



INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

LKD SEMESTER GENAP 2024-2025

Rudi Saputra

NIDN: 0312106701

ISILAMPIRAN

MATA KULIAH : STRUKTUR DAN SIFAT MATERIAL A

1. Surat Penugasan
2. Jurnal Perkuliahan
3. Barita Acara
4. Nilai Akhir

JAKARTA

AGUSTUS 2025

II. KEGIATAN BELAJAR 2

STRUKTUR KRISTAL BAHAN PADAT

A. Sub Kompetensi

Struktur kristal bahan padat dapat dijelaskan dengan benar

B. Tujuan Kegiatan Pembelajaran

Setelah pembelajaran ini mahasiswa mampu menjelaskan struktur kristal bahan teknik

C. Uraian Materi.

1. STRUKTUR ATOM

Setiap atom terdiri dari inti yang sangat kecil yang terdiri dari proton dan neutron, dan di kelilingi oleh elektron yang bergerak. Elektron dan proton mempunyai muatan listrik yang besarnya $1,60 \times 10^{-19}$ C dengan tanda negatif untuk elektron dan positif untuk proton sedangkan neutron tidak bermuatan listrik. Massa partikel-partikel subatom ini sangat kecil: proton dan neutron mempunyai massa kira-kira sama yaitu $1,67 \times 10^{-27}$ kg, dan lebih besar dari elektron yang massanya $9,11 \times 10^{-31}$ kg.

Setiap unsur kimia dibedakan oleh jumlah proton di dalam inti, atau **nomor atom (Z)**. Untuk atom yang bermuatan listrik netral atau atom yang lengkap, nomor atom adalah sama dengan jumlah elektron. Nomor atom merupakan bilangan bulat dan mempunyai jangkauan dari 1 untuk hidrogen hingga 94 untuk plutonium yang merupakan nomor atom yang paling tinggi untuk unsur yang terbentuk secara alami.

Massa atom (A) dari sebuah atom tertentu bisa dinyatakan sebagai jumlah massa proton dan neutron di dalam inti. Walaupun jumlah proton sama untuk semua atom pada sebuah unsur tertentu, namun jumlah neutron (*N*) bisa bervariasi. Karena itu atom dari sebuah unsur bisa mempunyai dua atau lebih massa atom yang disebut **isotop**. **Berat atom** berkaitan dengan berat rata-rata massa atom dari isotop yang terjadi secara alami. **Satuan massa atom (sma)** bisa digunakan untuk perhitungan berat atom. Suatu skala sudah ditentukan dimana 1 sma didefinisikan sebagai 1/12 massa atom dari isotop karbon yang paling umum, karbon 12 (^{12}C) ($A = 12,00000$). Dengan teori tersebut, massa proton dan neutron sedikit lebih besar dari satu, dan

$$A \cong Z + N$$

Berat atom dari unsur atau berat molekul dari senyawa bisa dijelaskan berdasarkan sma per atom (molekul) atau massa per mol material. Satu mol zat terdiri dari $6,023 \times 10^{23}$

atom atau molekul (bilangan Avogadro). Kedua teori berat atom ini dikaitkan dengan persamaan berikut: **1 sma/atom (molekul) = 1 g/mol**

Sebagai contoh, berat atom besi adalah 55,85 sma/atom, atau 55,85 g/mol. Kadang-kadang penggunaan sma per atom atau molekul lebih disukai; pada kesempatan lain g/mol (atau kg/mol) juga digunakan.

2. IKATAN ATOM PADA BAHAN PADAT

a. GAYA DAN ENERGI IKAT

Ketika atom didekatkan dari suatu jarak yang tak terbatas. Pada jarak jauh, interaksi bisa diabaikan, tetapi ketika atom saling mendekati, masing-masing memberikan gaya ke yang lainnya. Gaya ini ada dua macam, tarik atau tolak, dan besarnya merupakan fungsi jarak antar atom. Sumber gaya tarik F_A tergantung pada jenis ikatan yang ada antara dua atom. Besarnya berubah dengan jarak, seperti yang digambarkan secara skematis pada Gambar 2.8a. Akhirnya, kulit elektron terluar dari kedua atom mulai tumpang tindih, dan gaya tolak yang kuat F_R mulai timbul. Gaya netto F_N antar dua atom adalah jumlah kedua komponen tarik dan tolak, yaitu :

$$F_N = F_A + F_R$$

yang juga merupakan fungsi jarak antar atom sebagaimana di plot pada Gambar 2.8a. Jika F_A dan F_R sama besar, tidak ada gaya netto, sehingga:

$$F_A + F_R = 0$$

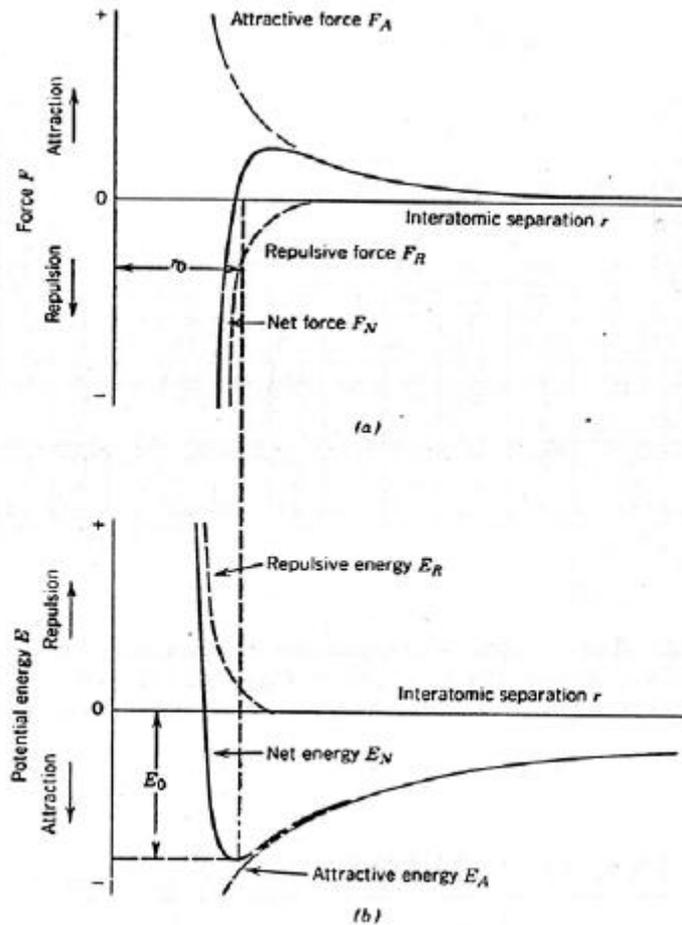
Kemudian kondisi kesetimbangan muncul. Pusat kedua atom tetap terpisah pada jarak keseimbangan r_0 seperti ditunjukkan gambar 2.8a. Pada sebagian besar atom, r_0 kira-kira 0,3 nm (3Å). Ketika sudah berada pada posisi ini, kedua atom akan melawan semua usaha untuk memisahkannya dengan gaya tarik, atau untuk mendorongnya dengan gaya tolak.

Kadang-kadang lebih menyenangkan untuk menggunakan energi potensial antara dua atom daripada gaya. Secara matematik, energi (E) dan gaya (F) dihubungkan dengan :

$$E = \int F dr$$

Atau untuk sistem atom,

$$\begin{aligned} E_N &= \int_{\infty}^r F_N dr \\ &= \int_{\infty}^r F_A dr + \int_{\infty}^r F_R dr \\ &= E_A + E_R \end{aligned}$$



Gambar 2.1. a) Gaya repulsive, attractive dan Net sebagai fungsi dari jarak atom., b) Energi repulsive, attractive dan net sebagai fungsi jarak atom.

dimana E_N , E_A dan E_R masing-masing adalah energi netto, energi tarik dan energi tolak bagi dua atom yang terisolasi dan berdekatan.

Gambar 2.1b menggambarkan energi potensial tarik, tolak dan energi potensial netto sebagai fungsi jarak antar atom untuk dua atom. Untuk kurva netto, yaitu jumlah kedua energi, mempunyai energi potensial dititik minimum. Pada posisi ini spasi kesetimbangan yang sama, r_0 , bersesuaian dengan jarak atom pada kurva energi potensial minimum.

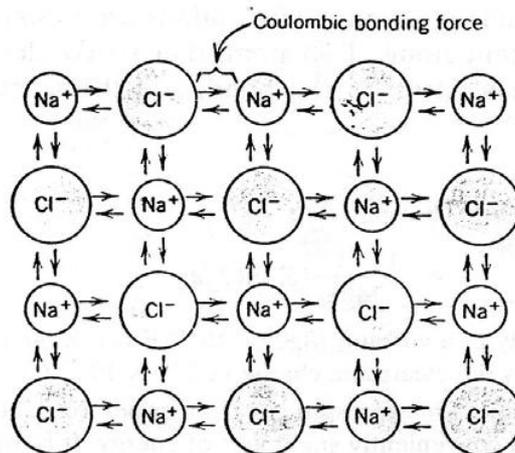
Energi Ikat untuk kedua atom ini, E_0 , bersesuaian dengan energi pada titik minimum ini (juga diperlihatkan pada gambar 2.1b), dimana menyatakan energi yang diperlukan untuk memisahkan kedua atom ini kejarak yang tak terbatas. Besar energi ikat ini dan bentuk energi vs kurva jarak antar atom berbeda dari satu material ke material lainnya, kedua variabel ini bergantung kepada jenis ikatan atom. Zat padat dibentuk dengan energi ikat yang besar, sedangkan energi ikat yang kecil lebih disukai oleh gas, kondisi cair berlaku

bagi energi yang besarnya menengah. Pada umumnya untuk material padat, temperatur leleh dan sifat ikatannya mencerminkan besarnya energi ikat.

3. IKATAN PRIMER

a. Ikatan Ion

Biasanya ditemukan pada senyawa yang dibangun oleh unsur logam dan bukan logam. Atom logam akan memberikan elektron valensinya ke atom-atom non logam. Pada proses ini semua atom akan menjadi stabil atau mempunyai konfigurasi gas mulia dan bermuatan listrik, yaitu atom-atom ini menjadi ion. Natrium klorida (NaCl) adalah material ion klasik. Atom natrium bisa mendapatkan struktur elektron neon (dan muatan positif tunggal) dengan menyerahkan satu elektron valensi 3s ke atom klorin. Setelah penyerahan elektron ini, ion klorin akan bermuatan negatif dan dengan konfigurasi elektron menyerupai argon, Pada natrium klorida, semua natrium dan klorin berada dalam bentuk ion. Jenis ikatan ini digambarkan secara skematik pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema ikatan atom sodium chloride (NaCl)

Gaya ikat tarik menarik adalah **coloumbik**; yaitu ion positif dan negatif tarik menarik satu sama lain karena adanya muatan listrik netto. Untuk dua ion yang terisolasi, energi tarik E_A adalah fungsi jarak atom sesuai dengan :

$$E_A = -\frac{A}{r}$$

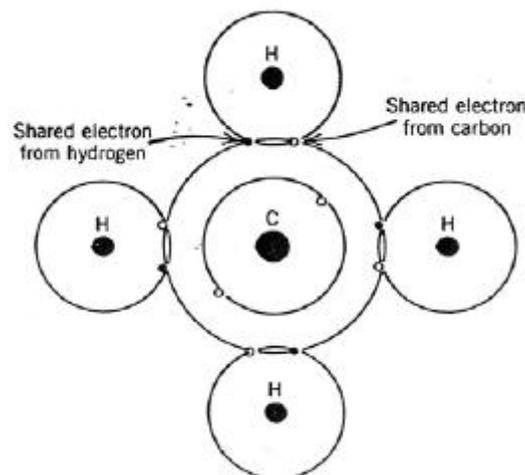
dan dengan analogi yang sama, energi tolak adalah :

$$E_R = \frac{B}{r^n}$$

Pada perumusan diatas, A , B dan n adalah konstanta yang harganya tergantung pada masing-masing sistem ion. Harga n kira-kira 8. Material ion mempunyai karakteristik keras dan rapuh, secara listrik dan termal adalah isolator.

b. Ikatan Kovalen

Pada ikatan kovalen, konfigurasi elektron stabil diperoleh dengan membagi elektron antara atom yang berdekatan. Dua atom yang berikatan kovalen masing-masing akan menyumbangkan minimal satu elektron keikatan, dan elektron yang dipakai bersama bisa dianggap dipunyai bersama oleh kedua atom. Ikatan kovalen digambarkan secara skematik pada Gambar 2.10 untuk molekul metana (CH_4). Atom karbon mempunyai empat elektron valensi, sedangkan setiap atom hidrogen mempunyai sebuah elektron valensi. Setiap atom hidrogen bisa mendapatkan konfigurasi elektron helium (dua elektron valensi $1s$) ketika atom karbon membaginya dengan satu elektron. Karbon sekarang mempunyai empat tambahan elektron, satu dari setiap hidrogen sehingga total elektron valensi menjadi delapan, dan struktur elektronnya adalah neon.



