

METALURGI FISIK : STRUKTUR, PROSES, DAN SIFAT MEKANIS LOGAM



Tim Penulis :

Shanti Kumbarasari | Akram La Kilo | Imah Luluk Kusminah
Subekti | Muhammad Ridwan Septiawan

ISBN 978-634-255-036-2



9

786342

550182

METALURGI FISIK :

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

**Shanti Kumbarasari
Akram La Kilo
Imah Luluk Kusminah
Subekti
Muhammad Ridwan Septiawan**



GETPRESS INDONESIA

METALURGI FISIK :
Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

Penulis : Shanti Kumbarasari
Akram La Kilo
Imah Luluk Kusminah
Subekti
Muhammad Ridwan Septiawan

Editor : Mila Sari, M.Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni , S.Pd.
PENERBIT GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, September 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, berkat rahmat dan karunia-Nya buku Metalurgi Fisik: Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam ini dapat diselesaikan. Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman komprehensif mengenai ilmu metalurgi fisik, mulai dari klasifikasi logam ferrous dan non-ferrous beserta metode identifikasinya, struktur atom, kristal, serta cacat kristal pada logam dan pengaruhnya terhadap sifat material, hingga pembahasan diagram fasa dan transformasi material. Selain itu, buku ini juga membahas prinsip dan teknik perlakuan panas pada logam, sifat mekanis logam beserta metode pengujiannya, dengan penekanan pada keterkaitan antara struktur, proses, dan sifat yang dihasilkan. Diharapkan buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, peneliti, maupun praktisi di bidang teknik material dan metalurgi, serta mendorong inovasi dalam pengembangan material logam untuk berbagai aplikasi industri.

Padang, Juli 2025

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	vii
BAB 1 KLASIFIKASI LOGAM FERROUS DAN NON FERROUS	1
1.1 Pendahuluan	1
1.2 Logam Ferrous	3
1.3 Logam Non-Ferrous	22
1.4 Perbandingan Logam Ferrous dan Non-Ferrous	39
1.5 Metode Identifikasi Logam Ferrous dan Non-Ferrous	45
DAFTAR PUSTAKA	48
BAB 2 STRUKTUR ATOM, KRISTAL, DAN CACAT KRISTAL PADA LOGAM	51
2.1 Pendahuluan	51
2.2 Struktur Atom dan Sifat Fisik Logam	52
2.3 Struktur Kristal Logam	57
2.4 Cacat Kristal Logam	60
2.5 Deformasi Plastis pada Logam dan Mekanisme Dislokasi	65
2.6 Pengaruh Struktur Kristal pada Kemudahan Deformasi	68
2.7 Pengaruh Cacat Kristal dalam Metalurgi	70
DAFTAR PUSTAKA	74
BAB 3 DIAGRAM FASA DAN TRANSFORMASI MATERIAL	77
3.1 Pendahuluan	77
3.2 Definisi dan Konsep Dasar	77
3.3 Diagram Fasa Fe_3C	79
3.4 Transformasi Material	90
DAFTAR PUSTAKA	100
BAB 4 PROSES PERLAKUAN PANAS PADA LOGAM	103
4.1 Pendahuluan	103
4.2 Prinsip Perlakuan Panas	104
4.3 Kesimpulan	119
DAFTAR PUSTAKA	120

BAB 5 SIFAT MEKANIS LOGAM DAN PENGUJIAN	123
5.1 Pendahuluan	123
5.2 Definisi Sifat Mekanis Logam	126
5.3 Jenis-Jenis Sifat Mekanis Logam.....	130
5.4 Pengujian Sifat Mekanis	144
DAFTAR PUSTAKA	158
BIODATA PENULIS	161

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1. Material Ferrous a) Material Non Ferrous b)	2
Gambar 1. 2. Diagram Fe-Fe ₃ C	4
Gambar 1. 3. Diagram Besi-Besi Karbida.....	5
Gambar 1. 4. Fasa pada baja eutektoid pada diagram fasa.....	6
Gambar 1. 5. Cast Iron	9
Gambar 1. 6. Konstruksi baja.....	17
Gambar 1. 7. Aluminium.....	25
Gambar 1. 8. Tembaga.....	26
Gambar 1. 9. Kuningan.....	27
Gambar 1. 10. Tin Bronze	28
Gambar 1. 11. Timah.....	29
Gambar 1. 12. Seng.....	31
Gambar 1. 13. Nikel.....	33
Gambar 1. 14. Titanium.....	34
Gambar 1. 15. Emas.....	35
Gambar 1. 16. Perak.....	36
Gambar 1. 17. Platina.....	36
Gambar 1. 18. <i>Magnetic particle test</i>	45
Gambar 1. 19. Spark Test.....	46
Gambar 2. 1. Struktur atom-atom logam yang membentuk ikatan logam.....	52
Gambar 2. 2. Blok logam yang menampilkan atom logam dan electron valensi yang bergerak (mengalir).....	54
Gambar 2. 3. Ilustrasi sifat <i>malleability</i> pada logam: struktur kisi logam sebelum dan sesudah gaya luar diberikan. Ketika gaya diterapkan (ditandai dengan panah), ion-ion logam bermuatan positif (ditunjukkan dengan bola kuning) bergeser, namun tidak menyebabkan logam patah. Hal ini terjadi karena adanya "lautan elektron" (elektron bebas berwarna kuning muda) yang tetap menjaga ikatan logam tetap utuh dan fleksibel. Proses ini menjelaskan sifat <i>malleability</i> atau kemampuan logam ditempa menjadi bentuk tipis tanpa pecah.	56

Gambar 2. 4. Struktur kristal Kubus Berpusat Badan (BCC)	57
Gambar 2. 5. Struktur kristal kubus berpusat muka (FCC)	58
Gambar 2. 6. Stuktur heksagonal kemas rapat (HCP) kritical logam... 59	
Gambar 2. 7. Ditunjukkan dua contoh dislokasi <i>edge</i> : (kiri) dislokasi <i>edge</i> pada tongkol jagung dan (kanan) representasi tiga dimensi dari dislokasi <i>edge</i> pada suatu padatan, yang menggambarkan bagaimana dislokasi <i>edge</i> dapat dilihat sebagai cacat garis sederhana yang berasal dari penyisipan satu set atom ekstra ke dalam kisi kristal. Pada kedua kasus, asal dari dislokasi <i>edge</i> ditunjukkan dengan simbol $\perp$	61
Gambar 2. 8. Cacat dislokasi ulir	62
Gambar 2. 9. Cacat dislokasi campuran.....	62
Gambar 2. 10. Butiran dan batas; (A) mikroskopik dan (B) atomic.....	63
Gambar 2. 11. Orientasi butiran; acak (kiri) dan preferensial (kanan).	64
Gambar 3. 1. Diagram Fasa Biner Besi-Karbida.....	80
Gambar 3. 2. (a) -ferrite (90) and (b) austenite (325)	82
Gambar 3. 3. Representasi skematis struktur mikro eutektoid (0,76 wt% C) di atas dan di bawah suhu eutektoid. ..	85
Gambar 3. 4. Proses Pembentukan Perlit	85
Gambar 3. 5. Struktur Mikro Untuk Paduan Besi-Karbon Hipoeutektoid	86
Gambar 3. 6. Struktur Mikro Untuk Paduan Besi-Karbon Dengan Komposisi Hipereutektoid.....	87
Gambar 3. 7. Foto Mikro Dari Baja 1,4-wt%C)	88
Gambar 3. 8. Foto Mikro Dari Baja 1,4-wt%C)	93
Gambar 3. 9. Pendinginan Lambat	96
Gambar 3. 10. Pendinginan Medium	97
Gambar 3. 11. Pendinginan Cepat.....	97
Gambar 4. 1. Diagram fase Fe-C dan struktur mikro	105
Gambar 4. 2. Suhu awal martensit M_s dan suhu akhir M_f versus kandungan karbon.....	107
Gambar 4. 3. Kisaran suhu yang direkomendasikan untuk perlakuan panas pada baja karbon biasa	108

Gambar 4. 4. Struktur pengecoran baja (a) sebelum normalisasi dan (b) setelah normalisasi.....	109
Gambar 4. 5. Hubungan antara kekerasan maksimum yang dapat dicapai baja yang dipadatkan dengan kandungan karbon.....	111
Gambar 4. 6. Pengaruh waktu, dan temperatur pada perlakuan (<i>Aging</i>) terhadap kekerasan	116
Gambar 4. 7. Skema waktu-suhu pengerasan presipitasi	117
Gambar 4. 8. Microstruktur hasil Pengerasan Presipitasi	118
Gambar 5. 1. Sampel untuk (a) uji tarik (b) uji tarik tekukan (c) uji ketangguhan kerapuhan	125
Gambar 5. 2. Contoh struktur kristal. Unit sel (a) simple cubic (b) face-centered cubic (c) body centered cubic (d) hexagonal close-packed.....	129
Gambar 5. 3. Kekerasan sebanding dengan ukuran kedalaman lubang. Semakin keras material, semakin kecil ukuran kedalaman lubang.....	133
Gambar 5. 4. Hubungan sifat kekerasan dengan sifat mekanis logam yang lain	134
Gambar 5. 5. Ilustrasi material ulet dan rapuh.....	136
Gambar 5. 6. Contoh kurva beban-pemanjangan	145
Gambar 5. 7. Alat uji Brinell	147
Gambar 5. 8. Metode pengujian kekerasan Brinell	148
Gambar 5. 9. Alat uji Rockwell	149
Gambar 5. 10. Alat uji Vickers	150

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1. Klasifikasi, Sifat, dan Aplikasi Utama Besi Tuang.....	13
Tabel 1. 2. Klasifikasi, Sifat, dan Aplikasi Utama Baja.....	20
Tabel 1. 3. Sifat dan Aplikasi Logam Non-Ferrous.....	37
Tabel 1. 4. Perbandingan Sifat Umum Logam Ferrous dan Non-Ferrous.....	40
Tabel 2. 1. Sistem slip pada Kristal Logam.....	68
Tabel 3. 1. Perbedaan CCT dengan TTT	98
Tabel 3. 2. Contoh Transformasi Material.....	99

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

BAB 1

KLASIFIKASI LOGAM FERROUS DAN NON FERROUS

Oleh Shanti Kumbarasari

1.1 Pendahuluan

1.1.1 Definisi Umum Logam

Logam merupakan kategori bahan yang memiliki spesifikasi seperti daya tahan, elastisitas, daya hantar termal serta elektrik yang baik. (Agus, Cahya, Fendy dan Muhammad Ihsan, 2024). Secara umum, logam dicirikan oleh kemampuannya untuk ditempa dan diubah bentuknya (*malleability dan ductility*), konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, serta kekuatan, kekerasan, dan keuletan yang signifikan. Sifat-sifat ini, seperti kemampuan menahan goresan, potongan, keausan, benturan, dan kemampuan ditarik tanpa patah, secara kolektif mendefinisikan utilitas logam dalam aplikasi teknis. Selain itu, logam umumnya memiliki titik lebur yang tinggi dan dapat diperoleh dari bijih logam melalui proses penambangan serta pengolahan.

Logam dalam konteks keteknisan, seperti besi teknis, bukan sekadar besi murni (Fe) karena besi murni tidak memenuhi persyaratan kekuatan, keuletan, dan ketahanan terhadap pengaruh eksternal seperti korosi, aus, bahan kimia, atau suhu tinggi. Oleh karena itu, besi teknis selalu

dicampur dengan unsur-unsur lain seperti karbon (C), silikon (Si), mangan (Mn), fosfor (P), dan belerang (S) untuk mencapai sifat-sifat yang diinginkan. . (Agus, Cahya, Fendy dan Muhammad Ihsan, 2024)

1.1.2 Pentingnya Klasifikasi Logam dalam Industri dan Rekayasa

Klasifikasi logam menjadi *ferrous* dan *non-ferrous* adalah aspek fundamental dalam ilmu material dan rekayasa. Pembagian ini sangat penting karena perbedaan mendasar dalam komposisi kimia, sifat fisik dan mekanik, serta aplikasi spesifik dari masing-masing kategori. Pemahaman yang mendalam mengenai klasifikasi ini memungkinkan para insinyur dan desainer untuk memilih material yang paling sesuai untuk kebutuhan aplikasi tertentu, mengoptimalkan kinerja, efisiensi biaya, dan keberlanjutan proyek.



a

b

Gambar 1. 1. Material Ferrous a) Material Non Feroous b)

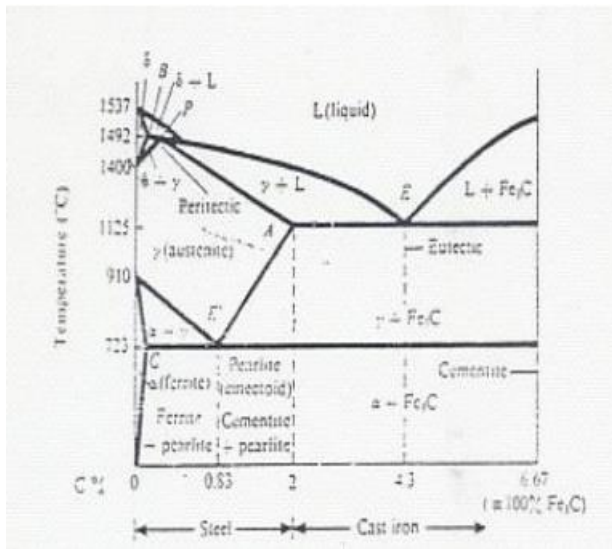
Sumber: <https://www.firsthope.co.in/ferrous-and-nonferrous-metals/>

Sifat-sifat makroskopik suatu material, seperti kekuatan atau ketahanan korosi, tidak hanya ditentukan oleh keberadaan unsur tertentu, tetapi juga oleh bagaimana unsur-unsur tersebut berinteraksi pada tingkat mikrostruktural dan bagaimana material tersebut diproses. Klasifikasi ferrous dan non-ferrous membantu dalam mengelompokkan material berdasarkan karakteristik dominan yang berasal dari komposisi utamanya, sehingga mempermudah proses seleksi dan pengembangan material untuk tantangan rekayasa yang kompleks.

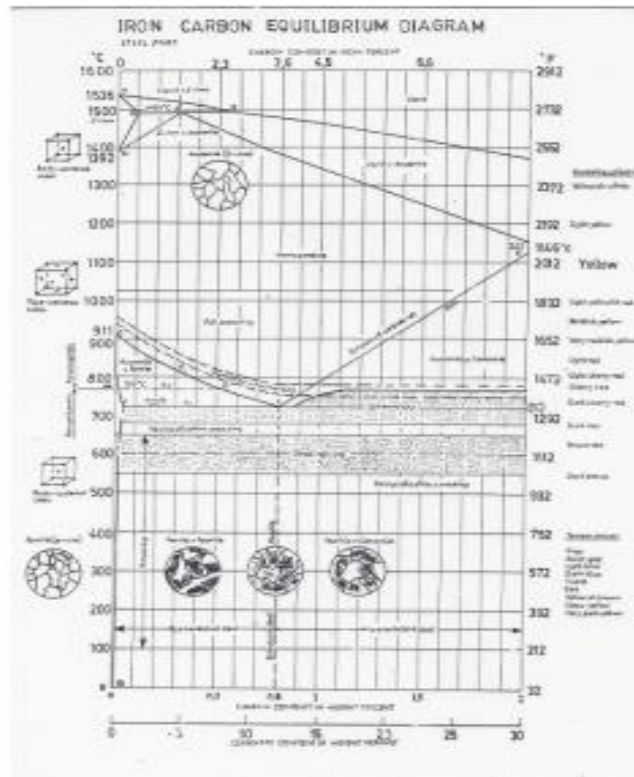
1.2 Logam Ferrous

1.2.1 Definisi dan Komposisi Dasar

Logam ferrous merupakan paduan logam yang terdiri dari unsur besi (Fe) yaitu elemen metal dan karbon (C) yaitu elemen non metal. Satu atom Carbon (C) dan 3 atom besi (Fe) yang bersifat dasar lunak melalui reaksi kimia menghasilkan molekul besi karbid (Fe_3C) yang bersifat sangat keras. Nama lain dari besi karbid adalah sementit. Pada diagram berikut menjelaskan hubungan antara temperatur sehingga terjadi perubahan fase selama proses pendinginan dan pemanasan yang lambat dengan kadar karbon yang disebut diagram fasa. Diagram ini sebagai dasar dari teknik paduan besi (baja dan besi tuang). Dimana sementit (Fe_3C) terdiri 6,65% terbentuk dari laju pendinginan yang cepat serta apabila laju pendinginan lambat maka akan terbentuk karbon (grafit) yang terpisah. Struktur kristal sementit yaitu orthorombic.

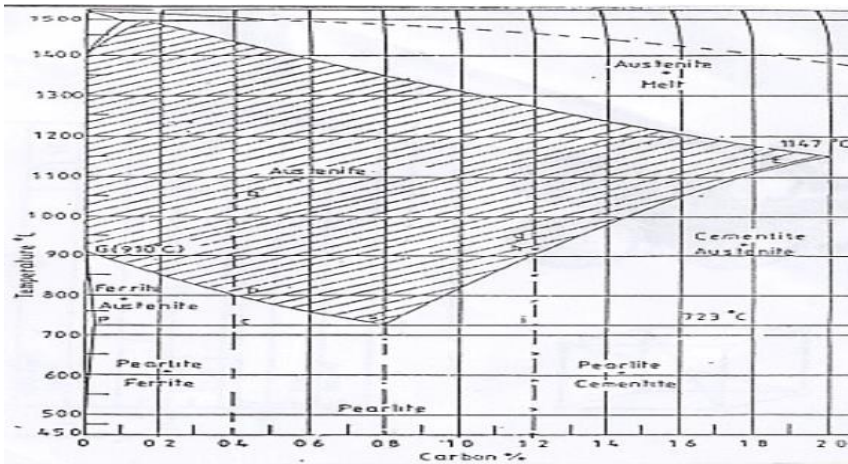


Gambar 1. 2. Diagram Fe-Fe₃C (Anrinal,2013)



Gambar 1. 3. Diagram Besi-Besi Karbida (Anrinal. 2013)

Garis putus-putus pada diagram phase Fe-Fe₃C menjelaskan mengenai keseimbangan besi-zat arang dimana grafit lebih stabil dari Fe₃C. Diagram Fe-Fe₃C merupakan diagram phase yang metastabil serta karbon sebagai unsur penstabil austenit. Pada suhu 1140°C karbon pada austenit melarut secara maksimal sebesar 1,5% serta karbon melarut pada ferit naik 0% pada suhu 910°C menjadi 0,025% pada suhu 523°C. Pada proses pendinginan selanjutnya, karbon melarut dalam ferit menurun menjadi 0,008% pada suhu kamar.



Gambar 1. 4. Fasa pada baja eutektoid pada diagram fasa

Garis GS menunjukkan kadar karbon meningkat maka perubahan austenit menjadi ferit menurun hingga mencapai pada titik S yaitu saat prosentase karbon 0,8% pada suhu 523oC hal ini dinamakan titik eutektoid. Susunan eutektoid baja sebagai titik rujukan dalam klasifikasi baja. Baja yang mengandung karbon 0,8% dinamakan baja eutektoid dan baja dengan mengandung kurang dari 0,8% dinamakan baja hypoeutektoid. Hypereutektiod adalah baja memiliki kandungan karbon lebih dari 0,8%.

Titik kritis sepanjang garis GS disebut sebagai garis A3 sedangkan titik kritis sepanjang garis PSK dinamakan garis A1 sehingga setiap titik pada garis GS dan SE menyatakan temperatur dimana temperatur dari austenit dimulai dengan metode dipanaskan atau didinginkan(Anrimal,2013).

Terdapat beberapa istilah yang terdapat pada diagram yaitu sebagai berikut :

- Ferrit: Besi- α murni, memiliki struktur lunak, terdapat pada baja yang memiliki kadar karbon kurang dari 0,9%
- Perlit : Besi karbon yang berkrystal lembut terdiri dari ferrit dan sementit.
- Sementit : struktur keras, hanya terdapat pada baja berkadar karbon lebih dari 0,9%
- Austenit: kristal besi- δ yang mengandung karbon atau elemen paduan yang lain dalam keadaan padat. Semua baja menjadi austenit dimulai dari titik ubah A1 serta seluruhnya menjadi austenit jika posisinya di atas titik ubah A3

Selain logam ferrous terdapat kandungan unsur-unsur paduan lain seperti mangan (Mn), fosfor (P), sulfur (S), dan silikon (Si). Penambahan unsur-unsur ini bertujuan untuk memodifikasi dan meningkatkan sifat-sifat material sesuai dengan kebutuhan aplikasi. (Achmad, Rudi, 2016).

Kandungan karbon dalam logam ferrous bervariasi secara luas, umumnya berkisar antara 0,03% hingga lebih dari 4% berat. Variasi persentase karbon ini secara fundamental membedakan jenis-jenis logam ferrous dan sifat-sifat mekaniknya. Sebagai contoh, baja karbon rendah memiliki keuletan tinggi, sementara baja karbon tinggi memiliki kekerasan yang signifikan. Kontrol yang presisi terhadap kadar karbon dan unsur paduan lainnya memungkinkan manipulasi sifat material secara akurat, menciptakan berbagai jenis logam ferrous yang disesuaikan untuk berbagai aplikasi rekayasa. Kemampuan untuk menyetel kinerja material melalui komposisi ini merupakan

inti dari rekayasa material, yang memungkinkan para profesional untuk menyeimbangkan kekuatan, keuletan, dan sifat-sifat lain yang diperlukan.

1.2.2 Karakteristik Umum Logam Ferrous

Logam ferrous memiliki serangkaian karakteristik yang menjadikannya pilihan utama dalam banyak aplikasi industri:

- a) **Sifat Fisik:** Umumnya memiliki warna abu-abu keputih-putihan.
- b) **Sifat Mekanik:** Dikenal karena kekuatan, kekerasan, dan ketahanan aus yang tinggi. Namun, sifat-sifat ini sangat bergantung pada komposisi karbon dan unsur paduan lainnya. Dibandingkan dengan besi murni, baja menunjukkan sifat kekuatan dan ketangguhan lebih unggul.
- c) **Sifat Kimia:** Secara inheren rentan terhadap korosi dan karat ketika terpapar oksigen dan kelembaban, karena adanya besi. Namun, penambahan unsur tertentu seperti kromium dapat membentuk lapisan pasif yang meningkatkan ketahanan korosi, seperti yang terlihat pada baja tahan karat.
- d) **Sifat Magnetik:** Sebagian besar logam ferrous bersifat magnetis karena kandungan besinya. Karakteristik ini menjadikannya ideal untuk aplikasi yang membutuhkan medan magnet, seperti transformator dan motor listrik.

1.2.3 Klasifikasi dan Jenis-jenis Utama Logam Ferrous

1. Besi Tuang (*Cast Iron*)

Besi tuang terdiri dari paduan unsur besi (Fe) serta karbon (C) dengan kandungan karbon yang relatif tinggi, umumnya di atas 2,5% hingga 4,5%. (Lilik, 2015). Paduan yang terkandung dalam besi tuang selain besi dan karbon terdapat unsur Silisium (Si), Mangan (Mn), Fosfor (P) dan Belerang (S).

Untuk struktur mikro besi cor terdapat ferrit atau perlit dan serpihan karbon bebas. Paduan antara karbon dan silisium memberikan pengaruh pada struktur mikro, ukuran, bentuk pada karbon bebas sehingga mutu serta kuantitas dapat berubah jika dibandingkan serpihan karbon bebas sebelumnya. Ketebalan serta laju pendinginan mengakibatkan perubahan struktur mikro. (Tata, Kenji, 1987)

Material ini umumnya rapuh dan tidak dapat ditempa dalam kondisi *as-cast*, namun memiliki kemampuan cor yang sangat baik, memungkinkan pembentukan menjadi bentuk yang kompleks.



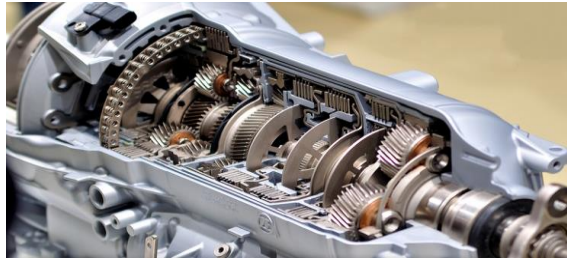
Gambar 1. 5. Cast Iron

Perbedaan dalam bentuk grafit yang terbentuk selama proses pendinginan menghasilkan berbagai jenis besi tuang dengan sifat dan aplikasi yang berbeda. Pemilihan jenis besi tuang yang tepat sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja dalam aplikasi spesifik. Misalnya, besi tuang abu-abu yang mampu menyerap getaran sangat cocok untuk alas mesin, sementara besi tuang ulet yang lebih kuat dan ulet digunakan untuk komponen mesin yang membutuhkan ketahanan terhadap beban. Ini menunjukkan bagaimana material dapat dioptimalkan berdasarkan kebutuhan fungsional yang sangat spesifik, bahkan dalam satu kategori logam ferrous.

Berikut adalah jenis-jenis utama besi tuang:

a. Besi Tuang Abu-abu (*Gray Cast Iron*)

Sifat: Grafit besi tuang abu-abu berbentuk *flake* (serpihan tipis) yang terbagi merata dalam strukturnya, memberikan bidang patahan berwarna kelabu. (Tata Surdia, Shinroku Saito 1997). Memiliki kekuatan tarik 10-30 kgf/mm² dengan titik cair 1200°C. Ketangguhan yang lebih rendah dari baja, tetapi kekuatan tekan setara dengan baja karbon rendah dan sedang. Bersifat lunak dan getas terhadap beban tarik, mudah diproduksi, dan memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap getaran. (Lilik, 2015).



Gbr. 6 Roda gigi mobil

Sumber.

<https://wuling.id/id/blog/autotips/memahami-roda-gigi-mobil-pengertian-hingga-fungsinya>

Aplikasi: Pengaruh dari unsur Chrom, Nikel, Molibden, Vanadium, Titan dan sebagainya menjadikan besi cor kelabu menjadi tahan panas, aus, korosi dan mampu mesin sehingga dapat diaplikasikan pada proses produksi pembuatan mesin dan alat berat yang sering terkena getaran, blok silinder mesin, *gearbox, flywheel*, kotak roda gigi, dan peralatan permesinan

b. Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)

- **Sifat:** Besi tuang putih sebagai bahan dasar besi cor mampu tempa yang telah melampaui proses pelunakan didalam sebuah tanur dengan rentang waktu lama. Struktur sementit (Fe_3C) dari besi cor putih mengalami perubahan ferit atau perlit dan karbon yang mengendap. (Tata Surdia, Kenji, 1987). Apabila sementit dalam jumlah besar maka memberikan bidang patahan berwarna putih. Material ini sangat keras, getas, tahan aus

tinggi, machinability dan tensile strength rendah. (Wahyudin, Surasno,1997)

- Aplikasi: berdasarkan sifat material yang sangat keras dan tahan terhadap keausan, maka dapat digunakan pada rol di mesin roller, *grinding ball* (Achmad, Widi, Fajar 2013)

c. Besi Tuang Ulet (*Ductile Cast Iron / Nodular Cast Iron*)

- **Sifat:** Besi tuang nodular berbentuk grafit bulat (nodular) karena penambahan magnesium dan silikon mengakibatkan sifat mekanik yaitu kekuatan, kekerasan dan keuletan semakin tinggi. (Fredek, Suriansyah, 2018)
- **Aplikasi:** digunakan untuk *valve manufactures, piping and fittings, engine parts* misalnya *gears, steering device*, dan *agricultural industry* contohnya komponen tractor, *brackets, clamps* dan *pulley*. (diecasting-mould.com,2002)

d. Besi Tuang Mampu Tempa (*Malleable Cast Iron*)

- **Sifat:** Dibuat dari besi tuang putih melalui perlakuan panas anil yang mengubah karbida besi menjadi grafit. Memiliki sifat yang mirip dengan baja ringan, dengan kemampuan tempa yang sangat baik, ketahanan terhadap beban kejut, dan kemampuan mesin yang baik. Konduktivitas termal lebih tinggi dan ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan temperatur dibandingkan besi cor ulet. (Tata Surdia, Kenji, 1987)
- **Aplikasi:** untuk jenis besi tuang mampu tempa ini pada umumnya digunakan di industri kereta api, otomotif, sambungan pipa, industri pertanian,

penghubung poros, roda gigi, *flange*, *pipe fitting*, dan *valve*.

Tabel 1. 1. Klasifikasi, Sifat, dan Aplikasi Utama Besi Tuang

Jenis Besi Tuang	Komposisi Kunci	Sifat Utama	Aplikasi Umum
Abu-abu (<i>Gray</i>)	Grafit serpihan, 2.5-4% C, 1-3% Si	Lunak, getas tarik, mudah diproduksi, penyerap getaran baik	Struktur dasar mesin, alas alat mesin, blok silinder, roda gila, kotak roda gigi
Putih (<i>White</i>)	Sementit, C > 1.7%, Si rendah	Sangat keras, sangat getas, tahan aus tinggi, kemampuan mesin rendah	Rol pada mesin roller, stamp shoes, bahan baku besi tuang mampu tempa
Ulet (<i>Ductile/Nodular</i>)	Grafit bulat (Mg, Ce), 3-4.5% C	Sifat mekanik mendekati baja, lebih kuat & ulet dari abu-abu	Valve, badan pompa, roda gigi, komponen otomotif (blok mesin diesel, poros

Jenis Besi Tuang	Komposisi Kunci	Sifat Utama	Aplikasi Umum
			engkol)
Mampu Tempa (<i>Malleable</i>)	Grafit kluster (dari besi tuang putih yang dianil)	Seperti baja ringan, mampu tempa & mesin baik, tahan beban kejut	Industri kereta api, otomotif, sambungan pipa, alat berat, penghubung poros

2. Besi Tempa (*Wrought Iron*)

Pada umumnya kandungan karbon pada besi tempa sebesar di bawah 0,08% atau kurang dari 1,7%. Pengaruh dari kandungan karbon yang rendah ini memberikan sifat yang sangat berbeda dari besi tuang.

Sifat: Besi tempa sangat lunak dan mudah ditempa. Meskipun lunak, material ini memiliki kekuatan yang lebih tinggi dan lebih kuat dibandingkan besi cor. Sifatnya yang fleksibel dan mudah dibentuk memungkinkan pengerjaan detail. Berdasarkan sifat material yang kuat, kokoh serta tahan lama mengakibatkan besi tempa ini menjadi pilihan untuk pembuatan produk yang membutuhkan tahan aus. Namun, tanpa perlindungan yang memadai, besi tempa rentan terhadap korosi atau karat.

Aplikasi: Sering digunakan dalam pembuatan perabotan, pagar, dan produk dekoratif lainnya karena kemudahannya dibentuk menjadi desain yang beragam

dan estetis. Selain itu, karena karakteristiknya yang kuat dan kokoh, besi tempa juga sangat baik untuk tujuan keamanan, seperti pagar rumah.

Kekurangan: Meskipun memiliki banyak kelebihan, besi tempa umumnya memiliki harga yang relatif mahal. Selain itu, material ini seringkali berwarna hitam dan memerlukan perlindungan anti-karat untuk memperpanjang usia pakainya. Bobotnya yang cukup besar juga menuntut tumpuan yang kokoh saat pemasangan.

3. Baja (Steel)

Material baja terdiri dari paduan besi dan diperkuat dengan unsur karbon sebesar kisaran 0,03% hingga 2,1% berat baja. Karbon berfungsi untuk mengeraskan baja, dan persentase karbon ini sangat menentukan sifat mekanik akhir baja.

