperatur 750°C dengan perbesaran 200X.....	61
Gambar 31. Pengamatan struktur mikro dengan perlakuan panas <i>annealing</i> temperatur 750°C dengan perbesaran 1000X	61
Gambar 32. Pengamatan struktur mikro dengan perlakuan panas <i>annealing</i> temperatur 1000°C dengan perbesaran 200X	62
Gambar 33. Pengamatan struktur mikro dengan perlakuan panas <i>annealing</i> temperatur 750°C dengan perbesaran 1000X	62
Gambar 34. Pengamatan struktur mikro tanpa perlakuan panas (<i>raw material</i>), temperatur 750°C dan temperatur 1000°C perbesaran 200X.....	63

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan material di dunia industri khususnya manufaktur semakin lama semakin meningkat. Material yang memiliki karakteristik tertentu seperti kekuatan, keuletan, dan sifat mekanik lainnya sangat dibutuhkan bagi dunia industri. Berbagai macam penelitian pun dilakukan demi mendapatkan material baru yang diinginkan.

Besi cor menjadi peran utama yang sangat penting dalam penggunaan pembuatan bahan otomotif maupun konstruksi. Besi cor merupakan jenis material yang cukup digemari dan telah lama menjadi pilihan utama di dunia industri digunakan dalam bentuk peralatan, pemesinan, alat rumah tangga, dan transportasi, serta berbagai keperluan lainnya.. Besi cor sering digunakan pada elemen mesin seperti sambungan perpipaan, poros, engkol, roda gigi, landasan mesin, selain itu besi cor memiliki kemampuan yang tinggi untuk meredam getaran, sehingga seringkali dipakai sebagai bahan dasar kerangka atau penopang mesin (Widodo, 2018).

Besi cor adalah bahan konstruksi yang penting dan banyak digunakan dalam industri pembangunan. Ini adalah logam yang dilelehkan dan dituang ke dalam cetakan untuk membentuk berbagai bentuk yang diperlukan. Besi cor telah digunakan selama ribuan tahun. Sejarahnya meliputi zaman kuno di mana peradaban seperti Romawi Kuno menggunakan teknik pengecoran untuk membuat berbagai struktur dan senjata. Seiring berjalannya waktu,

teknik pengecoran telah berkembang dan ditingkatkan. Proses pembuatan besi cor dimulai dengan peleburan besi mentah, yang kemudian dituang ke dalam cetakan yang sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Ada beberapa teknik pengecoran yang berbeda, seperti pengecoran pasir, pengecoran cetakan logam, dan teknologi modern seperti pengecoran tekanan rendah. Besi cor digunakan dalam berbagai proyek konstruksi, seperti pembangunan gedung, jembatan, infrastruktur, dan mesin. Kekuatan dan daya tahan besi cor membuatnya menjadi pilihan utama untuk struktur-struktur yang memerlukan kestabilan dan ketahanan terhadap beban berat (Fadhillah dkk, 2022).

Besi cor masuk dalam golongan besi paduan yang memiliki titik cair sekitar 1200 OC, kekuatan tarik 10 s/d 40 kg/mm², kekuatan tekan (*compressive strength*) 3 ÷ 5 kali kekuatan tarik, modulus elastisitas 75 sampai 150 Gpa, mampu meredam getaran dan memiliki mampu cor yang cukup baik sehingga banyak dipakai di industry-industri otomotif, permesinan, permesinan dan pertanian (Widodo, 2018).

Heat treatment sangat dibutuhkan dalam rekayasa sifa-sifat mekanik dari suatu material. *Heat treatment* adalah proses pemanasan dan pendinginan logam yang terkontrol dengan tujuan untuk mengubah sifat-sifat fisik dari logam. Proses perlakuan panas yang benar akan menghasilkan tegangan dalam dan juga dapat dihilangkan, ketangguhan suatu bahan juga dapat didapat serta besar butir dapat diperbesar ataupun diperkecil. Ada berbagai macam perlakuan panas yang biasa digunakan pada proses pengolahan baja. Perlakuan panas yang sering digunakan adalah *annealing*, *quenching*, dan *tempering*. *Annealing* adalah perlakuan panas terhadap baja yang dilakukan dengan memanaskan baja hingga temperatur yang cukup tinggi untuk membuat baja menjadi lunak. Proses ini terjadi dalam tiga tahapan yaitu pemulihan, rekristalisasi dan penumbuhan butir. (Suhatmoko, 2008)

Behera (2014) melakukan penelitian proses perlakuan panas jenis *annealing* yang bertujuan untuk meningkatkan keuletan dan kekuatan impak pada *pheroidal graphite cast iron*. Pada penelitian ini spesimen diaustenisasi pada suhu 1000°C dan ditahan selama 90 menit diikuti dengan pendinginan tungku hingga suhu kamar. Kemudian dilakukan proses pengujian tarik, kekerasan *vickers* dan impak *charpy*. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa setelah proses *annealing* kekuatan tarik pada spesimen uji mengalami penurunan sebesar 91,6 Mpa atau 17,4%, untuk nilai kekerasan juga mengalami penurunan yaitu sebesar 116,8 HV atau 43% sedangkan untuk kekuatan impak mengalami peningkatan sebesar 31,93 J/cm². Dengan ini dapat disimpulkan bahwa proses *annealing* pada besi cor dapat digunakan untuk meningkatkan keuletan pada besi cor.

Atmoko dkk (2021) melakukan proses perlakuan panas jenis *annealing* pada besi cor kelabu jenis ASTM A48 yang dipanaskan pada temperatur 850°C kemudian diholding selama 20 menit, dan didinginkan di dalam *furnace*. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada spesimen mengalami penurunan yang signifikan yaitu sebesar 20,5%. Dan dapat disimpulkan bahwa perlakuan panas metode *annealing* akan menyebabkan penurunan kekerasan, hal ini disebabkan fasa ferit yang semakin mendominasi matriks. Namun perlakuan *annealing* ini tepat untuk produk yang membutuhkan sifat ulet seperti poros.

Diniardi dan Yudi (2012) juga melakukan penelitian mengenai proses perlakuan panas *annealing* pada besi cor juga pernah dilakukan oleh Diniardi dan yudi pada tahun 2012, pada penelitian ini besi cor nodular FCD 60 yang dipanaskan pada temperatur 900°C kemudian diholding selama 120 menit, dan didinginkan di dalam *furnace* selama 24 jam, kemudian dilakukan pengujian tarik dan pengujian kekerasan. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik pada spesimen uji mengalami penurunan yaitu 169 N/mm² atau 30,78%, dan nilai kekerasan juga mengalami penurunan yaitu 4,6 HB atau 1,97%. Dan dapat

disimpulkan bahwa perlakuan panas jenis *annealing* akan mengurangi kekuatan tarik dan juga nilai kekerasan pada besi cor nodular FCD 60.

Praniko (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *austempering* pada besi cor kelabu FC 25, pada penelitian ini besi cor FC 25 dipanaskan dengan variasi temperatur *austempering* yaitu 300°C, 350°C dan 400°C dengan waktu penahanan selama 60 menit, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi temperatur *austempering* dan perubahan struktur mikro pada besi cor kelabu FC 25. Adapun hasil pengujian yang didapatkan setelah dilakukan proses *austempering* adalah terjadi peningkatan terhadap ketangguhannya. Nilai tertinggi energi impak yang diperoleh pada temperatur 300°C sebesar 4 Joule, selanjutnya pada temperatur 350°C sebesar 4,5 Joule, kemudian pada temperatur 400°C sebesar 5 Joule. Pada pengamatan struktur mikro menggunakan Optical Microscopy (OM) menunjukkan perubahan fasa dari ferit dan perlit menjadi fasa ausferit.

Fadhillah dkk (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi temperatur *heat treatment* pada *ductile cast iron* (Fcd-50), Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui peningkatan sifat mekanik *ductile cast iron* (Fcd-50) terhadap kekerasan, *impact* dan struktur mikro dengan proses *heat treatment*. Pengujian pertama yaitu spesimen tanpa perlakuan dan pengujian kedua sebagai pembanding yaitu variasi temperatur *heat treatment* yaitu 800°C, 850°C dan 900°C dengan penahanan waktu selama 30 menit dan pendinginan menggunakan oli. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh dari proses perlakuan meningkatkan kekerasan, dan memberikan perubahan ferrit, perlit serta grafit yaitu struktur perlit lebih banyak dan struktur grafit dan ferit berkurang dibanding spesimen As-cast.

Dalam merancang dan membuat kerangka dan komponen kendaraan, sifat-sifat material selalu diperlukan agar komponen kendaraan tersebut dapat berfungsi secara maksimal dan memenuhi kebutuhan fungsional kendaraan

tersebut. Sifat ketahanan terhadap kegagalan suatu material sangat penting untuk diperhatikan guna menghindari kerusakan saat pengoperasian kendaraan. Dimana pada penelitian ini digunakan jenis spesimen besi cor kelabu FC25. Berdasarkan dari pernyataan dan beberapa penelitian terdahulu mengenai pentingnya pengujian kekerasan dan ketangguhan pada material khususnya pada besi cor, maka penulis akan melakukan penelitian mengenai **“Pengaruh Variasi Temperatur Pada Proses *Annealing* Terhadap Nilai Kekerasan Dan Ketangguhan Besi Cor Kelabu FC25”**.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis nilai kekerasan besi cor kelabu FC25 melalui proses perlakuan panas *annealing* dengan tiga variasi suhu.
2. Menganalisis hasil *Impact Strength* pada besi cor kelabu FC25 melalui metode *Charpy* serta perlakuan panas dengan tiga variasi suhu.
3. Melakukan pengamatan struktur mikro setelah proses *annealing* pada besi cor kelabu FC25.

C. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bahan penelitian ini menggunakan Besi Cor Kelabu FC25.
2. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah metode *Full Annealing* dengan variasi temperatur 750°C , 850°C dan 1000°C.
3. Menggunakan variasi *holding time* 30 menit dan dilakukan pendinginan lambat selama 30 jam.
4. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian kekerasan (metode *Vickers*) dan Pengujian kekuatan Impak (metode *Charpy*).
5. Menggunakan alat uji *Optical Microscope (OM)* untuk melihat struktur mikro.

D. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini adalah

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang kegunaan besi cor pada umumnya, spesifikasi dan unsur kimia penyusun besi cor kelabu FC25, tujuan penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan yang dilakukan pada penelitian ini.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab II menjabarkan tentang landasan teori dari beberapa literatur yang mendukung pembahasan mengenai pengaruh perlakuan panas *Annealing* pada besi cor kelabu.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III ini berisi tentang metode yang dilakukan penulis dalam mengumpulkan informasi, tempat serta waktu pelaksanaan penelitian dan juga menerangkan langkah sistematis yang penulis lakukan dalam melaksanakan penelitian ini.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV menjelaskan tentang data hasil pengujian yang sudah dilakukan serta pembahasan dari hasil data yang sudah didapatkan saat proses penelitian.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab V menjabarkan kesimpulan serta saran yang diberikan oleh penulis dari hasil penelitian yang sudah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan beberapa literatur dan jurnal sebagai referensi untuk menunjang penelitian yang dilakukan penulis.