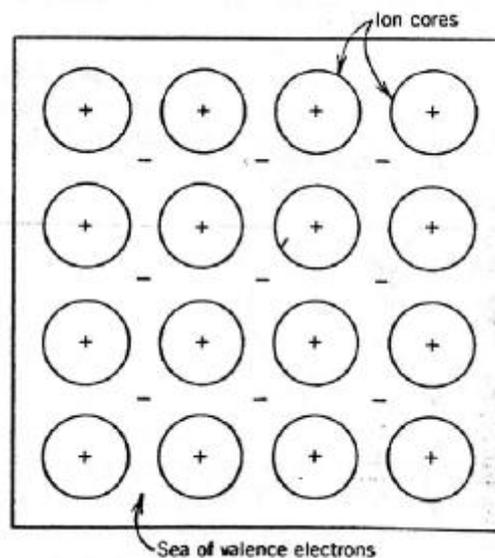
Gambar 2.3. Skema covalent bonding pada molekul methane (CH_4)

Jumlah ikatan kovalen yang mungkin untuk suatu atom ditentukan oleh jumlah elektron valensi. Untuk elektron valensi N' , sebuah atom bisa berikatan kovalen paling banyak $8 - N'$ dengan atom lainnya. Contohnya: $N' = 7$ pada klorin, dan $8 - N' = 1$, artinya satu atom Cl bisa berikatan hanya dengan satu atom lainnya seperti Cl_2 . Dengan cara yang sama untuk atom karbon $N' = 4$, dan setiap atom karbon mempunyai $8 - 4$ yaitu empat elektron untuk dibagi. Intan adalah struktur yang berinteraksi secara tiga dimensi dimana setiap atom karbon berikatan kovalen dengan atom karbon lainnya.

Ikatan kovalen bisa sangat kuat seperti pada intan, dimana intan sangat sangat keras dan mempunyai temperatur leleh yang sangat tinggi yaitu $>3550^{\circ}\text{C}$ (6400°F), atau ikatan kovalen bisa sangat lemah seperti pada bismut, dimana akan meleleh pada 270°C (518°F). Material polimer bercirikan ikatan ini, dimana struktur molekul dasar yang mempunyai rantai karbon yang panjang diikat bersama-sama secara kovalen dengan dua dari empat ikatan yang tersedia untuk setiap atomnya. Dapat terjadi ikatan antar atom mempunyai ikatan yang sebagian berikatan ion dan sebagian lain berikatan kovalen, dan kenyataannya sangat sedikit senyawa yang menunjukkan murni mempunyai ikatan ion atau ikatan kovalen saja.

c. Ikatan Logam

Ikatan logam, jenis ikatan primer terakhir, ditemukan pada logam dan paduannya. Material logam mempunyai satu, dua atau paling banyak tiga elektron valensi. Dengan model ini, elektron valensi tidak terikat kepada atom tertentu pada bahan padat namun lebih kurang ia akan bebas hanyut/bergerak melewati keseluruhan logam. Elektron ini bisa dianggap dimiliki oleh logam secara keseluruhan, atau membentuk “lautan elektron” atau “awan elektron”. Gambar 2.4 memperlihatkan ilustrasi skematik ikatan logam.



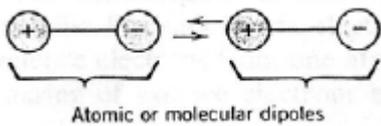
Gambar 2.4. Skema ikatan logam

Ikatan ini bisa lemah atau kuat, jangkauan energinya antara 68 kJ/mol ($0,7 \text{ eV/atom}$) untuk raksa hingga 850 kJ/mol (8.8 eV/atom) untuk wolfram. Temperatur leleh masing-masing berturut-turut adalah -39 dan 3410°C (-38 dan 6170°F).

4. IKATAN SEKUNDER ATAU IKATAN VAN DER WAALS

Ikatan sekunder, van der Waals atau fisik adalah lemah jika dibandingkan dengan ikatan primer atau kimia; energi ikat biasanya dalam kisaran 10 kJ/mol (0,1 eV/atom). Ikatan sekunder timbul antara semua atom atau molekul, tapi keberadaannya tidak jelas jika salah satu dari ketiga jenis ikatan primer ada. Ikatan sekunder dibuktikan oleh gas mulia, yang mempunyai struktur elektron yang stabil, dan juga diantara molekul yang strukturnya berikatan kovalen.

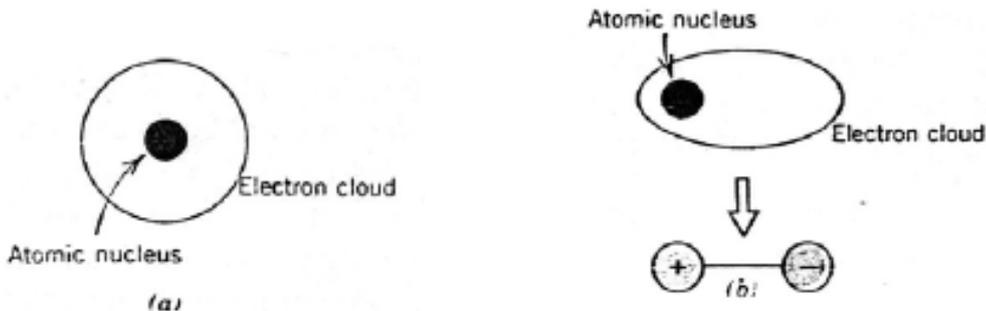
Gaya ikatan sekunder timbul dari dipol atom atau molekul. Pada dasarnya sebuah dipol listrik timbul jika ada jarak pisah antara bagian positif dan negatif dari sebuah atom atau molekul. Ikatan di hasilkan dari gaya tarik-menarik coulombik antara ujung positif sebuah dipol dan bagian negatif dari dipol yang berdekatan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5. Interaksi dipol terjadi antara dipol-dipol terimbas, antara dipol terimbas dengan molekul polar (yang mempunyai dipol permanen), dan antara molekul-molekul polar. Ikatan hidrogen, jenis khusus dari ikatan sekunder, ditemukan pada beberapa molekul dimana hidrogen sebagai salah satu komponen. Mekanisme ikatan ini akan dibicarakan secara singkat berikut ini.



Gambar 2.5. Skema ikatan van der Waals dua dipole

a. Ikatan Dipol Terimbas yang Berfluktuasi

Sebuah dipol bisa dihasilkan atau diimbaskan ke sebuah atom atau molekul yang simetris secara listrik, yaitu distribusi ruang keseluruhan elektron simetris terhadap inti bermuatan positif, sebagaimana diperlihatkan Gambar 2.6a. Semua atom mengalami gerak vibrasi konstan, yang akan menyebabkan distorsi seketika dan berumur pendek, terhadap simetri listrik pada beberapa atom atau molekul, dan menimbulkan dipol listrik kecil, seperti yang digambarkan oleh Gambar 2.6b.



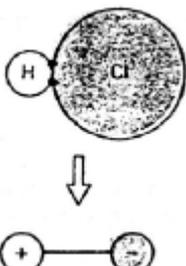
Gambar 2.6. a) Skema ikatan electron simetris. b) atom dipole listrik kecil

Salah satu dipol ini pada gilirannya bisa menimbulkan sebuah pergerakan pada distribusi elektron dari molekul atau atom yang berdekatan, yang membuat atom atau molekul kedua ini menjadi dipol yang kemudian dengan lemah ditarik atau diikat ke atom atau molekul yang pertama; ini adalah satu jenis ikatan van der Waals. Gaya-gaya tarik ini bisa timbul diantara sejumlah besar atom atau molekul, dimana gaya-gaya ini bersifat sementara dan berfluktuasi terhadap waktu.

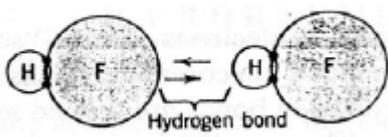
Proses pencairan dan, dalam beberapa hal, proses pembekuan dari gas mulia dan molekul lain yang simetris dan netral secara listrik seperti H_2 dan Cl_2 dipercaya disebabkan oleh ikatan jenis ini. Temperatur leleh dan didih adalah sangat rendah pada material dimana ikatan dipol terimbas dominan, dan dari semua ikatan antar molekul yang mungkin terjadi, ikatan ini paling lemah.

b. Ikatan Antara Dipol Molekul Polar dan Dipol Terimbas

Momen dipol permanen timbul pada beberapa molekul karena susunan yang tidak simetris dari daerah yang bermuatan positif dan negatif; molekul ini disebut **molekul polar**. Gambar 2.7 adalah penggambaran skematik dari molekul hidrogen klorida; momen dipol permanen timbul dari muatan netto dari muatan positif dan negatif yang masing-masing berkaitan dengan ujung-ujung hidrogen dan klorin dari molekul HCl.



Gambar 2.7. Skema molekul polar hydrogen chloride



Gambar 2.8 Skema ikatan hydrogen dalam hydrogen fluoride.

Molekul polar bisa juga mengimbaskan dipol pada molekul non polar didekatnya, dan sebuah ikatan akan terbentuk sebagai hasil gaya tarik menarik antara dua molekul ini. Lebih jauh, besar ikatan ini akan lebih besar dari pada dipol terimbas yang berfluktuasi.

c. Ikatan Dipol Permanen

Gaya van der Waals juga akan timbul diantara molekul polar yang berdekatan. Energi ikat yang terkait lebih besar secara signifikan dari pada energi ikat yang ada pada dipol terimbas.

Jenis ikatan sekunder yang paling kuat, ikatan hidrogen, adalah kasus khusus dari ikatan molekul polar. Ikatan ini terjadi antara molekul dimana hidrogen berikatan kovalen dengan fluorin (sebagai HF), dengan oksigen (sebagai H₂O), dan dengan nitrogen (sebagai NH₃).

Untuk setiap ikatan H-F, H-O atau H-N, elektron hidrogen tunggal dibagi bersama dengan atom lainnya. Maka, ujung hidrogen dari ikatan pada dasarnya adalah proton terbuka yang bermuatan positif, yang tak terlindungi oleh elektron. Ujung molekul yang bermuatan positif sangat tinggi ini mempunyai gaya tarik yang kuat terhadap ujung negatif dari molekul yang berdekatan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8 untuk HF. Besar ikatan hidrogen umumnya lebih besar dari ikatan sekunder jenis lainnya, dan bisa mencapai 51 kJ/mol (0,52 eV/molekul).

5. MOLEKUL

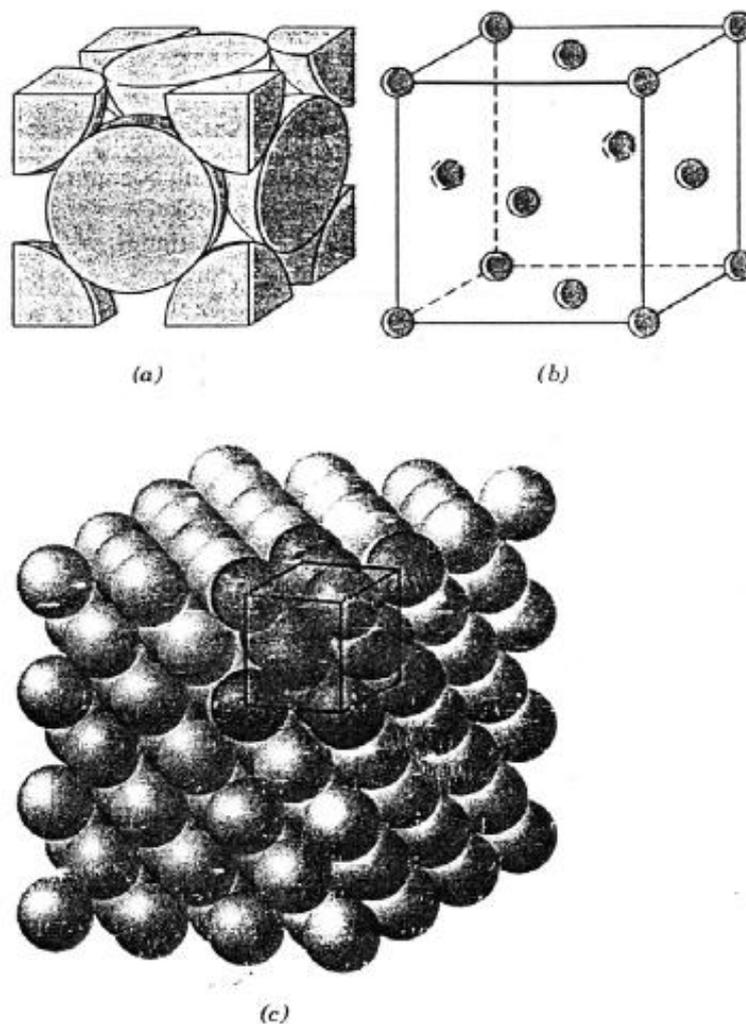
Molekul bisa didefinisikan sebagai sebuah kelompok atom yang terikat bersama-sama oleh ikatan primer yang kuat. Dalam konteks ini, keseluruhan spesimen padat yang terikat dengan ikatan logam dan ion bisa dianggap sebagai molekul tunggal. Pada cairan terkondensasi dan bahan padat, ikatan antar molekulnya adalah ikatan sekunder lemah. Konsekuensinya, material molekul mempunyai temperatur leleh dan didih yang rendah. Sebagian besar dari mereka yang mempunyai molekul kecil yang dibentuk oleh beberapa atom adalah gas pada temperatur dan tekanan biasa atau ambien. Disisi lain, banyak polimer modern, merupakan material molekul yang dibangun oleh molekul yang sangat besar, berada pada kondisi padat; beberapa dari sifat-sifat mereka sangat bergantung kuat atas keberadaan ikatan sekunder van der Waals dan hidrogen.