Karakteristik Umum: Baja umumnya lebih kuat, lebih keras, dan lebih tangguh dibandingkan besi murni atau besi tuang. Sifat mekaniknya dapat ditingkatkan secara signifikan melalui berbagai perlakuan panas, yang memanipulasi mikrostruktur internal material. Perlakuan panas, seperti austenitizing, quenching, dan tempering untuk baja karbon tinggi, adalah kunci untuk memanipulasi mikrostruktur dan sifat mekanik baja melampaui komposisi kimia awalnya. Ini menunjukkan bahwa sifat material bukan hanya fungsi dari komposisi, tetapi juga dari proses manufaktur. Berikut adalah jenis-jenis utama baja:

a. Baja Karbon (*Carbon Steel*)

Jenis baja karbon mempunyai komposisi utama yaitu besi dan karbon, dengan sedikit unsur lain. Klasifikasi baja karbon didasarkan pada kadar karbonnya, yang secara langsung memengaruhi sifat mekanik material. Peningkatan kadar karbon umumnya meningkatkan kekuatan dan kekerasan baja, namun pada saat yang sama mengurangi keuletan dan kemampuan lasnya. Pemilihan baja karbon yang tepat melibatkan pertimbangan trade-off ini, memastikan bahwa material yang dipilih sesuai dengan kebutuhan spesifik aplikasi, baik itu untuk kekuatan struktural atau kemampuan bentuk.

i. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel / Mild Steel*)

Baja Karbon Rendah memiliki kandungan karbon $< 0,25\%$ atau berkisar antara $0,1\%$ hingga $0,3\%$.

Sifat: Dikenal karena sifatnya yang lunak, ulet, dan memiliki ketangguhan tinggi. Baja jenis ini sangat mudah dibentuk, mudah dilas, dan mudah diolah menggunakan mesin. Namun, kekerasan dan ketahanan terhadap ausnya relatif rendah. Apabila dilihat dari segi biaya produksi jenis baja karbon rendah termasuk rendah dan sangat efisien. Material ini beresiko minim retak atau patah di bawah beban tinggi dan tekanan.

Aplikasi: Digunakan secara luas dalam pembuatan karoseri otomotif, kerangka bangunan, perpipaan, pagar. Juga menjadi pilihan utama untuk baja tulangan beton, dukungan atap, dinding penahan, dan berbagai komponen otomotif.



Gambar 1. 6. Konstruksi baja

Sumber : <https://nimsteel.co.id/manfaat-dan-kelebihan-konstruksi-baja-untuk-bangunan/>

ii. Baja Karbon Menengah (*Medium Carbon Steel*)

Komposisi: Kadar karbon dengan rentang 0,30% - 0,6% 5 atau 0,25% - 0,55%.

Sifat: Lebih keras dan kuat daripada baja karbon rendah, serta dapat dikeraskan dengan baik melalui perlakuan panas. Namun, baja ini lebih sulit dilas dan dibentuk oleh mesin. Memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi, ketahanan terhadap tekanan dan guncangan, serta ketahanan aus yang tinggi. Ketangguhan dan daktilitasnya juga cukup baik. Apabila baja karbon menengah ini ditambahkan elemen kromium atau molibdenum maka ketahanan korosinya dapat meningkat signifikan.

Aplikasi: Diterapkan pada pembuatan rel kereta api, roda gigi, pegas, poros engkol yang membutuhkan daya tahan tinggi. Baja karbon menengah dapat digunakan material yang berstruktur dengan kandungan tekanan tinggi, tangki dan bejana bertekanan, serta alat pertanian.

iii. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*)

Komposisi: Baja karbon tinggi memiliki kadar karbon di rentang 0,6% - 1,7%.

Sifat: Merupakan jenis baja karbon yang paling keras, kuat, dan ulet dibandingkan baja karbon lainnya. Memiliki kekuatan tarik dan kekerasan yang sangat tinggi, namun keuletan atau kemampuan regangnya lebih rendah. Baja ini memiliki ketahanan panas yang tinggi, tahan aus, dan dapat disepuh. Lebih sulit dilas dan dibentuk dengan mesin dibandingkan baja karbon rendah dan menengah.

Sifat mekanik baja karbon tinggi dapat ditingkatkan melalui proses perlakuan pemanasan melalui proses hardening, tempering, annealing yang disesuaikan dengan kebutuhan produk yang akan diproduksi.

Aplikasi: Pada umumnya jenis baja ini dipergunakan untuk alat-alat perkakas seperti palu, gergaji, pisau, obeng, kunci, kapak, bor, pahat, kikir, dan stempel. Diaplikasikan pada produk kawat baja, kabel baja, pegas, rel kereta api, ban roda kereta api, pisau cukur, jarum, *chisel*, *milling cutter*, dan *reamers*.

b. Baja Paduan (*Alloy Steel*)

Definisi: Pada baja paduan memiliki paduan utama yaitu karbon dan besi agar mendapatkan sifat tertentu yang tidak dapat dicapai oleh baja karbon biasa maka ditambahkan unsur paduan lainnya. Unsur paduan ini dapat mencakup krom, mangan, nikel, sulfur, silikon, fosfor, molibdenum, tungsten, vanadium, dan kobalt.

Klasifikasi: Baja paduan dapat terbagi menjadi 2 jenis yaitu baja paduan rendah memiliki kandungan unsur paduan khusus $< 2,5\%$ berat dan baja paduan tinggi mempunyai kandungan unsur paduan khusus $> 10\%$ berat.

Sifat: Memiliki kekuatan yang lebih tinggi, ketangguhan, ketahanan terhadap korosi, ketahanan aus, dan kemampuan mempertahankan kekerasan pada suhu tinggi. Baja paduan juga menunjukkan kemampuan regang yang lebih baik dibandingkan baja karbon dengan kekuatan yang sama. Penambahan unsur paduan memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap ukuran grain dan stabilitas pada proses pengerasan.

Aplikasi: Jenis baja paduan dapat diaplikasikan pada produk yang memerlukan kekuatan dan ketahanan tinggi, seperti komponen pesawat terbang, komponen mobil balap, mesin industri, komponen mesin (transmisi, crankshaft, roda gigi), struktur pesawat, mesin jet, alat-alat berat (excavator, bulldozer), peralatan energi, dan industri minyak dan gas.

c. Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Definisi: jenis baja HSS memiliki kandungan minimal 10,5% kromium.

Sifat: Kandungan kromium ini memungkinkan pembentukan lapisan pasif oksida pelindung di permukaan, yang memberikan ketahanan luar biasa terhadap korosi dan karat. Baja tahan karat juga memiliki kekuatan tinggi serta tahan suhu tinggi.

Aplikasi: Dapat diaplikasikan dalam industri makanan, kimia, farmasi, serta untuk peralatan dapur, tangki penyimpanan, pipa, peralatan rumah tangga, dan konstruksi

bangunan. Juga ditemukan dalam industri medis, aplikasi kelautan, dan sistem pembuangan otomotif.

Tabel 1. 2. Klasifikasi, Sifat, dan Aplikasi Utama Baja

Jenis Baja	Komposisi Karbon/Paduan Kunci	Sifat Utama	Aplikasi Umum
Karbon Rendah	C < 0.25% (0.1-0.3%)	Lunak, ulet, ketangguhan tinggi, mudah dibentuk/dilas, biaya efektif	Bodi mobil, rangka bangunan, pipa, jembatan, kaleng, rebar, komponen otomotif
Karbon Menengah	C 0.3-0.6% (0.25-0.55%)	Lebih keras & kuat dari rendah, dapat dikeraskan, tahan aus, tahan tekanan	Poros, rel kereta api, roda gigi, pegas, baut, komponen mesin, tangki bertekanan
Karbon Tinggi	C 0.6-1.7%	Paling keras & kuat, kekuatan tarik tinggi, ketahanan panas/aus tinggi, keuletan rendah	Alat perkakas (palu, gergaji, pisau), kawat/kabel baja, pegas, rel kereta api
Paduan	Fe, C + Cr, Mn, Ni, Mo, W, V, Co	Kekuatan, ketangguhan, ketahanan korosi/aus, kekerasan suhu tinggi lebih baik	Pesawat terbang, mobil balap, mesin industri, alat berat, peralatan energi
Tahan Karat	Min. 10.5% Cr	Ketahanan korosi & karat luar biasa,	Industri makanan/kimia/farmasi, peralatan dapur,

Jenis Baja	Komposisi Karbon/Paduan Kunci	Sifat Utama	Aplikasi Umum
		kekuatan tinggi, tahan suhu tinggi	konstruksi, medis, kelautan

1.2.4 Aplikasi Umum Logam Ferrous di Berbagai Industri

Logam ferrous merupakan tulang punggung banyak industri modern karena kombinasi sifat mekanik yang unggul dan biaya yang relatif terjangkau.

Konstruksi: Baja (karbon, paduan, tahan karat) adalah material utama dalam konstruksi modern, digunakan untuk jembatan, bangunan, rangka struktural, pipa, dan tulangan beton. Kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap tekanan menjadikan baja tak tergantikan dalam aplikasi ini.

Otomotif: Digunakan untuk bodi mobil, komponen mesin seperti blok mesin, komponen rem, poros, roda gigi, dan crankshaft. Besi tuang sering digunakan untuk komponen rem dan blok mesin karena daya tahan dan efektivitas biayanya.

Manufaktur dan Peralatan Berat: Baja perkakas, baja karbon, dan besi cor digunakan untuk cetakan pemotong, berbagai peralatan, mesin berat, rol, dan alat pertanian karena kekuatan dan ketahanan ausnya yang luar biasa dalam kondisi pabrik yang keras.

Infrastruktur: Jaringan pipa baja sangat penting untuk transportasi air, minyak, dan gas jarak jauh karena ketahanan dan kekuatan tariknya. Demikian pula,

infrastruktur rel kereta api memanfaatkan keawetan dan kapasitas menahan beban baja yang luar biasa.

1.3 Logam Non-Ferrous

1.3.1 Definisi dan Komposisi Dasar

Logam non-ferrous merupakan jenis logam yang komponen utamanya tidak mengandung besi (Fe). Jika ada, kandungan besi sangat kecil, umumnya kurang dari 1% berat. Kelompok ini mencakup berbagai macam logam murni dan paduan yang didominasi oleh unsur-unsur selain besi, seperti aluminium, tembaga, timah, seng, timbal, nikel, dan titanium, serta logam mulia seperti emas, perak, dan platina.

1.3.2.. Karakteristik Umum Logam Non-Ferrous

Logam non-ferrous memiliki karakteristik yang sangat beragam dan seringkali melengkapi kekurangan logam ferrous:

Sifat Fisik: Umumnya memiliki kepadatan rendah dan ringan. Banyak di antaranya memiliki kilau yang menarik, seperti putih keperakan (aluminium, perak, platina, timah), kemerahan (tembaga), atau kuning (emas, kuningan).

Konduktivitas: Sebagian besar adalah konduktor listrik dan termal yang sangat baik. Tembaga, misalnya, menempati urutan kedua sebagai konduktor listrik terbaik setelah perak.

Ketahanan Korosi: Ciri khas utama adalah ketahanan yang sangat baik terhadap korosi dan karat. Ketahanan ini seringkali disebabkan oleh pembentukan lapisan oksida

pasif yang kuat di permukaannya, seperti pada aluminium dan titanium yang berfungsi untuk memberikan perlindungan berkelanjutan terhadap korosi pada logam dasar. Mekanisme perlindungan diri ini merupakan keunggulan intrinsik yang membedakannya dari sebagian besar logam ferrous yang cenderung berkarat.

Sifat Mekanik: Sifat mekanik bervariasi; pada umumnya kekuatan tarik logam non-ferrous murni kurang baik. Namun, sifat ini dapat diperbaiki secara signifikan dengan memadukannya, memungkinkan peningkatan kekerasan dan kekuatan tarik. Logam non-ferrous umumnya lebih mudah ditempa dan ulet dibandingkan banyak logam ferrous.

Sifat Magnetik: Sebagian besar logam non-ferrous bersifat non-magnetis, menjadikannya ideal untuk aplikasi isolasi listrik dan elektronik di mana medan magnet dapat mengganggu. Namun, perlu dicatat adanya pengecualian seperti nikel, yang bersifat feromagnetik meskipun termasuk dalam kategori non-ferrous.

Penting untuk dicatat bahwa meskipun beberapa sumber mungkin menyajikan informasi yang tidak akurat, seperti klaim bahwa logam non-ferrous tidak dapat menghantarkan listrik atau mudah pecah, konsensus dalam ilmu material, yang didukung oleh banyak sumber terpercaya, menegaskan bahwa sebagian besar logam non-ferrous adalah konduktor yang sangat baik dan memiliki kemampuan bentuk yang tinggi. Kehati-hatian dalam memvalidasi informasi dari berbagai sumber adalah praktik penting dalam penelitian teknis.

3.3.3 Klasifikasi dan Jenis-jenis Utama Logam Non-Ferrous

1. Aluminium (Al)

Bahan pembentuk aluminium antara lain :

1. Bauksit : hidroksid aluminium ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
2. Kreolit:florid aluminium natrium ($\text{AlF}_3 \cdot 3\text{NaF}$)

Sifat:

1. Warna : putih kebiru-biruan
2. Struktur kristal : FCC dengan $a: 4,0414^\circ$
3. Titik cair rendah : 658°C
4. Logam yang ringan : berat jenis 2,72
5. Ultimate strength : $8\text{-}10 \text{ kp/mm}^2$
6. Logam yang lunak dengan kekerasan 20 BHN
7. Penahan korosi yang baik karena terbentuknya lapisan Al_2O_3 pada permukaannya
8. Penghantar panas dan listrik yang baik
9. Mudah dikerjakan dalam keadaan dingin

Logam ringan dengan kepadatan rendah, sekitar sepertiga dari baja. Aluminium lunak, non-magnetis, dan ulet. Memiliki afinitas tinggi terhadap oksigen, membentuk lapisan oksida pasif yang kuat di permukaan saat terpapar udara, yang memberikan ketahanan korosi yang sangat baik. Aluminium berfungsi konduktor panas serta listrik yang baik.



Gambar 1. 7. Aluminium

Sumber: <https://antaratetapjaya.co.id/produk/plat-aluminium/>

Aplikasi: Karena kombinasi sifat ringan, kekuatan yang baik (terutama dalam paduan), dan ketahanan korosi, aluminium banyak digunakan dalam industri penerbangan (pesawat terbang), otomotif (mobil), dan konstruksi (bangunan, jembatan, atap). Selain itu, aplikasi lain meliputi kemasan (kaleng minuman, aluminium foil), peralatan masak, elektronik, saluran listrik, dan peralatan medis.

2. Tembaga (Cu) dan Paduannya (Kuningan, Perunggu)

Tembaga Murni

Tembaga diperoleh dari bijih-bijih tembaga yaitu

- a) Koperkies (CuFeS_2) : $\pm 34\%$ tembaga
- b) Kilap tembaga (Cu_2S) : $\pm 79\%$ tembaga
- c) Malasit ($\text{CuCo}_3\text{Cu(OH)}_2$) : $\pm 57\%$ tembaga

Sifat:

- 1. Struktur kristal FCC dengan $a = 3,607 \text{ \AA}$,
- 2. Titik cair/lebur : 1830°C ,
- 3. Berat jenis : $8,93 \text{ g/cm}^3$.
- 4. Ultimate strength : $23\text{-}25 \text{ kp/mm}^2$

5. Kekerasan : 30-40 BHN

Logam berwarna coklat kemerahan, mudah ditempa, liat, dan merupakan penghantar panas serta listrik yang sangat baik. Tembaga membentuk patina hijau di permukaannya seiring waktu, yang berfungsi melindungi logam dari korosi lebih lanjut. Meskipun relatif lunak, ketangguhan tembaga dapat ditingkatkan secara signifikan melalui paduan.



Gambar 1. 8. Tembaga

Sumber :

<https://www.kajianpustaka.com/2020/09/tembaga.html>

Aplikasi: Digunakan secara luas dalam pembuatan kabel listrik, komponen elektronik, sistem pendingin, penukar panas, dan perpipaan konstruksi listrik. Juga ditemukan dalam peralatan, kendaraan, arsitektur (atap, fitur dekoratif), dan tangki air panas.

Kuningan (Brass)

Definisi: Kuningan secara umum merupakan paduan antara tembaga dan seng. Tembaga memiliki kandungan seng (Zn) dengan prosentase mencapai 39% dengan phase tunggal (phase α) yang merupakan larutan padat Zn dalam tembaga.

Prosentase Zn di dalam tembaga 39-50%, maka akan timbul phase baru yang dinamakan phase β yang merupakan larutan zat padat Zn dalam ikatan elektrosatik CuZn.

Kuningan ber phase α dapat dikerjakan pada temperatur kamar (20-25°C, *cold working*) dan akan rapuh pada temperatur 300-700°C. Sedangkan kuningan dengan fase β tidak dapat dikerjakan dalam keadaan dingin karena rapuh.



Gambar 1. 9. Kuningan

Sumber : https://www.theengineeringchoice-com.translate.goog/what-is-brass-its-properties-types-and-uses/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs

Sifat: Lebih keras dan lebih tahan lama daripada tembaga murni, memiliki ketahanan korosi yang baik, dan kemampuan mesin yang baik. Warnanya bervariasi dari kuning hingga emas, tergantung komposisi paduannya.

Aplikasi: Digunakan untuk sekrup, lampu, kenop pintu, perlengkapan mandi dan wastafel, alat musik, dan komponen perpipaan.

Perunggu (Bronze):

Definisi: Paduan tembaga dengan timah, dan dapat juga mengandung unsur lain seperti seng, timbal, aluminium, mangan, atau nikel.



Gambar 1. 10. Tin Bronze

Sumber: <https://compraco.com.br/en/blogs/industria/12-tipos-de-bronze-que-voce-deve-conhecer?srsId=AfmBOopwYlbuxXSwErZlbGob6i2g4sG-OmbayZ1mbIOFtwDnxHFTjhDt>

Sifat: Umumnya lebih kuat dan memiliki ketahanan aus yang lebih baik daripada kuningan, sehingga cocok untuk tugas berat. Warnanya cenderung merah atau cokelat dengan kilau yang lebih rendah dari tembaga murni yang dipoles.

Aplikasi: Digunakan untuk bantalan, patung, barang dekoratif, dan aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap cuaca buruk dan gaya erosi.

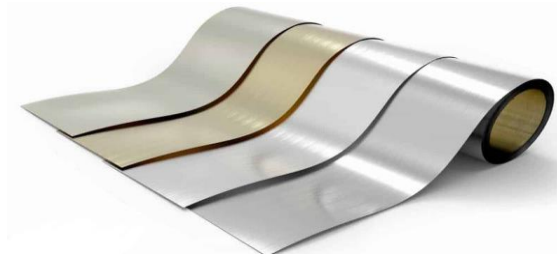
3. Timah (Sn)

Timah merupakan oksida timah putih (Sn O_2)

Sifat:

- a. Warna putih mengkilat
- b. Struktur kristal tetragonal dengan konstanta 3,1753 Å dan 5,3194 Å (β) < 18° C
- c. Titik cair sangat rendah $\pm 232^\circ$ C
- d. Logam yang cukup berat dengan BJ: 7,28 gr/cm³
- e. Kekuatan tarik sangat rendah τ_u : 2,5 kp/mm²
- f. Kekerasan sangat rendah : 5 BHN
- g. Dapat dikerjakan dalam keadaan dingin dengan di roll menjadi plat yang sangat tipis

Timah merupakan material logam yang berwarna putih keperakan, lunak, sangat ringan, dan mudah meleleh dengan titik leleh rendah (231,9°C). (Novita, 2019) .Karena sifatnya yang lunak, timah jarang digunakan dalam bentuk murni melainkan sering dipadukan dengan logam lain. Timah memiliki toksisitas rendah, ketahanan tinggi terhadap korosi dan oksidasi, serta konduktivitas listrik dan termal yang baik. Material ini juga dapat ditempa dan ulet.



Gambar 1. 11. Timah

Sumber: <https://shasolo.com/mengenal-tin-plating-proses-pelapisan-timah-dan-aplikasinya-dalam-industri/>

Aplikasi: Berfungsi untuk pelapis lembaran misal pelat timah dan dalam industri pengawetan makanan contohnya

pembuatan kaleng. Aplikasi lain meliputi kabel superkonduktor, solder (untuk elektronik dan pipa), paduan (seperti perunggu, tembaga, timbal, seng, antimon), pembuatan kaca (proses *float glass*), pigmen pewarna (timah putih), bahan kimia anti-fouling untuk kapal, elektroda baterai (Li-ion), bantalan, suku cadang kendaraan bermotor, reaktor nuklir, pelindung radiasi (sinar X), peralatan musik (senar gitar), peralatan olahraga (bola bowling), serta atap dan talang air.

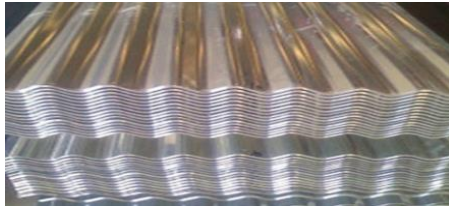
d) Seng (Zn)

Bijih-bijih seng diperoleh dari

- a. Spat seng yakni karbonat seng (ZnCO_3)
- b. Sulfid seng (ZnS)
- c. Bahan pematannya berupa Al (3,5-4,5%), Cu (0-3,5%) dan sedikit Mg (0-0,1%)

Sifat

- a. Warna abu-abu putih
- b. Struktur kristal close packed hexagonal dengan konstanta: $a=2,6595 \text{ \AA}$ dan $c=4,9368 \text{ \AA}$
- c. Titik cair rendah : 419°C
- d. Logam yang cukup berat jenis $7,12 \text{ gr/cm}^3$
- e. Tahan terhadap korosi
- f. Logam yang rapuh, seperti dapat di roll maupun di tempa bila dipanaskan pada suhu $\pm 150^\circ\text{C}$ tanpa menjadi rapuh kembali bila didinginkan.
- g. Paduan seng lebih murah dan sangat baik dalam proses penuangan.



Gambar 1. 12. Seng

Sumber <http://www.wibindomakmur.com/home/productDetail/17/name/seng%2Bgelombang%2Bsniseng%2Bwarna%2Bppgl>

Aplikasi: Terutama digunakan dalam proses galvanisasi untuk melapisi dan melindungi logam ferrous dari korosi. Selain itu, seng juga digunakan dalam pembuatan baterai, logam campuran (misalnya kuningan), alat-alat ukur, bagian-bagian mesin, dan kosmetik.

5. Timbal (Pb)

Bijih-bijih penyusun timah hitam antara lain:

- a. Kelap timbel yang merupakan Sulfittimbel (PbS)
- b. Bijih timbel putih (PbCO_3)

Sifat:

- a. Warna abu-abu gelap
- b. Struktur kristal FCC dengan $4,4927 \text{ \AA}$
- c. Titik cair rendah : 327°C
- d. Logam yang berat dengan berat jenis: 11.34 gr/cm^3
- e. Kekuatan tarik rendah $u = 2 \text{ kp/mm}^2$
- f. Kekuatan rendah 4 BHN
- g. Tahan terhadap korosi udara

Timbal memiliki titik lebur yang rendah dan menunjukkan ketahanan korosi yang baik terhadap air dan asam. Namun, perlu dicatat bahwa timbal memiliki konduktivitas listrik yang rendah dan tergolong sebagai logam berat yang bersifat racun.

Aplikasi: berfungsi dalam pembuatan komponen kabel, material baterai serta bahan pengisi. Karena sifatnya yang tahan korosi dan kemampuannya meredam suara serta radiasi, timbal juga digunakan sebagai perisai radiasi pada sinar X dan reaktor nuklir, serta dalam amunisi.

6. Nikel (Ni)

Bijih nikel mengandung garnirit yang merupakan paduan silikat-magnesium-nikel. Disamping itu terdapat sulfida dengan tercampur bijih besi dan tembaga.

Sifat:

- a. Warna putih
- b. Struktur kristal FCC dengan $a = 3,512 \text{ \AA}$
- c. Titik cair tinggi 1453°C
- d. Logam yang berat dengan berat jenis $8,7 \text{ gr/cm}^3$
- e. Sangat tahan karat
- f. Kekuatan tarik cukup tinggi 30 kp/mm^2
- g. Dapat dikerjakan baik dalam keadaan dingin dan panas

Nikel adalah logam yang dikenal karena ketahanan korosinya yang baik. Uniknya, meskipun termasuk dalam kategori non-ferrous, nikel adalah salah satu dari sedikit logam non-ferrous yang bersifat feromagnetik,

menjadikannya pengecualian penting dalam sifat magnetik umum kategori ini.



Gambar 1. 13. Nikel

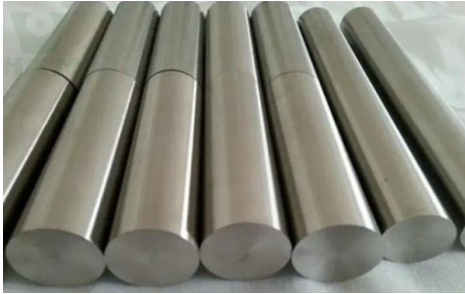
Sumber : <https://www.theengineeringchoice.com/what-is-nickel-its-alloys-properties-and-uses/>

Aplikasi: Digunakan secara luas dalam pembuatan paduan, terutama sebagai komponen penting dalam baja tahan karat untuk meningkatkan ketahanan korosi dan sifat uletnya. Selain itu, nikel juga berperan penting dalam produksi baterai, perangkat elektronik, dan pemrosesan kimia.

7. Titanium (Ti)

Sifat: Titanium termasuk logam ringan karena memiliki rasio kekuatan-terhadap-berat yang sangat tinggi, kepadatan rendah, ulet (terutama dalam lingkungan bebas oksigen), berwarna putih metalik sehingga titanium berkilau. Memiliki titik lebur tinggi ($1,668^{\circ}\text{C}$). Meskipun paramagnetik, konduktivitas listrik dan termalnya relatif rendah dibandingkan logam lain seperti tembaga atau aluminium. Salah satu sifat paling menonjol adalah kemampuannya membentuk lapisan oksida pasif yang

sangat protektif di permukaannya, memberikan ketahanan korosi yang sangat baik terhadap asam pengoksidasi, larutan klorida, dan asam organik.



Gambar 1. 14. Titanium

Sumber. <https://id.huaxiaometal.com/produk-baja/baja-paduan-khusus/paduan-titanium.html>

Aplikasi: Karena kombinasi kekuatan tinggi, ringan, dan ketahanan korosi yang luar biasa, titanium banyak digunakan dalam industri penerbangan (pesawat luar angkasa, kerangka sepeda, struktur pesawat, mesin jet), otomotif, dan konstruksi. Biokompatibilitasnya yang tinggi menjadikannya material pilihan dalam peralatan medis (misalnya implan). Selain itu, digunakan dalam pemrosesan kimia, teknik kelautan, dan pompa sublimasi titanium sebagai scavenger gas dalam sistem vakum ultra-tinggi.

8. Logam Mulia (Emas, Perak, Platina)

Definisi Umum: Logam mulia memiliki sifat yang khas yaitu berkilau, tahan aus, tahan korosi dan oksidasi, titik lebur dan titik didih yang tinggi. Kelangkaannya di alam menjadikannya sangat berharga.

Emas (Au):

Sifat: Logam mulia yang paling dikenal, memiliki warna kuning khas dan sangat lunak dalam bentuk murni. Emas bersifat kuat, tahan korosi atau oksidasi, tidak mudah teroksidasi serta penghantar panas dan listrik yang baik. Material emas dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan.



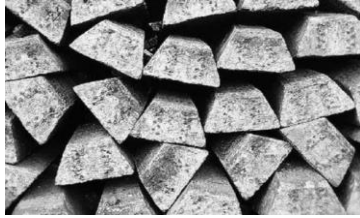
Gambar 1. 15. Emas

Sumber. <https://www.antam.com/id/products/emas>

Aplikasi: Paling sering digunakan dalam perhiasan, alat elektronik, industri farmasi dan kimia. Emas juga kadang digunakan sebagai bahan pengisi gigi dan pelapis untuk scan mikroskop elektron. Selain itu, emas adalah aset investasi yang sangat diandalkan karena nilainya yang stabil dan kemampuannya sebagai safe haven terhadap inflasi.

Perak (Ag):

Sifat: Jenis material non logam mengkilap, berwarna putih dan sebagai konduktor listrik terbaik di antara semua logam dan tidak mengalami proses korosif.



Gambar 1. 16. Perak

Sumber: <https://www.cnbcindonesia.com/research/20250419075003-128-627079/tak-banyak-yang-tahu-ternyata-ri-raksasa-dunia-penghasil-perak>

Aplikasi: Digunakan dalam perhiasan, peralatan makan, kontak listrik, dan pembuatan cermin.

Platina (Pt):

Sifat: Logam mulia berwarna putih keperakan. Memiliki titik lebur yang sangat tinggi ($1768,3^{\circ}\text{C}$ - 1772°C) dan titik didih yang tinggi (3800°C - 3825°C), serta densitas tinggi (21.45 g/cm^3). Platina sangat tahan korosi dan oksidasi, sangat tidak reaktif, dan stabil secara kimia sehingga pada proses reaksi kimia, material platina dapat digunakan katalis.



Gambar 1. 17. Platina

Sumber: https://metalsedge-com.translate.goog/what-is-platinum-used-for/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=id&_x_tr_hl=id&_x_tr_pto=imgs

Aplikasi: Digunakan dalam perhiasan, barang-barang elektronik (misalnya sebagai katalis dalam sel bahan bakar), dan sebagai katalisator dalam peralatan anti polusi mobil. Platina juga digunakan untuk melapisi kerucut misil dan komponen mesin jet yang mengandalkan ketahanan pada suhu tinggi. Meskipun dapat dijadikan instrumen investasi, harganya cenderung kurang stabil dibandingkan emas atau perak.

Tabel 1. 3. Sifat dan Aplikasi Logam Non-Ferrous

Jenis Logam	Warna	Densitas (relatif)	Konduktivitas Listrik/Termal	Ketahanan Korosi	Sifat Mekanik Kunci	Sifat Magnetik	Aplikasi Umum
Aluminium (Al)	Putih Keperakan	Rendah (ringan)	Sangat baik	Sangat baik (lapisan oksida pasif)	Lunak, ulet, dapat ditempa	Non-magnetis	Penerbangan, otomotif, konstruksi, kemasan, elektronik
Tembaga (Cu)	Coklat Kemerahan	Sedang	Sangat baik (terbaik ke-2)	Baik (patina verdigris)	Mudah ditempa, liat, lentur, lunak	Non-magnetis	Kabel listrik, elektronik, penukar panas, perpipaan, otomotif
Timah (Sn)	Putih Keperakan	Rendah (ringan)	Baik	Sangat baik	Lunak, ulet, dapat ditempa	Non-magnetis	Pelapis kaleng, solder, paduan, kaca, baterai, medis
Seng (Zn)	Putih Kebiruan	Sedang	Baik	Baik	Sedang	Non-magnetis	Galvanisasi, baterai, paduan (kuningan), kosmetik 3
Timbal (Pb)	Biru Keabu-abuan	Tinggi (berat)	Rendah	Sangat baik (terhadap air/asam)	Lunak, sangat liat, tidak dapat ditempa	Non-magnetis	Kabel, baterai, atap, perisai radiasi, pipa, cat
Nikel (Ni)	Putih Keperakan	Sedang	Baik	Sangat baik	Tahan Korosi, kuat (paduan)	Fero magnetik (penguculan)	Paduan (baja tahan karat), baterai, elektronik, Pemrosesan kimia
Titanium	Putih metalik	Rendah	Relatif rendah	Sangat baik (lapisan)	Kekuatan-berat	Para Magnet	Penerbangan, otomotif,

Jenis Logam	Warna	Densitas (relatif)	Konduktivitas Listrik/Termal	Ke-tahan-an Korosi	Sifat Mekanik Kunci	Sifat Magnetik	Aplikasi Umum
(Ti)		(ringan)		Oksida pasif)	tinggi, kuat, ulet	ik	medis, kimia, kelautan
Emas (Au)	Kuning terang	Tinggi (berat)	Sangat baik	Sangat baik (tidak teroksidasi)	Sangat Lunak (murni), mudah dibentuk, kuat	Non -magnet is	Perhiasan, elektronik, medis, investasi
Perak (Ag)	Putih Meng kilap	Tinggi (berat)	Terbaik	Sangat Baik (tidak korosif)	Lunak, mudah dibentuk	Non-magnetis	Perhiasan, Peralatan makan, kontak listrik, cermin , investasi
Platina (Pt)	Putih Keperakan	Sangat tinggi	Baik	Sangat baik (tidak reaktif)	Keras, mudah dibentuk	Non-Magnet is	Perhiasan, elektronik (katalis), katalisator, medis

1.3.4 Aplikasi Umum Logam Non-Ferrous di Berbagai Industri

Logam non-ferrous dapat diaplikasikan dalam berbagai komponen di bidang industri apabila kebutuhan produk yang diproduksi mempunyai sifat-sifat spesifik yang tidak dimiliki oleh logam ferrous.