LAMPIRAN

Berisikan data seperti gambar hasil pengujian dan data yang mendukung penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Besi Cor

Besi cor adalah proses pengecoran logam yang menggunakan besi cair untuk dicetak menjadi bentuk yang diinginkan. Proses ini melibatkan peleburan besi dan menuangkannya ke dalam cetakan yang telah dibuat sebelumnya. Setelah besi cair mendingin dan mengeras, cetakan dapat dibuka, dan benda yang dicetak bisa diambil. Penggunaan besi cor sangat umum dalam industri manufaktur, seperti pembuatan bagian mesin, struktur bangunan, komponen otomotif, peralatan rumah tangga, dan banyak lagi. Besi cor biasa disebut juga besi tuang terdiri dari paduan besi yang mengandung karbon (*c*), silikon (*s*), phosphor (*p*), mangan (*Mg*), dan sulfur (*s*). Besi cor umumnya memiliki kandungan karbon sebanyak 2,0 % sampai 6,67 %, namun biasanya besi cor yang digunakan untuk komponen mesin memiliki kandungan karbon sebesar 2,5 sampai 4,0 % karena semakin tinggi kadar karbon pada besi cor akan semakin rapuh dan getas besi cor tersebut. Selain karbon besi cor juga memiliki kandungan silikon sebesar 1–3 % dan phosphor 0,05–15 %. Selain itu masih ada beberapa unsur tambahan lainnya (Setyana, 2015).

Besi tuang masuk kelompok logam tinggi (*ferrous metal*). Tetapi dengan kadar karbon yang lebih tinggi, lebih dari 2,0% yang banyak digunakan biasanya antara 2,5–4,0% karbon. Oleh karena adanya karbon tinggi di dalam besi tuang menyebabkan sifatnya sangat rapuh. Keuletan besi tuang sangat rendah oleh karena itu tidak bisa ditarik, dirol atau dikerjakan pada temperatur kamar atau tidak mampu dibentuk disembarang waktu.

Keistimewaan besi tuang ini mudah dituang walaupun besi tuang rapuh dan tegangan tariknya rendah dibanding baja. Kekuatan tarik besi cor ini antara 100 – 250 N/mm², kekerasan 140 – 270 HBN, namun besi cor ini agak getas, dan mempunyai kemampuan cor sangat baik serta murah (Putra, 2011).

Besi cor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, diantaranya besi cor kelabu, besi cor nodular, besi cor malleable dan besi cor putih. Besi cor nodular adalah salah satu jenis besi cor malleable yang bentuk grafitnya bulat, kekuatan dan keuletannya menjadi lebih baik. Besi cor pada dasarnya merupakan paduan eutektik dari besi dan karbon. Dengan demikian temperature lelehnya relative lebih rendah, sekitar 1200 celcius. Temperature leleh yang rendah sangat menguntungkan, karena mudah dicairkan, sehingga pemakaian bahan bakar atau energi lebih hemat dan murah. Selain itu dapur peleburannya dapat dibangun dengan lebih sederhana (De Jesus & Soebiyakto, 2018).

Komposisi dari besi cor dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1 komposisi besi cor (Setyana, 2015).

Elemen	Grey iron %	White iron %	Malleable iron %	Ductile iron %
Karbon	2,5 – 4,0	1,8 – 3,6	2,0 – 2,6	3,0 – 4,0
Silikon	1,0 – 3,0	0,5 – 1,9	1,1 – 1,6	1,8 – 2,8
Mangan	0,25 – 1,0	0,25 – 0,8	0,2 – 1,0	0,1 – 1,0
Sulfur	0,02 – 0,25	0,06 – 0,20	0,01 – 0,18	0,03 max
Fosfor	0,05 – 0,1	0,06 – 0,18	0,18 max	0,1 max

Besi cor memiliki beberapa pengklasifikasian berdasarkan dari struktur metalografi yang sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon dalam paduan. Kandungan karbon dalam besi cor bisa berupa sementit (Fe₃C) ataupun berupa karbon bebas (*grafit*). Sifat mekanik besi cor sangat dipengaruhi oleh bentuk, ukuran, dan distribusi *grafit*. Selain karbon unsur lainnya seperti silikon, phosphor, mangan, belerang juga mempengaruhi struktur

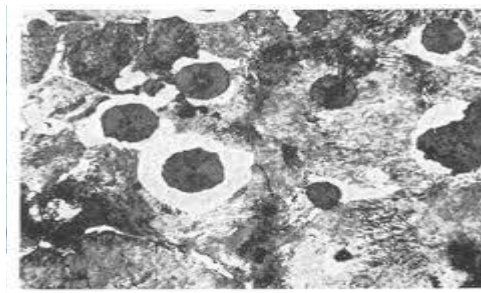
metalografi besi cor (Setyana, 2015).

Pembagian besi cor berdasarkan bentuk karbon khususnya dan struktur mikro dibagi menjadi 4 jenis besi tuang yaitu besi cor nodular (*nodular cast iron*), besi cor kelabu (*grey cast iron*), besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*), dan besi cor putih (*white cast iron*).

B. Jenis-Jenis Besi Cor

1. Besi cor nodular

Besi Cor Nodular adalah besi cor yang memiliki grafit berbentuk bulat, oleh karenanya BCN juga dikenal sebagai besi cor *spherulitik* dan Besi Bergrafit Spheroidal Besi cor ini memiliki keuletan yang tinggi sehingga sering juga disebut Besi Cor Ulet (Ductile Cast Iron). Besi cor nodular termasuk salah satu besi tuang mampu tempa yang memiliki karakteristik kuat dan ulet. Besi cor nodular memiliki kandungan karbon sebanyak 3 %, silikon sebanyak 1,8–3 %, mangan hingga 1,0 %, sulfur antara 0,005 – 0,035 % (Suhatmoko & Nukman, 2008).



Gambar 1. Struktur mikro besi cor nodular (Raharjo & Surojo, 2009).

Besi cor nodular adalah jenis besi tuang pengembangan dari besi cor kelabu dimana proses pembuatannya dengan menambahkan unsur magnesium (Mg) atau cerium (Ce) pada saat peleburan sehingga mendorong proses *grafitisasi* dan menghasilkan *grafit* yang berbentuk

bulat. *grafit* besi cor nodular mempunyai konsentrasi tegangan yang sangat kecil sehingga kekuatan tuang menjadi lebih baik (Nukman et al., 2002).

2. Besi cor kelabu

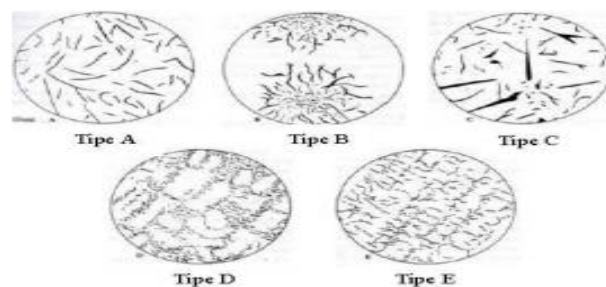
Besi cor dengan kadar silikon tinggi (2% Si) dapat membentuk grafit dengan mudah sehingga Fe_3C tidak terbentuk. Serpih grafit terbentuk dalam logam sewaktu proses pembekuan. Besi cor kelabu sangat rendah angka keuletannya, sehingga apabila kita tarik maka akan terbentuk bidang patahan karena grafit yang terbentuk sangat rapuh. Besi cor kelabu merupakan peredam getaran yang baik dan kapasitas redamnya tinggi (Darmadi, 2015).

Salah satu karakteristik yang dimiliki oleh besi cor kelabu adalah bidang patahannya yang berbentuk *flake* (serpih), patahan yang terjadi dengan rambatan yang melintasi satu serpih ke serpih lainnya. Karena sebagian besar permukaan patahan melintasi serpih-serpih (*flake*) grafit dan grafit yang terbentuk ada banyak, maka permukaannya berwarna kelabu. Pembentukan grafit pada besi cor kelabu terjadi saat proses pembekuan. Proses pembentukan grafit terjadi karena tingginya kadar karbon, unsur *grafite stabilizer* (silikon), temperatur penuangan tinggi dan pendinginan yang lambat. Grafit pada besi cor berbentuk *flake* (serpih), berupa lempeng-lempeng kecil yang melengkung. Karena ujung-ujung grafit berbentuk runcing menyebabkan ketangguhan besi cor rendah (Setyana, 2015).

Besi cor kelabu mempunyai matrik ferit, perlit, sementit, martensit, dan bainit yang mempunyai klasifikasi masing-masing. Matrik perlit dalam besi cor kelabu mempunyai kombinasi keuletan dan kekerasan yang baik, tetapi nilainya masih rendah. Sementit dan martensit mempunyai kekerasan yang tinggi, tetapi sangat getas. Diantara matrik-matrik di atas, masih ada matrik bainit yang mempunyai keuletan dan kekerasan

yang paling baik daripada keempat matrik tersebut (Setyana, 2015).

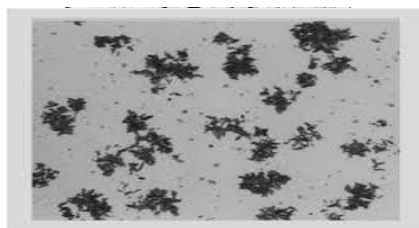
Tipe grafit besi cor kelabu dapat dikelompokkan menjadi lima tipe, yaitu tipe A, B, C, D dan E. Grafit tipe A memiliki serpih-serpih grafit yang terbagi rata dan orientasinya sebarang. Struktur tersebut timbul pada besi cor kelas tinggi dengan matriks perlit dan terdapat potongan-potongan grafit yang bengkok yang memberikan kekuatan tertinggi pada besi cor. Grafit bengkok tersebut diperoleh dengan cara meningkatkan pengendapan kristalkristal sepanjang austenit proeutektik. Besi cor dengan kandungan karbon tinggi jarang yang mempunyai potongan grafit bengkok disebabkan oleh pengendapan kristal yang sedikit sehingga perlu dilakukan penghilangan oksida dan inokulasi penggrafitan pada besi cair.



Gambar 2 Grafit pada besi cor kelabu (Setyana, 2015)

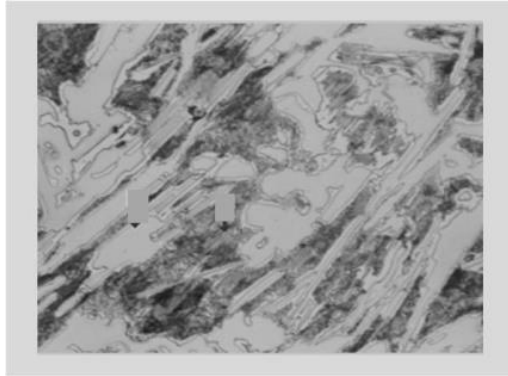
3. Besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*)

Besi tuang mampu tempa dibuat dari besi tuang putih yang dilunakan sebuah tanur dalam waktu yang lama. Proses tersebut dilakukan dengan cara pemanasan besi tuang putih pada dapur listik sampai mencapai suhu 950 °C selama 28 jam (Sofi et al., 2017).



Gambar 3 Struktur Mikro Besi Cor Mampu Tempa (Sofi et al., 2017).

4. Besi cor putih (*white cast iron*)



Gambar 4 Struktur Mikro Besi Cor Putih(Hadi S. dkk, 2019)

Besi tuang putih merupakan jenis dari besi tuang. Besi tuang ini mempunyai mikro struktur yaitu dendrit primer dari austenit yang bertransformasi menjadi perlit hitam dan dikelilingi lebih banyak sementit putih hal itu terjadi karena adanya proses pendinginan yang sangat cepat, sehingga besi tuang dibelah akan tampak berwarna putih (Putra, 2011). Mengingat bahwa sementit adalah struktur yang sangat keras dan getas maka besi tuang putih yang sebagian besar yang mengandung sementit berupa jaringan kontinyu juga keras, tahan aus tetapi sangat getas dan sangat sulit diproses permesinan.

C. Sifat Mekanik Besi Cor

Sifat mekanik dari besi cor adalah karakteristik fisik dan mekanik yang menentukan responsnya terhadap beban, tekanan, atau gaya eksternal lainnya. Berikut adalah beberapa sifat mekanik utama dari besi cor :

1. Kekuatan Tarik: Ini adalah kemampuan besi cor untuk menahan tegangan sebelum patah. Kekuatan tarik yang tinggi menunjukkan kemampuan material untuk menahan beban eksternal yang besar tanpa mengalami deformasi permanen.

