

METALURGI FISIK

BUKU AJAR

Disclaimer

Bahan ajar ini disarikan dari berbagai sumber. Setiap Mahasiswa yang mengutip beberapa bagian yang relevan ke dalam karya tulisnya, agar dapat merujuk kepada sumber aslinya.

Teuku Azuar Rizal
azuarrizal@gmail.com

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	A
DAFTAR GAMBAR	D
DAFTAR TABEL	F
1 PRINSIP METALURGI FISIK	1
1.1 MENGENAL METALURGI	1
1.2 IKATAN ATOM DAN STRUKTUR KRISTAL	4
1.2.1 BILANGAN KUANTUM	4
1.2.2 ASAS AUFBAU	6
1.2.3 STABILITAS STRUKTUR ATOM	6
1.3 IKATAN LOGAM	7
1.3.1 PENGERTIAN IKATAN LOGAM	7
1.3.2 MODEL LAUTAN ELEKTRON	7
2 STRUKTUR MIKRO	9
2.1 JENIS IKATAN DALAM BAHAN PADAT	9
2.1.1 IKATAN IONIK	9
2.1.2 IKATAN KOVALEN	10
2.1.3 IKATAN LOGAM	11
2.1.4 IKATAN DAN PENGARUH GAYA LUAR	11
2.2 STRUKTUR MIKRO LOGAM	11
2.2.1 KUBIK PERMUSATAN RUANG.	13
2.2.2 KUBIK PERMUSATAN SISI.	13
2.2.3 KRISTAL HEKSAGONAL.	14
3 CACAT KRISTAL LOGAM	15
3.1 CACAT KRISTAL	15
3.1.1 KETIDAKMURNIAN DALAM BAHAN PADAT	15
3.2 LARUTAN PADAT DALAM LOGAM	15
3.2.1 LARUTAN PADAT SUBSTITUSI	16
3.2.2 LARUTAN PADAT TERTATA	16
3.2.3 LARUTAN PADAT INTERSTISI	16
3.2.4 LARUTAN PADAT DALAM SENYAWA	17
3.3 KETIDAKSEMPURNAAN DALAM KRISTAL	17
3.3.1 CACAT TITIK.	18
3.3.2 CACAT GARIS (DISLOKASI)	18
3.3.3 CACAT PERMUKAAN.	19

3.4	BATAS BUTIR.	19
3.4.1	DAERAH BATAS BUTIR DAN BESAR BUTIR.	20
4	DEFORMASI DAN REKRISTALISASI	21
4.1	DEFORMASI DEFORMASI ELASTIS DAN DEFORMASI PLASTIS	21
4.1.1	DEFORMASI ELASTIK	21
4.1.2	DEFORMASI PLASTIK	22
4.2	REKRISTALISASI	22
5	DIAGRAM BESI-BESI KARBIDA	25
5.1	DIAGRAM BESI-KARBON	25
5.2	STRUKTUR MIKRO DAN KAITANNYA DENGAN SIFAT MEKANIK	28
5.2.1	FERIT	28
5.2.2	PERLIT	28
5.2.3	BAINIT	28
5.2.4	MARTENSIT	29
5.2.5	SEMENTIT	30
5.2.6	KARBIDA:	30
6	DIAGRAM TTT DAN CCT	31
6.1	DIAGRAM TTT	31
6.2	DIAGRAM CCT	33
7	HARDENABILITY	35
7.1	HARDENABILITY	35
7.1.1	MAMPU KERAS KUANTITATIF.	36
7.2	PENGUJIAN JOMINY.	36
7.2.1	LANGKAH KERJA DAN PROSES JOMINY TEST :	36
7.3	PENGUJIAN GROSSMAN	38
8	PERLAKUAN PANAS	39
8.1	SEKILAS PANDANG	39
8.2	ANNEALING	39
8.2.1	FULL ANNEALING	40
8.2.2	SPHEROIDIZED ANNEALING	40
8.2.3	ISOTHERMAL ANNEALING	40
8.2.4	PROSES HOMOGENISASI	40
8.3	STRESS RELIEVING	40
8.3.1	TIMBULNYA TEGANGAN DI DALAM BENDA KERJA	41
8.3.2	TEMPERATUR STRESS RELIEVING	41
8.3.3	TUNGKU PEMANAS UNTUK STRESS RELIEVING	42
8.4	NORMALIZING	42
8.5	HARDENING	44
8.5.1	TEMPERATUR PEMANASAN	44
8.5.2	TAHAPAN PEKERJAAN SEBELUM PROSES <i>QUENCHING</i>	45

8.5.3	LAMA PEMANASAN	46
8.5.4	MEDIA <i>QUENCHING</i>	46
8.5.5	PENGARUH UNSUR PADUAN PADA Pengerasan	47
8.5.6	PEMBENTUKAN AUSTENIT SISA	47
8.6	TEMPERING	48
8.6.1	PERUBAHAN STRUKTUR SELAMA PROSES TEMPER	48
8.6.2	PENGARUH UNSUR PADUAN PADA PROSES TEMPER	49
8.6.3	PERUBAHAN SIFAT MEKANIK	50
8.7	AUSTEMPERING	50
9	MEKANISME PENGUATAN	53
<hr/>		
9.1	BATAS BUTIR DAN DISLOKASI	54
9.2	MEKANISME PENGUATAN :	55
9.2.1	PENGUATAN BUTIR	55
9.2.2	HUBUNGAN HALL-PETCH	55
9.2.3	PENGUKURAN UKURAN-BUTIR	55
9.2.4	PENGUATAN REGANGAN	56
9.2.5	PENGUATAN LARUTAN PADAT	56
9.2.6	PENGUATAN FASA KEDUA	56
9.2.7	PENGUATAN PRESIPITASI	56
	DAFTAR BACAAN	57
<hr/>		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1. Tujuan dari program ini adalah untuk memberikan pemahaman dasar tentang prinsip-prinsip utama yang menentukan evolusi struktur dalam logam dan paduan	1
Gambar 1-2. Status produksi baja di beberapa negara	1
Gambar 1-3. Contoh penulisan unsur	4
Gambar 1-4. Posisi ion dalam unsur	4
Gambar 1-5. Urutan pengisian orbital-orbital atom mengikuti arah panah	6
Gambar 1-6. Skema ikatan logam dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Elektron valensi menjadi terdisosiasi dengan inti atomnya dan membentuk lautan elektron.	8
Gambar 2-1. Beberapa konfigurasi elektron unsur	10
Gambar 2-2. Ikatan atom pada MgO_2	10
Gambar 2-3. Struktur kristal tunggal	12
Gambar 2-4. unit sell	12
Gambar 2-5. Konstanta kisi	12
Gambar 2-6. Kristal bukan kubik	13
Gambar 2-7. Sistem kristal	13
Gambar 2-8. Struktur Kubik pemusatan ruang	13
Gambar 2-9. Struktur Kubik pemusatan sisi	14
Gambar 2-10. Struktur Kubik pemusatan sisi	14
Gambar 2-11. Sel satuan heksagonal sederhana	14
Gambar 2-12. Struktur heksagonal tumpukan padat	14
Gambar 3-1. Larutan padat substitusi acak	16
Gambar 3-2. Larutan padat substitusi tertata	16
Gambar 3-3. Larutan padat interstisi	17
Gambar 3-4. Larutan padat substitusi dalam senyawa	17
Gambar 3-5. Struktur Cacat	17
Gambar 3-6. Cacat titik	18
Gambar 3-7. Dislokasi garis \perp . Terjadi cacat linier pada sisi bidang atom tambahan. (Guy and Hren, elemen of physical metalurgi)	19
Gambar 3-8. Energi Dislokasi. atom yang berdekatan dengan dislokasi mengalami tekanan (gelap) dan tegangan (putih)	19
Gambar 3-9. Dislokasi Ulir (tampak sel-sel satuan) vektor geser b sejajar dengan cacat garis	19
Gambar 3-10. Pembentukan Dislokasi akibat geseran (a) Garis dislokasi, D , akan bergerak melalui kristal sampai pergeseran selesai (b) cacat yang terjadi adalah dislokasi ulir, dengan garis cacat sejajar arah pergeseran (c) cacat linier yang terbentuk disebut dislokasi	19
Gambar 3-11. Atom Permukaan	19
Gambar 3-12. Menghitung butir	20
Gambar 4-1. Kurva tegangan regangan suatu material	21
Gambar 4-2. Perubahan dimensi sesuai arah tegangan (a) kristal mengalami gaya tarik (b) kristal pada posisi normal (c) kristal pada keadaan tertekan	22
Gambar 4-3. Perbedaan butir pada beberapa pengerjaan logam	22
Gambar 4-4. Perubahan struktur mikro dan sifat mekanik logam terdeformasi selama proses rekristalisasi	22
Gambar 5-1. Diagram Fe-Fe ₃ C	26
Gambar 5-2. Fasa pada baja eutektoid pada diagram fasa	26
Gambar 5-3. Diagram Kesetimbangan Besi - Karbon	27
Gambar 6-1. Diagram Transformasi Isothermal baja Eutectoid 1080.	32
Gambar 6-2. Diagram CCT pada baja Karbon	33
Gambar 7-1. Alat Jominy Test	36
Gambar 7-2. Percobaan Jominy	37
Gambar 7-3. Grafik hasil pengukuran kekerasan	37
Gambar 7-4. Kurva kemampukerasan untuk beberapa jenis baja, berikut komposisi dan ukuran butir tertent. Setelah pengujian Jonimy diperoleh perbedaan kekerasan pada berbagai komposisi.(data: U.S. Steel)	38

<i>Gambar 8-1. Diagram untuk temperatur Spheroidized annealing</i>	40
<i>Gambar 8-2. Grafik pemanasan, quenching dan tempering</i>	43
<i>Gambar 8-3. Diagram untuk temperatur Normalizing</i>	43
<i>Gambar 8-4. Temperatur pemanasan sebelum Quenching</i>	44
<i>Gambar 8-5. Grafik hubungan antara Temperatur, kekerasan dan kandungan austenit</i>	45
<i>Gambar 8-6. Grafik lama pemanasan dengan tebal dinding dari benda kerja yang dihardening</i>	46
<i>Gambar 8-7. Pengaruh suhu oli pada kecepatan quenching</i>	47
<i>Gambar 8-8. Hubungan antara kadar karbon dengan austenit</i>	48
<i>Gambar 8-9. Hubungan antara temperatur pengerasan dengan jumlah austenit sisa yang terbentuk</i>	48
<i>Gambar 8-10. Perubahan kekerasan dan struktur selama tempering</i>	48
<i>Gambar 8-11. Warna baja pada proses tempering</i>	49
<i>Gambar 8-12. Pengaruh tempering pada baja paduan</i>	49
<i>Gambar 8-13. Pengaruh temperatur tempering terhadap sifat mekanis</i>	50
<i>Gambar 8-14. Skema Diagram TT yang menggambarkan proses austempering, quenching dan tempering. thermalprocessing.com</i>	50

DAFTAR TABEL

<i>Tabel 1-1. Tabel pengaruh sifat bahan terhadap struktur mikro</i>	<i>4</i>
<i>Tabel 1-2. Bilangan Kuantum utama</i>	<i>5</i>
<i>Tabel 1-3. Bilangan kuantum utama dan magnetik</i>	<i>5</i>
<i>Tabel 1-4. Contoh ikatan atom</i>	<i>8</i>
<i>Tabel 8-1. Temperatur stress relieving yang spesifik dan lazim diterapkan pada beberapa jenis baja</i>	<i>42</i>
<i>Tabel 8-2. Garam- garam yang digunakan dalam proses Quenching</i>	<i>51</i>

1 PRINSIP METALURGI FISIK

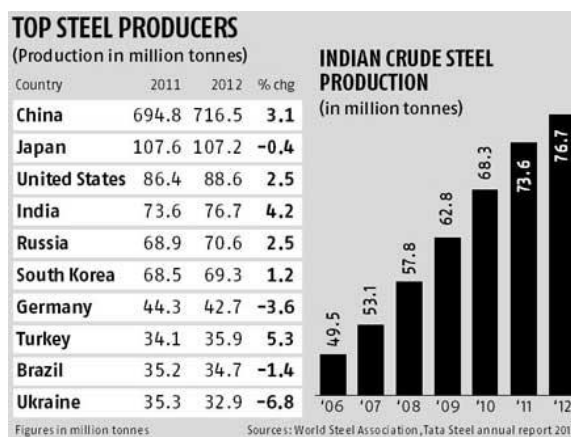
1.1 Mengenal Metalurgi

Metalurgi fisik berkaitan dengan evolusi structure pembentukan solid (padatan) dari suatu keadaan fase cair (liquid). Efek dari elemen paduan dan ketidakmurnian pada proses transformasi dan efek dari teknik pengolahan pada perubahan struktur dan korelasi sifat-sifat struktur; meskipun berfokus pada logam dan paduan, dapat dipakai untuk keramik, polimer atau bidang lain bahan. Logam dan paduan telah digunakan sejak dulu; beberapa periode peradaban manusia telah dinamai dengan logam dan paduan, misalnya, Zaman Perunggu atau zaman logam.



