

# Struktur Padatan Anorganik

Dr. Ahmad Mudzakir, M.Si.



## PENDAHULUAN

---

Penemuan difraksi sinar-x yang dapat memberikan informasi rinci tentang struktur padatan ternyata memberikan sumbangan yang tidak sedikit pada perkembangan bidang kimia anorganik pada awal abad ke-20. Bersamaan dengan makin dipahaminya kerumitan keadaan kristalin maka dasar teoritis yang dapat menjelaskan bagaimana gaya-gaya yang bekerja dapat menyatukan keadaan padat ini juga telah disusun, dicobakan dan kemudian disempurnakan.

Modul ini akan membawa Anda untuk dapat mengeksplorasi apa yang dewasa ini dapat diketahui tentang struktur padatan anorganik. Modul ini merupakan modul pertama dari sembilan modul. Tema perkuliahan Kimia Anorganik 2 adalah kimia unsur logam dan persenyawaannya. Pembahasan tema perkuliahan dapat dilakukan dengan baik jika konsep tentang struktur padatan telah dikuasai dengan baik. Modul pertama ini merupakan prinsip dasar yang akan mempermudah Anda memahami kimia unsur-unsur logam dan persenyawaannya yang dibahas pada Modul 5 (Logam Alkali), Modul 6 (Logam Alkali Tanah), Modul 7 (Logam V, Cr, dan Mn), Modul 8 (Logam Fe, Co, dan Ni) dan Modul 9 (Logam Cu, Ag, dan Au).

Padatan biasanya terdiri dari atom, molekul atau ion yang tersusun kaku dalam geometri berulang dari partikel-partikel yang disebut dengan kisi kristal. Kristal biasanya dikelompokkan berdasarkan interaksi yang terjadi antarpartikel penyusunnya. Interaksi ini meliputi ikatan ionik, logam dan kovalen sebagaimana juga interaksi intermolekuler lainnya seperti ikatan hidrogen, gaya dipol-dipol, dan gaya van der Waals.

Setelah mempelajari modul ini, Anda diharapkan dapat memahami struktur padatan logam padatan, padatan ionik, dan beberapa aspek yang berkaitan dengannya.

Secara lebih khusus, setelah mempelajari modul ini, Anda diharapkan dapat:

1. menjelaskan karakteristik umum padatan logam dan perbedaannya dengan padatan ionik dan padatan molekuler;
2. menerapkan teori dan model ikatan logam untuk menjelaskan sifat-sifat tertentu logam;
3. menjelaskan sifat tertentu logam berkaitan dengan penataan atom-atom logam dalam kisi kristal;
4. menjelaskan karakteristik umum padatan ionik dan perbedaannya dengan padatan logam dan padatan molekuler;
5. menjelaskan pembentukan ion;
6. menjelaskan beragam sistem kristal padatan ionik dan perbedaannya;
7. menghitung angka banding jejari dan kaitannya dengan struktur padatan ionik;
8. menjelaskan beragam paduan logam dan sifat-sifatnya;
9. menjelaskan beragam ketidaksempurnaan kristal dan penyebabnya;
10. menjelaskan beragam bahan non kristalin dan sifatnya.

Untuk dapat mencapai kompetensi yang diharapkan, modul ini dibagi dalam tiga kegiatan belajar, yaitu Kegiatan Belajar 1 yang membahas tentang padatan logam, Kegiatan Belajar 2 membahas tentang padatan ionik, dan Kegiatan Belajar 3 yang membahas tentang ketidakmurnian dan ketidaksempurnaan kristal.

Perhatikanlah hal-hal berikut ini agar Anda dapat menguasai dengan mudah apa-apa yang menjadi tuntutan modul pertama ini sebagai berikut.

1. Bacalah dengan cermat bagian pendahuluan modul ini sehingga Anda memahami benar apa, untuk apa, dan bagaimana caranya mempelajari modul ini.
2. Sepintas bacalah keseluruhan modul ini untuk menangkap gambaran lengkap apa yang ingin disampaikan. Setelah itu temukan kata-kata kunci yang merupakan intisari modul. Glosarium yang ada pada bagian akhir modul dapat menuntun Anda menemukan kata-kata kunci dimaksud.
4. Setelah ide pokok modul dapat Anda tangkap dan kata-kata kunci juga sudah Anda peroleh, maka mulailah Anda baca dengan lebih rinci apa-apa yang merupakan ide pokok tersebut. Berilah tanda dan buatlah

komentar bagian-bagian yang menurut Anda menarik. Di tengah-tengah Anda mempelajari rincian penjelasan, mungkin Anda diharapkan menjawab soal-soal latihan. Kerjakanlah soal latihan tersebut, karena soal latihan memang dibuat agar Anda bisa menguasai modul ini dengan lebih baik dengan jalan menuntun Anda menemukan sendiri hal-hal yang akan memperkuat penjelasan.

5. Pelajarilah secara berurutan tiap kegiatan belajar. Pada setiap kegiatan belajar disediakan beberapa soal tes formatif. Kerjakanlah soal tersebut, untuk mengukur kemampuan Anda menguasai modul. Jika lebih dari 80% soal-soal tes formatif itu dapat Anda kerjakan dengan benar, lanjutkanlah ke kegiatan belajar berikutnya secara berurutan. Jika tidak, maka kembalilah pada penjelasan modul, terutama bagian-bagian yang Anda anggap sukar. Setelah cobalah sekali lagi Anda mengerjakan soal-soal tes formatif sehingga Anda merasa telah menguasai dengan baik.

## KEGIATAN BELAJAR 1

## Padatan Logam

Padatan logam dapat dicirikan oleh beberapa sifat fisiknya yang khas. Sifat-sifat ini merupakan sifat umum logam. Pengecualian dari sifat-sifat ini dapat ditemukan pada beberapa jenis logam tertentu. Beberapa sifat umum logam adalah sebagai berikut.

1. Logam mempunyai konduktivitas listrik yang tinggi dan sifat ini akan melemah dengan meningkatnya suhu.
2. Logam merupakan penghantar panas yang baik.
3. Logam mempunyai harga titik leleh dan titik didih yang tinggi.
4. Logam memiliki sifat kilau yang khas pada permukaannya.
5. Logam mempunyai kerapatan yang tinggi dan merupakan bahan yang cukup keras.
6. Logam dapat ditempa.
7. Logam tahan terhadap tekanan tinggi dan mempunyai elastisitas tinggi.
8. Logam tidak dapat ditembus cahaya.
9. Logam mengkristal dalam sistem tertentu yang mempunyai bilangan koordinasi tinggi (8, 12, atau 14).
10. Logam membentuk larutan padat yang disebut alloy dengan sifat-sifat logam.
11. Logam berkecenderungan membentuk senyawa non stoikiometrik dengan sifat-sifat logam. Dalam senyawa ini atom-atom seperti hidrogen, boron, karbon atau nitrogen terperangkap dalam celah tertentu dari struktur logam.
12. Logam umumnya merupakan unsur elektropositif.
13. Kereaktifan logam meningkat sejalan dengan makin kecilnya ukuran partikel.

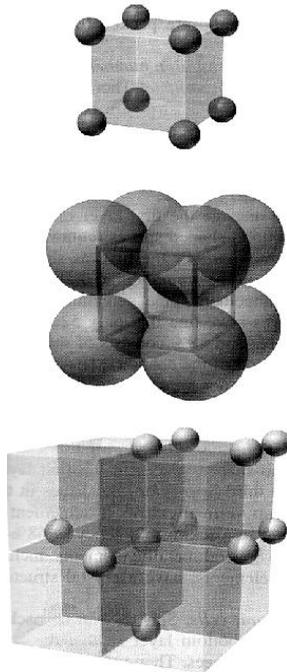
**A. SUSUNAN ATOM DALAM KISI KRISTAL LOGAM**

Kekerasan, kerapatan, titik leleh, panas pembentukan dan penguapan serta sifat-sifat lainnya dari logam dapat dihubungkan dengan susunan atom-atom dalam kisi kristal logam. Struktur logam murni dapat dengan mudah digambarkan karena atom-atom yang membentuk padatan tersebut dapat digambarkan sebagai bola sempurna dan satu sama lain identik. Berdasarkan

pola difraksi sinar-X, atom-atom logam tersusun menurut salah satu dari empat struktur dasar berikut: kubus sederhana (*simple cubic, sc*); kubus pusat badan (*body centered cubic, bcc*); kubus terjejal (*cubic closed packed, ccp*); dan heksagonal terjejal (*hexagonal closed packed, hcp*).

Kubus sederhana dapat dibentuk dengan menyusun bola-bola itu membentuk bidang segi empat datar. Lapisan kedua bidang segi empat datar berada tepat di atas bola-bola lapisan pertama, dan ini dilakukan berulang-ulang. Setiap bola dalam struktur ini bersinggungan dengan empat bola lain yang identik dalam bidang datar yang sama. Selain itu juga bersinggungan dengan satu bola dari bidang atas dan satu bola dari bidang bawahnya. Karena setiap atom dalam struktur kubus sederhana dapat membentuk ikatan dengan tetangga terdekatnya, maka setiap bola dikatakan memiliki bilangan koordinasi enam.

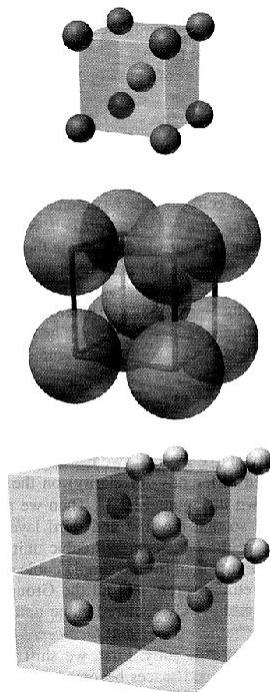
Struktur kubus sederhana tidak efisien dalam penggunaan ruang. Hanya sekitar 52% dari ruang yang tersedia dapat dihuni secara nyata oleh partikel-partikel dalam struktur kubus sederhana, sisanya merupakan ruang kosong.



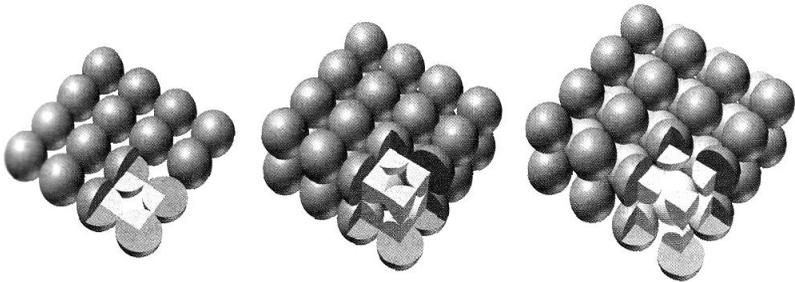
Gambar 1.1.  
Struktur Kubus Sederhana

Penggambaran struktur kubus pusat badan dapat dilakukan pertama kali dengan menyusun bola ke dalam bidang segi empat datar, tapi satu sama lain tidak bersinggungan. Susunan bola untuk bidang segi empat datar kedua menempati celah-celah bidang datar pertama. Susunan bola bidang datar ketiga menempati celah-celah bidang datar kedua, dan seterusnya. Hasilnya adalah struktur dimana posisi bidang atom dengan urutan genap identik, demikian pula posisi bidang atom yang berurutan ganjil akan identik. Susunan ini dapat dilambangkan dengan struktur berulang AB AB AB AB. Dalam struktur kubus berpusat badan, tiap bola bersinggungan dengan empat bola dari bidang atas dan empat bola dari bidang di bawahnya, yang diposisikan di sudut-sudut kubus. Satuan berulang dalam struktur ini adalah kubus delapan bola dengan bola kesembilan identik dalam pusat badan. Bilangan koordinasi struktur kubus pusat badan adalah delapan.

Kubus pusat badan lebih efisien dalam menggunakan ruang daripada kubus sederhana, yaitu sekitar 68% ruang diisi.