2. Kekerasan: Menunjukkan seberapa tahan besi cor terhadap penetrasi atau goresan. Kekerasan yang tinggi mengindikasikan ketahanan yang baik terhadap aus, korosi, dan kerusakan mekanis.
3. Ketangguhan: Ini adalah kemampuan besi cor untuk menahan dampak atau beban yang tiba-tiba tanpa retak atau pecah. Ketangguhan yang baik penting dalam menghindari kegagalan material saat terkena tekanan yang tidak terduga.
4. Elongasi: Mengukur seberapa jauh besi cor dapat meregang sebelum mengalami patah. Elongasi yang tinggi menunjukkan sifat elastisitas yang baik pada material.
5. Ketegangan Luluh: Titik di mana besi cor mulai mengalami perubahan permanen dalam bentuknya ketika diberi beban. Melampaui titik ini akan menyebabkan material tidak bisa kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan.
6. Ketegangan Lengkung (Flexural Strength): Ini adalah kemampuan besi cor untuk menahan beban lentur tanpa mengalami patah atau kegagalan struktural.
7. Ketahanan Terhadap Kelelahan: Ini adalah sifat yang mengukur kemampuan besi cor untuk menahan beban berulang-ulang tanpa kegagalan struktural. Hal ini penting dalam aplikasi di mana besi cor terus-menerus mengalami tekanan atau getaran.

Tabel 2 *Mechanical properties* untuk besi cor (Umardani, 2008).

Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	110 - 807	110 - 807
Hardness, Knoop	162 - 906	162 - 906
Hardness, Rockwell B	40.0 - 97.0	40.0 - 97.0
Hardness, Rockwell C	11.4 - 65.0	11.4 - 65.0
Hardness, Vickers	151 - 871	151 - 871
Tensile Strength, Ultimate	90.0 - 1650 MPa	13100 - 240000 psi
Tensile Strength, Yield	65.5 - 1450 MPa	9500 - 210000 psi
Elongation at Break	0.200 - 40.0 %	0.200 - 40.0 %
Reduction of Area	2.00 - 10.0 %	2.00 - 10.0 %
Modulus of Elasticity	62.1 - 250 GPa	9000 - 36300 ksi
Flexural Yield Strength	248 - 655 MPa	36000 - 95000 psi
Compressive Yield Strength	220 - 2520 MPa	31900 - 365000 psi
Poissons Ratio	0.240 - 0.370	0.240 - 0.370
Fatigue Strength	68.9 - 510 MPa	10000 - 74000 psi
Fracture Toughness	44.0 - 110 MPa-m ^{1/2}	40.0 - 100 ksi-in ^{1/2}
Machinability	0.000 - 125 %	0.000 - 125 %
Shear Modulus	27.0 - 67.6 GPa	3920 - 9800 ksi
Shear Strength	149 - 1480 MPa	21600 - 215000 psi
Izod Impact Unnotched	4.00 - 244 J	2.95 - 180 ft-lb
Charpy Impact	0.100 - 40.0 J	0.0738 - 29.5 ft-lb
Charpy Impact, Unnotched	2.70 - 200 J	1.99 - 148 ft-lb
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.00000500 - 110 ohm-cm	0.00000500 - 110 ohm-cm
Magnetic Permeability	100 - 750	100 - 750
Thermal Properties	Metric	English
CTE, linear	7.75 - 19.3 $\mu\text{m/m}^{\circ}\text{C}$	4.31 - 10.7 $\mu\text{in/in}^{\circ}\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.506 J/g- $^{\circ}\text{C}$	0.121 BTU/lb- $^{\circ}\text{F}$
Thermal Conductivity	8.50 - 53.3 W/m-K	59.0 - 370 BTU-in/hr-ft ² - $^{\circ}\text{F}$
Melting Point	1120 - 1430 $^{\circ}\text{C}$	2050 - 2610 $^{\circ}\text{F}$
Solidus	1140 - 1270 $^{\circ}\text{C}$	2080 - 2320 $^{\circ}\text{F}$
Liquidus	1220 - 1430 $^{\circ}\text{C}$	2220 - 2610 $^{\circ}\text{F}$
Maximum Service Temperature, Air	649 - 982 $^{\circ}\text{C}$	1200 - 1800 $^{\circ}\text{F}$
Minimum Service Temperature, Air	-59.4 - -30.0 $^{\circ}\text{C}$	-75.0 - -22.0 $^{\circ}\text{F}$

D. Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah suatu metode yang digunakan untuk mengubah sifat fisik, dan kadang-kadang sifat kimia dari suatu material. Aplikasi yang paling umum adalah untuk material logam walaupun perlakuan panas juga digunakan dalam pembuatan berbagai materi lain, seperti kaca. Secara umum perlakuan panas adalah memanaskan atau mendinginkan material, biasanya dalam suhu ekstrem, untuk mencapai hasil yang diinginkan seperti pengerasan atau pelunakan material. Perlu dicatat bahwa walaupun perlakuan panas sengaja dilakukan untuk untuk tujuan mengubah sifat secara khusus, di mana pemanasan dan pendinginan dilakukan untuk tujuan

mengubah sifat, pemanasan dan pendinginan sering terjadi secara kebetulan selama proses manufaktur lain seperti pembentukan panas (Hot forming) atau Pengelasan.

Perlakuan panas bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat dari logam dengan jalan memanaskan coran sampai temperatur yang cocok, lalu dibiarkan beberapa waktu pada temperatur tersebut, kemudian didinginkan ke temperatur yang lebih rendah dengan kecepatan yang sesuai. Perlakuan panas yang dilaksanakan pada coran adalah: pelunakan temperatur rendah, pelunakan, penormalan, pengerasan dan penemperan. *Heat treatment* hanya bisa dilakukan pada logam campuran yang pada temperatur kamar mempunyai struktur mikro dua fase atau lebih. Sedang pada temperatur yang lebih tinggi fase-fase tersebut akan larut menjadi satu fase (Nurlina, 2019).

Cara yang dipakai ialah dengan memanaskan logam sehingga terbentuk satu fase, kemudian diikuti dengan pendinginan cepat. Dengan cara ini pada temperatur kamar akan terbentuk satu fase yang kelewat jenuh. Bila logam dalam keadaan tersebut dipanaskan maka fase-fase yang larut akan mengendap. Secara umum langkah pertama *heat treatment* adalah memanaskan logam atau paduan itu sampai suatu temperatur tertentu, lalu menahan beberapa saat pada temperatur tersebut, kemudian mendinginkannya dengan laju pendinginan tertentu.

Komposisi dari baja sangat mempengaruhi struktur mikro yang akan terjadi, disamping perlakuan-perlakuan yang dialami logam atau baja sebelumnya. Secara garis besar proses perlakuan panas dapat dibedakan menurut tingginya temperatur dan laju pendinginannya (Pramono, 2011).

Proses perlakuan panas dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu :

- Proses perlakuan panas yang menghasilkan struktur yang seimbang,

seperti : *anealling* , *normalizing*.

- Proses perlakuan panas yang menghasilkan struktur yang tidak seimbang seperti halnya pada *hardening*

1. *Annealling* (Pelunakan Coran).

Annealing (pelunakan) coran dilakukan dengan memanaskan sampai temperatur yang cukup tinggi kemudian didinginkan perlahan-lahan dalam tungku yang dipakai untuk melunakan. Dalam proses *annealing* baja harus dipanaskan melalui suhu pengkristalan kembali untuk membebaskan tegangan–tegangan dalam baja.

Kemudian mempertahankan pemanasannya pada suhu tinggi untuk membuat sedikit pertumbuhan butir–butiran dan suatu struktur austenit, seterusnya didinginkan secara perlahan-lahan untuk membuat suatu struktur perlit. Baja menjadi cukup lunak sehingga dapat dikerjakan dengan mesin. Baja yang dilakukan *annealing* kurang keuletanya dibandingkan dengan hasil perlakuan panas lainnya akan tetapi baja *annealing* membentuk geram yang baik sewaktu pemesinan.

2. *Normalizing*

Normalizing dilakukan untuk mendapatkan struktur mikro dengan butir yang halus dan seragam. Proses ini dapat diartikan sebagai pemanasan dan mempertahankan pemanasan pada suhu yang sesuai diatas batas perubahan diikuti dengan pendinginan secara bebas didalam udara luar supaya terjadi perubahan ukuran butiran-butiran. Hal tersebut membuat ukuran menjadi seragam dan juga untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik dari baja tersebut.

Pada proses ini baja dipanaskan untuk membentuk struktur austenite direndam dalam keadaan panas, dan seterusnya didinginkan secara bebas diudara. Pendinginan yang bebas akan menghasilkan struktur yang lebih halus daripada struktur yang dihasilkan dengan jalan *annealing*. Pengerjaan mesin juga akan menghasilkan permukaan yang lebih baik.

3. Pengerasan (*Hardening*)

Pengerasan biasanya dilakukan untuk memperoleh sifat tahan aus yang tinggi atau kekuatan yang lebih baik. Pengerasan dilakukan dengan memanaskan baja sampai ke daerah austenit lalu mendinginkannya dengan cepat, dengan pendinginan yang cepat ini terbentuk martensit yang kuat. Temperatur pemanasannya, lama waktu tahan dan laju pendinginan untuk pengerasan banyak tergantung pada komposisi kimia dari baja. Kekerasan maksimum yang dapat dicapai tergantung pada kadar karbon dalam baja. Kekerasan yang terjadi pada benda akan tergantung pada temperatur pemanasan, waktu tahan dan laju pendinginan yang dilakukan pada proses perlakuan panas, disamping juga pada *harden ability* baja yang dikeraskan (Rubijanto, 2006).

E. Variasi Temperatur

Proses perlakuan panas melibatkan pemanasan dan pendinginan logam atau bahan lainnya untuk mengubah sifat-sifatnya. Variasi temperatur merupakan salah satu faktor kunci dalam proses ini dan memiliki berbagai efek tergantung pada jenis perlakuan panas yang dilakukan.

1. Pemanasan:

Pemanasan Awal: Saat suatu bahan dipanaskan, sifatnya bisa berubah tergantung pada suhu yang diberikan. Pada suhu rendah, mungkin hanya sedikit perubahan yang terjadi pada struktur bahan. Namun, saat suhu ditingkatkan, struktur mikro dapat mulai berubah.

Pemanasan Tinggi: Pada titik tertentu, material dapat mengalami transformasi fase seperti pelelehan, pengerasan, atau rekristalisasi. Misalnya, dalam proses pengerasan baja, pemanasan pada suhu tertentu diikuti oleh pendinginan cepat (*quenching*) dapat menghasilkan struktur kristal yang lebih padat dan keras.

2. Variasi Temperatur dalam Proses Quenching (Pendinginan Cepat):

Pendinginan Cepat: Dalam beberapa metode perlakuan panas seperti quenching, bahan dipanaskan pada suhu tinggi lalu didinginkan dengan cepat. Variasi temperatur yang cepat ini dapat menciptakan perubahan struktural yang signifikan, menyebabkan pembentukan struktur kristal yang lebih padat dan keras.

Efek Pendinginan Cepat: Proses pendinginan yang cepat dapat menyebabkan tegangan internal di dalam bahan, yang dalam beberapa kasus dapat menyebabkan retak atau distorsi pada material jika tidak dikelola dengan benar.

3. Pendinginan dan Annealing (Pemanasan Ulang):

Annealing: Ini adalah proses dimana bahan didinginkan secara perlahan dari suhu tinggi untuk merestrukturisasi bahan dengan cara yang lebih terkendali. Variasi temperatur yang lambat dan terkendali memungkinkan material untuk kembali ke struktur kristal yang lebih stabil dan mengurangi tegangan yang mungkin telah terbentuk selama proses sebelumnya.