Gambar 1-1. Tujuan dari program ini adalah untuk memberikan pemahaman dasar tentang prinsip-prinsip utama yang menentukan evolusi struktur dalam logam dan paduan

Saat pertama kali dengan proses metalurgi diperkenalkan, sekitar pertengahan abad sembilan belas, baja sudah dapat dihasilkan dalam jumlah massal, dan telah menjadi salah satu bahan utama konstruksi saat ini. Oleh karena itu perlu juga diketahui sedikit mengenai kemampuan produksi logam-logam strategis di negara masing-masing, berikut sifat-sifat yang umum dimiliki oleh logam dan paduan yang umum dipakai.



Gambar 1-2. Status produksi baja di beberapa negara

Baja, bisa memiliki rentang kekuatan dari 240 MPa dengan cara mengatur proses produksi, teknik, perlakuan panas, dan lain-lain. Tingkat kekuatan yang dapat diperoleh mencapai beberapa kali lipat. Seperti juga aluminum, alumunium mulai banyak dijumpai sejak awal abad ke duapuluh, begitu juga dengan tembaga. Material lain yang umum dijumpai adalah logam umum dan zinc, material tersebut sangat populer dalam hal konstruksi, sebab sifatnya yang unik.

Tujuan dan Sasaran

Tujuan dari program ini adalah untuk memberikan pemahaman dasar tentang prinsip-prinsip utama yang menentukan evolusi struktur dalam logam dan paduan saat pemrosesan mereka, dan hubungannya dengan sifat, kinerja dan kemampuan kerja logam. Dan logam yang digunakan, diproduksi dengan teknik pengolahan yang tertentu, dan sifat-sifatnya dikendalikan oleh struktur dan komposisi; dan kinerja dari bahan-bahan tersebut pada gilirannya ditentukan oleh sifat material.

Beberapa hal yang hendaknya dipahami sebelum mempelajari metalurgi fisik antara lain adalah:

1. **Ikatan tom dan struktur kristal:** ikatan logam, sel satuan, atom packing, situs interstisial, indeks Miller, orientasi kristal, proyeksi stereographic.
2. **Perangkat dan teknik eksperimental:** Metalografi (Optical TEM, SEM), Difraksi Sinar X, Sifat-sifat Mekanik, analisis termal.
3. **Pemadatan logam murni:** aturan fase, konsep energi bebas, entropi, energi permukaan (batas butir) dan pada pendinginan, nukleasi dan pertumbuhan butir, nukleasi homogen dan heterogen, pembekuan directional.

Pada bagian dua, nanti akan dibahas mengenai struktur mikro, yang akan dilanjutkan dengan pembahasan mengenai sifat-sifat mekanik dan beberapa hal terkait lainnya

Selanjutnya, akan dibahas pula mengenai pemadatan logam murni; bagaimana logam diproduksi serta bagaimana proses transformasinya logam murni selama prosesnya; konsep dasar dan prinsip dasar termodinamika, yang kadang termodinamis sekaligus kinetis, yang nantinya akan membantu memahami perkembangan struktur pada logam murni.

1. Deformasi plastik pada logam murni: mekanisme (slip & puntir), peregangan stres geser kritis, uji tarik kristal tunggal (fcc), kekuatan teoritis kristal yang ideal.
2. Cacat kristal dalam logam: kosong, interstitial, substitusi, energi bebas pencampuran, dislokasi (konsep dasar saja), dislokasi garis/ ulir, dislokasi parsial, stacking fault, dislokation lock, dislokasi menumpuk, hubungan Hall-Petch, struktur batas butir.

Logam juga memiliki sifat yang menarik yang dibentuk oleh proses mekanik yang dikenal sebagai deformasi plastis. Deformasi plastis pada logam mulia (poly crystalline bukan kristal tunggal), sering digunakan untuk lebih memahami kekuatan teoritis kristal ideal. Secara praktis, kristal ideal tak selamanya terjadi dengan mudah, kadangkala cacat dapat saja muncul di dalam logam, sehingga sifat material sedikit banyaknya akan dipengaruhi juga oleh cacat yang muncul. Oleh karena itu, akan dipelajari juga mengenai macam-macam cacat dan bagaimana sifat material dapat berubah karenanya. Tak hanya sifat mekanis, sifat fisik material juga dipengaruhi oleh kekosongan.

Materi selanjutnya akan berkaitan dengan:

4. **Diffusi:** konsep dasar fenomena dan pendekatan atomistik.
5. **Pemadatan paduan biner:** batas kelarutan (solubility), sistem isomorphous, lever rule, constitutional super cooling, pengaruh pendinginan equilibrium, sistem eutektik, peritectik, eutectoid dan peritectoid, diagram fasa kompleks, diagram ternary, segitiga komposisi, ternary eutectic, bidang vertikal & horizontal, struktur logam coran, segregasi dan porositas, diagram besi-karbon, baja dan besi cor.

Selanjutnya adalah pemahaman tentang paduan yang merupakan gabungan dari beberapa logam. Ada satu kriteria penting, kriteria mengenai bagaimana mekanisme atom-atom unsur yang berbeda ini terdistribusi, faktor-faktor yang mengendalikan pergerakan atom ini, dan kisi. Dan dari proses difusi ini akan dapat dipahami ide dasar mengenai fenomena logis proses difusi. Demikian juga pada pendekatan atomik. Dari latar belakang dasar akan dilanjutkan dengan pemadatan paduan biner; paduan biner dikelompokkan dengan cara yang berbeda. Kita akan mempelajari bagaimana struktur ini berkembang dalam bentuk paduan biner; dibagian ini juga akan dipelajari

tentang tiga fase equilibrium seperti eutektik, peritektik, transformasi solid state, sehingga kita dapat mengetahui asal struktur pada logam mahal.

Selanjutnya akan dijelaskan sedikit mengenai porositas segregasi, dan selanjutnya menitikberatkan pada satu hal penting berkaitan diagram fasa besi-karbon dan diagram karbon yang akan menjelaskan mengapa sifat paduan besi-karbon, berubah berdasarkan proses yang dilakukan.

Materi selanjutnya adalah

6. **Diagram fasa biner paduan logam komersil yang umum:** Cu-Ni, Au-Cu, Ni-Cr, Al-Si, Al-Zn, Al-Ag, Pb-Sn, Cu-Zn, Cu-Sn, Cu-Al, Ti-Al, Ti-V: interpretasi struktur mikro dan sifat.
7. **Pengerjaan dingin dan Annealing:** Recovery, recrystallization dan pertumbuhan butir, pendekatan fenomena dan mekanis.
8. Presipitasi **dari terminal super saturasi-terminal larutan padat:** presipitasi kinetik dan termodinamik, pengerasan presipitasi (precipitation hardening).

Dalam bagian tersebut, kita akan dapat memahami beberapa diagram paduan biner berikut karakteristiknya, dan bagaimana caranya menginterpretasi awal perubahan struktur mikro, dan kaitannya dengan sifat material. Logam yang mengalami pengerjaan dingin, dan memahami sifat yang berubah selaras kegiatan pengerjaan dingin.

Selanjutnya juga akan dipelajari mengenai proses pengerasan presipitasi (precipitation hardening). Apa yang terjadi pada larutan superjenuh yang mengalami perlakuan panas, kita akan mencoba memahami tentang termodinamika dan kinetika presipitasi.

9. **Perlakuan panas pada baja:** diagram T-T-T; transformasi perlitik, martensitik dan bainitik, efek unsur paduan terhadap diagram fasa dan diagram TTT, diagram CCT, Annealing, normalizing, hardening dan tempering, hardenability.
10. **Penerapan metalurgi fisik:** Mekanisme Penguatan, kekuatan vs ketangguhan (keuletan), pengolahan thermo-mekanik, paduan mikro baja, baja kekuatan ultra tinggi, superalloy, kontrol tekstur.

Selanjutnya, kita akan melihat perlakuan panas baja secara rinci. Kinetika transformasi, diagram transformasi waktu-suhu, beberapa istilah seperti Perlitik, Martensitik, transformasi Bainitik, pengaruh unsur paduan terhadap diagram fasa, diagram TTT, diagram CCT, dan beberapa perlakuan panas yang umum. Terakhir, akan dijelaskan beberapa hal berkaitan aplikasi metalurgi fisik. dalam hal ini akan dapat di pahami bagaimana kekuatan material atau logam paduan dapat ditingkatkan, tanpa mengorbankan keuletan atau ketangguhan.

1.2 Ikatan Atom dan Struktur Kristal

Dalam bagian ini akan dipelajari beberapa hal berkaitan dengan:

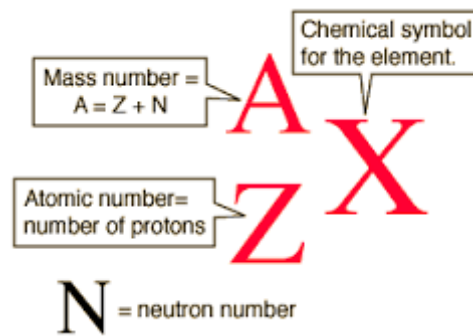
1. Ikatan logam
2. Struktur kristal: unit cell, packing atomik, situs interstitial
3. Indeks miller: arah dan bidang kristal
4. Proyeksi stereografik: arah kristal

Dalam bagian ini akan dijelaskan beberapa gagasan ringkas tentang ikatan atom, dan struktur kristal. keduanya merupakan fokus utama pada ikatan logam, sistem struktur-kristal yang kita pakai untuk memperbaiki bidang kristal, dan arahnya. Dan bagaimana kristal menjadi padatan, berapa besar perbedaan arahnya, dan bidang, dan arah dari kristal direpresentasikan dalam suatu proyeksi yang disebut proyeksi stereographic.

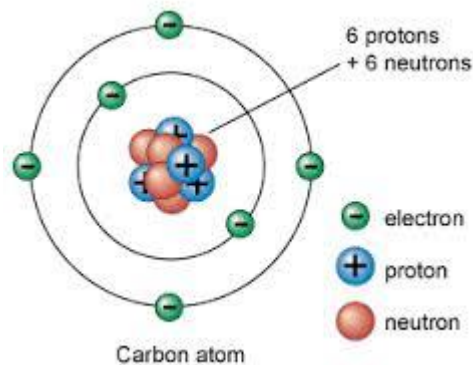
Tabel 1-1. Tabel pengaruh sifat bahan terhadap struktur mikro

Sifat	Kristal/ cacat kristal	Struktur mikro
Mekanis	Sangat kuat	Sangat kuat
Elektrik	Rendah	Rendah-kuat
Thermal	Rendah	Rendah-kuat
Magnetik	Rendah	Rendah-kuat
Kimia	Rendah	Rendah-sedang

Penjelasan diatas diharapkan telah memberi pemahaman tentang susunan atom, dan struktur mikro, dan sifat-sifat khas seperti sifat mekanik, listrik, termal, magnetik, dan kimia. selain itu, apakah sifat mekanik, yang memiliki ketergantungan yang kuat pada struktur kristal, dan cacat kristal? Ini tidak berarti bahwa, yang lain tidak tergantung.