Penerbangan dan Otomotif: Aluminium dan titanium sangat penting dalam industri ini karena sifat ringan dan kuat. Penggunaan material ringan ini secara signifikan berkontribusi pada efisiensi bahan bakar dan peningkatan kinerja.

Elektronik dan Listrik: Tembaga (untuk kabel dan komponen), aluminium (untuk kabel udara), emas, perak, dan platina (untuk kontak listrik dan konektor) sangat diandalkan karena konduktivitas listrik dan termal yang sangat baik. Sifat non-magnetis sebagian besar logam non-

ferrous juga menjadikannya ideal untuk aplikasi isolasi listrik dan elektronik.

Konstruksi: Aluminium digunakan untuk struktur dan atap, timbal untuk pipa dan atap, tembaga untuk perpipaan dan atap, dan seng untuk galvanisasi baja. Ketahanan korosi dan bobot ringan aluminium menjadikannya pilihan yang ekonomis dan tahan lama untuk fasad bangunan dan struktur ringan.

Kemasan: Aluminium digunakan untuk kaleng minuman dan untuk mencegah korosi dan melindungi isi dalam kaleng maka timah digunakan sebagai pelapis kaleng makanan.

Medis: Titanium digunakan untuk implan biokompatibel karena ketahanan korosinya dan kompatibilitas dengan tubuh manusia. Emas, perak, dan platina juga digunakan dalam peralatan medis dan amalgam gigi.

Perhiasan dan Investasi: Emas, perak, dan platina sangat dihargai dalam industri perhiasan dan sebagai aset investasi karena kelangkaan, keindahan, dan ketahanan korosinya yang luar biasa.

1.4 Perbandingan Logam Ferrous dan Non-Ferrous

1.4.1 Perbedaan Utama

Perbedaan mendasar antara logam ferrous dan non-ferrous terletak pada komposisi kimia dan sifat-sifat yang diturunkannya. Tabel 1.4 merangkum perbedaan utama ini.

Tabel 1. 4. Perbandingan Sifat Umum Logam Ferrous dan Non-Ferrous

Kriteria Perbandingan	Logam Ferrous	Logam Non-Ferrous
Komposisi Besi	Mengandung besi sebagai komponen (0.03% hingga >2.14% karbon)	Tidak mengandung besi atau hanya jumlah sangat kecil (<1% Fe)
Sifat Magnetik	Sebagian besar bersifat magnetis	Sebagian besar bersifat non-magnetis (kecuali nikel)
Ketahanan Korosi	Rentan terhadap korosi/karat (kecuali baja tahan atau diberi pelapis)	Umumnya sangat tahan korosi (membentuk lapisan oksida pasif)
Kekuatan Tarik	Umumnya lebih tinggi (terutama baja)	Umumnya lebih rendah dalam bentuk murni, dapat ditingkatkan dengan paduan

Kriteria Perbandingan	Logam Ferrous	Logam Non-Ferrous
Kepadatan/Berat	Lebih padat dan berat	Umumnya lebih rendah dan ringan
Biaya Relatif	Umumnya lebih terjangkau	Umumnya lebih mahal
Konduktivitas Listrik/Termal	Bervariasi, umumnya lebih rendah dari non-ferrous konduktor tinggi	Umumnya sangat (terutama tembaga, alum emas, perak)

Perbedaan dalam sifat magnetik antara kedua kategori ini tidak hanya menjadi metode identifikasi praktis, tetapi juga pendorong utama dalam aplikasi spesifik. Keberadaan besi pada logam ferrous menyebabkan sifat magnetis yang kuat, menjadikannya pilihan ideal untuk transformator dan motor listrik. Sebaliknya, sifat non-magnetis sebagian besar logam non-ferrous sangat krusial untuk aplikasi elektronik di mana medan magnet dapat mengganggu. Pengecualian seperti nikel, yang bersifat feromagnetik meskipun non-ferrous, menunjukkan kompleksitas dan nuansa dalam klasifikasi material, di mana pemahaman yang mendalam tentang sifat atomik fundamental memiliki implikasi makroskopik yang luas dalam rekayasa.

1.4.2 Kelebihan dan Kekurangan Masing-masing Kategori

Logam Ferrous

Kelebihan:

Biaya Efektif: Logam ferrous umumnya lebih terjangkau dibandingkan logam non-ferrous karena ketersediaan bijih besi yang melimpah dan metode produksi yang relatif sederhana.

Kekuatan dan Kekerasan Tinggi: Logam ferrous, terutama baja, dikenal karena kekuatan tarik dan kekerasan yang sangat tinggi, menjadikannya material pilihan untuk aplikasi penahan beban dan struktural yang membutuhkan ketahanan tinggi.

Batas Daya Tahan Terhadap Kelelahan: Beberapa paduan ferrous menunjukkan batas daya tahan yang jelas terhadap kelelahan, yang sangat penting untuk aplikasi dengan siklus beban tinggi yang memerlukan umur panjang.

Kemampuan *Case Hardening*: Untuk meningkatkan daya tahannya, sejumlah paduan ferrous dapat mengalami pengerasan permukaan (*case-hardening*) dengan nitridasi atau karburasi sehingga material yang dihasilkan memiliki struktur inti yang ulet dengan lapisan luar yang kuat dan tahan gesek.

Daur Ulang Efisien: Logam ferrous mudah didaur ulang, dan proses daur ulangnya membutuhkan lebih sedikit energi dibandingkan produksi dari bijih baru.

Kekurangan:

Rentan Korosi: Kelemahan utama logam ferrous adalah kerentanannya terhadap korosi dan karat ketika terpapar oksigen dan kelembaban. Meskipun baja tahan karat memiliki ketahanan korosi yang lebih baik berkat penambahan kromium, jenis ferrous lainnya memerlukan perlindungan tambahan seperti galvanisasi atau pelapisan khusus untuk mencegah karat.

Variasi Sifat: Sifat logam ferrous sangat bervariasi tergantung pada komposisi paduan dan perlakuan panasnya, sehingga tidak ada satu set pro dan kontra yang berlaku untuk semua paduan ferrous.

Kepadatan Tinggi: Kepadatan yang lebih tinggi dapat menjadi kekurangan dalam aplikasi yang membutuhkan material ringan, seperti di industri kedirgantaraan.

Logam Non-Ferrous

Kelebihan:

Ketahanan Korosi Unggul: Logam non-ferrous umumnya menunjukkan tahan korosi dan karat. Hal ini disebabkan oleh pembentukan lapisan oksida pasif yang kuat di permukaannya, menjadikannya ideal untuk lingkungan yang korosif.

Ringan: Banyak logam non-ferrous memiliki kepadatan rendah dan ringan, sehingga sering digunakan di industri kedirgantaraan dan otomotif.

Konduktivitas Listrik dan Termal yang Sangat Baik: Logam non-ferrous seperti tembaga, aluminium, emas, dan

perak merupakan konduktor listrik serta thermal sehingga menjadi pilihan utama dalam pembuatan part elektronik, kabel, dan peralatan yang membutuhkan proses perpindahan panas.

Non-Magnetis: Sebagian besar logam non-ferrous bersifat non-magnetis, yang sangat bermanfaat dalam aplikasi elektronik di mana medan magnet dapat mengganggu perangkat sensitif.

Kemampuan Bentuk Tinggi: Umumnya mudah ditempa dan dibentuk, memungkinkan pembuatan komponen dengan desain yang rumit.

Kekurangan:

Biaya Lebih Mahal: Logam non-ferrous umumnya lebih mahal daripada logam ferrous. Meskipun demikian, nilai intrinsik yang tinggi dan efisiensi daur ulang untuk beberapa jenis (misalnya aluminium dan tembaga) dapat mengimbangi biaya awal ini, menjadikannya pilihan yang berharga dalam jangka panjang.

Kekuatan Terbatas: Dalam bentuk murni, banyak logam non-ferrous memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih rendah dibandingkan baja berkekuatan tinggi, sehingga tidak selalu cocok untuk aplikasi beban berat yang membutuhkan kekuatan struktural maksimal.

Ketiadaan Sifat Magnetik: Sifat non-magnetis, meskipun sering menjadi kelebihan, dapat menjadi kekurangan dalam aplikasi yang secara spesifik membutuhkan sifat magnetik, seperti dalam motor atau transformator.

1.5 Metode Identifikasi Logam Ferrous dan Non-Ferrous

Dalam praktik rekayasa dan industri, membedakan antara logam *ferrous* dan *non-ferrous* adalah langkah awal yang krusial untuk proses daur ulang, pemilihan material, atau pengerjaan lebih lanjut. Beberapa metode identifikasi yang umum digunakan meliputi:

1.5.1 Uji Magnet

Uji magnet adalah metode yang paling sederhana dan cepat untuk membedakan logam ferrous dari non-ferrous.



Gambar 1. 18. *Magnetic particle test*

<https://www.detch.co.id/magnetic-particle-test/>

Prinsip: Logam ferrous mengandung besi sebagai komponen utama, yang bersifat feromagnetik, sehingga akan menempel pada magnet.⁶ Sebaliknya, sebagian besar logam non-ferrous tidak mengandung besi dan oleh karena itu tidak akan menarik magnet.

Penerapan: Jika magnet menempel pada material, kemungkinan besar itu adalah baja atau besi tuang (ferrous).

Jika magnet tidak menempel, material tersebut kemungkinan besar adalah logam non-ferrous seperti tembaga, kuningan, aluminium, atau timah.

Penting untuk diingat bahwa ada pengecualian, seperti baja tahan karat tertentu (misalnya seri 300) yang mungkin tidak terlalu magnetis, atau nikel yang bersifat feromagnetik meskipun non-ferrous.

1.5.2 Uji Percikan Bunga Api (*Spark Test*)

Uji percikan bunga api adalah metode visual yang digunakan untuk mengklasifikasikan berbagai jenis baja paduan berdasarkan komposisi kimianya, khususnya kandungan karbon.



Gambar 1. 19. Spark Test

Sumber: <https://www.metalsupermarkets.co.uk/what-is-the-spark-test/>

Prinsip: Ketika benda uji digerinda dengan roda gerinda yang berputar, beram hasil potongan bahan uji akan memercik dan terbakar dikarenakan oksidasi terhadap udara luar, sehingga menghasilkan percikan bunga api yang khas. Bentuk, warna, panjang, dan jumlah percikan bunga api ini memberikan indikasi tentang komposisi material.

Penerapan:

Logam Ferrous vs. Non-Ferrous: Logam ferrous akan menghasilkan percikan bunga api saat digerinda karena mengandung unsur karbon dan besi yang mudah teroksidasi. Sebaliknya, logam non-ferrous umumnya tidak akan menghasilkan percikan bunga api yang signifikan karena tidak mengandung unsur karbon atau besi dalam jumlah yang cukup untuk reaksi pembakaran yang terlihat.

Kandungan Karbon dalam Logam Ferrous:

- a. Baja Karbon Rendah: Percikan cenderung lurus dan tidak bercabang.
- b. Baja Karbon Menengah: Percikan bergerak lurus dengan percabangan yang sedikit serta terbentuk bunga api pada ujung percikan.
- c. Baja Karbon Tinggi: Percikan bercabang-cabang serta terbentuk bunga api berjumlah banyak pada ujung cabang.

Keunggulan: Metode ini relatif mudah dan murah dibandingkan dengan metode analisis kimia yang lebih kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- Anrinal, H. (2013). *Metalurgi fisik*. ANDI.
- Balubun, F. D., & Suriansyah. (2018). Pengaruh *austemper ductile iron* terhadap kekerasan dan struktur mikro *ductile cast iron* (Fcd-45). *Proton: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Mesin*.
- Domke. (n.d.). *Werkstoffkunde und werkstoffprüfung*. Verlag W. Girardet.
- Fardhilah, N. (2019). *Memahami unsur, senyawa dan campuran*. ALPRIN.
- Hess, R. (n.d.). *Wärmebehandlung*. Firma SIG Swiss.
- Junying Metal Manufacturing Company Limited. (2002). *Company profile*. <https://www.diecasting-mould.com/>
- Prasetyo, A. B., Sutowo, C., Rokhmanto, F., & Arrasyid, M. I. (2024). Pengenalan material logam dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari di Karang Taruna Perumahan Puspipetek. *Garda: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang, Tangerang Selatan – Indonesia.
- Setyana, L. D. (2015). Studi ukuran grafit besi cor kelabu terhadap laju keausan pada produk blok rem metalik kereta api. *Jurnal Material Teknologi Proses*, 1(1).
- Shackelford, J. F. (2021). *Introduction to materials science for engineers*. Pearson Education.
- Shofi, A., Astuti, W., & Nurjaman, F. (2013). Karakteristik struktur mikro dan sifat mekanik besi tuang putih paduan krom tinggi hasil *thermal hardening* untuk aplikasi *grinding ball*. *Majalah Metalurgi*, 28(3), 177–184.

- Samlawi, A. K., & Siswanto, R. (2016). *Material teknik*. Universitas Lambung Mangkurat.
- Surdia, T., & Chijiiwa, K. (1996). *Teknik pengecoran logam*. Pradnya Paramita.
- Surdia, T., & Saito, S. (1992). *Pengetahuan bahan teknik*. Pradnya Paramita.
- Wahyudin, & Surasno. (1997). Bola gerus (*grinding ball*) dan permasalahannya. *Jurnal Berita Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, 10, 35–37.

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

BAB 2

STRUKTUR ATOM, KRISTAL, DAN CACAT KRISTAL PADA LOGAM

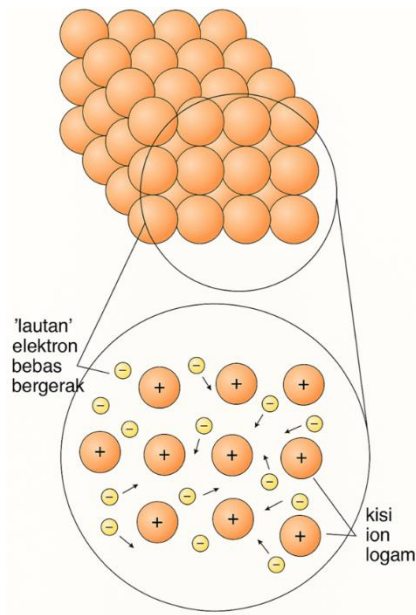
Oleh Akram La Kilo

2.1 Pendahuluan

Struktur atomik dan kristal logam berperan krusial dalam menentukan sifat-sifat fisis (seperti konduktivitas listrik, titik leleh) dan sifat mekanis (misalnya kekuatan, keuletan, dan kekerasan) dari logam. Ikatan logam dengan “lautan elektron” yang bebas bergerak memberi logam ciri khas: mampu menghantarkan listrik/kalor dengan baik, serta dapat ditempa atau diregangkan tanpa patah. Di sisi lain, susunan kristal (misalnya BCC, FCC, HCP) memengaruhi bagaimana lapisan atom dapat bergeser satu sama lain (melalui slip atau kembaran), sehingga berdampak pada kemudahan deformasi plastis, kekuatan, dan keuletan material. Laporan ini menguraikan hubungan tersebut secara teoritis, memberikan contoh spesifik (besi, aluminium, tembaga, dll.), dan meninjau temuan ilmiah terbaru di bidang metalurgi fisik mengenai struktur atom/cacat kristal dan sifat mekanik logam.

2.2 Struktur Atom dan Sifat Fisik Logam

Logam tersusun dari atom-atom yang terikat melalui ikatan logam, yaitu jaringan kation logam yang dikelilingi oleh elektron valensi yang terdelokalisasi sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.1** Elektron-elektron bebas ini bergerak dengan leluasa di antara ion-ion logam, membentuk “lautan elektron” yang menstabilkan struktur logam (La Kilo, 2018).



Gambar 2. 1. Struktur atom-atom logam yang membentuk ikatan logam.

(Diadaptasi dari: [saintschemistry10](https://saintschemistry10.com))

Adanya lautan elektron inilah yang menyebabkan logam memiliki sifat-sifat fisik khas: logam dapat menghantarkan Listrik dan panas dengan sangat baik, karena elektron-

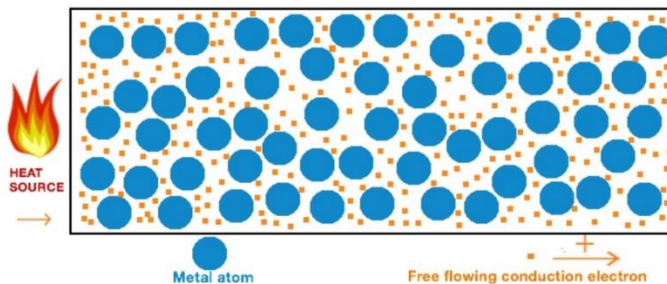
elektron bebas mudah bergerak dan membawa energi atau muatan listrik ke seluruh bagian logam. Selain itu, ikatan logam yang fleksibel memungkinkan atom-atom dalam kisi logam untuk bergeser tanpa menyebabkan logam patah, sehingga logam menjadi mudah ditempa dan lentur (*ductile*). Sifat-sifat ini; konduktivitas, kemudahan ditempa, dan kilap logam, semuanya berakar dari keberadaan lautan elektron dalam struktur atom logam. Sifat-sifat logam dijelaskan berikut.

2.2.1 Konduktor Listrik dan Termal yang Tinggi

Logam dikenal memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi. Secara mikroskopis, hal ini dijelaskan oleh teori “lautan elektron”. Dalam struktur logam padat, atom-atom melepaskan sebagian elektron valensinya sehingga membentuk awan atau lautan elektron bebas yang menyelimuti ion-ion logam bermuatan positif. Elektron-elektron ini terdelokalisasi dan bergerak bebas di seluruh kristal. Akibatnya, ketika diberi beda potensial listrik, elektron bebas tersebut dengan mudah berpindah melalui logam, mengangkut muatan listrik. Inilah sebabnya logam sangat baik dalam menghantarkan arus listrik. Elektron bebas bertindak seperti “pembawa muatan” yang dapat bergerak tanpa terikat pada satu inti atom, sehingga arus listrik dapat mengalir dengan resistansi rendah.

Selain berperan sebagai penghantar listrik, logam juga memiliki kemampuan tinggi dalam menghantarkan panas (**Gambar 2.2**). Terdapat dua mekanisme utama yang mendukung konduktivitas termal pada logam: (1) Kehadiran elektron bebas yang tidak hanya membawa muatan listrik, tetapi juga energi kinetik untuk disebarkan melalui tumbukan dengan atom-atom lain; (2) Getaran kisi atom yang rapat, di mana susunan atom logam yang sangat

berdekatan memungkinkan transfer energi panas secara efisien dari satu atom ke atom tetangga melalui gerakan termal. Temperatur sendiri merepresentasikan tingkat energi kinetik akibat getaran atom atau molekul, sehingga pada logam padat, vibrasi dari satu atom mudah menstimulasi vibrasi pada atom lainnya. Dengan demikian, energi panas dapat menyebar cepat melalui jaringan atom yang saling bersentuhan erat. Kinerja istimewa logam dalam menghantarkan panas merupakan hasil kombinasi mobilitas tinggi elektron serta kerapatan struktur atomnya. Sebagai contoh, perak dan tembaga dikenal memiliki konduktivitas termal tertinggi berkat struktur kristal yang rapat dan melimpahnya elektron bebas.



Gambar 2. 2. Blok logam yang menampilkan atom logam dan electron valensi yang bergerak (mengalir). (Diadaptasi dari [termstet](#))

Kehadiran pengotor atau unsur paduan umumnya menurunkan konduktivitas logam, karena atom asing dapat menghambat pergerakan elektron serta mengganggu vibrasi teratur pada kisi logam. Oleh karena itu, logam murni biasanya memiliki tingkat konduktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan logam paduan.

2.2.2 Titik Didih dan Titik Leleh yang Tinggi

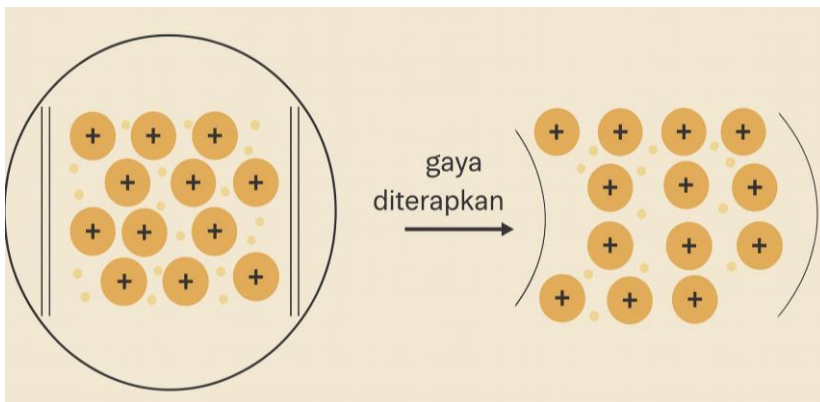
Logam memiliki titik leleh dan titik didih yang tinggi karena adanya ikatan logam yang sangat kuat. Dalam struktur logam, atom-atom tidak hanya tersusun berdekatan, tetapi juga saling berinteraksi melalui lautan elektron bebas. Elektron-elektron ini bergerak bebas di antara ion logam positif dan menciptakan gaya tarik elektrostatik yang sangat kuat dan merata ke segala arah. Untuk memutuskan ikatan-ikatan ini, dibutuhkan energi panas yang besar, sehingga logam tidak mudah meleleh atau menguap.

Selain itu, struktur kristal logam yang padat dan teratur turut berperan dalam meningkatkan titik leleh dan titik didih. Atom-atom logam tersusun dalam pola kristal tertentu seperti FCC, BCC, atau HCP yang membuatnya semakin rapat dan stabil. Karena atom-atom saling berdekatan, gaya tarik antartpartikel menjadi lebih besar, sehingga proses perubahan fase dari padat ke cair (leleh) maupun dari cair ke gas (mendidih) membutuhkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan zat lain dengan ikatan antarmolekul yang lebih lemah.

Faktor lain yang berpengaruh adalah jumlah elektron valensi dan ukuran atom logam itu sendiri. Logam dengan jumlah elektron valensi lebih banyak dan ukuran atom yang kecil cenderung membentuk ikatan logam yang lebih kuat, sehingga memiliki titik leleh dan titik didih yang lebih tinggi. Misalnya, tungsten (W) memiliki titik leleh sekitar 3422°C dan titik didih hingga 5555°C , menjadikannya salah satu logam dengan ketahanan panas terbaik. Inilah sebabnya logam banyak digunakan dalam aplikasi suhu tinggi seperti elemen pemanas, peralatan industri, dan komponen pesawat.

2.2.3 Daya Tempa dan Daya Lentur

Kemampuan dibentuk menjadi lembaran (daya tempa) dan kemampuan ditarik menjadi kawat (daya lentur) pembentukan logam dapat dijelaskan melalui model lautan elektron: ketika logam mengalami proses penempaan atau penarikan, lapisan atom-atomnya mampu bergeser secara relatif tanpa memutuskan ikatan. Hal ini dimungkinkan karena elektron-elektron valensi menyesuaikan posisinya, sehingga kestabilan ikatan logam tetap terjaga **Gambar 2.3**. Berbeda dari kristal ionik yang rapuh, kisi logam tidak pecah saat dihantam, melainkan atom-atomnya hanya bergeser dan logam berubah bentuk (deformasi permanen).

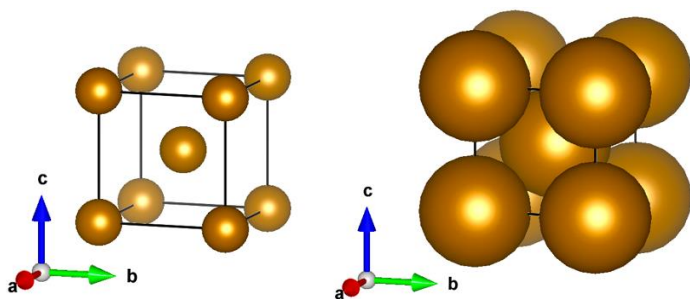


Gambar 2. 3. Ilustrasi sifat *malleability* pada logam: struktur kisi logam sebelum dan sesudah gaya luar diberikan. Ketika gaya diterapkan (ditandai dengan panah), ion-ion logam bermuatan positif (ditunjukkan dengan bola kuning) bergeser, namun tidak menyebabkan logam patah. Hal ini terjadi karena adanya "lautan elektron" (elektron bebas berwarna kuning muda) yang tetap menjaga ikatan logam tetap utuh dan fleksibel. Proses ini menjelaskan sifat *malleability* atau kemampuan logam ditempa menjadi bentuk tipis tanpa pecah. (diadaptasi dari: geniebook.com).

2.3 Struktur Kristal Logam

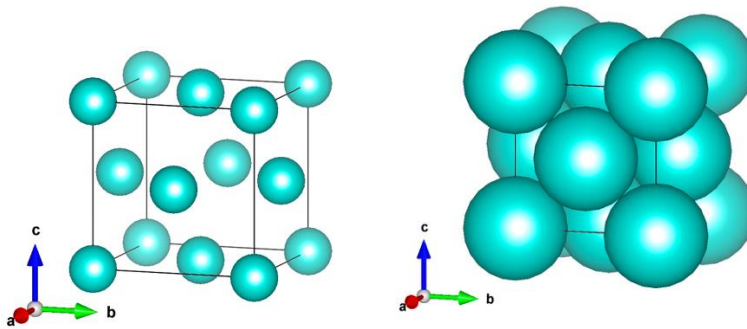
Sebagian besar logam padat tersusun oleh atom-atom yang teratur dalam pola *kisi kristal* tiga dimensi yang berulang. Artinya, atom-atom logam menempati titik-titik pada sel satuan yang diulang secara periodik. Tiga struktur kristal logam yang paling umum adalah: kubus berpusat muka (*Face-Centered Cubic*, FCC), kubus berpusat badan (*Body-Centered Cubic*, BCC), dan heksagonal kemas rapat (*Hexagonal Close-Packed*, HCP).

Pada struktur BCC, setiap sel satuan kubus memiliki atom pada tiap 8 sudut kubus, *ditambah* 1 atom di pusat kubus. Total ada 2 atom per sel satuan (dari 8 sudut $\times 1/8 + 1$ di tengah). Dalam BCC, atom pusat menyentuh atom-atom di sudut terdekatnya sepanjang diagonal ruang kubus. Setiap atom BCC dikelilingi oleh 8 tetangga terdekat, sehingga *bilangan koordinasi*-nya adalah 8. Struktur ini tidak sepadat FCC, dengan fraksi pengisian ruang sekitar 68%. Beberapa logam terkenal berstruktur BCC antara lain besi- α (Fe pada suhu ruang), kromium (Cr), molibdenum (Mo), tungsten (W), dan vanadium (V).



Gambar 2. 4. Struktur kristal Kubus Berpusat Badan (BCC)

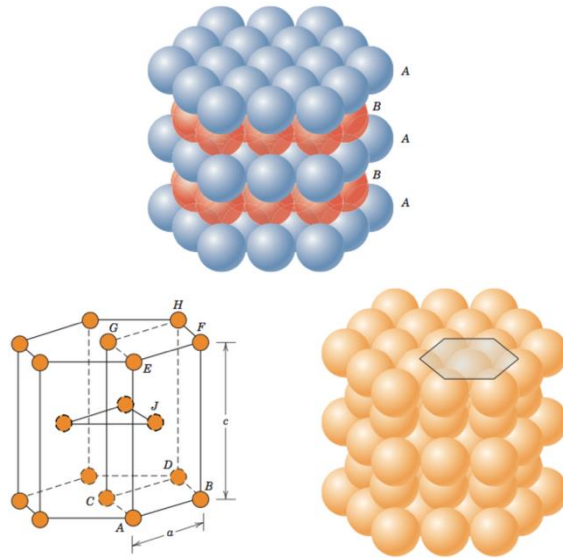
Pada struktur FCC, selain 8 atom di sudut kubus, terdapat 6 atom pada setiap muka kubus (masing-masing muka menyumbang $\frac{1}{2}$ atom ke sel satuan). Total ada 4 atom per sel ($8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2}$). Atom-atom bersentuhan sepanjang diagonal muka kubus. Setiap atom FCC dikelilingi oleh 12 tetangga terdekat (bilangan koordinasi 12). Struktur FCC merupakan salah satu susunan paling rapat (*packing factor* $\sim 74\%$), sama rapatnya dengan HCP. Banyak logam umum berstruktur FCC, misalnya aluminium (Al), tembaga (Cu), perak (Ag), emas (Au), nikel (Ni), dan timah (Pb).



Gambar 2. 5. Struktur kristal kubus berpusat muka (FCC)

Struktur HCP berbeda dari kubus; sel satuannya berbentuk prisma heksagon. Lapisan atom pada HCP tersusun secara ABAB... – atom pada lapisan di atas berada di sela-sela atom lapisan di bawahnya sedemikian rupa sehingga membentuk pola heksagonal rapat. Satu sel satuan HCP berisi 6 atom (hasil penjumlahan dari beberapa atom di sudut dan pusat lapisan atas, bawah, dan tengah prisma). HCP juga merupakan struktur terpadat (74% ruang terisi) dengan bilangan koordinasi 12 (mirip FCC). Contoh logam berstruktur HCP antara lain magnesium (Mg), titanium- α (Ti pada suhu ruang), seng (Zn), dan kobalt- α (Co). Pada HCP,

tiap atom memiliki 6 tetangga dalam satu lapisan heksagonal, 3 di lapisan atas, dan 3 di lapisan bawah, total 12 tetangga.



Gambar 2. 6. Stuktur heksagonal kemas rapat (HCP) kritical logam. (Sumber: Callister & Rethwisch 5e)

Sekilas, FCC dan HCP sama-sama struktur terpadat karena masing-masing atom memiliki 12 tetangga dekat. BCC sedikit kurang rapat (8 tetangga) tetapi tetap banyak dipilih alam karena konfigurasi ikatan yang stabil. Perbedaan kerapatan susunan ini berpengaruh pada sifat-sifat fisik logam.

2.4 Cacat Kristal Logam

Cacat Kristal Logam adalah ketidaksempurnaan yang terjadi dalam struktur kristal logam. Cacat ini dapat memengaruhi sifat mekanik, fisik, dan kimia dari logam tersebut. Secara umum, cacat kristal terbagi menjadi tiga kategori utama: cacat titik, cacat garis (dislokasi), dan cacat bidang. Setiap jenis cacat memengaruhi cara logam merespons terhadap beban dan perubahan suhu.

2.4.1 Cacat Titik (*Point Defects*)

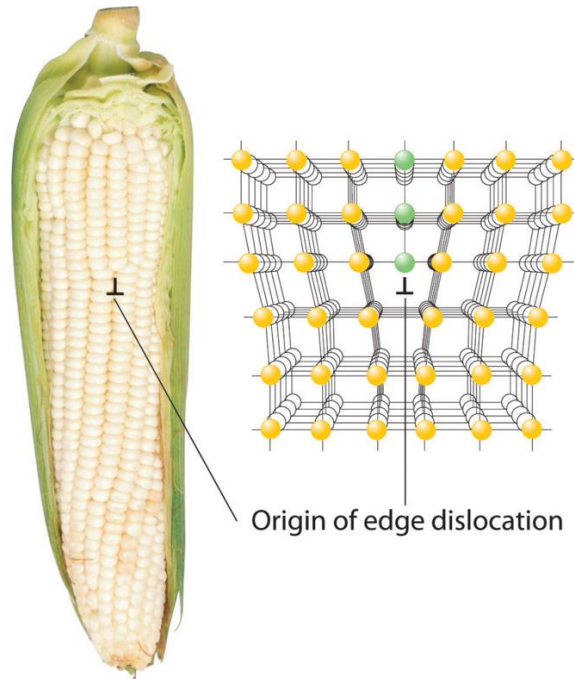
Cacat titik adalah cacat yang terjadi pada satu titik dalam kisi kristal. Ada beberapa jenis cacat titik yang umum:

- a. Vacancy (Vakan): Terjadi ketika sebuah atom tidak berada pada posisinya yang seharusnya dalam kisi kristal ((La Kilo, Costanzo, et al., 2019). Vakan ini dapat memengaruhi difusi atom dalam material.
- b. Interstitial: Terjadi ketika sebuah atom yang lebih kecil masuk ke dalam ruang antar atom yang lebih besar dalam kisi kristal. Ini sering terjadi pada logam yang lebih rapat.
- c. Substitutional: Terjadi ketika satu atom di dalam kisi kristal digantikan oleh atom lain yang berbeda (Kilo et al., 2019, 2022; La Kilo et al., 2020, 2021; La Kilo, Umamah, et al., 2019; PAKAYA & others, 2015; Sadapu, 2015). Misalnya, pada paduan logam seperti baja (besi dan karbon).