Variasi temperatur merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhitungkan dalam proses perlakuan panas karena dapat mempengaruhi sifat fisik, mekanik, dan struktural dari bahan. Pengendalian suhu dan kecepatan pendinginan sangat penting untuk mencapai sifat yang diinginkan dalam bahan setelah proses perlakuan panas.

F. Annealing

Annealing adalah proses perlakuan panas yang umumnya diterapkan pada paduan logam yang telah mengalami pengerjaan dingin. Proses annealing yaitu proses pemanasan material sampai temperature *austenite* lalu ditahan beberapa waktu kemudian pendinginannya dilakukan perlahan-lahan di dalam tungku.



Gambar 5 Annealing (id.wikipedia.org)

Kekerasan yang tinggi akan menyulitkan proses berikutnya seperti pembentukan atau *machining*. Sifat getas akan menyebabkan kegagalan proses manufaktur. Untuk mendapatkan kembali sifat lunak dan keuletan dari baja tersebut, maka dilakukan proses *annealing*.

Kerasan dan keuletan yang dapat dicapai setelah proses *annealing* sangat tergantung pada temperatur yang diterapkan. Secara umum dapat dikatakan, bahwa kekerasan akan turun dengan semakin tingginya temperatur anil, sedangkan keuletan akan semakin tinggi dengan semakin tingginya temperatur anil (Perez, 2017).

Ada beberapa tipe yang biasa diterapkan untuk mencapai sifat-sifat tertentu dalam proses *annealing* antara lain :

1. *Full Annealing*

Full annealing adalah proses perlakuan panas yang melibatkan pemanasan material logam ke suhu di atas suhu kritisnya (biasanya jauh di atas suhu rekristalisasi) dan kemudian pendinginan perlahan hingga mencapai suhu ruangan. Proses ini dilakukan untuk mengubah struktur mikrologam secara keseluruhan, meningkatkan keuletan, mengurangi kekerasan, dan menghilangkan tegangan dalam. Langkah-langkah dalam full annealing meliputi. Pemanasan,Material logam

dipanaskan secara merata ke suhu yang di atas suhu kritisnya, yaitu suhu di mana struktur mikrologam berubah. Suhu pemanasan ini bergantung pada jenis materialnya, namun biasanya berada di atas suhu kritisnya selama beberapa waktu agar memastikan bahwa seluruh bagian logam mencapai suhu yang sama. Penahanan Suhu, Setelah mencapai suhu yang diinginkan, logam dipertahankan pada suhu tersebut selama periode waktu tertentu agar proses perubahan struktural dapat berlangsung secara menyeluruh dalam material. Hal ini memungkinkan butir logam untuk tumbuh kembali dalam bentuk yang lebih seragam dan kurangi tegangan dalam. Pendinginan Perlahan, Setelah tahap penahanan suhu, logam kemudian didinginkan perlahan ke suhu ruangan. Pendinginan perlahan sangat penting untuk mencegah terbentuknya struktur yang kasar atau tegangan yang berlebihan dalam material. Proses pendinginan perlahan ini bisa dilakukan dalam tungku atau dengan cara membiarkan material didinginkan secara alami di udara terbuka.

Manfaat dari *Full Annealing* adalah sebagai berikut:

- Meningkatkan Keuletan: Proses ini mengurangi kekerasan logam dan meningkatkan keuletannya, membuatnya lebih mudah untuk dibentuk atau diolah secara mekanis.
- Mengurangi kekerasan : Struktur mikrologam yang dihasilkan dari annealing memiliki kekerasan yang lebih rendah, yang bermanfaat dalam mengurangi retakan atau pecah pada material.
- Menghilangkan tegangan dalam: Annealing membantu menghilangkan tegangan yang terjebak dalam material, yang dapat disebabkan oleh proses-proses sebelumnya seperti pengerolan atau pembentukan.

Full annealing digunakan secara luas dalam industri logam, terutama dalam manufaktur yang memerlukan logam dengan keuletan yang tinggi dan kekerasan yang rendah, seperti untuk produksi komponen

mesin atau bagian yang membutuhkan proses pembentukan yang rumit.

2. *Annealing* process

Digunakan untuk logam-logam yang telah mengalami deformasi plastis (misalnya, setelah proses pembentukan). Logam dipanaskan ke suhu yang kurang dari suhu kritisnya dan kemudian didinginkan perlahan, mengurangi tegangan dalam dan meningkatkan keuletan tanpa mengubah komposisi kimianya. Proses annealing adalah salah satu teknik perlakuan panas yang diterapkan pada logam untuk mengurangi tegangan dalam yang mungkin terakumulasi selama proses-proses pembentukan atau pemrosesan mekanis, seperti pengelasan, pembentukan, atau pengerolan. Tujuan utama dari process annealing adalah untuk mengurangi tegangan dalam dalam material tanpa mengubah struktur mikrologam secara signifikan. Ini dilakukan dengan memanaskan logam ke suhu di bawah suhu kritisnya, yaitu suhu di mana terjadi perubahan struktural dalam material.

Langkah-langkah dalam process annealing adalah sebagai berikut:

- Pemanasan

Material logam dipanaskan ke suhu yang kurang dari suhu kritisnya, namun cukup tinggi untuk memungkinkan redistribusi atom atau ion dalam material. Suhu ini dipilih agar material mencapai suhu yang cukup untuk mengurangi tegangan dalam, tetapi tidak terlalu tinggi sehingga tidak menyebabkan perubahan struktural yang signifikan.

- Penahanan Suhu

Setelah mencapai suhu yang diinginkan, material dipertahankan pada suhu tersebut selama jangka waktu tertentu agar proses pemulihan tegangan dalam dapat berlangsung. Proses ini memungkinkan material untuk mengalami perubahan

mikrostruktural yang membantu dalam mengurangi tegangan dalam.

- Pendinginan Perlahan

Setelah proses penahanan suhu selesai, material didinginkan secara perlahan ke suhu ruangan. Pendinginan perlahan ini membantu mencegah terbentuknya tegangan baru dalam material dan mengurangi risiko terbentuknya struktur yang kasar.

Keuntungan utama dari process annealing adalah pengurangan tegangan dalam, yang dapat meningkatkan kekuatan, keuletan, dan stabilitas dimensi dari material logam. Ini juga membantu mengurangi risiko terjadinya retak atau kegagalan material akibat tegangan yang terakumulasi. Process annealing sering digunakan dalam industri untuk merestorasi struktur mikrologam dan mengurangi efek tegangan dalam yang mungkin terjadi setelah proses-proses mekanis seperti pembentukan atau pengelasan, menjadikannya penting dalam menghasilkan material yang andal dan berkualitas tinggi.

3. *Stress Relieving* (Pelunakan Tegangan): Proses yang mengurangi tegangan dalam yang disebabkan oleh proses-proses mekanis seperti las atau pemrosesan lainnya. Logam dipanaskan ke suhu di bawah suhu kritisnya dan didinginkan perlahan, membantu mengurangi tegangan dalam tanpa mengubah struktur material secara signifikan.
4. *Isothermal Annealing* (*Annealing* Isotermal): Proses di mana logam dipanaskan ke suhu tertentu dan kemudian dijaga pada suhu tersebut selama periode waktu yang cukup untuk memastikan transformasi struktural yang sempurna, diikuti dengan pendinginan. Hal ini menghasilkan struktur yang homogen dan seragam dalam logam.
5. *Recrystallization Annealing* (*Annealing* Rekristalisasi): Dilakukan untuk menghilangkan deformasi dan meningkatkan keuletan logam

setelah proses deformasi mekanis. Proses ini menyebabkan rekristalisasi butir logam, mengurangi kekerasan dan meningkatkan keuletan.

6. *Bright Annealing*

Proses ini dilakukan untuk menghasilkan permukaan benda kerja yang bebas dari oksidasi. Perlindungan terhadap oksidasi selama proses perlakuan panas biasanya dilakukan dengan “menyelimuti” benda kerja dengan atmosfer tungku yang sesuai. Proses bright annealing dilakukan dengan berbagai cara yang masing-masing dapat diterapkan pada material *ferro* atau *non ferro*, baik berbentuk kawat, strip, lembaran maupun berbentuk tabung dan sebagainya (Perez, 2017).

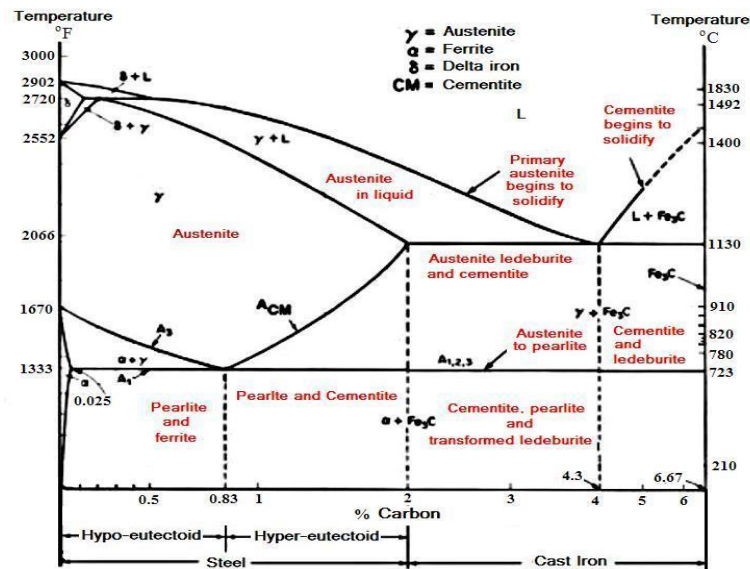
G. **Diagram Fasa Fe-Fe₃C**

Diagram Fe-Fe₃C adalah diagram yang menampilkan hubungan antara temperatur dimana terjadi perubahan fasa selama proses pendinginan lambat dan pemanasan lambat dengan kandungan karbon (% C). Diagram fasa besi dan karbida besi Fe₃C ini menjadi landasan untuk laku panas kebanyakan jenis baja yang kita kenal.

Dari diagram fasa tersebut dapat diperoleh informasi-informasi penting yaitu antara lain:

- Fasa yang terjadi pada komposisi dan temperatur yang berbeda dengan pendinginan lambat.
- Temperatur pembekuan dan daerah-daerah pembekuan paduan Fe-C bila dilakukan pendinginan lambat.
- Temperatur cair dari masing-masing paduan.
- Batas-batas kelarutan atau batas kesetimbangan dari unsur karbon fasa tertentu.
- Reaksi-reaksi metalurgis yang terjadi.

Berikut ini adalah diagram fasa Fe-Fe₃C merupakan diagram yang menjekaskan mengenai perubahan fasa :



Gambar 6 Diagram Fasa Fe-Fe₃C (Callister, 2007)

Penjelasan diagram:

- Pada kandungan karbon mencapai 6.67% terbentuk struktur mikro dinamakan Sementit Fe₃C (dapat dilihat pada garis vertikal paling kanan).
- Sifat-sifat *cementite* sangat keras dan sangat getas.
- Pada sisi kiri diagram dimana pada kandungan karbon yang sangat rendah, pada suhu kamar terbentuk struktur mikro *ferrite*.
- Pada baja dengan kadar karbon 0.83%, struktur mikro yang terbentuk adalah *pearlite*, kondisi suhu dan kadar karbon ini dinamakan titik *Eutectoid*.
- Pada baja dengan kandungan karbon rendah sampai dengan titik *eutectoid*, struktur mikro yang terbentuk adalah campuran antara *ferrite* dan *pearlite*.
- Pada baja dengan kandungan titik *eutectoid* sampai dengan 6.67%, struktur mikro yang terbentuk adalah campuran antara *pearlite* dan

cementite.

