

**PENGARUH *HOLDING TIME* PADA PROSES *ANNEALING*
TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN KETANGGUHAN
BESI COR KELABU FC25**

(Skripsi)

Oleh :

MEILISA PUTRI UTAMI

2015021024



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

PENGARUH *HOLDING TIME* PADA PROSES *ANNEALING* TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN KETANGGUHAN BESI COR KELABU FC25

Oleh

Meilisa Putri Utami

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 lama waktu *holding time* 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 temperatur 850°C dengan variasi *holding time* 30 menit, 60 menit dan 120 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 *holding time* 30 menit, 60 menit dan 120 menit sebesar 152,662722 kg/mm², 148,797411 kg/mm², 143,470735 kg/mm². Hasil pengujian impak didapatkan energi impak sebelum dilakukan perlakuan panas adalah sebesar 3 Joule. Hasil energi impak setelah dilakukan perlakuan panas *annealing* dengan *holding time* 30 menit, 60 menit dan 120 menit sebesar 3,8 Joule, 4,06 Joule, 4,3 Joule. Pada pengamatan struktur mikro menggunakan Optical Microscopy (OM) menunjukkan perubahan fasa grafit flake menjadi grafit nodular dengan butir yang lebih besar.

Kata kunci : Beci Cor Kelabu FC25, *Annealing*, *Holding Time*, kekerasan, ketangguhan dan OM.

ABSTRACT

THE EFFECT OF HOLDING TIME IN THE ANNEALING PROCESS ON THE HARDNESS AND IMPACT STRENGTH OF FC25 GRAY CAST IRON

By

Meilisa Putri Utami

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, and machine beds. This study aimed to determine the effect of holding time during the annealing process on the mechanical properties and microstructure of FC25 Gray Cast Iron. This research used FC25 Gray Cast Iron specimens that were heat treated with annealing at a temperature of 850°C with holding time variations of 30 minutes, 60 minutes, and 120 minutes, then slowly cooled in the furnace for 30 hours. Subsequently, Vickers hardness testing and Charpy impact testing were carried out. The hardness test results showed a hardness value of 154.739849 kg/mm² before heat treatment. The hardness test results after annealing heat treatment with holding times of 30 minutes, 60 minutes, and 120 minutes were 152.662722 kg/mm², 148.797411 kg/mm², and 143.470735 kg/mm², respectively. The impact test results showed an impact energy of 3 Joules before heat treatment. The impact energy results after annealing heat treatment with holding times of 30 minutes, 60 minutes, and 120 minutes were 3.8 Joules, 4.06 Joules, and 4.3 Joules, respectively. Optical Microscopy (OM) observation of the microstructure showed a transformation of the graphite flake phase to a nodular graphite phase with larger grains.

Keywords: FC25 Gray Cast Iron, Annealing, Holding Time, hardness, toughness, and OM.

**PENGARUH *HOLDING TIME* PADA PROSES *ANNEALING*
TERHADAP NILAI KEKERASAN DAN KETANGGUHAN
BESI COR KELABU FC25**

Oleh :

MEILISA PUTRI UTAMI

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 *HOLDING TIME* PADA
PROSES ANNEALING TERHADAP NILAI
KEKERASAN DAN KETANGGUHAN
BESI COR KELABU FC25**

Nama Mahasiswa : ***Melissa Putri Utami***

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021024

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



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

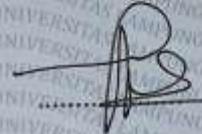
Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Dr. Ir. Martinus, S.T., MSc.
NIP. 19790821 200312 1 003

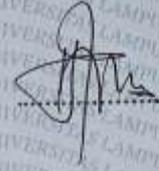
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

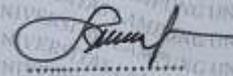
Ketua Penguji : **Zulhanif, S.T., M.T**



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



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: 21 Mei 2024



PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Meilisa Putri Utami
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021024
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, 8 Juni 2024

Yang menyatakan,

Meilisa Putri Utami

NPM. 2015021024

RIWAYAT HIDUP



Penulis memiliki nama lengkap Meilisa Putri Utami dilahirkan di Gunung Dempo kota Pagaram pada tanggal 10 Mei 2002. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Pengki Delvian dan Ibu Reza Widiarti. Penulis mengawali Pendidikan formal di TK Tunas Karya PTPN VII Unit Pagaram pada tahun (2007-2008), SD Negeri 31 Pagaram (2008- 2014), SMP Negeri 6 Pagaram (2014-2017). SMA Negeri 1 Pagaram (2017-2020). Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi Asisten Mata Kuliah, Asisten Laboratorium dan mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai sekretaris bidang Organisasi dan Kepemimpinan periode 2021/2022, dan Bendahara Umum periode 2022/2023. Penulis menjalankan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Tanjung Jati, Kec. Lemong, Kab. Pesisir Barat pada awal Januari – Februari 2023. Penulis melaksanakan Kerja Praktik di PTPN VII Unit Pagaram, Kota Pagaram, Sumatera Selatan pada Juli-Agustus 2023, dengan topik Analisis Performansi Mesin *Fluidized Bed Dryer* (FBD) Terhadap Pengeringan Teh Hitam Ortodoks Di PTPN VII Unit Pagaram. Pada skripsi ini penulis melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul “Pengaruh *Holding Time* 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

“Dan bersabarlah kamu, sesungguhnya janji Allah adalah benar”

(Qs. Ar-Ruum:60)

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”

(Qs. Al-Baqarah, 2:286)

“Selalu ada harga dalam sebuah proses. Nikmati saja lelah-lelahmu itu. Lebarakan lagi rasa sabar itu. Semua yang kau investasikan untuk menjadi dirimu serupa yang kau impikan, mungkin tidak akan selalu lancar. Tapi, gelombang-gelombang itu yang nanti bisa kau ceritakan”

(Boy Candra)

“Direndahkan dimata manusia, ditinggikan dimata Tuhan, Prove Them Wrong”

“Gonna fight and don't stop, until you're proud”

PERSEMBAHAN



Atas Ridho Allah SWT dan dengan segala kerendahan hati

Saya persembahkan skripsi ini kepada kedua orang tua saya yaitu Bapak Pengki Delvian dan Ibu Reza Widiarti, yang sangat saya sayangi dan cintai atas segala keikhlasan disetiap pengorbanan, dukungan dan doa untuk anak mu ini sehingga mendapatkan gelar sarjana.