2.4.2 Cacat Garis (*Line Defects / Dislocations*)

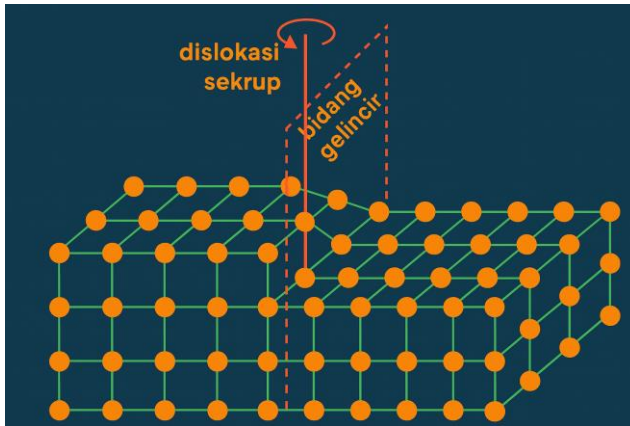
Dislokasi adalah cacat yang terjadi ketika lapisan atom dalam kisi kristal bergeser. Dislokasi ini memengaruhi plastisitas logam, yang memungkinkan logam untuk mengalami deformasi plastik akibat tekanan.

- a. Dislokasi sisi (*edge dislocation*): Terjadi ketika suatu lapisan atom disisipkan ke dalam kisi kristal, menciptakan ketegangan pada sisi lain. Ketegangan ini memengaruhi cara logam merespons gaya luar.



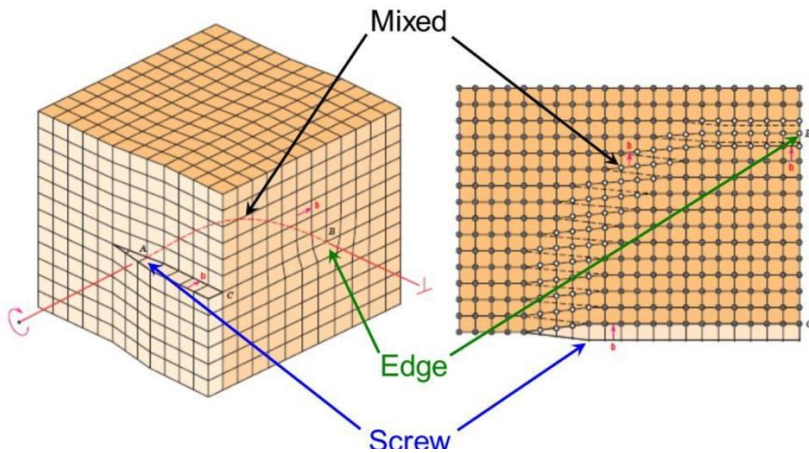
Gambar 2. 7. Ditunjukkan dua contoh dislokasi *edge*: (kiri) dislokasi *edge* pada tongkol jagung dan (kanan) representasi tiga dimensi dari dislokasi *edge* pada suatu padatan, yang menggambarkan bagaimana dislokasi *edge* dapat dilihat sebagai cacat garis sederhana yang berasal dari penyisipan satu set atom ekstra ke dalam kisi kristal. Pada kedua kasus, asal dari dislokasi *edge* ditunjukkan dengan simbol $\perp$. (Sumber: [libretexts chemistry](https://libretexts.org))

- b. Dislokasi ulir (*screw dislocation*): terjadi ketika sebagian dari lapisan atom berputar, sehingga menghasilkan pergeseran dalam susunan atom tanpa mengubah posisi barisnya.



Gambar 2. 8. Cacat dislokasi ulir

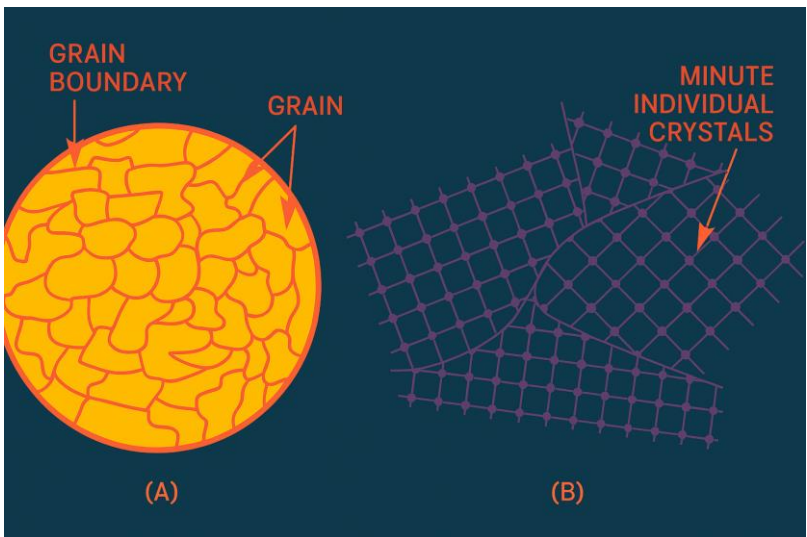
- c. Campuran (*mixed dislocation*): merupakan kombinasi dari dislokasi *edge* dan *screw*. Biasanya, dislokasi ini merupakan jenis yang paling umum dalam logam.



Gambar 2. 9. Cacat dislokasi campuran. (Sumber: gambar 4.5, Calister 7e)

2.4.3 Cacat Bidang (*Planar Defects*)

Cacat bidang berhubungan dengan cacat yang terjadi pada permukaan atau batas antara dua bagian dalam kisi kristal. Jika Anda mengambil sebagian kecil dari logam umum dan memeriksanya di bawah mikroskop, Anda akan melihat struktur yang mirip seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.10(A)**. Setiap area terang disebut butir atau kristal, yaitu wilayah ruang yang ditempati oleh kisi kristal yang kontinu. Garis-garis gelap yang mengelilingi butir-butir tersebut disebut batas butir. Struktur butir merujuk pada susunan butir-butir dalam suatu logam, di mana setiap butir memiliki struktur kristal tertentu.

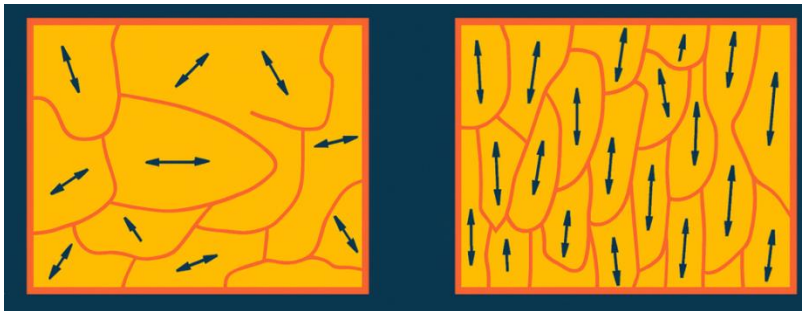


Gambar 2. 10. Butiran dan batas; (A) mikroskopik dan (B) atomic. (Diadaptasi dari [engineering library](#))

Batas butir adalah bagian luar dari suatu butir yang memisahkannya dari butir-butir lainnya. Batas butir merupakan daerah ketidaksesuaian antara butir-butir dan

biasanya memiliki lebar sekitar satu hingga tiga diameter atom. Batas butir memisahkan wilayah kristal yang berorientasi berbeda-beda (polikristalin) namun memiliki struktur kristal yang identik. **Gambar 2.10(B)** menggambarkan empat butir dengan orientasi berbeda dan batas butir yang terbentuk pada antarmuka di antara butir-butir tersebut.

Salah satu fitur penting dari logam adalah ukuran rata-rata butirnya. Ukuran butir menentukan sifat-sifat logam. Sebagai contoh, ukuran butir yang lebih kecil akan meningkatkan kekuatan tarik dan cenderung meningkatkan keuletan. Sebaliknya, ukuran butir yang lebih besar lebih disukai untuk meningkatkan sifat tahan terhadap deformasi pada suhu tinggi (*creep*). *Creep* adalah deformasi permanen yang meningkat seiring waktu di bawah beban atau tegangan tetap. *Creep* akan semakin mudah terjadi seiring peningkatan suhu.



Gambar 2. 11. Orientasi butiran; acak (kiri) dan preferensial (kanan). (Diadaptasi dari [engineering library](#)).

Sifat penting lainnya dari butir logam adalah orientasinya. **Gambar 2.11** (kiri) menunjukkan susunan acak dari butir-butir sehingga tidak ada satu pun arah dalam butir-butir tersebut yang sejajar dengan batas luar sampel

logam. Orientasi acak seperti ini dapat diperoleh melalui proses *cross rolling* (penggilingan silang) pada material. Jika sampel seperti itu digiling cukup lama ke satu arah, maka dapat berkembang struktur butir yang terorientasi searah dengan arah penggilingan seperti yang ditunjukkan pada **Error! Reference source not found.** (kanan). Hal ini disebut sebagai orientasi preferensial (*preferred orientation*). Dalam banyak kasus, orientasi preferensial ini sangat diinginkan, tetapi dalam situasi lain justru bisa sangat merugikan. Sebagai contoh, orientasi preferensial pada elemen bahan bakar uranium dapat menyebabkan perubahan dimensi yang sangat besar dan berbahaya selama digunakan dalam reaktor nuklir.

2.5 Deformasi Plastis pada Logam dan Mekanisme Dislokasi

Salah satu sifat khas logam adalah dapat mengalami deformasi plastis – artinya logam bisa dibengkokkan, ditempa, atau diregangkan permanen tanpa langsung patah. Berbeda dengan bahan rapuh (misal kristal ionik atau keramik) yang cenderung retak jika gaya melampaui batas elastis, logam dapat mengalami *yield* dan berubah bentuk. Mengapa demikian? Alasannya berkaitan dengan adanya dislokasi dalam struktur kristal logam dan banyaknya *bidang slip* yang memungkinkan atom-atom bergeser.

Deformasi elastis vs plastis: Saat gaya kecil diberikan, logam mengalami *deformasi elastis* di mana ikatan antar-atom meregang tapi akan kembali ke posisi semula ketika gaya dilepas. Namun, begitu tegangan melampaui *titik luluh* (*yield point*), mulailah *deformasi plastis*. Dalam fase

plastis, sebagian ikatan atom putus dan terbentuk kembali pada posisi baru – inilah perubahan bentuk permanen. Grafik tegangan-regangan logam menunjukkan daerah elastis linear di awal, lalu setelah yield material memasuki regime plastis di mana regangan meningkat pesat dengan tambahan tegangan kecil.

Peran dislokasi: Secara mikroskopis, deformasi plastis pada logam terjadi terutama melalui gerakan dislokasi. *Dislokasi* adalah cacat linier pada kisi kristal – dapat dibayangkan sebagai gangguan dimana satu baris atom tidak sempurna, misalnya satu setengah bidang atom tersisip di tengah kisi (disebut dislokasi tepi). Adanya dislokasi memungkinkan lapisan atom bergeser satu per satu, bukan seluruh bidang sekaligus. Hal ini dramatis mengurangi gaya yang dibutuhkan untuk deformasi. Bayangkan jika tidak ada dislokasi: untuk menggeser satu lapisan atom melawan lapisan di bawahnya, semua ikatan di sepanjang bidang itu harus diputus serentak, perlu tegangan sangat besar. Namun dengan dislokasi, pergeseran dapat terjadi secara *gradual* ibarat sebuah “gelombang” yang merambat melalui kristal, memutus ikatan secara bergantian sehingga energi yang dibutuhkan jauh lebih rendah.

Sebagai analogi, menggeser lapisan atom dengan dislokasi seperti menggeser karpet berkerut. Untuk memindahkan karpet berat, akan sulit jika menarik seluruh karpet sekaligus. Akan jauh lebih mudah jika kita membuat *lekukan/kerutan* di tepi karpet, lalu mendorong gelombang kerutan itu melintasi karpet hingga ke ujung lainnya ojs.unud.ac.id. Demikian pula dalam kristal logam, dislokasi berperan seperti kerutan: ujung dislokasi bergerak di sepanjang bidang kristal (disebut *bidang slip*), menyebabkan satu deret atom bergeser sedikit demi sedikit.

Pergerakan dislokasi inilah yang tampak sebagai logam “melunak” saat ditempa – material berubah bentuk tanpa terputus karena ikatan antar-atom putus sambung bergantian seiring dislokasi melintas.

Bidang slip dan arah slip: Tidak semua bidang kristal sama-sama mudah untuk terjadinya slip. *Bidang slip* adalah bidang kristal dengan kerapatan atom tertinggi (paling rapat terisi atom) di mana lapisan atom dapat bergeser dengan resistensi minimal. *Arah slip* adalah arah dalam bidang tersebut yang juga paling rapat susunan atomnya. Kombinasi bidang slip tertentu dan arah slip tertentu disebut sistem slip. Setiap struktur kristal memiliki himpunan sistem slip yang berbeda jumlah dan orientasinya. Misalnya, pada FCC bidang slip utamanya adalah bidang $\{111\}$ (diagonal ruang kubus) dengan arah slip $\langle 110 \rangle$, sedangkan pada BCC bidang slip utamanya $\{110\}$ dengan arah $\langle 111 \rangle$. Gerakan dislokasi terjadi di sepanjang salah satu sistem slip ini ketika material mengalami tegangan geser yang cukup (dikenal sebagai *tegangan geser kritis* untuk slip).

Selama deformasi, dislokasi bergerak hingga bertemu hambatan (misal batas butir atau partikel penguat). Penumpukan dislokasi tersebut menyebabkan pengerasan regangan (*work hardening*) – logam menjadi lebih kuat tapi kurang ulet setelah didistorsi plastis berulang karena pergerakan dislokasi makin terhalang.. Proses anil (pemanasan) dapat mengurangi dislokasi dan mengembalikan keuletan yang hilang melalui rekristalisasi.

2.6 Pengaruh Struktur Kristal pada Kemudahan Deformasi

Struktur kristal logam (BCC, FCC, HCP) sangat mempengaruhi kemampuan mudah ditempa atau kemudahan deformasi plastis logam tersebut. Faktor utamanya adalah jumlah dan kualitas sistem slip yang tersedia dalam kristal. Secara umum, semakin banyak sistem slip independen yang dimiliki suatu struktur, semakin mudah ditempa logam tersebut. Sebuah aturan empiris menyatakan bahwa diperlukan minimal 5 sistem slip independen agar material dapat deformasi plastis pada segala orientasi tanpa patah. Berikut perbandingan struktur BCC, FCC, dan HCP:

Tabel 2. 1. Sistem slip pada Kristal Logam

Struktur Kristal	Jumlah Sistem Slip Utama (bidang × arah)	Contoh Logam (suhu ruang)	Duktalitas/ <i>Malleability</i>
FCC (kubus berpusat muka)	12 sistem slip = 4 bidang $\{111\} \times 3$ arah $\langle 110 \rangle$ Bidang slip <i>sangat rapat</i> (primer).	Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pb, dll.	Tinggi (sangat ulet, mudah ditempa). Logam FCC dapat diulur menjadi kawat atau dipipihkan dengan mudah.
BCC (kubus berpusat badan)	12 sistem slip = 6 bidang $\{110\} \times 2$ arah $\langle 111 \rangle$ (utama). <i>Tidak ada bidang truly close-packed</i> ; perlu energi lebih untuk slip.	Fe- α , Cr, Mo, W, V, Nb, dll.	Sedang (ulet moderat). Logam BCC umumnya kuat namun kurang ulet daripada FCC, terutama pada suhu

Struktur Kristal	Jumlah Sistem Slip Utama (bidang × arah)	Contoh Logam (suhu ruang)	Duktalitas/ <i>Malleability</i>
			rendah (beberapa BCC bisa getas di T rendah).
HCP (heksagonal padat)	3 sistem slip = 1 bidang basal {0001} × 3 arah <11-20>. Sistem slip tambahan (prismatik/piramidal) baru aktif di tegangan tinggi atau suhu tinggi.	Mg, Zn, Ti-α, Co-α, Be, Cd, dll.	Rendah (cukup getas pada kondisi normal). Logam HCP cenderung sulit deformasi plastis kecuali pada suhu lebih tinggi (untuk mengaktifkan slip ekstra atau <i>twinning</i>).

Dari tabel di atas tampak bahwa struktur FCC paling mudah ditempa, diikuti BCC, sedangkan HCP paling tidak ulet pada suhu kamar. FCC memiliki 12 sistem slip dengan bidang slip yang *sangat rapat*, sehingga pergeseran atom terjadi mudah dengan energi rendah. BCC meski secara jumlah juga memiliki 12 sistem slip, bidang-bidang slip utamanya kurang rapat sehingga membutuhkan tegangan lebih besar untuk menggerakkan dislokasi; akibatnya keuletannya berada di tingkat menengah. Adapun HCP hanya memiliki 3 sistem slip independen pada bidang basal. Tiga slip sistem ini tidak cukup untuk mengakomodasi deformasi ke segala arah, sehingga logam HCP cenderung *kurang dapat* menyesuaikan

deformasi dan gampang retak kecuali jika *twinning* atau mekanisme lain turut terjadi. Secara umum, urutan keuletan menurun dari FCC (paling ulet), ke BCC, lalu HCP (paling getas). Inilah sebabnya, misalnya, aluminium (FCC) dan tembaga (FCC) sangat mudah ditarik menjadi kawat atau dipukul menjadi lembaran (digunakan sebagai logam tempa), sedangkan magnesium dan seng (HCP) lebih baik dicetak daripada ditempa karena cenderung retak jika dideformasi dingin.

2.7 Pengaruh Cacat Kristal dalam Metalurgi

2.7.1 Kekuatan Mekanik

a. Strain Hardening: Peningkatan jumlah cacat seperti dislokasi dapat menghambat pergerakan dislokasi lain, sehingga meningkatkan kekuatan logam (Greer & Nix, 2006; Griesbach et al., 2023). Strain hardening, atau dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai penguatan regangan, merupakan suatu proses penting dalam ilmu material yang berfungsi untuk meningkatkan kekuatan logam melalui deformasi plastis. Ketika logam mengalami tarikan, tekan, atau proses pembentukan lainnya yang melampaui batas elastisnya, maka akan terjadi perubahan permanen pada struktur kristalnya. Dalam proses inilah *strain hardening* terjadi.

Kunci utama dari fenomena ini terletak pada dislokasi, cacat garis dalam struktur kristal logam yang bergerak saat logam mengalami deformasi. Ketika logam mengalami regangan plastis, jumlah dislokasi akan meningkat secara signifikan. Dislokasi-dislokasi ini tidak bergerak secara bebas; mereka saling bertabrakan, berinteraksi, dan berhadapan dengan berbagai hambatan, seperti batas butir atau presipitasi. Peningkatan jumlah dislokasi menciptakan

kondisi di mana pergerakan dislokasi menjadi semakin sulit. Akibatnya, logam menjadi lebih keras dan lebih kuat. Inilah inti dari mekanisme *strain hardening*.

Selain itu, interaksi antara dislokasi juga menghasilkan struktur mikro seperti sel dislokasi atau kusut dislokasi, yang bertindak sebagai penghalang tambahan terhadap pergerakan dislokasi lain. Struktur ini biasanya terdiri dari dinding padat dan interior yang relatif lebih kosong, dan terbukti sangat mempengaruhi laju penguatan regangan. Bahkan, jika pembentukan struktur ini dihambat, maka efek *strain hardening* dapat ditingkatkan.

Struktur mikro yang kompleks akibat interaksi dislokasi ini juga menimbulkan tegangan balik (*backstress*) di dalam butiran kristal. Tegangan balik ini menghambat gerakan dislokasi dan menciptakan efek yang dikenal sebagai penguatan kinematik (*kinematic hardening*). Hal ini berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan material secara keseluruhan.

Strain hardening tidak hanya bergantung pada deformasi mekanis, tetapi juga dapat dioptimalkan melalui perlakuan termomekanik, yaitu kombinasi antara proses pemanasan dan deformasi terkendali. Misalnya, deformasi yang diikuti dengan proses anil (*annealing*) dapat mengubah konfigurasi dislokasi, memperhalus mikrostruktur, dan secara keseluruhan memperkuat logam atau paduan yang dihasilkan.

Menariknya, efek *strain hardening* juga menunjukkan ketergantungan terhadap ukuran ketika material berada dalam skala mikro atau nano. Pada ukuran yang lebih kecil, gradien regangan plastis dan keberadaan dislokasi geometris yang diperlukan (*geometrically necessary dislocations*) semakin dominan. Ini menyebabkan logam dalam ukuran kecil memiliki tegangan alir yang lebih tinggi

dan kemampuan strain hardening yang lebih besar karena terbatasnya pembentukan sel dislokasi.

b. Penguatan oleh Cacat: Cacat seperti dislokasi dan batas butir dapat meningkatkan kekuatan logam melalui mekanisme penguatan dislokasi dan penghalang batas butir (Cui et al., 2025; Griesbach et al., 2023; Procter, 2010).

2.7.2 Ketangguhan dan Duktalitas

- a. Interaksi Dislokasi: Interaksi antara dislokasi dan cacat lain seperti kembar dapat meningkatkan ketangguhan dan duktalitas logam (Cui et al., 2025; Griesbach et al., 2023).
- b. Pengaruh Oksigen: Kandungan oksigen yang tinggi dapat meningkatkan kekuatan tetapi mengurangi duktalitas logam, karena pengaruhnya terhadap dislokasi dan struktur mikro (Gao et al., 2024; Long et al., 2025).

2.7.3 Difusi dan Korosi

- a. Difusi yang Ditingkatkan: Cacat seperti batas butir dan interstitials dapat meningkatkan laju difusi, yang mempengaruhi proses seperti *creep* dan korosi (Procter, 2010; Safonova et al., 2016).
- b. Segregasi Kotoran: Batas butir dapat bertindak sebagai situs segregasi kotoran, yang dapat mempengaruhi ketahanan korosi logam (Procter, 2010).

Dalam upaya meningkatkan performa mekanik material logam ringan, strategi modifikasi mikrostruktur melalui pengenalan cacat kristal telah menjadi fokus penting dalam bidang material maju. Pada paduan magnesium-litium

(Mg-Li), penguatan dicapai melalui pengendalian struktur kristal, khususnya melalui penciptaan kembar (twinning) dan dislokasi. Cacat ini tidak hanya menghambat pergerakan dislokasi, namun juga meningkatkan interaksi antara dislokasi dan batas butir, yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan tarik dan ketangguhan material secara signifikan. Studi terbaru oleh (Cui et al., 2025) menekankan bahwa densitas dislokasi yang tinggi serta formasi kembar yang terkendali dalam paduan Mg-Li mampu menciptakan sistem penguatan yang sinergis, sangat berguna untuk aplikasi struktural pada kendaraan ringan dan industri dirgantara.

Sementara itu, pendekatan serupa diterapkan pada paduan titanium yang diproses melalui metode Powder Metallurgy (P/M Ti). Salah satu tantangan dalam teknologi ini adalah kehadiran oksigen sebagai unsur interstisial yang umumnya bersifat merugikan karena dapat menyebabkan kerapuhan. Namun, penelitian oleh (Gao et al., 2024; Long et al., 2025) menunjukkan bahwa dengan mengontrol kadar oksigen secara presisi dalam paduan P/M Ti, kekuatan material dapat ditingkatkan tanpa penurunan signifikan pada sifat keuletannya. Oksigen yang terdistribusi homogen dalam mikrostruktur berkontribusi terhadap pembentukan hambatan dislokasi serta memperkuat batas butir, serupa dengan mekanisme pada paduan Mg-Li, namun melalui rute kimiawi dan proses difusi. Strategi ini membuka jalan bagi pengembangan paduan titanium berkinerja tinggi untuk aplikasi medis dan aeronautika, di mana kombinasi kekuatan dan duktilitas sangat dibutuhkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cui, X., Yang, Y., Zhou, Z., Hu, Z., Luo, Y., Wei, G., Gao, W., Jiang, B., Peng, X., & Pan, F. (2025). Developing a lamellar-structured Mg-4Li-3Al-0.4Ca alloy with high strength-ductility synergy. *Journal of Materials Science and Technology*, 229, 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.11.083>
- Gao, S., Pan, K., Chen, D., Wang, B., Wu, S., Luo, X., Sun, M., Zhao, C., & Li, N. (2024). Mechanism of oxygen content on impact toughness of $\alpha + \beta$ powder metallurgy titanium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.077>
- Greer, J. R., & Nix, W. D. (2006). Nanoscale gold pillars strengthened through dislocation starvation. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 73(24). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.245410>
- Griesbach, C., Cai, J., Jeon, S.-J., & Thevamaran, R. (2023). Synergistic strength and toughness through impact-induced nanostructural evolutions in metals. *Extreme Mechanics Letters*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2023.102037>
- Kilo, A. La, Abas, R. N. R., Costanzo, A., Mazza, D., Botutihe, D. N., & Kilo, J. La. (2022). Atomistic Simulation of La and Mn-Doped PbBi₂Nb₂O₉ Aurivillius Phase. *Molekul*, 17(2). <https://doi.org/10.20884/1.jm.2022.17.2.6346>
- Kilo, A. La, Umamahb, T. S., & Laliyob, L. A. R. (2019). Studi Kestabilan Zirkonia Terdoping Ration Trivalen melalui

- Pemodelan Atomistik. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4).
- La Kilo, A. (2018). *Kimia Anorganik: Struktur dan Kereaktifan* (1st ed.). UNG Press.
- La Kilo, A., Alio, L., La Kilo, J., & others. (2020). Stability study of four layer Aurivillius oxide of $AxBi_{4-x}Ti_4O_{15}$ (A= Ca, Sr, Ba): Atomistic simulation. *Acta Chimica Asiana*, 3(2), 157–162.
- La Kilo, A., Costanzo, A., Mazza, D., Martoprawiro, M. A., Prijamboedi, B., & Ismunandar, I. (2019). Highest ionic conductivity of BIMEVOX (ME= 10% Cu, 10% Ga, 20% Ta): Computational modeling and simulation. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(6), 510–519.
- La Kilo, A., Kusriani, K., & Botutihe, D. N. (2021). The Relationship between Stability and Ion Conduction of Trivalent Cation Doped Ceria. *Jambura Journal of Chemistry*, 3(1).
<https://doi.org/10.34312/jambchem.v3i1.9870>
- La Kilo, A., Umamah, T. S., & Laliyo, L. A. R. (2019). Study on the Stability of Trivalent Cations Doped Zirconia through Atomistic Modeling. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(4), 129–135.
<https://doi.org/10.14710/jksa.22.4.129-135>
- Long, J., Liu, X., Gu, J., Luo, X., Pan, K., Pan, J., & Li, N. (2025). Breaking strength and ductility trade-off for powder metallurgy Ti alloys with high content of oxygen. *Materials Science and Engineering: A*, 940.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148529>

- PAKAYA, M. S., & others. (2015). Simulasi Atomistik Oksida Aurivillius Lapis Empat $\text{ABi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (A= Ca, Sr dan Ba). *Skripsi*, 1(441410017).
- Procter, R. P. M. (2010). Outline of structural metallurgy relevant to corrosion. In *Shreir's Corrosion* (pp. 52–76). <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00201-8>
- Sadapu, S. (2015). Pengaruh Substitusi Bi secara Parsial oleh Dopan (A= Ba, Ca, Sr dan Pb) dalam Lapisan $[\text{Bi}_2\text{O}_2]$ 2+ pada Oksida Aurivillius $\text{ABi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$. *Skripsi*, 1(441410014).
- Safonova, E. V, Mitrofanov, Y. P., Konchakov, R. A., Yu Vinogradov, A., Kobelev, N. P., & Khonik, V. A. (2016). Experimental evidence for thermal generation of interstitials in a metallic crystal near the melting temperature. *Journal of Physics Condensed Matter*, 28(21). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/28/21/215401>

BAB 3

DIAGRAM FASA DAN TRANSFORMASI MATERIAL

Oleh Imah Luluk Kusminah

3.1 Pendahuluan

Pemahaman terhadap perilaku fasa dalam material sangat penting dalam ilmu dan rekayasa material. Diagram fasa digunakan untuk menggambarkan kestabilan termodinamika dari berbagai fasa dalam suatu sistem terhadap variasi suhu dan komposisi. Diagram ini memungkinkan insinyur untuk merancang paduan dan perlakuan panas secara optimal guna mencapai struktur mikro dan sifat mekanik yang diinginkan (William D. Callister, 2012).

3.2 Definisi dan Konsep Dasar

Diagram fasa merupakan gambaran visual dari keadaan kesetimbangan antara fasa dalam suatu sistem seiring dengan perubahan suhu dan komposisi. Dalam konteks paduan logam, diagram fasa digunakan untuk memahami interaksi antara dua atau lebih elemen pembentuk paduan dan fasa yang terbentuk dari hasil pencampuran tersebut (Porter, Easterling and Sherif, 2009).

Diagram fasa merupakan representasi grafis yang menunjukkan hubungan antara temperatur, komposisi, dan fasa-fasa yang terbentuk dalam suatu sistem material pada keadaan kesetimbangan. Diagram ini sangat penting dalam ilmu material karena dapat memprediksi fasa-fasa yang akan muncul pada kondisi pemanasan atau pendinginan tertentu, serta memberikan informasi tentang titik leleh, batas kelarutan, dan reaksi eutektik atau peritektik (William D. Callister, 2012).

Diagram fasa dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah komponennya, yakni diagram fasa tunggal, biner (dua unsur), dan terner (tiga unsur).

Alloy merupakan material dengan sifat metalik yang terdiri atas satu atau lebih unsur kimia, termasuk setidaknya satu logam. Ketika dua atau lebih unsur bercampur, hasilnya bisa berupa fase senyawa intermetalik, larutan padat, atau campuran dari beberapa fase. Suatu alloy bisa bersifat homogen atau heterogen, tergantung jumlah dan distribusi fasenya. Fase diartikan sebagai bagian dari sistem material yang homogen secara kimia dan fisik, namun berbeda dari bagian lainnya (Porter, Easterling and Sherif, 2009).

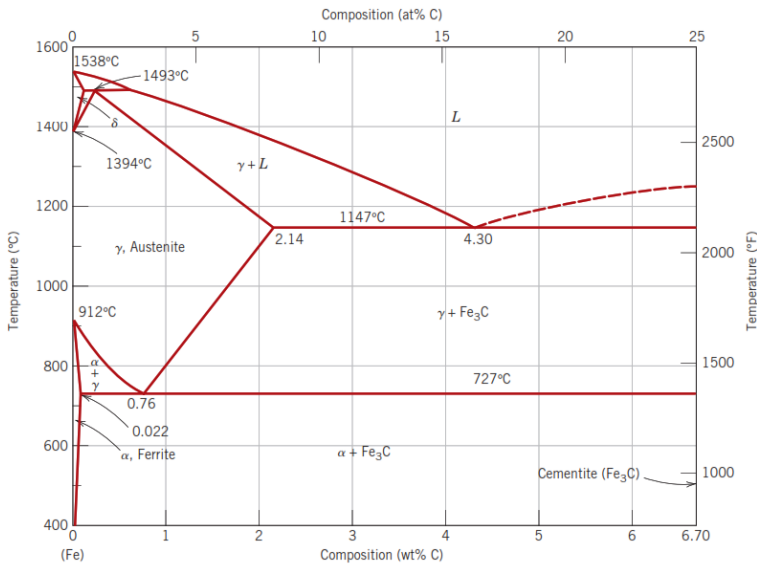
Salah satu diagram fasa yang paling dikenal adalah sistem biner seperti Fe-C (besi-karbon), yang memiliki peran fundamental dalam teknik metalurgi. Diagram ini menjelaskan pembentukan fasa seperti austenit, ferit, sementit, dan perlit yang memiliki karakteristik mekanik berbeda-beda (Golikov, 2020) (Porter, Easterling and Sherif, 2009).