- Pada saat pendinginan dari suhu leleh baja dengan kadar karbon rendah, akan terbentuk struktur mikro *Ferrite Delta* lalu menjadi struktur mikro *Austenite*.
- Pada baja dengan kadar karbon yang lebih tinggi, suhu leleh turun dengan naiknya kadar karbon, peralihan bentuk langsung dari leleh menjadi *Austenite*.

Beberapa istilah dalam diagram fasa Fe-Fe₃C dan fasa-fasa yang terdapat didalam diagram diatas akan dijelaskan dibawah ini.

1. A1 adalah temperatur reaksi *eutectoid* yang perubahan fasa γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ *pearlite* untuk baja *hypoeutectoid*.
2. A2 adalah titik *Currie* (pada temperatur 769 °C), dimana sifat magnetik besi berubah dari *feromagnetik* menjadi *paramagnetic*.
3. A3 adalah temperatur dari fasa γ menjadi α (*ferrit*) yang ditandai pula dengan naiknya batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya temperatur.
4. Acm adalah temperatur transformasi γ menjadi Fe_3C *cementite* yang ditandai pula dengan penurunan batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya temperatur.
5. A123 adalah temperatur transformasi γ menjadi $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ *pearlite* untuk baja *hypereutectoid*.

Komposisi *eutectoid* terdapat pada 4,3 % (berat) karbon (17 % atom) dan suhu *eutectoid* adalah 1148°C. Besi cor berada di daerah *eutectoid* ini karena rata-rata mengandung 2.5 % – 4 %. Pada bagian diagram antara 700°C-900°C dan daerah karbon antara 0%-1% ini mikro struktur baja dapat diatur dan disesuaikan dengan keinginan.

Struktur-struktur yang ada pada diagram fasa Fe-Fe₃C:

- a. *Ferrite* (Besi α) adalah suatu komposisi logam yang mempunyai batas maksimum kelarutan *Carbon* 0,025 % C pada *temperature* 723°C,

struktur kristalnya BCC (*Body Center Cubic*) dan pada temperature kamar mempunyai batas kelarutan Carbon 0,008 % C.

Sifat-sifatnya adalah:

- Ketangguhan rendah
- Keuletan tinggi
- Kekerasan < 90 HRB
- Struktur paling lunak pada diagram Fe-Fe₃C
- Ketahanan korosi medium

b. Austenite (Besi γ) adalah suatu larutan padat yang mempunyai batas maksimum kelarutan Carbon 2,11 % C pada temperature 1148°C, struktur kristalnya FCC (*Face Center Cubic*).

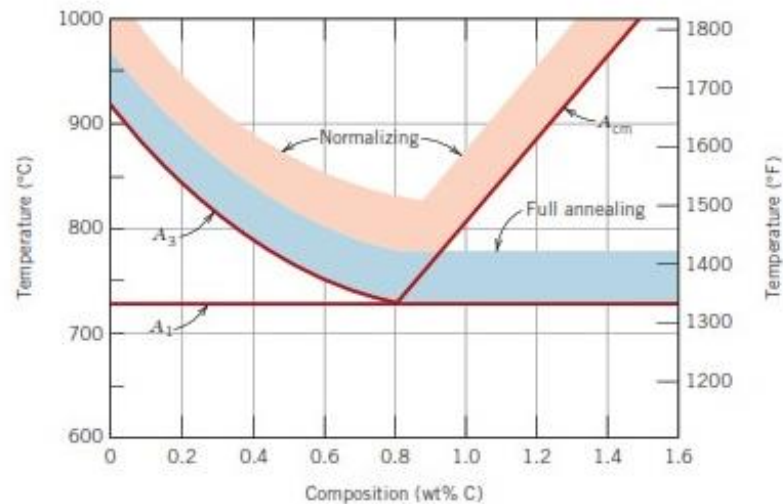
Sifat-sifatnya adalah:

- Ketangguhan baik sekali
- Ketahanan korosi yang paling baik dari SS yang lain
- Non hardened heat treatment
- Mudah dibentuk
- Paling banyak dipakai dalam industri

c. *Cementite* (Besi Karbida) adalah suatu senyawa yang terdiri dari unsur Fe dan C dengan perbandingan tertentu (mempunyai rumus empiris) dan struktur kristalnya *Orthohombic*. Sifat-sifatnya adalah sangat keras dan getas.

d. *Lediburite* ialah campuran *Eutectic* antara besi Gamma dengan *Cementite* yang dibentuk pada temperature 1130 °C dengan kandungan Carbon 4,3% C.

e. *Pearlite* adalah *Eeutectoid mixture* dari *ferrite* dan *cementit* (α +Fe₃C), terjadi pada temperatur 723 °C, mengandung 0,8 % karbon (Callister, 2007).



Gambar 7 Diagram fasa batas pemanasan *annealing* (Callister, 2007)

Diagram fasa digunakan untuk memvisualisasikan kondisi termal dan struktural suatu bahan pada berbagai kombinasi suhu dan tekanan. Diagram fasa batas pemanasan annealing adalah representasi grafis dari kondisi material saat dipanaskan untuk proses annealing. Annealing adalah proses pemanasan material ke suhu tertentu dan kemudian mendinginkannya secara perlahan untuk mengurangi kekerasan, meningkatkan keuletan, dan mengurangi tegangan internal dalam material. Diagram fasa untuk proses annealing menunjukkan perubahan struktural yang terjadi pada bahan tersebut selama dipanaskan dan didinginkan kembali. Secara umum, pada diagram fasa untuk annealing, sumbu horizontal mewakili suhu, sementara sumbu vertikal mewakili waktu atau laju pendinginan. Garis-garis atau kurva-kurva pada diagram ini menandai perubahan fase dari bahan selama proses annealing.

Pada tahap awal pemanasan, bahan dapat berada dalam berbagai fase, misalnya padatan atau cair. Ketika suhu meningkat, bahan bisa melewati transisi fase seperti leleh atau perubahan struktural lainnya. Kemudian, saat bahan didinginkan kembali, diagram fasa menunjukkan bagaimana struktur bahan berubah kembali ke fase padat dengan properti yang diinginkan setelah proses annealing. Diagram fasa batas pemanasan annealing sangat berguna bagi insinyur dan ahli material untuk memahami kondisi material

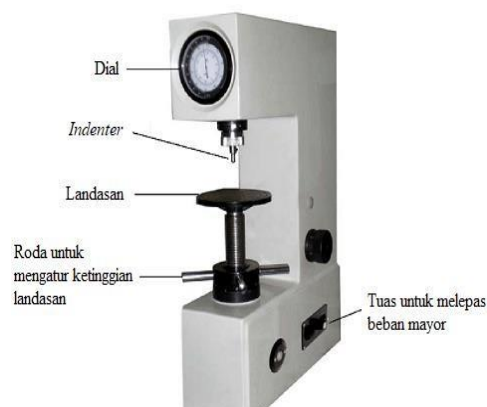
pada berbagai tahap proses annealing, membantu mereka mengoptimalkan parameter seperti suhu pemanasan, waktu, dan laju pendinginan untuk mendapatkan sifat material yang diinginkan.

H. Pengujian Kekerasan

Kekerasan (*Hardness*) adalah salah satu sifat mekanik (*Mechanical properties*) dari suatu material. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami gesekan (*frictional force*), dalam hal ini bidang keilmuan yang berperan penting mempelajarinya adalah Ilmu Bahan Teknik (*Metallurgy Engineering*).

Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi (penekanan). Kekerasan merupakan ukuran ketahanan bahan terhadap *deformasi* tekan. *Deformasi* yang terjadi dapat berupa kombinasi perilaku elastis dan plastis. Pada permukaan dari dua komponen yang saling bersinggungan dan bergerak satu terhadap lainnya akan terjadi *deformasi* elastis maupun plastis. *Deformasi* elastis kemungkinan terjadi pada permukaan yang keras, sedangkan *deformasi plastis* terjadi pada permukaan yang lebih lunak. Pengaruh deformasi bergantung pada kekerasan permukaan bahan (logam).

Uji kekerasan adalah pengujian yang paling efektif untuk menguji kekerasan dari suatu material, karena dengan pengujian ini kita dapat dengan mudah mengetahui gambaran sifat mekanis suatu material. Meskipun pengukuran hanya dilakukan pada suatu titik, atau daerah tertentu saja, nilai kekerasan cukup valid untuk menyatakan kekuatan suatu material. Dengan melakukan uji keras, material dapat dengan mudah digolongkan sebagai material ulet atau getas.



Gambar 8 Alat uji kekerasan (Andriyanto. 2014)

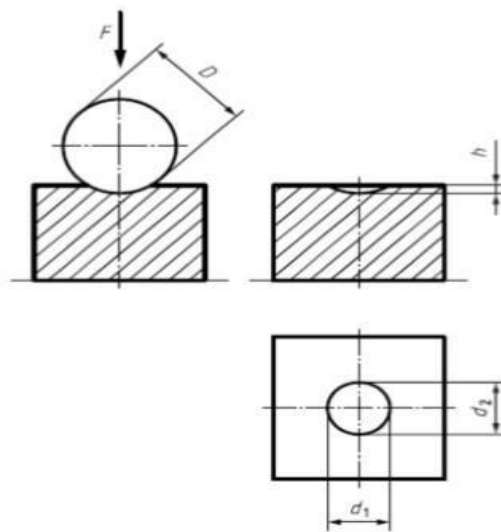
Didunia teknik, umumnya pengujian kekerasan menggunakan 3 macam metode pengujian kekerasan, yakni:

1. *Brinell* (HB / BHN)

Pengujian kekerasan dengan metode *Brinell* merupakan pengujian kekerasan dengan cara menusuk atau menekan spesimen menggunakan indenter berbentuk bola yang terbuat dari baja yang sudah dikeraskan atau karbida tungsten. Indenter bola baja digunakan untuk material yang memiliki kekerasan *Brinell* hingga 450 BHN.

Indenter bola karbida tungsten harus digunakan apabila material yang di uji memiliki kekerasan *Brinell* antara 451-650 BHN. Pengujian yang standar dilakukan dengan menggunakan diameter 10 mm bola baja atau karbida tungsten dengan beban 3000 kgf untuk logam keras, beban 1500 kgf untuk logam pertengahan, dan beban 500 kgf serta lebih rendah untuk material lunak. Indenter selain diameter 10 mm bisa digunakan, misal 5 mm, 2,5 mm dan 1 mm. Jika menggunakan diameter indenter selain 10 mm maka beban harus disesuaikan mengikuti formula $PD^2 = \text{konstan}$. Nilai konstanta tergantung dengan material yang di uji, 30 digunakan untuk baja dan paduannya, 10 digunakan untuk tembaga dan paduannya dan 5 digunakan untuk

aluminium dan paduannya.



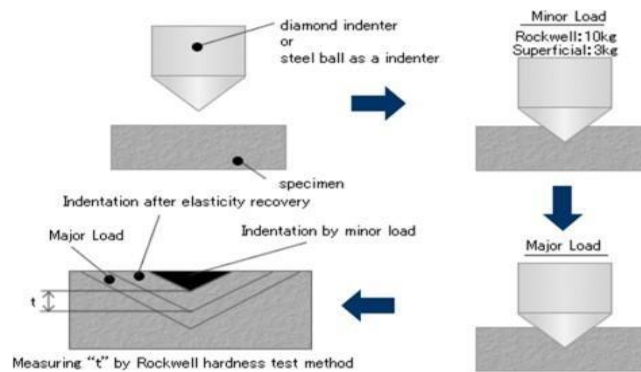
Gambar 9 Prinsip uji kekerasan brinell (Andriyanto. 2014)

2. Rockwell

Pengujian kekerasan *Rockwell* berbeda dengan *Brinell* dan *Vickers*. Pada uji kekerasan *Rockwell* tidak melakukan pengukuran tapak tekan secara manual, pengukuran langsung dilakukan oleh mesin dan langsung menunjukkan nilai kekerasan dari bahan yang diuji, nilai ini dapat dilihat pada dial indicator. Nilai kekerasan yang diperoleh berhubungan terbalik dengan kedalaman indentasi.