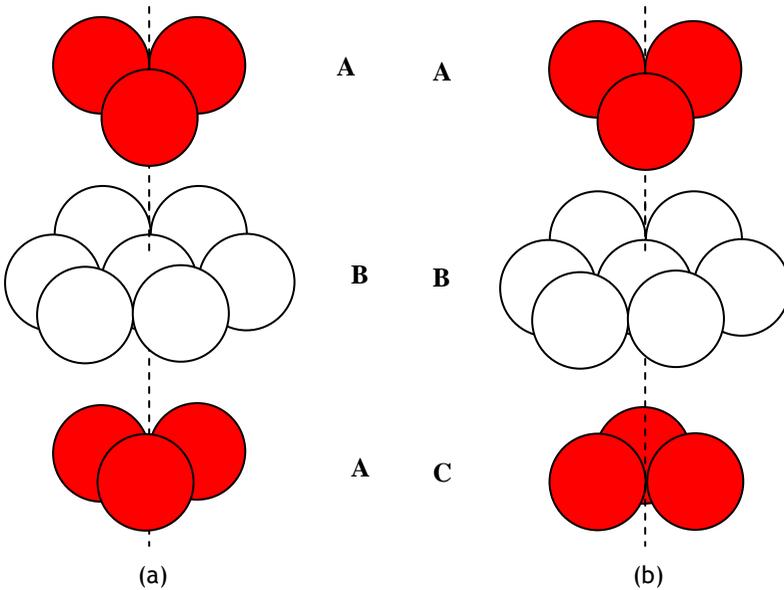
Gambar 1.2.  
Struktur Kubus Pusat Badan



Gambar 1.3.  
Penyusunan Bola dalam Kubus Sederhana dan Kubus Pusat Badan

Dalam struktur terjejal penggunaan ruang relatif lebih efisien. Terdapat dua macam struktur terjejal. Penggambaran kedua struktur terjejal tersebut dapat dimulai dengan menyusun bola yang berbidang datar atau lapisan dimana setiap bola bersinggungan dengan enam bola lain yang diorientasikan ke arah sudut heksagonal. Bidang kedua dibentuk dengan menyusun bola di atas celah yang membentuk segitiga pada bidang pertama. Bola-bola pada bidang ketiga susunannya dapat diarahkan langsung di atas bola pada bidang pertama membentuk susunan dengan struktur berulang AB AB AB AB. Karena struktur ini adalah susunan bidang bergantian dari bola terjejal heksagonal maka susunan seperti itu dinamakan struktur heksagonal terjejal. Pada struktur heksagonal terjejal, tiap bola bersinggungan dengan tiga bola dari bidang atas, tiga bola dari bidang di bawahnya, dan enam bola pada bidang yang sama. Bilangan koordinasi dalam struktur heksagonal terjejal adalah 12 (dua belas).

Terdapat cara lain untuk menempatkan susunan bola pada bidang ketiga selain menurut cara heksagonal terjejal. Atom-atom pada bidang ketiga dapat disusun di atas celah bidang pertama yang tidak digunakan pada pembentukan bidang kedua. Hasilnya adalah suatu struktur dengan pola ABC ABC ABC..., yang disebut kubus terjejal. Pada kubus terjejal, setiap bola dalam struktur ini bersinggungan dengan enam bola lain pada bidang yang sama, tiga bola dari bidang atas dan tiga bola dengan bidang di bawahnya. Bilangan koordinasi untuk struktur ini sama, yaitu dua belas.



Gambar 1.4.

Pola Susunan Struktur Terjejal [(a). Struktur Heksagonal Terjejal (b). Struktur Kubus Terjejal]

Dalam struktur heksagonal terjejal dan struktur kubus terjejal, ruang yang diisi mencapai 74%. Pada struktur heksagonal terjejal, atom-atom pada bidang pertama letaknya searah dengan atom-atom pada bidang ketiga. Sedangkan pada kubus terjejal, atom-atom pada bidang ketiga berbeda arah, diorientasikan  $180^\circ$  relatif terhadap bidang pertama.

Berkaitan dengan efisiensi penggunaan ruang suatu struktur kristal tertentu, maka perlu dikemukakan pengertian isi satuan sel. Isi satuan sel berarti jumlah partikel efektif yang terdapat dalam satuan sel. Karena dalam kisi setiap titik selanjutnya dihubungkan dengan titik lain, jumlah partikel efektif dalam satuan sel dapat dihitung sebagai berikut.

1. Karena sebuah sudut dipunyai oleh delapan kubus, setiap partikel pada sudut memberikan  $1/8$  bagiannya pada setiap kubus.
2. Sebuah sisi dipunyai oleh empat kubus, hanya  $1/4$  dari partikel yang secara efektif dipunyai oleh satu satuan sel kubik.

3. Sebuah muka dipunyai oleh dua kubus, hanya 1/2 dari partikel yang secara efektif dipunyai kubus.
4. Setiap partikel dalam satuan sel kubik memberikan bagiannya pada satuan sel.

Jika jumlah partikel efektif yang terdapat dalam satuan sel diketahui, maka massa satuan sel yang bersangkutan dapat dihitung. Massa suatu atom dapat dihitung dengan membagi massa molar spesi yang bersangkutan dengan bilangan Avogadro, kemudian hasilnya dikalikan dengan jumlah atom dalam satuan sel. Berkaitan dengan hal ini perlu pula dikemukakan pengertian kerapatan ideal kristal.

Yang dimaksud kerapatan ideal ( $d$ ) adalah kerapatan teoretis dari satuan sel kristal, dan didefinisikan sebagai:

$$d = \frac{M}{V}$$

di mana  $M$  adalah massa efektif dari satuan sel dan  $V$  adalah volume satuan sel. Ini dapat dihitung masing-masing dari persamaan-persamaan berikut.

$$V = a b c [1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma]^{1/2}$$

untuk satuan sel kubus:

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

maka:

$$V = a b c$$

$$M = Z m$$

dengan  $Z$  menyatakan jumlah partikel efektif dalam satuan sel dan  $m$  adalah massa masing-masing partikel. Jadi persamaan di atas dapat ditulis sebagai:

$$d = \frac{Z M}{L V}$$

dengan  $M$  adalah bobot molekul dan  $L$  adalah bilangan Avogadro. Untuk kristal NaCl misalnya dengan kubik berpusat muka dan panjang sisi kubusnya  $5,62 \times 10^{-10}$  m maka kerapatan idealnya dapat dihitung sebagai berikut.

Dalam satuan sel NaCl, setiap ion Cl menempati sudut dan pusat muka kubus. Jumlah ion  $\text{Cl}^-$  efektif adalah  $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 4$ . Ion menempati pusat tepi dan pusat kubus, maka  $Z_{\text{Na}^+} = (1 + 12) \times 1/4 = 4$ . Jumlah molekul NaCl efektif = 4. Massa molekul NaCl =  $58,5 \text{ g mol}^{-1}$  maka:

$$d = \frac{(4)(58,5 \text{ g mol}^{-1})(10^{-3} \text{ kg g}^{-1})}{(6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(5,62 \times 10^{-10} \text{ m})^3} = 2,19 \times 10^{23} \text{ kg m}^{-3}$$

Kerapatan teoretis yang diperoleh di atas adalah dengan asumsi bahwa kisi ditempati oleh spesi-spesi. Umumnya tidak demikian, dan kerapatan eksperimen selalu lebih kecil dibandingkan kerapatan ideal. Hal ini dibuktikan bahwa tidak semua titik kisi ditempati oleh atom-atom dan beberapa tetap tidak ditempati. Titik-titik ini disebut "lowongan". Persen pengisian tempat-tempat kisi dapat diperoleh dari perbandingan kerapatan eksperimen terhadap kerapatan teoretis, yaitu:

$$\% \text{ pengisian tempat} = \frac{d_{\text{exp}}}{d_{\text{hitung}}} \times 100$$

## B. STRUKTUR KRISTAL LOGAM

Logam polonium memiliki struktur kubus sederhana. Golongan alkali mengkristal dengan struktur kubus pusat badan, sedangkan logam Cu, Ag dan Au mengkristal dengan struktur kubus pusat muka. Hal ini membuat logam alkali bersifat lunak dengan kerapatan dan titik leleh yang rendah karena rendahnya energi kohesi logam alkali dibandingkan logam Cu, Ag dan Au. Logam Rb dengan massa atom 85,48 mempunyai kerapatan dan titik leleh yang jauh lebih rendah dibandingkan logam Cu dengan massa atom 63,37. Titik leleh Rb dengan kerapatan  $1480 \text{ kg m}^{-3}$  adalah 311,7K; sedangkan Cu dengan kerapatan  $8920 \text{ kg m}^{-3}$  adalah 1356K.

Karena faktor ukuran dan energi kohesi; logam Be, Mg, Zn dan Cd mempunyai struktur heksagonal terjejal; Ca dan Sr mengkristal dalam bentuk kubus pusat muka; sedangkan Ba dalam struktur kubus pusat badan.

Struktur kristal logam transisi sulit untuk diperkirakan karena logam ini membentuk beberapa allotrop yang mempunyai struktur kristal berbeda dan menunjukkan sifat fisika yang juga berbeda. Besi misalnya mempunyai tiga allotrop. Allotrop  $\alpha$  dan  $\delta$  mengkristal dalam bentuk kubus pusat badan, sedangkan allotrop  $\gamma$  mempunyai struktur kubus pusat muka. Allotrop  $\alpha$  dari logam Cr mempunyai struktur kubus pusat badan, sedangkan allotrop  $\beta$  nya berstruktur heksagonal terjejal. Berbagai bentuk allotrop mempunyai kestabilan yang berbeda dan mengkristal pada kondisi suhu dan tekanan yang juga berbeda.

## C. IKATAN DALAM LOGAM

Terdapat beberapa teori yang menerangkan ikatan pada logam. Teori untuk ikatan logam harus dapat menjelaskan sifat-sifat logam yang ada terutama sifat koordinasi dan konduktansinya yang tinggi.

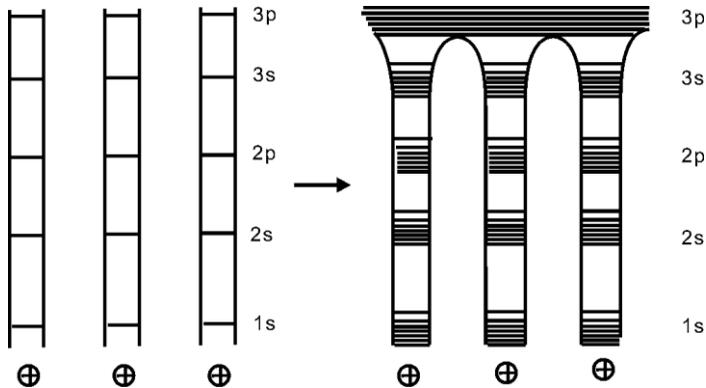
### 1. Model Elektron Bebas

Pada tahap awal perkembangan teori logam, terutama karena adanya sifat penghantar listrik, telah disarankan suatu model ikatan logam yang didasarkan pada adanya elektron bebas dalam larik beraturan ion logam positif. Elektron dianggap bergerak dengan bebas mengikuti statistika klasik di seluruh zat padat seperti molekul gas. Kestabilan logam terbentuk akibat dari tarikan antara ion positif dan gas elektron. Pendekatan ini pertama kali disarankan oleh Drude dan kemudian diperluas oleh Lorentz.

Gerakan elektron digambarkan menggunakan statistika klasik Maxwell-Boltzman dan mekanika kuantum dengan menganggap elektron terkurung dalam suatu kotak yang mempunyai ukuran sama dengan dimensi kristal logam. Energi dari satu partikel dalam kotak satu dimensi dengan ukuran  $a$  dapat dilukiskan dalam bentuk persamaan:

$$E = \frac{n^2 h^2}{8ma^2}$$

Selisih tingkat energi antara dua tingkat energi akan menurun sejalan dengan makin besarnya ukuran kotak  $a$ . Tingkat-tingkat energi yang berdekatan satu sama lain akan cenderung bergabung. Jika terdapat cukup tingkat energi yang berdekatan maka akan terbentuk suatu distribusi kontinu dalam suatu kisaran energi terbatas yang dapat dilukiskan sebagai suatu pita tenaga.



Gambar 1.5.  
Pita-pita Energi dalam Kristal Logam

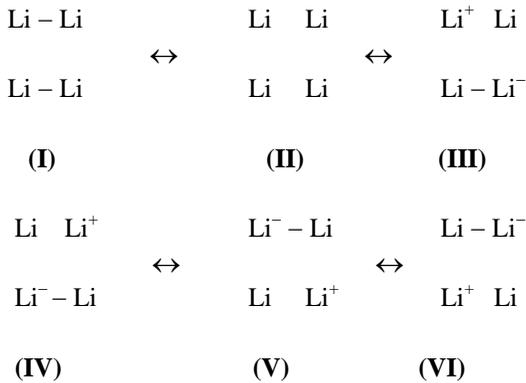
Meskipun teori ini mampu menjelaskan banyak sifat logam dan sifat ini akan meningkat sejalan dengan makin banyaknya elektron valensi, tetapi perhitungan kuantitatif yang berkaitan dengan energi kohesif, konduktansi spesifik, panas jenis dan besaran lainnya tidak bersesuaian dengan nilai hasil pengamatan dan kecenderungannya.