Adik saya Tegar Dwi Putra yang selalu memberikan semangat, dukungan dan doa yang tiada henti-hentinya kepada tuhan dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Untuk yang terkasih adik saya Alm. Zhevi Zhia Zhiani Binti Feriansyah yang selalu menjadi penyemangat dan motivator bagi saya, Keluarga besar Kakek Erlan dan Nenek Surianah 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 ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang ber-judul “Pengaruh Holding Time Pada Proses Annealing Terhadap Nilai Kekerasan dan Ketangguhan Besi Cor Kelabu FC25” dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di 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. Harmen, S.T., MT 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. Kedua orang tersayang Bapak dan Ibu (Pengki Delvian & Reza Widiarti) selalu memberikan nasehat, motivasi serta selalu mendukung penulis dari awal hingga akhir masa perkuliahan. Semoga beliau selalu bangga kepada penulis.
8. Adik penulis Tegar Dwi Putra, Zaid zhaka-zhakariyah yang telah mensupport selama perkuliahan.
9. Kepada seseorang yang pernah membersamai penulis, terimakasih atas patah hati yang diberikan yang selalu menjadi bayang-bayang selama proses perkuliahan, karena dengan patah hati penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar yang sekarang bisa menjadi pengingat untuk penulis sehingga dapat membuktikan bahwa anda akan tetap menjadi alasan penulis untuk terus berproses menjadi pribadi yang lebih baik. Walau tak dapat dipungkiri terkadang rasa sedih serap kali datang dan menjadi kendala tersendiri. Terimakasih telah mengisi cerita di perjalanan penulis menuju cita-cita dan menjadi bagian menyenangkan serta menyakitkan dari proses pendewasaan penulis.
10. Para staf admin Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu bersedia membantu penyelesaian segala berkas yang diperlukan.
11. Geng No Geber No Mesin yang terdiri dari Frizilla Safana, dan Tri Kusuma Wardani geng sahabat seperjuangan yang telah siap sedia menjadi teman penulis sejak maba, yang selalu siap menghibur dan membantu penulis dalam proses perkuliahan sampai penyelesaian Tugas Akhir ini.

12. Material Pride yang siap sedia membantu segala urusan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
13. Teman-teman seperjuangan Teknik Mesin Universitas Lampung Angkatan 2020.

DAFTAR ISI

BAB I	1
PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian.....	4
C. Batasan Masalah.....	4
D. Sistematika Penulisan	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Besi Cor.....	7
B. Jenis-Jenis Besi Cor	9
1. Besi cor nodular	9
2. Besi cor kelabu.....	9
C. Sifat Mekanik Besi Cor.....	11
D. Perlakuan Panas	12
1. <i>Annealling</i> (Pelunakan Coran).....	14
2. <i>Normalizing</i>	14
3. Pengerasan (<i>Hardening</i>).....	14
E. <i> Holding Time</i>	15
F. <i>Annealing</i>	16
1. <i>Annealing</i>	16
2. <i>Spheroidized Annealing</i>	18
3. <i>Isothermal Annealing</i>	18
4. Proses Homogenisasi.....	19
5. <i>Intermediate Annealing</i>	19
6. <i>Bright Annealing</i>	19
G. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	20
H. Pengujian Kekerasan.....	23
I. Pengujian Impak.....	28
J. Jenis-Jenis Metode Impak	28

K. Perhitungan Kekuatan Impak	29
L. Struktur Mikro.....	30
BAB III.....	35
METODOLOGI PENELITIAN	35
A. Waktu dan Tempat Penelitian	35
B. Bahan yang Digunakan.....	35
C. Metode Penelitian	44
D. Diagram Alir.....	48
BAB IV	52
HASIL DAN PEMBAHASAN	49
A. Hasil dan Pembahasan Uji Komposisi Kimia	49
B. Hasil dan Pembahasan Uji Kekerasan	50
C. Hasil pengujian impak	52
D. Hasil dan Pembahasan Struktur Mikro	56
BAB V	63
SIMPULAN DAN SARAN	63
A. Simpulan.....	62
B. Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR TABEL

Tabel 1 komposisi besi cor	8
Tabel 2. Tabel <i>Mechanical properties</i> besi cor	12
Tabel 3. Spesifikasi <i>Furnace</i>	37
Tabel 4. Spesifikasi <i>Hardness Tester</i>	38
Tabel 5. Spesifikasi <i>Profile Projector</i>	39
Tabel 6. Spesifikasi <i>Impact Testing Machine</i>	41
Tabel 7. Spesifikasi <i>Optical Emmision Spectrometer (OES)</i>	42
Tabel 8. Spesifikasi mikroskop Olympus BX53M	43
Tabel 9. Hasil Pengujian Kekerasan	46
Tabel 10. Hasil Pengujian Impak	47
Tabel 11. pengujian komposisi Besi Cor Kelabu FC25	49
Tabel 12. Hasil Pengujian kekerasan variasi <i>holding time annealing</i>	51
Tabel 13. Hasil Patahan Uji Impak	53
Tabel 14. Hasil pengujian impak variasi <i>holding time annealing</i>	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Annealing</i>	16
Gambar 2. Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	21
Gambar 3. Alat uji kekerasan	24
Gambar 4. Prinsip uji kekerasan <i>brinell</i>	25
Gambar 5. Prinsip uji kekerasan <i>rockwell</i>	26
Gambar 6. Prinsip uji kekerasan <i>Vickers</i>	27
Gambar 7. Ilustrasi Pengujian Impak.....	28
Gambar 8. Metode Uji Impak	29
Gambar 9. Struktur mikro besi cor kelabu.....	31
Gambar 10. Ferit dan perlit.....	32
Gambar 11. Martensit	32
Gambar 12. Struktur bainit	33
Gambar 13 Besi Cor Kelabu FC25	36
Gambar 14 Spesimen uji kekerasan	36
Gambar 15. Spesimen Uji Impak standar ASTM E-23.....	36
Gambar 16. <i>Furnace</i>	37
Gambar 17. <i>Hardness Tester</i>	38
Gambar 18. <i>Profile projector</i>	38
Gambar 19. Gerinda Potong	39
Gambar 20. Amplas	40
Gambar 21. Autosol	40
Gambar 22. <i>Impact Testing Machine</i>	41
Gambar 23. <i>Optical Emmision Spectrometer (OES)</i>	42
Gambar 24. Mikroskop olympus BX53M	43
Gambar 25. Diagram Alir Penelitian.....	48
Gambar 26. Grafik pengaruh variasi <i>holding</i> terhadap kekerasan besi cor	51
Gambar 27. Grafik pengaruh variasi <i>holding time</i> terhadap ketangguhan besi cor	55
Gambar 28. Hasil uji <i>microstruktur</i> material besi cor kelabu FC25 (Perbesaran 200x) ...	56
Gambar 29. Hasil uji <i>microstruktur</i> material besi cor kelabu FC25 (Perbesaran 1000x) .	56
Gambar 30. Struktur mikro <i>Raw Material</i> Besi cor kelabu FC25 perbesaran 200x	57
Gambar 31. Struktur mikro Raw Material Besi cor kelabu FC25 perbesaran 1000x	57
Gambar 32. Struktur Mikro Besi Cor Kelabu FC25 30 Menit T 850°C perbesaran 200x 58	
Gambar 33. Struktur Mikro Besi Cor Kelabu FC25 30 Menit T 850°C perbesaran 1000x	58
Gambar 34. Struktur Mikro Besi Cor Kelabu FC25 holding time 120 menit Perbesaran 200x	59
Gambar 35. Struktur Mikro Besi Cor Kelabu FC25 120 Menit T 850°C Perbesaran 200x	60

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini membawa dampak yang begitu besar bagi perkembangan teknologi. Seiring dengan kemajuan dunia, terutama industri di bidang otomotif dan permesinan. Berbagai kebutuhan terhadap material yang beraneka ragam menuntut manusia untuk terus berinovasi, sehingga material logam yang paling banyak digunakan di dunia industri adalah baja, karena baja memiliki berbagai keunggulan yaitu kekuatan yang tinggi, kemampukerasan yang baik, dan relatif ulet.