Indentor yang digunakan adalah bola baja yang diperkeras berukuran 1/16 in dan 1/8 in serta kerucut intan bersudut 120° dengan ujung bulat diberi nama *brale*. Pada operasi pengujian, Beban minor diterapkan sebesar 10 kgf yang menyebabkan indentasi awal dan menempatkan identer pada posisi yang akurat untuk penekanan. Dial ditempatkan pada skala tanda set nol.

Selanjutnya, pemberian beban utama (*major*) yang berbeda besarnya tergantung pada skala *rockwell* yang digunakan. *Rockwell* skala A digunakan untuk logam yang sangat keras. *Rockwell* skala B digunakan untuk menguji material dengan kekerasan medium. Skala B memiliki nilai 0 – 100. Nilai kekerasan diatas 100 memberikan hasil pengujian yang kurang valid sebab kemungkinan indenter telah menjadi rata. *Rockwell* skala C digunakan untuk menguji material dengan kekerasan tinggi yaitu diatas B100. Baja paling keras memiliki nilai C70. Skala C digunakan pada C20 ke atas.



Gambar 10 Prinsip uji kekerasan rockwell (Andriyanto. 2014)

Kelebihan pengujian kekerasan metode *Rockwell*:

- Dapat digunakan untuk bahan yang sangat keras.
- Dapat dipakai untuk batu gerinda sampai plastik.
- Cocok untuk semua material yang keras dan lunak.

Kekurangan pengujian kekerasan metode *Rockwell*:

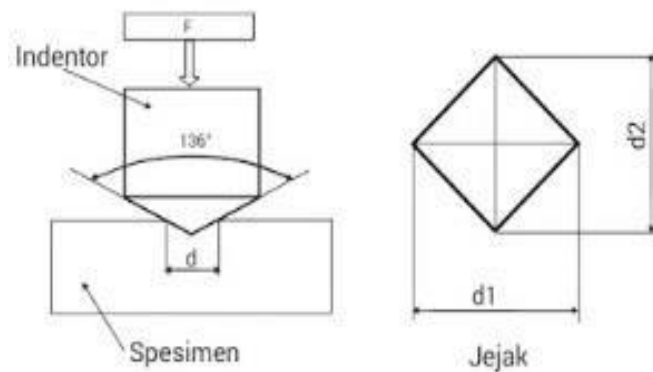
- Tingkat ketelitian rendah.
- Tidak stabil apabila terkena guncangan.
- Penekanan bebannya tidak praktis

3. *Vickers* (HV / VHN)

Metode pengujian kekerasan *Vickers* dilaksanakan dengan cara menekan

benda uji atau spesimen dengan indentor intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan 136° . Penekanan oleh indentor akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan benda uji.

Metode pengujian kekerasan *Vickers* dilaksanakan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan indentor intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan 136° . Penekanan oleh indentor akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan benda uji.



Gambar 11 Prinsip uji kekerasan Vickers (Andriyanto. 2014)

Rentang beban uji yang digunakan pada pengujian kekerasan *Vickers* berkisar antara 1 kgf sampai 120 kgf, dan beban uji yang umum digunakan adalah 5, 10, 30 dan 50 kgf. Sedangkan waktu penerapan beban uji (*dwell time*) standar biasanya dilaksanakan selama 10 -15 detik.

I. Pengujian Impak

Pengujian impak merupakan salah satu uji mekanik yang dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik bahan, seperti kemampuan bahan terhadap benturan dan karakteristik keuletan bahan terhadap perubahan suhu. Alat uji impak merupakan salah satu alat uji yang sering digunakan dalam

pengembangan bahan struktur material dalam mengukur kemampuan beban kejut. Pada pengujian impact, banyaknya energi yang diserap oleh bahan untuk terjadinya perpatahan merupakan ukuran ketahanan impact atau ketangguhan bahan tersebut. Material yang ulet akan menunjukkan harga impact yang besar, dengan menyerap energi potensial dari pendulum beban yang berayun dari suatu ketinggian yang menumbuk benda uji sehingga benda uji mengalami perubahan bentuk (Jalil et al., 2017).

J. Jenis-Jenis Metode Impact

Secara umum metode pengujian impact terdiri dari dua jenis yaitu :

1. Metode *Charpy*

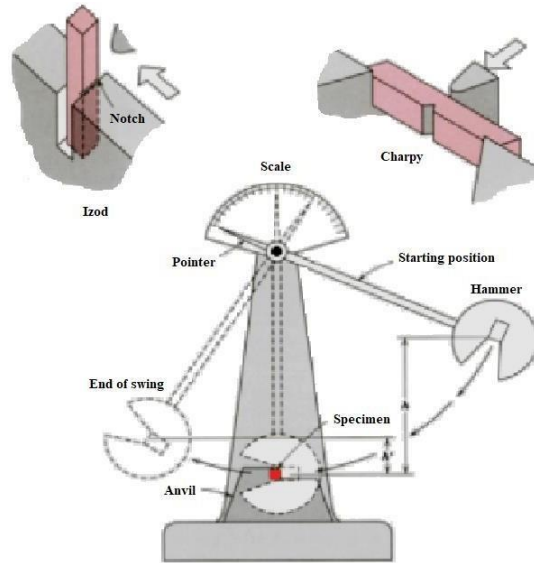
Pengujian tumbuk dengan meletakkan posisi spesimen uji pada tumpuan dengan posisi horizontal/mendatar dan arah pembebanan berlawanan dengan arah takikan. Posisi takik berada di tengah, kedalaman takik 2 mm dari permukaan benda uji dan sudut takik 45° . Metode *charpy* banyak digunakan di Amerika dan metode ini yang paling sering digunakan karena lebih teliti dan akurat.

2. Metode *Izod*

Pengujian tumbuk dengan meletakkan posisi spesimen uji pada tumpuan dengan posisi dan arah pembebanan searah dengan arah takikan.

K. Perhitungan Kekuatan Impact

Perhitungan kekuatan impact bertujuan untuk mencari energi impact dan harga impact, sebelum mencari energi impact dan harga impact harus mencari sudut β dan sudut α dengan cara melakukan pengujian, ilustrasi pengujian dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 12 ilustrasi Pengujian Impak (Callister, 2001)

Berikut adalah rumus yang digunakan pada pengujian impak :

$$E = E_1 - E_2 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan : E = Usaha yang diperlukan untuk mematahkan benda uji
(kg.m)

E_1 = Usaha yang dilakukan (kg.m)

E_2 = Sisa usaha setelah pematahabenda uji (kg.m)

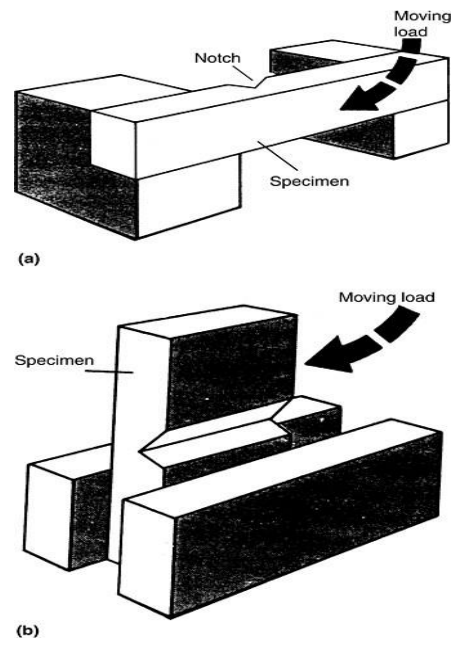
Harga impak (HI) suatu material yang diuji dengan metode *charpy* diberikan oleh :

$$HI = \frac{E}{A} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

E = Energi yang diserap (J)

A = Luas penampang di bawah takikan (mm²)



Gambar 13 Ilustrasi Metode Uji Impak Charpy (atas) dan Izod (bawah) , (ASM, 2000)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun waktu dan tempat dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Waktu dan tempat penelitian

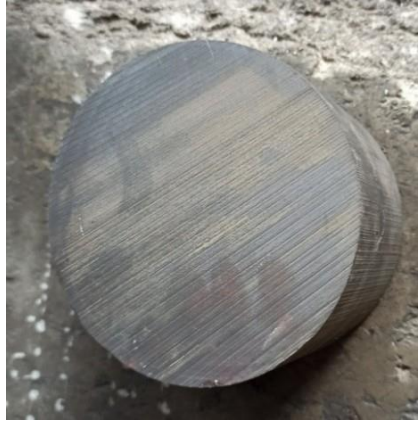
Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Desember 2023 sampai Februari 2024 di Laboratorium Material Teknik Mesin, Universitas Lampung. Bahan yang akan digunakan adalah besi cor kelabu FC25. Adapun prosedur dalam pengujian ini yaitu proses *annealing* dengan pengujian kekerasan dan impak.

B. Bahan yang Digunakan

Bahan dan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

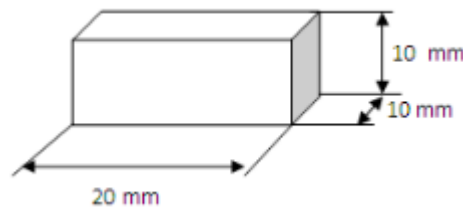
1. Besi Cor Kelabu FC25

Besi cor kelabu FC25 adalah spesimen yang akan digunakan untuk penelitian yang dilakukan.



Gambar 14 Besi Cor Kelabu FC25

2. Spesimen Uji Kekerasan

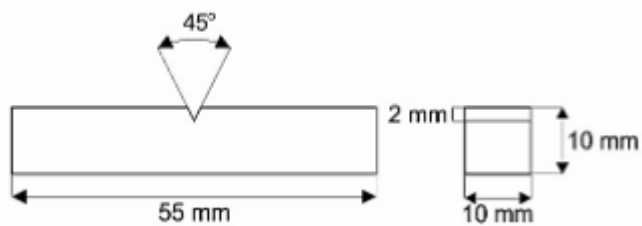


Gambar 15 Spesimen uji kekerasan

Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan disesuaikan dengan standar ASTM E92, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 15.

3. Spesimen Uji Impak

Spesimen yang digunakan untuk pengujian impact disesuaikan dengan standar ASTM E-23, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 16.



Gambar 16 Spesimen Uji Impak standar ASTM E-23

B. Alat yang digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Furnace

Furnace digunakan dalam proses perlakuan panas, dimana spesimen akan dipanaskan dengan variasi temperatur yang telah ditentukan dan kemudian didinginkan didalam furnace sampai mencapai suhu ruangan. Furnace ini terdapat di Laboratorium Grafi SMK SMTI Bandar Lampung.



Gambar 17 *Furnace*

Tabel 3. Spesifikasi Furnace

Model	Barnstead Thermolyne Thermofisher 4800 Series Muffle Furnace F48025-60-80
Power Rating	120 Volts
Hertz	50/60Hz
Amps	15 watt
Phase	1
Temperature Range	Continues : 1093°C Intermittent : 1200°C
Dimensions in Inches	Chamber : 7 (17,8) W X 5 (12,7) X 10 (25,4) D Overall : 13,25 (33,7) W X 19 (48,3) H X 19,5 (49,5) D

2. *Hardness Tester*

Alat uji Hardness Tester digunakan dalam pengujian kekerasan metode *vickers*. Alat ini terdapat di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Lampung.