6. KRISTAL

Material **kristal** adalah material padat dimana atom-atomnya tersusun dalam susunan yang berulang dan periodik pada dimensi yang besar yaitu atom-atom berada pada kondisi "keteraturan jarak panjang". Untuk material non-kristal atau *amorfus*, keteraturan atom jarak panjang tidak muncul.

7. SEL SATUAN

Ketika menerangkan struktur kristal, atom (atau ion) dilukiskan sebagai bola padat dan model ini disebut dengan *model bola keras atom* dimana setiap bola akan menyinggung bola terdekat. Susunan atom pada kristal padat memperlihatkan bahwa sekelompok kecil atom membentuk pola yang berulang. Karena itu dalam menerangkan struktur kristal, lebih mudah untuk membagi struktur ke dalam kesatuan kecil yang berulang yang disebut **sel satuan**. Sel satuan pada sebagian besar struktur kristal berbentuk jajaran genjang atau prisma yang mempunyai tiga set permukaan yang sejajar (gambar 2.9 c), dimana dalam hal ini sebuah kubus.



Gambar 2.9. Struktur Kristal Face Centre Cubic (FCC)

Sel satuan bisa kadang-kadang digambarkan dengan model *sel satuan bola diperkecil* seperti terlihat pada gambar 2.9b.

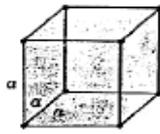
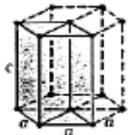
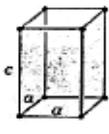
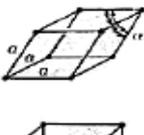
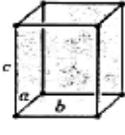
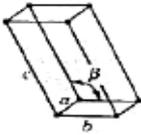
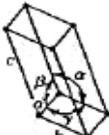
8. SISTEM KRISTAL

Jika dilihat dari geometri sel satuan, ditemukan bahwa kristal mempunyai tujuh kombinasi geometri yang berbeda seperti diperlihatkan pada tabel 2.1.

Pada sebagian besar logam, struktur kristal yang dijumpai adalah: kubus pusat sisi, FCC (face-centered cubic), kubus pusat ruang, BCC (body-centered cubic) dan tumpukan padat heksagonal, HCP (hexagonal close-packed).

Beberapa logam, dan juga non-logam, bisa mempunyai lebih dari satu struktur kristal, fenomena ini disebut **polimorfisme**. Jika kondisi ini dijumpai pada bahan padat elemental maka disebut **alotropi**

Tabel 2.1. Parameter lattice untuk beberapa jenis struktur Kristal atom logam

<i>Crystal System</i>	<i>Axial Relationships</i>	<i>Interaxial Angles</i>	<i>Unit Cell Geometr</i>
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

a. KUBUS PUSAT SISI, FCC

Struktur kristal ini termasuk kristal kubus dimana terdapat atom di setiap sudut kubus ditambah masing-masing satu buah atom di setiap permukaan/sisi kubus. Sifat ini banyak dijumpai pada logam seperti tembaga, aluminium, perak dan emas. Gambar 2.9 memperlihatkan kristal jenis ini. Panjang sisi kubus a dan jari-jari atom R dihubungkan dengan persamaan:

$$a = 2R\sqrt{2}$$

Fraksi volume bola padat di dalam sel satuan atau disebut **faktor penumpukan atom, FP** dirumuskan:

$$FP = \frac{\text{volume atom didalam sel satuan}}{\text{volume total sel satuan}}$$

Untuk struktur FCC, Faktor Penumpukan Atom adalah 0,74. Logam umumnya mempunyai faktor penumpukan atom yang relatif besar untuk memaksimalkan efek pembungkusan oleh elektron bebas.

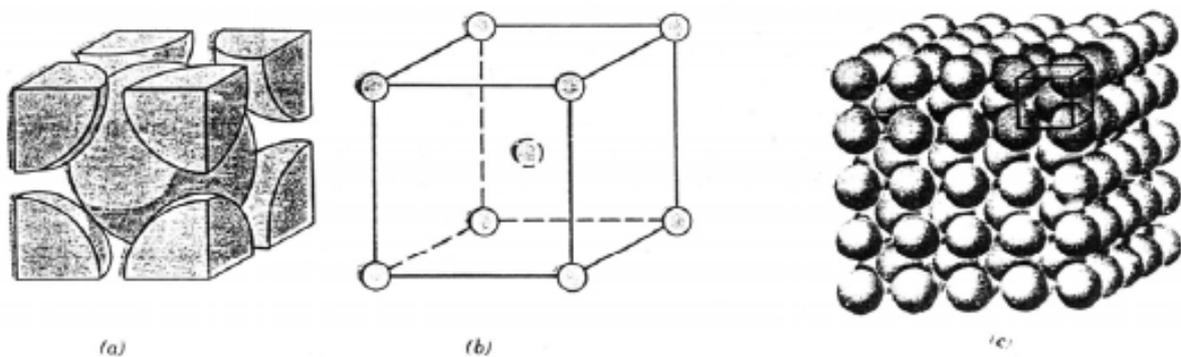
b. KUBUS PUSAT RUANG, BCC

Struktur kristal ini mempunyai atom di setiap sudut kubus ditambah sebuah atom didalam kubus, seperti yang ditunjukkan gambar 2.10.

Panjang sel satuan dirumuskan dengan:

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

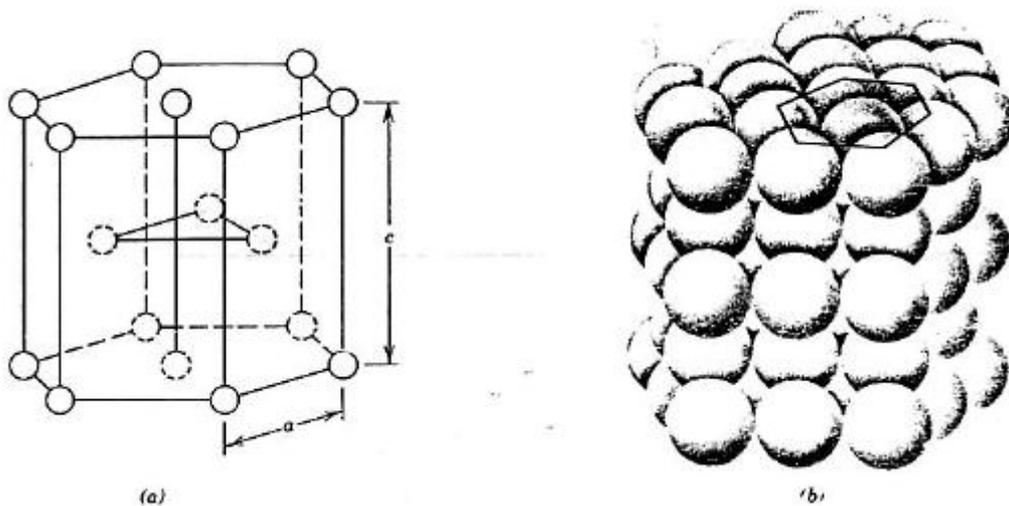
Faktor Penumpukan Atom kristal ini adalah 0,68.



Gambar 2.10. Struktur Kristal Body Centere Cubic (BCC)

c. TUMPUKAN PADAT HEKSAGONAL, HCP

Gambar 2.11 memperlihatkan sel satuan jenis ini. Sel satuan jenis ini adalah jenis sel satuan heksagonal. Permukaan atas dan bawah sel satuan terdiri dari enam atom yang membentuk heksagonal yang teratur dan mengelilingi sebuah atom ditengah-tengahnya. Bidang lain yang mempunyai tiga atom tambahan pada sel satuan terletak antara bidang atas dengan bidang bawah. Enam atom ekivalen dipunyai oleh setiap sel satuan ini. Faktor penumpukan atom untuk sel satuan HCP adalah sama dengan sel satuan FCC. Logam yang mempunyai struktur kristal ini antara lain: cadmium, magnesium, titanium dan seng.



Gambar 2.11. Struktur Kristal Hexagonal Close Paced (HCP)

9. KERAPATAN ATOM

Kerapatan atom struktur kristal bisa dicari dengan persamaan:

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

dimana : n = jumlah atom yang terkait dengan sel satuan

A = berat atom

V_C = volume sel satuan

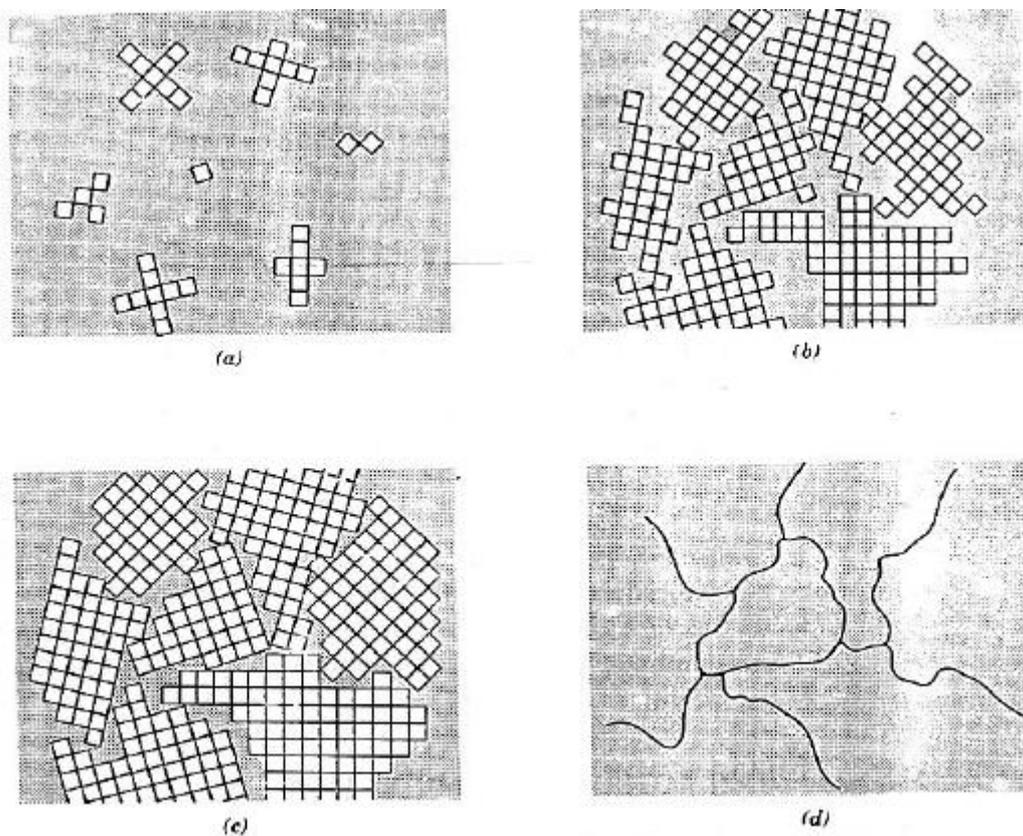
N_A = bilangan avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ atom/mol)

10. KRISTAL TUNGGAL

Untuk bahan padat kristal, susunan atom yang periodik dan berulang adalah sempurna atau berlanjut di keseluruhan spesimen tanpa gangguan, hasilnya disebut kristal tunggal. Semua sel satuan bersambung dengan cara yang sama dan mempunyai orientasi yang sama.