Pada perkembangannya penggunaan material baja diimbangi dengan semakin banyaknya penggunaan material besi cor. 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. Pada umumnya besi cor merupakan material yang mengandung karbon (C), silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P), dan belerang (S). Besi cor sering digunakan pada elemen mesin seperti sambungan perpipaan, poros, engkol, roda gigi, landasan mesin. Besi cor memiliki kemampuan yang tinggi untuk meredam getaran, sehingga seringkali dipakai sebagai bahan dasar kerangka atau penopang mesin (Purnomo, 2006)

Dalam penggunaannya, besi cor sebagai bahan pembuat kerangka kendaraan yang berfungsi memberikan struktur dan kekuatan yang diperlukan untuk mendukung dan menjaga komponen-komponen mesin agar dapat beroperasi

dengan efisien dan aman, kerangka akan mengalami beban dinamis yang bervariasi dan juga mengalami perubahan beban secara terus menerus, oleh karena itu kerangka kendaraan sering mengalami kegagalan dalam operasinya. Kegagalan akibat perubahan beban berulang sangatlah umum terjadi karena pada prinsipnya setiap komponen pastilah memiliki batas usia pakai, akan tetapi sedapat mungkin kegagalan tersebut dihindari, sehingga mesin dapat bekerja secara optimal sesuai dengan keperluan.

Untuk itu dibutuhkan suatu metode rekayasa sifat-sifat fisik dan mekanik dari suatu material dengan menggunakan proses *heat treatment*. *Heat treatment* adalah proses pemanasan dan pendinginan logam yang terkontrol dengan tujuan untuk mengubah sifat-sifat fisik dari logam. Dengan melakukan proses perlakuan panas dengan tepat akan menghasilkan tegangan dalam yang dapat dihilangkan, besar butir dapat diperbesar dan diperkecil, ketangguhan dapat ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet. 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. Temperatur yang dibutuhkan untuk *annealing* bergantung pada jenis *annealing* dan kandungan elemen campuran dalam baja (Avner, 1974).

Proses perlakuan panas jenis *annealing* pernah dilakukan oleh Behera pada tahun 2014 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.

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Atmoko dkk pada tahun 2021 yaitu melakukan proses perlakuan panas jenis *annealing* pada besi cor kelabu jenis ASTM A48 yang dipanaskan pada temperatur 850°C kemudian di *holding* 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.

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 di *holding* 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.

Dalam merancang atau 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. Perlakuan panas *annealing* dapat membantu mengurangi kegetasan, meningkatkan kekuatan terhadap beban dinamis serta meningkatkan ketahanan aus pada besi cor. 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 *Holding Time* 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 pengaruh waktu *holding time* pada proses *annealing* terhadap nilai kekerasan besi cor kelabu FC25.
2. Menganalisis pengaruh waktu *holding time* pada proses *annealing* terhadap nilai ketangguhan (*impact strength*) besi cor kelabu FC25.
3. Melakukan pengamatan struktur mikro pada material besi cor kelabu FC25 setelah diberi perlakuan panas *annealing* dengan menggunakan variasi waktu *holding time*.

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 *Annealing* dengan temperatur 850°C.
3. Menggunakan variasi *holding time* 30 menit, 60 menit dan 120 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 biasa disebut juga besi tuang terdiri dari paduan besi yang mengandung karbon (C), silikon (Si), 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 termasuk dalam kelompok baja karbon 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 di sembarang 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 pada dasarnya merupakan paduan eutektik dari besi dan karbon. Dengan demikian temperatur lelehnya relatif lebih rendah, sekitar 1200 celcius. Temperatur 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 (Fe_3C) 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 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).

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 *ferit* dalam besicor kelabu sangat ulet, tetapi kekerasannya sangat rendah. 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).

Kandungan besi cor kelabu memiliki C antara 2,5%–4% dan unsur Mn sekitar 0,8%. Besi cor kelabu memiliki unsur Si yang tinggi antara 1%–3%, dengan Si sebesar ini grafit akan terbentuk dengan mudah, sehingga fasa karbida Fe_3C tidak terbentuk. *Grafit* serpih besi cor ini terjadi pada saat proses pembekuan. Besi cor kelabu banyak digunakan pada pembuatan bagian–bagian kendaraan yaitu kerangka kendaraan, blok silinder, tutup silinder, rumah engkol, slubung silinder, roda daya, tromol rem, mesin hydrolis (pompa, turbin), bagian–bagian mesin (roda gigi, kopleng, gear transmisi).

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).

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

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 besi cor mencakup berbagai parameter yang menggambarkan responsnya terhadap beban mekanis. Berikut adalah beberapa sifat mekanik utama dari besi cor :

1. Besi cor umumnya memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan baja, tetapi kekuatan tarik ini dapat bertambah cukup tinggi tergantung dengan jenis dan perlakuan panasnya.
2. Besi cor memiliki tingkat kekerasan yang bervariasi tergantung pada komposisi kimianya dan perlakuan panas yang diterapkan.
3. Besi cor cenderung memiliki ketangguhan yang lebih rendah (getas) dibandingkan dengan baja, sehingga dapat menjadi rapuh dalam beberapa kondisi.
4. Besi cor memiliki keuletan yang lebih rendah dibandingkan dengan baja

Tabel *Mechanical properties* untuk besi cor dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Tabel *Mechanical properties* besi cor (Matweb)

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 - 67.0 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		
Electrical Resistivity	0.00000500 - 110 ohm-cm	0.00000500 - 110 ohm-cm
Magnetic Permeability	100 - 750	100 - 750
Thermal Properties		
CTE, linear	7.75 - 19.3 µm/m-°C	4.31 - 10.7 µm/in-°F
Specific Heat Capacity	0.506 J/g-°C	0.121 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	8.50 - 53.3 W/m-K	59.0 - 370 BTU-in/hr-ft ² -°F
Melting Point	1120 - 1430 °C	2050 - 2610 °F
Solidus	1140 - 1270 °C	2080 - 2320 °F
Liquidus	1220 - 1430 °C	2220 - 2610 °F
Maximum Service Temperature, Air	649 - 982 °C	1200 - 1800 °F
Minimum Service Temperature, Air	-59.4 - -30.0 °C	-75.0 - -22.0 °F

D. Perlakuan Panas

Heat Treatment (perlakuan panas) adalah proses yang memiliki tujuan mengubah struktur logam dengan cara memanaskan spesimen uji hingga mencapai suhu tertentu pada dapur *furnace* (tanur). Pemanasan ini dilakukan pada temperatur rekristalisasi yang dimiliki oleh masing-masing logam. Selanjutnya, spesimen uji didinginkan pada media pendingin seperti udara, air, air garam, oli dan solar dimana setiap media pendingin tersebut memiliki tingkat kerapatan pendinginan yang berbeda-beda. Sifat-sifat logam terutama sifat mekanik selain dipengaruhi oleh komposisi penyusunnya juga sangat dipengaruhi oleh struktur mikrologam. Suatu logam atau paduan akan mempunyai sifat mekanis yang berbeda-beda apabila struktur mikronya dirubah. Pemberian perlakuan panas atau pendinginan dengan kecepatan yang tidak sama tersebut mengakibatkan logam dan paduan merubah

strukturnya. Perubahan struktur logam dapat dilakukan dengan perlakuan panas. Pencapaian sifat material logam yang sesuai kebutuhan manusia tersebut dapat dilakukan dengan mengatur kecepatan proses pendinginan dan batas temperatur yang digunakan selama pengujian.