## 2. Model Resonansi dari Teori Ikatan Valensi

Tingginya bilangan koordinasi logam dalam padatan dibandingkan dengan jumlah elektron valensi yang tersedia untuk ikatan menyebabkan anggapan bahwa terdapat ikatan antar dua elektron terlokasi dalam kristal logam harus dikesampingkan. Untuk mengatasi masalah ini sekaligus untuk menerangkan ikatan pada logam, pada tahun 1965 Pauling menggunakan konsep resonansi. Menurut model ini, ikatan logam dianggap sebagai ikatan kovalen yang dapat melakukan resonansi. Model resonansi yang dikembangkan oleh Pauling didasarkan pada hasil pengamatan terhadap pola difraksi sinar-X oleh kristal litium. Dari hasil difraksi sinar-X oleh logam litium diketahui bahwa setiap atom Li dikelilingi oleh 8 atom Li yang lain. Jika dihubungkan dengan konfigurasi elektron Li yaitu  $1s^2 2s^1$ , tampaknya tidak mungkin satu atom Li dapat mengikat delapan atom Li yang lain, hanya dengan satu elektron valensi.

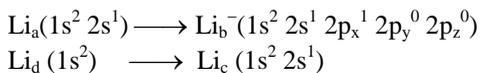
Menurut Pauling, jika setiap atom Li menggunakan elektron valensinya untuk berikatan, maka harus terjadi resonansi pasangan ikatan Li-Li secara bersamaan di dalam kristalnya. Resonansi yang mungkin terjadi pada kristal

litium ditunjukkan pada Gambar 1.6. Untuk memperoleh kestabilan yang lebih tinggi, maka bentuk resonansi harus lebih banyak.



Pada struktur III, IV, V, dan VI terdapat sebuah atom Li yang bermuatan negatif membentuk ikatan kovalen dengan dua atom Li yang lain, dan sebuah ion  $\text{Li}^+$ . Terjadinya ikatan kovalen pada bentuk-bentuk tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

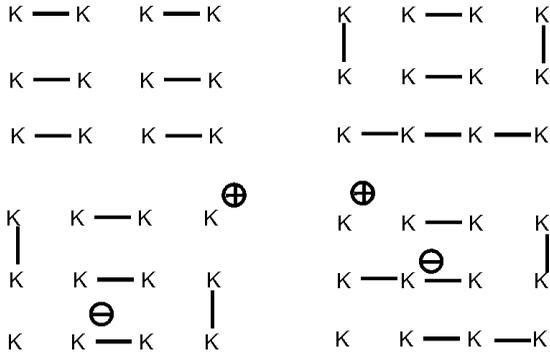
Empat atom litium misalnya  $\text{Li}_a$ ;  $\text{Li}_b$ ;  $\text{Li}_c$ ; dan  $\text{Li}_d$ , masing-masing mempunyai struktur elektron  $1s^2 2s^1 2p_x^0 2p_y^0 2p_z^0$ . Jika atom  $\text{Li}_d$  memberikan elektron valensinya kepada atom  $\text{Li}_b$ , maka  $\text{Li}_d$  menjadi ion  $\text{Li}_d^+$  ( $1s^2$ ), dan atom  $\text{Li}_b$  menjadi ion  $\text{Li}_b^- (1s^2 2s^1 2p_x^1 2p_y^0 2p_z^0)$ . Orbital  $2s^1$  dan  $2p_x^1$  membentuk orbital hibrida sp, masing-masing dapat membentuk ikatan kovalen dengan atom  $\text{Li}_a$  dan atom  $\text{Li}_c$ .



Orbital  $2p_y^0$  dan  $2p_z^0$  pada ion  $\text{Li}_b$  disebut orbital logam, dan dapat menerima aliran elektron serta memberikan sumbangan pada daya hantar listrik.

Pada lapisan atom-atom dalam kisi kristal logam kalium, setiap atom K juga hanya mempunyai satu elektron kulit valensi yang dapat disumbangkan bagi pembentukan ikatan dengan hanya satu dari delapan (atau 14) atom K tetangganya dalam struktur kubus berpusat muka (fcc). Ikatan ini dapat pula terionisasi dan membentuk struktur kanonik ion yang juga merupakan bagian

dalam stabilisasi resonansi kisi logam. Jika jumlah dari bentuk-bentuk resonansi ini sangat banyak maka kristal logam akan mengalami stabilisasi yang besar, membentuk ikatan terdelokalisasi dengan energi resonansi dan energi kohesi logam yang tinggi.



Gambar 1.6.  
Beberapa Bentuk Kanonik Logam Kalium

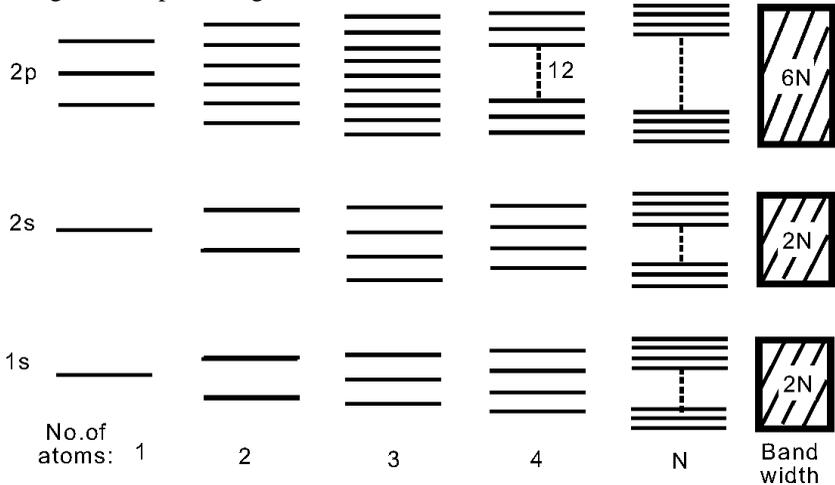
Seperti pada litium, jika kalium membentuk struktur  $\text{K}^-$  maka orbital 4p lah yang digunakan untuk mengakomodasi empat elektron. Energi yang dibutuhkan untuk mempromosikan elektron dari orbital 4s ke orbital 4p dapat terealisasi melalui besarnya energi resonansi.

### 3. Model Pita Valensi dari Teori Orbital Molekul

Kristal logam dapat dipandang sebagai molekul raksasa dimana beberapa orbital molekul mencakup keseluruhan logam, sehingga logam dapat dianggap sebagai ikatan terdelokalisasi yang ekstrem. Logam dapat dipandang sebagai deretan inti atom bermuatan positif yang beraturan dikelilingi oleh lautan elektron dari kulit terluar. Elektron-elektron ini bebas bergerak ke seluruh kristal logam, bahkan dengan voltase kecil sekalipun dapat menarik elektron ke satu arah membentuk arus listrik. Teori orbital molekul dapat memberikan gambaran secara rinci ikatan terdelokalisasi ini. Karena tingkat energi logam dipenuhi elektron menjadikan banyak tingkat-tingkat energi seolah-olah membentuk pita, sehingga teori orbital molekul logam sering disebut teori pita.

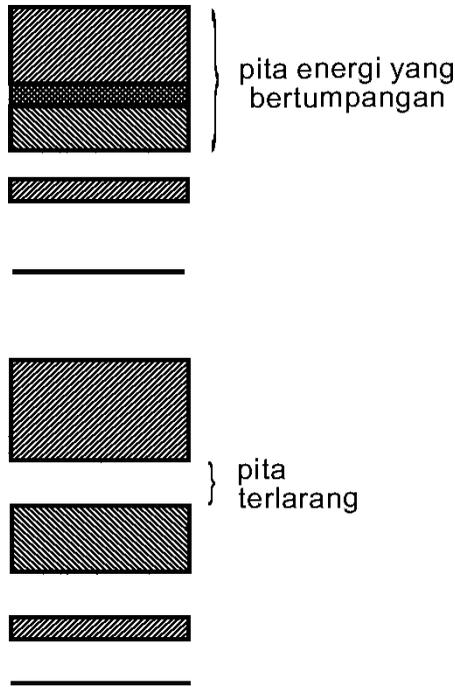
Kombinasi orbital atom menjadi orbital molekul menghasilkan pemisahan tingkat energi dari orbital atom asalnya. Tingkat pemisahan ini tergantung pada jarak antar inti dan orientasi orbital atomnya. Pembentukan

tingkat energi yang makin rapat dengan meningkatnya jumlah atom digambarkan dalam bentuk diagram seperti diperlihatkan pada Gambar 1.7. Jika jumlah atom terus meningkat, maka tingkat energi makin rapat menghasilkan pita energi.



Gambar 1.7.  
Pembentukan Tingkat Energi dari Tumpang Tindih Orbital Atom Jika Jumlah Atom Secara Progresif Meningkat

Pita energi dalam zat padat bersesuaian dengan tingkat energi sebuah atom, dan sebuah elektron dalam zat padat hanya dapat memiliki energi dalam pita energi ini. Beberapa pita energi dalam zat padat dapat bertumpang, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.8 (a). Dalam hal ini elektron memiliki distribusi kontinu (malar) dari energi yang diizinkan. Dalam zat padat lain pita energi bisa tak bertumpang [Gambar 1.8 (b)], dan selang di antaranya menyatakan energi yang tidak boleh dimiliki elektron. Selang seperti itu disebut pita terlarang, yakni pita dengan selang energi tanpa orbital molekul.



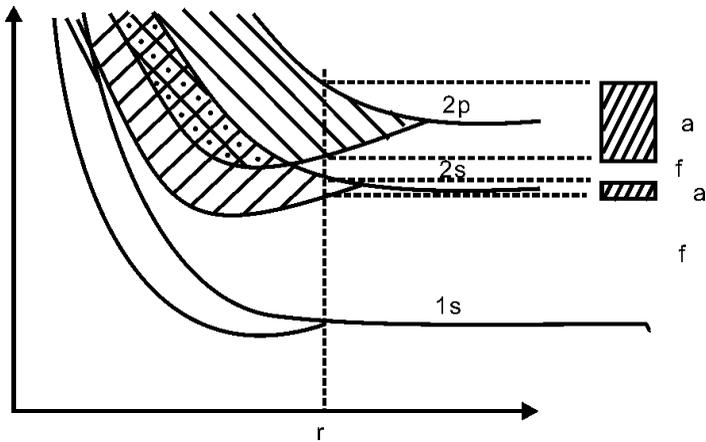
Gambar 1.8. (a).

Pita Energi dalam Zat Padat dapat Bertumpangan, (b). Pita terlarang memisahkan pita energi yang tidak bertumpangan.

Pemisahan antara tingkat-tingkat energi yang berbeda pada pita energi tergantung pada:

- perbedaan energi antar orbital atom, dan
- jarak antar inti.

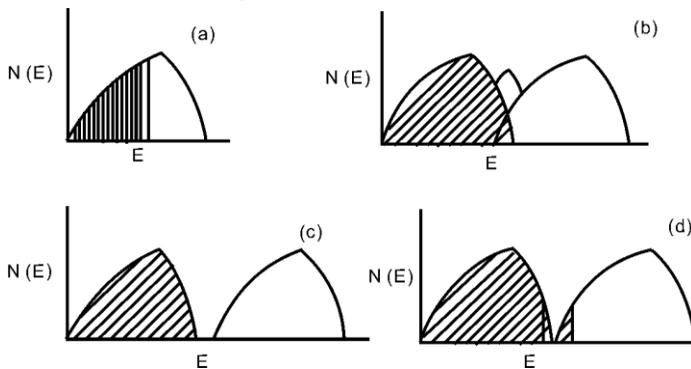
Pada jarak  $r$  yang relatif lebih tinggi tidak akan terjadi tumpang tindih orbital atom, tetapi jika jarak ini makin kecil dimulailah pembentukan pita energi. Makin kecil perbedaan tingkat energi antar orbital atom, makin tinggi jarak dimana tumpang tindih akan terjadi. Ini dapat terlihat jika tumpang tindih antara orbital  $2s$  dengan  $2p$  dibandingkan dengan tumpang tindih antara orbital  $1s$  dengan  $1p$ . Lebar pita untuk elektron pada orbital lebih dalam sangat kecil dan energinya hampir sama dengan orbital atomnya.