11. POLIKRISTAL

Sebagian besar bahan padat kristal disusun oleh sekumpulan kristal-kristal kecil atau butir. Kristal seperti ini disebut **polikristal**. Berbagai tingkat dalam pembekuan spesimen polikristal diperlihatkan secara skematik oleh gambar 3.16. Pertama-tama kristal kecil atau nuklei terbentuk di berbagai posisi. Kristal ini mempunyai orientasi kristalografi acak, sebagaimana ditunjukkan oleh jaring persegi. Butir-butir kecil tumbuh. Ujung-ujung atom yang berdekatan bersinggungan satu sama lain ketika proses pembekuan mendekati selesai. Hasilnya orientasi kristalografi akan berbeda antara satu butir dengan butir lainnya.



Gambar 2.12. Skema diagram tahapan pembekuan pada bahan polycrystalline. a) pegintian Kristal., b) pertumbuhan Kristal., c) pertumbuhan Kristal komplet d) Struktur butiran ila dilihat dibawah mikroskop.

E. Latihan

1. Gambarkan dan jelaskan bagian-bagian dari atom.
2. Gaya dan energy ikatan atom dipengaruhi oleh apa?
3. Ada berapa macam ikatan atom primer? Gambarkan dan jelaskan
4. Apa yang dimaksud dengan ikatan van der Waals?
5. Apa yang dimaksud dengan molekul, Kristal dan sel satuan ?
6. Apakah lattice itu?
7. Gambarkan sel satuan untuk BCC, FCC, HCP.

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

8. Panjang sel satuan BCC adalah $a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$. Bagaimana rumus tersebut didapat?
9. Bagaimana cara menghitung kerapatan atom?
10. Apakah yang dimaksud dengan polikristal dan Kristal tunggal?

F. Rangkuman

Setiap atom terdiri dari inti yang sangat kecil yang terdiri dari proton dan neutron, dan dikelilingi oleh elektron yang bergerak. Elektron dan proton mempunyai muatan listrik yang besarnya $1,60 \times 10^{-19}$ C dengan tanda negatif untuk elektron dan positif untuk proton sedangkan neutron tidak bermuatan listrik.

Gaya atom yang berdekatan ada dua macam, tarik atau tolak, dan besarnya merupakan fungsi jarak antar atom. Sumber gaya tarik F_A tergantung pada jenis ikatan yang ada antara dua atom.

Energi potensial tarik, tolak dan energi potensial netto sebagai fungsi jarak antar atom untuk dua atom. Untuk kurva netto, yaitu jumlah kedua energi, mempunyai energi potensial titik minimum

Ikatan primer terdiri dari ikatan ion, ikatan kovalen dan ikatan logam. Sedangkan ikatan sekunder disebut sebagai ikatan van der Waals, Gaya ikatan sekunder timbul dari dipol atom atau molekul. Pada dasarnya sebuah dipol listrik timbul jika ada jarak pisah antara

bagian positif dan negatif dari sebuah atom atau molekul. Ikatan di hasilkan dari gaya tarik-menarik coulombik antara ujung positif sebuah dipol dan bagian negatif dari dipol yang berdekatan.

Kristal adalah material padat dimana atom-atomnya tersusun dalam susunan yang berulang dan periodik pada dimensi yang besar yaitu atom-atom berada pada kondisi “keteraturan jarak panjang”.

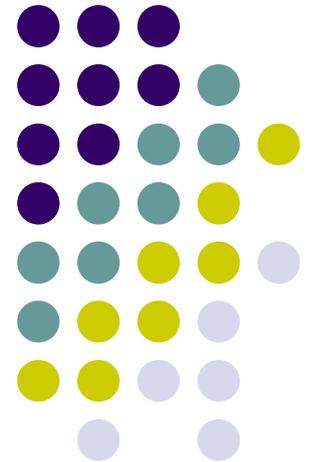
Susunan atom pada kristal padat memperlihatkan bahwa sekelompok kecil atom membentuk pola yang berulang. Karena itu dalam menerangkan struktur kristal, lebih mudah untuk membagi struktur ke dalam kesatuan kecil yang berulang yang disebut **sel satuan**.

Struktur Kristal

Rudi Saputra

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Sains & Teknologi
Nasional

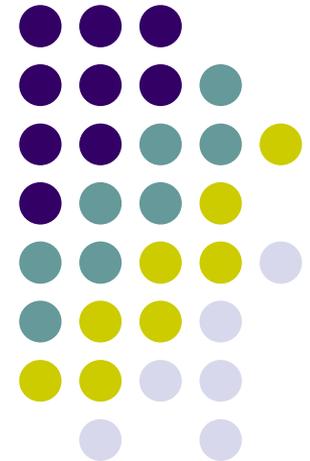
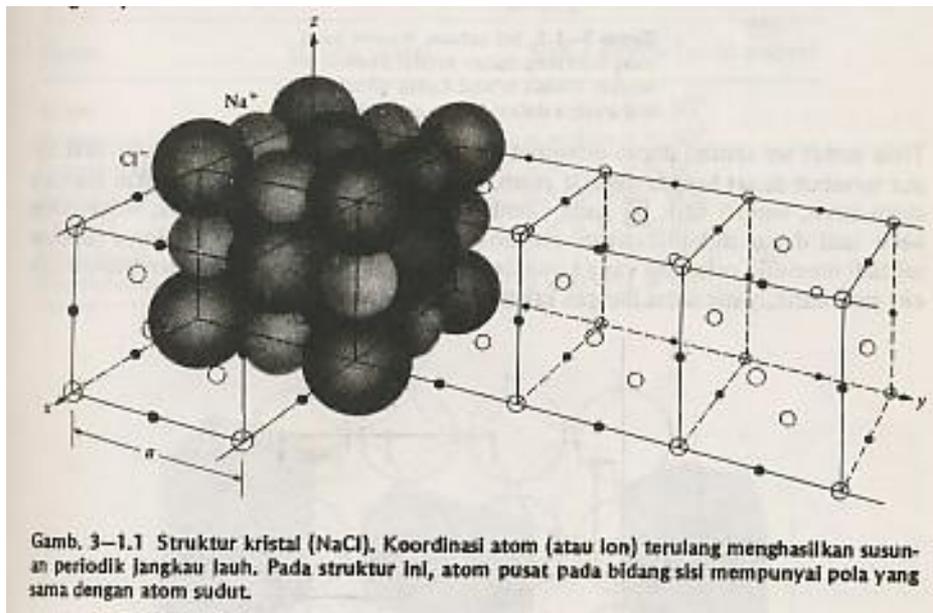
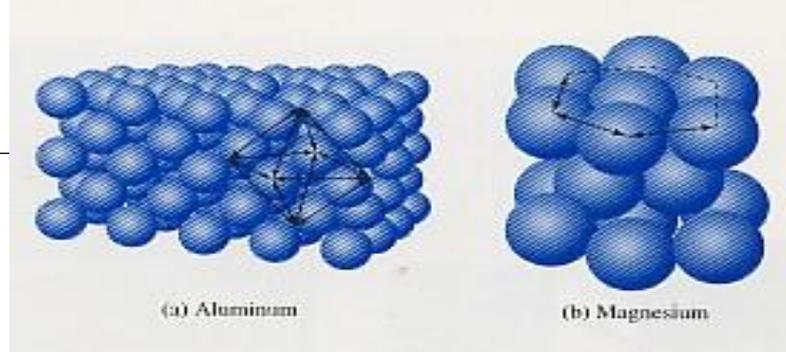
2014



Struktur Kristal

Kristal

Kristal adalah susunan atom-atom yang mengatur diri secara teratur dan berulang pada 3 dimensi



perhatikan gambar :

Kerangka 3 dimensi , dimana bila ditarik garis imajiner melalui inti-inti atom dalam 3 dimensi disebut kisi ruang (space lattice)



Kisi runag ini merupakan susunan dari sejumlah besar unit cell (sel satuan)

Unit cell : merupakan bagian terkecil dari kisi ruang (space lattice)

Satu unit cell dinyatakan atau terdiri dari lattice parameter berupa panjang rusuk dan sudut antara rusuk



Gamb 3-1.2. Sel satuan. Volum kecil yang berulang dalam kristal disebut sel satuan. Untuk kristal kubik konstanta kisi a sama dalam ketiga arah koordinat

Disamping itu ada beberapa unsur yg dapat dijumpai dgn jenis space lattice yg berbeda, sifat ini dinamakan “ Polimorfi “



Diantara logam-logam yg memiliki sifat polimorfi ini, ada sifat polimorfinya yg reversible

Hal ini terjadi dimana pd suatu kondisi tertentu akan terjadi perubahan maka space latticenya juga berubah, bila kondisi kembali seperti semula maka space latticenya juga akan kembail seperti semula, sifat seperti ini dinamakan “ Allotropi “

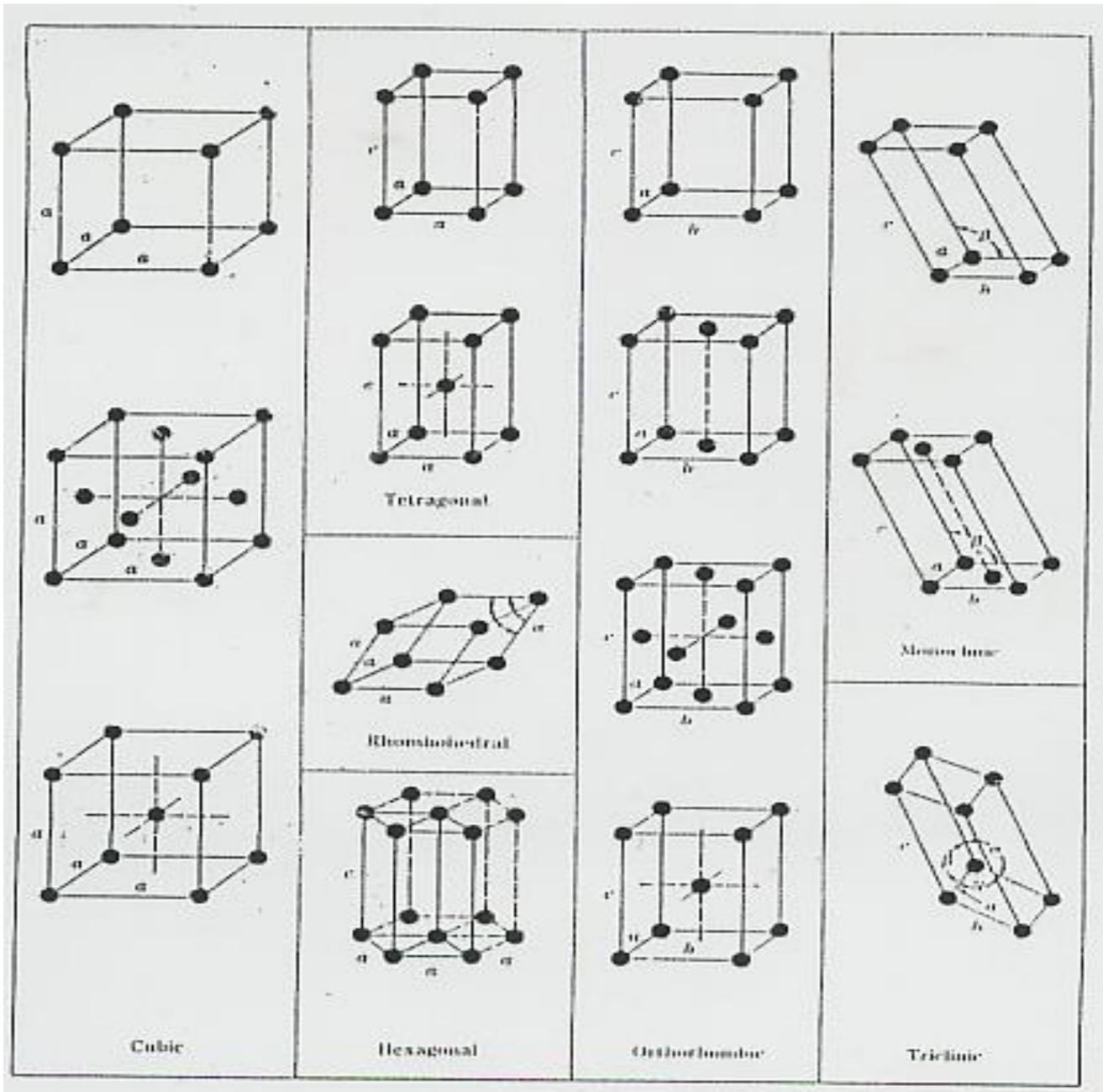
Contoh : Besi disamping sebagai Polimorfi, juga dapat berupa Allotropi