3.3 Diagram Fasa Fe_3C

Contoh diagram fasa paling umum adalah sistem biner, seperti sistem Fe-C (besi-karbon), yang hanya melibatkan dua komponen. Diagram ini menyajikan informasi tentang titik leleh paduan, rentang temperatur di mana fasa tunggal atau multipel terbentuk, jenis reaksi fasa seperti eutektik, dan peritektik.

Equilibrium adalah kondisi penting yang dipahami melalui energi bebas, sebuah parameter termodinamika yang mencakup energi internal dan entropi sistem. Sistem mencapai titik kesetimbangan ketika energi bebas berada pada nilai minimum pada suhu, tekanan, dan komposisi tertentu. Dalam konteks makroskopik, ini berarti sistem mempertahankan sifat-sifatnya secara konstan dan berada dalam kondisi stabil (William D. Callister, 2012).

Kesetimbangan fase adalah kondisi dalam sistem multifase di mana sifat setiap fase tidak berubah seiring waktu, menunjukkan bahwa interaksi antar fase telah mencapai keadaan stabil.



Gambar 3. 1. Diagram Fasa Biner Besi-Karbida

Sumber : (William D. Callister, 2012)

Diagram fasa besi-karbon terlihat di Gambar 3.1. Ketika besi murni dipanaskan, ia mengalami dua perubahan bentuk kristal sebelum mencair. Pada suhu ruang, bentuk stabilnya adalah ferit (besi alpha) dengan struktur kristal BCC. Saat suhu mencapai 912 °C, ferit berubah menjadi austenit (besi gamma) dengan struktur FCC. Bentuk ini bertahan sampai 1394 °C, lalu kembali ke struktur BCC sebagai delta-ferit, dan akhirnya mencair di 1538 °C. Semua perubahan ini dapat dilihat di bagian kiri diagram.

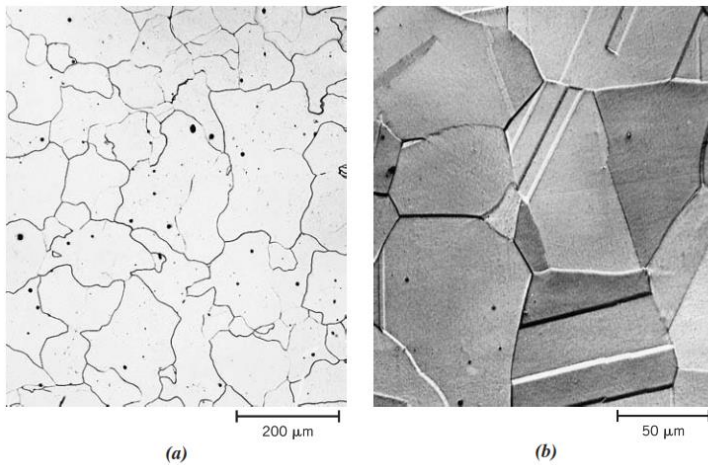
Gambar 3.1 menunjukkan sumbu komposisi hingga 6,70 wt% C, batas di mana sementit (Fe₃C) terbentuk. Hal ini membagi sistem besi-karbon menjadi dua bagian: wilayah kaya besi (yang ditampilkan) dan wilayah grafit (tidak ditampilkan). Karena semua baja dan besi cor mengandung karbon kurang dari 6,70 wt%, fokusnya hanya pada sistem

Fe-Fe₃C. Oleh karena itu, diagram ini sebenarnya merupakan diagram fase Fe-Fe₃C, meskipun komposisi tetap dinyatakan dalam wt% C, dengan 6,70 wt% C sama dengan 100 wt% Fe₃C (William D. Callister, 2012).

Karbon bertindak sebagai unsur asing yang masuk ke sela-sela struktur kristal besi dan membentuk campuran homogen dengan dua bentuk besi: ferit dan austenit. Seperti terlihat pada Gambar 3.1, ferit, yang memiliki bentuk kristal BCC, hanya bisa melarutkan sedikit karbon—maksimal 0,022% pada suhu 727 °C—karena celah dalam strukturnya kecil. Meskipun jumlahnya sedikit, karbon bisa mengubah sifat mekanik ferit secara signifikan. Ferit sendiri bersifat lunak, bisa menjadi magnet di bawah 768 °C, dan memiliki massa jenis 7,88 g/cm³ (Gambar 3.2a).

Austenit, bentuk lain dari besi dengan struktur FCC, tidak stabil di bawah 727 °C jika hanya berisi karbon. Namun, ia bisa melarutkan hingga 2,14% karbon pada 1147 °C karena struktur FCC memiliki ruang interstisial lebih besar. Austenit ini penting dalam perlakuan panas baja dan tidak memiliki sifat magnetik (Gambar 3.2b).

Sementit (Fe₃C) terbentuk ketika karbon dalam ferit melebihi batas kelarutannya pada suhu di bawah 727 °C. Senyawa ini juga hadir di rentang suhu antara 727 °C dan 1147 °C. Sementit sangat keras, rapuh, dan meningkatkan kekuatan baja secara drastis.

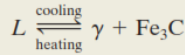


Gambar 3. 2. (a) -ferrite (90) and (b) austenite (325).

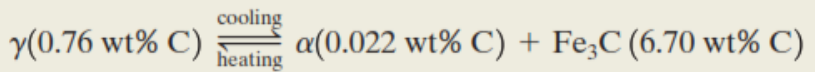
Sumber: (William D. Callister, 2012)

Sementit sebenarnya bukan senyawa yang stabil sepenuhnya, tapi ia bisa bertahan di suhu kamar tanpa berubah. Jika dipanaskan terus-menerus antara 650 dan 700 °C selama bertahun-tahun, sementit akan perlahan-lahan berubah menjadi besi alfa dan grafit. Setelah didinginkan kembali, grafit akan tetap ada. Karena perubahan ini sangat lambat, sebagian besar karbon dalam baja tetap dalam bentuk Fe_3C , bukan grafit, jadi diagram fase Fe- Fe_3C tetap digunakan dalam praktik meskipun bukan diagram kesetimbangan sejati. Tambahkan silikon pada besi cor bisa mempercepat proses pembentukan grafit ini (William D. Callister, 2012).

Gambar 3.1 juga menunjukkan area dua fase dan titik eutektik di 4,30 wt% C pada suhu 1147 °C. Ferrit dan ferit sebenarnya sangat mirip, hanya berbeda pada suhu kestabilannya. Karena ferit hanya muncul di suhu tinggi, ia tidak banyak dipakai dalam aplikasi teknis.



Saat logam cair mendingin, ia mulai membentuk dua jenis fase padat: austenit dan sementit. Ketika pendinginan dilanjutkan sampai suhu kamar, terjadi lagi perubahan struktur. Di titik tertentu, yaitu pada 0,76% karbon dan suhu



727 °C, terjadi reaksi eutektoid di mana austenit berubah menjadi ferit dan sementit (Suherman, 1999).

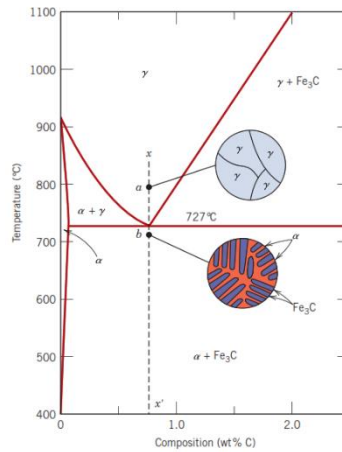
Reaksi eutektoid ini menyatakan bahwa austenit padat akan berubah menjadi ferit dan sementit saat suhu turun melewati titik tersebut. Transformasi eutektoid ini krusial, karena menjadi dasar utama dalam perlakuan panas baja, sebagaimana akan dibahas pada bagian selanjutnya.

Paduan berbasis besi diklasifikasikan berdasarkan kandungan karbonnya menjadi besi murni (<0,008 wt% C), baja (0,008–2,14 wt% C), dan besi tuang (2,14–6,70 wt% C). Besi murni hampir sepenuhnya terdiri dari ferit pada suhu kamar. Baja mengandung struktur mikro berupa campuran ferit dan sementit. Meski batas atas karbon dalam baja adalah 2,14 wt%, secara praktis kandungan karbon jarang melebihi 1 wt%. Besi tuang, meskipun batasnya hingga 6,70 wt% C, umumnya memiliki kandungan karbon di bawah 4,5 wt% (William D. Callister, 2012).

Ketika baja eutektoid didinginkan secara perlahan melewati titik eutektoid, terbentuklah struktur mikro yang khas berupa lapisan-lapisan ferit dan sementit yang

tersusun bergantian. Ketebalan lapisan ferit jauh lebih besar dari sementit, dengan perbandingan sekitar 8 banding 1. Struktur ini disebut perlit karena penampakkannya di bawah mikroskop menyerupai kilauan mutiara. Perlit membentuk butiran kecil yang disebut koloni, di mana arah lapisan di dalamnya hampir sejajar, walau berbeda antar koloni. Lapisan ferit terlihat lebih terang dan tebal, sementit tampak sebagai garis gelap yang sangat tipis. Karena sangat halus, banyak lapisan sementit tampak seperti bayangan gelap menyatu. Perlit punya sifat mekanik yang seimbang, tidak selunak ferit, tapi juga tidak sekeras sementit (Prabhudev, 1988).

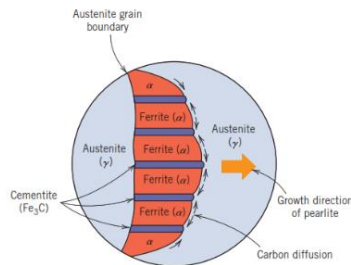
Lapisan-lapisan Fe_3C yang menyusun perlit terbentuk karena komposisi austenit awal berbeda dari komposisi ferit dan sementit yang dihasilkan setelah transformasi. Untuk memungkinkan perubahan ini, atom karbon harus berpindah tempat, atau berdifusi, dari satu bagian ke bagian lain. Gambar 3.3 menunjukkan bagaimana karbon bergerak dari wilayah ferit ke arah sementit selama perlit tumbuh dari batas butir ke dalam austenit yang masih tersisa. Struktur berlapis muncul karena hanya diperlukan perpindahan karbon dalam jarak pendek, membuat prosesnya lebih cepat dan efisien (Suherman, 1999).



Gambar 3. 3. Representasi skematis struktur mikro eutektoid (0,76 wt% C) di atas dan di bawah suhu eutektoid.

Sumber: (William D. Callister, 2012)

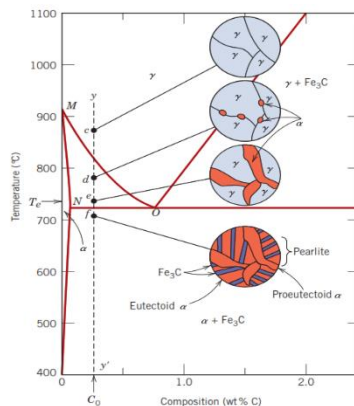
Pola lamela dalam perlit berkembang karena difusi karbon yang dibutuhkan hanya mencakup jarak pendek antar fase, sehingga prosesnya efisien.



Gambar 3. 4. Proses Pembentukan Perlit

Sumber: (William D. Callister, 2012)

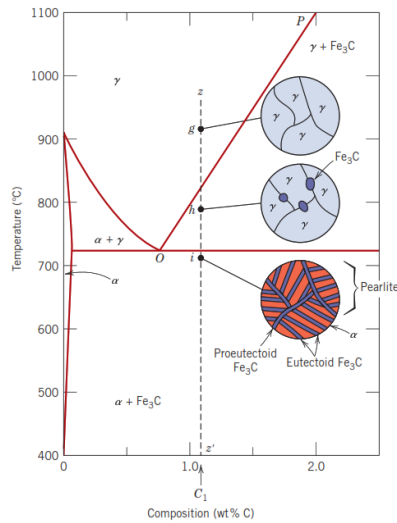
Struktur mikro paduan Fe-Fe₃C dengan komposisi bukan eutektoid, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.5, ditinjau untuk sistem eutektik. Misalnya, paduan C₀ (antara 0,022 dan 0,76 wt% C) tergolong hipoeutektoid. Selama proses pendinginan melalui wilayah dua fase, komposisi ferit sedikit meningkat dalam kadar karbon sepanjang garis MN. Sebaliknya, austenit mengalami perubahan komposisi yang lebih drastis seiring penurunan suhu mengikuti garis MO.



Gambar 3. 5. Struktur Mikro Untuk Paduan Besi-Karbon Hipoeutektoid

Sumber: (William D. Callister, 2012)

Paduan hipereutektoid, yaitu yang memiliki kandungan karbon antara 0,76 hingga 2,14 wt%, akan mengalami transformasi dan membentuk struktur mikro yang meliputi perlit dan sementit proeutektoid saat didinginkan dari wilayah dua fase.

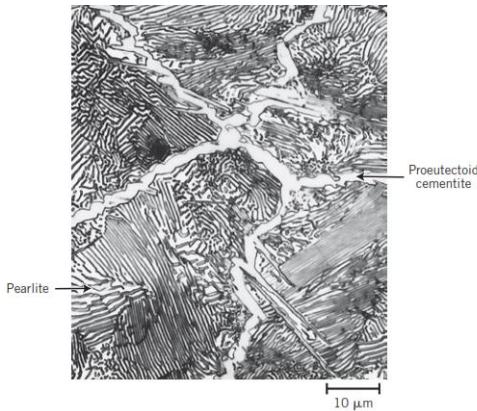


**Gambar 3. 6. Struktur Mikro Untuk Paduan Besi-Karbon
Dengan Komposisi Hipereutektoid
Sumber: (William D. Callister, 2012)**

Kuantitas relatif dari kedua fasa tersebut dapat dihitung dengan pendekatan yang sama seperti pada paduan hipoeutektoid, menggunakan garis kesetimbangan dari 0,76 hingga 6,70 wt% C. Untuk paduan dengan komposisi C_1 (lihat Gambar 3.6), fraksi perlit (W_p) dan fraksi sementit proeutektoid (W_{Fe_3C}) ditentukan berdasarkan rumus aturan perhitungan berikut:

$$W_p = \frac{X}{V + X} = \frac{6.70 - C'_1}{6.70 - 0.76} = \frac{6.70 - C'_1}{5.94} \quad (10.22)$$

$$W_{Fe_3C} = \frac{V}{V + X} = \frac{C'_1 - 0.76}{6.70 - 0.76} = \frac{C'_1 - 0.76}{5.94} \quad (10.23)$$



Gambar 3. 7. Foto Mikro Dari Baja 1,4-wt%C

Sumber: (William D. Callister, 2012)

Secara umum, Diagram fasa Fe-C menampilkan tiga titik penting: Eutektik (4,3% C; 1147 °C), Eutektoid (0,76% C; 727 °C), Peritektik (0,17% C; 1493 °C). Struktur mikro yang dihasilkan sangat tergantung pada komposisi karbon dan laju pendinginan. Sebagai contoh, baja hipereutektoid (C > 0,76%) akan menghasilkan struktur perlit + sementit (Thelning, 2000).

Terdapat beberapa fasa penting dalam diagram ini:

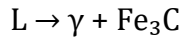
1. Austenit (γ -Fe): Fasa padat dengan struktur kristal FCC yang dapat melarutkan karbon hingga 2,11%. Stabil pada suhu tinggi (sekitar 727°C hingga 1495°C).
2. Ferit (α -Fe): Fasa padat BCC yang hanya mampu melarutkan karbon dalam jumlah kecil ($\sim 0,02\%$). Stabil di bawah suhu 912°C.
3. Sementit (Fe_3C): Senyawa intermetalik yang sangat keras dan getas, mengandung 6,67% C.

4. Perlit: Struktur mikro lamelar yang terbentuk dari ferit dan sementit hasil dari transformasi eutektoid austenit.
5. Ledeburit: Campuran eutektik dari austenit dan sementit, terbentuk pada karbon tinggi ($>4,3\%$).

Diagram fasa ini mencakup tiga reaksi penting:

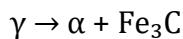
1. Reaksi Eutektik

Terjadi pada $4,3\%$ C dan 1147°C , di mana cairan (L) berubah menjadi austenit + sementit (ledeburit) secara simultan.



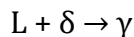
2. Reaksi Eutektoid

Terjadi pada $0,8\%$ C dan 727°C , di mana austenit berubah menjadi ferit + sementit membentuk perlit.



3. Reaksi Peritektik

Terjadi pada $0,16\%$ C dan 1495°C , di mana cairan + δ -ferit berubah menjadi austenit.



Pembagian Baja Berdasarkan Kandungan Karbon

- Baja Hipoeutektoid ($< 0,8\%$ C): Struktur mikro terdiri dari ferit dan perlit. Semakin rendah karbon, semakin banyak ferit terbentuk.
- Baja Eutektoid ($0,8\%$ C): Seluruh austenit berubah menjadi perlit saat pendinginan.
- Baja Hipereutektoid ($> 0,8\% - 2,11\%$ C): Mengandung sementit primer dan perlit. Semakin

tinggi karbon, semakin banyak sementit terbentuk (Thelning, 2000).

Diagram fasa besi-karbon digunakan untuk merancang perlakuan panas seperti annealing, normalizing, quenching, dan tempering. Selain itu, diagram ini membantu memprediksi struktur mikro akhir dan sifat mekanik yang akan dihasilkan berdasarkan jalur pemanasan dan pendinginan. Misalnya, untuk meningkatkan kekerasan baja, pendinginan cepat dari fase austenit digunakan agar terbentuk martensit. Sebaliknya, jika dibutuhkan keuletan, maka digunakan pendinginan lambat untuk membentuk perlit atau ferit (Totten, 2006).

3.4 Transformasi Material

Transformasi material merujuk pada perubahan struktur kristal, mikrostruktur, atau fasa suatu material akibat perubahan kondisi lingkungan seperti suhu, tekanan, komposisi, atau medan magnet. Transformasi ini memengaruhi sifat fisik dan mekanik material secara signifikan. Contoh paling umum adalah transformasi austenit menjadi martensit pada baja saat pendinginan cepat, atau pembentukan perlit saat pendinginan lambat (Abbott, 1912).

Transformasi fasa dapat digolongkan menjadi dua jenis utama, yaitu transformasi difusional (seperti pembentukan perlit) dan non-difusional (seperti pembentukan martensit). Proses ini tergantung pada laju pendinginan dan suhu, yang bisa dijelaskan lebih rinci melalui diagram TTT (*Time-Temperature-Transformation*) atau CCT (*Continuous Cooling Transformation*) (Zhang, D., Wei, D., Liu, B., Wang, F., & Zhang, 2016). Transformasi antar

fasa, seperti dari austenit ke martensit pada pendinginan cepat, merupakan contoh transformasi difusi-non-difusi yang sangat menentukan sifat akhir suatu logam.

Transformasi dalam material dapat diklasifikasikan berdasarkan mekanisme dan kondisi termodinamika, sebagai berikut (Saunders and Miodownik, 1998):

A. Transformasi Kesetimbangan (*Equilibrium Transformations*)

Terjadi secara lambat, memungkinkan sistem mencapai kesetimbangan termodinamika. Umumnya melibatkan difusi atom .

Contoh: Austenit → Perlit pada pendinginan lambat baja karbon.

B. Transformasi Tak-Seimbang (*Non-equilibrium Transformations*)

Terjadi dengan sangat cepat, tidak memberi waktu cukup bagi atom untuk berdifusi. Struktur hasil transformasi biasanya metastabil. Contoh: Austenit → Martensit pada pendinginan cepat (*quenching*).

Jenis Transformasi Berdasarkan Mekanisme :

A. Transformasi Difusional

Mekanisme melalui perpindahan atom dalam jaringan kristal. Biasanya terjadi pada suhu menengah hingga tinggi.

Contoh: Austenit → Ferit + Sementit (Perlit)

Cair → Padat (kristalisasi logam)

B. Transformasi Non-Difusional (*Displastik* atau *Shear Transformations*)

Mekanisme melalui pergeseran kisi kristal secara simultan tanpa perpindahan atom dalam jangkauan panjang secara cepat dan spontan.

Contoh: Austenit → Martensit

Ciri khas: Terjadi tanpa perubahan komposisi kimia, hanya perubahan struktur kristal (FCC ke BCT dalam martensit baja).

Diagram Terkait Transformasi Material :

A. Diagram Fasa (*Phase Diagram*)

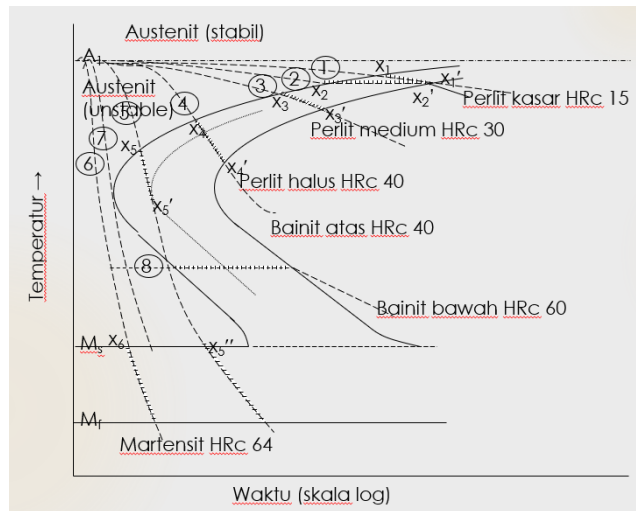
Menunjukkan fasa-fasa stabil pada berbagai suhu dan komposisi. Berguna untuk memahami kondisi awal dan akhir transformasi, dapat dilihat pada gambar 2.1

B. Diagram TTT (*Time-Temperature-Transformation*)

Material logam, khususnya baja, mengalami perubahan struktur mikro selama proses pendinginan dari suhu tinggi. Perubahan ini sangat dipengaruhi oleh laju pendinginan dan suhu transformasi. Untuk memahami dan mengendalikan proses transformasi fasa tersebut, digunakanlah *Time-Temperature-Transformation Diagram* atau lebih dikenal sebagai Diagram TTT (Suherman, 1999). Diagram ini sangat penting dalam rekayasa termal logam karena membantu menentukan perlakuan panas yang optimal agar diperoleh sifat mekanik yang diinginkan.

Diagram TTT menggambarkan hubungan antara waktu, suhu, dan fasa yang terbentuk selama proses pendinginan isothermal (pendinginan yang dilakukan hingga suhu tertentu, kemudian ditahan). Sumbu horizontal menyatakan logaritma waktu, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan suhu transformasi. Kurva-kurva dalam diagram ini menunjukkan awal dan akhir pembentukan fasa-fasa seperti perlit, bainit, dan martensit (Prabhudev, 1988).

Diagram TTT umumnya disusun untuk baja austenitik yang didinginkan dari suhu austenitisasi (biasanya di atas 727°C) ke suhu lebih rendah, lalu ditahan untuk mengamati perubahan fasa secara waktu nyata.



Gambar 3. 8. Foto Mikro Dari Baja 1,4-wt%C
Sumber: (Suherman, 1999)

a. Perlit

Perlit terbentuk pada suhu menengah ($\sim 550\text{--}700^{\circ}\text{C}$) dengan laju pendinginan lambat. Struktur ini terdiri

dari lapisan-lapisan ferit dan sementit. Perlit memberikan kekuatan sedang dan keuletan yang baik.

b. Bainit

Bainit terbentuk pada suhu lebih rendah ($\sim 250\text{--}550^\circ\text{C}$) dengan waktu transformasi lebih cepat. Ada dua tipe bainit:

- Upper bainite: terbentuk pada suhu lebih tinggi ($350\text{--}550^\circ\text{C}$).
- Lower bainite: terbentuk pada suhu lebih rendah ($250\text{--}350^\circ\text{C}$).

Bainit memiliki kekuatan lebih tinggi daripada perlit tetapi masih mempertahankan keuletan yang cukup.

c. Martensit

Martensit terbentuk jika pendinginan dilakukan sangat cepat (*quenching*) hingga di bawah suhu kritis (M_s – Martensite start). Transformasi ini tidak bergantung pada waktu, hanya tergantung suhu. Martensit adalah fasa keras dan getas karena struktur kristalnya berbentuk tetragonal terdistorsi (Suherman, 1999).

Diagram TTT khas memiliki bentuk huruf "C" yang menunjukkan batas waktu transformasi fasa. Diagram ini dibagi menjadi:

- Kurva awal transformasi (start curve).
- Kurva akhir transformasi (finish curve).
- Garis suhu M_s dan M_f untuk martensit.

Contoh transformasi berdasarkan jalur pendinginan:

- Jalur pendinginan lambat melewati kurva C $\rightarrow$ membentuk perlit.

- Jalur pendinginan sedang → membentuk bainit.
- Jalur pendinginan sangat cepat (tidak menyentuh kurva C) → membentuk martensit (Totten, 2006).

C. Diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*)

Menjelaskan transformasi fasa selama pendinginan kontinu (*non-isothermal*). Lebih praktis untuk kondisi industri dibanding diagram TTT. Diagram TTT dan Diagram CCT merupakan alat bantu untuk memahami bagaimana transformasi fasa berlangsung dalam kondisi non-kesetimbangan. Diagram TTT menunjukkan waktu yang diperlukan untuk transformasi fasa pada temperatur isothermal tertentu. Diagram CCT menggambarkan transformasi yang terjadi selama pendinginan kontinu. Diagram ini sangat penting dalam perlakuan panas logam, seperti normalisasi, anil, dan pengerasan (Zhang *et al.*, 2014).

Diagram CCT adalah representasi grafis yang menunjukkan bagaimana struktur mikro logam berubah selama pendinginan kontinu dari suhu austenitisasi. Diagram ini memetakan hubungan antara:

- Waktu pendinginan
- Suhu transformasi
- Jenis fasa yang terbentuk (perlit, bainit, martensit)

Berbeda dengan diagram TTT yang menggunakan skenario pendinginan isothermal, CCT menggambarkan kondisi aktual di mana logam didinginkan tanpa penahanan suhu tertentu (HKDHB and RWKH, 2006).

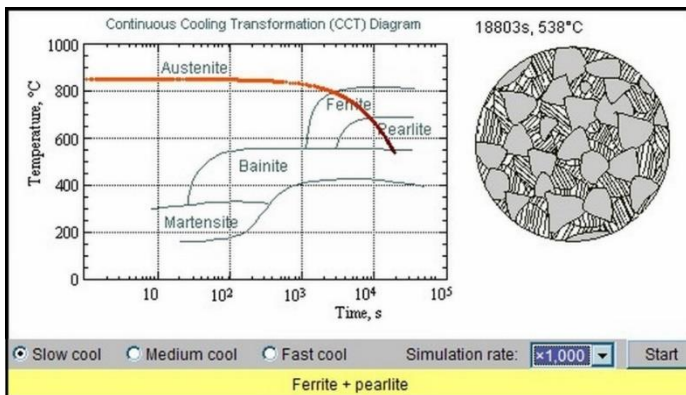
Diagram CCT disusun dalam sumbu:

- Vertikal: suhu (biasanya dalam °C)
- Horisontal: waktu dalam skala logaritmik (detik)

Kurva-kurva dalam diagram ini menunjukkan awal dan akhir transformasi dari austenit menjadi produk fasa lain, tergantung pada kecepatan pendinginan. Selain itu, terdapat garis-garis yang menunjukkan suhu mulai (M_s) dan selesai (M_f) terbentuknya martensit.

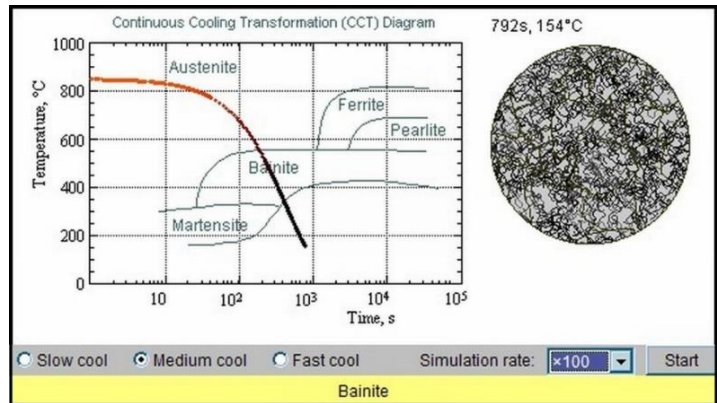
Berikut pola umum pendinginan dan hasil transformasinya dalam CCT:

- **Pendinginan lambat (furnace cooling):** membentuk perlit kasar.



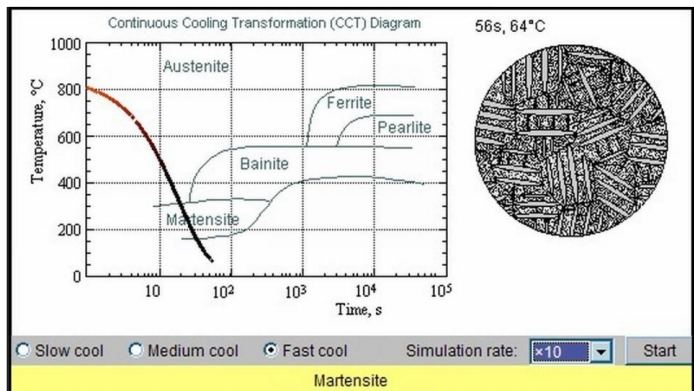
Gambar 3. 9. Pendinginan Lambat
Sumber: (Prabhudev, 1988)

- **Pendinginan sedang (air cooling):** membentuk perlit halus atau bainit.



Gambar 3. 10. Pendinginan Medium
Sumber: (Prabhudev, 1988)

- **Pendinginan cepat (oil quenching):** membentuk martensit sebagai atau dominan.



Gambar 3. 11. Pendinginan Cepat
Sumber: (Prabhudev, 1988)

Dengan membaca diagram CCT, dapat diprediksi:

- Jenis struktur mikro akhir
- Waktu transformasi

- Kisaran suhu pembentukan fasa tertentu.

Tabel 3. 1. Perbedaan CCT dengan TTT

Aspek	Diagram CCT	Diagram TTT
Jenis pendinginan	Kontinu	Isotermal
Relevansi industri	Sangat tinggi	Terbatas
Kurva transformasi	Lebih geser ke kanan	Lebih awal
Pembentukan martensit	Lebih realistis	Tidak digambarkan jelas

Sumber: (Thelning, 2000)

Misalnya, baja karbon 0.4% C dipanaskan ke 850°C dan didinginkan dengan tiga kecepatan berbeda:

- Pendinginan lambat (furnace) → struktur akhir: perlit kasar.
- Pendinginan sedang (udara) → struktur akhir: perlit halus dan sebagian bainit.
- Pendinginan cepat (minyak) → struktur akhir: bainit halus dan martensit.

Dengan membaca jalur pendinginan pada diagram CCT, kita dapat merancang metode quenching terbaik agar menghasilkan kombinasi sifat kekerasan, keuletan, dan ketangguhan yang optimal.

Tabel 3. 2. Contoh Transformasi Material

Jenis Material	Transformasi	Suhu/ Tekanan	Struktur Awal → Akhir	Sifat Baru
Baja karbon	Austenit → Perlit	~727 °C	FCC → lamela BCC + Fe ₃ C	Kuat dan ulet
Baja paduan	Austenit → Martensit	Quenching	FCC → BCT	Sangat keras
Al-Si alloy	Cair → α-Al + eutektik	~577 °C	Liquid → Padat multiphase	Kekuatan tinggi, ringan
Zr-alloy (reaktor)	α → β-Zr	> 862 °C	HCP → BCC	Ductile untuk fabrikasi

Sumber: (Thelning, 2000)

Dengan memahami diagram fasa dan mekanisme transformasi material, insinyur dan ilmuwan material dapat merancang proses perlakuan panas yang optimal serta memilih material dengan struktur mikro yang diinginkan untuk aplikasi tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, R.R. (1912) 'Steel and its Heat Treatment', *Scientific American*, 73(1899supp), pp. 323–323. Available at: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican05251912-323asupp>.
- Golikov, N.I. (2020) 'Effect of Residual Stress on Crack Development in Longitudinal Welded Joints of a Gas Pipeline', *Procedia Structural Integrity*, 30, pp. 28–32. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.006>.
- HKDHB and RWKH (2006) 'Preface to the Third Edition', in H.K.D.H. Bhadeshia and S.R. Honeycombe (eds) *Steels (Third Edition)*. Oxford: Butterworth-Heinemann, p. xi. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075068084-4/50002-9>.
- Porter, D.A., Easterling, K.E. and Sherif, M.Y. (2009) *Phase transformations in metals and alloys, third edition, Phase Transformations in Metals and Alloys, Third Edition*.
- Prabhudev, K.H. (1988) 'Handbook of Heat Treatment of Steels', p. 762. Available at: <http://books.google.com/books?id=yu2r5uqJBGIC&pgis=1>.
- Saunders, N. and Miodownik, A.P. (eds) (1998) 'Chapter 6 - Phase Stabilities', in *Pergamon Materials Series*. Pergamon, pp. 129–178. Available at: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1470-1804\(98\)80026-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1470-1804(98)80026-6).