Gambar 1.9.  
Perubahan Energi Potensial E terhadap Jarak Antar Inti

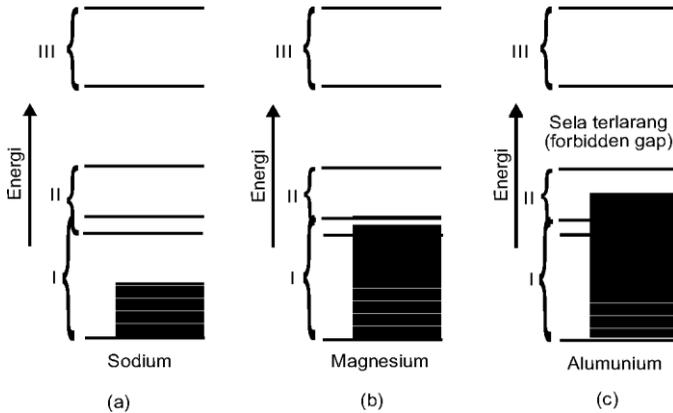
Lebar pita tidak semata-mata dipengaruhi jumlah atom, tetapi juga oleh luasnya interaksi antar orbital atom yang terjadi. Lebar pita yang besar terjadi untuk orbital berenergi tinggi karena lebih besarnya tumpang tindih. Lebar pita untuk pita terlarang akan menjadi lebih besar antara pita-pita energi rendah dibandingkan antar pita-pita berenergi lebih tinggi.

Fungsi distribusi  $L(E)$  elektron dengan energi  $E$  dalam sebuah pita diperlihatkan pada Gambar 1.10. Jarak antarpita dan pengisian pita akan menentukan sifat bahan menjadi konduktor, isolator, atau semikonduktor.



Gambar 1.10.  
Distribusi Pita Energi dalam (a). dan (b) Konduktor, (c). Insulator (Isolator) dan (d). Semikonduktor

*Konduktor.* Pada konduktor terdapat pita valensi yang kosong. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.11 (a) untuk logam natrium dan 1.11 (c) untuk logam aluminium.



Gambar 1.11.

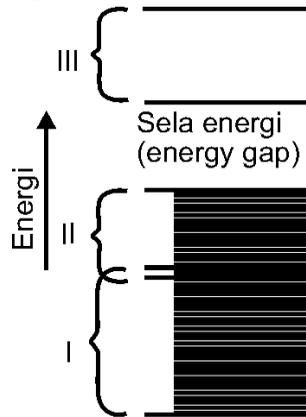
Pita energi (a) Natrium. Karena hanya memiliki satu elektron valensi per atom, pita valensi pertama (I) terisi separuh. (b) Magnesium. Pita pertama terisi penuh, tetapi pita kedua (II) tumpang tindih dan diisi beberapa elektron. (c) Aluminium. Dengan tiga elektron valensi, pita pertama (I) terisi penuh, pita kedua (II) terisi separuh.

Semua logam ini mempunyai pita kosong pada bagian atas pita valensinya.

Tingkat energi yang kosong dalam suatu pita penting bagi konduksi karena memungkinkan suatu elektron memasuki suatu tingkat energi yang lebih tinggi bila elektron bergerak menuju elektroda positif. Hal ini tidak mungkin terjadi seandainya pita energi terisi penuh dan suatu pita energi terlarang menutupinya.

Magnesium dengan dua elektron valensi per atom, seharusnya terisi pita valensi pertamanya. Ternyata bahwa pita-pita pertama dan kedua saling tumpang tindih [Gambar 1.11(b)]. Beberapa elektron dari sejumlah  $2N$  elektron ( $N$  adalah bilangan Avogadro, yang menyatakan jumlah atom) masuk ke dalam pita kedua dimana terdapat banyak sekali pita kosong yang dapat menerima elektron yang dipercepat. Hasilnya, magnesium bersifat konduktor. Sebaliknya, silikon, memberikan gambaran yang lain karena keempat elektron valensi per atom memenuhi kedua pita valensi pertama (Gambar 1.12). Selain itu, di atas pita kedua terdapat pita terlarang. Jadi, elektron-elektron tidak dapat di tingkatkan energinya dalam kedua pita

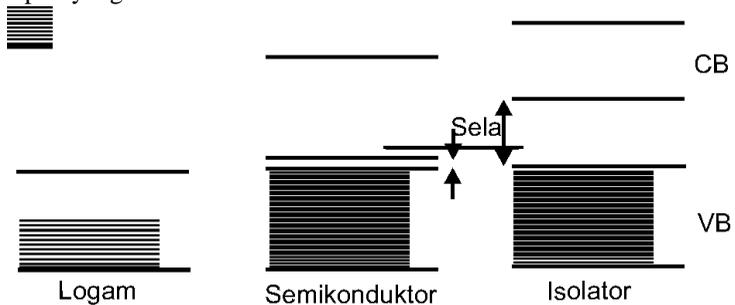
tersebut dan ada sela yang besar di bawah pita ketiga (III). Silikon bukan konduktor. Silikon adalah suatu semikonduktor, karena ukuran sela energi pita terlarang sedemikian sehingga elektron dengan energi yang tinggi dapat melompati sela memasuki pita konduksi.



Gambar 1.12.

Sela Energi Silikon. Empat elektron valensi per atom silikon mengisi kedua pita energi pertama. Antara pita kedua dan ketiga terdapat sela energi terlarang.

*Isolator.* Ditinjau dari segi pita energi, maka isolator adalah bahan yang mempunyai sela energi besar antara pita valensi yang paling banyak terisi dan pita kosong berikutnya, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.13. Sela itu sedemikian besarnya sehingga dapat kita katakan bahwa elektron terjebak dalam pita yang lebih rendah.

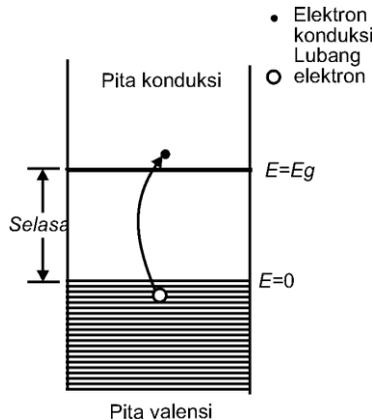


Gambar 1.13.

Konduktor, Semikonduktor dan Isolator. Konduktor memiliki pita energi yang tidak terisi. Semikonduktor memiliki sela terlarang yang sempit di atas pita valensi (VB) terisi yang teratas. Beberapa elektron dapat melompati sela memasuki pita konduksi (CB). Isolator mempunyai sela energi yang merupakan hambatan bagi elektron.

Elektron valensi biasanya digambarkan sebagai terikat dengan ion negatif atau ada dalam ikatan kovalen. Diperlukan energi sekitar  $7\text{eV}$  ( $= 1,1 \times 10^{-18}\text{ J}$ ) untuk memisahkan elektron dari ion  $\text{Cl}^-$  dalam  $\text{NaCl}$ , dan sekitar  $6\text{ eV}$  untuk memisahkan elektron dari ikatan kovalen intan. Energi aktivasi sebesar  $7\text{eV}$  dan  $6\text{eV}$  merupakan ukuran dari sela energi dan dapat dibandingkan dengan energi pada silikon dan germanium masing-masing sebesar  $1,1\text{ eV}$  dan  $0,7\text{ eV}$ . Sebagai patokan, diambillah sela energi sebesar  $4\text{ eV}$  ( $= 0,64 \times 10^{-18}\text{ J}$ ) untuk membedakan semikonduktor dengan isolator. Hal ini sesuai dengan kenyataan,  $\text{NaCl}$  dan intan adalah isolator elektronik sedang silikon dan germanium adalah semikonduktor.

*Semikonduktor.* Konduktor dan isolator dibedakan berdasarkan ukuran sela energi terlarangnya. Dalam semikonduktor, besar sela energi sedemikian sehingga jumlah elektron yang berarti dapat melompat melalui sela antara pita valensi terisi ke pita konduksi yang kosong seperti diperlihatkan pada Gambar 1.14.

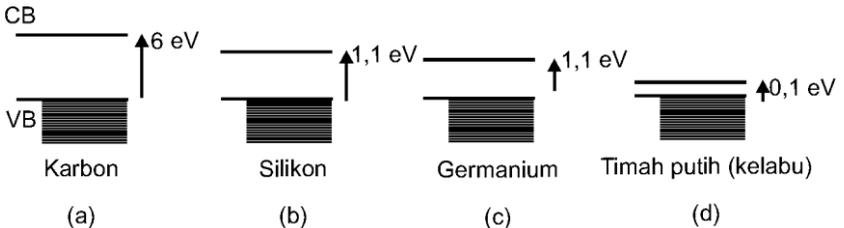


Gambar 1.14.

*Semikonduktor.* Dalam semikonduktor sebagian elektron valensi melompati sela energi terlarang. Elektron adalah pembawa muatan negatif dalam pita konduksi. Lubang elektron merupakan pembawa muatan positif dalam pita valensi.

Elektron dengan energi tambahan sekarang dapat membawa muatan ke elektroda positif. Di samping itu, lubang elektron yang terjadi dalam pita valensi dapat menghantarkan muatan karena elektron yang terletak di bagian yang lebih dalam dari pita dapat bergerak ke atas mengisi pita yang

dikosongkan tadi. Pada Gambar 1.15 terlihat sela energi untuk C (intan), Si, Ge dan Sn (kelabu).



Gambar 1.15.

Sela Energi Unsur-Unsur Golongan 14. Unsur-unsur ini dapat mempunyai struktur yang sama dan mempunyai pita yang terisi. Karena timah putih memiliki energi yang terkecil, pada suhu ruang, ia mempunyai elektron yang terbanyak dalam pita konduksi (CB), oleh karena itu mempunyai konduktivitas tertinggi.

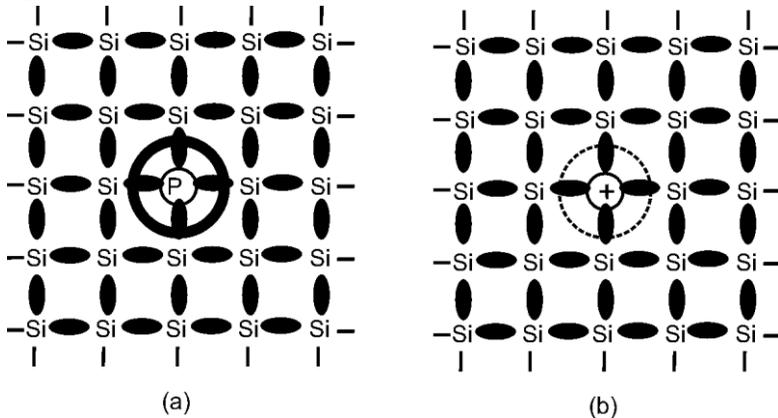
Sela dalam intan terlalu besar untuk dapat menghasilkan sejumlah pembawa muatan, sehingga intan termasuk kelompok isolator seperti diperlihatkan pada Tabel 1.1. Jumlah pembawa muatan meningkat berdasarkan urutan anggota golongan 14 sistem periodik dari karbon ke silikon, germanium, dan timah putih; akibatnya konduktivitas meningkat seperti terlihat pada tabel. Konduktivitas ini merupakan sifat dasar dari bahan dan tidak ditimbulkan oleh kotoran, sehingga disebut semikonduk intrinsik.

Dalam beberapa kasus, sifat semikonduktor tergantung pada kehadiran pengotor dalam kisi kristalnya, yang dikenal dengan istilah *doping*. Semikonduktor jenis ini disebut sebagai semikonduktor ekstrinsik. Pengotor bisa terdapat dalam order  $10^{20}$  atom per  $\text{cm}^3$  dengan fraksi mol kira-kira  $10^{-7}$ . Terdapat dua tipe semikonduktor terdoping secara ekstrinsik yakni semikonduktor tipe n dan semikonduktor tipe p.

Tabel 1.1.  
Sela Energi dalam Unsur-unsur Semikonduktor Golongan 14

Elemen	Sela energi (energy gap)		Pada 20°C	
	$10^{-18}$ J	eV	Bagian dari elektron valensi dengan energi $> E_g$	Konduktivitas a $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
C (intan)	0,96	~ 6	$\sim 1/30 \times 1021$	$< 10^{-16}$
Si	0,176	1,1	$\sim 1/10^{13}$	$5 \times 10^{-4}$
Ge	0,112	0,7	$\sim 1/10^{10}$	1
Sn (kelabu)	0,016	0,1	$\sim 1/5000$	$10^6$

*Semikonduktor jenis-n.* Ketidakmurnian mempengaruhi karakteristik bahan semikonduktor dengan menimbulkan elektron dan lubang elektron tambahan. Contoh untuk kasus ini adalah silikon yang mengandung fosfor. Fosfor mempunyai lima elektron valensi sedang silikon memiliki empat elektron. Pada Gambar 1.16 berikut diperlihatkan bahwa elektron tambahan tetap ada, terpisah dari pasangan elektron yang merupakan ikatan antara atom yang berdekatan. Elektron ini dapat membawa muatan ke arah elektroda positif. Sebaliknya elektron tambahan yang tidak dapat tinggal dalam pita valensi karena pita ini sudah penuh, menempati kedudukan dekat puncak sela energi.



Gambar 1.16.