Perlakuan panas adalah proses 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. *Annealing* (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 di dalam udara luar supaya terjadi perubahan ukuran butir-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. Holding Time

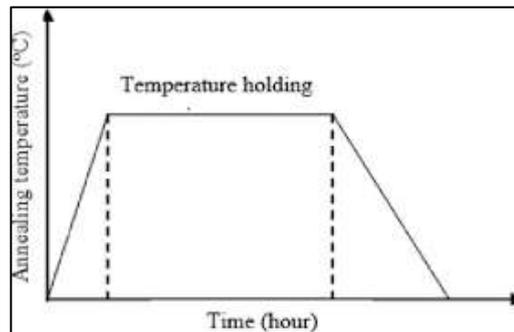
Holding time atau waktu tahan dilakukan untuk mendapatkan kekerasan maksimum dari suatu bahan pada proses *quenching* dengan menahan pada temperatur pengerasan untuk memperoleh pemanasan yang homogen sehingga struktur austenitnya homogen. Pada proses *pack carburizing holding time* sangat diperlukan untuk menghasilkan kelarutan karbon pada besi cor, semakin lama *holding timenya* maka semakin banyak karbon yang terdifusi dengan besi (De Jesus & Soebiyakto, 2018).

Pada saat tercapainya temperatur kritis atas, struktur sudah hampir seluruhnya austenit. Tetapi pada saat itu austenit masih berbutir halus dan kadar karbon serta unsur paduannya belum homogen dan biasanya masih ada karbida yang belum larut. Untuk itu logam perlu ditahan pada temperatur austenit beberapa saat untuk memberi kesempatan larutnya karbida dan lebih homogenya austenit. Dan lamanya waktu penahan ini tergantung pada

1. Tingkat kelarutan karbida.
2. Ukuran butir yang diinginkan.
3. Laju pemanasan.
4. ketebalan spesimen atau ukuran penampang (Singhal & Saxena, 2020).

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 1. *Annealing* (id.wikipedia.org)

Salah satu sifat yang berubah selama proses pengerjaan dingin adalah kekerasan. Kekerasan logam baja menjadi tinggi diikuti sifat getas yang juga menjadi tinggi. 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*.

Kekerasan 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).

Proses Anil terdiri dari beberapa tipe yang diterapkan untuk mencapai sifat-sifat tertentu sebagai berikut:

1. *Full Annealing*

Full annealing (FA) terdiri dari austenisasi dari baja yang diikuti dengan

pendinginan yang lambat di dalam tungku, kemudian temperatur yang dipilih untuk austenisasi tergantung pada kandungan karbon dari baja tersebut. *Full annealing* untuk baja hypoeutektoid dilakukan pada temperatur austenisasi sekitar 50°C diatas garis A3 dan mendiampkannya pada tempertur tersebut untuk jangka waktu tertentu, kemudian diikuti dengan pendinginan yang lambat diatas tungku. Pada temperatur austenisasi, pembentukan austenit akan merubah struktur yang ada sebelum dilakukan pemanasan, dan *austenite* yang terbentuk relatif halus. Pendinginan yang lambat di dalam tungku akan menyebabkan *austenite* mengurai menjadi *pearlite dan ferrite*. Pemanasan yang terlalu tinggi diatas A3 akan menyebabkan *austenite* tumbuh sehingga dapat merugikan sifat baja yang diproses.

Menganil/*annealing* baja *hypereutektoid* dilakukan dengan cara memanaskan baja tersebut diatas A1 untuk membulatkan *cementite proeutektoid*. Jika baja *hypereutektoid* dipanaskan pada temperatur Acm dan didinginkan perlahan-lahan, maka pada batas butir akan terbentuk *cementite preeutektoid* sehingga akan terjadi rangkaian sementit pada batas butir *austenite*. Pendinginan yang diperlambat akan menyebabkan presipitasi *ferrite* sebagai kelompok yang terpisah. Pembentukan daerah pemisah *ferrite* pada baja yang tidak dikehendaki karena akan menimbulkan daerah yang lunak (*soft spot*) selama proses pengerasan berlangsung. *Full annealing* juga diterapkan pada baja karbon dan baja paduan hasil proses pengecoran serta baja *hot work*. Untuk produk cor yang besar, terutama yang terbuat dari baja paduan, *Full annealing* akan memperbaiki mampu mesin dan juga menaikkan kekuatan akibat butir-butirnya menjadi halus.

Tujuan proses *full annealing*:

- Mengurangi tegangan internal yang terjadi akibat proses pembekuan, pemotongan, penempaan, pengerolan atau pengelasan.

- Meningkatkan keuletan dan ketangguhan.
- Meningkatkan mampu mesin.
- Mengurangi ketidak homogenan komposisi kimia.
- Menghaluskan ukuran butir.

2. *Spheroidized Annealing*

Spheroidized annealing (SA) dilakukan dengan cara memanaskan baja sedikit diatas atau dibawah titik A1, kemudian didiamkan pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu kemudian diikuti dengan pendinginan yang lambat. Proses ini ditujukan agar karbida-karbida yang berbentuk lamelar pada *pearlite* dan *cementite* sekunder menjadi bulat. Disamping itu, perlakuan ini ditunjukkan mendeformasikan struktur seperti *martensite*, trostit, dan sorbit dan lainnya, yang merupakan hasil akhir dari proses *quench*.

Tujuan dari *spheroidized annealing* adalah untuk memperbaiki mampu mesin dan mempebaiki mampu bentuk. Sebagai contoh mampu mesin baja perkakas karbon tinggi sangat baik jika strukturnya sperodisasi. Semua jenis baja perkakas paduan, termasuk kelas karbida maupun baja untuk bantalan harus memiliki kondisi sperodisasi agar hasil pemesinannya baik.

3. *Isothermal Annealing*

Jenis proses ini dimanfaatkan untuk melunakkan baja-baja sebelum dilakukan proses permesinan. Proses ini terdiri dari austenisasi pada temperatur *annealing* (*Full annealing*) kemudian diikuti dengan pendinginan yang relatif cepat sampai ke temperatur 60 °C dibawah garis A1 (menahan secara *isothermal*) dengan waktu tertentu. Kekerasan yang dicapai setelah proses *isothermal annealing*, tergantung pada tingginya temperatur penahanan baja dibawah A1.