Macam-macam kristal

Dalam bahan terdapat 7 macam kristal

1. Cubic
2. Tetragonal
3. Rhombohedral
4. Hexagonal
5. Orthorhombic
6. Monoclinic
7. Triclinic





penjelasan gambar



Dari ke 7 sistim kristal tsb, ternyata ada 14 jenis bentuk space lattice (kisi ruang) yang terjadi

1. Cubic, terdiri dari

1.1. Cubic Simple

1.2. Cubic Body Centred

1.3. Cubic Face Centred

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

2. Tetragonal, terdiri dari

2.1. Tetragonal Simple

2.2. Tetragonal Body Centred

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

3. Rhombohedral \longrightarrow $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

4. Hexagonal \longrightarrow $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ ; \gamma = 120^\circ$

5. Orthorombic, terdiri dari

5.1. Orthorombic simple

5.2. Orthorombic base centred

5.3. Orthorombic face centred

$a \neq b \neq c$

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

6. Monoclinic, terdiri dari

6.1. Monoclinic simple

6.2. Monoclinic base centred

$a \neq b \neq c$

$\alpha = \gamma \neq \beta \neq 90^\circ$

7. Triclinic \longrightarrow $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

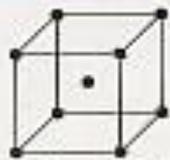




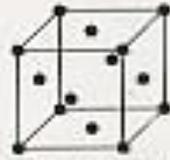
TABLE 3.2 THE FOURTEEN CRYSTAL (BRAVAIS) LATTICES



Simple cubic



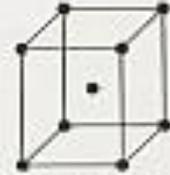
Body-centered cubic (bcc)



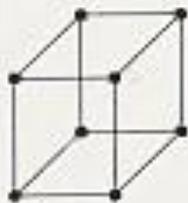
Face-centered cubic (fcc)



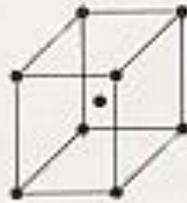
Simple tetragonal



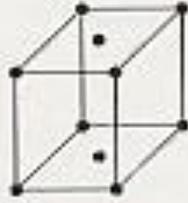
Body-centered tetragonal



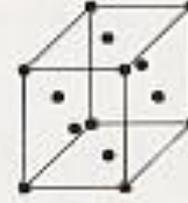
Simple orthorhombic



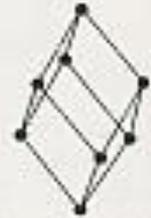
Body-centered orthorhombic



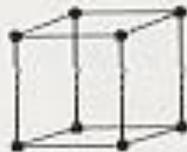
Base-centered orthorhombic



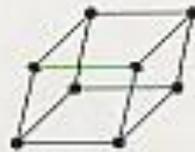
Face-centered orthorhombic



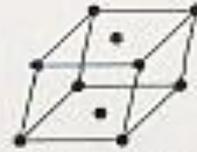
Rhombic



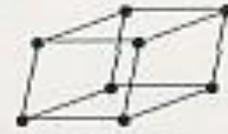
Hexagonal



Simple monoclinic



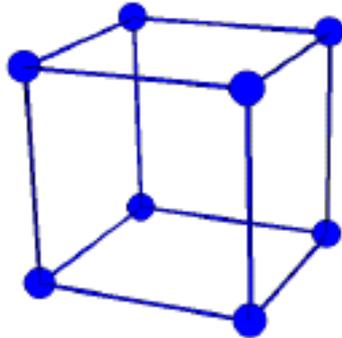
Base-centered monoclinic



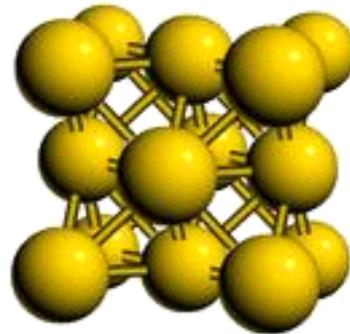
Triclinic

Introduction to the atomic arrangement of crystal form

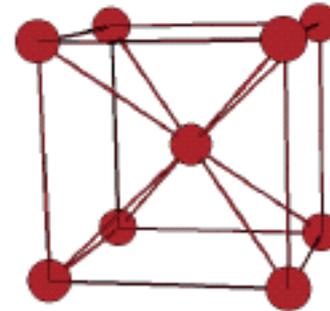
Crystal Lattice Structures



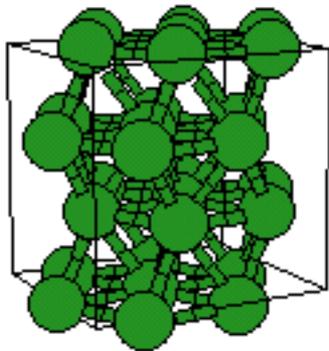
Simple Cubic
and related structures



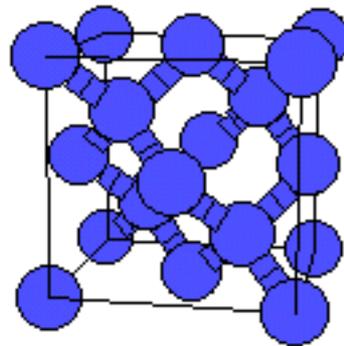
Cubic Close Packed
and related structures



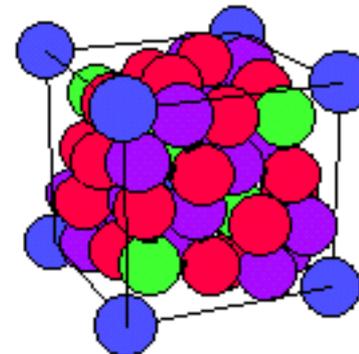
Body Centered Cubic
and related structures



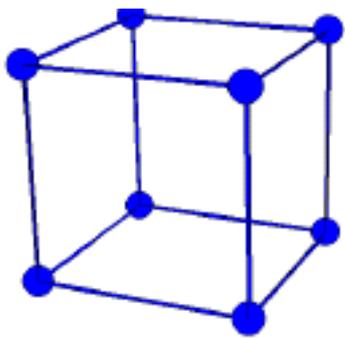
Hexagonal Close Packed
and related structures



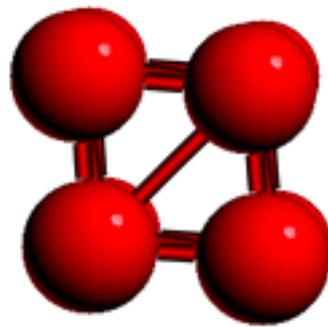
Carbon
and Related Structures



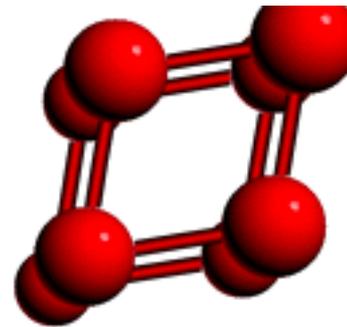
Manganese Structures



Simple Cubic (A_1)

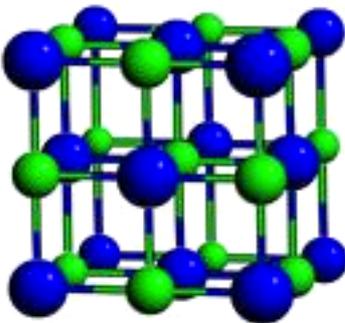


β Po (A_7)

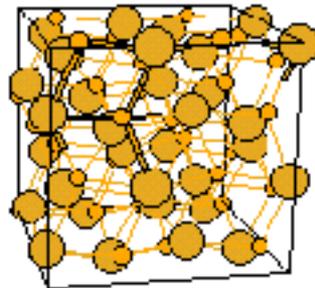


α Hg (A_{10})

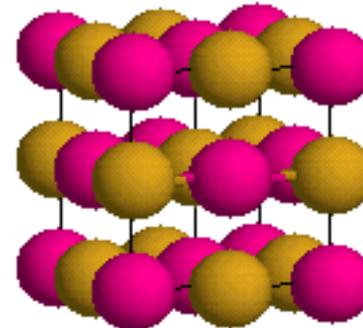
Simple
Cubic and
Related
Structures



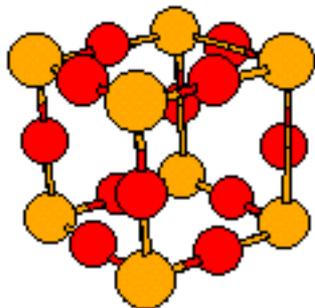
NaCl (B_1)



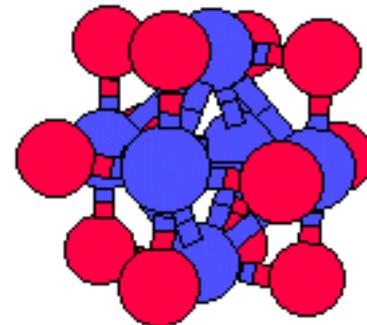
FeSi (B_{20})



TiF (B_{24})



α ReO₃ (D_{09})



NbO



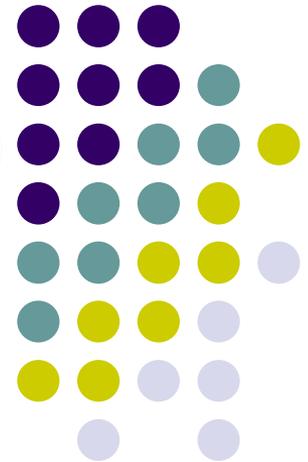
Kebanyakan logam-logam membeku dengan membentuk kristal, diantaranya adalah Kubus atau Hexagonal

Dari 14 sistim kristal tersebut ada 3 macam yang sering dijumpai yaitu :

1. Body Centred Cubic (bcc)
(Kubus Pemusatan Ruang = kpr)

2. Face Centred Cubic (fcc)
(Kubus Pemusatan Sisi = kps)

3. Hexagonal Close Packed (hcp)
(Hexagonal Tumpukan Padat = hcp)

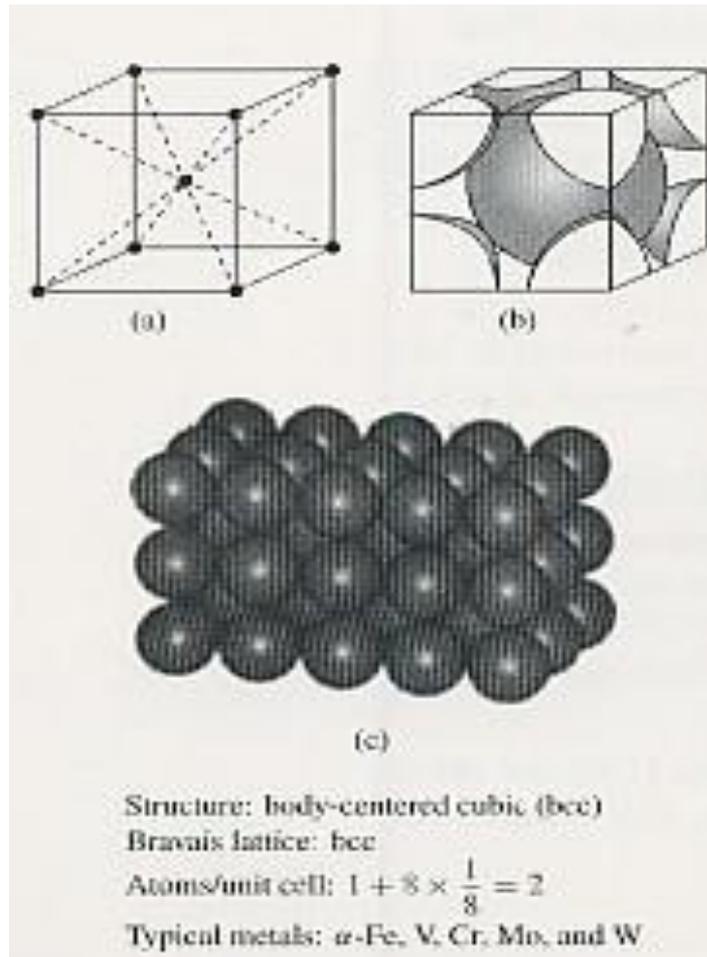


bcc = kpr

body centred cubic = bcc

atau

kubus pemustan ruang = kpr

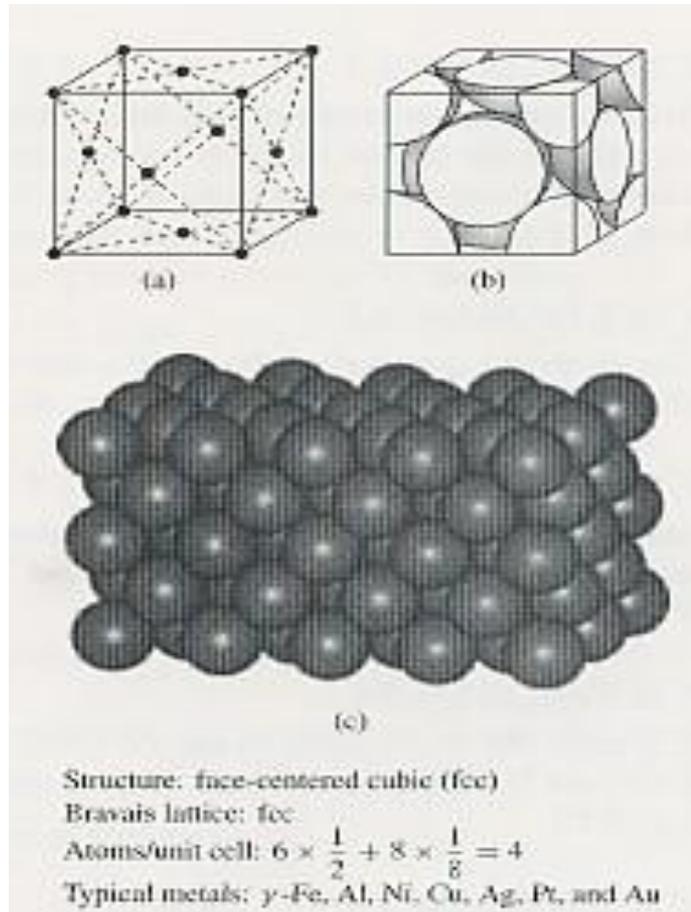
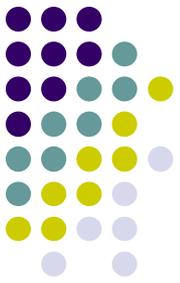