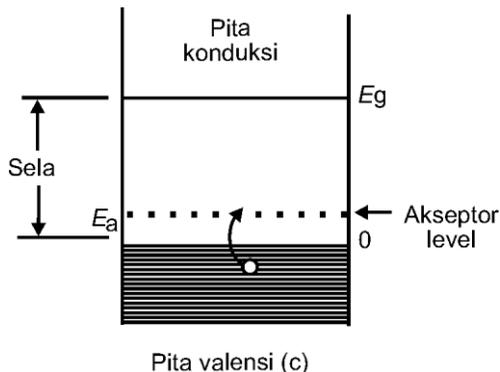
Semikonduktor Ekstrinsik Jenis-n. Atom-atom unsur golongan 15 mempunyai elektron valensi tambahan di samping ke-empat lainnya.

Elektron yang kelima ini dapat terlepas dari atom induk dengan energi tambahan sedikit saja, dan diberikan pada pita konduksi sebagai pembawa muatan. Pita energi donor,  $E_d$ , sedikit di bawah puncak sela energi. (a) Kotoran jenis-n, seperti fosfor. (b) Atom fosfor yang terionisasi (elektroda positif berada di sebelah kiri), dan (c). Model pita.

Dari pita energi donor  $E_d$ , elektron tambahan tadi dengan mudah dapat diaktifkan memasuki pita konduksi. Atom-atom unsur golongan 15 seperti N, P, As, dan Sb dapat menghasilkan pembawa muatan negatif, atau jenis-n untuk semikonduktor.

*Semikonduktor Jenis-p.* Unsur-unsur golongan Kelompok 13 seperti B, Al, Ga, dan In hanya mempunyai tiga elektron valensi. Jika unsur tersebut ditambahkan pada silikon sebagai ketidakmurnian, terjadilah lubang elektron.

Pada Gambar 1.17(a) dan (b) terlihat bahwa setiap atom aluminium dapat menerima sebuah elektron. Dalam proses ini, suatu muatan positif bergerak mendekati elektroda negatif. Gambar 1.15(c) memperlihatkan bahwa perbedaan energi untuk elektron agar dapat pindah dari pita valensi ke pita akseptor,  $E_a$ , jauh lebih kecil dari sela energi penuh. Elektron lebih mudah diaktifkan untuk menduduki tempat akseptor dibandingkan dengan pita konduksi. Lubang elektron yang tertinggal dalam pita valensi dapat menjadi pembawa muatan positif untuk semikonduktor jenis-p.



Gambar 1.17.

Semikonduktor Ekstrinsik Jenis-p. Atom unsur golongan 13 kurang satu elektron valensi dari rata-rata empat elektron. Atom ini dapat menerima sebuah elektron dari pita valensi, sehingga meninggalkan sebuah lubang elektron sebagai pembawa muatan. Pita akseptor,  $E_a$ , sedikit di atas bagian bawah sela energi.

- a). Ketidakmurnian jenis-p seperti aluminium.
- (b). Atom aluminium yang terionisasi (elektroda negatif di sebelah kanan), dan
- (c). Model pita.



**LATIHAN**

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Hitung jumlah partikel efektif dalam sistem kubik berpusat muka!
- 2) Litium membentuk kisi kubik berpusat muka. Jika panjang sisi kisi adalah  $3,50 \times 10^{-10}$  m dan kerapatan eksperimen adalah  $5,30 \times 10^2$  kg  $m^{-3}$ , hitung persentase pengisian tempat logam litium.
- 3) Jelaskan sifat-sifat logam yang dapat dijelaskan oleh teori elektron bebas!
- 4) Gambarkan bentuk-bentuk resonansi dari logam natrium!

- 5) Terangkan hantaran listrik dalam logam Be dan Li menggunakan teori orbital molekul!
- 6) Jika Ge ditambahkan pada GaAs maka Ge akan terdistribusi secara merata diantara bagian Ga dan As. Jika Se ditambahkan pula, bagian mana yang disukai Ge? GaAs yang didoping Se ini akan memberikan jenis semikonduktor apa, jenis n atau p?

*Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Dalam sistem kubik berpusat muka, ada delapan partikel pada sudut dan enam partikel pada pusat setiap muka. Jumlah partikel efektif adalah:  $(8 \times 1/8) + (6 \times 1/2) = 1 + 3 = 4$ .
- 2) Karena Li membentuk kisi kubik berpusat badan, maka jumlah atom efektif satuan sel adalah  $(8 \times 1/8) + 1 = 2$ .

$$\text{massa satuan sel} = \frac{2 \times 7}{6,02 \times 10^{23}} = 2,324 \times 10^{23} \text{ g}$$

$$\text{volume satuan sel} = (3,50 \times 3,50 \times 3,50)(10^{-30}) \text{ m}^3$$

$$d = \frac{2,324 \times 10^{-26}}{42,875 \times 10^{-30}} = 0,054 \times 10^4 \text{ kg m}^3$$

$$\% \text{ pengisian tempat} = \frac{5,3 \times 10^2 \text{ kg m}^3}{5,4 \times 10^2 \text{ kg m}^3} \times 100 = 98\%$$

- 3) Sifat-sifat logam yang dapat diterangkan oleh teori elektron bebas antara lain konduktivitas panas dan listrik, kedapattampaan, dan kilap logam.
- 4) Lihat bentuk kanonik logam kalium.
- 5) Lihat Gambar 1.10 untuk logam natrium, magnesium, dan aluminium. Kaitkan dengan jumlah elektron valensi pada orbital Be dan Li.  ${}_4\text{Be}: 1s^2 2s^2$  dan  ${}_3\text{Li}: 1s^2 2s^1$ .
- 6) Ge akan menyukai bagian Ga jika Se ditambahkan karena Se akan mengisi bagian As. Se akan memberikan elektron dan membentuk  $\text{Se}^+$ , sehingga akan terbentuk semikonduktor jenis n.

**RANGKUMAN**

---

Padatan logam dapat dicirikan oleh beberapa sifat fisiknya yang khas. Kekerasan, kerapatan, titik leleh, panas pembentukan dan penguapan serta sifat-sifat lainnya dari logam dapat dihubungkan dengan susunan atom-atom dalam kisi kristal logam. Berdasarkan pola difraksi sinar-X, atom-atom logam tersusun menurut salah satu dari empat struktur dasar berikut: kubus sederhana (*simple cubic*, sc); kubus pusat badan (*body centered cubic*, bcc); kubus terjejal (*cubic closed packed*, ccp); dan heksagonal terjejal (*hexagonal closed packed*, hcp). Terdapat beberapa teori yang menerangkan ikatan pada logam seperti teori elektron bebas, teori ikatan valensi, dan teori orbital molekul. Teori untuk ikatan logam harus dapat menjelaskan sifat-sifat logam yang ada terutama sifat koordinasi dan konduktansinya yang tinggi.

**TES FORMATIF 1**

---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Logam aluminium mempunyai sel satuan kubus pusat muka dengan panjang rusuk 4,05 angstrom dan rapat massa  $2,70 \text{ g cm}^{-3}$ . Jari-jari atom aluminium dalam satuan angstrom adalah ....
  - A. 1,35
  - B. 1,70
  - C. 1,43
  - D. 2,86
  
- 2) Logam yang mempunyai banyak bidang geser mudah dibengkokkan. Hal tersebut terdapat dalam susunan ....
  - A. kubus sederhana
  - B. kubus pusat muka
  - C. kubus pusat badan
  - D. tetragonal sederhana
  
- 3) Di antara struktur kristal berikut
  - (a) heksagonal terjejal susunan AB AB AB
  - (b) heksagonal terjejal susunan ABC ABC
  - (c) kubus pusat muka terjejal susunan ABC ABC
  - (d) kubus pusat muka terjejal susunan AB AB AB

Yang merupakan struktur logam adalah ....

- A. a, b, dan c
  - B. a dan c
  - C. b dan d
  - D. a dan d
- 4) Logam perak mengkristal dalam bentuk kubus dengan satu sel kubus pusat muka. Jika panjang rusuk sel sama dengan 4,09 angstrom maka jarak antar inti dalam satuan angstrom dua atom terdekat adalah ....
- A. 1,45
  - B. 1,77
  - C. 2,89
  - D. 3,54
- 5) Perkirakan kelompok logam manakah yang semua logamnya mempunyai bidang geser terbanyak ....
- A. Mg, Ca, dan Zn
  - B. Fe, Cr, dan Na
  - C. Ti, Zn, dan Cu
  - D. Al, Au, dan Ag
- 6) Unsur di bawah ini yang merupakan bahan isolator adalah ....
- A. Mg
  - B. Si
  - C. Na
  - D. Al
- 7) Di bawah ini merupakan sifat khas logam ....
- A. mudah patah
  - B. kuat
  - C. keras
  - D. penghantar listrik
- 8) Proses pabrikasi semikonduktor tipe-p pada silikon dapat dicapai dengan cara ....
- A. pemanasan
  - B. penambahan unsur P
  - C. penambahan unsur B
  - D. pendinginan di bawah suhu nol mutlak

- 9) Berdasarkan konfigurasi elektronnya, unsur  ${}_{12}\text{Mg}$  akan mempunyai pita yang penuh. Sifat konduktor dari Mg disebabkan oleh adanya ....
- cacat kristal
  - kekurangan elektron
  - kelebihan elektron
  - tumpangtuh orbital 3s-3p
- 10) Untuk membedakan antara konduktor dan isolator dapat dilakukan dengan melihat hal-hal berikut ini, *kecuali* ....
- titik leleh
  - hantaran panas
  - sela energi
  - pita terlarang

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

## KEGIATAN BELAJAR 2

## Padatan Ionik

Sifat senyawa ionik berbeda dari senyawa kovalen, karena adanya kation dan anion di dalam kisi kristal. Terdapat susunan geometri dari ion-ion dalam kisi, yang menghasilkan tingginya gaya tarik kation dan anion serta kecilnya gaya tolak kation-kation dan anion-anion. Beberapa sifat karakteristik senyawa ionik disebutkan di bawah ini.

*Stereokimia.* Ikatan ionik sangat kuat dan terarah ke segala arah. Kekuatan ionik mampu menembus ke seluruh ruangan dan sama-sama kuat ke segala arah.

*Titik leleh dan titik didih.* Karena kekuatan interaksi kation-anionnya dan dapat menembus kisi kristal, senyawa ionik memiliki titik leleh dan titik didih yang tinggi, serta memiliki kalor pembentukan dan kalor penguapan tinggi. Dalam kristal NaCl, setiap ion  $\text{Na}^+$  dikelilingi oleh enam ion  $\text{Cl}^-$  dan setiap ion  $\text{Cl}^-$  dikelilingi oleh enam ion  $\text{Na}^+$ . Susunan ini menyebar pada kisi kristal, akibatnya kekuatan daya tariknya sangat kuat menembus kristal.

Tabel 1.2.  
Titik Leleh Beberapa Garam Natrium

Anion	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Br}^-$	$\text{I}^-$	$\text{Alme}_4^-$
Titik Leleh (K)	1268	1073	1023	924	513

*Kekerasan.* Gaya tarik elektrostatik multivalen dalam kristal ionik membuat kristal menjadi keras. Kekerasan meningkat dengan menurunnya jarak antarion dan meningkatnya muatan ion. Ion-ion dengan susunan konfigurasi elektron kulit terluar mirip gas mulia yang *inert* (ion dengan 8 elektron valensi) membuat kristal menjadi lebih keras dibandingkan ion-ion dengan konfigurasi elektron kulit terluar mirip gas *pseudoinert* (18 elektron).

Tabel 1.3.  
Kekerasan Senyawa Ionik dalam Skala morh (Harga untuk Intan = 10)

	LiF	NaF	MgO	CaO	SrO
M-X (pm)	202	231	205	240	257
Kekerasan	3,3	3,2	6,5	4,5	3,5
	LiCl	NaCl	MgS	CaS	SrS
M-X (pm)	257	281	259	284	300
Kekerasan	3,0	2,5	4,5	4,0	3,3
	LiBr	CuBr			
M-X (pm)	275	246			
Kekerasan	2,5	2,4			

*Kerapuhan.* Jika tersedia cukup energi yang diberikan pada lapisan kristal dari sebuah sel unit, maka gaya tarik-menarik berubah menjadi gaya tolak-menolak antara anion-anion dan tolak-menolak kation-kation dan kristal menjadi rapuh. Kristal ionik, meskipun keras, rapuh dan mudah menjadi butiran dan serbuk kecil dengan hanya dipukul dengan palu (berbeda dengan logam yang keras tetapi liat).