Pada umumnya proses *isothermal annealing* mirip dengan *full annealing*, akan tetapi proses ini lebih menguntungkan yaitu:

- Waktu proses lebih pendek untuk menghasilkan struktur mikro yang sama.
- Menghemat biaya.
- Struktur mikro lebih seragam.

4. Proses Homogenisasi

Proses ini dilakukan pada rentang temperatur 1100-1200 °C. Proses difusi yang terjadi pada temperatur ini akan menyeragamkan komposisi baja. Proses ini diterapkan pada baja-baja paduan dimana pada saat membeku sesaat setelah proses penuangan, memiliki struktur yang tidak homogen. Sebagian besar tidak homogen tersebut dapat diatasi pada saat pengolahan ingot baja tersebut. Seandainya ketidak homogenan tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, maka perlu diterapkan proses homogenisasi atau *diffusional annealing*. Proses homogenisasi dilakukan selama beberapa jam pada temperatur sekitar 1150-1200 °C. Setelah itu benda kerja didinginkan ke 800-850 °C, dan selanjutnya didinginkan di udara. Setelah proses ini, dapat juga dilakukan proses normal atau anil untuk memperhalus struktur *over heat*. Perlakuan seperti ini hanya dilakukan untuk kasus-kasus yang khusus karena biaya prosesnya sangat tinggi.

5. *Intermediate Annealing*

Proses ini dilakukan terhadap baja yang sudah mengalami proses "*Case hardening*" agar dapat dimesin. Prosesnya terdiri dari penahan benda kerja pada temperatur dibawah A1, yaitu sekitar 630-680 °C, untuk selama 4-6 jam dan diikuti dengan pendinginan yang lambat. Tujuan dari proses ini mirip proses sperodisasi yaitu memperbaiki mampu mesin.

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).

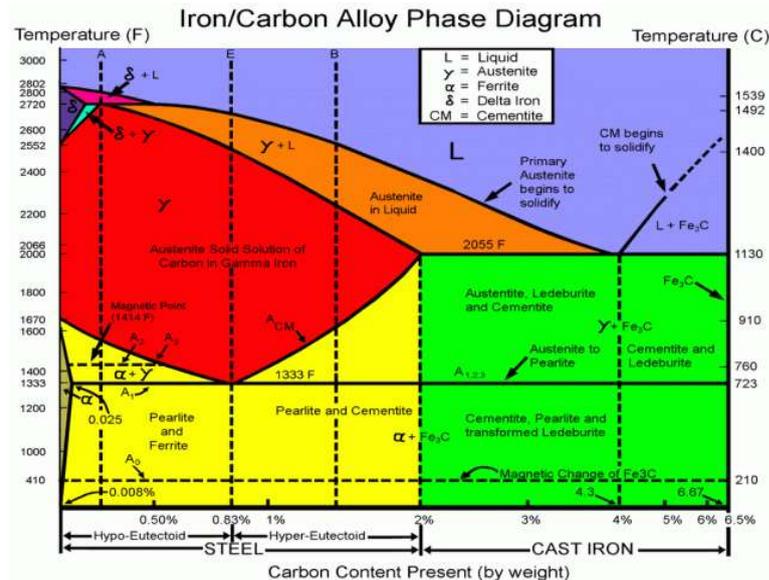
G. Diagram Fasa Fe-Fe₃C

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 menjelaskan mengenai perubahan fasa :



Gambar 2. 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 struktu rmikro

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 turunya temperatur.
4. Acm adalah temperatur transformasi γ menjadi Fe₃C *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 *cementite* ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), terjadi pada temperatur 723 °C, mengandung 0,8 % karbon (Callister, 2007).

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).



Gambar 3. Alat uji kekerasan (Andriyanto. 2014)

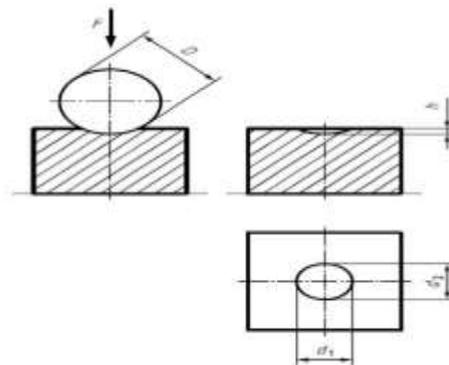
Uji kekerasan adalah pengujian yang paling efektif untuk menguji kekerasan dari suatu material, karena dengan pengujian ini kita dapat dengan mudah mengetahui gambaran sifat mekanis suatu material. Meskipun pengukuran hanya dilakukan pada suatu titik, atau daerah tertentu saja, nilai kekerasan cukup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

Didunia teknik, umumnya pengujian kekerasan menggunakan 3 macam metode pengujian kekerasan yang umum digunakan, 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.



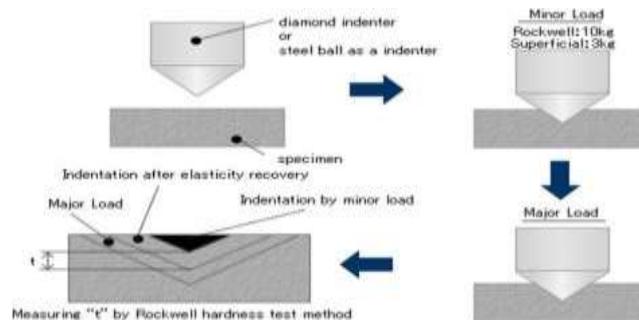
Gambar 4. Prinsip uji kekerasan *brinell* (Andriyanto. 2014)

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.



Gambar 5. Prinsip uji kekerasan *rockwell* (Andriyanto, 2014)

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.

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.

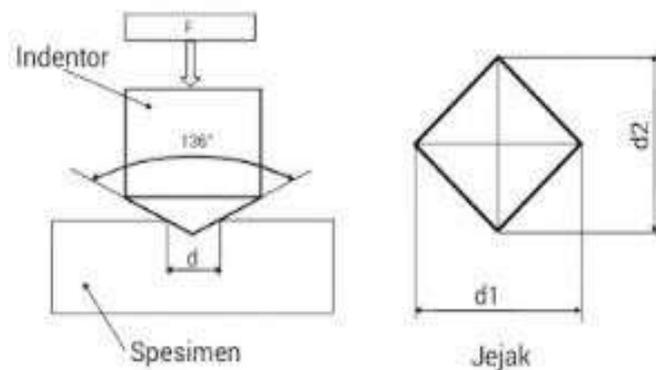
Kekurangan pengujian kekerasan metode *Rockwell*:

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

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

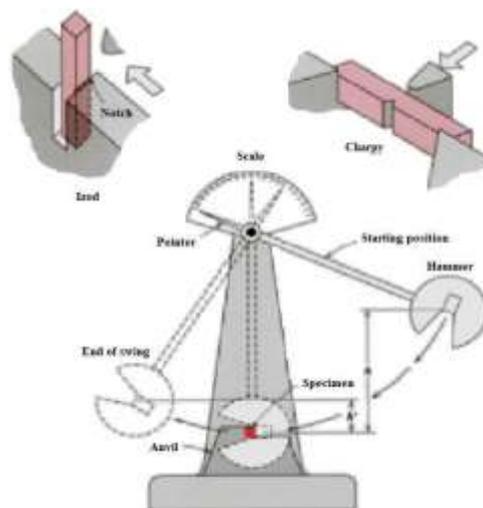


Gambar 6. Prinsip uji kekerasan *Vickers* (Andriyanto. 2014)

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 impak, banyaknya energi yang diserap oleh bahan untuk terjadinya perpatahan merupakan ukuran ketahanan impak atau ketangguhan bahan tersebut. Material yang ulet akan menunjukkan harga impak 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).