fcc = kps

face centred cubic = fcc

atau

kubus pemusatan sisi = kps

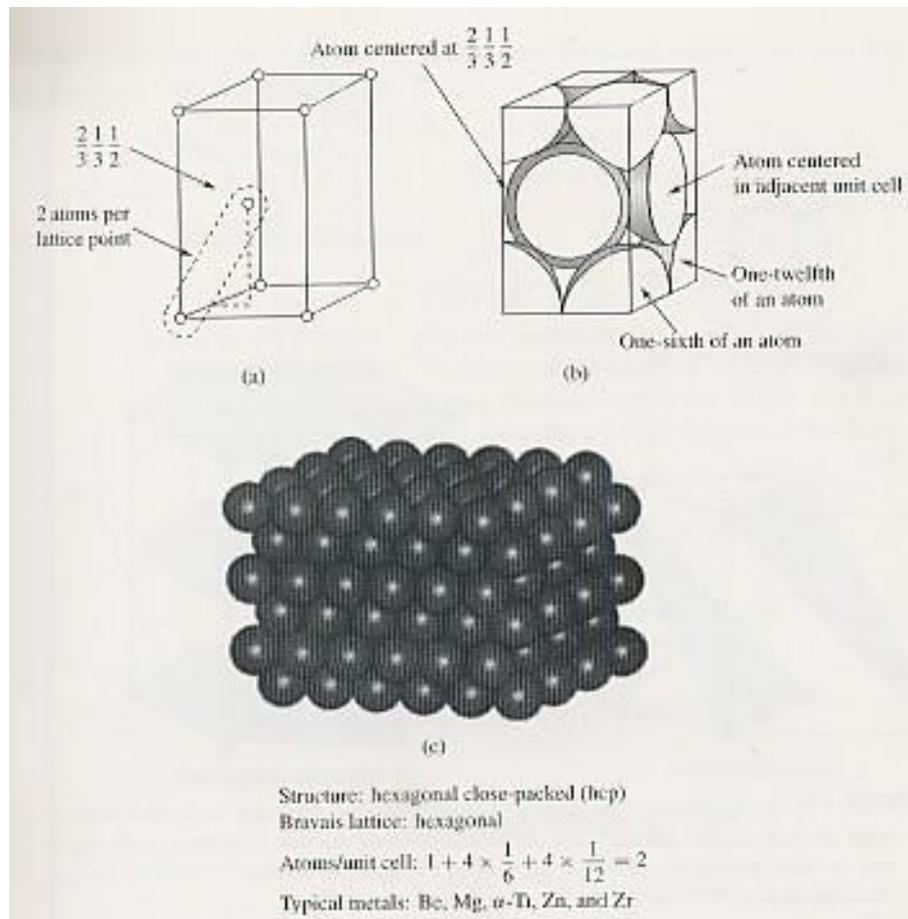
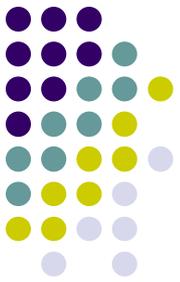


hcp = htp

hexagonal close packed = hcp

atau

hexagonal tumpukan padat = htp



Bahan logam hampir 90 % struktur kristalnya dalam bentuk bcc, fcc dan hcp

Untuk besi bcc, ukuran 1 unit cell pada suhu kamar = $0,287 \times 10^{-9}$ (m)

sedangkan $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ (m), maka :
= 0,287 (nm)

apabila pada logam ada x (mm), maka jumlah unit cell yg diperoleh :

$$= x \text{ (mm)} / 0,287 \times 10^{-6} \text{ (mm)} \times 1 \text{ (unit cell)}$$

contoh

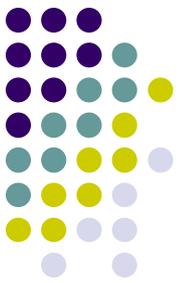
berapa unit cell yg diperoleh pada logam besi sepanjang 1 mm

$$= 1 / 0,287 \times 10^{-6} \times 1 \text{ (unit cell)}$$

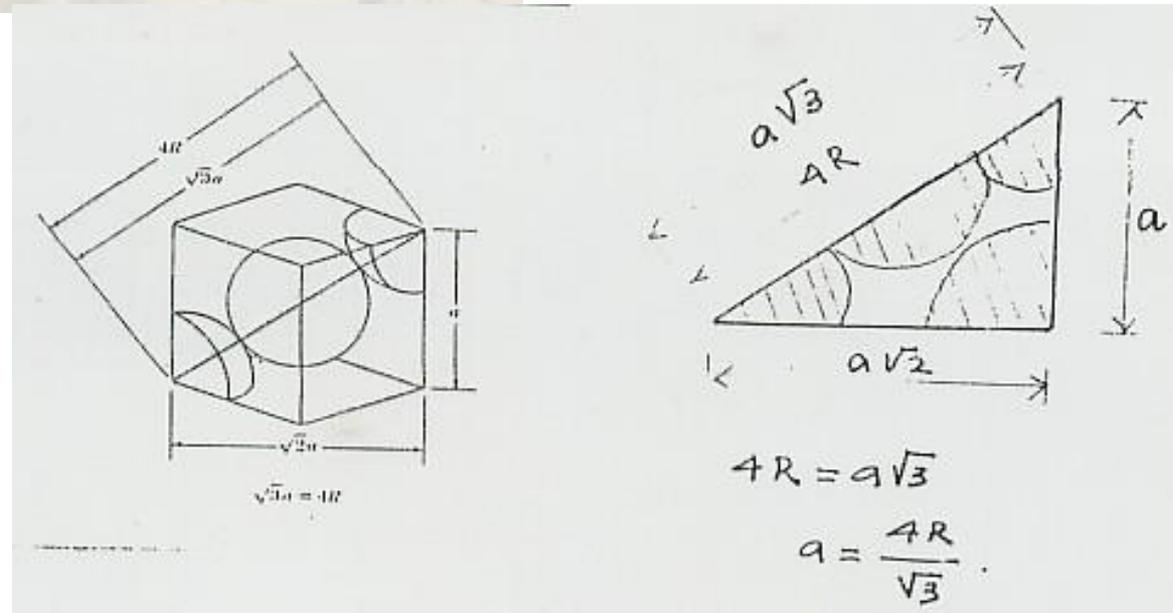
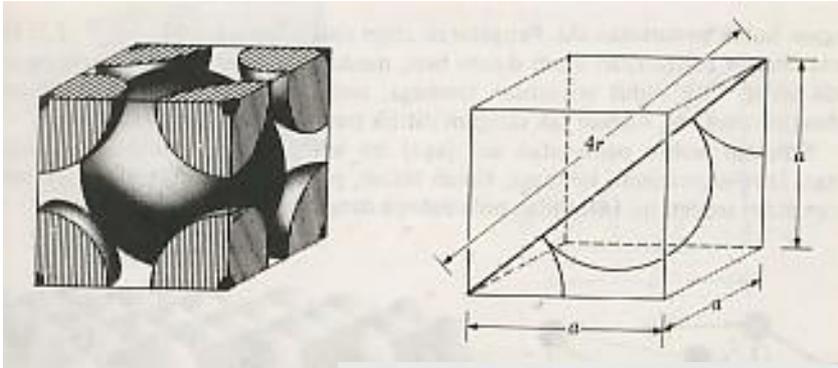
$$= 3,48 \times 10^{-6} \text{ (unit cell)}$$

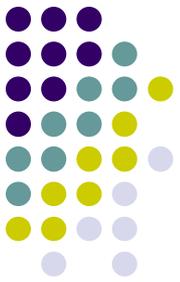


Konstanta kisi (a) dan Volume kekosongan



1. Struktur Kristal bcc





Jumlah atom / unit cell

$$= 1/8 \times 8 + 1 = 2 \text{ atom}$$

dalam tabel R utk besi = 0,1241 (nm), shg :

$$a = 4R / \sqrt{3}$$

$$= 4 \times 0,1241 \times 10^{-9} / \sqrt{3} \text{ (m)}$$

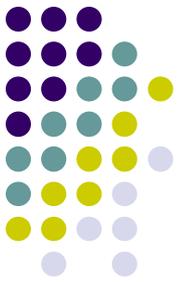
$$= 0,286 \times 10^{-9} \text{ (m)}$$

Adapun untuk Atomic Packing Factor (APF) atau faktor tumpukan atom adalah

$$\text{APF} = \text{Vol atom dlm unit sel} / \text{Vol satu unit sel}$$

$$\begin{array}{ccc} \text{volume atom} \times \text{jumlah atom} & & a^3 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ (4/3 \pi R^3) & 2 & \end{array}$$

dimana $R = a\sqrt{3}/4$



sehingga

$$\frac{4/3 \pi \{ a^3 (\sqrt{3})^3 \} 2}{4^3 a^3}$$

$$\begin{aligned} \text{APF} &= 0,68 \\ &= 68 \% \end{aligned}$$

untuk

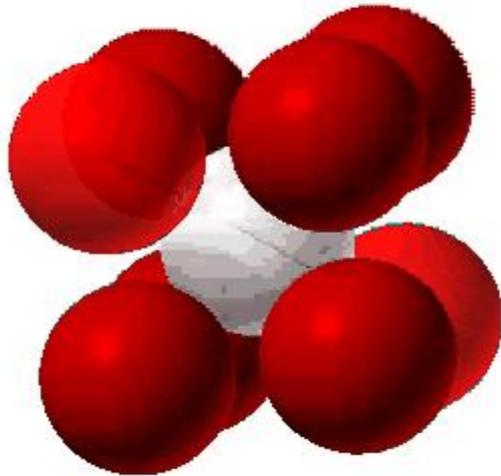
volume kekosongan per unit sel

$$\begin{aligned} &= 1 - 0,68 \\ &= 0,32 \\ &= 32 \% \end{aligned}$$

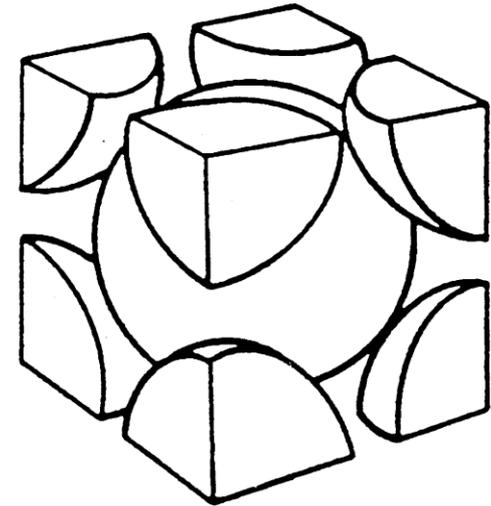
Body Centered Cubic (BCC)



- Close packed directions are cube diagonals.
 - Note: All atoms are identical; the center atom is shaded differently only for ease of viewing.