*Kelarutan.* Senyawa ion dapat larut dalam larutan polar dengan konstanta dielektrikum tinggi karena menurunnya gaya antar ion dalam medium yang mempunyai dielektrik sekaligus karena terjadinya gaya tarik (interaksi) dipol antara ion dengan pelarut. Kedua hal ini memberikan energi untuk memecahkan kisi ionik. Meskipun demikian, banyak senyawa ionik larut dalam pelarut yang mempunyai konstanta dielektrik yang rendah seperti dioxan, nitrobenzen, eter, dan alkohol. Kelarutan dalam pelarut jenis ini disebabkan oleh sifat kovalen parsial dari senyawa dan terjadinya koordinasi molekul pelarut melalui atom O.

*Konduktansi.* Dalam keadaan padat, senyawa ionik mempunyai sifat penghantar yang sangat rendah, karena posisi ion-ion yang rapat dalam kisi kristalnya. Beberapa padatan seperti  $M\text{Ag}_4\text{I}_5$  ( $M = \text{K}, \text{NH}_4, \text{ dan Rb}$ ) mempunyai konduktivitas yang sama seperti ion-ion dalam larutannya, karena faktor mobilitas  $\text{Ag}^+$  yang tinggi dalam suatu kisi kristal yang khas. Dalam keadaan cair dan dalam larutan, senyawa ionik dapat menghantar listrik karena faktor pembentukan ion bebas yang sangat mobil (bebas

bergerak) yang dapat berpindah tempat dalam medan listrik sehingga dapat membawa muatan listrik.

## A. PEMBENTUKAN ION

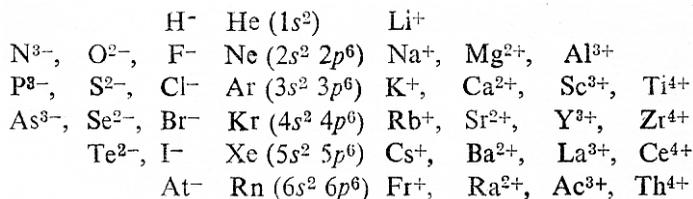
Terdapat beberapa tipe yang berbeda dari konfigurasi elektron terluar untuk kation dan anion, seperti dijelaskan pada bagian berikut.

### 1. Kation Tanpa Elektron Terluar

Ion hidrogen  $H^+$  yang terbentuk karena hilangnya elektron satu-satunya dalam atom adalah juga satu-satunya contoh kation tipe ini. Proton, inti yang mempunyai muatan positif, terstabilkan dalam larutan oleh solvasi dan hal ini merupakan sifat yang unik.

### 2. Ion dengan Konfigurasi Gas Inert

Ion ini mempunyai konfigurasi elektron gas inert  $ns^2np^6$  dalam kulit terluarnya, kecuali untuk  $n = 1$ , dimana tidak ada orbital p dan konfigurasi elektron kulit terluarnya adalah  $1s^2$ . Konfigurasi ini dicapai oleh golongan 1, 2, dan 3 dengan melepaskan semua elektron kulit valensinya, dan golongan 15, 16 dan 17 dengan menangkap masing-masing 3, 2, dan 1 elektron di kulit terluarnya. Beberapa contoh disebutkan di bawah.



Karena efek perlindungan yang tidak efisien dari inti oleh elektron-elektron  $1s^2$ , ion dengan konfigurasi elektron  $1s^2$  memiliki sifat berbeda dari anggota lainnya dalam golongan yang sama dan cenderung membentuk senyawa kovalen.

### 3. Ion dengan Kulit Terluar Berisi 18 Elektron

Unsur-unsur transisi golongan 3, 4, 13 dan 14 memiliki konfigurasi elektron kulit terakhir  $(n-1)s^2 (n-1)p^6 (n-1)d^{10} ns^{1,2} np^{0,1,2}$  dapat kehilangan elektron kulit terluarnya dan membentuk ion dengan konfigurasi elektron

terluar  $ns^2 np^6 nd^{10}$ . Ion-ion  $Cu^+$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ga^{3+}$ , dan  $Ge^{4+}$  mempunyai konfigurasi elektron kulit terluar  $3s^2 3p^6 3d^{10}$ , ion-ion  $Ag^+$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $In^{3+}$  dan  $Sn^{4+}$  mempunyai konfigurasi  $4s^2 4p^6 4d^{10}$ , sedangkan  $Pb^{4+}$  konfigurasinya adalah  $5s^2 5p^6 5d^{10}$ . Jika konfigurasi ini didapatkan hanya dengan hilangnya elektron, maka tidak mungkin akan didapatkan anion yang memiliki konfigurasi seperti ini. Pengecualian hanya terjadi pada anion  $Au^-$  dengan konfigurasi  $5s^2 5p^6 5d^{10}$  yang ditemukan pada senyawa  $CsAu$ .

#### 4. Ion dengan Pasangan Elektron Inert $s^2$

Jika unsur yang memiliki konfigurasi elektron valensi  $ns^2 np^x$  ( $x = 1, 2, 3$ ) kehilangan hanya elektron p-nya saja maka akan terbentuk kation dengan konfigurasi elektron  $ns^2$ . Hal ini dapat terjadi, hanya jika energi elektron ns dan np cukup berbeda sebagai hasil ionisasi selama pembentukan ikatan kimia. Hanya golongan unsur transisi 3, 4, dan 5 yang membentuk konfigurasi ini seperti ion  $Ga^+$ ,  $Ge^{2+}$  dan  $As^{2+}$  untuk  $4s^2$ ; ion  $In^+$ ,  $Sn^{2+}$  dan  $Sb^{3+}$  untuk  $5s^2$ , dan ion  $Tl^+$ ,  $Pb^{2+}$  dan  $Bi^{3+}$  untuk ion dengan konfigurasi  $6s^2$ .

#### 5. Ion d dan f

Ion logam transisi yang dibentuk karena lepasnya elektron kulit valensi tanpa ionisasi elektron d, yang mempunyai konfigurasi elektron terluar  $ns^2 np^6 nd^x$  ( $x = 1$  sampai 9) dan dikelompokkan sebagai ion-ion d, karena kemiripan di antara mereka. Beberapa ion adalah termasuk ion tipe ini seperti  $Ti^{2+}$ ,  $V^{2+}$ ,  $Cr^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , dan  $Cu^{2+}$ .

Ion f berasal dari unsur transisi dalam yang kehilangan elektron terluar pada orbital s dan d dan memiliki konfigurasi  $(n-1)s^2 (n-1)p^6 (n-1)f^{1-13} ns^2 np^6$  dengan nilai  $n = 6$  untuk kation golongan aktinida (aktinon) dan 5 untuk kation golongan aktinida (lantanon). Ion ini mempunyai kemiripan satu dengan yang lainnya karena kemiripan ukuran dan konfigurasi elektronnya sama, dengan kulit elektron f yang tidak terlibat dalam pembentukan ikatan kimia.

#### 6. Ion Poliatomik

Suatu unsur yang dapat membentuk senyawa dengan suatu unsur elektronegatif seperti O, F, atau Cl melalui ikatan kovalen, dapat mereduksi keelektronegatifan dan muatan formalnya sendiri. Pembentukan sejumlah besar anion oxo (oxoanion), anion tio (thioanion), kation oxo (oxocation), dan kompleks halo (halocomplexes) merupakan contoh untuk ion tipe ini.

Ion-ion ini dan yang lainnya seperti  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  dimasukkan sebagai senyawa koordinasi.

## 7. Ion dengan Konfigurasi Elektron Tak Teratur

Terdapat ion-ion yang tidak dapat dikelompokkan ke dalam kelompok tertentu seperti  $\text{Hg}_2^{2+}$ ,  $\text{Ge}_2^{2+}$ , dan  $\text{Pb}_9^-$ .

Terdapatnya beberapa tipe ion dengan konfigurasi tertentu yang telah dijelaskan sebelumnya dapat memberikan landasan bagi kita (Fajans telah merumuskannya untuk kita) untuk menyimpulkan satu hal bahwa pembentukan ion akan mudah terjadi jika:

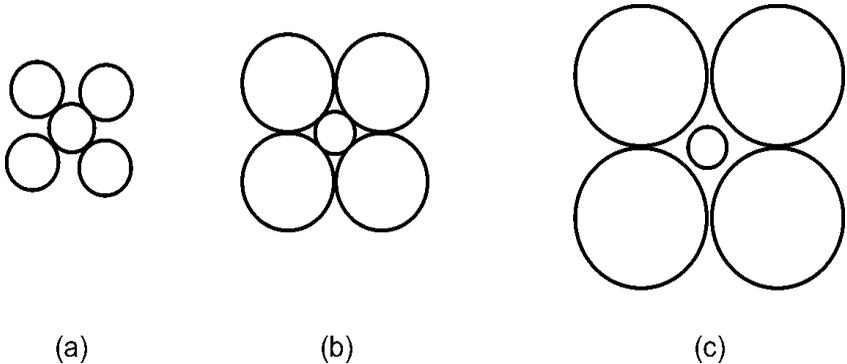
- muatan ion, khususnya kation adalah kecil, umumnya bermuatan satu atau dua satuan muatan.
- ukuran anion relatif kecil dan ukuran kation relatif besar, dan
- ion yang terbentuk strukturnya stabil. Tipe ion-ion berikut disusun berdasarkan kecenderungan berkurangnya kestabilan: ion dengan struktur gas inert dengan 8 elektron, ion dengan konfigurasi pseudoinert dengan 18 elektron, ion dengan pasangan elektron inert  $6s^2$ , serta ion d dan f.

Ketidakstabilan ion-ion  $3d^{10}$  dan  $5d^{10}$  dalam kasus tembaga dan emas melibatkan penjelasan yang agak berbeda. Spesi ion stabil adalah untuk  $\text{Cu}^{2+}$  ( $3d^9$ ) dan  $\text{Au}^{3+}$  ( $5d^8$ ). Penjelasan yang mungkin untuk hal ini adalah bahwa muatan inti unsur ini tidak cukup tinggi untuk bersatunya 18 elektron secara tetap. Untuk kasus emas, peningkatan ukuran akan menyebabkan terjadinya kecenderungan muatan +3 sebagai keadaan yang paling stabil. Kestabilan ion  $\text{Ag}^+$  ( $4d^{10}$ ) dan pembentukan anion emas aurida ( $\text{Au}^-$ ), bagaimanapun tidak sejalan dengan penjelasan ini.

## B. STRUKTUR SENYAWA IONIK

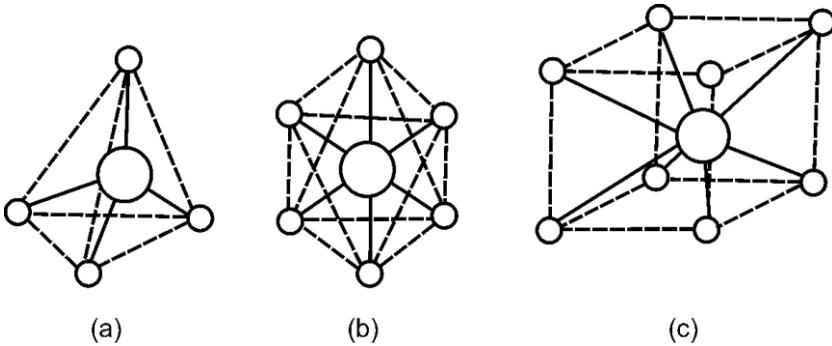
Jika kation dan anion dalam senyawa ionik berinteraksi hanya karena gaya-gaya elektrostatik, mereka berusaha menyusun dirinya sendiri dalam susunan geometrik tertentu sehingga gaya tolak-menolak di antara muatan sejenis berkurang, sedangkan tarik-menarik di antara muatan yang berbeda menjadi maksimal. Ini dapat dilihat dengan mempertimbangkan pengaruh dari peningkatan ukuran ion pusat, secara kualitatif, dalam penyusunan

secara hipotetik ion-ion oktahedral. Penyusunan ruang terlihat lebih sesuai melalui pandangan sisi salah satu dari keempat ion (anion) yang mengelilingi ion pusat (kation). Susunan yang paling stabil adalah dimana anion-anion bersentuhan satu sama lain, juga menyentuh kation [Gambar 1.18(b)]. Jika ukuran anion mengecil, anion tidak akan lagi menyentuh anion lainnya, walaupun anion akan bersentuhan dengan kation [Gambar 1.18(a)]. Jika ukuran relatif dari kation meningkat lebih jauh lagi, lebih banyak lagi anion yang mampu bersentuhan dan memberikan kestabilan yang lebih besar dengan berubahnya bilangan koordinasi dan struktur. Sebaliknya, jika ukuran anion membesar, anion tidak mampu lagi menyentuh kation dan peningkatan tolakan antar muatan akan menyebabkan anion menjauh dari bola koordinasi kation, sehingga akan mengubah strukturnya.