Gambar 7. Ilustrasi Pengujian Impak (Callister, 2001)

J. Jenis-Jenis Metode Impak

Secara umum metode pengujian impak terdiri dari dua jenis yaitu :

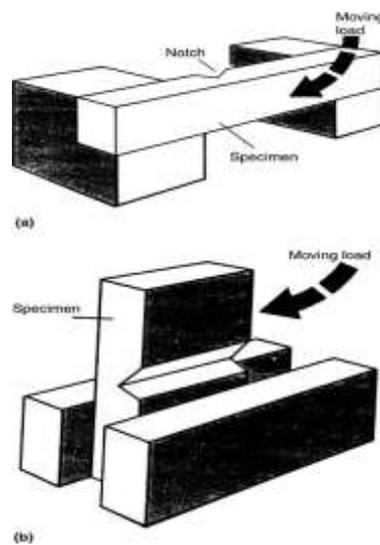
1. Metode *Charpy*

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.



Gambar 8. Metode Uji Impak *Charpy* (atas) dan *Izod* (bawah) , (ASM, 2000)

K. Perhitungan Kekuatan Impak

Perhitungan kekuatan impak bertujuan untuk mencari energi impak dan harga impak, sebelum mencari energi impak dan harga impak harus mencari sudut β dan sudut α dengan cara melakukan pengujian, ilustrasi pengujian dapat dilihat pada gambar 7.

Berikut adalah rumus yang digunakan pada pengujian impact :

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

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

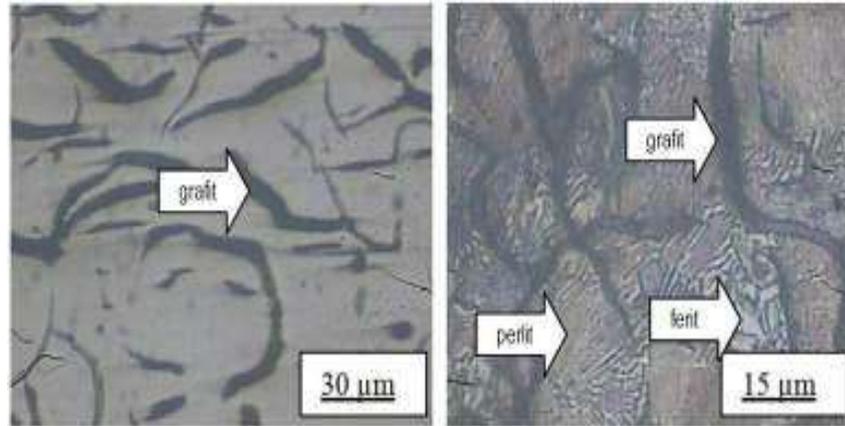
$$HI = \frac{E}{A} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana : E = Energi yang diserap (J)

A = Luas penampang di bawah takikan (mm²)

L. Struktur Mikro

Sifat fisik dan, khususnya, perilaku mekanis suatu material sering kali tergantung pada mikro. Struktur mikro terlihat pada pengamatan mikroskopis langsung menggunakan mikroskop optik atau elektron. Dalam paduan logam, struktur mikro dicirikan oleh jumlah fasa yang ada, mereka proporsi, dan cara mereka didistribusikan atau diatur. Itu mikrostruktur paduan tergantung pada variabel seperti elemen paduan yang ada, mereka konsentrasi, dan perlakuan panas paduan (yaitu, suhu, waktu pemanasan pada suhu, dan laju pendinginan ke kamar suhu). Prosedur persiapan spesimen untuk pemeriksaan mikroskopis. Setelah pemolesan dan pengetsaan yang tepat, fase yang berbeda mungkin menjadi dibedakan dengan penampilannya. Misalnya, untuk paduan dua fase, satu fase mungkin tampak terang dan fase gelap lainnya. Ketika hanya satu fasa atau larutan padat menyajikan, teksturnya seragam, kecuali batas butir yang mungkin mengungkapkan (Callister, 2014).



Gambar 9. Struktur mikro besi cor kelabu (lilik,2015)

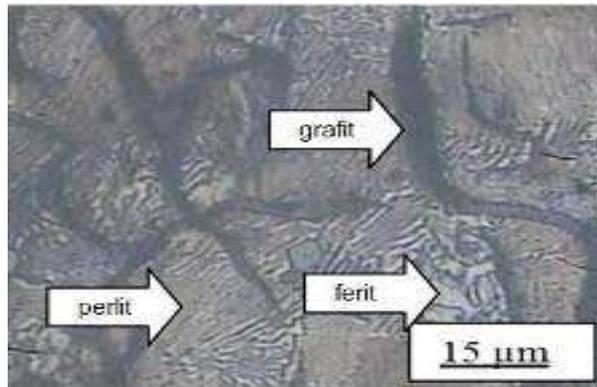
Struktur mikro adalah kumpulan fasa – fasa yang dapat diamati melalui teknik metalografi. Fasa – fasa tersebut dapat merupakan struktur mikro pada logam yang dapat diamati melalui mikroskop. Berikut adalah struktur mikro pada besicor (Putra, 2011).

1. Ferrit

Merupakan besi yang murni dengan struktur dengan kristal berbentuk *Body Centered Cubic* (BCC) dan sering disebut sebagai besi alpha. Struktur ini bersifat lunak dan lemah serta mempunyai sifat yang magnetic dan punya konduktifitas listrik yang tinggi. Dalam struktur biasanya tanpa dalam warnayang terang.

2. Perlit

Merupakan stuktur yang berbentuk lapisan dari lemel ferrit dan sementit. Perlit mempunyai sifat ulet dan baik ketahanan ausnya makin baik struktur yang ada dalam perlit maka makin kuat pula kekuatan yang dimilikinya. Penampaknya dalam bagian yang berwarna gelap.