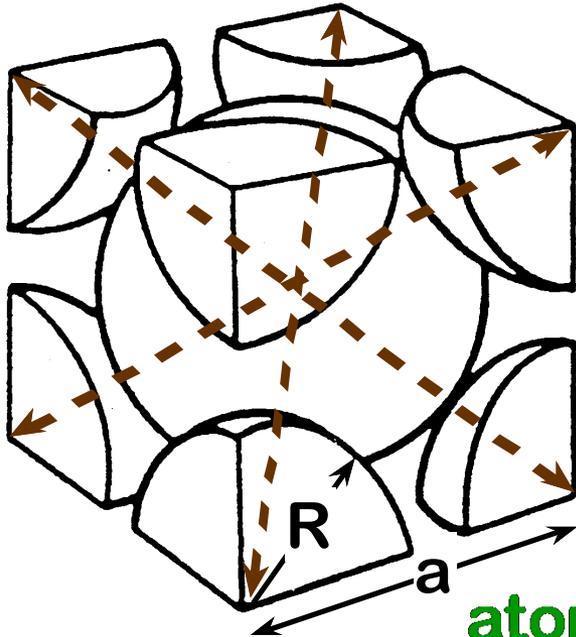
- Coordination # = 8





APF: BCC

- APF for a body-centered cubic structure = 0.68



Close-packed directions:
length = $4R$
 $= \sqrt{3} a$

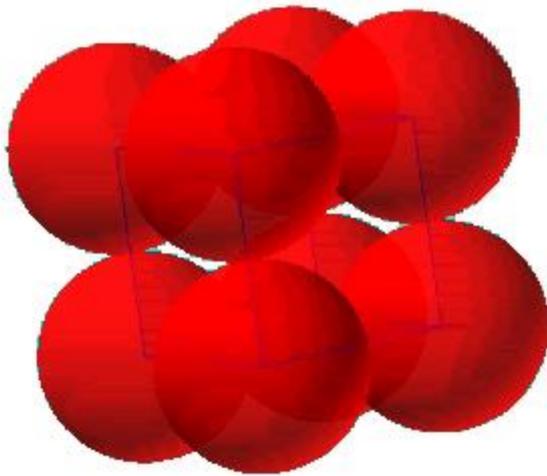
Unit cell contains:
 $1 + 8 \times 1/8$
 $= 2 \text{ atoms/unit cell}$

$$\text{APF} = \frac{\text{atoms/unit cell} \times \text{volume/atom}}{\text{volume/unit cell}}$$

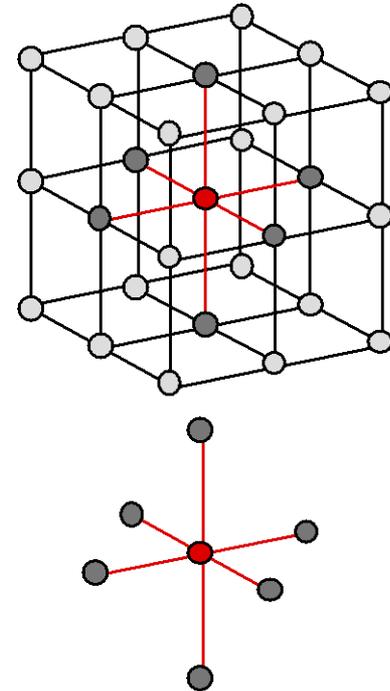
The diagram shows the calculation of the Atomic Packing Factor (APF) for a BCC unit cell. The numerator is the product of the number of atoms per unit cell (2) and the volume of one atom. The denominator is the volume of the unit cell (a^3). The terms are color-coded: 'atoms/unit cell' is green, 'volume/atom' is brown, and 'volume/unit cell' is blue.

Simple Cubic (SC)

- Rare due to poor packing (only Po has this structure)
- **Close-packed directions** are cube edges.

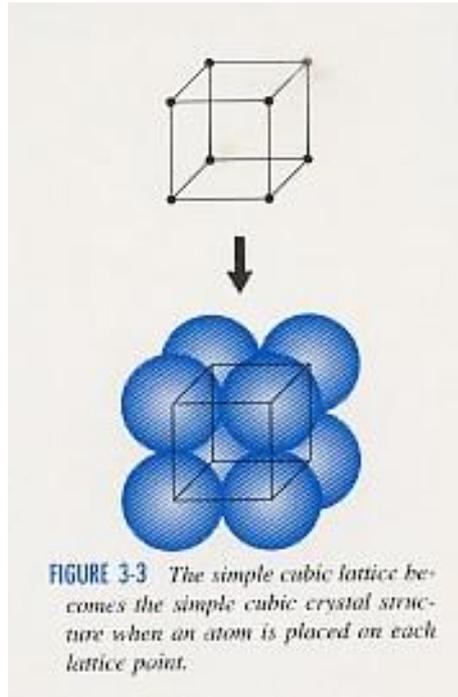


- **Coordination # = 6**
(# nearest neighbors)



2. Simple Cubic

lihat gambar



jumlah atom / unit sel

$$= 1/8 \times 8 = 1 \text{ atom}$$

Volume atom/unit sel

$$= 4/3 \pi R^3 \times \text{jumlah atom}$$

$$= 4/3 \pi \times (a/2)^3 \times 1$$

$$\text{Volume unit sel} = a^3$$

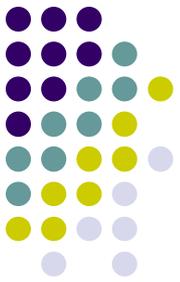
sehingga

$$\text{APF} = 4/3 \pi \times (a/2)^3 \times 1 / a^3$$

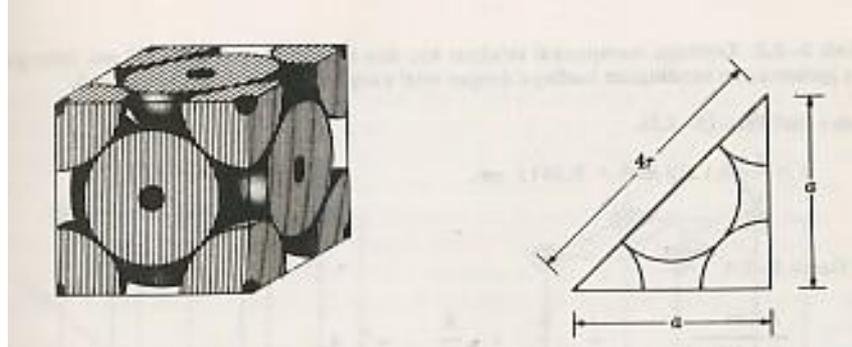
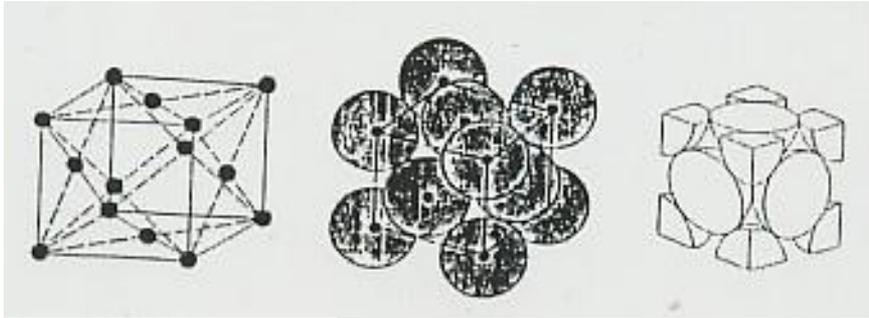
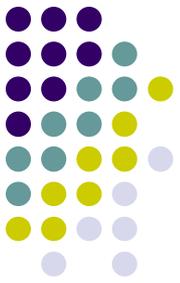
$$= 0,52 = 52 \%$$

$$\text{Volume kekosongan} = 1 - 0,52 = 0,48$$

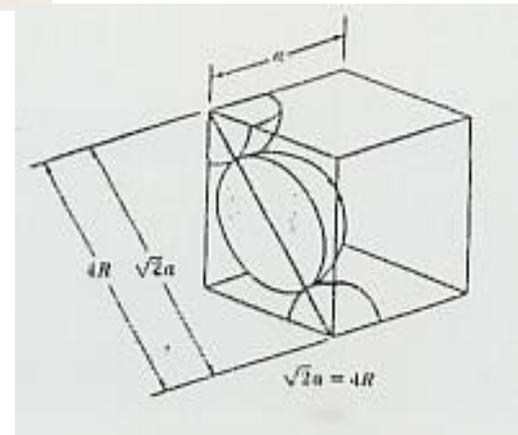
$$= 48 \%$$



3. Face Centred Cubic



$$4R = a\sqrt{2}$$
$$a = 4R / \sqrt{2}$$



Jumlah atom / unit sel

$$= 1/8 \times 8 + 1/2 \times 6$$

$$= 4 \text{ atom}$$

Volume atom dalam 1 unit sel

$$= 4/3 \pi R^3 \times 4$$

$$= 4/3 \pi \times (a\sqrt{2}/4)^3 \times 4$$

Volume 1 unit sel = a^3

Sehingga APF =

$$\frac{4/3 \pi \times (a\sqrt{2}/4)^3 \times 4}{a^3}$$

$$= 0,74 = 74 \%$$

Volume Kekosongan

$$= 1 - 0,74$$

$$= 0,26 = 26 \%$$

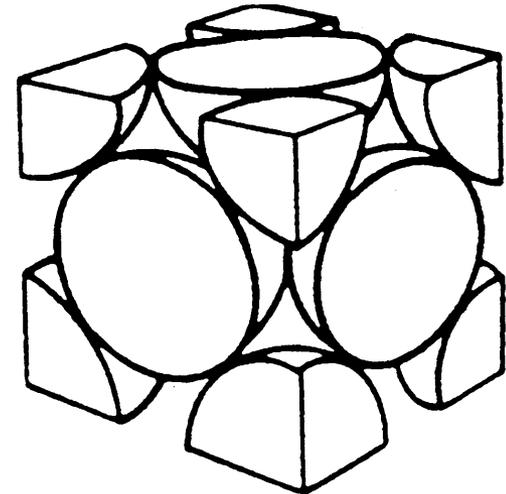
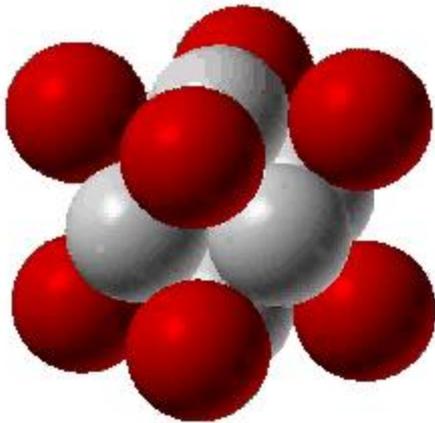




Face Centered Cubic (FCC)

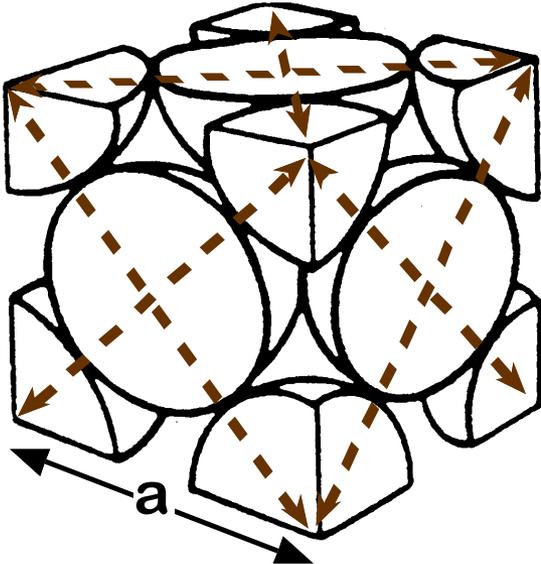
- Close packed directions are face diagonals.
 - Note: All atoms are identical; the face-centered atoms are shaded differently only for ease of viewing.