Gambar 1-3. Contoh penulisan unsur



Gambar 1-4. Posisi ion dalam unsur

Atom terdiri dari partikel-partikel sub atom, ada Nucleus, di mana massa total terkonsentrasi. Nukleus atau inti terdiri dari proton, dan Neutron. Proton bermuatan positif, dan jumlah proton sama dengan nomor atom. Dan A adalah bilangan massa atom sedangkan Z (bermuatan negatif) adalah jumlah Neutron.

Artinya, inti memiliki seluruh massa, dan kemudian elektron terus bergerak dalam orbit yang berbeda. Dan keadaan energi dalam orbit ini dijelaskan oleh satu set bilangan kuantum, yang tercantum di sini bilangan kuantum prinsip memiliki bilangan kuantum azimut, bilangan kuantum magnetik.

1.2.1 Bilangan Kuantum

Pengertian Bilangan Kuantum: Bilangan kuantum adalah suatu nilai yang menjelaskan kuantitas kekal dalam sistem dinamis. Bilangan kuantum menggambarkan sifat orbital dan elektron dalam orbital.

Bilangan kuantum menentukan tingkat energi utama atau jarak dari inti, bentuk orbital, orientasi orbital, dan spin elektron. Setiap sistem kuantum dapat memiliki satu atau lebih bilangan kuantum.

Macam-Macam Bilangan Kuantum:

Untuk menjelaskan elektron secara lengkap dibutuhkan empat macam bilangan kuantum, yaitu:

1. Bilangan kuantum utama (n) yang menyatakan tingkat energi.
2. Bilangan kuantum azimut (ℓ) yang menyatakan bentuk orbital.
3. Bilangan kuantum magnetik (m) yang menyatakan orientasi orbital dalam ruang tiga dimensi.
4. Bilangan kuantum spin (s) yang menyatakan spin elektron pada sebuah atom.

Bilangan kuantum utama

Bilangan kuantum utama (primer) digunakan untuk menyatakan tingkat energi utama yang dimiliki oleh elektron dalam sebuah atom. Bilangan kuantum utama tidak pernah bernilai nol. Semakin tinggi nilai n semakin tinggi pula energi elektron.

Untuk sebuah atom, nilai bilangan kuantum utama berkisar dari 1 ke tingkat energi yang mengandung elektron terluar. Bilangan kuantum utama mempunyai nilai sebagai bilangan bulat positif 1, 2, 3, dst. Nilai-nilai tersebut melambangkan K, L, M, dst.

Tabel 1-2. Bilangan Kuantum utama

Kulit	K	L	M	N	O
Nilai n	1	2	3	4	5

Bilangan kuantum azimut:

Bilangan kuantum azimut sering disebut dengan bilangan kuantum angular (sudut). Energi sebuah elektron berhubungan dengan gerakan orbital yang digambarkan dengan momentum sudut. Momentum sudut tersebut dikarakterisasi menggunakan bilangan kuantum azimut. Bilangan kuantum azimut menyatakan bentuk suatu orbital dengan simbol ℓ .

Bilangan kuantum azimut juga berhubungan dengan jumlah subkulit. Nilai ini menggambarkan subkulit yang dimana elektron berada. Untuk subkulit s, p, d, f, bilangan kuantum azimut berturut-turut adalah 0, 1, 2, 3.

Bilangan kuantum magnetik

Bilangan kuantum magnetik menyatakan tingkah laku elektron dalam medan magnet. Tidak adanya medan magnet luar membuat elektron atau orbital mempunyai nilai n dan ℓ yang sama tetapi berbeda m . Namun dengan adanya medan magnet, nilai tersebut dapat sedikit berubah. Hal tersebut dikarenakan timbulnya interaksi antara medan magnet sendiri dengan medan magnet luar.

Tabel 1-3. Bilangan kuantum utama dan magnetik

Kulit (n)	Subkulit (ℓ)	Nama Orbital ($n\ell$)	Orientasi (m_ℓ)	Jumlah Orbital	Maksimum Terisi
$n = 1$	$\ell = 0$	1s	$m_\ell = 0$	1	2 e^-
	$\ell = 0$	2s	$m_\ell = 1, 0-1$	1	2 e^-
$n = 2$	$\ell = 1$	2p	$m_\ell = 1, 0-1$ (or p_x, p_y, p_z)	3	6 e^-
	$\ell = 0$	3s	$m_\ell = 0$	1	2 e^-
$n = 3$	$\ell = 1$	3p	$m_\ell = 1, 0-1$	3	6 e^-
	$\ell = 2$	3d	$m_\ell = 2, 1, 0, -1, -2$ (or d_{xy}, d_{yz}, d_{xz})	5	10 e^-

Bilangan kuantum magnetik ada karena momentum sudut elektron, gerakannya berhubungan dengan aliran arus listrik. Karena interaksi ini, elektron menyesuaikan diri di wilayah tertentu di sekitar inti. Daerah khusus ini dikenal sebagai orbital. Orientasi elektron di sekitar inti dapat ditentukan dengan menggunakan bilangan kuantum magnetik m .

Bilangan kuantum spin:

Bilangan kuantum spin menyatakan momentum sudut suatu partikel. Spin mempunyai simbol s atau sering ditulis dengan m_s (bilangan kuantum spin magnetik). Suatu elektron dapat mempunyai bilangan kuantum spin $s = +\frac{1}{2}$ atau $-\frac{1}{2}$.

Nilai positif atau negatif dari spin menyatakan spin atau rotasi partikel pada sumbu. Sebagai contoh, untuk nilai $s = +\frac{1}{2}$ berarti berlawanan arah jarum jam (ke atas), sedangkan $s = -\frac{1}{2}$ berarti searah jarum jam (ke bawah). Diambil nilai setengah karena hanya ada dua peluang orientasi, yaitu atas dan bawah. Dengan demikian, peluang untuk mengarah ke atas adalah 50% dan peluang untuk mengarah ke bawah adalah 50%.

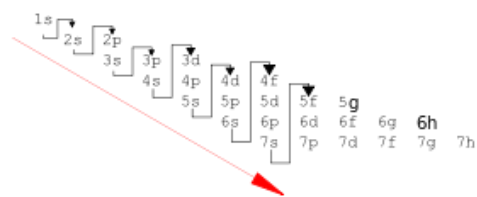
1.2.2 Asas Aufbau

Asas Aufbau¹ adalah bagian penting dalam konsep konfigurasi elektron awal Bohr. Ia dapat dinyatakan sebagai:

Terdapat maksimal dua elektron yang dapat diisi ke dalam orbital dengan urutan peningkatan energi orbital: orbital berenergi terendah diisi terlebih dahulu sebelum elektron diletakkan ke orbital berenergi lebih tinggi.

¹ berasal dari Bahasa Jerman Aufbau yang berarti "membangun, konstruksi" (lihat International Union of Pure and Applied

Urutan pengisian orbital-orbital atom mengikuti arah panah.



Gambar 1-5. Urutan pengisian orbital-orbital atom mengikuti arah panah

Asas ini bekerja dengan baik (untuk keadaan dasar atom-atom) untuk 18 unsur pertama; ia akan menjadi semakin kurang tepat untuk 100 unsur sisanya. Bentuk modern asas Aufbau menjelaskan urutan energi orbital berdasarkan kaidah Madelung, pertama kali dinyatakan oleh Erwin Madelung pada tahun 1936.[7][9]

Orbital diisi dengan urutan peningkatan $n+l$;

Apabila terdapat dua orbital dengan nilai $n+l$ yang sama, maka orbital yang pertama diisi adalah orbital dengan nilai n yang paling rendah.

Sehingga, menurut kaidah ini, urutan pengisian orbital adalah sebagai berikut:

1s 2s 2p 3s 3p 4s 3d 4p 5s 4d 5p 6s 4f 5d 6p 7s 5f 6d 7p

Asas Aufbau dapat diterapkan, dalam bentuk yang dimodifikasi, ke proton dan neutron dalam inti atom.

1.2.3 Stabilitas struktur atom

Berikut ini adalah contoh perpidahan elektron (melepas dan menerima) pada saat terbentuknya ikatan atom yang stabil.

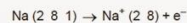
Sebuah atom cenderung melepaskan elektron apabila memiliki elektron terluar 1, 2, atau 3 elektron dibandingkan konfigurasi elektron gas mulia yang terdekat.

Chemistry. "aufbau principle". Compendium of Chemical

Contoh:



Gas mulia terdekat ialah ${}_{10}\text{Ne} : 2\ 8$. Jika dibandingkan dengan atom Ne, maka atom Na kelebihan satu elektron. Untuk memperoleh kestabilan, dapat dicapai dengan cara melepaskan satu elektron.

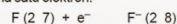


Sebuah atom cenderung menerima elektron apabila memiliki elektron terluar 4, 5, 6, atau 7 elektron dibandingkan konfigurasi elektron gas mulia yang terdekat.

Contoh:



Konfigurasi elektron gas mulia yang terdekat ialah ${}_{10}\text{Ne} : 2\ 8$. Konfigurasi Ne dapat dicapai dengan cara menerima satu elektron.



Jika masing-masing atom sukar untuk melepaskan elektron (memiliki keelektronegatifan tinggi), maka atom-atom tersebut cenderung menggunakan elektron secara bersama dalam membentuk suatu senyawa. Cara ini merupakan peristiwa yang terjadi pada pembentukan ikatan kovalen. Misalnya atom fluorin dan fluorin, keduanya sama-sama kekurangan elektron, sehingga lebih cenderung memakai bersama elektron terluarnya.

Jika suatu atom melepaskan elektron, berarti atom tersebut memberikan elektron kepada atom lain. Sebaliknya, jika suatu atom menangkap elektron, berarti atom itu menerima elektron dari atom lain. Jadi, susunan elektron yang stabil dapat dicapai dengan berikatan dengan atom lain.

kondisi tersebut memengaruhi titik leleh dan titik didih. Titik leleh helium adalah 1 derajat Kelvin dan diatas helium (dalam sistem periodik) ada neon; neon dengan titik leleh pada 24 K, argon 84 K, dan radon 211 K. Jadi, jadi kriteria utama yang paling penting dari stabilitas struktur atom adalah sel terluar yang paling dekat.

1.3 Ikatan Logam

1.3.1 Pengertian Ikatan Logam

Lebih dari delapan puluh unsur yang ada di sistem periodik unsur adalah logam. Logam bersifat padat pada temperatur dan tekanan standar, dengan pengecualian unsur merkuri dan galium yang keduanya berupa cairan. Sebagai pengingat, sifat-sifat logam adalah sebagai berikut:

1. Mempunyai konduktivitas termal dan listrik yang tinggi.
2. Berkilau dan memantulkan cahaya.
3. Dapat ditempa.
4. Mempunyai variasi kekuatan mekanik.

Ikatan logam adalah suatu kekuatan utama yang menyatukan atom-atom logam. Ikatan logam merupakan akibat dari adanya tarik menarik muatan positif dari logam dan muatan negatif dari elektron yang bergerak bebas.

Sifat-sifat logam tidak dapat dimasukkan dalam kriteria ikatan seperti ikatan kovalen maupun ikatan ion. Senyawa ionik tidak dapat mengantarkan listrik pada fase padatan, dan senyawa ionik bersifat rapuh (berlawanan dengan sifat logam). Atom dari senyawa logam hanya mengandung satu sampai tiga elektron valensi. Dengan demikian atom tersebut tidak mampu membentuk ikatan kovalen. Senyawa kovalen merupakan penghantar listrik yang buruk dan umumnya berupa cairan (dengan sifat berkebalikan dengan pembentukan logam). Dengan demikian, logam membentuk model ikatan yang berbeda.