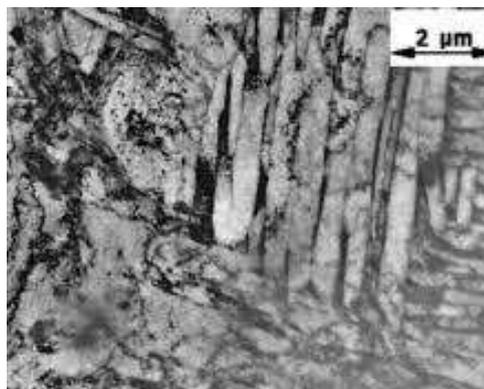
Gambar 10. *Ferit dan perlit* (Lilik, 2015)

3. *Sementit*

Merupakan senyawa karbon yang biasa ditemukan dalam struktur semua besi tuang. Sementit mempunyai kekerasan yang tinggi dan sangat getas. Penampakkannya dalam struktur berupa bagian berwarna putih.

4. *Martensit*

Merupakan suatu fasa penyusun kekerasan yang terbentuk pada proses pendinginan yang berlangsung cepat. Penampakkannya dalam struktur berupabagian yang berwarna agak terang.



Gambar 11. *Martensit* (Callister, 2007)

5. Austenit

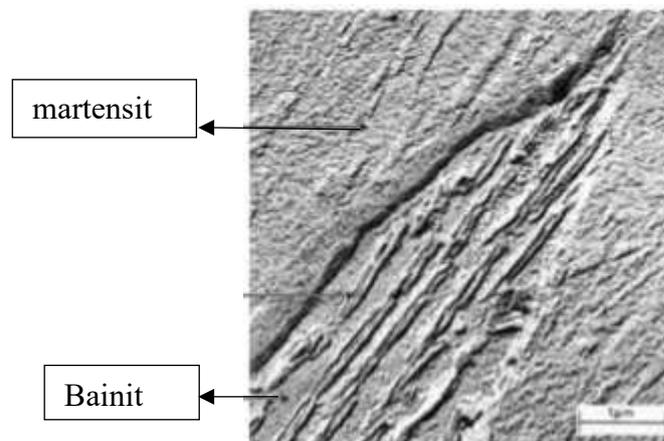
Biasa disebut sebagai γ (γ -iron) yang mempunyai susunan struktur kristal yang berbentuk *fase Centered Cubic* (FCC) serta mempunyai daya larut yang tinggi terhadap karbon serta mempunyai sifat yang tidak *magnetic*.

6. Grafit

Merupakan karbon bebas yang terkandung dalam struktur besi tuang. Fase penyusun ini bersifat keras dan meningkatkan sifat mampu mesin yang dimiliki besi tuang. Proporsi dari sifat *grafit* tergantung pada komposisi kimia yang dimiliki besi tuang. Penampakkannya dalam struktur.

7. Bainit

Bainit merupakan fasa yang kurang stabil yang diperoleh dari austenit pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur transformasi ke pearlite dan lebih tinggi dari transformasi ke martensit.



Gambar 12. Struktur *bainit* (Callister,2007)

Analisis pengaruh struktur mikro dan sifat mekanik besi cor nodular yang dilakukan oleh Kenawy dkk (2001) menunjukkan bahwa sifat mekanik (kekuatan, kekerasan, dan keuletan) besi cor dipengaruhi oleh fraksi *fasa ferit* atau perlit dari matrik dan besarnya ukuran *grafit*. Jika fraksi *fasa perlit* semakin tinggi maka kekuatan dan kekerasan juga

akan semakin tinggi. Selanjutnya jika ukuran *grafit* semakin besar maka kekuatan dan keuletan besi cor akan semakin rendah (Raharjo, 2007).

Sejumlah data mengenai perubahan fasa dari berbagai sistem paduan telah dikumpulkan dan dicatat dalam bentuk diagram atau yang dikenal dengan diagram fasa, juga disebut dengan diagram keseimbangan atau diagram equilibrium.

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 Universitas Lampung, Laboratorium Metrologi Universitas Lampung, Laboratorium Grafi SMK SMTI Bandar Lampung, dan Laboratorium Material Teknik Universitas Diponegoro. Bahan yang akan digunakan adalah besi cor kelabu FC25. Adapun prosedur dalam pengujian ini yaitu proses *annealing* dengan pengujian kekerasan, dampak, dan struktur mikro.

B. Bahan yang Digunakan

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

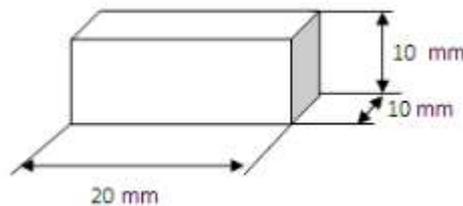
1. Besi Cor Kelabu FC25

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



Gambar 13 Besi Cor Kelabu FC25

2. Spesimen Uji Kekerasan

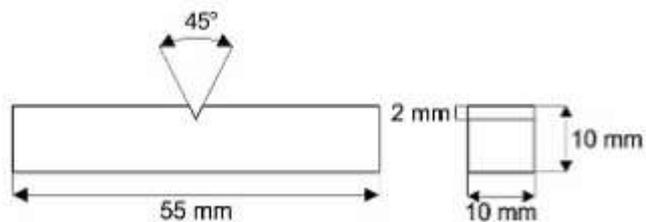


Gambar 14 Spesimen uji kekerasan

Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan disesuaikan dengan standar ASTM E92, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 14.

3. Spesimen Uji Impak

Spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan disesuaikan dengan standar ASTM E-23, dengan ukuran dan bentuk seperti gambar 15.



Gambar 15. Spesimen Uji Impak standar ASTM E-23

C. 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 16. *Furnace*

Tabel 3. Spesifikasi *Furnace*

Model	<i>Barnstead Thermolyne Thermofisher 4800 Series Muffle Furnace F48025-60-80</i>
<i>Power Rating</i>	120 Volts
<i>Hertz</i>	50/60Hz
<i>Amps</i>	15 watt
<i>Phase</i>	1
<i>Temperature Range</i>	<i>Continues : 1093°C Intermittent : 1200°C</i>
<i>Dimensions in Inches</i>	<i>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</i>

2. *Hardness Tester*

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



Gambar 17. *Hardness Tester*

Tabel 4. Spesifikasi *Hardness Tester*

Model	<i>Hardness Testing Equipment Via Grumello 57-24127 bergamo Italy</i>
N	3237 CO
<i>Modello</i>	A100
<i>Load</i>	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 18. *Profile projector*

Tabel 5. Spesifikasi *Profile Projector*

<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 19. 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 20. Amplas

6. Autosol

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



Gambar 21. 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 22. *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
	0 – 0.5 J minimum <i>scale</i> = 0.005 J
	0 – 1 J minimum <i>scale</i> = 0.01 J

<i>Dial scale</i>	0 – 2 J minimum scale = 0.02 J
	0 – 4 J minimum scale = 0.04 J
	0 – 5 J minimum scale = 0.05 J
<i>Corner dimension of striking edge</i>	30 degree
<i>Round angel radius of striking edge</i>	R = 2 mm
<i>specimen</i>	Conform to ISO180

8. *Optical Emmision Spectrometer (OES)*

Optical Emmision Spectrometer (OES) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung di dalam material.