Gambar 18. *Hardness Tester*

Tabel 4. Spesifikasi *Hardness Tester*

Model	Hardness Testing Equipment Via Grumello 57-24127 bergamo Italy
N	3237 CO
Modello	A100
Load	Min 3 kgf Max 187,5 kgf

3. *Profile Projektor*

Profile projector (Optical comparator/shadowgraph) digunakan untuk mengukur diagonal dari jejak indentasi spesimen uji kekerasan. Alat ini terdapat di Laboratorium Metrologi Industri Teknik Mesin Universitas Lampung



Gambar 19. Profile projector

Tabel 5. Spesifikasi Profile Projektor

<i>Model</i>	<i>PJ-3000 Series</i>	
<i>Protactor</i>	<i>Effective diameter</i>	<i>306mm(12")</i>
<i>Screen</i>	<i>Screen material</i>	<i>Fine ground glass</i>
	<i>Reference line</i>	<i>Staggered cross and crosshair</i>
	<i>Angle display (LED)</i>	<i>Resolution: 1 or 0.01 (switchable), Range: 370 Functions: Absolute/incremental mode switching, Zero Set</i>
<i>Projection Lens</i>	<i>10X</i>	
<i>Magnification accuracy</i>	<i>Contour Illumination</i>	<i>±0.1% or less</i>
	<i>Surface illumination</i>	<i>±0.15% or less</i>
<i>Surface illumination</i>	<i>Light source</i>	<i>Halogen bulb(24V, 150W)</i>
	<i>Optical system</i>	<i>Vertical illumination with a half-reflection mirror</i>
	<i>Functions</i>	<i>Adjustable condenser lens, Oblique reflection mirrors(options for 10X and 20X lenses)</i>
<i>Power Supply</i>	<i>100/110/120/220/240V AC (Switchable), 50/60Hz</i>	

4. Gerinda Potong

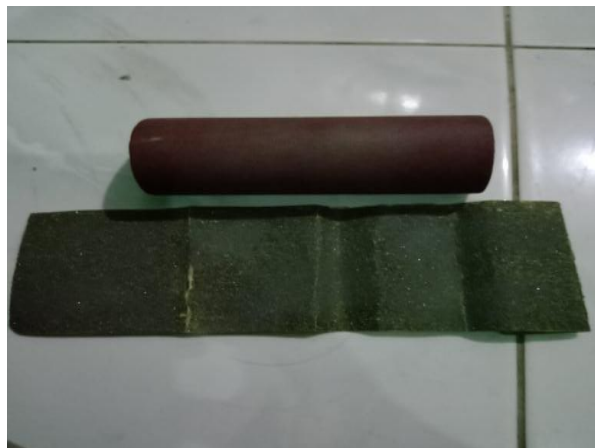
Mesin potong logam digunakan untuk membentuk dimensi yang diinginkan dari spesimen yang akan digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 20. Gerinda Potong

5. Amplas

Amplas berfungsi sebagai penghalus permukaan spesimen agar permukaan menjadi halus dan bersih. Tingkatan amplas yang digunakan adalah 80, 120, 240, 320, 500, 1000, 1500, dan 2000.



Gambar 21. Amplas

6. Autosol

Fungsi dari autosol adalah untuk mengkilapkan logam pada spesimen yang akan digunakan untuk penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 22. Autosol

7. *Impact Testing Machine*

Impact Testing Machine merupakan alat yang digunakan untuk pengujian beban kejut yang diberikan pada spesimen. Pengujian impak ini dilakukan dengan menggunakan metode *charpy* yang mana dengan membuat takikan persis ditengah spesimen.



Gambar 23. *Impact Testing machine*

Tabel 6. Spesifikasi *Impact Testing machine*

Model	RMU <i>Testing Equipment</i>
Pendulum <i>Energy</i>	300 J <i>Charpy</i> – Div. 1 J 150 J <i>Charpy</i> – Div. 0,5 J 165 J <i>Izod</i> – Div. 2,5 J
<i>Rising angel</i>	160°
<i>Distance between centers of pendulum spesimen</i>	380 mm
Pendulum momen	0.5 J PL = 0.258 Nm
	1 J PL = 0.516 Nm
	2 J PL = 1.031 Nm
	4 J PL = 2.062 Nm
	5 J PL = 2.578 Nm
<i>Dial scale</i>	0 – 0.5 J minimum <i>scale</i> = 0.005 J
	0 – 1 J minimum <i>scale</i> = 0.01 J
	0 – 2 J minimum <i>scale</i> = 0.02 J
	0 – 4 J minimum <i>scale</i> = 0.04 J
	0 – 5 J minimum <i>scale</i> = 0.05 J
<i>Corner dimension ofstriking edge</i>	30 <i>degree</i>
<i>Round angel radius ofstriking edge</i>	R = 2 mm
<i>specimen</i>	<i>Conform to ISO180</i>

8. *Optical Emmision Spectrometer*

Optical Emmision Spectrometer adalah sebuah alat untuk menentukan komposisi unsur dari berbagai logam dan paduan. Analisis OES menggunakan proses percikan, yang melibatkan penerapan muatan listrik ke sampel, menguapkan sejumlah kecil material.



Gambar 24. *Optical Emmision Spectrometer*

Tabel 7. Spesifikasi *Optical Emmision Spectrometer*

Model	Foundry-Master Smart
S/N	82B1155
Model Year	2022
Input	100-240 VAC 50-60 Hz
Power	700 VA

9. Mikroskop *Olympus BX53M*

Alat ini digunakan untuk mengamati objek yang ukurannya sangat kecil hingga mata manusia tidak dapat melihatnya. Mikroskop *Olympus* merupakan alat untuk mengamati benda secara mikroskopik



Gambar 25. Mikroskop *Olympus BX53M*

Tabel 8. Spesifikasi *Mikroskop Olympus BX53M*

Model	Mikroskop Metalurgi BX53M include Digital Camera DP23 & Software Preciv
Objective Lens	5x, 10x, 20x dan 50x
Total Pembesaran	50x, 100x, 200x, 500x, 1000 x
Kamera mikroskop	<ul style="list-style-type: none"> - Olympus DP23 - Resolusi : 6.4 - Megapiksel ukuran : 1/1.8 in - Tipe Rana : Rana Bergulir - Ukuran Piksel (um): 2.4 x 2.4 - Kecepatan Bingkai Langsung : 30 hingga 25 Kamera I/F : USB3.1 - Adaptor Kamera : C-mount - Kamera Digital DP23-CU Olympus 6.4MP - Kamera Adaptor C-Mount
Perangkat Lunak	<ul style="list-style-type: none"> - PC Windows 10/Window 11 & Office 2019 Asli (CPU HP/Dell Intel Core i3, RAM 4GB, HDD/SDD 512, DVDRW, kartu VGA 1GB - Card Reader, K/B - Mouse - Wi-Fi, Lan, - Monitor LCD 21 inci) - Fitur Perangkat Lunak Pengambilan PRECiV : Akuisisi

D. Metode Penelitian

Adapun metode penelitian terbagi menjadi beberapa tahap, yaitu tahap pertama persiapan spesimen atau benda uji, kemudian tahap perlakuan panas, selanjutnya tahap pengujian, serta tahap pengambilan data.

1. Persiapan Spesimen

a. Spesimen Pengujian Impak

Melakukan penyesuaian bentuk spesimen dari bentuk silinder ke bentuk yang telah ditentukan, yaitu panjang 55 mm, lebar 10 mm dan tinggi 10

mm, kemudian dilanjutkan dengan membuat takikan 2 mm. Penyesuaian bentuk dapat dilakukan dengan menggunakan gerinda potong.

b. Spesimen Pengujian Kekerasan

Potong bahan besi cor kelabu FC25 yang masih utuh dari pabrik menggunakan mesin grinda tangan. Spesimen besi cor kelabu FC25 hasil potongan berbentuk plat persegi panjang dengan ukuran panjang 20 mm, lebar 10 mm dan tebal/tinggi 10 mm. Haluskan bagian permukaan dengan menggunakan amplas, dan gunakan kain halus dan autosol agar specimen tampak mengkilap.

2. Perlakuan Panas

Adapun tahapan perlakuan panas yang dilakukan pada besi cor adalah sebagai berikut :

- a. Besi cor yang sudah sesuai dengan dimensi dimasukkan kedalam tungku pemanas (*furnace*) untuk dipanaskan dengan variasi temperatur pemanasan 750°C, 850°C dan 1000°C.
- b. Setelah temperatur besi cor telah mencapai temperatur austenitnya, selanjutnya dilakukan penahanan pada temperatur yang telah ditentukan, dengan waktu penahanan 30 menit.
- c. Spesimen yang sudah dipanaskan kemudian didinginkan di dalam *furnace* selama 30 jam sampai mencapai suhu ruangan.

3. Pengujian

Pengujian pada besi cor dilakukan dengan beberapa tahapan antara lain :

- a. Pengujian impak dengan menggunakan metode *Charpy* dengan universal *impact tester*. Adapun tahapan dari pengujian impak ini adalah :
 1. Melakukan kalibrasi pada alat pengujian impak untuk meminimalisir kesalahan perhitungan.
 2. Meletakkan *specimen* pada meja uji.
 3. Mengangkat pendulum pada meja uji impak.
 4. Melepaskan tuas pada mesin uji impak.

5. Melakukan pengereman setelah pendulum mencapai ketinggian maksimum.
 6. Menentukan jenis perpatahan yang terjadi.
 7. Melakukan analisis pada perpatahan.
 8. Menghitung energi impak yang terjadi.
 9. Lakukan semua langkah diatas pada semua specimen yang akan dilakukan pengujian impak
- b. Pengujian kekerasan dengan menggunakan metode *Vickers* dengan mesin *hardness tester*. Adapun tahapan pengujian kekerasan ini adalah:
1. Mengatur beban dari alat uji yaitu yang sebesar 50 kgf
 2. Memasang indentor berbentuk pyramid intan yang beralas bujur sangkar yang memiliki sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan adalah 136° .
 3. Letakkan spesimen besi cor kelabu FC25 pada meja uji dari alat. Kemudian mengatur handle alat uji hingga indentor menyentuh permukaan spesimen.
 4. Memutar *handle* hingga jarum dari skala minor menunjukkan angka 0.
 5. kemudian tarik tuas beban berlawanan arah jarum jam dan tunggu hingga 10 detik, lalu tarik Kembali tuas searah jarum jam.
 6. Menurunkan handle landasan hingga indentor tidak lagi menyentuh spesimen.
 7. Kemudian ukur diagonal hasil indentasi dengan menggunakan alat profile proyektor dan mencatatnya.
 8. Lakukan semua langkah diatas pada semua specimen yang akan dilakukan pengujian kekerasan.