1.3.2 Model Lautan Elektron

Untuk menjelaskan ikatan pada logam, Lorentz mengusulkan sebuah model yang dikenal dengan model gas elektron atau model lautan elektron. Model ini didasarkan pada sifat logam berikut:

Energi ionisasi yang rendah

Logam umumnya mempunyai energi ionisasi yang rendah. Secara tak langsung, pengertian ini merujuk pada elektron valensi yang tidak terikat dengan kuat oleh inti. Elektron valensi dapat bergerak dengan bebas diluar pengaruh inti. Dengan demikian, logam mempunyai elektron yang bebas bergerak.

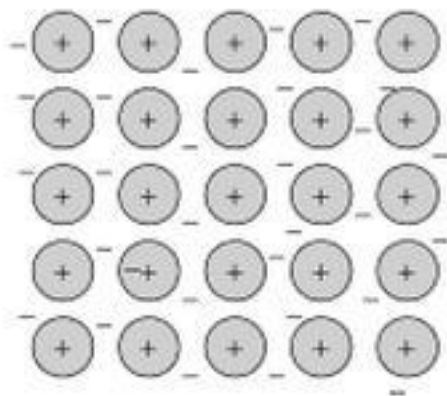
Banyak orbital kosong

Telah diteliti bahwa logam mempunyai banyak orbital yang kosong sebagai akibat elektron valensi logam lebih rendah

daripada orbital valensi logam. Sebagai contoh, logam litium mempunyai orbital 2p yang kosong; natrium mempunyai orbital 3p dan 5d yang kosong; dan magnesium mempunyai orbital 3p dan 3d yang juga masih kosong.

Contoh Ikatan Logam

Elektron yang paling luar pada sebagian besar logam biasanya mempunyai hubungan yang tidak erat dengan inti karena letaknya yang jauh dari muatan positif inti. Semua elektron valensi logam-logam bergabung membentuk lautan elektron yang bergerak bebas di antara inti atom. Elektron yang bergerak bebas beraksi sebagai ikatan terhadap ion bermuatan positif. Ikatan logam tidak mempunyai arah. Akibatnya, ikatan tidak rusak ketika logam ditempa.



Gambar 1-6. Skema ikatan logam dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Elektron valensi menjadi terdisosiasi dengan inti atomnya dan membentuk lautan elektron.

Contoh ikatan unsur yang mempunyai ikatan logam adalah sebagian besar logam seperti Cu, Al, Au, Ag, dsb. Logam transisi seperti Fe, Ni, dsb membentuk ikatan campuran yang terdiri dari ikatan kovalen (pada elektron 3d) dan ikatan logam.

Ikatan		Sifat
Ion		insulator
Kovalen		Insulator
Logam		Konduktor
Van der wall		isolator

Tabel 1-4. Contoh ikatan atom

2 STRUKTUR MIKRO

Agar pemahaman terhadap bahan menjadi lebih baik, maka perlu diketahui sifat asal material (sifat mekanik, fisik, dan kimiawi) dan bagaimana sifat itu berubah selama proses produksinya. Sifat bahan pada dasarnya ditentukan oleh:

1. interaksi antar atom bahan;
2. perilaku gugus-gugus atom tersebut (mungkin mempunyai struktur kristalin yang teratur);
3. atribut yang berkaitan dengan gabungan gugus-gugus atom tersebut.

2.1 Jenis Ikatan dalam bahan padat

Atom terdiri atas inti atom bermuatan positif yang dikelilingi oleh sejumlah elektron (yang dianggap tidak bermassa), jumlah muatan elektron sama dengan muatan inti sehingga secara keseluruhan atom itu netral, dan tidak bermuatan. Elektron tersusun dalam beberapa tingkatan energi atau kulit energi. Kulit energi terluar mempunyai ikatan yang paling lemah dengan intinya. Gambar 2.1(a) memperlihatkan gambaran 2D untuk Mg, jenis atom logam yang memiliki dua elektron pada kulit terluar, dan O₂, atom unsur bukan logam yang mempunyai enam elektron pada kulit paling luar. Keduanya mempunyai dua elektron pada kulit yang paling dekat dengan intinya.

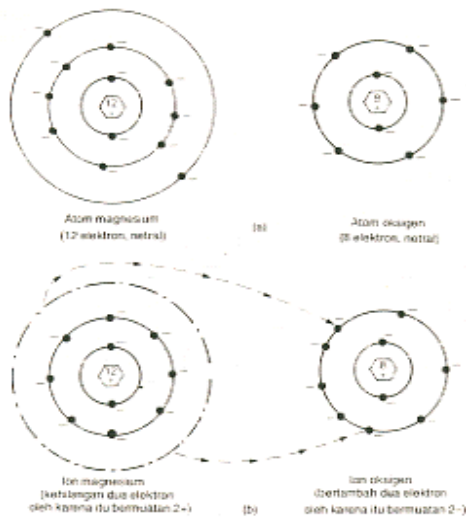
Interaksi antar atom berkurang bila kulit terluar diduduki oleh delapan elektron. Atom yang tidak memiliki konfigurasi ini selalu berusaha untuk membentuk ikatan sedemikian rupa sehingga mencapai konfigurasi ini. Karakteristik inilah yang mendorong terbentuknya tiga jenis ikatan atom yaitu ikatan ionik, ikatan kovalen, dan ikatan logam.

2.1.1 Ikatan Ionik

Ikatan ionik terjadi antara atom logam dan atom bukan logam dan merupakan ikatan yang sangat kuat. Bahan dengan ikatan ionik mempunyai ciri: temperatur lebur tinggi, keras, dan rapuh. Ikatan ionik terbentuk bila atom oksigen "menangkap" dua elektron terluar atom magnesium (Gambar 2.1(b)). Dengan demikian, atom oksigen bertambah dua muatan negatif dan atom magnesium kehilangan dua elektron terluarnya sehingga mempunyai kelebihan dua muatan positif. Baik oksigen maupun magnesium kini memiliki delapan elektron pada kulit terluarnya dan mencapai keseimbangan kimiawi seperti gas mulia. Akan tetapi, kedua atom yang tadinya netral itu sekarang mempunyai muatan elektrostatik yang berlawanan dan inilah yang menghasilkan ikatan ionik, seperti tampak pada Gambar 1.2(a) yang merupakan gambar dua dimensi senyawa oksida magnesium (MgO).

Tujuan & Sasaran

1. Memahami jenis ikatan bahan padat
2. Membahas pengaruh struktur atom, struktur kristalin, dan perilaku bahan dalam bentuknya yang utuh.

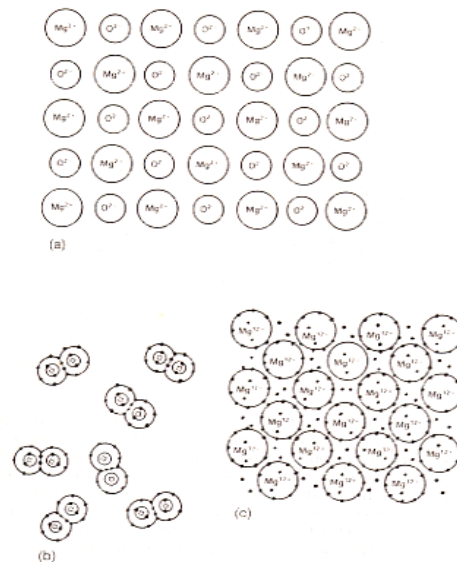


Gambar 2-1. Beberapa konfigurasi elektron unsur

Atom bermuatan sejenis tolak menolak, sedangkan atom dengan muatan berlawanan tarik menarik. Jadi, pada bahan utuh yang terdiri atas atom yang berikatan ionik, terbentuk struktur kristal dengan pola teratur dalam tiga dimensi. Tiap atom dikelilingi oleh atom dengan muatan yang berlawanan. Kekuatan senyawa seperti ini ditentukan oleh kekuatan ikatan elektrostatis antar atom tak sejenis, dan kerapuhannya ditentukan oleh ketahanan atom bermuatan terhadap usaha yang memaksanya menduduki posisi dekat dengan atom yang bermuatan sama. Oksida magnesium menentang gaya yang mendekatkan atom oksigen dan atom magnesium dengan atom sejenis. Bila gaya tersebut cukup besar, kristal akan retak.

2.1.2 Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen terjadi antara atom dengan empat elektron atau lebih pada kulit terluarnya, suatu kondisi yang dijumpai pada unsur bukan logam. Sebuah atom tak mungkin menampung semua elektron kulit terluar atom lain. Sekiranya hal itu terjadi, maka kulit elektron terluarnya akan kelebihan elektron (jumlah ideal adalah delapan elektron). Bila terdapat empat elektron atau lebih pada kulit terluar, atom sedemikian rupa sehingga mereka dapat berbagi elektron luar, tampak pada Gambar 1.2b.



Gambar 2-2. Ikatan atom pada MgO_2

Pada gambar ini terlihat dua atom oksigen berbagi elektron sehingga setiap atom mempunyai delapan elektron. Ikatan antara bagian atom sangat kuat, tetapi ikatan antara pasangan lemah; demikian lemahnya sehingga oksigen tidak dapat beku dan membentuk kristal mencapai temperatur yang sangat rendah.

Bahan yang mempunyai ikatan kovalen dapat berbentuk gas, cairan, atau padatan dan ikatan ini merupakan ikatan yang kuat. Untuk penerapan di bidang teknik, kita mengambil contoh yang relevan, misalnya karbon. Atom karbon mempunyai empat elektron pada kulit terluarnya. Agar jumlah elektron tersebut mencapai delapan, karbon dapat bersenyawa dengan atom karbon lainnya atau dengan empat buah atom berelektron tunggal (pada kulit terluar) seperti hidrogen. Dengan hidrogen, karbon akan membentuk metana (CH_4). Dengan dua atom yang mempunyai elektron ganda (pada kulit terluarnya) seperti oksigen, karbon membentuk dioksida karbon (CO_2).

Dengan atom karbon lain, akan terbentuk dua jenis kristal karbon. Bentuk pertama adalah intan. Intan mempunyai struktur kubik dengan atom pada posisi rangkaian tetragonal, sedangkan bentuk kedua mempunyai atom karbon dalam rangkaian bidang heksagonal dan disebut grafit. Grafit dikenal dengan sifat pelumasnya akibat susunan bidangnya yang dapat

saling bergeseran. Walaupun atom karbon dikelilingi oleh delapan elektron, jenis ikatannya agak berbeda. Jarak antar bidang lebih besar daripada jarak antar atom dalam bidang itu sendiri, sehingga gaya ikat antar bidang lemah. Selain itu, ikatan semacam ini menggunakan tiga elektron per atom, sedangkan elektron keempat bebas atau dapat bergerak dalam bidang yang sejajar dengan kulit.

Atom karbon yang membentuk ikatan dengan atom lain seperti hidrogen sering kali membentuk rantai atau untai yang panjang. Ikatan antar atom yang seperti rantai ini (yang disebut struktur polimer) tidak selalu mencerminkan sifat ikatan kovalen karena, meskipun kuat, rantai juga fiksibel dan ikatan antar rantai yang berdekatan lemah.

2.1.3 Ikatan Logam

Dua pertiga dari unsur mempunyai kurang dari empat elektron pada kulit terluarnya. Meskipun jumlahnya memadai untuk mengimbangi muatan positif inti, bila dua jenis unsur ini membentuk ikatan, jumlah elektron masih kurang untuk membentuk ikatan keseimbangan kimia dan tidak dapat membentuk ikatan ionik atau ikatan kovalen. Dalam keadaan padat, unsur logam membentuk jenis ikatan yang lain sekali, yang menjadi ciri khas logam. Elektron pada kulit terluar suatu logam bergerak sebagai awan melalui ruang antar inti yang bermuatan positif bersama kulit elektron lainnya, lihat Gambar 1.2c.