- Suherman, W. (1999) *Diktat Kuliah: Perlakuan Panas*. Surabaya: FTI-ITS.
- Thelning, K.-E. (2000) *Steel and its heat treatment*. Butterworths.
- Totten, G.E. (2006) 'Dieter, Steel Heat Treatment', pp. 1–12.
- William D. Callister, D.G.R. (2012) *Fundamentals of Materials Science and Engineering*.
- Zhang, D., Wei, D., Liu, B., Wang, F., & Zhang, Y. (2016) 'Performance and cost analysis of anti-corrosive coating system for ship hulls', *Ocean Engineering*, 167, pp. 164–171.
- Zhang, C. *et al.* (2014) 'Continuous cooling transformation behavior of a Ti addition steel', in *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publications, pp. 480–483. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.556-562.480>.

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

BAB 4

PROSES PERLAKUAN PANAS PADA LOGAM

Oleh Subekti

4.1 Pendahuluan

Perlakuan panas adalah teknik yang melibatkan pemanasan dan pendinginan logam. Proses ini meningkatkan kekuatan, kekerasan, viskositas, ketangguhan, ketahanan benturan, ketahanan aus, ketahanan abrasi, ketahanan korosi, kemampuan mesin, dan kemampuan pengerjaan dingin logam (Banerjee, 2017). Fitur utama perlakuan panas adalah meningkatkan sifat logam tanpa mengubah bentuknya. Bab ini bertujuan untuk membantu meningkatkan pengetahuan tentang perlakuan panas, dengan fokus pada perlakuan panas baja.

Perlakuan panas merupakan teknik penting dalam pemrosesan baja karena meningkatkan berbagai sifat baja, adapun tujuan utama proses perlakuan panas untuk baja (Banerjee, 2017) adalah:

- a. Untuk meningkatkan kekuatan, ketangguhan, kekerasan, dan keuletan;
- b. Untuk melunakkan baja;
- c. Untuk menghilangkan tegangan dan regangan internal;

- d. Untuk menghaluskan butiran;
- e. Untuk menormalkan baja yang telah mengalami operasi mekanis atau perlakuan panas.

Secara umum, sifat baja karbon tinggi diubah oleh perlakuan panas jauh lebih besar daripada baja karbon rendah. Alasannya adalah bahwa perubahan sifat sebagian besar disebabkan oleh perubahan bentuk dan distribusi karbon, yang jelas rendah pada baja karbon rendah.

Perubahan sifat baja setelah perlakuan panas disebabkan oleh transformasi fasa dan perubahan struktur yang terjadi selama perlakuan panas. Faktor-faktor yang menentukan dan mengendalikan perubahan struktur ini disebut prinsip-prinsip perlakuan panas. Prinsip-prinsip penting perlakuan panas adalah sebagai berikut:

- a. Transformasi fasa selama pemanasan.
- b. Pengaruh laju pendinginan terhadap perubahan struktur selama pendinginan.
- c. Pengaruh kandungan karbon dan unsur paduan.

4.2 Prinsip Perlakuan Panas

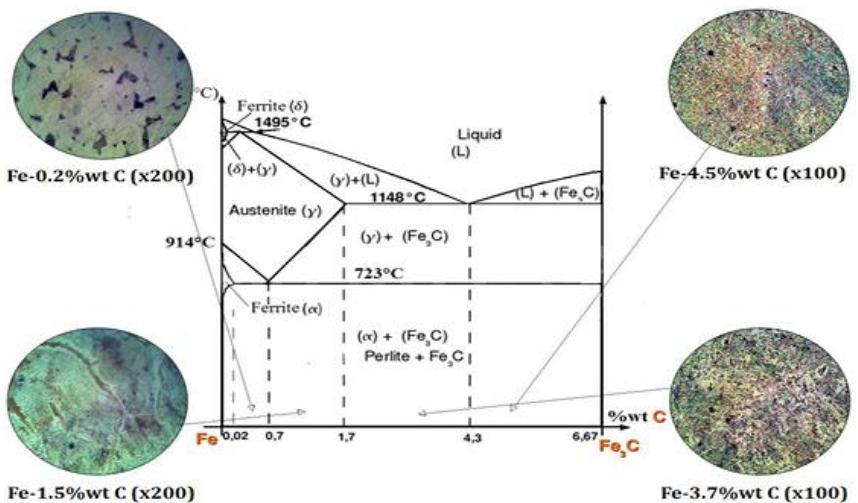
Pada proses perlakuan panas terdiri dari dua metoda perlakuan panas, yaitu

- 1. Metoda Transformasi martensit
- 2. Metoda Perlakuan Pengerasan Presipitasi

4.2.1 Transformasi Martensit

Martensit terbentuk dari austenit melalui transformasi displasif. Perlakuan panas yang disebut "quenching" dilakukan untuk mengeraskan material baja. Pertama,

material baja dipanaskan di atas suhu transformasi untuk menciptakan struktur austenit, yang memungkinkan banyak atom karbon masuk di antara atom-atom besi. Selanjutnya, material didinginkan dengan cepat untuk menciptakan struktur yang sangat keras (struktur martensit) dengan banyak atom karbon yang terperangkap di dalam atom-atom besi. Inilah yang disebut "transformasi martensit". Semakin tinggi kandungan karbon, semakin keras kekerasan yang dihasilkan seperti tampak pada Gambar 4. 1.



Gambar 4. 1. Diagram fase Fe-C dan struktur mikro

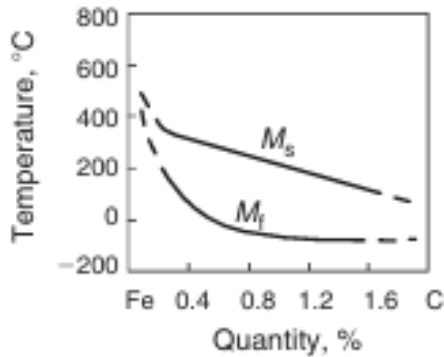
(Sumber : Ferhat, dkk, 2014)

Transformasi martensit adalah perilaku transformasi yang terjadi ketika material didinginkan dengan cepat dari keadaan austenit, dan semakin cepat laju pendinginan, semakin banyak struktur martensit yang terbentuk. Semakin tinggi kandungan karbon (%), semakin rendah suhu Ms (titik di mana transformasi martensit terjadi), dan semakin rendah suhu Mf (titik di mana transformasi martensit

berakhir). Untuk material dengan kandungan karbon lebih dari 0,6%, suhu dapat turun di bawah 0°C (Totten, dkk, 2006), seperti tampak pada Gambar 4.2. Struktur austenitik yang tidak menyelesaikan transformasi di sini tetap disebut "austenit tertahan". Jika austenit tertahan dibiarkan, secara alami akan bertransformasi secara bertahap, menyebabkan cacat seperti perubahan dimensi. Oleh karena itu, terdapat metode perlakuan yang disebut "perlakuan sub-nol" yang menahan material pada suhu rendah untuk mengubahnya secara paksa menjadi martensit. Namun, karena austenit tertahan lebih lunak daripada martensit, sifat geser austenit tertahan dapat berkontribusi pada kasus-kasus yang membutuhkan kompatibilitas (Dossett, dan Totten, 2014). Adapun jenis perlakuan panas adalah sebagai berikut

4.2.1.1 Anil

Anil merupakan salah satu proses terpenting dalam perlakuan panas. Proses ini merupakan salah satu operasi yang paling banyak digunakan dalam perlakuan panas baja dan didefinisikan sebagai proses pelunakan. Proses ini dipanaskan 30-50°C di atas suhu kritis atas dan didinginkan dengan laju yang sangat lambat melalui anil di dalam tungku. Tujuan utama anil adalah untuk membuat baja lebih ulet dan mudah ditempa serta menghilangkan tegangan internal. Proses ini membuat baja lebih lunak dan lebih mudah untuk dimesin.



Gambar 4. 2. Suhu awal martensit M_s dan suhu akhir M_f versus kandungan karbon.

(Sumber : Totten, dkk, 2006)

4.2.1.1.1 Tujuan Anil

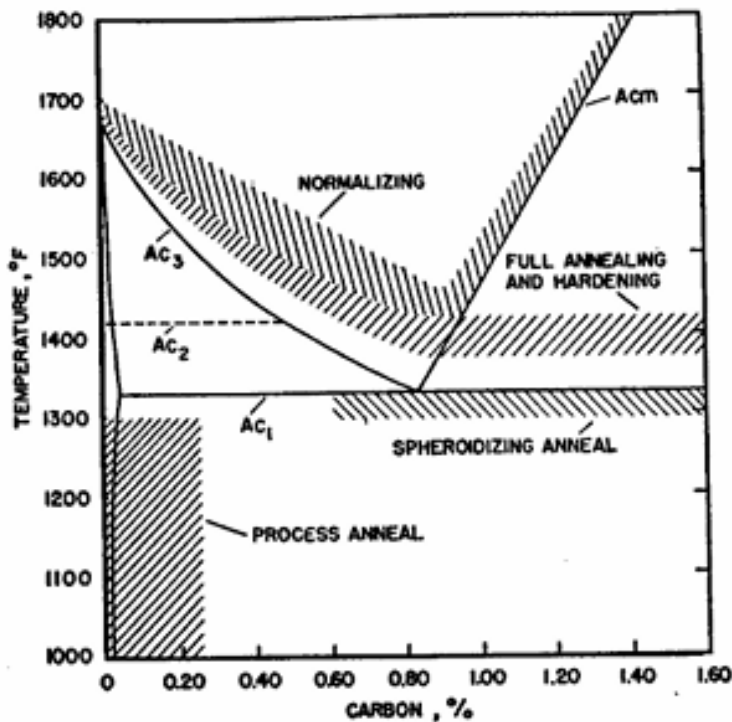
Adapun tujuan dari perlakuan panas adalah :

- Melunakkan baja dan meningkatkan kemampuan mesinnya.
- Untuk mengurangi ukuran partikel dan menghilangkan gas.
- Proses ini menghilangkan tegangan internal yang dihasilkan oleh proses sebelumnya.
- Untuk mendapatkan keuletan, kelenturan, dan ketangguhan yang diinginkan.
- Mengubah sifat listrik dan magnetik.

4.2.1.1.2 Prosedur Anil

Anil proses, sering disebut anil pelepas tegangan, biasanya diterapkan pada baja karbon rendah yang dikerjakan dingin (hingga sekitar 0,25% karbon) untuk melunakkan baja secukupnya agar dapat dikerjakan dingin lebih lanjut. Baja biasanya dipanaskan mendekati, tetapi di

bawah, suhu Ac_1 (gambar 4.3). Jika baja tidak akan dikerjakan dingin lebih lanjut, tetapi pelepas tegangan internal diinginkan, kisaran suhu yang lebih rendah sudah cukup (sekitar 1.000 °F). Laju pendinginan tidak penting. Jenis anil ini akan menyebabkan rekristalisasi dan pelunakan butiran ferit hasil pengerjaan dingin, tetapi biasanya tidak akan memengaruhi jumlah perlit hasil pengerjaan dingin yang relatif kecil.



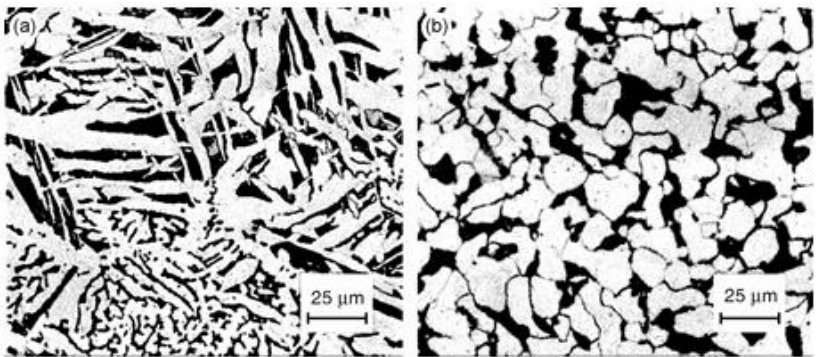
Gambar 4. 3. Kisaran suhu yang direkomendasikan untuk perlakuan panas pada baja karbon biasa

(Sumber : Digges, dkk, 1996)

4.2.1.2 Normalisasi

Normalisasi adalah proses perlakuan panas logam di mana benda kerja dipanaskan hingga suhu 30–50 °C di atas A_{c3} (untuk baja hipoeutektoid) atau A_{cm} (untuk baja hipereutektoid), dipertahankan pada suhu tersebut cukup lama, dan kemudian didinginkan di udara, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3. Proses ini terutama bertujuan untuk mengubah austenit berbutir halus menjadi perlit lamelar halus atau menghilangkan karbida retikuler pada baja hipereutektoid, menghilangkan tegangan internal material, menstabilkan ukuran benda kerja, mempersiapkan struktur untuk pendinginan, dan mencegah deformasi serta retak (Xiaochun, Kuangdi, 2023).

Normalisasi sangat dibutuhkan pada pengecoran baja karena, akibat pendinginan yang lambat setelah pengecoran, struktur berbutir kasar terbentuk yang biasanya mengandung ferit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4. Struktur pengecoran baja (a) sebelum normalisasi dan (b) setelah normalisasi

(Sumber : Totten, dkk, 2006)

4. 2.1.2.1 Tujuan Normalisasi

Adapun tujuan dari perlakuan panas normalisasi

- Meningkatkan keseragaman struktur.
- Untuk memastikan penyempurnaan butiran.
- Untuk menghasilkan perubahan yang diinginkan pada sifat-sifat baja.

4. 2.1.2.2 Prosedur Normalisasi

Baja dipanaskan hingga sekitar 40° hingga 50°C di atas suhu kritis atasnya. Baja dipertahankan pada suhu ini untuk waktu yang singkat. Baja kemudian didinginkan di udara diam pada suhu ruangan. Proses ini dikenal sebagai pendinginan udara. Adapun Keunggulan Proses Normalisasi Dibandingkan Proses Anil, adalah

- Meningkatkan homogenitas mikrostruktur dan memperhalus ukuran butir
- Mengurangi kemungkinan distorsi atau fraktur dengan melepaskan tegangan internal.
- Meningkatkan keuletan dan kekerasan logam
- Hasilnya, logam menjadi lebih kuat dan keras.
- Menghilangkan segregasi dendritik yang tersisa dari proses pengecoran. Kerugian Proses Normalisasi

Beberapa kemungkinan kerugian dari proses normalisasi adalah:

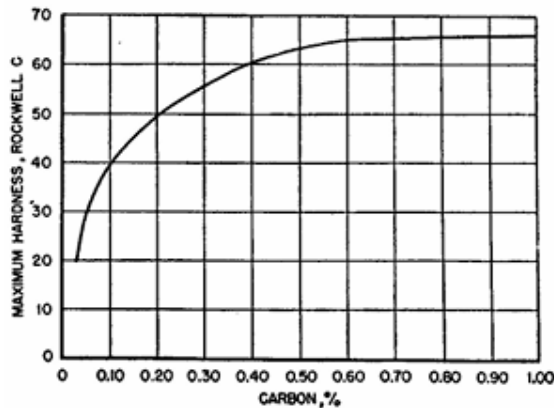
- Proses ini dapat memperumit struktur logam karena memecahnya menjadi terlalu banyak tabel.
- Proses ini dapat mengurangi kekuatan beberapa paduan dan logam.

- Proses ini mungkin memerlukan pemesinan lanjutan atau penyelesaian permukaan untuk menghilangkan kerak atau lapisan dekarburisasi.

4.2.1.3 Pengerasan (*Hardening*)

Pengerasan: Tujuan utama proses pengerasan adalah untuk membuat baja keras dan ulet. Dalam proses ini, baja dipanaskan $30^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{C}$ di atas suhu kritis atas dan kemudian dibiarkan mendingin hingga suhu ruang dengan pendinginan dalam air atau oli. Proses ini merupakan kebalikan dari anil.

Kekerasan maksimum yang dapat diperoleh pada baja struktural paduan rendah dan baja karbon biasa yang dikeraskan sepenuhnya terutama bergantung pada kandungan karbonnya. Hubungan antara kekerasan maksimum dan kandungan karbon ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5. Hubungan antara kekerasan maksimum yang dapat dicapai baja yang dipadamkan dengan kandungan karbon.

(Sumber : Digges, dkk, 1996)

4. 2.1.3.1 Tujuan Pengerasan

Pengerasan meningkatkan kekerasan baja.

- Tahan aus
- Memungkinkan baja untuk memotong logam lain

4. 2.1.3.2 Prosedur Pengerasan

Baja dipanaskan di atas rentang suhu kritisnya. Baja dipertahankan pada suhu tersebut selama beberapa waktu. Baja kemudian didinginkan dengan cepat dalam media pendinginan. Media pendinginan dipilih sesuai dengan tingkat kekerasan yang diinginkan. Udara, air, oli pendinginan, dan garam cair digunakan sebagai media pendinginan. Bagian tipis, seperti bilah pisau, didinginkan di udara. Air merupakan media yang banyak digunakan, tetapi menyebabkan gelembung terbentuk di permukaan logam. Oleh karena itu, larutan air garam digunakan untuk mencegah hal ini. Minyak digunakan ketika terdapat risiko distorsi pada retakan dan cocok untuk baja paduan. Garam cair digunakan untuk mendinginkan serpihan, menghasilkan produk yang bebas retak dan tahan benturan.

4. 2.1.3.3 Aplikasi Pengerasan

Berlaku untuk pahat, palu godam, palu tangan, center punch, tap, die, pemotong frais, bilah pisau, dan roda gigi.

4.2.1.4 Tempering

Ketika spesimen baja dikeraskan selama proses pengerasan, spesimen tersebut menjadi getas dan memiliki tegangan sisa yang tinggi. Ini adalah operasi yang digunakan

untuk memodifikasi sifat baja yang dikeraskan dengan pendinginan (quenching) dengan tujuan meningkatkan kegunaannya.

Proses utama yang terjadi selama tempering adalah presipitasi dan rekristalisasi martensit. Baja yang diquenching memiliki struktur metastabil. Jika dipanaskan, strukturnya akan mendekati kesetimbangan. Karakter proses yang terjadi selama tempering ditentukan oleh tiga ciri utama baja yang diquenching: supersaturasi yang kuat pada larutan padat martensit, kepadatan cacat kisi kristal yang tinggi (dislokasi, batas sudut rendah dan besar, lapisan ganda), dan keberadaan austenit tertahan.

Proses utama yang terjadi selama tempering baja adalah presipitasi martensit yang disertai pembentukan karbida. Tergantung pada suhu dan durasi tempering, presipitasi martensit dapat melibatkan tiga tahap: presipitasi, presipitasi karbida metastabil intermediet, dan presipitasi serta koagulasi sementit.

Austenit tertahan dapat mengalami presipitasi secara bersamaan. Karena kepadatan dislokasi yang tinggi pada martensit, substrukturnya mirip dengan substruktur logam yang dikeraskan (dideformasi). Oleh karena itu, poligonisasi dan rekristalisasi dapat terjadi selama tempering. Tempering dibagi menjadi tiga kategori tergantung pada kegunaan baja yang dibutuhkan:

- Tempering suhu rendah.
- Tempering suhu sedang.
- Tempering suhu tinggi.

4.2.1.4.1 Tujuan tempering

Untuk menghilangkan tegangan internal akibat pengerasan.

- Untuk mengurangi kerapuhan.
- Meningkatkan keuletan, kekuatan, dan ketangguhan.
- Untuk meningkatkan ketahanan aus.
- Untuk mendapatkan sifat mekanik yang dibutuhkan.

4.2.1.4.2 Prosedur tempering

Baja setelah di-quenching dalam proses pengerasan dipanaskan kembali hingga suhu sedikit lebih tinggi daripada rentang suhu penggunaannya, tetapi di bawah suhu kritis bawah. Suhu di sini dapat bervariasi dari 100°C hingga 700°C.

Pemanasan kembali dilakukan dalam bak berisi minyak, timah cair, atau garam cair. Spesimen dibiarkan di dalam bak selama beberapa waktu hingga suhu mencapai keseragaman. Waktu ini bergantung pada komposisi baja dan kualitas yang diinginkan. Spesimen kemudian dikeluarkan dari bak dan dibiarkan mendingin perlahan di udara diam.

4.2.1.4.3 Aplikasi tempering

Tempering diterapkan pada pahat potong, perkakas, dan roda gigi yang dikeraskan melalui proses pengerasan.

4.2.2 Metoda Perlakuan Pengerasan Presipitasi

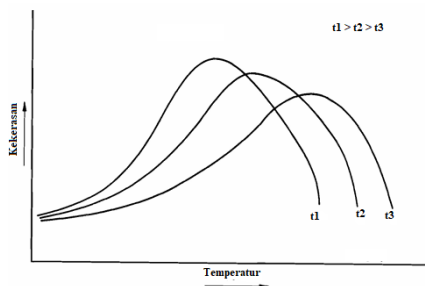
Pada tahun 1906, pengerasan presipitasi logam secara tidak sengaja ditemukan pada paduan aluminium-tembaga

yang disebut "Duralumin" oleh ahli metalurgi Jerman Alfred Wilm. Butuh waktu sekitar 15 tahun setelah penemuan ini untuk sepenuhnya memahami dan kemudian memanfaatkan mekanisme pengerasan presipitasi (Luke Zubek, 2006). Penerapannya yang luas menggarisbawahi efektivitasnya dalam menghasilkan material berkinerja tinggi. Adapun proses pengerasan presipitasi (Martin, 2012; Ludwigson, & Hall, 1959), adalah

1. Pengerasan presipitasi adalah perlakuan panas larutan. Dalam kasus baja tahan karat yang dapat dikeraskan dengan presipitasi, perlakuan ini terdiri dari perendaman singkat pada kisaran 1650°F hingga 2050°F, perlakuan yang tepat bergantung pada komposisi dan sifat yang diinginkan. Tujuan dari perlakuan ini adalah untuk melarutkan unsur-unsur yang akhirnya membentuk presipitat pengerasan. Perlakuan panas larutan juga dapat berfungsi sebagai anil atau sebagai perlakuan pengkondisian austenit pada baja tahan karat.
2. Pengerasan presipitasi adalah pengembangan kondisi supersaturasi. Karena sebagian besar unsur paduan jauh lebih mudah larut pada suhu anil larutan daripada pada suhu kamar, supersaturasi unsur terlarut dapat dicapai dengan pendinginan. Pendinginan, atau setidaknya pendinginan cepat, mencegah presipitasi unsur terlarut selama pendinginan dengan membatasi waktu di mana embrio presipitat dapat tumbuh menjadi inti yang stabil melalui proses difusi. Pada suhu kamar, difusi dalam baja tahan karat sangat lambat sehingga presipitasi tidak terjadi.
3. proses pengerasan-presipitasi, yaitu perlakuan penuaan (aging treatment). Perlakuan ini merupakan kompromi

antara variabel termodinamika dan kinetik. Tingkat supersaturasi yang tinggi yang terdapat pada paduan (baik austenitik maupun martensit) pada suhu ruang memberikan gaya dorong yang kuat untuk presipitasi. Namun, laju difusi yang dapat diabaikan pada baja tahan karat pada suhu ini mencegah pembentukan presipitat. Pada suhu yang sedikit lebih tinggi, laju difusi cukup besar untuk memungkinkan migrasi atom yang mengarah pada pembentukan presipitat. Sementara laju difusi (variabel kinetik) meningkat seiring dengan suhu, tingkat supersaturasi (variabel termodinamika) menurun seiring dengan suhu. Pada suhu tertentu, martensit mulai kembali menjadi austenit, sehingga kondisi supersaturasi teratasi.

Pada suhu tinggi dalam rentang presipitasi-pengerasan, presipitat tumbuh dengan cepat dan menjadi tidak koheren. Efek pengerasannya dalam kondisi ini berkurang secara signifikan. Pengaruh durasi dan suhu perlakuan penuaan (*Aging*) terhadap kekerasan diilustrasikan pada Gambar 4.6.

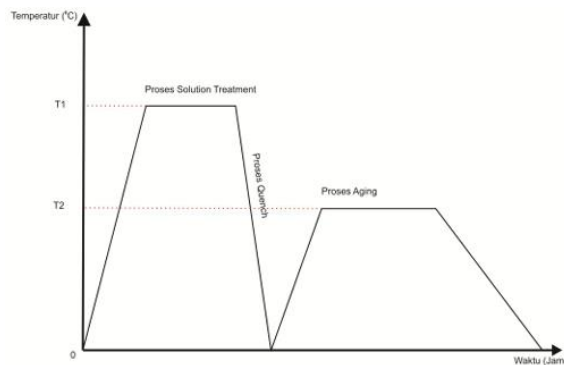


Gambar 4. 6. Pengaruh waktu, dan temperatur pada perlakuan (*Aging*) terhadap kekerasan

(Sumber : Ludwigson, & Hall, 1959)

Pada suhu tinggi dalam rentang presipitasi-pengerasan, presipitat tumbuh dengan cepat dan menjadi tidak koheren. Efek pengerasannya dalam kondisi ini berkurang secara signifikan. Memahami langkah-langkah mendasar ini sangat penting untuk mengoptimalkan proses pengerasan presipitasi dan mencapai sifat material yang diinginkan. Setiap fase harus dikontrol secara cermat untuk memastikan pembentukan struktur mikro yang seragam dan stabil, yang penting untuk peningkatan kinerja paduan yang telah diolah.

Saat ini, pengerasan presipitasi sangat penting dalam menciptakan material berkekuatan tinggi untuk berbagai aplikasi, seperti komponen kedirgantaraan yang tahan terhadap suhu dan tekanan ekstrem, serta perangkat medis yang membutuhkan daya tahan dan biokompatibilitas. Penelitian dan inovasi yang berkelanjutan di bidang ini menjanjikan peningkatan lebih lanjut dalam kinerja material, mendorong kemajuan di berbagai sektor teknologi (Purniawan, dkk, 2017). Skema perlakuan panas pengerasan presipitasi ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7. Skema waktu-suhu pengerasan presipitasi
(Sumber : Purniawan, dkk, 2017)

Suhu pengerasannya rendah, sehingga hanya terjadi sedikit perubahan warna pada permukaan, dengan sedikit oksidasi, dan perubahan dimensi hanya disertai penyusutan sebesar 0,004 hingga 0,006 mm per cm. Struktur setelah pengerasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, terdapat endapan yang sangat halus sehingga sulit dibedakan antara karbida dan nitrida (Tsukamoto, 1959).



Gambar 4. 8. Microstruktur hasil Pengerasan Presipitasi
(Tsukamoto, 1959).

Adapun keuntungan dan kerugian dari Pengerasan Presipitasi pada Baja Tahan Karat.

1. Keuntungan Pengerasan Presipitasi

- Berkat pengembangan struktur mikro yang lebih kokoh di dalam logam, membuat logam hingga empat kali lebih kuat.
- meningkatnya keuletan material yang akan membantu mencegah retak dan patah.
- Membuat logam lebih tahan korosi, dan memberinya semacam perlindungan terhadap keausan.

2. Kekurangan Pengerasan Presipitasi

- Penggunaan panas yang terlalu tinggi selama proses pengerasan presipitasi membuat logam menjadi getas, atau menyebabkannya retak atau melengkung selama fase pendinginan.
- Memakan waktu dan rumit yang membutuhkan peralatan yang sangat khusus yang terkadang sulit didapatkan.
- Membutuhkan keahlian, serta perhitungan waktu dan suhu yang presisi.
- Biayanya yang tinggi, proses yang panjang, dan tuntutan presisi membuat proses ini tidak selalu layak untuk beberapa aplikasi dan dapat menyebabkan biaya material yang lebih tinggi.

4.3 Kesimpulan

Kali ini, kami menjelaskan jenis-jenis perlakuan panas untuk produk baja. Perlakuan panas adalah metode pemrosesan yang mengubah struktur baja melalui pemanasan dan pendinginan untuk mendapatkan kekerasan, ketangguhan, dan lain lain. Suhu pemanasan dan laju pendinginan berbeda untuk setiap jenis, dan perbedaan kecil sekalipun dapat sangat memengaruhi sifat baja, sehingga keterampilan dan pengetahuan teknis yang tinggi sangat penting saat melakukan perlakuan panas.

DAFTAR PUSTAKA

- Banerjee, M. K. (2017). 2.1 Fundamentals of heat treating metals and alloys. *Comprehensive materials finishing*, 1-49.
- Digges, T. G., Rosenberg, S. J., & Geil, G. W. (1966). Heat treatment and properties of iron and steel (No. NBSMONO88).
- Dossett, J. L., & Totten, G. E. (2014). *ASM handbook. Volume 4D, Heat Treating of Irons and Steels, ASM International, Materials Park, OH, USA*.
- Ferhat, M., Benchettara, A., Amara, S. E., & Najjar, D. (2014). Corrosion behaviour of Fe-C alloys in a sulfuric medium. *J. Mater. Environ. Sci*, 5(4), 1059-1068.
- Fujio Tsukamoto. (1959). On the precipitation-hardening stainless steels. *J-STAGE Top*. Vol. 45 (1959) No. 11 (in Japanese). https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.45.11_1282
- Luke Zubek (2006). Technical Overview Precipitation Hardening of Stainless Steel Grades. https://msdspring.com/Technical/reference/17-7ph_techsummary.pdf
- Ludwigson, D. C., & Hall, A. M. (1959). The physical metallurgy of precipitation-hardenable stainless steels (Vol. 111). Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute.
- Martin, J. W. (2012). *Precipitation hardening: theory and applications*. Butterworth-Heinemann.
- Purniawan, A., Sutarsis, S., & Sigit, T. W. (2017). Precipitation Hardening Formation in Mg6Zn0. 5Y Alloy as an Engine Block Application. *Key Engineering Materials*, 739, 220-224.

Totten, G. E. (2006). *Steel heat treatment handbook-2* volume set. CRC press.

<https://www.theengineerspost.com/heat-treatment-of-steel/>

<https://steelprogroup.com/stainless-steel/type/precipitation-hardening/>

<https://www.enzemfg.com/precipitation-hardening-stainless-steel/>

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

BAB 5

SIFAT MEKANIS LOGAM DAN PENGUJIAN

Oleh Muhammad Ridwan Septiawan

5.1 Pendahuluan

Dalam dunia teknik dan rekayasa material, logam merupakan salah satu jenis material yang paling banyak digunakan. Penggunaan logam meluas hampir di seluruh sektor industri seperti konstruksi, otomotif, perkapalan, manufaktur mesin, hingga teknologi kedirgantaraan. Keunggulan utama logam terletak pada sifat mekaniknya yang sangat baik, seperti kekuatan tarik tinggi, kekerasan yang memadai, serta keuletan dan ketangguhan yang memungkinkan logam dibentuk menjadi berbagai struktur kompleks. Selain itu, logam memiliki kemampuan menghantarkan panas dan listrik, serta dapat didaur ulang, menjadikannya pilihan ideal dalam banyak aplikasi teknik. Namun demikian, keunggulan tersebut hanya dapat dimanfaatkan secara optimal jika pengguna memahami dengan baik karakteristik logam yang digunakan, terutama dalam konteks pembebanan mekanik yang kompleks dan sering kali ekstrem (Callister and Rethwisch, 2018).