4. Pengambilan data

Pengambilan data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Pengujian Kekerasan

Tabel 9. Hasil Pengujian Kekerasan

Material	Suhu <i>Annealing</i>	<i>Holding time</i>	Beban (Kgf)	Spesimen	Kekerasan (HV) Kg/mm ²	Rata-rata (HV) Kg/mm ²
Besi cor kelabu FC 25		0 menit	50	Raw material 1		
		Raw material 2				
		Raw material 3				
	750°C	30 menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		
	850°C	30 menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		
	1000°C	30menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		

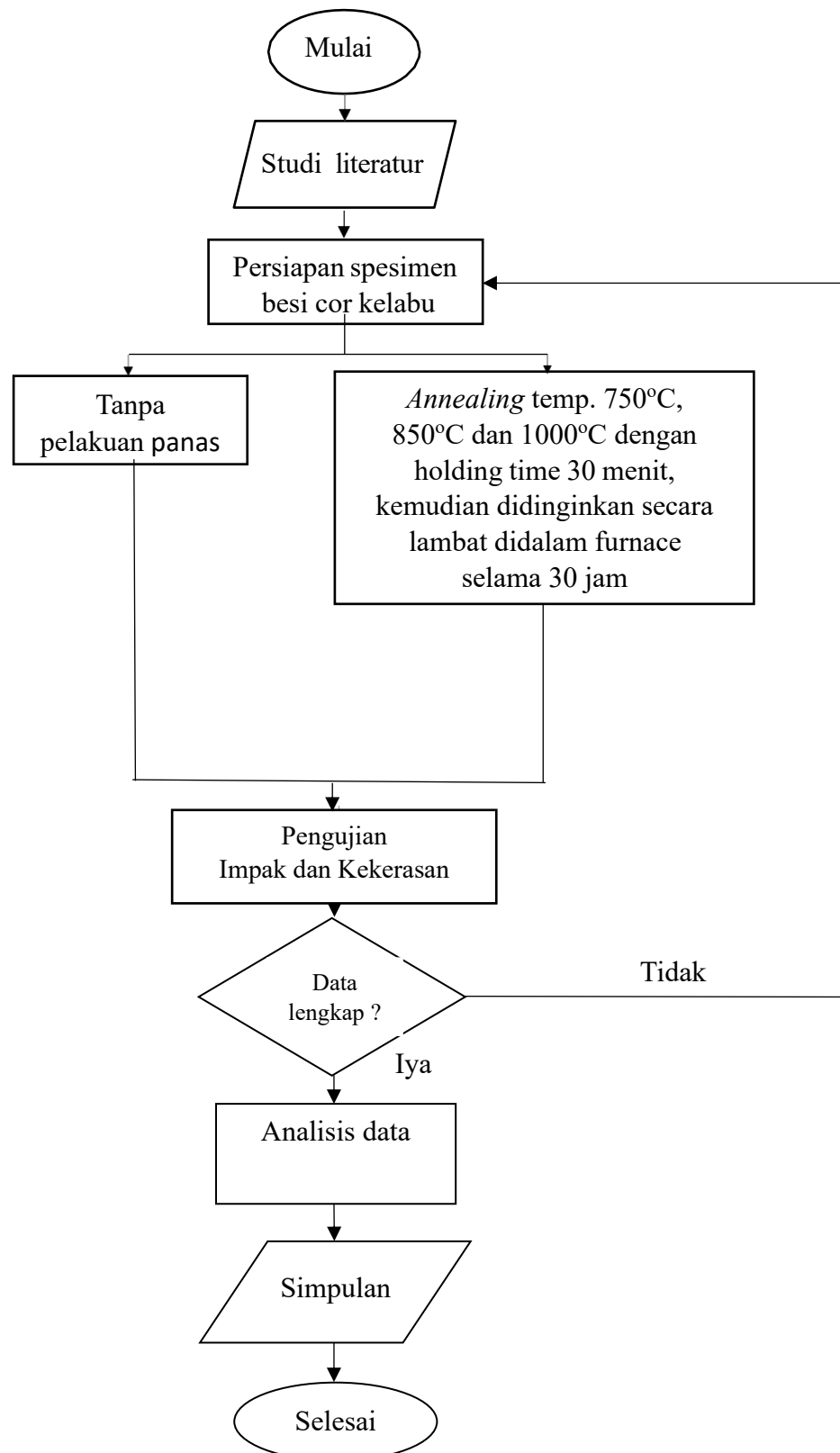
b. Pengujian impak

Tabel 10. Hasil Pengujian Impak

Material	Suhu <i>Annealing</i>	<i>Holding time</i>	Spesimen	Energy E (Joule)	Harga impak (HI)	Rata – rata J/mm ²
Besi cor kelabu FC25		0 menit	Raw Material 1			
			Raw Material 2			
			Raw Material 3			
	750°C	30 menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			
	850°C	30 menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			
	1000°C	30menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			

D. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut:



BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Adapun simpulan yang telah didapatkan setelah dilakukan penelitian pengaruh variasi temperatur *annealing* pada besi cor kelabu FC 25 terhadap kekerasan, ketangguhan bahan dan struktur mikro adalah sebagai berikut :

1. Nilai kekerasan yang dihasilkan dari ketiga variasi temperatur yang diberikan pada spesimen besi cor kelabu FC 25 mengalami penurunan. Pada temperatur 750°C presentase penurunan kekerasan yaitu 1,34% dan menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 152,662722 Kg/mm², pada temperatur 850°C presentase penurunan kekerasan yaitu 2,84% dan menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 150,3386871 Kg/mm², kemudian pada temperatur 1000°C presentase penurunan kekerasan yaitu 5,57% dan menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 146,1269614 Kg/mm². Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur pada proses perlakuan panas *annealing* sangat berpengaruh terhadap nilai kekerasasn pada besi cor kelabu FC 25. Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses *annealing* pada besi cor kelabu FC 25 maka nilai kekerasannya akan semakin menurun.
2. Nilai ketangguhan atau kekuatan impak yang dihasilkan dari ketiga variasi temperatur yang diberikan pada spesimen besi cor kelabu FC25 mengalami peningkatan. Pada temperatur 750°C presentase peningkatan katangguhan yaitu 8,67% dan menghasilkan energi impak dengan rata-rata sebesar 3,26 *Joule*. Pada temperatur 850°C presentase peningkatan ketangguhan yaitu 26,67% dan menghasilkan energi impak dengan rata-

rata sebesar 3,8 *Joule*. Kemudian pada temperatur 1000°C presentase peningkatan ketangguhan yaitu 41% dan menghasilkan energi impak dengan rata-rata sebesar 4,23 *Joule*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur pada proses *annealing* sangat berpengaruh terhadap kekuatan impak pada besi cor kelabu FC25. Semakin tinggi temperatur yang diberikan dalam proses *annealing* pada besi cor kelabu FC25 maka kekuatan impaknya akan semakin meningkat.

3. Struktur mikro yang dihasilkan dari ketiga variasi temperatur yang diberikan pada spesimen besi cor kelabu FC25 mengalami perubahan. Dimana pada awal proses *annealing* struktur mikro besi cor kelabu FC25 terdiri dari matriks perlit, sedikit ferit dan juga grafit, semakin tinggi temperatur maka struktur perlit yang getas akan bertransformasi menjadi struktur ferit yang lebih lunak dan grafit akan bertransformasi menjadi grafit yang lebih bulat atau kompak dan merata. Struktur ferit akan lebih banyak atau mendominasi dan butirannya menjadi lebih halus dan seragam karena perubahan bentuk dan ukuran grafit serta ferit ini dapat mempengaruhi distribusi tegangan di dalam material. Hal tersebut dapat mempengaruhi kekerasan serta ketangguhan dari besi cor kelabu FC25.

B. Saran

Adapun saran yang penulis berikan untuk mendukung penelitian selanjutnya yaitu :

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat dikembangkan lagi agar mendapat sifat mekanik yang diinginkan yaitu dengan melakukan pengujian tarik.
2. Untuk mendapatkan hasil struktur mikro yang lebih jelas sebaiknya melakukan uji struktur mikro *scanning electron microscopy* (SEM).

DAFTAR PUSTAKA

- Atmoko, N. T., Chamim, M., Subiyati, S., & Priyambodo, B. H. (2021). Efek Perlakuan Panas (Heat Treatment) pada Besi Cor Kelabu terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro. *Creative Research in Engineering*, 1(2), 67. <https://doi.org/10.30595/serie.v1i2.10847>
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to physical metallurgy* (Vol. 2). McGraw-hill New York.
- Behera, R. (2014). *Property Variation of Ductile Cast Iron With Respect To Annealing Treatment*.
- Callister, W. D. (2007). *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- Darmadi, W. (2015). *Pengaruh media pendinginan terhadap struktur mikro dan kekerasan pada besi cor*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- De Jesus, A. D. S., & Soebiyakto, G. (2018). Analisis Uji Tarik Dan Metalografi Sifat Mekanik Besi Tuang Kelabu (Fc-20) Dengan Proses Heat Treatment. *Proton*, 10(1).
- Diniardi, E., & yudi, I. (2012). Analisa Pengaruh Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Besi Cor Nodular (Fcd 60). *Sintek Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6(2).
- Fadhillah, A, R., Sabarudin, S., & Dede, Y, D. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur *Heat Treatment* Pada *Ductile Cast Iron* (Fcd-50) Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro. *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 17, No. 02, Agustus 2022, 203-212.
- Jalil, S. A., Zulkifli, Z., & Rahayu, T. (2017). Analisa kekuatan impak pada penyambungan pengelasan smaw material ASSAB 705 dengan variasi arus pengelasan. *Jurnal Polimesin*, 15(2), 58–63.
- Nukman, N., Arifin, B., & Sugiarto, B. (2002). Pengaruh Penambahan Unsur 0,25 % Mo Pada Besi Tuang Nodular Yang Diaustenisasi Dan Diaustemper Menjadi Austemper Ductile Iron Terhadap Sifat Mekanisnya. *Makara Journal of Technology*, 6(1).
- Nurlina, N. (2019). Pengaruh Pengujian Hardening Pada Baja Karbon Rendah Sebagai Solusi Peningkatan Kualitas Material. *Jurnal Qua Teknika*, 9(1), 11–20.
- Perez, M. (2017). Impact of annealing treatments on the softening and work hardening behaviour of Jethete M152 alloy for subsequent cold forming processes. *Materials Science and Engineering: A*, 690, 303–312.

- Pramono, A. (2011). Karakteristik Struktur Mikro Hasil Proses Hardening Baja AISI 1045 Media Quenching Untuk Aplikasi Sprocket Rantai. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 7(2), 115–124.
- PURNOMO, J. (2006). *PENGARUH TEMPERATUR ANNEALING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKROBESI TUANG KELABU FC 30*.
- Putra, T. D. (2011). PENGARUH MODIFIKASI PENDINGINAN CETAKAN TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN STRUKTURMIKRO BESI TUANG FC–15. *Widya Teknika*, 19(1).
- Raharjo, W. P., & Surojo, E. (2009). Pengaruh Temperatur dan Waktu Austempering Terhadap Kekerasan ADI Hasil Austempering FCD 55. *GEMA TEKNIK Majalah Ilmiah Teknik*, 10(2), pp-53.
- Rubijanto, -. (2006). PENGARUH PROSES PENDINGINAN PASKA PERLAKUAN PANAS TERHADAP UJI KEKERASAN (VICKERS) DAN UJI TARIK PADA BAJA TAHAN KARAT 304 PRODUKSI PENGECORAN LOGAM DI KLATEN. *TRAKSI, Vol 4, No 1 (2006): TRAKSI*. <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/jtm/article/view/608/660>
- Setyana, L. D. (2015). Studi Ukuran Grafit Besi Cor Kelabu Terhadap Laju Keausan Pada Produk Blok Rem Metalik Kereta Api. *Jurnal Material Teknologi Proses: Warta Kemajuan Bidang Material Teknik Teknologi Proses*, 1(1).
- Singhal, P., & Saxena, K. K. (2020). Effect of silicon addition on microstructure and mechanical properties of grey cast Iron: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1393–1401.
- Sofi, A., Astuti, W., & Nurjaman, F. (2017). KARAKTERISTIK STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK BESI TUANG PUTIH PADUAN KROM TINGGI HASIL THERMAL HARDENING UNTUK APLIKASI GRINDING BALL [Microstructure Characteristic and Mechanical Properties of Thermal Hardened of High Chromium White Cast Iron for Grind. *Metalurgi*, 28(3), 177–184.
- Suhatmoko, G., & Nukman, N. (2008). Analisa Perlakuan Panas Austempering pada Besi Tuang Nodular FCD 45 terhadap Kekuatan Impak dan Kekerasannya. *Jurnal Rekayasa Sriwijaya*, 16(2).
- Widodo, S., & HD, N, S. (2018). Peningkatan Sifat Mekanis Besi Cor Kelabu Melalui Proses Tempering. *Journal of Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 2, September 2018*