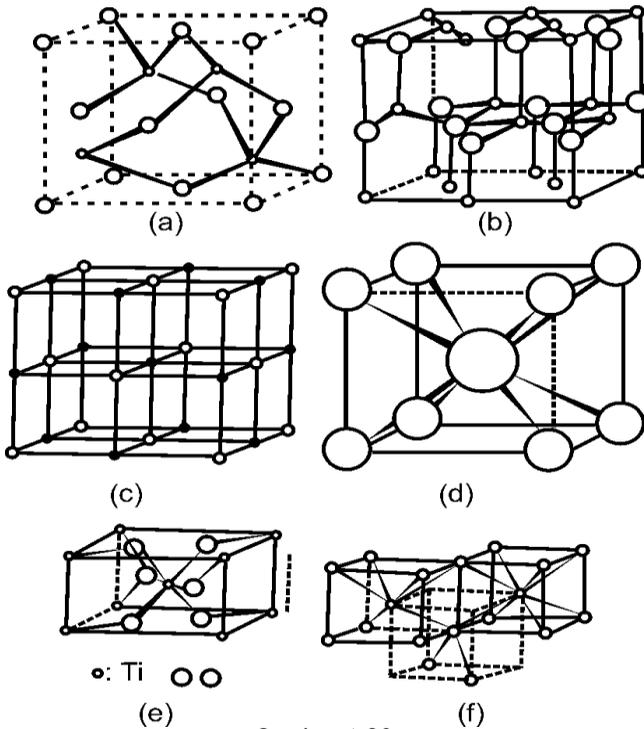


Gambar 1.18.  
Pengaruh Peningkatan Ukuran Ion Terluar

Kisi ionik yang paling umum dan stabil adalah tetrahedral, oktahedral dan bangun kubus sesuai dengan bilangan koordinasi masing-masing 4, 6 dan 8 (Gambar 1.19). Kisi ionik dikenal setelah nama mineral yang mengkristal dalam yang sama terbentuk (Gambar 1.20). Tampak bahwa untuk bilangan koordinasi 4 (kisi tetrahedral) ada dua perbedaan struktur, yaitu *wurtzite* dan *zinc blende*. Perbedaan keduanya ditunjukkan pada Gambar 1.21.

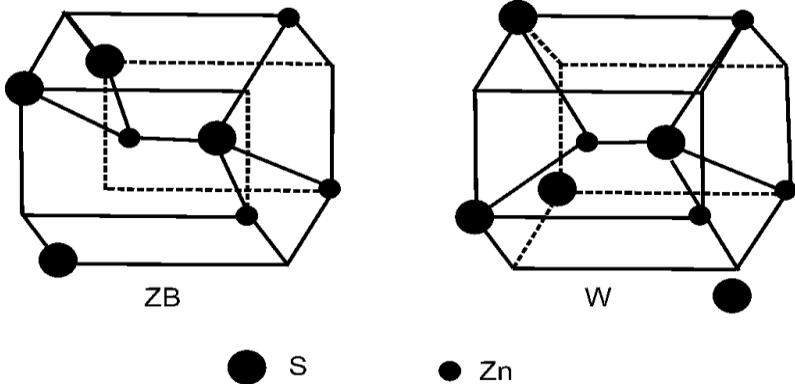


Gambar 1.19.  
Kisi (a) Tetrahedral, (b) Oktahedral dan (c) Kubus.  
Kisi Menunjukkan hanya ada Satu Ion Pusat.



Gambar 1.20.

Beberapa Kisi Ionik [Untuk Kisi Ionik 1:1 (a). *Zinc Blende* atau Sphalerite ZnS, (b). *Wurtzite* ZnS, (c). *Rock Salt* NaCl, (d). Cesium Klorida CsCl] dan [Untuk Kisi Ionik 1:2 (f). Cubic Fluorite CaF<sub>2</sub> dan Oktahedral Rutil TiO<sub>2</sub>]



Gambar 1.21.  
Struktur Zinc Blende dan Wurtzite

**C. PERHITUNGAN PERBANDINGAN JEJARI**

**1. Kisi Kubus**

Pada bangun kubus, anion berada pada sudut kubus dan kation berada pada pusat kubus. Pada kasus dimana anion saling bersentuhan dengan anion lainnya juga dengan kation (pada kasus terbatas), tepi kubus akan sama dengan dua kali jejari anion ( $= 2r_a$ ). Diagonal terpanjang akan sama dengan jejari dua anion pada pusat diagonal ( $= 2r_a$ ) ditambah diameter kation dimana  $r_a$  dan  $r_c$  masing-masing adalah jejari anion dan kation (Gambar 1.22). Jika sisi kubus adalah  $b$ , maka panjang diagonal ruangnya adalah  $b\sqrt{3}$ , sehingga:

$$b = 2r_a \quad \text{dan} \quad b\sqrt{3} = 2r_a + 2r_c$$

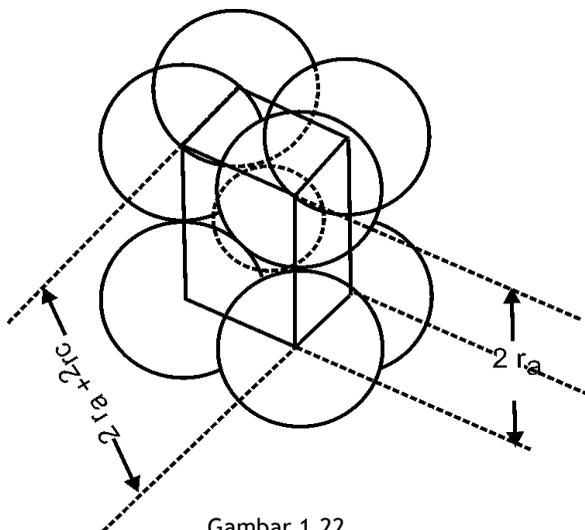
sehingga,

$$\frac{2r_a + 2r_c}{2r_a} = \sqrt{3}$$

secara sederhana dapat ditulis:

$$\frac{r_c}{r_a} = 0,732$$

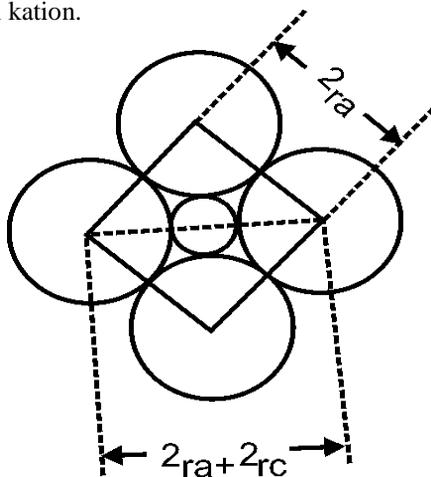
Jika diasumsikan bahwa ion-ion merupakan bola keras yang tidak dapat ditekan maka harga minimum perbandingan jejari untuk kisi kubus yang didapat secara geometris adalah 0,732.



Gambar 1.22.  
Geometri Kisi Kubus

## 2. Kisi Oktahedral

Secara geometris, bangun oktahedral ditunjukkan pada Gambar 1.23. Empat anion berada pada sudut bujur sangkar, kation berada di pusat, dan satu anion masing-masing pada bagian atas dan bawah yang terbentuk oleh empat anion berisi kation.



Gambar 1.23.  
Geometri Kisi Oktahedral

Semua ion saling bersentuhan sehingga dapat membentuk susunan yang paling stabil. Sisi bujur sangkar  $b$ , akan sama dengan dua kali jejari anion  $r_a$ , dan diagonal bujur sangkar,  $b\sqrt{2}$  akan sama dengan diameter kation ( $2r_c$ ) ditambah dua kali jejari anion ( $2r_a$ ) sehingga:

$$b = 2r_a$$

$$\text{dan } b\sqrt{2} = 2r_a + 2r_c$$

dengan melakukan pembagian maka:

$$\frac{2r_c + 2r_a}{2r_a} = \sqrt{2}$$

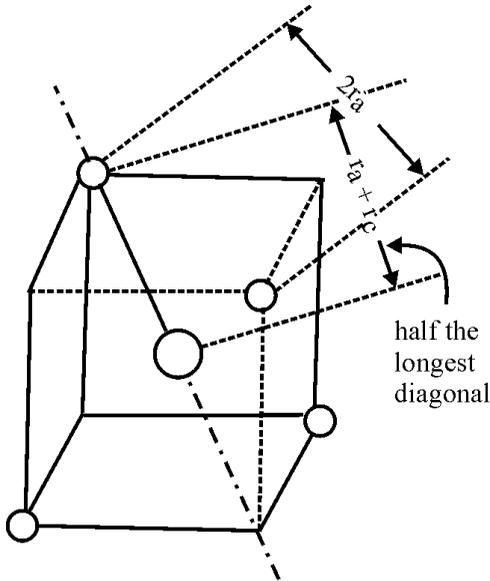
dan jika disederhanakan menjadi:

$$\frac{r_c}{r_a} = 0,414$$

Harga banding jejari kation terhadap anion ini merupakan harga perbandingan minimum untuk kisi oktahedral dari permukaan non kompresi.

### 3. Kisi Tetrahedral

Jika dalam sebuah kubus, pengulangan sudut yang digabungkan akan menghasilkan tetrahedron. Pusat tetrahedron sama dengan pusat kubus. Kestabilan susunan tetrahedral disebabkan oleh adanya empat anion di setiap sudutnya yang saling bersentuhan, kation berada di pusat seperti diperlihatkan pada Gambar 1.24.



Gambar 1.24.  
Geometri Kisi Tetrahedral

Pada susunan ini, dua anion pada akhir diagonal muka saling bersentuhan ( $b\sqrt{2} = 2r_a$ ). Kation berada pada pusat diagonal ruang dan menyentuh satu anion pada sudutnya. Setengah panjang diagonal ruang ( $b\sqrt{2}/2$ ) akan sama dengan jumlah jejeri kation ( $r_c$ ) dan jejeri anion ( $r_a$ ), sehingga:

$$\frac{b\sqrt{3}}{2} = r_c + r_a$$

dan

$$b\sqrt{2} = 2r_a$$

jika dilakukan operasi pembagian, maka:

$$\frac{r_c + r_a}{r_a} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$$

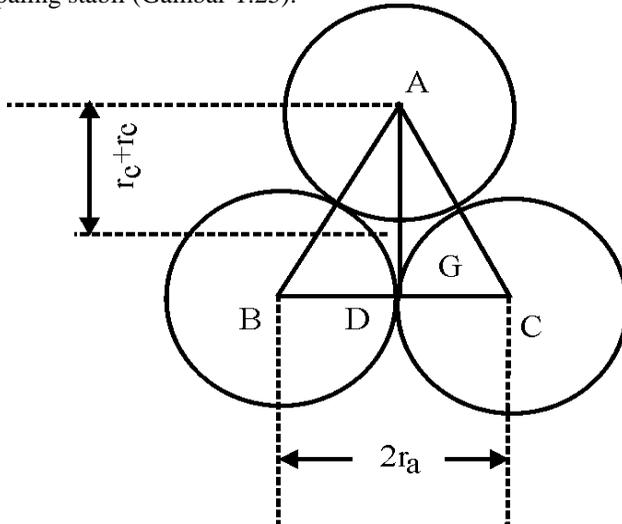
secara sederhana dapat ditulis:

$$\frac{r_c}{r_a} = 0,221$$

Ini merupakan batas kestabilan terendah untuk kisi tetrahedral.

**4. Kisi Segitiga Datar**

Untuk bilangan koordinasi 3, susunan segitiga planar yang disusun oleh tiga anion yang saling bersentuhan dan kation berada di pusat merupakan susunan paling stabil (Gambar 1.25).



Gambar 1.25.  
Geometri Struktur Segitiga Planar Berkoordinasi Tiga

Jika sisi segitiga ini adalah  $b$  maka  $b = 2r_a$ . Jari kation dapat ditentukan secara geometri. Jika D merupakan titik kontak anion-anion pada BC maka:

$$AD = AB \cos 30^\circ = b \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Jika G merupakan pusat segitiga maka:

$$AG = \frac{2}{3} AD = \frac{2}{3} b \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{b}{\sqrt{3}}$$

sehingga:

$$r_a + r_c = \frac{b}{\sqrt{3}}$$

karena  $b = 2 r_a$  maka:

$$r_a + r_c = \frac{2r_a}{\sqrt{3}}$$

secara sederhana dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{r_c}{r_a} = 0,155$$

Jika ukuran kation makin kecil, maka susunan geometri dengan anion-anion saling bersentuhan dengan anion lainnya juga dengan kation tidak mungkin terjadi. Dalam kaitan ini, jika bilangan koordinasi dua hanya berkaitan dengan kemungkinan terjadinya susunan linier maka kisi lengkap tidak akan terbentuk.