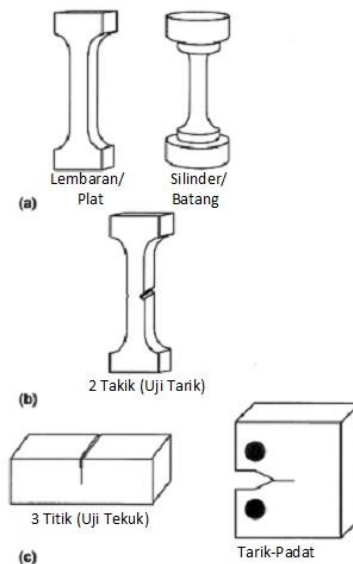
Sifat mekanik logam adalah karakteristik logam dalam menanggapi gaya atau beban dari luar. Hal ini mencakup berbagai aspek seperti kekuatan tarik, kekerasan, keuletan,

kekakuan, dan ketahanan terhadap kelelahan material. Masing-masing sifat ini penting untuk dipahami karena sangat menentukan perilaku logam dalam situasi nyata, baik saat digunakan dalam kondisi statis maupun dinamis. Misalnya, dalam pembuatan rangka kendaraan, diperlukan logam yang ringan tetapi memiliki kekuatan tinggi agar efisien namun tetap aman. Sebaliknya, dalam konstruksi bangunan bertingkat, dibutuhkan material yang mampu menahan beban berat dalam jangka waktu lama. Pemilihan material yang salah dapat berujung pada kegagalan struktur yang berisiko tinggi bagi keselamatan dan menimbulkan kerugian ekonomi (Budinski and Budinski, 2010).

Untuk memperoleh informasi tentang sifat mekanik logam, tidak cukup hanya mengandalkan data teoritis atau komposisi kimia material tersebut. Pengujian mekanik diperlukan untuk mengetahui bagaimana material akan berperilaku dalam kondisi nyata. Pengujian dilakukan dengan prosedur yang sistematis dan terstandarisasi agar hasilnya dapat dipercaya dan digunakan sebagai acuan. Beberapa metode pengujian yang umum dilakukan antara lain uji tarik, uji kekerasan, uji lentur, uji impak, dan uji kelelahan. Setiap pengujian dirancang untuk mengevaluasi aspek tertentu dari sifat mekanik material. Sebagai contoh, uji tarik memberikan informasi tentang kekuatan tarik maksimum dan keuletan suatu logam, sementara uji impak mengukur kemampuan material dalam menyerap energi saat terkena beban mendadak (Dieter and Bacon, 2005).

Dalam praktik industri, hasil pengujian sifat mekanik memiliki peran strategis dalam proses desain dan pengembangan produk. Data hasil uji digunakan untuk memvalidasi perhitungan teknik, memilih material yang sesuai, serta menetapkan batas aman penggunaan komponen. Selain itu, pengujian mekanik juga menjadi

bagian penting dalam proses kontrol kualitas, memastikan bahwa material yang digunakan dalam produksi massal tetap konsisten dan memenuhi standar teknis yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, pengujian sifat mekanik tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan laboratorium semata, tetapi juga menjadi bagian integral dalam sistem manajemen mutu dan keselamatan kerja di industri modern yang kompetitif (Smith and Hashemi, 2011).



Gambar 5. 1. Sampel untuk (a) uji tarik (b) uji tarik tekukan (c) uji ketangguhan kerapuhan
(ASM Handbook Committee, 2000)

Bab ini disusun untuk memberikan pemahaman menyeluruh mengenai berbagai sifat mekanik logam beserta metode pengujiannya. Pembahasan akan dimulai dari pengenalan konsep dasar sifat mekanik, dilanjutkan dengan penjelasan rinci tentang jenis-jenis sifat seperti kekuatan tarik, kekerasan, keuletan, ketangguhan, kekakuan,

kelelahan, dan creep. Kemudian akan dijelaskan pula metode-metode pengujian yang umum digunakan dalam industri dan laboratorium, termasuk prinsip kerja alat uji, prosedur pelaksanaan, serta cara membaca dan menginterpretasi data hasil uji. Selain itu, pembaca juga akan diperkenalkan pada berbagai standar internasional yang mengatur tata cara pengujian, agar hasil pengujian dapat dibandingkan secara global.

Melalui pemahaman yang mendalam terhadap sifat mekanik logam dan cara pengujiannya, diharapkan pembaca mampu menerapkan pengetahuan ini dalam konteks nyata. Pengetahuan ini tidak hanya berguna dalam ranah akademik, tetapi juga sangat penting dalam praktik teknik sehari-hari, khususnya dalam perancangan produk, pemilihan material, pengendalian mutu, hingga penelitian dan pengembangan material baru. Penguasaan terhadap materi ini juga akan mendukung mata kuliah lain yang berkaitan, seperti mekanika bahan, desain elemen mesin, metalurgi fisik, serta teknik manufaktur. Dengan demikian, bab ini merupakan bagian krusial dalam membangun fondasi keilmuan di bidang teknik material dan rekayasa struktur.

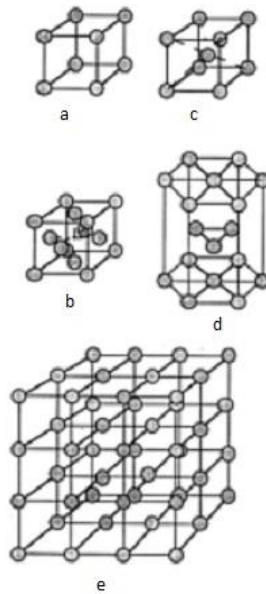
5.2 Definisi Sifat Mekanis Logam

Sifat mekanis logam adalah karakteristik atau respons logam terhadap gaya atau beban yang bekerja padanya. Sifat ini menggambarkan bagaimana logam berperilaku di bawah kondisi kerja tertentu, termasuk tarikan, tekanan, lenturan, dampak, serta beban siklik atau berulang. Dalam praktik rekayasa, pemahaman terhadap sifat mekanis menjadi sangat penting karena menentukan apakah suatu material dapat digunakan secara aman dan efisien dalam suatu

komponen atau struktur teknik. Sifat-sifat ini tidak hanya penting dalam pemilihan material, tetapi juga dalam proses produksi, perawatan, dan perbaikan produk teknik. Misalnya, pada rangka kendaraan bermotor, logam yang digunakan harus memiliki kombinasi kekuatan tarik tinggi dan keuletan yang memadai agar tidak mudah patah saat terjadi kecelakaan. Oleh karena itu, memahami sifat mekanis logam bukan hanya menjadi bagian dari pengetahuan material semata, tetapi juga menjadi bagian integral dari keselamatan, keandalan, dan efisiensi rekayasa (Callister and Rethwisch, 2018)

Sifat mekanis logam biasanya diuji melalui metode-metode eksperimental standar yang menghasilkan data kuantitatif seperti tegangan (stress), regangan (strain), kekerasan (hardness), dan energi serapan. Beberapa sifat mekanis utama yang sering diuji di antaranya adalah kekuatan tarik (tensile strength), keuletan (ductility), kekerasan, ketangguhan (toughness), kekakuan (stiffness), dan ketahanan terhadap kelelahan (fatigue resistance). Kekuatan tarik, misalnya, menunjukkan sejauh mana suatu logam dapat menahan gaya tarik sebelum akhirnya mengalami kegagalan atau patah. Sementara itu, keuletan mengindikasikan kemampuan logam untuk mengalami deformasi plastis sebelum patah. Sifat-sifat tersebut sangat penting terutama dalam aplikasi struktural di mana logam digunakan sebagai bagian dari rangka bangunan, jembatan, pesawat, dan kapal. Selain itu, berbagai jenis pengujian telah distandarisasi secara internasional melalui lembaga seperti ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization), dan JIS (Japanese Industrial Standards) untuk memastikan hasil uji yang valid dan dapat dibandingkan lintas industri dan negara (ASTM E8/E8M – 13a, 2013; ISO 6892-1, 2019).

Penting untuk dicatat bahwa sifat mekanis bukanlah sifat mutlak dari suatu logam murni, melainkan sangat dipengaruhi oleh kondisi mikrostruktur, perlakuan panas, metode manufaktur, serta lingkungan operasi. Misalnya, baja karbon rendah dan baja karbon tinggi memiliki komposisi kimia yang hampir serupa, tetapi perbedaan dalam perlakuan panas seperti pendinginan cepat atau perlambatan dapat menghasilkan perbedaan yang signifikan dalam kekerasan dan kekuatannya. Di sisi lain, adanya cacat mikro, porositas, atau inklusi non-logam dalam struktur internal logam juga dapat menurunkan performa mekanisnya secara drastis. Oleh karena itu, analisis sifat mekanis sering kali disertai dengan studi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron sebagai pendekatan holistik dalam rekayasa material. Hubungan antara sifat mekanis dan struktur internal logam ini dikenal sebagai pendekatan struktur–properti–proses, yang merupakan dasar dari ilmu material modern (Ashby and Jones, 2014).



Gambar 5. 2. Contoh struktur kristal. Unit sel (a) simple cubic (b) face-centered cubic (c) body centered cubic (d) hexagonal close-packed (ASM Handbook Vol 8)

Selain faktor internal, kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan media korosif juga turut memengaruhi perilaku mekanis logam. Pada suhu tinggi, misalnya, logam dapat mengalami penurunan kekuatan tarik dan peningkatan keuletan yang ekstrem, kondisi ini dikenal dengan istilah thermal softening. Sebaliknya, pada suhu rendah, beberapa logam seperti baja dapat menjadi rapuh dan mudah patah, fenomena ini disebut sebagai brittle fracture. Selain itu, lingkungan yang agresif secara kimia dapat mempercepat terjadinya korosi tegangan (stress corrosion cracking), yang merupakan kegagalan mendadak pada logam karena kombinasi tegangan dan korosi. Dalam hal ini, pengujian sifat mekanis tidak dapat dipisahkan dari

pengujian ketahanan lingkungan untuk mendapatkan gambaran yang komprehensif mengenai performa logam dalam kondisi riil. Hal ini menjadikan studi tentang sifat mekanis tidak hanya sekadar menguji kekuatan, tetapi juga memahami dan memprediksi perilaku jangka panjang material dalam berbagai kondisi (Dieter and Bacon, 2005).

5.3 Jenis-Jenis Sifat Mekanis Logam

5.3.1 Kekuatan Tarik (Tensile Strength)

Kekuatan tarik adalah ukuran kemampuan suatu logam untuk menahan gaya tarik sebelum mengalami deformasi permanen atau patah. Dalam pengujian kekuatan tarik, spesimen logam ditarik secara aksial hingga gagal, menghasilkan data penting seperti tegangan leleh (yield strength), kekuatan tarik maksimum (ultimate tensile strength), dan pemanjangan (elongation). Nilai kekuatan tarik sangat krusial karena mencerminkan sejauh mana logam mampu digunakan dalam aplikasi struktural tanpa mengalami kerusakan. Uji tarik dilakukan secara standar dengan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dan mengikuti prosedur seperti yang dijelaskan dalam ASTM E8/E8M-21, yaitu standar internasional untuk pengujian tarik logam (ASTM, 2021). Data yang diperoleh dari uji ini membantu insinyur dalam menentukan kelayakan material untuk berbagai penggunaan teknik. Selain itu, grafik tegangan-regangan yang dihasilkan juga memberikan wawasan tentang perilaku elastis dan plastis material tersebut (Callister and Rethwisch, 2018).

Nilai kekuatan tarik tidak berdiri sendiri, melainkan terdiri dari beberapa parameter penting. Tegangan leleh (yield strength) merupakan titik di mana material mulai mengalami deformasi plastis, sedangkan kekuatan tarik

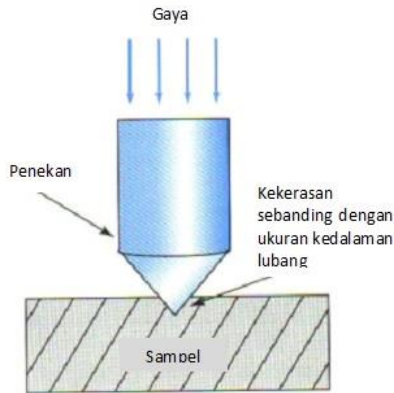
maksimum (ultimate tensile strength) adalah beban tertinggi yang dapat ditahan sebelum terjadi patah. Setelah melewati titik maksimum ini, material biasanya akan mengalami fenomena **necking**, yaitu penyempitan lokal pada penampang spesimen yang mempercepat terjadinya kegagalan. Selain itu, **elongation** atau pemanjangan total hingga patah menunjukkan tingkat keuletan (ductility) logam tersebut (Dieter, 1986). Parameter-parameter ini membantu dalam mengevaluasi sejauh mana sebuah logam bisa digunakan dalam kondisi pembebanan aktual di lapangan, dan sejauh mana risiko kegagalan bisa diminimalkan. Dalam dunia teknik, sangat penting untuk menyeimbangkan antara kekuatan dan keuletan agar material tidak hanya kuat, tetapi juga tidak getas saat menerima beban mendadak atau berulang (Smith and Hashemi, 2011).

Banyak faktor yang memengaruhi kekuatan tarik suatu logam, termasuk komposisi kimia, struktur mikro, perlakuan panas, serta proses pembuatannya. Sebagai contoh, baja karbon tinggi memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih besar dibandingkan dengan baja lunak, namun lebih rapuh karena struktur mikronya yang lebih keras. Perlakuan panas seperti annealing, quenching, dan tempering mampu memodifikasi struktur mikro sehingga kekuatan tarik bisa ditingkatkan atau diturunkan sesuai kebutuhan aplikasi (Callister and Rethwisch, 2018). Selain itu, teknik manufaktur seperti cold working juga berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik karena terjadi pengerasan regangan (strain hardening) selama deformasi plastis. Oleh sebab itu, pemahaman tentang hubungan antara mikrostruktur dan kekuatan tarik menjadi aspek penting dalam ilmu material dan rekayasa logam (Dieter and Bacon, 2005). Dengan pengujian dan analisis yang tepat, para insinyur dapat memilih material

yang tidak hanya ekonomis, tetapi juga aman dan tahan lama.

5.3.2 Kekerasan (Hardness)

Kekerasan (hardness) merupakan salah satu sifat mekanis logam yang menggambarkan kemampuan suatu material dalam menahan deformasi plastis lokal, seperti penetrasi, goresan, atau pemotongan. Kekerasan menjadi indikator penting dalam pemilihan material teknik karena berkaitan erat dengan ketahanan aus dan umur pakai suatu komponen, khususnya pada elemen mesin yang bergesekan (Callister and Rethwisch, 2018). Secara umum, kekerasan dibedakan menjadi tiga jenis: kekerasan indentasi, kekerasan gores, dan kekerasan pantul. Di antara ketiganya, kekerasan indentasi paling sering digunakan dalam pengujian sifat mekanik logam. Pengujian ini dilakukan dengan menekan indenter berbentuk tertentu ke permukaan material menggunakan beban tertentu, lalu mengukur kedalaman atau luas jejaknya. Kekerasan tidak hanya mencerminkan ketahanan terhadap penetrasi, tetapi juga menjadi parameter tak langsung dari kekuatan tarik dan tingkat pengerasan material. Oleh karena itu, nilai kekerasan sangat berguna dalam pengendalian mutu, evaluasi perlakuan panas, serta pemilihan bahan untuk keperluan desain teknik (Smith and Hashemi, 2011).



Gambar 5. 3. Kekerasan sebanding dengan ukuran kedalaman lubang. Semakin keras material, semakin kecil ukuran kedalaman lubang
(Brandt, 2005)

Tiga metode utama yang digunakan dalam pengujian kekerasan indentasi adalah metode Brinell, Rockwell, dan Vickers. Uji Brinell menggunakan bola baja atau tungsten karbida sebagai indenter, dengan gaya tekan besar (biasanya 500 hingga 3000 kgf), yang kemudian ditekan ke permukaan logam selama waktu tertentu. Diameter bekas tekan diukur dan digunakan untuk menghitung nilai kekerasan Brinell (HB) (ASM Handbook Committee, 2000). Metode ini cocok untuk logam lunak hingga menengah seperti tembaga, aluminium, dan baja karbon rendah. Uji Rockwell, berbeda dari Brinell, menggunakan berbagai jenis indenter dan beban berdasarkan skala tertentu, seperti Rockwell A, B, dan C. Rockwell C (HRC) misalnya, menggunakan kerucut berlian sebagai indenter dan cocok untuk logam yang sangat keras seperti baja perkakas. Salah satu keunggulan metode Rockwell adalah hasil pengujian dapat langsung dibaca dari skala alat, sehingga efisien dan banyak digunakan dalam industri (ASTM E18-20, 2020). Uji Vickers, di sisi lain,

menggunakan piramida berlian sebagai indenter dan sangat cocok untuk pengujian permukaan tipis atau benda kecil karena jejak tekanannya sangat kecil namun akurat. Nilai kekerasan Vickers (VHN) dihitung berdasarkan luas permukaan jejak dan gaya tekan yang diberikan (Totten, 2006). Uji ini bersifat universal karena dapat diterapkan untuk logam lunak maupun keras dengan hasil yang konsisten.



Gambar 5. 4. Hubungan sifat kekerasan dengan sifat mekanis logam yang lain (Brandt, 2005)

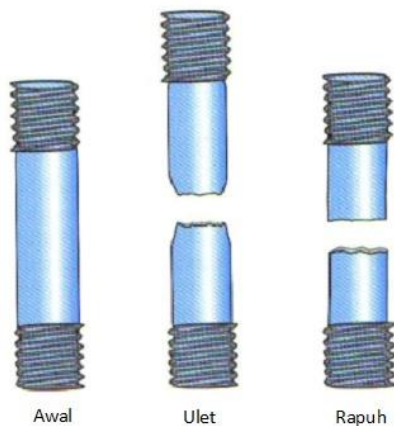
Namun, penting untuk dipahami bahwa kekerasan merupakan sifat lokal, yang artinya sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan, struktur mikro, serta adanya tegangan sisa atau perlakuan permukaan tertentu. Oleh karena itu, dalam praktik pengujian, sering kali dilakukan pengambilan sampel dari beberapa titik permukaan untuk mendapatkan nilai rata-rata yang representatif. Perlakuan panas seperti quenching, tempering, atau case hardening dapat secara signifikan mempengaruhi kekerasan material, karena menyebabkan perubahan pada struktur mikro logam. Semakin halus dan padat struktur butir logam, umumnya

semakin tinggi nilai kekerasannya (Callister and Rethwisch, 2018). Kekerasan juga berhubungan erat dengan ketahanan aus; logam dengan kekerasan tinggi biasanya memiliki ketahanan aus yang lebih baik, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi mesin, alat pemotong, roda gigi, dan bantalan. Dalam rekayasa teknik, nilai kekerasan sering kali digunakan sebagai dasar dalam memilih material yang akan digunakan pada kondisi kerja tertentu, termasuk beban gesek, tekanan lokal tinggi, dan lingkungan abrasif (ASM Handbook Committee, 2000).

5.3.3 Keuletan (Ductility)

Keuletan atau ductility adalah salah satu sifat mekanis logam yang menggambarkan kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis secara signifikan sebelum mengalami patah. Logam yang ulet mampu ditarik atau dibengkokkan menjadi bentuk yang lebih panjang atau lebih ramping tanpa mengalami retak atau putus. Sifat ini sangat penting terutama pada proses pembentukan logam, seperti penarikan kawat, penempaan, dan penggulangan. Keuletan erat kaitannya dengan kemampuan logam dalam menyerap energi sebelum patah, namun berbeda dengan ketangguhan (toughness), karena keuletan lebih menekankan pada perubahan bentuk permanen yang dapat dicapai tanpa kegagalan (Callister and Rethwisch, 2018). Dua parameter utama yang digunakan untuk mengukur keuletan logam adalah persentase pemanjangan (percent elongation) dan pengurangan luas penampang (reduction of area) setelah dilakukan uji tarik (ASTM E8/E8M – 13a, 2013). Semakin besar nilai kedua parameter ini, maka semakin ulet suatu logam tersebut. Misalnya, logam seperti tembaga (Cu) dan aluminium (Al) tergolong sangat ulet karena dapat ditarik

menjadi kawat tipis tanpa patah. Sebaliknya, logam seperti besi tuang (cast iron) memiliki keuletan yang sangat rendah dan lebih cenderung rapuh (brittle). Keuletan dipengaruhi oleh struktur mikro logam, temperatur, kandungan unsur paduan, serta perlakuan panas yang diberikan. Pada suhu tinggi, sebagian besar logam menunjukkan peningkatan keuletan karena pergerakan dislokasi menjadi lebih mudah (Smith and Hashemi, 2011). Dalam praktik rekayasa, pemahaman tentang keuletan sangat penting untuk menentukan metode pemrosesan yang tepat dan menghindari kegagalan material dalam aplikasi struktural. Keuletan juga berkaitan erat dengan keselamatan, sebab logam yang ulet memberikan peringatan sebelum patah (misalnya dengan deformasi permanen), berbeda dengan logam getas yang dapat patah secara tiba-tiba. Oleh karena itu, pengujian dan evaluasi keuletan logam menjadi bagian penting dalam pengendalian mutu material, baik dalam laboratorium maupun dalam pengujian di lapangan industri (Callister and Rethwisch, 2018).



**Gambar 5. 5. Ilustrasi material ulet dan rapuh
(Brandt, 2005)**

5.3.4 Ketangguhan (Toughness)

Ketangguhan atau toughness adalah kemampuan suatu material, terutama logam, untuk menyerap energi dan mengalami deformasi plastis dalam jumlah besar sebelum mengalami kegagalan patah. Toughness mencerminkan gabungan antara kekuatan (strength) dan keuletan (ductility) suatu logam (Callister and Rethwisch, 2018). Oleh karena itu, logam yang memiliki kekuatan tinggi namun juga cukup ulet akan menunjukkan ketangguhan yang lebih besar. Karakteristik ini penting dalam desain struktur atau komponen yang bekerja dalam kondisi beban dinamis, impak, atau getaran. Toughness dapat dianalisis secara kuantitatif sebagai luas area di bawah kurva tegangan-regangan dari hasil uji tarik (Smith and Hashemi, 2011). Logam seperti baja karbon menunjukkan toughness yang tinggi karena mampu menahan deformasi signifikan sebelum patah, sementara logam rapuh seperti besi cor memiliki toughness yang rendah. Dengan demikian, toughness menjadi indikator penting dalam menganalisis seberapa aman suatu material saat menerima beban tak terduga di dunia nyata.

Pengujian toughness secara eksperimental dilakukan menggunakan uji impak, yang paling umum adalah uji Charpy dan uji Izod. Dalam pengujian ini, spesimen logam yang diberi takik dikenai beban tumbukan oleh bandul yang diayunkan dari ketinggian tertentu. Energi yang diserap oleh spesimen hingga patah dihitung berdasarkan perbedaan tinggi bandul sebelum dan sesudah tumbukan, kemudian dikonversi menjadi satuan energi (joule). Standar pengujian yang digunakan untuk metode ini antara lain ASTM E23 (ASTM E23-18, 2018). Salah satu fenomena penting yang berkaitan dengan toughness adalah transisi dari perilaku ulet ke perilaku rapuh pada suhu rendah, yang dikenal

dengan istilah ductile-to-brittle transition temperature (DBTT). Oleh karena itu, toughness sering diuji pada berbagai suhu untuk melihat performa material dalam kondisi ekstrem, seperti pada logam yang digunakan dalam lingkungan kriogenik, misalnya baja dalam tangki LNG atau komponen struktur pada wilayah kutub (Budinski and Budinski, 2010).

Penting untuk dicatat bahwa toughness berbeda dari sifat mekanik lainnya seperti kekuatan atau kekerasan. Material bisa saja sangat kuat, tetapi jika tidak mampu mengalami deformasi plastis, ia tetap akan mudah patah dan tidak dianggap tangguh. Kekerasan, di sisi lain, hanya menunjukkan kemampuan material menahan goresan atau penetrasi, dan tidak mencerminkan kemampuannya menyerap energi dari tumbukan (Callister and Rethwisch, 2018). Dalam praktik teknik, pemahaman terhadap toughness sangat penting untuk mencegah kegagalan mendadak (catastrophic failure) yang dapat mengakibatkan kecelakaan serius atau kerugian ekonomi besar. Oleh karena itu, pemilihan material dengan toughness tinggi merupakan langkah penting dalam desain komponen mesin, jembatan, kendaraan, dan infrastruktur lainnya yang berpotensi mengalami dampak atau bekerja dalam lingkungan berisiko tinggi (Smith and Hashemi, 2011).

5.3.5 Kekakuan (Stiffness)

Kekakuan (stiffness) adalah sifat mekanis suatu material yang menggambarkan kemampuan untuk menahan deformasi elastis ketika diberikan gaya eksternal. Secara umum, kekakuan didefinisikan sebagai rasio antara gaya yang dikenakan terhadap perpindahan yang dihasilkan ($k = F/\delta$), yang berarti semakin besar nilai kekakuannya,

semakin kecil deformasi yang ditimbulkan oleh gaya yang sama (Callister and Rethwisch, 2018). Kekakuan merupakan aspek penting dalam perancangan struktur karena berpengaruh langsung pada kestabilan dimensi dan perilaku beban selama pemakaian. Perlu dibedakan antara kekakuan dan kekuatan; kekuatan berkaitan dengan kemampuan menahan beban sampai patah, sedangkan kekakuan menyangkut resistansi terhadap deformasi elastis sebelum mencapai titik leleh (Budinski and Budinski, 2010). Contohnya, baja memiliki kekakuan yang jauh lebih tinggi daripada aluminium, meskipun keduanya dapat dirancang untuk aplikasi struktural yang berbeda. Kekakuan erat kaitannya dengan modulus elastisitas atau Young's Modulus, yaitu ukuran ketegaran intrinsik bahan terhadap deformasi. Nilai modulus elastisitas ini bersifat konstan untuk tiap jenis logam, misalnya baja karbon memiliki nilai sekitar 200 GPa, aluminium sekitar 70 GPa, dan titanium sekitar 116 GPa (Ashby and Jones, 2014). Dalam praktiknya, kekakuan suatu komponen tidak hanya bergantung pada jenis material, tetapi juga pada geometri dan ukuran benda. Sebagai contoh, sebuah batang baja panjang akan tampak kurang kaku dibandingkan dengan batang pendek dengan penampang yang lebih besar, meskipun terbuat dari bahan yang sama. Oleh karena itu, perhitungan kekakuan dalam rekayasa teknik mempertimbangkan sifat intrinsik bahan sekaligus dimensi struktur (Callister and Rethwisch, 2018). Dalam pengujian laboratorium, kekakuan biasanya diperoleh melalui uji tarik atau tekan, dengan mengamati kemiringan awal kurva tegangan-regangan, yang mencerminkan respon elastis material. Komponen teknik harus memiliki kekakuan minimum yang memadai untuk mencegah getaran, defleksi berlebih, dan instabilitas struktural yang dapat menyebabkan kelelahan atau bahkan kegagalan prematur.

Kekakuan juga memainkan peran penting dalam analisis dinamika struktur, terutama dalam menentukan frekuensi alami sistem dan karakteristik getaran (Ashby & Jones, 2012). Oleh karena itu, pemahaman tentang kekakuan sangat penting bagi insinyur material dan struktur dalam memastikan bahwa desain tidak hanya kuat, tetapi juga tahan terhadap perubahan bentuk yang tidak diinginkan selama masa pakai produk.

5.3.6 Kelelahan (Fatigue)

Kelelahan (fatigue) merupakan salah satu mekanisme kegagalan paling umum yang terjadi pada material logam, terutama saat logam mengalami pembebanan berulang atau siklik. Kegagalan akibat kelelahan terjadi meskipun tegangan yang diterima material tersebut berada jauh di bawah batas kekuatan tarik atau tegangan luluhnya. Proses kelelahan dimulai dari inisiasi retakan mikro pada titik-titik lemah seperti goresan, takikan, atau cacat permukaan, lalu berkembang menjadi retakan makro yang menyebar secara perlahan hingga akhirnya menyebabkan patahan tiba-tiba. Salah satu ciri utama kelelahan adalah ketidakmampuannya untuk dideteksi secara visual sebelum terjadi kerusakan fatal, karena tidak terjadi deformasi plastis yang signifikan. Fenomena ini pertama kali dipahami secara ilmiah sejak abad ke-19, ketika kerusakan mendadak sering terjadi pada poros roda dan komponen mesin uap. Uji kelelahan biasanya dilakukan dengan pembebanan siklik melalui metode rotating bending, axial loading, atau torsional fatigue test, di mana hasilnya digambarkan dalam bentuk kurva S-N (Stress vs. Number of Cycles) yang menggambarkan hubungan antara tegangan siklik maksimum dan jumlah siklus hingga patah (Dieter and Bacon, 2005).

Beberapa material, seperti baja karbon rendah, menunjukkan adanya batas kelelahan (endurance limit)—tegangan maksimum di bawah nilai tertentu di mana logam tidak akan gagal akibat kelelahan meskipun mengalami pembebanan dalam jumlah siklus tak terbatas (ASM Handbook Committee, 1996). Namun, tidak semua logam memiliki sifat ini; aluminium dan paduannya misalnya, menunjukkan bahwa semakin lama siklus berlangsung, semakin kecil tegangan yang diperlukan untuk menyebabkan kegagalan, tanpa ada ambang batas tetap. Oleh karena itu, dalam perancangan komponen dari logam semacam ini, pendekatan finite life lebih banyak digunakan, yaitu dengan menentukan umur pakai berdasarkan jumlah siklus yang aman. Banyak faktor yang memengaruhi daya tahan kelelahan suatu logam, antara lain struktur mikro, kondisi permukaan (kasar atau halus), perlakuan panas, tegangan sisa, suhu operasi, dan lingkungan (misalnya keberadaan korosi atau kelembapan tinggi). Upaya pencegahan kegagalan akibat kelelahan mencakup optimasi desain untuk menghindari konsentrasi tegangan, perlakuan permukaan seperti shot peening untuk menghasilkan tegangan sisa tekan, serta pemrosesan logam yang meningkatkan homogenitas struktur mikro. Pemahaman tentang kelelahan sangat penting terutama dalam industri yang menggunakan komponen dengan siklus tinggi seperti pesawat, kendaraan bermotor, jembatan, turbin gas, dan perangkat elektronik yang terus-menerus mengalami pembebanan dinamis.

5.3.7 Creep dan Ketahanan Aus

Creep adalah fenomena deformasi plastis yang terjadi secara perlahan dan progresif pada logam ketika dikenai

beban konstan dalam waktu lama pada suhu tinggi, umumnya di atas 0,4 dari temperatur leleh absolut material (dalam satuan Kelvin). Creep sangat signifikan pada aplikasi teknik seperti turbin gas, mesin jet, dan reaktor nuklir yang bekerja pada suhu tinggi. Proses ini berlangsung dalam tiga tahap, yaitu: creep primer (laju deformasi menurun), creep sekunder (laju konstan), dan creep tersier (laju meningkat hingga kegagalan). Laju creep dipengaruhi oleh suhu, tegangan, struktur mikro, dan waktu pembebanan. Mekanisme creep dapat melibatkan pergerakan dislokasi, difusi atom, dan pergeseran batas butir (Callister and Rethwisch, 2018). Pengujian creep dilakukan menggunakan alat uji creep khusus yang menjaga beban dan suhu secara konstan sambil mengukur regangan terhadap waktu. Grafik hasil uji biasanya menunjukkan hubungan strain-time untuk memahami perilaku deformasi jangka panjang. Dalam praktik teknik, misalnya pada pipa uap pembangkit listrik yang beroperasi di atas 500 °C, creep bisa menyebabkan keretakan dan kegagalan struktur (Dieter and Bacon, 2005). Oleh karena itu, dalam perancangan komponen yang digunakan dalam kondisi suhu tinggi, sifat creep harus dianalisis secara cermat. Material superalloy, logam tahan panas, atau logam dengan penguatan dispersi sering digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap creep pada aplikasi ekstrem. Selain itu, pengaruh lingkungan seperti oksidasi atau korosi juga dapat mempercepat kerusakan creep sehingga perlu diperhitungkan dalam desain material. Pemahaman tentang creep menjadi dasar penting dalam rekayasa material berbasis keandalan dan umur pakai sistem kerja suhu tinggi.