Inti beserta kulit elektron di bagian dalam dianggap sebagai bola keras yang tersusun padat dengan pola teratur, membentuk apa yang disebut *susunan kristal*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.2.c. Susunan ion positif terikat menjadi satu oleh awan elektron bermuatan negatif membentuk ikatan khas yang disebut ikatan *logam*. Oleh karena ion tidak memiliki kecenderungan khusus untuk menempati lokasi tertentu, ion dapat bergerak dalam kisi kristal tanpa mengganggu keteraturan pola. Selain itu, awan elektron dapat digerakkan ke arah tertentu oleh potensial listrik, dan menghasilkan *arus listrik*. Konduktivitas

listrik merupakan karakteristik khas logam. Pada kristal dengan ikatan ion atau ikatan kovalen, elektron terikat dan tidak bebas bergerak. Hanya bila potensial cukup tinggi (potensial tembus), elektron dapat ditarik lepas.

2.1.4 Ikatan dan Pengaruh Gaya Luar

Di samping kemampuan gerak elektron pada ikatan logam, perbedaan besar lain antara ikatan logam dan ikatan lainnya terletak pada perilakunya bila dipengaruhi oleh gaya luar. Gaya kecil tak seberapa pengaruhnya terhadap ketiga jenis ikatan tersebut. Regangan atau perpanjangan yang terjadi lenyap bila gaya ditiadakan. Sifat ini disebut *perpanjangan elastik* atau *kompresi elastik*. Bila gaya cukup besar, pada ikatan logam dapat terjadi pergelinciran ion logam membentuk pola sejenis yang tetap bertahan meski gaya ditiadakan. Ini dimungkinkan karena semua ion memiliki sifat yang sama dan elektron tidak terikat pada atom tertentu. Sebaliknya, atom dengan ikatan ion menentang gerak luncuran tersebut karena antara ion dan elektron terdapat ikatan kuat. Oleh karena itu, bahan dengan ikatan ion cenderung rapuh.

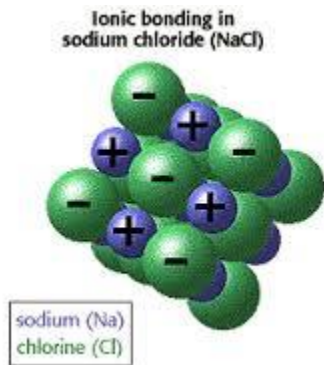
Karena adanya kemampuan inti untuk saling meluncur, kristal dengan ikatan logam dapat dibentuk secara mekanik dan ikatan antar atomnya tetap kuat. Sifat ini disebut *keuletan (ductility)* atau kenyal bentuk dan merupakan karakteristik keadaan logam.

Apa pun bentuk ikatannya, bahan umumnya membentuk susunan tiga dimensi (atau struktur kristal) yang teratur dalam ruang. Ada empat belas jenis struktur, tetapi hanya empat yang biasanya ditemukan pada logam yang digunakan dalam penerapan keteknikan. Sel tunggal sederhana mewakili jumlah atom yang tak terhingga dalam susunan tiga dimensi kristal utuh.

2.2 Struktur Mikro Logam

Semua logam, sebagian besar keramik dan beberapa polimer membentuk kristal ketika bahan tersebut membeku. Dengan

ini dimaksudkan bahwa atom-atom mengatur diri secara teratur dan berulang dalam pola 3 dimensi. Struktur semacam ini disebut *kristal* (Gambar 2.3).



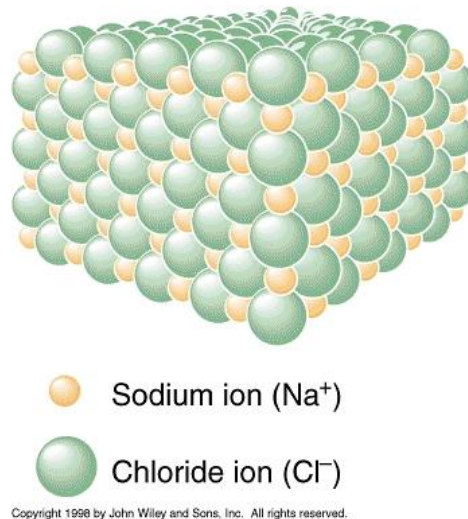
Gambar 2-3. Struktur kristal tunggal

Pola teratur dalam jangkauan panjang yang menyangkut puluhan jarak atom dihasilkan oleh koordinasi atom dalam bahan. Disamping itu pola ini kadang-kadang menentukan pula bentuk luar dari kristal, contoh yang dapat dikemukakan adalah bentuk bintang enam bunga salju. Permukaan datar batu batuan mulia, kristal kwarsa (SiO_2) bahan garam meja biasa (NaCl) merupakan penampilan luar dari pengaturan di dalam kristal itu sendiri. Dalam setiap contoh yang dikemukakan tadi, pengaturan atom di dalam kristal tetap ada meskipun bentuk permukaan luarnya diubah. Struktur dalam kristal kwarsa tidak berubah meskipun permukaan luar tergesek sehingga membentuk butiran pasir pantai yang bulat-bulat. Hal yang sama kita jumpai pada pengaturan heksagonal molekul air dalam es atau bunga salju.

Tata jangkauan panjang yang merupakan karakteristik kristal dapat dilihat pada Gambar 2.4. Model ini memperlihatkan beberapa pola atom kisi yang dapat terjadi bila terdapat satu jenis atom. Karena pola atom ini berulang secara tak terhingga, untuk mudahnya kisi kristal ini dibagi dalam *sel satuan*. Sel satuan ini yang mempunyai volum terbatas, masing-masing memiliki ciri yang sama, dengan kristal secara keseluruhan.

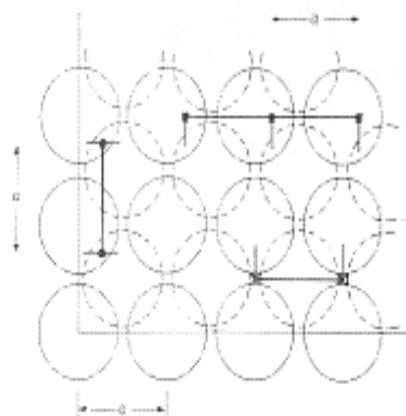
Jarak yang selalu terulang, yang disebut *konstanta kisi*, dalam pola jangkauan panjang kristal. menentukan ukuran sel satuan. jadi dimensi yang berulang atau a , (lihat

Gambar 2.4.) juga merupakan dimensi sisi sel satuan. Karena pola kristal Gambar 2.4 identik dalam ketiga arah tegak lurus, sel satuan ini berbentuk kubik dan a adalah konstanta kisi dalam ketiga arah koordinat. Dalam kristal bukan kubik, konstanta kisi berbeda dalam ketiga arah koordinat.



Gambar 2-4. unit sell

Titik sudut sel satuan dapat ditempatkan *dimana saja* dalam suatu kristal. jadi, sudut tersebut dapat berada dipusat atom, tempat lain dalam atom-atom atau diantara atom-atom, seperti titik pada Gambar 2.5. Dimanapun ia berada, volum yang kecil tadi dapat diduplikasikan dengan volum yang identik disebelahnya (asalkan sel tadi memiliki orientasi yang sama dengan pola kristal) Setiap sel mempunyai ciri-ciri geometrik, yang sama dengan kristal keseluruhan.

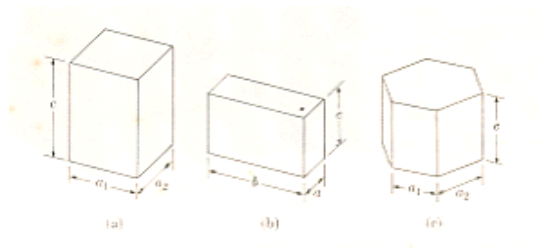


Gambar 2-5. Konstanta kisi

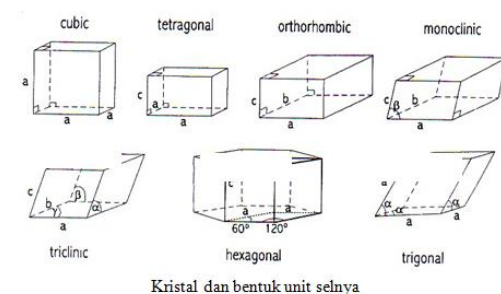
Kristal kubik memiliki pola yang sama sepanjang ketiga sumbu tegak lurus: $a_1 = a_2$

= a_3 . Kebanyakan logam dan beberapa jenis keramik berbentuk kubik.

Kristal bukan kubik terjadi bila pola ulangnya tidak sama dalam ketiga arah koordinatnya atau sudut antara ketiga *sumbu kristal* tidak sama dengan 90° . Ada tujuh *sistem kristal*, dengan karakteristik geometriaknya seperti tercantum dalam Tabel 1.1. Dalam pelajaran pengantar dasar ilmu logam ini perhatian kita tertuju pada bentuk kristal kubik yang lebih sederhana. Akan tetapi disamping itu kita perlu mengenal juga sistem heksagonal. Disamping itu, kristal tetragonal dan ortorombik dengan karakteristik sel satuan seperti Gambar. 1.6



Gambar 2-6. Kristal bukan kubik



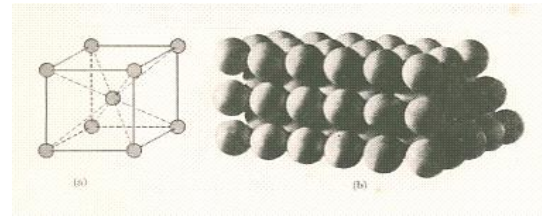
Gambar 2-7. Sistem kristal

Kristal kubik terdiri dari tiga bentuk kisi, *kubik sederhana*, *kubik pemusatan ruang* dan *kubik pemusatan sisi*. Suatu kisi adalah Pola yang berulang dalam tiga dimensi yang terbentuk dalam kristal. Sebagian besar logam memiliki kisi kubik pemusatan ruang (kpr) atau kisi kubik pemusatan sisi (kps).

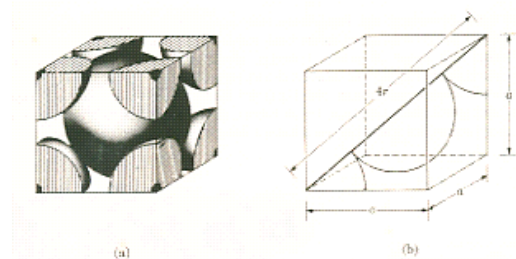
2.2.1 Kubik pemusatan ruang.

Besi mempunyai struktur kubik. Pada suhu ruang sel satuan besi mempunyai atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom pada Pusat kubus (Gambar 1.7.) Besi merupakan logam yang paling umum

dengan struktur kubik pemusatan ruang, tetapi bukan satu-satunya. Krom, tungsten dan unsur lain juga memiliki susunan kubik pemusatan ruang.



Gambar 2-1. Struktur Kubik pemusatan ruang



Gambar 2-8. Struktur Kubik pemusatan ruang

Tiap atom besi dalam struktur kubik pemusatan ruang (kpr) ini dikelilingi oleh delapan atom tetangga; hal ini berlaku untuk setiap atom, baik yang terletak pada titik sudut maupun atom dipusat sel satuan.

Oleh karena itu setiap atom mempunyai lingkungan geometrik yang sama (Gambar 1.7). Sel satuan logam kpr mempunyai dua atom. Satu atom dipusat kubus dan delapan seperdelapan atom pada delapan titik sudutnya (Gambar 1.8).