Gambar 23. *Optical Emmision Spectrometer (OES)*

Tabel 7. Spesifikasi *Optical Emmision Spectrometer (OES)*

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

9. *Mikroskop olympus BX53M*

Mikroskop Optik digunakan untuk mengetahui perubahan struktur mikro dari benda uji.



Gambar 24. 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 spesimen 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 temperatur pemanasan 850°C
- b. Setelah temperatur besi cor telah mencapai temperatur austenitnya, selanjutnya dilakukan penahanan pada temperatur yang telah ditentukan, dengan variasi waktu penahanan 30, 60 dan 120 menit.
- c. Spesimen yang sudah dipanaskan kemudian didinginkan didalam *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 spesimen 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 spesimen yang akan dilakukan pengujian kekerasan.

c. Pengamatan struktur mikro

Pengamatan dilakukan menggunakan OM untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi pada besi cor setelah diberi perlakuan panas *annealing*.

4. Pengambilan data

Pengambilan data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Pengujian Kekerasan

Adapun data pada pengujian kekerasan metode *vickers* pada besi cor kelabu FC25 adalah sebagai berikut :

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°C	0 menit	50	Raw material 1		
				Raw material 2		
				Raw material 3		
	850°C	30 menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		
		60 menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		
		120 menit		Spesimen 1		
				Spesimen 2		
				Spesimen 3		

b. Pengujian impak

Adapun data pada pengujian metode *charpy* pada besi cor kelabu FC25 adalah sebagai berikut :

Tabel 10. Hasil Pengujian Impak

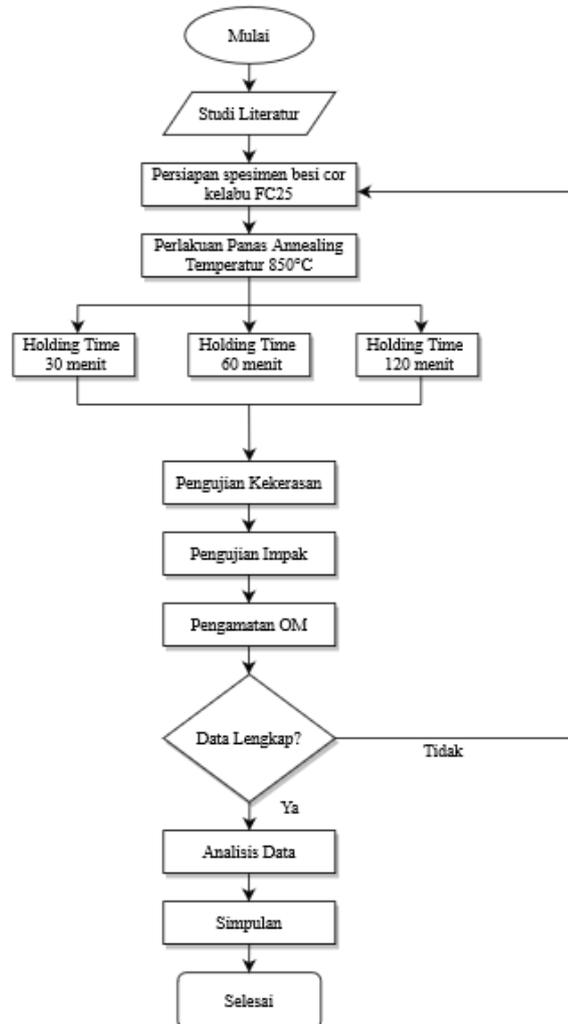
Material	Suhu <i>annealing</i>	<i>Holding time</i>	Spesimen	Energy E (Joule)	Harga impak	Rata – rata
Besi cor kelabu FC25	0°C	0 menit	Raw Material 1			
			Raw Material 2			
			Raw Material 3			
	850°C	30 menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			
		60 menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			
		120 menit	Spesimen 1			
			Spesimen 2			
			Spesimen 3			

c. Pengamatan OM

Setelah dilakukan pengujian impak, dilanjutkan dengan pengamatan OM atau pengujian struktur mikro.

E. Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 25. Diagram Alir Penelitian

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Adapun simpulan yang diperoleh setelah dilakukan penelitian Pengaruh *Holding Time* pada proses *annealing* terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan besi cor kelabu FC25 adalah sebagai berikut :

1. Nilai kekerasan yang dihasilkan dari ketiga variasi *holding time* yang diberikan pada spesimen besi cor kelabu FC25 mengalami penurunan. Hasil uji kekerasan didapatkan nilai kekerasan sebelum dilakukan perlakuan panas sebesar 154,739849 kg/mm². Pada *holding time* 30 menit menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 152,662 kg/mm² atau 1,34%. Pada *holding time* 60 menit menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 148,797 kg/mm² atau 3,84%. Kemudian pada *holding time* 120 menit menghasilkan nilai kekerasan dengan rata-rata sebesar 143,470 kg/mm² atau 7,28%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi *holding time* pada proses *annealing* sangat berpengaruh terhadap nilai kekerasan pada besi cor kelabu FC25. Semakin lama *holding time* yang diberikan dalam proses *annealing* pada besi cor kelabu FC25 maka nilai kekerasannya akan semakin menurun.
2. Nilai ketangguhan atau kekuatan impact yang dihasilkan dari ketiga variasi *holding time* yang diberikan pada spesimen besi cor kelabu FC25 mengalami peningkatan. Hasil uji impact didapatkan nilai ketangguhan sebelum dilakukan perlakuan panas sebesar 3 Joule. Pada *holding time* 30 menit menghasilkan energi impact dengan rata-rata sebesar 3,8 Joule atau 26,67%. Pada *holding time* 60 menit menghasilkan energi impact

dengan rata-rata sebesar 4,06 *Joule* atau 35,33%. Kemudian pada *holding time* 120 menit menghasilkan energi impak dengan rata-rata sebesar 4,3 *Joule* atau 43,33%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi *holding time* pada proses *annealing* sangat berpengaruh terhadap kekuatan impak pada besi cor kelabu FC25. Semakin lama *holding time* yang diberikan dalam proses *annealing* pada besi cor kelabu FC25 maka kekuatan impaknya akan semakin meningkat.

3. Struktur mikro yang dihasilkan dari ketiga variasi *holding time* 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 berbentuk serpihan (*flake*) semakin lama *holding time* maka struktur perlit yang getas akan bertransformasi menjadi struktur ferit yang lebih lunak dan grafit serpihan *flake* 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.

B. Saran

Adapun saran yang diperoleh dari setelah dilakukan penelitian Pengaruh *Holding Time* pada proses *annealing* terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan besi cor kelabu FC25 adalah sebagai berikut :

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

DAFTAR PUSTAKA

- Andriyanto Dwi, Khoiruz Zam Zami Muhammad. 2014. Pengetahuan Bahan Teknik-Modul 4-Uji Kekerasan LABORATORIUM SISTEM MANUFAKTUR 52 RINGKASAN. Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Trunojoyo Madura
- 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).
- 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 Sprochet 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).
- 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).