- Coordination # = 12



APF: FCC

- APF for a body-centered cubic structure = 0.74



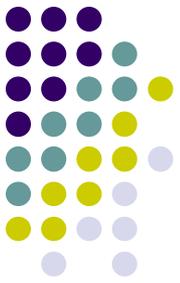
Close-packed directions:
length = $4R$
 $= \sqrt{2} a$

Unit cell contains:
 $6 \times 1/2 + 8 \times 1/8$
 $= 4$ atoms/unit cell

$$\text{APF} = \frac{\frac{\text{atoms}}{\text{unit cell}} \cdot \frac{\text{volume}}{\text{atom}}}{\frac{\text{volume}}{\text{unit cell}}}$$

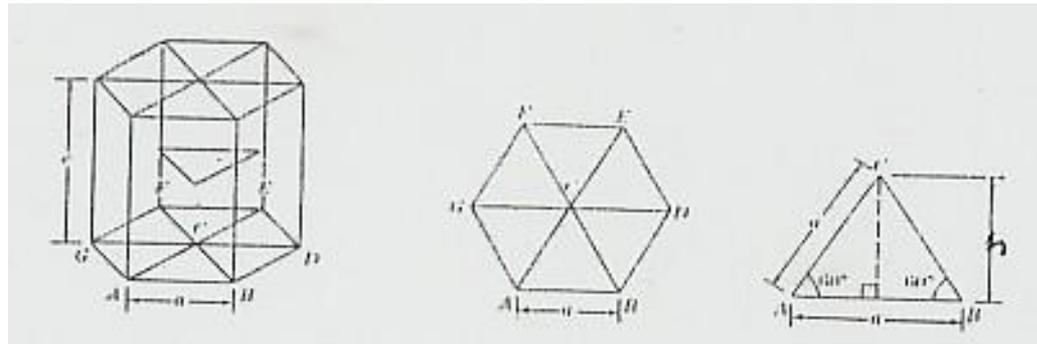
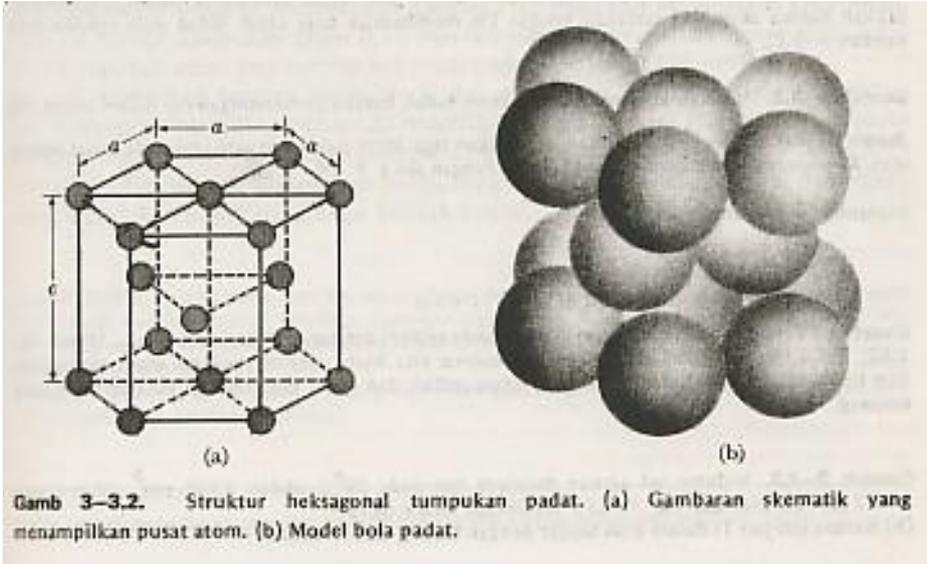
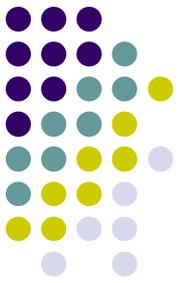
The diagram shows the APF formula with components highlighted in colored boxes and arrows pointing to their respective parts:

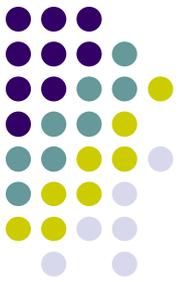
- The number **4** is highlighted in a green box, with an arrow pointing to it from the label "atoms/unit cell".
- The term $\frac{4}{3} \pi (\sqrt{2}a/4)^3$ is highlighted in an orange box, with an arrow pointing to it from the label "volume/atom".
- The term a^3 is highlighted in a blue box, with an arrow pointing to it from the label "volume/unit cell".



4. Hexagonal Closed Packed (hcp)

lihat gambar





Jumlah atom / unit sel

$$= 3 + 1/6 \times 12 + 1/2 \times 2$$

$$= 6 \text{ atom}$$

Volume satu unit sel = luas x tinggi

Luas permukaan atas = $1/2 \times a \times h$

$$= 1/2 \times a \times a \cos 30 \times 6$$

Volume = $\{ 6/2 \times a^2 \times \cos 30^\circ \} C$

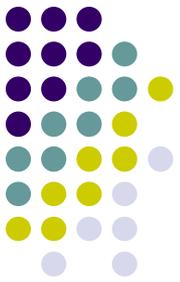
harga C, tergantung dari jenis atom/unsur (lihat tabel)

sehingga APF =

$$\frac{4/3 \pi R^3 \cdot 6}{(3a^2 \cos 30^\circ) C}$$

dimana $R = a/2$

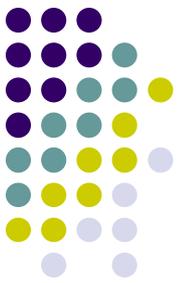
kesimpulan



Tabel : struktur kristal

struktur kristal	a	jumlah atom	volume atom dalam unit sel	APF	volume kekosongan
Simple cubic	2R	1	$\frac{4}{3} \pi (a/3)^3$	52 %	48 %
bcc	$\frac{4R}{\sqrt{3}}$	2	$\frac{8}{3} \pi (a\sqrt{3}/4)^3$	68 %	32 %
fcc	$\frac{4R}{\sqrt{2}}$	4	$\frac{16}{3} \pi (a\sqrt{2}/4)^3$	74 %	26 %
hcp	2R	6	$(3a^2 \cos 30^\circ)C$	$\frac{8\pi R^3}{(3a^2 \cos 30^\circ)C}$	

contoh soal : volume density



Tembaga mempunyai struktur kristal fcc dgn jari-jari atom
 $R = 0,1278$ (nm)

Hitung density (ρ_v) dari Cu tsb dlm mega gram, dimana masa
atom Cu = 63,54 (gr/mol)

Jawab :

$$\begin{aligned}\text{untuk fcc } a &= 4R / \sqrt{2} = 4 \times 0,1278 / \sqrt{2} \\ &= 0,361 \text{ (nm)}\end{aligned}$$

masa/unit sel = masa atom/bil avogadro

$$\text{masa 1 atom} = 63,54 \text{ (gr/mol)} / 6,02 \times 10^{23} \text{ (mol}^{-1}\text{)}$$

$$\begin{aligned}\text{masa 4 atom} &= 4 [63,54 \text{ (gr/mol)} / 6,02 \times 10^{23} \text{ (mol}^{-1}\text{)}] \\ &= 4,22 \times 10^{-22} \text{ (gr)} \\ &= 4,22 \times 10^{-28} \text{ (Mgr)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{volume Cu / unit sel} &= a^3 \\ &= (0,361 \times 10^{-4})^3 = 4,7 \times 10^{-29} \text{ (m}^3\text{)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{sehingga } \rho_v &= 4,22 \times 10^{-28} \text{ (Mgr)} / 4,7 \times 10^{-29} \text{ (m}^3\text{)} \\ &= 8,98 \text{ (gr/cm}^3\text{)}\end{aligned}$$

nilai ini kalau diperiksa pada tabel memenuhi (cocok)

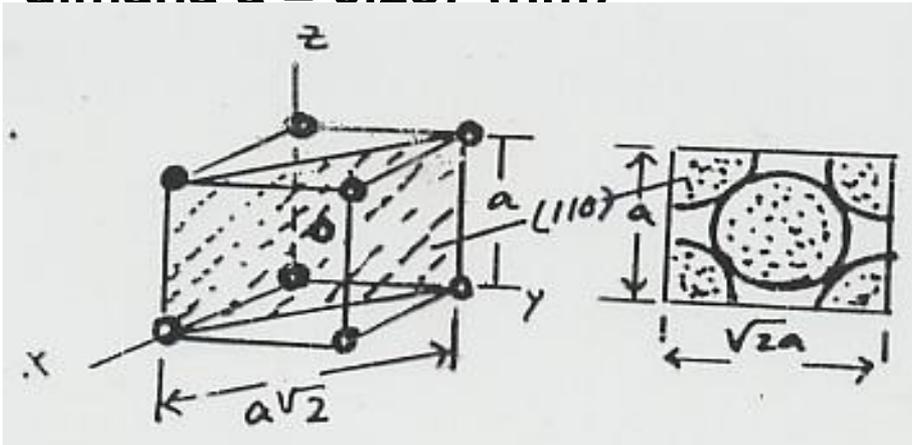
contoh soal : planar density

Planar Density (ρ_p) merupakan kerapatan atom persatuan luas pada bidang yg berpotongan

$$\rho_p = \text{jumlah atom} / \text{luas}$$



Hitung planar density pada bidang (110) dari besi bcc per mm^2 , dimana $a = 0.287$ (nm)



jumlah atom pd bidang
(110)

$$= 1 + 4 \times 1/4 \text{ (atom)}$$

$$= 2 \text{ atom}$$

luas bidang (110)

$$= a\sqrt{2} \times a = a^2\sqrt{2}$$

$$\text{Dengan demikian } \rho_p = 2 \text{ atom} / a^2\sqrt{2} = 2 / \sqrt{2} (0,287)^2$$

$$= 17,22(\text{atom}/\text{nm}^2)$$

$$= 17,2 \times 10^{13} \text{ (atom}/\text{nm}^3)$$



INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moch. Kahfi II No.RT.13, RT.13/RW.9, Srengseng Sawah, Kec. Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, DKI Jakarta
 Website : www.istn.ac.id / e-Mail : admin@istn.ac.id / Telepon : (021) 7270090

ISI PRESENSI MAHASISWA TEKNIK MESIN 2024 GENAP

Mata kuliah : MS1207 - Struktur dan Sifat Material

Nama Kelas : A

No	NIM	NAMA	TATAP MUKA										
			12 Mar 2025	19 Mar 2025	9 Apr 2025	23 Apr 2025	30 Apr 2025	7 Mei 2025	28 Mei 2025	4 Jun 2025	25 Jun 2025	2 Jul 2025	16 Jul 2025
Peserta Reguler													
1	21210009	KAMAL HAMNOER	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
2	21210010	MOCHAMMAD YAZID SASTRAWINATA	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
3	24210001	Mahendra Edwin	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
4	24210002	Dzaky Amir Mahmud	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
5	24210003	Fauzan Azhiima	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
6	24210004	Riski Maulana Akbar	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
7	24210005	Muhammad Nanda Noer Darmawan	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
8	24210008	Muhammad Noufal Hidayat	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
9	24210502	Rizky Aulia Riyadi					H	H	H	H	H	H	H
Paraf Ketua Kelas													
Paraf Dosen													



INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moch. Kahfi II No.RT.13, RT.13/RW.9, Srengseng Sawah, Kec. Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, DKI Jakarta
Website : www.istn.ac.id / e-Mail : admin@istn.ac.id / Telepon : (021) 7270090

LAPORAN NILAI PERKULIAHAN MAHASISWA

Program Studi S1 Teknik Mesin Periode 2024 Genap

Mata kuliah : Struktur dan Sifat Material

Nama Kelas : A

Kelas / Kelompok :

Kode Mata kuliah : MS1207

SKS : 3

No	NIM	Nama Mahasiswa	TUGAS INDIVIDU (20,00%)	UTS (30,00%)	UAS (40,00%)	KEHADIRAN (10,00%)	Nilai	Grade	Lulus	Sunting KRS?	Info
1	21210009	KAMAL HAMNOER	70.00	60.00	75.00	75.00	69.50	B	✓		
2	21210010	MOHAMMAD YAZID SASTRAWINATA	70.00	70.00	75.00	75.00	72.50	B+	✓		
3	24210001	Mahendra Edwin	70.00	80.00	80.00	75.00	77.50	A-	✓		
4	24210002	Dzaky Amir Mahmud	70.00	70.00	75.00	75.00	72.50	B+	✓		
5	24210003	Fauzan Azhiima	70.00	75.00	80.00	75.00	76.00	A-	✓		
6	24210004	Riski Maulana Akbar	70.00	70.00	75.00	75.00	72.50	B+	✓		
7	24210005	Muhammad Nanda Noer Darmawan	70.00	70.00	75.00	75.00	72.50	B+	✓		
8	24210008	Muhammad Noufal Hidayat	70.00	70.00	75.00	75.00	72.50	B+	✓		
9	24210502	Rizky Aulia Riyadi	70.00	70.00	80.00	75.00	74.50	B+	✓		
Rata-rata nilai kelas			70.00	70.56	76.67	75.00	73.33	B+			

Pengisian nilai untuk kelas ini ditutup pada **Rabu, 6 Agustus 2025** oleh **199505-003**

Tanggal Cetak : Rabu, 20 Agustus 2025, 19:35:50

Paraf Dosen :

Ir. RUDI SAPUTRA, MT.