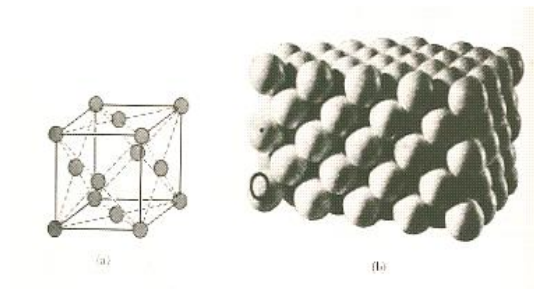
Kita dapat menerapkan konsep *tumpukan atom* (F.T) pada logam kpr, dengan menggunakan model bola keras maka fraksi volum dari sel satuan yang ditempati oleh bola-bola tersebut.

2.2.2 Kubik pemusatan sisi.

Pengaturan atom dalam tembaga (Gambar 1.9) tidak sama dengan pengaturan atom dalam besi, meski keduanya kubik. Disamping atom pada setiap titik sudut sel satuan tembaga, terdapat sebuah atom

ditengah setiap bidang permukaan, namun tak satupun dititik pusat kubus.

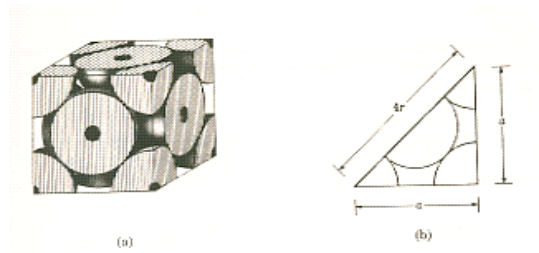
Struktur kubik pemusatan sisi (kps) ini lebih sering dijumpai pada logam, antara lain, aluminium, tembaga, timah hitam, perak dan nikel mempunyai pengaturan atom seperti ini (demikian pula halnya dengan besi pada suhu tinggi).



Gambar 2-9. Struktur Kubik pemusatan sisi

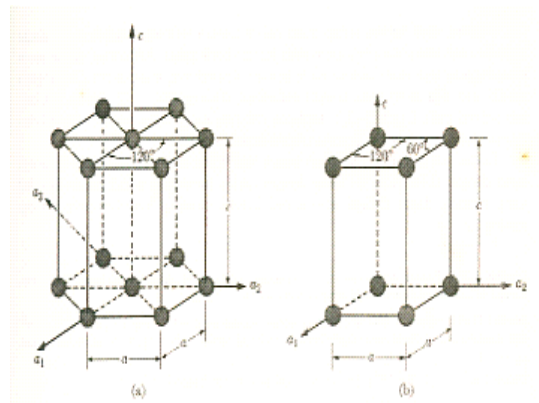
Logam dengan struktur kps mempunyai empat kali lebih banyak atom. Kedelapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam bidang sisi menghasilkan 3 atom per sel satuan. (Gambar 1.9).

Faktor tumpukan untuk logam kps adalah 0.74, yang ternyata lebih besar dari nilai 0.68 untuk logam kpr. Hal ini memang wajar oleh karena setiap atom dalam logam kpr dikelilingi oleh delapan atom . Sedang setiap atom dalam logam kps mempunyai dua belas tetangga. Hal ini dibuktikan dalam Gambar 1.9, dimana kita lihat bahwa atom pada sisi depan mempunyai empat tetangga, empat tetangga yang bersinggungan dengannya dibagian belakang dan empat lagi yang serupa dibagian depannya.

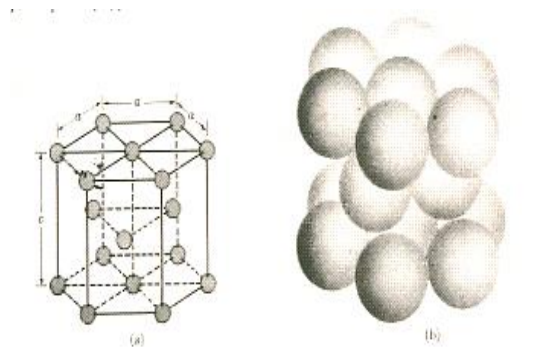


Gambar 2-10. Struktur Kubik pemusatan sisi

2.2.3 Kristal Heksagonal.



Gambar 2-11. Sel satuan heksagonal sederhana



Gambar 2-12. Struktur heksagonal tumpukan padat

3 CACAT KRISTAL LOGAM

3.1 Cacat Kristal

Diperlukan berjuta-juta atom untuk membentuk satu kristal. Oleh karena itu, tidak mengherankan bila terdapat cacat atau ketidakaturan dalam tubuh kristal. Cacat cacat inilah yang ikut menentukan sifat bahan secara keseluruhan.

3.1.1 Ketidakmurnian dalam Bahan Padat

Ada kalanya karena faktor harga, ketersediaan atau sifat-sifat tertentu, diperlukan adanya ketidakmurnian. Sebagai contoh, perak sterling, yang mengandung tembaga 7.5% dan perak 92.5%. Bahan ini memang unggul, dapat saja dimurnikan menjadi perak dengan kadar 99% lebih. Harganya akan lebih mahal, sedang kualitas lebih rendah. Tanpa merubah rupa, campuran tembaga 7.5% akan membuat perak itu lebih kuat, keras dan awet dengan harga yang lebih murah.

Dengan sendirinya sifat-sifat itu harus sesuai dengan rancangan kita sendiri. Seng yang dicampurkan pada tembaga menghasilkan kuningan yang lebih murah daripada tembaga murni. Kuningan lebih keras, kuat dan ulet dibandingkan tembaga. Sebaliknya, kuningan mempunyai konduktivitas listrik yang lebih rendah dari pada tembaga, sehingga kita tetap menggunakan tembaga murni untuk penghantar listrik dan penggunaan sejenis lainnya dimana konduktivitas listrik diutamakan.

Paduan adalah kombinasi dari dua/lebih jenis logam. Kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin (besi kpr dan Fe₃C dalam baja konstruksi), atau paduan dapat merupakan larutan padat, dan sebagai contoh akan dibahas kuningan. Meskipun istilah paduan digunakan secara umum, kombinasi dari dua atau lebih komponen oksida dapat digunakan dalam produk keramik (contoh: isolator busi, badan pesawat tilpon terdiri dari kombinasi beberapa jenis molekul).

3.2 Larutan Padat dalam Logam

Larutan padat mudah terbentuk bila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan struktur elektron yang serupa. Sebagai contoh dapat diambil logam dalam kuningan, tembaga dan seng yang masing-masing mempunyai jari-jari atom 0.1278 nm dan 0.139 nm. Keduanya mempunyai 28 elektron subvalensi dan membentuk struktur kristal dengan bilangan koordinasi 12. jadi, bila seng ditambahkan pada tembaga, maka dengan mudah seng dapat menggantikan kedudukan tembaga dalam kisi kps, sampai maksimal menggantikan 40% dari atom tembaga. Dalam larutan padat tembaga dan seng ini, distribusi seng terjadi secara acak (Gambar 3.1).

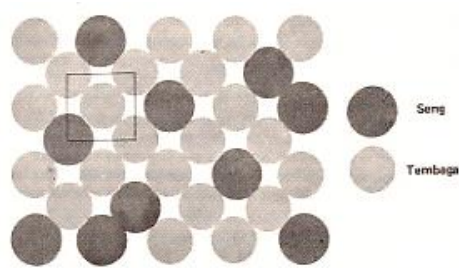
Tujuan dan Sasaran

Tujuan dari bagian ini adalah untuk mengilustrasikan bagaimana cacat terjadi material teknik beserta pengaruhnya terhadap kinerja material. Sasarannya adalah untuk:

1. Memahami cacat kristal pada logam
2. Memahami larutan padat
3. Memahami ketidaksempurnaan pada logam
4. Memahami batas butir.

3.2.1 Larutan padat substitusi

Larutan padat yang telah diuraikan diatas disebut *larutan padat substitusi* oleh karena atom seng menggantikan atom tembaga dalam struktur kristal. Larutan padat seperti ini sering dijumpai dalam berbagai sistem logam. Contoh lain larutan tembaga dan nikel yang membentuk monel. Pada *monel*, nikel dapat menggantikan atom tembaga dalam struktur tembaga semula dalam perbandingan jumlah manapun. Larutan padat tembaga-nikel berkisar dari 0% nikel dan 100% tembaga sampai 100% nikel dan 0% tembaga. Semua paduan tembaga-nikel berstruktur kubik pemusatan sisi.



Gambar 3-1. Larutan padat substitusi acak

Sebaliknya, timah putih secara terbatas sekali menggantikan tembaga, membentuk perunggu, dan tetap mempertahankan struktur mula tembaga yaitu kubik pemusatan sisi. Timah putih melebihi daya larut padat maksimal akan membentuk fasa lain.

Untuk dapat menggantikan atom lainnya dengan jumlah yang cukup banyak dan membentuk larutan padat substitusi, ukuran dari atom harus sama atau hampir sama. Nikel dan tembaga mempunyai jangkau larut yang besar karena keduanya mempunyai struktur kps dan jari-jari atomnya masing-masing 0.1246 nm dan 0.1278 nm. Dengan meningkatnya perbedaan ukuran, menurunlah kemampuan substitusinya. Hanya 20% atom tembaga dapat digantikan oleh aluminium karena jari-jari aluminium adalah 0.1431 nm, sedang jari-jari tembaga hanya 0.1278 nm.

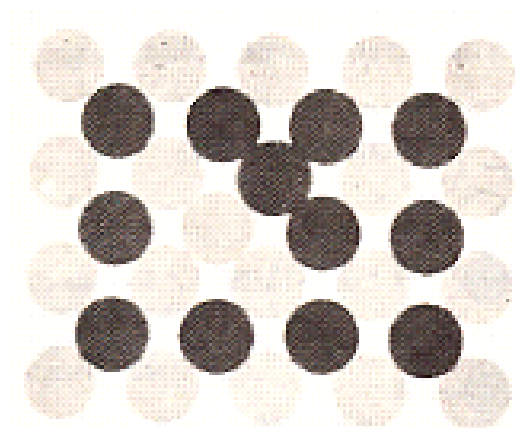
Pelarutan padat menjadi terbatas bila terdapat selisih ukuran jari-jari atom

melebihi 15%. Pelarutan akan lebih terbatas lagi-bila kedua komponennya mempunyai struktur kristal yang berbeda atau valensi yang berlainan. Faktor pembatasan adalah jumlah atom substitusi dan bukannya berat atom substitusi. Umumnya, ahli teknik menyatakan komposisi dalam persentase berat. Oleh karena itu perlu kita membiasakan diri merubah persentase berat menjadi persentase atom dan sebaliknya.

3.2.2 Larutan padat tertata

Gambar 3.1 memperlihatkan suatu substitusi acak atom dalam struktur kristal lain. Pada larutan demikian, kemungkinan bahwa suatu unsur akan menempati kedudukan atom tertentu dalam kristal sebanding dengan persentase atom unsur tersebut dalam paduan tadi. Dalam keadaan demikian, dikatakan bahwa tidak ada tata substitusi kedua elemen tadi.

Akan tetapi sering dijumpai penataan kedua jenis atom sehingga membentuk pengaturan khusus. Gambar 3.2. memperlihatkan struktur tertata dimana kebanyakan "atom hitam" dikelilingi oleh atom kelabu" Penataan seperti ini jarang terjadi pada suhu yang lebih tinggi oleh karena agitasi termal yang lebih besar cenderung mengacaukan susunan yang tertata.