Ketahanan aus merujuk pada kemampuan suatu logam untuk menahan kehilangan material dari permukaannya akibat gesekan atau interaksi mekanis dengan permukaan

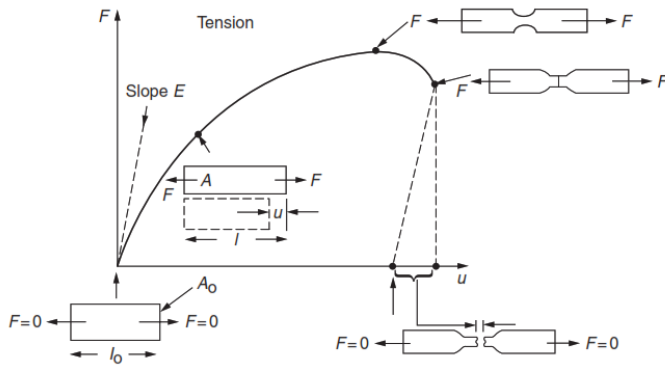
lain. *Wear* atau aus terjadi dalam berbagai bentuk: *adhesive wear* (penempelan antar permukaan), *abrasive wear* (kontak dengan partikel keras), *corrosive wear* (pengaruh lingkungan kimia), dan *fretting wear* (getaran kecil berulang antar permukaan). Ketahanan aus sangat tergantung pada kekerasan permukaan, kekasaran, jenis pelumasan, kondisi lingkungan, dan beban kerja. Material dengan kekerasan tinggi biasanya memiliki ketahanan aus lebih baik, tetapi struktur mikro, pelapisan permukaan, dan perlakuan termal juga memainkan peran penting (Callister and Rethwisch, 2018). Pengujian aus dilakukan menggunakan alat seperti pin-on-disk tester, di mana spesimen digesekkan terhadap permukaan lain dalam kondisi terkendali untuk mengukur kehilangan massa atau perubahan dimensi. Pengujian ini dapat memberikan data kuantitatif terhadap efisiensi pelapisan atau perlakuan permukaan tertentu. Untuk meningkatkan ketahanan aus, teknik seperti pelapisan keras (*hard coating*), nitriding, carburizing, atau pelapisan keramik digunakan secara luas dalam industri otomotif, pertambangan, dan manufaktur alat berat. Sebagai contoh, pada roda gigi kendaraan atau bantalan mesin, aus yang tidak terkendali bisa menyebabkan kerusakan fatal pada sistem transmisi. Oleh karena itu, pemilihan material tahan aus sangat krusial dalam mendesain komponen mesin yang bergerak atau bergesekan tinggi. Dalam dunia teknik modern, sifat ketahanan aus menjadi salah satu parameter kunci dalam memastikan keandalan dan umur panjang peralatan mekanis (ASM Handbook Committee, 2017).

5.4 Pengujian Sifat Mekanis

5.4.1 Uji Tarik (Tensile Test)

Uji tarik merupakan salah satu metode paling fundamental dan penting dalam pengujian sifat mekanis logam. Uji ini bertujuan untuk menentukan bagaimana material merespon terhadap gaya tarik hingga material tersebut mengalami deformasi plastis dan akhirnya patah. Selama proses uji tarik, spesimen uji dengan bentuk dan ukuran standar—biasanya silindris atau bentuk anjing (dog-bone shape)—diberi gaya secara perlahan menggunakan alat yang disebut Universal Testing Machine (UTM). Gaya yang diberikan searah sumbu spesimen dan terus ditingkatkan hingga spesimen mengalami kerusakan. Hasil dari uji ini menghasilkan data berupa grafik tegangan (stress) terhadap regangan (strain), yang memberikan informasi mengenai kekuatan tarik maksimum (ultimate tensile strength), tegangan leleh (yield strength), modulus elastisitas (Young's modulus), keuletan (ductility), dan pemanjangan setelah patah (Callister and Rethwisch, 2018). Standar pelaksanaan uji tarik diatur oleh lembaga internasional seperti ASTM E8/E8M dan ISO 6892-1, yang menentukan metode persiapan spesimen, kecepatan pengujian, hingga cara pelaporan hasil. Uji tarik juga berguna untuk membandingkan kualitas logam hasil perlakuan panas, pengelasan, maupun paduan logam yang berbeda. Dengan mengetahui parameter-parameter ini, insinyur dapat menentukan apakah suatu logam cocok untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan tinggi atau deformasi yang signifikan sebelum patah. Selain itu, nilai elongasi dan area reduction juga digunakan sebagai indikator keuletan material. Dalam aplikasi industri, informasi dari uji tarik menjadi dasar penting dalam

perancangan struktur dan komponen mesin yang aman dan andal (ASTM E8/E8M – 13a, 2013)(ISO 6892-1, 2019).



Gambar 5. 6. Contoh kurva beban-pemanjangan
(Ashby and Jones, 2014)

Selain memberikan data numerik, uji tarik juga membantu dalam memvisualisasikan perilaku material selama proses deformasi. Grafik tegangan-regangan yang dihasilkan terbagi menjadi dua zona utama, yaitu zona elastis dan plastis. Zona elastis menggambarkan kemampuan material kembali ke bentuk semula setelah beban dihilangkan, dan dicirikan oleh hubungan linier antara tegangan dan regangan sesuai hukum Hooke. Di sisi lain, zona plastis menunjukkan bahwa material telah mengalami perubahan bentuk permanen. Tegangan leleh adalah titik transisi antara keduanya dan menjadi parameter penting dalam desain teknik karena menunjukkan batas aman penggunaan material. Selain itu, pada grafik tersebut terdapat necking point, yaitu titik saat penampang spesimen mulai menyempit secara signifikan hingga akhirnya patah. Hasil uji tarik juga sangat sensitif terhadap kondisi permukaan spesimen, kecepatan pengujian, suhu, serta orientasi butiran (grain orientation), yang semuanya dapat

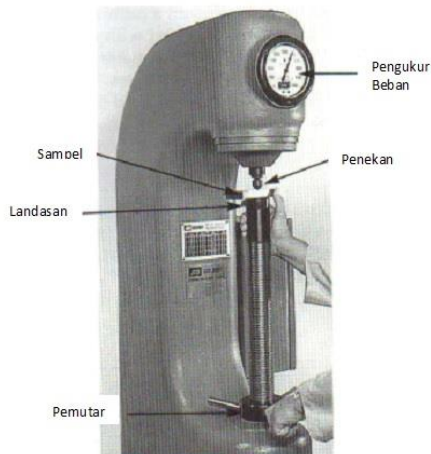
memengaruhi hasil akhir. Oleh karena itu, dalam penelitian dan kontrol mutu industri, uji tarik dilakukan dengan kontrol ketat terhadap semua parameter tersebut. Uji ini juga dapat dimodifikasi menjadi uji tarik suhu tinggi atau uji tarik siklik untuk mendapatkan informasi lanjutan. Dengan kemampuannya untuk memberikan banyak informasi penting dalam satu pengujian, uji tarik merupakan metode utama dalam evaluasi kekuatan logam dan bahan teknik lainnya (Dieter and Bacon, 2005).

5.4.2 Uji Kekerasan (Brinell, Rockwell, Vickers)

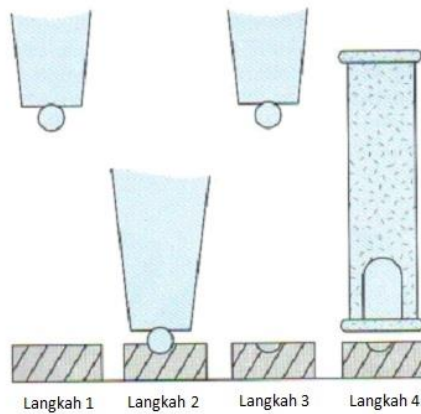
Pengujian kekerasan merupakan salah satu metode paling umum dalam menilai sifat mekanis logam. Kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan deformasi plastis, khususnya terhadap goresan, penekanan, atau penetrasi dari benda yang lebih keras (Callister and Rethwisch, 2018). Uji kekerasan penting dalam industri untuk mengetahui ketahanan material terhadap keausan, deformasi lokal, serta sebagai indikator tidak langsung terhadap kekuatan tarik (Smith and Hashemi, 2011). Tiga metode pengujian kekerasan yang paling umum digunakan adalah Brinell, Rockwell, dan Vickers. Masing-masing metode tersebut berbeda dari sisi prinsip kerja, jenis indenter yang digunakan, beban yang diterapkan, serta interpretasi hasilnya. Meski begitu, ketiganya bekerja berdasarkan prinsip mengukur respons permukaan logam saat diberi beban statis oleh suatu benda keras.

Uji Brinell (Brinell Hardness Test - HB) menggunakan bola baja atau karbida tungsten berdiameter tetap (umumnya 10 mm), yang ditekan ke permukaan logam dengan gaya beban besar, antara 500 kgf hingga 3000 kgf, tergantung jenis bahan yang diuji. Setelah ditekan selama

sekitar 10–15 detik, diameter bekas jejak pada permukaan logam diukur, dan nilai kekerasan Brinell (HB) dihitung berdasarkan luas permukaan jejak tersebut (ASTM E10-18, 2018). Uji ini cocok untuk material logam yang relatif lunak seperti aluminium, kuningan, dan besi tuang. Karena ukuran bekas yang dihasilkan relatif besar, uji ini kurang cocok untuk benda kerja kecil atau komponen akhir. Namun, kelebihan utama dari uji Brinell adalah kemampuannya memberikan nilai kekerasan rata-rata pada area yang lebih luas, sehingga sangat berguna untuk bahan yang tidak homogen (Dieter and Bacon, 2005).



Gambar 5. 7. Alat uji Brinell
(Brandt, 2005)

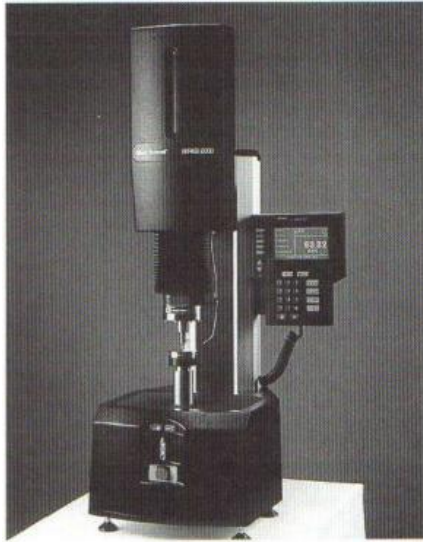


Gambar 5. 8. Metode pengujian kekerasan Brinell

1. sampel diletakkan di landasan
2. penekan menekan sampel
3. penekan dilepas
4. mikroskop mengukur jejak lubang
(Brandt, 2005)

Uji Rockwell (Rockwell Hardness Test - HR) merupakan metode yang lebih cepat dan praktis, terutama untuk kebutuhan industri dengan jumlah pengujian yang tinggi. Dalam metode ini, digunakan bola baja (untuk logam lunak) atau kerucut berlian (untuk logam keras) sebagai indenter. Pengujian dimulai dengan pemberian beban minor sebesar 10 kgf, kemudian dilanjutkan dengan beban mayor sesuai skala yang digunakan (misalnya, 100 atau 150 kgf), lalu kembali dikurangi ke beban minor. Kedalaman penetrasi yang dihasilkan diukur secara langsung dan dikonversi menjadi nilai kekerasan Rockwell (ASTM E18-20, 2020). Metode ini sangat efisien karena tidak memerlukan pengukuran optik seperti pada Brinell atau Vickers. Uji Rockwell banyak digunakan untuk baja, paduan logam, dan produk industri lainnya karena kecepatan dan kemudahan

interpretasi hasilnya (Smith and Hashemi, 2011). Namun, akurasi uji Rockwell dapat dipengaruhi oleh kondisi permukaan dan ketidakteraturan lokal pada material.



Gambar 5. 9. Alat uji Rockwell
(Brandt, 2005)

Uji Vickers (Vickers Hardness Test - HV) merupakan metode pengujian kekerasan yang sangat presisi dan fleksibel. Pengujian ini menggunakan piramida berlian dengan sudut 136 derajat sebagai indenter dan dapat menggunakan beban ringan (hingga mikro-Vickers) maupun beban berat, tergantung kebutuhan (ASTM E384-17, 2017). Setelah pemberian beban selama waktu tertentu (biasanya 10–15 detik), diagonal jejak piramida diukur dengan mikroskop, lalu dikonversi ke nilai kekerasan menggunakan rumus standar. Keunggulan utama metode ini adalah dapat digunakan untuk spesimen kecil, lapisan tipis, atau pengujian mikrostruktur seperti lapisan permukaan atau hasil las. Karena jejaknya kecil dan tidak merusak secara

signifikan, Vickers sering digunakan dalam penelitian dan pengujian laboratorium yang menuntut akurasi tinggi (Callister and Rethwisch, 2018). Namun, kelemahannya adalah pengujian memerlukan waktu lebih lama serta penggunaan peralatan optik presisi tinggi yang relatif mahal.



Gambar 5. 10. Alat uji Vickers
(Brandt, 2005)

Ketiga metode tersebut memiliki keunggulan dan keterbatasan masing-masing, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik. Uji Brinell cocok untuk material homogen dan permukaan kasar, uji Rockwell ideal untuk kecepatan dan produksi massal, sedangkan uji Vickers unggul untuk akurasi dan pengujian mikro. Standar pengujian internasional seperti ASTM E10, E18, dan E384 menjadi rujukan utama dalam pelaksanaan pengujian ini di lapangan. Selain itu, nilai kekerasan sering digunakan sebagai indikator sifat mekanis lainnya, seperti kekuatan

tarik, terutama pada logam yang bersifat isotropik (Dieter and Bacon, 2005). Oleh karena itu, pengujian kekerasan memegang peran vital dalam karakterisasi dan kendali mutu material teknik modern.

5.4.3 Uji Impak (Charpy & Izod)

Uji impak merupakan salah satu metode penting dalam pengujian sifat mekanis logam yang digunakan untuk menentukan ketangguhan (toughness) suatu material, yaitu kemampuannya menyerap energi sebelum patah saat dikenai beban secara tiba-tiba atau mendadak. Dua metode utama yang digunakan adalah uji Charpy dan uji Izod. Dalam uji Charpy, spesimen uji berbentuk batang pendek yang diberi takik (notch) di bagian tengah, diletakkan horizontal pada dua penopang, dan dihantam pada sisi berlawanan takik oleh palu pendulum. Sedangkan pada uji Izod, spesimen dipasang secara vertikal seperti kantilever, dengan takik menghadap ke arah datangnya tumbukan. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada orientasi spesimen dan titik tumpunya. Penggunaan takik pada spesimen bertujuan untuk memusatkan tegangan pada satu titik, sehingga memudahkan terjadinya patahan (Callister and Rethwisch, 2018). Selama proses pengujian, energi yang diserap oleh spesimen saat patah dihitung berdasarkan perubahan posisi ayunan pendulum sebelum dan sesudah tumbukan. Energi ini menjadi indikator ketangguhan material dan biasanya dinyatakan dalam satuan Joule (J) atau foot-pound (ft-lb).

Ketangguhan material yang diukur dalam uji impak sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan, terutama untuk logam seperti baja karbon, yang menunjukkan fenomena transisi dari perilaku ulet (ductile) ke getas (brittle) saat

suhu menurun. Fenomena ini dikenal sebagai ductile-to-brittle transition dan sangat penting untuk diketahui dalam aplikasi struktural yang berada di lingkungan bersuhu rendah, seperti pipa bawah laut atau komponen mesin luar ruang. Oleh karena itu, pengujian sering dilakukan pada berbagai suhu untuk menentukan batas transisi tersebut (Dieter and Bacon, 2005). Standar internasional yang digunakan dalam pengujian ini antara lain ASTM E23 untuk uji Charpy dan ASTM D256 untuk uji Izod, yang menjelaskan prosedur pelaksanaan, bentuk spesimen, serta cara kalibrasi alat (ASTM E23-18, 2018). Uji impak sangat berguna dalam proses seleksi material untuk produk teknik seperti rangka kendaraan, struktur bangunan, dan komponen mesin yang harus mampu menahan benturan. Selain itu, hasil uji juga digunakan dalam kontrol mutu untuk menjamin bahwa material yang digunakan tidak bersifat getas saat digunakan dalam kondisi ekstrem (Smith and Hashemi, 2011). Dengan demikian, uji impak memainkan peran sentral dalam peningkatan keandalan dan keselamatan produk teknik (Budinski and Budinski, 2010).

5.4.4 Uji Lentur (Bending Test)

Uji lentur merupakan salah satu metode pengujian sifat mekanis yang bertujuan untuk menilai kemampuan suatu material, terutama logam, dalam menahan pembebanan lentur hingga terjadi deformasi atau fraktur. Dalam pengujian ini, spesimen akan ditempatkan di atas dua penyangga dan dikenai beban di satu atau dua titik di bagian tengahnya, tergantung apakah digunakan metode tiga titik atau empat titik. Uji lentur sangat bermanfaat untuk mengevaluasi kekuatan lentur, modulus elastisitas lentur, dan keuletan material, khususnya untuk bahan yang sulit

diuji menggunakan uji tarik seperti pelat tipis atau material komposit (Callister and Rethwisch, 2018). Material yang diuji akan mengalami kombinasi tegangan tarik dan tekan—tegangan tarik terjadi di bagian bawah, sedangkan bagian atas mengalami tegangan tekan. Hal ini memungkinkan pengujian terhadap perilaku deformasi plastis dan elastis secara bersamaan. Oleh karena itu, uji lentur banyak digunakan dalam aplikasi industri, seperti kontrol kualitas bahan bangunan atau logam struktural dalam bidang konstruksi dan otomotif.

Metode yang paling umum digunakan adalah uji lentur tiga titik (*three-point bending test*), di mana beban diberikan pada tengah batang uji, sedangkan kedua ujungnya disangga. Tegangan maksimum umumnya terjadi di bagian tengah sisi bawah batang. Material getas seperti besi cor atau keramik biasanya menunjukkan kegagalan di bagian ini karena minimnya kemampuan deformasi plastis, sedangkan logam ulet seperti baja karbon rendah akan mengalami lentur signifikan sebelum patah (Dieter and Bacon, 2005). Parameter penting yang diperoleh dari uji ini meliputi *flexural strength*, *flexural modulus*, dan sudut lentur. Standar internasional telah ditetapkan untuk memastikan pengujian dilakukan secara konsisten. Misalnya, ASTM (ASTM E290-09, 2013) dan ISO (ISO 7438:2005, 2005) memberikan pedoman lengkap mengenai bentuk spesimen, kecepatan pembebanan, jarak antar penyangga, dan cara interpretasi hasil uji. Selain itu, kondisi permukaan, arah penggilingan, serta kecepatan pembebanan dapat mempengaruhi hasil pengujian secara signifikan.

Dalam industri manufaktur, uji lentur memiliki peran penting terutama dalam pengujian produk setengah jadi seperti pelat logam, pipa, dan profil struktural. Proses pembengkokan (*bending*) pada lembaran logam, misalnya,

memerlukan material yang mampu menahan deformasi tanpa retak atau pecah. Oleh sebab itu, produsen sering menggunakan uji ini untuk mengevaluasi kemampuan forming material sebelum diproses lebih lanjut. Tidak hanya itu, uji lentur juga digunakan dalam pengembangan material baru, seperti paduan aluminium atau komposit logam-polimer, untuk menilai kesesuaian struktur mikro terhadap pembebanan lentur (Callister and Rethwisch, 2018). Laboratorium teknik material umumnya dilengkapi mesin uji lentur khusus yang telah dikalibrasi agar dapat memberikan hasil yang akurat dan sesuai standar. Dengan demikian, uji lentur memberikan informasi penting bagi insinyur dan desainer dalam menentukan aplikasi praktis suatu material dalam kondisi pembebanan nyata.

5.4.5 Uji Kelelahan (Fatigue Test)

Uji kelelahan atau fatigue test merupakan metode penting dalam mengetahui sejauh mana suatu logam mampu menahan beban siklik atau berulang dalam jangka waktu tertentu sebelum mengalami kegagalan. Hal ini sangat krusial untuk komponen teknik yang bekerja dalam kondisi dinamis, seperti pada poros transmisi, struktur jembatan, dan sayap pesawat. Beban berulang ini bisa menyebabkan kegagalan meskipun tegangan yang dialami berada di bawah batas elastis material. Fenomena ini dikenal sebagai fatigue failure, yang sering terjadi tanpa tanda-tanda peringatan sebelumnya karena diawali oleh pembentukan retakan mikro yang berkembang menjadi retak makro hingga akhirnya patah total (Callister and Rethwisch, 2018). Tujuan utama dari pengujian ini adalah menentukan batas kelelahan (fatigue limit) atau umur kelelahan (fatigue life), yaitu jumlah siklus maksimum pembebanan yang dapat ditahan

sebelum terjadi kerusakan. Dalam praktiknya, pengujian ini dilakukan menggunakan mesin uji kelelahan khusus yang mampu memberikan beban siklik dalam bentuk tegangan tarik-kompresi, lentur, atau puntir, tergantung dari kondisi kerja aktual material tersebut (ASTM E466-21, 2021).

Spesimen uji biasanya dibuat dengan bentuk standar seperti silinder yang menyempit di bagian tengah, agar retakan inisiasi muncul di lokasi yang terkontrol. Selama pengujian, spesimen dikenai pembebanan berulang dengan frekuensi tertentu, umumnya antara 10 hingga 100 Hz, dan pengamatan dilakukan hingga spesimen mengalami kegagalan. Data yang diperoleh disajikan dalam grafik S-N (Stress vs Number of Cycles), yang menggambarkan hubungan antara tegangan maksimum dan jumlah siklus sampai patah. Pada logam seperti baja karbon rendah, terdapat endurance limit, yaitu batas tegangan di bawah mana kegagalan karena kelelahan tidak terjadi, meskipun jumlah siklus sangat besar. Namun, pada logam lain seperti aluminium dan tembaga, tidak ditemukan batas ini, sehingga kegagalan dapat terjadi pada semua tingkat tegangan jika siklus cukup banyak. Oleh karena itu, pemahaman sifat kelelahan setiap jenis logam sangat penting dalam proses desain dan seleksi material.

Dalam perkembangannya, pengujian kelelahan tidak hanya berfokus pada umur total material, tetapi juga pada perilaku pertumbuhan retakan. Pendekatan berbasis fracture mechanics digunakan untuk memahami bagaimana retakan kecil dapat tumbuh menjadi kegagalan struktural besar, bahkan pada tingkat tegangan yang relatif rendah. Faktor-faktor eksternal seperti kekasaran permukaan, konsentrasi tegangan di sekitar lubang atau takik, serta kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban, dapat mempercepat kegagalan akibat kelelahan. Selain itu, proses

manufaktur seperti pengelasan atau perlakuan panas juga berperan dalam mengubah ketahanan kelelahan logam. Untuk aplikasi modern, terutama pada industri dirgantara dan otomotif, uji kelelahan telah dikombinasikan dengan teknologi monitoring real-time seperti sensor getaran dan sistem prediktif berbasis machine learning untuk memprediksi umur pakai komponen secara akurat dan mencegah kegagalan mendadak. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian kelelahan bukan hanya bagian dari proses kontrol kualitas, tetapi juga merupakan strategi penting dalam desain teknik berbasis keandalan (reliability-based design).

5.4.6 Uji Creep (Creep Test)

Uji creep merupakan metode pengujian sifat mekanis logam untuk mengetahui perilaku material ketika dikenai tegangan konstan pada suhu tinggi dalam jangka waktu yang lama. Fenomena creep terjadi ketika suatu material mengalami deformasi plastis progresif secara perlahan walaupun beban yang diberikan tetap, terutama saat berada pada suhu di atas 0,4 dari titik leleh logam dalam satuan Kelvin (Callister and Rethwisch, 2018). Pengujian ini sangat penting dalam industri yang beroperasi pada kondisi temperatur tinggi seperti pembangkit listrik, turbin gas, reaktor nuklir, dan sistem pembuangan kendaraan bermotor (Dieter and Bacon, 2005). Metode uji creep dilakukan dengan menempatkan spesimen logam dalam mesin uji creep, kemudian dikenai beban konstan sambil dijaga pada suhu yang ditentukan selama beberapa jam, hari, atau bahkan minggu. Data yang dihasilkan dari uji ini biasanya berupa kurva deformasi terhadap waktu (creep curve), yang dibagi menjadi tiga tahap: creep primer (laju deformasi menurun), creep sekunder (laju deformasi konstan), dan

creep tersier (laju deformasi meningkat hingga terjadi kegagalan) (Meyers and Chawla, 2009). Informasi dari kurva ini sangat penting dalam menentukan masa pakai material dan mengevaluasi potensi kegagalan dini pada kondisi operasional yang ekstrem. Standar pengujian creep umumnya mengacu pada ASTM E139, yang memberikan panduan rinci terkait desain spesimen, pengendalian suhu, metode pencatatan data, serta interpretasi hasil (ASTM E139-00, 2003). Salah satu tantangan utama dalam pengujian creep adalah kebutuhan akan waktu yang sangat lama dan kestabilan suhu yang presisi, karena fluktuasi suhu sekecil apa pun dapat memengaruhi hasil secara signifikan. Oleh karena itu, mesin uji creep modern dilengkapi dengan sistem pengendalian suhu otomatis dan sensor perpindahan linier dengan ketelitian tinggi (Callister and Rethwisch, 2018). Selain logam, uji creep juga digunakan untuk material polimer, keramik, dan paduan super (superalloys), terutama untuk mengkaji performa pada suhu operasi mendekati titik leleh material (Meyers and Chawla, 2009). Secara umum, uji creep memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material teknik, desain komponen kritis, serta peningkatan keamanan dan efisiensi dalam sistem termal dan mekanik bersuhu tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashby, M.F. and Jones, D.R.H. (2014) *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*. Butterworth-Heinemann.
- ASM Handbook Committee (1996) *ASM Handbook Volume 19 Fatigue and Fracture*. ASM International Handbook Committee.
- ASM Handbook Committee (2000) *ASM Handbook Volume 8 Mechanical Testing and Evaluation*. 8th edn. ASM International Handbook Committee.
- ASM Handbook Committee (2017) *ASM Handbook Volume 18 Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International.
- ASTM E8/E8M – 13a (2013) *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-13A.
- ASTM E10-18 (2018) *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/E0010-18>.
- ASTM E18-20 (2020) *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/E0018-20>.
- ASTM E23-18 (2018) *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. West

Conshohocken, PA: ASTM International. Available at:
<https://doi.org/10.1520/E0023-18>.

ASTM E139-00 (2003) *Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials*.

ASTM E290-09 (2013) *Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility 1*. West Conshohocken, PA. Available at: www.astm.org.

ASTM E384-17 (2017) *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at:
<https://doi.org/10.1520/E0384-17>.

ASTM E466-21 (2021) *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at:
<https://doi.org/10.1520/E0466-21>.

Brandt, D.A. (2005) *Metallurgy Fundamentals*. The Goodheart-Willcox.

Budinski, K.G. and Budinski, M.K. (2010) *Engineering Materials Properties and Selection*. 9th edn. Pearson.

Callister, W.D. and Rethwisch, D.G. (2018) *Materials Science and Engineering An Introduction*. 10th edn. Wiley.

Dieter, G.E. and Bacon, D. (2005) *Mechanical Metallurgy*. 3rd edn. McGraw-Hill.

ISO 6892-1 (2019) *Metallic Materials-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature*. Available at:
www.iso.org.

ISO 7438:2005 (2005) *Metallic Materials - Bend Test*.
Available at: www.iso.org.

Meyers, M.A. and Chawla, K.K. (2009) *Mechanical Behavior of Materials*. 2nd edn. Cambridge University Press.

Smith, W.F. and Hashemi, J. (2011) *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Interactive*. 5th edn. McGraw-Hill.

Totten, G.E. (2006) *Steel Heat Treatment Handbook*. 2nd edn. CRC Press.

BIODATA PENULIS



Shanti Kumbarasari, S.T, M.T
Dosen Program Studi Mesin Industri
Politeknik Industri ATMI

Penulis lahir di Blora, 26 Mei 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Mesin Industri Politeknik Industri ATMI. Menyelesaikan pendidikan S1 Universitas Sanata Dharma Yogyakarta Jurusan Teknik Mesin dan melanjutkan S2 Universitas Pancasila Jakarta jurusan Magister Teknik Manufaktur.

Telah menulis buku bersama mengenai :

- 1. *Evaluating Online Learning Challenges and Strategies***
Novateur Publication
ISBN. 978-93-90753-23-9
- 2. *Elemen Mesin Untuk Teknik Industri***
Penerbit Get Press Indonesia
ISBN. 978-623-198-921-5
- 3. *Mekanika Bahan dalam Teknik Mesin***
Penerbit Get Press Indonesia

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

ISBN. 978-623-125-025-4

4. Material Teknik 2

Penerbit Get Press Indonesia

ISBN. 978-623-125-229-6

5. Mengungkap Rahasia Mesin:

Landasan dan Aplikasi Teknik Mesin

Penerbit Get Press Indonesia

ISBN. 978-623-125-514-3

BIODATA PENULIS



Akram La Kilo

Dosen Program Studi Kimia
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Gorontalo

Akram La Kilo adalah seorang dosen Guru Besar di Program Studi Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Gorontalo. Beliau lahir di Tikong pada 11 April 1977 dan menempuh pendidikan S1 di STIKP Negeri Gorontalo, S2 dan S3 di Institut Teknologi Bandung (ITB) dengan spesialisasi di bidang Kimia Anorganik. Dalam pengajaran, Prof. Akram mengampu berbagai mata kuliah seperti Kimia Dasar, Kimia Anorganik, Kimia Anorganik Fisik, dan Kimia Komputasi. Selain itu, beliau aktif dalam melakukan penelitian, dengan fokus pada topik-topik kimia komputasi, seperti simulasi konduktivitas ion dan studi kestabilan material. Selain mengajar dan melakukan penelitian, beliau juga berperan aktif dalam pengabdian kepada masyarakat. Ia terlibat dalam berbagai program pemberdayaan sosial, seperti penyuluhan dan audit halal produk lokal serta peningkatan minat baca anak-anak melalui rumah pintar di daerah

Gorontalo. Prof. Akram memiliki pengalaman dalam berbagai proyek pengabdian yang didanai oleh Ristek Dikti dan LPPOM, yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas pendidikan dan kesejahteraan masyarakat. Dalam perannya sebagai peneliti dan pengabdian masyarakat, beliau telah memperoleh sejumlah penghargaan, termasuk penghargaan sebagai Ketua Program Studi Terbaik di Universitas Negeri Gorontalo dan Presenter Terbaik dalam seminar nasional.

BIODATA PENULIS



Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Pengelasan dan Fabrikasi
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Penulis lahir di Gresik tanggal 7 Maret 1992. Penulis adalah dosen di Program Studi Teknik Pengelasan dan Fabrikasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS. Penulis aktif menekuni bidang menulis, baik menulis jurnal maupun buku. Penulis juga aktif dalam melakukan penelitian dan pengabdian masyarakat. Google scholar penulis dapat dicek melalui link <https://scholar.google.com/citations?user=d3iCjV8AAAAJ&hl=en&oi=ao> . Bidang keahlian penulis adalah ilmu bahan, teknik pengelasan, polimer & komposit, korosi, dan Quality Control. Alamat penulis di Perum Grand Surya D3-12

Metalurgi Fisik:

Struktur, Proses, dan Sifat Mekanis Logam

Sidoarjo, atau bisa dihubungi di alamat email berikut :
imahluluk@ppns.ac.id.

BIODATA PENULIS



Subekti

Dosen Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Mercubuana, Jakarta

Penulis lahir di Bogor tanggal 23 November 1973. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Mercubuana. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Mesin dan melanjutkan S2 pada Jurusan Teknik Mesin. Penulis menekuni bidang penelitian ke arah getaran, robotic, dan energy baru terbarukan.

BIODATA PENULIS



Muhammad Ridwan Septiawan, S.Si., M.T.

Dosen Program Studi Teknik Kimia Mineral
Politeknik Industri Logam Morowali

Penulis lahir di Kendari tanggal 8 September 1989. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Kimia Mineral Politeknik Industri Logam Morowali. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Kimia dan melanjutkan S2 pada Rekayasa Pertambangan. Bidang keilmuan saya adalah pengolahan mineral dan metalurgi. Selain kegiatan akademik, penulis juga terlibat dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat. Book chapter ini merupakan bagian dari kontribusi penulis dalam pengembangan ilmu pengetahuan yang aplikatif dan berkelanjutan.