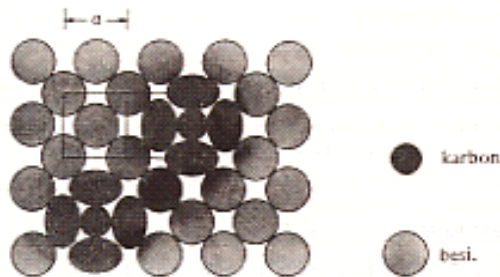


Gambar 3-2. Larutan padat substitusi tertata

3.2.3 Larutan padat interstisi

Jenis larutan padat lainnya, digambarkan pada Gambar 3.3., disisi atom yang kecil

dikelilingi oleh atom-atom yang lebih besar. Contoh: karbon dalam besi. Pada suhu dibawah 912°C , besi murni mempunyai struktur kubik pemusatan ruang. Diatas 912°C , terdapat daerah temperatur tertentu dimana besi mempunyai struktur kubik pemusatan sisi. Pada kisi kubik pemusatan sisi terdapat ruang sisipan atau "lubang" yang agak besar pada pusat sel satuan. Karbon, sebagai atom yang sangat kecil, dapat menduduki lubang tersebut dan membentuk larutan padat besi dan karbon. Pada suhu yang lebih rendah, dimana besi mempunyai struktur kubik pemusatan ruang, ruang sisipan antara atom-atom besi jauh lebih kecil. Akibatnya, daya larut karbon dalam besi kubik pemusatan ruang sangat terbatas.



Gambar 3-3. Larutan padat interstisi

3.2.4 Larutan padat dalam senyawa

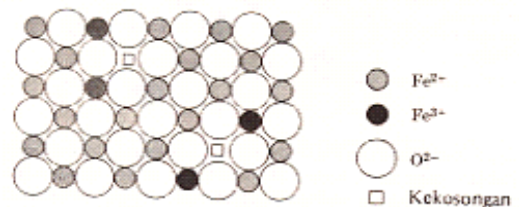
Larutan padat substitusi terdapat dalam fasa ionik maupun logam. Dalam fasa ionik sama halnya dengan logam padat, ukuran atom atau ion merupakan faktor yang penting. Gambar 2.4. adalah contoh larutan padat ionik. Strukturnya ialah MgO dimana ion Mg^{2+} digantikan oleh ion Fe^{2+} . Karena jari-jari kedua ion tersebut masing-masing 0.066 nm dan 0.074 nm , substitusi sempurna mungkin terjadi. Sebaliknya, ion Ca^{2+} tidak dapat digantikan begitu saja oleh ion Mg^{2+} karena jari-jarinya lebih besar yaitu 0.099 nm .

Persyaratan tambahan yang berlaku lebih ketat untuk larutan padat senyawa keramik daripada larutan padat logam, dengan syarat bahwa muatan valensi ion yang digantikan harus sama dengan muatan valensi ion baru.



Gambar 3-4. Larutan padat substitusi dalam senyawa

Sangat sulit untuk menggantikan Mg^{2+} dalam MgO dengan Li^+ , meskipun keduanya mempunyai jari-jari yang sama karena akan terdapat selisih muatan (kekurangan). Substitusi semacam ini hanya mungkin terjadi bila diiringi perubahan lain yang dapat meniadakan selisih muatan.



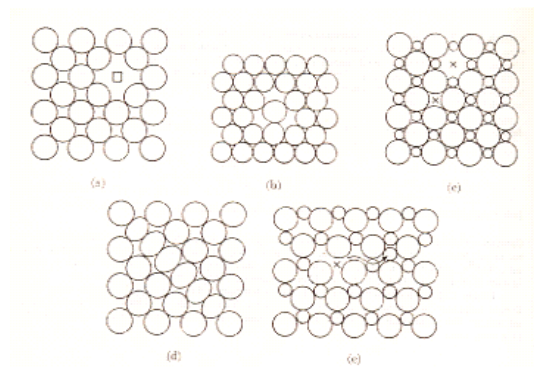
Gambar 3-5. Struktur Cacat

3.3 Ketidaksempurnaan dalam Kristal

Telah kita kenal, jenis ketidaksempurnaan dalam kristal, dimana diperlukan kekosongan untuk mengimbangi kepincangan muatan. Bila ketidaksempurnaan seperti kekosongan meliputi sebuah atau beberapa atom kita sebut: *cacat titik*. Ketidaksempurnaan lain dalam kristal berujud garis; oleh karena itu disebut *cacat garis*. Cacat jenis ini penting pada waktu kristal mengalami deformasi plastik oleh gaya geser. Sejumlah kecil cacat dapat menyebabkan kristal logam menjadi 1000 kali lebih ulet dibandingkan dengan keadaan tanpa cacat. Bila banyak sekali jumlahnya, cacat garis ini dapat meningkatkan kekuatan logam. Akhirnya, cacat lainnya berbentuk dua dimensi dan mencakup *permukaan luar* atau *batas-batas intern*.

3.3.1 Cacat Titik.

Cacat titik yang paling sederhana adalah *kekosongan*, disini ada atom yang "hilang" dalam kristal (Gambar 2.6.). Cacat demikian merupakan hasil dari penumpukkan yang salah sewaktu kristalisasi, atau dapat juga terjadi pada suhu tinggi, oleh karena meningkat energi termal. Bila enersi termal tinggi memungkinkan bagi atom-atom untuk melompat meninggalkan tempatnya (dimana energi terendah) akan naik pula.



Gambar 3-6. Cacat titik

1. kekosongan
2. Kekosongan ganda (dua atom hilang)
3. kekosongan pasangan ion (cacat Schottky)
4. sisipan
5. ion terpisah (cacat Frenkel).

Kekosongan pasangan Ion (disebut juga cacat Schottky) terdapat dalam senyawa yang harus mempunyai keseimbangan muatan, Cacat ini mencakup kekosongan pasangan ion dengan muatan berlawanan. Kekosongan pasangan ion dan kekosongan tunggal mempercepat difusi atom. Suatu atom tambahan dapat berada dalam struktur kristal, khususnya bila faktor tumpukan atom rendah. Cacat semacam ini disebut *sisipan*, mengakibatkan distorsi atom. *Perpindahan Ion* dari kisi ke tempat sisipan disebut cacat Frenkel. Struktur tumpukan padat lebih sedikit sisipan dan ion pindahannya dari pada kekosongan, karena diperlukan energi tambahan untuk menyisipkan atom.

3.3.2 Cacat Garis (Dislokasi)

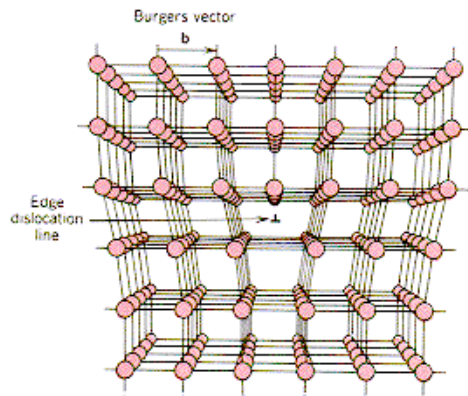
Cacat garis yang paling banyak dijumpai didalam kristal adalah dislokasi. *Dislokasi garis* dapat dilihat pada Gambar 2.7. Dislokasi ini dapat digambarkan sebagai sisipan satu bidang atom tambahan dalam struktur kristal. Disekitar dislokasi garis terdapat daerah yang mengalami tekanan dan tegangan, sehingga terdapat energi tambahan sepanjang dislokasi tersebut. Jarak geser atom disekitar dislokasi disebut vektor geser (b^*). Vektor ini tegak lurus pada garis dislokasi.

Dislokasi ulir menyerupai spiral dengan garis cacat sepanjang sumbu ulir. Vektor gesernya sejajar dengan garis cacat. Atom-atom disekitar dislokasi ulir mengalami gaya geser, oleh karena itu terdapat energi tambahan disekitar dislokasi tersebut.

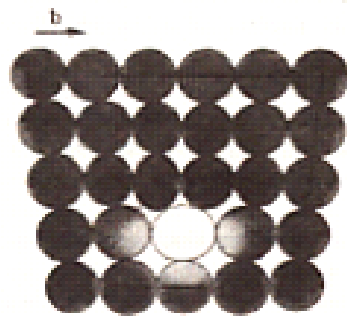
Kedua jenis dislokasi garis terjadi karena ada ketimpangan dalam orientasi bagian-bagian yang berdekatan dalam kristal yang tumbuh sehingga ada suatu deretan atom tambahan ataupun deretan yang kurang.

Seperti terlihat pada Gambar 2.7, dislokasi ulir memudahkan pertumbuhan kristal karena atom dan sel satuan tambahan dapat tertumpuk pada setiap anak tangga ulir. Istilah ulir sangat tepat karena anak tangga melingkari sumbu pada proses pertumbuhan.

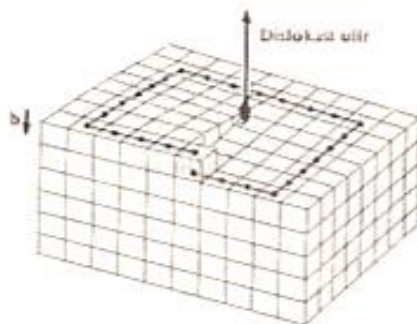
Dislokasi mudah terjadi sewaktu deformasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.8. dimana suatu pergeseran mengakibatkan terjadinya dislokasi garis dan dislokasi ulir. Keduanya menghasilkan deformasi akhir yang sama dan sebetulnya dihubungkan satu dengan lainnya oleh garis dislokasi yang terjadi.



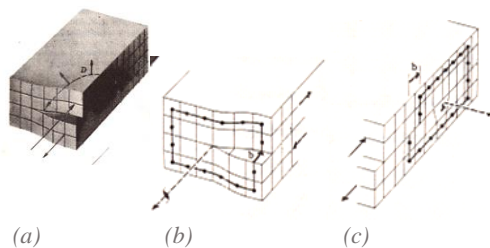
Gambar 3-7. Dislokasi garis \perp . Terjadi cacat linier pada sisi bidang atom tambahan. (Guy and Hren, elemen of physical metalurgi)



Gambar 3-8. Energi Dislokasi. atom yang berdekatan dengan dislokasi mengalami tekanan (gelap) dan tegangan (putih)



Gambar 3-9. Dislokasi Ulir (tampak sel-sel satuan) vektor geser b sejajar dengan cacat garis



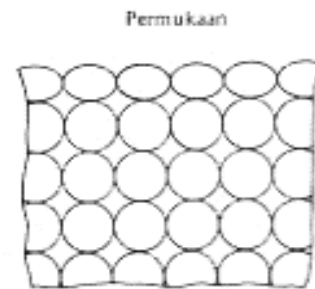
Gambar 3-10. Pembentukan Dislokasi akibat geseran (a) Garis dislokasi, D , akan bergerak melalui kristal sampai pergeseran selesai (b) cacat yang terjadi adalah dislokasi ulir, dengan garis cacat sejajar arah pergeseran (c) cacat linier yang terbentuk disebut dislokasi

3.3.3 Cacat Permukaan.

Ketidaksempurnaan kristal dalam dua dimensi merupakan suatu batas. Batas yang paling nyata adalah *permukaan luar*. Permukaan dapat dilukiskan sebagai akhir atau batas struktur kristal, kita dapat memahami kenyataan bahwa koordinasi atom pada permukaan tidak sama dengan koordinasi atom dalam kristal. Atom permukaan hanya mempunyai tetangga pada satu sisi saja, oleh karena itu memiliki energi yang lebih tinggi dan ikatannya kurang kuat.

3.4 Batas butir.

Meskipun bahan seperti tembaga dalam kawat listrik terdiri dari satu fasa saja, yaitu satu struktur (kps), benda tersebut terdiri dari banyak sekali kristal dengan orientasi yang berbeda. Kristal-kristal ini **disebut butir**. Bentuk butir dalam bahan padat biasanya diatur oleh adanya butir-butir lain disekitarnya. Dalam setiap butir, semua sel satuan teratur dalam satu arah dan satu pola tertentu. Pada *batas butir*, antara dua butir yang berdekatan terdapat daerah transisi yang tidak searah dengan pola dalam kedua butiran tadi.



Gambar 3-11. Atom Permukaan

Meskipun kita tidak dapat melihat atom-atom itu satu-persatu, dengan mudah kita dapat melihat batas butir dibawah mikroskop. Untuk ini logam perlu *dietsa*. Mula-mula logam dipolis sampai terbentuk permukaan yang halus seperti cermin kemudian diberi zat Kimia tertentu selama beberapa detik. Atom-atom didaerah transisi diantara butiran akan lebih mudah larut dibandingkan atom-atom lainnya dan akan meninggalkan garis yang tampak oleh mikroskop. Batas butir yang dietsa tidak

lagi merupakan permukaan yang halus sebagai bagian lainnya dari butir.

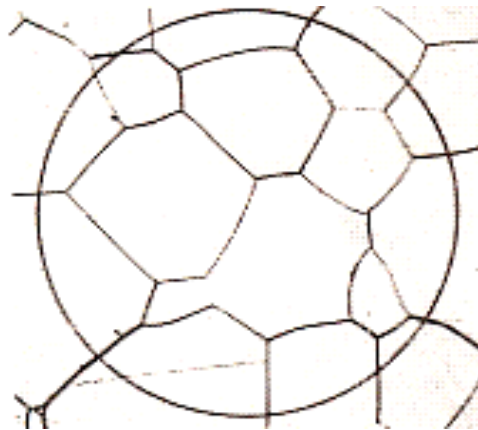
Batas butir dapat kita anggap berdimensi dua, bentuknya mungkin melengkung dan sesungguhnya memiliki ketebalan tertentu yaitu 2 sampai 3 jarak atom. Ketidakseragaman orientasi antara butiran yang berdekatan menghasilkan tumpukan atom yang kurang efisien sepanjang batas. Oleh karena itu atom sepanjang batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terdapat dalam butir.

Hal ini yang menyebabkan mengapa daerah perbatasan lebih mudah terkikis. Energi atom batas butir yang lebih tinggi juga penting bagi proses nukleasi selama perubahan fasa polimorfi. Tumpukan atom yang lebih sedikit, pada batas butir memperlancar difusi atom, dan ketidakseragaman orientasi pada butir yang berdekatan mempengaruhi kecepatan gerak dislokasi, jadi batas butir merubah regangan plastik dalam bahan

3.4.1 Daerah batas butir dan besar butir.

Karena batas butir berpengaruh atas bahan dalam berbagai hal, perlu diketahui besar

daerah batas butir per satuan volum (S_v). Besarnya dapat dihitung dengan mudah dengan menarik suatu garis pada gambar struktur mikro. Garis ini akan memotong lebih banyak batas butir pada bahan *berbutir halus* dibandingkan dengan bahan *berbutir kasar*. Hubungannya adalah $S_v = 2 P_L$, dimana P_L merupakan jumlah titik potong antara garis dengan panjang satuan dan batas butir. Hubungan tersebut diatas tidak akan dibuktikan disini, akan tetapi kebenarannya dapat dilihat pada Gambar 1.22.

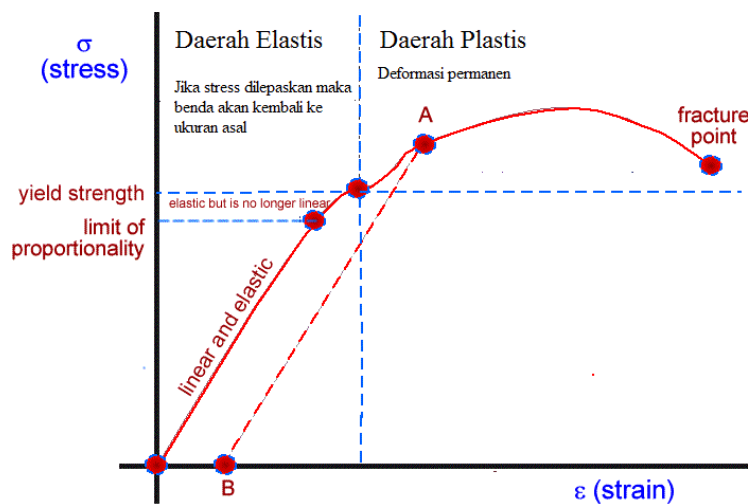


Gambar 3-12. Menghitung butir

4 DEFORMASI DAN REKRISTALISASI

4.1 Deformasi Elastis dan Deformasi Plastis

Pengertian: Deformasi atau perubahan bentuk dapat dipisahkan menjadi dua, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis adalah perubahan bentuk yang bersifat sementara. Perubahan akan hilang bila gaya dihilangkan. Dengan kata lain bila beban ditiadakan, maka benda akan kembali ke bentuk dan ukuran semula. Di lain pihak, deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang bersifat permanen, meskipun beban dihilangkan.



Gambar 4-1. Kurva tegangan regangan suatu material

Bila suatu material dibebani sampai daerah plastis, maka perubahan bentuk yang saat itu terjadi adalah gabungan antara deformasi elastis dan deformasi plastis (penjumlahan ini sering disebut deformasi total). Bila beban ditiadakan, maka deformasi elastis akan hilang pula, sehingga perubahan bentuk yang ada hanyalah deformasi plastis saja.

4.1.1 Deformasi Elastik

Deformasi elastik terjadi bila sepotong logam atau bahan padat dibebani gaya. Bila beban berupa gaya tarik, benda akan bertambah panjang; setelah gaya ditiadakan, benda akan kembali ke bentuk semula. Sebaliknya, beban berupa gaya tekan akan mengakibatkan benda menjadi pendek sedikit. Regangan elastik adalah hasil dari perpanjangan sel satuan dalam arah tegangan tarik, atau kontraksi dari sel satuan dalam arah tekanan.

Tujuan dan Sasaran

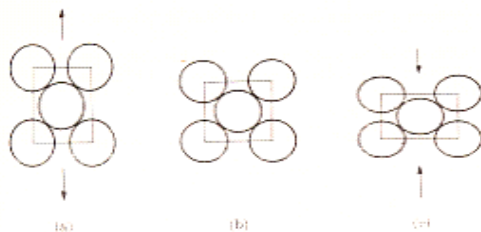
Tujuan dari bab ini mempelajari deformasi dan rekristalisasi yang dapat dialami oleh logam

Secara khusus topik yang ditawarkan adalah:

1. Deformasi pada material
2. Rekristalisasi pada material.

Bila hanya ada deformasi elastis, regangan akan sebanding dengan tegangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan disebut **modulus elastisitas** (modulus Young), dan merupakan karakteristik suatu logam tertentu. Makin besar gaya tarik menarik antar atom logam, makin tinggi pula modulus elastisitasnya.

Setiap perpanjangan atau perpendekan struktur kristal dalam satu arah tertentu, karena gaya searah, akan menghasilkan perubahan dimensi dalam arah tegak lurus dengan gaya tadi.



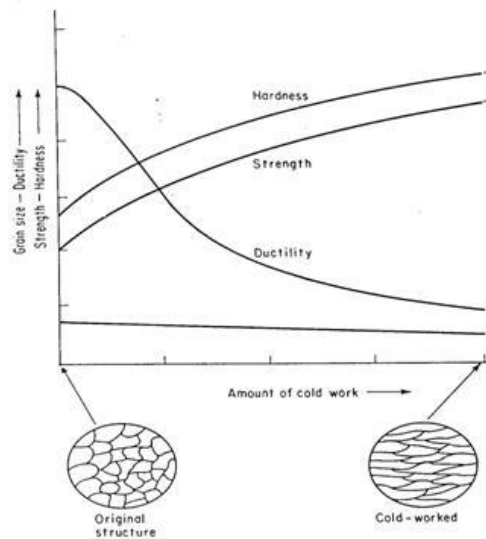
Gambar 4-2. Perubahan dimensi sesuai arah tegangan (a) kristal mengalami gaya tarik (b) kristal pada posisi normal (c) kristal pada keadaan tertekan

4.1.2 Deformasi Plastik

Pada deformasi plastik terjadi bila sepotong logam atau bahan padat dibebani gaya. Logam akan mengalami perubahan bentuk, dan setelah gaya diiadakan, terjadi perubahan bentuk permanen. Hal ini terjadi akibat sliding antar bidang atom, dan atau ikatan atom-atomnya pecah

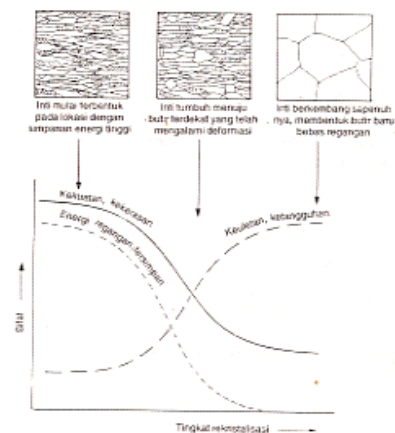
4.2 Rekristalisasi

Energi yang terhimpun dalam struktur pengerjaan dingin menjadikan logam tidak stabil. Bila dipanaskan hingga suhu yang menyebabkan difusi berlangsung dengan cepat, rangkaian dislokasi terlepas dan terbentuk batas butir baru. Logam menjadi lunak dan dikatakan bahwa logam telah dianil. Inti untuk butir baru terdapat di lokasi di dalam butir kristal yang rusak. Daerah tersebut kemudian tumbuh, sehingga terjadi kristal baru bebas regangan. Proses disebut **rekristalisasi**. Makin besar jumlah energi yang tersimpan dengan perkataan lain, pengerjaan dingin logam lebih besar semakin besar jumlah lokasi inti makin halus butir akhir.



Gambar 4-3. Perbedaan butir pada beberapa pengerjaan logam

Seperti telah diperlihatkan pada Gambar 4.3., sifat bahan yang dianil berubah menjadi sifat keadaan bebas regangan, meskipun kekuatan dan keuletan meningkat (dibandingkan dengan benda coran). Sesungguhnya, proses rekristalisasi tidak semudah itu. Terdapat tahap antara yang tidak dapat diamati dengan mikroskop optik. Pada tahap ini rangkaian dislokasi membentuk batas butir bersudut kecil, dan disebut tahap pemulihan. Meskipun sifat mekanik hampir tak berubah, tetapi terjadi pengaturan kembali struktur pada skala atom, mendahului perubahan struktur mikro di atas.



Gambar 4-4. Perubahan struktur mikro dan sifat mekanik logam terdeformasi selama proses rekristalisasi

Temperatur rekristalisasi biasanya sekitar $0.4-0.6 T_m$. Proses rekristalisasi bergantung pada waktu dan temperatur, biasanya dipilih suhu sekitar $0.6 T_m$ agar proses berlangsung lebih cepat. Pengerjaan mekanik mempunyai efek yang sangat berbeda bila dilakukan di atas atau di bawah daerah rekristalisasi. Bila di bawah suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan terdistorsi, mengandung energi, dan disebut struktur pengerjaan dingin.

Bila deformasi dilakukan di atas suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan lebih lunak, mempunyai sifat mekanik yang sama dengan logam awal, dan disebut struktur pengerjaan panas. Perlu dicatat bahwa istilah "panas" atau "dingin" berkaitan suhu kerja yang dihubungkan dengan $0.6 T_m$ atau suhu rekristalisasi.

Sebagai contoh untuk timbal (Pb) pengerjaan pada suhu ruang termasuk pengerjaan panas, sedang untuk tungsten (W) 1000°C masih merupakan pengerjaan dingin.

Rekristalisasi logam pengerjaan dingin belum tentu menghasilkan produk akhir yang stabil. Bila logam dipanaskan terus setelah proses rekristalisasi berakhir, butir yang besar akan "memakan" butir yang kecil sehingga batas butir keseluruhan sistem berkurang. Dengan pengerjaan dingin sebesar 2-5 % diperoleh beberapa daerah berenergi regangan tinggi, yang kemudian menjadi inti. Setelah proses anil pada $0.8 T_m$ tumbuh butir berdiameter beberapa cm. Meskipun percobaan ini bermanfaat untuk memperlihatkan jalannya proses rekristalisasi, secara teknis kurang bermanfaat. Tujuan anil adalah untuk menuntaskan proses rekristalisasi. Pertumbuhan butir ditekan untuk mencapai kekuatan optimal, keuletan juga meningkat bila butir tetap halus.