Kenyataan menunjukkan, jika perbandingan jejari ada di bawah angka 0,25; maka kerapatan muatan kation meningkat. Hal ini menyebabkan terjadinya polarisasi anion, yang cukup bagi terbentuknya ikatan kovalen. Peningkatan kerapatan muatan inti untuk dua anion dengan muatan sama adalah sebesar 64 satuan untuk perbandingan jejari 0,25; 15 satuan untuk perbandingan 0,20; dan 274 satuan untuk perbandingan 0,15.

Di dalam senyawa ionik, geometri kisi kristal diketahui melalui senyawa tertentu yang mengkristal dalam bentuk tertentu. Beberapa dari kisi kristal yang umum diketahui dan batas perbandingan jejarnya diperlihatkan pada Tabel 1.4.

Tabel 1.4.  
Susunan Bola Kaku X Sekitar M

Bilangan Koordinasi M	Susunan X	Angka Banding Jejari	Kisi Kristal
2	Linier	< 0,15	
3	Segitiga	0,15 - 0,22	
4	Tetrahedral	0,22 - 0,41	Wurtzite, Quartz
6	Oktahedral	0,41 - 0,73	Rock Salt, Rutile
8	Kubus	> 0,73	CsCl, Fluorite

## 5. Keterbatasan Aturan Perbandingan Jejari

Terdapat beberapa keterbatasan jika aturan perbandingan jejari ini diterapkan secara umum, yakni:

- a. Aturan perbandingan jejari diterapkan hanya pada pengemasan bola keras yang diketahui ukurannya. Anion tidaklah keras karena mudah dipolarisasi dan cenderung membentuk ikatan kovalen yang arahnya sangat kuat dan tidak mengikuti aturan perbandingan jejari.
- b. Beberapa anion tidak lagi menunjukkan sifat seperti bola (*sphericity*) jika mereka merupakan gabungan dari atom-atom yang terikat secara kovalen, seperti  $\text{CN}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , dan  $\text{N}_3^-$ .
- c. Beberapa garam mengkristal dalam dua modifikasi yang mempunyai perbedaan bilangan koordinasi. Tolak-menolak anion-anion yang lebih besar dalam senyawa dengan bilangan koordinasi tinggi akan meningkatkan jarak antar inti. Senyawa  $\text{RbX}$  ( $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$ ) mengkristal dalam struktur *rock salt* (garam cadas) dalam kondisi biasa, tetapi mengadopsi struktur *CsCl* pada tekanan yang lebih tinggi. Jejari dalam koordinasi 8 ( $r_8$ ) dapat dihitung dari jejari  $r_6$  dalam senyawa berkoordinasi 6, atau dengan menggunakan rumus berikut:

$$\frac{r_8}{r_6} = \left( \frac{8A_6}{6A_8} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (1)$$

dengan  $A_6$  dan  $A_8$  masing-masing menyatakan tetapan Madelung untuk struktur oktahedral dan kubus, sedangkan  $n$  adalah eksponen Born. Jika  $A_6 = 1,74756$ ,  $A_8 = 1,76267$  dan  $n = 10$ , maka:

$$r_8 = 1,032 r_6$$

Jejari ion bergantung pada bilangan koordinasi ion dalam kisi. Dalam kasus dimana sebuah struktur mempunyai angka banding di batas dua struktur maka jejari ion menjadi tidak pasti jika mereka mengadopsi dua kisi.

- d. Garam-garam litium (jejari  $\text{Li}^+ = 66 \text{ pm}$ ) seperti  $\text{LiCl}$ ,  $\text{LiBr}$  dan  $\text{LiI}$  semuanya mengkristal dalam kisi oktahedral, meskipun semuanya mempunyai angka banding jejari Pauling di bawah 0,41 pm. Data jejari  $\text{Cl}^-$  adalah 181 pm,  $\text{Br}^- = 195 \text{ pm}$  dan  $\text{I}^- = 216 \text{ pm}$  memberikan angka banding jejari 0,36 untuk  $\text{LiCl}$ , 0,34 untuk  $\text{LiBr}$  dan 0,305 untuk  $\text{LiI}$ . Meskipun  $\text{LiI}$  dapat dianggap secara parsial bersifat kovalen, nampaknya hal ini tidak bisa digeneralisasi untuk halida lainnya. Meskipun demikian, jika dianggap bahwa tidak ada ikatan yang 100% ionik, jadi setiap ikatan ionik memiliki karakter kovalen, maka perkiraan jejari ionik akan terlalu rendah untuk kation hasil dari lepasnya elektron valensi dan terlalu tinggi untuk anion. Jika dalam perhitungan jejari ionik

Pauling bervalensi satu seperti NaF diasumsikan bahwa transfer elektron tidak terjadi secara lengkap, dan perubahan harga  $Z^*$  hanya 2 satuan, maka jejari terhitung untuk  $\text{Na}^+$  adalah 99 pm dan untuk  $\text{F}^-$  adalah 132 pm. Meskipun perubahannya hanya 4 pm, tetapi hal ini ternyata merubah angka banding jejari dari 95/136 (=0,62) menjadi 99/132 (=0,75) dan tentu saja batas kestabilan kisi oktahedral menjadi terlampaui.

Jika logam alkali dan alkali tanah membentuk ikatan kovalen, maka mereka menggunakan elektron-elektron pada orbital s nya. Struktur dengan sifat kovalen akan mempunyai jejari kation lebih tinggi karena elektron pada orbital s mempunyai kulit kuantum yang lebih tinggi dibandingkan ion-ion yang mempunyai konfigurasi elektron terluar seperti gas mulia. Jejari kation yang teramati akan lebih tinggi dibandingkan jejari ion yang diperoleh dari hasil perhitungan.

- e. Meskipun penggunaan data jejari ion litium yang lebih besar (karena kontribusi sifat kovalen) dapat menyelesaikan persoalan untuk litium halida, tetapi hal ini tidak cukup dapat membantu menyelesaikan kasus kation-kation berukuran besar. Struktur dengan bilangan koordinasi delapan jarang ditemukan, kecuali untuk CsCl, CsBr dan CsI. Aturan angka banding jejari memperkirakan bahwa untuk barium, stronsium, dan PbO kisi yang mungkin adalah kubus. Jejari masing-masing ion adalah  $\text{Ba}^{2+} = 134$  pm,  $\text{Sr}^{2+} = 112$  pm,  $\text{Pb}^{2+} = 120$  pm, dan  $\text{O}^{2-} = 140$  pm. Kenyataannya semua oksida yang disebut tadi mengkristal dalam kisi oktahedral. Tidak ada penjelasan sederhana yang dapat menjelaskan gejala ini, meskipun dapat dikatakan bahwa meskipun peningkatan tetapan Madelung A (1,763 untuk kubus dan 1,748 untuk oktahedral) hanya satu persen, tetapi faktor lainnya seperti tolakan anion-anion dapat menyebabkan semua oksida ini menyukai struktur dengan bilangan koordinasi enam.

Berkaitan dengan aturan angka banding jejari ini dapat dikatakan bahwa jejari sebuah ion bukanlah merupakan kuantitas yang pasti. Jika jejari sebuah ion secara aktual dapat dihitung dan ditentukan, penggunaannya tidak dapat dilakukan pada setiap kasus. Jejari ionik sering kali lebih kecil, sedangkan jejari anion lebih besar dibandingkan ukuran nyatanya, dan dua faktor ini berkecenderungan untuk saling menghilangkan dalam perhitungan jarak antar inti seperti pada jejari Bragg-Slater. Jejari ionik sangatlah bervariasi bergantung pada lingkungan ionnya. Tiap kristal memberikan lingkungan

yang berbeda terhadap ion, dan memberikan efek polarisasi yang sedikit berbeda, sehingga jejari ionik untuk ion tertentu akan berubah dari satu kristal ke kristal yang lain.

Jika anion bersentuhan satu dengan lainnya seperti yang diharapkan dari angka banding jejari, karena adanya tolakan antar anion, jarak antar ion yang teramati akan lebih besar dibandingkan dengan yang didapatkan dari jumlah jejari ioniknya seperti pada kasus LiF. Hal ini disebut sebagai fenomena tolakan ganda.

Aturan angka banding jejari akan terasa lebih kasar jika ukuran ion dan kerapatan muatan sangat berbeda, seperti pada kasus kisi tetrahedral yang melibatkan terbentuknya ikatan kovalen. Tabel berikut akan memperjelas masalah ini.

Tabel 1.5.  
Angka Banding Jejari untuk Kisi Tetrahedral

BeO 0,25	ZnO 0,53						Kisi Wurtzite
BeS 0,19	HgS 0,55	CuF 0,72	CuCl 0,53	CuBr 0,49	CuI 0,44	AgI 0,52	Kisi Zinc Blende
ZnS 0,40	CdS 0,52	MnS 0,45					Kisi Zinc Blende dan Kisi Wurtzite



## LATIHAN

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Pada kejadian bergesernya suatu lapisan kristal terhadap lapisan lainnya, apa yang terjadi pada sifat kekerasan, kedaptempaan (sifat dapat ditempa) dan kerapuhan dari logam, kristal ionik, kristal kovalen dan kristal molekuler? Apa pula yang terjadi pada sifat titik lelehnya?
- 2) Berdasarkan faktor mudahnya pembentukan ion seperti yang diungkapkan Fajans, golongan unsur manakah yang paling mudah membentuk ion positif dan golongan manakah yang paling mudah membentuk ion negatif?

- 3) Untuk menunjukkan kuantitas massa molar, kita menggunakan istilah massa molekul untuk intan (C) dan senyawa  $\text{SiO}_2$ . Tepatkah penggunaan istilah massa molekul untuk senyawa-senyawa ionik?
- 4) Jejari ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  masing-masing adalah  $0,98 \times 10^{-10}$  m dan  $1,81 \times 10^{-10}$  m. Hitung bilangan koordinasi masing-masing ion.
- 5) Rubidium klorida,  $\text{RbCl}$  diasumsikan mempunyai struktur  $\text{CsCl}$  pada tekanan tinggi. Hitunglah jarak ikatan  $\text{Rb-Cl}$  dalam struktur  $\text{CsCl}$  berdasarkan data jarak  $\text{Rb-Cl}$  dalam struktur  $\text{NaCl}$ . Jejari ionik pada sistem dengan bilangan koordinasi enam untuk  $\text{Rb}^+$  adalah 166 pm dan untuk  $\text{Cl}^-$  adalah 167 pm. Gunakan juga persamaan (1) untuk menghitung jejari  $\text{Cl}^-$  pada bilangan koordinasi delapan. Eksponen Born untuk  $\text{Rb}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  masing-masing adalah 10 dan 9. Tetapan Modelung untuk  $\text{NaCl}$  dan  $\text{CsCl}$  masing-masing adalah 1,75 dan 1,76.

*Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) a. Pada logam, semua atom adalah sama dan lapisan kemasannya dapat bergeser satu terhadap lainnya. Ikatan memang dapat melemah jika atom bergeser dari posisinya semula, tetapi situasinya tetap sama. Logam memang dapat ditempa, terutama jika strukturnya adalah kubus terjejal. Kekerasan dan titik leleh bervariasi, tergantung pada kekuatan ikatan.
- b. Kristal ionik memang keras, tetapi rapuh. Dibutuhkan gaya yang cukup besar untuk memisahkan kation dengan anion, tetapi pergeseran dapat membuat terjadinya tolakan antar kation maupun antar anion, menyebabkan kerapuhan kristal ionik.
- c. Kristal kovalen keras dan dapat dipecahkan. Pergeseran dapat menyebabkan pecahnya kristal melalui pecahkan ikatan kovalen, tetapi ini tidak mudah. Dibutuhkan gaya yang juga sangat besar untuk memecahkannya.
- d. Kristal molekuler bersifat lunak dan dapat ditempa. Terdapat ikatan yang cukup lemah antar molekul, sehingga antar lapisan juga mudah bergeser. Tidak terdapat tolakan yang kuat pada saat terjadinya deformasi.
- e. Kristal ionik dan kristal kovalen mempunyai titik leleh tinggi karena ikatannya yang kuat.

- f. Kristal molekuler mempunyai titik leleh rendah karena ikatannya memang lemah. Titik lelehnya bergantung pada massa molekul, karena yang berperan adalah gaya van-der-Waals. Meningkatkan jumlah elektron akan meningkatkan gaya van-der-Waals. Titik leleh logam sangat bervariasi, dari yang rendah seperti Hg sampai yang tinggi seperti W, karena kekuatan ikatan logam juga sangat bervariasi.
- 2) Unsur yang paling mudah membentuk ion positif adalah unsur pada golongan 1 dan 2, sedangkan yang paling mudah membentuk ion negatif adalah unsur pada golongan 16 dan 17.
  - 3) Karena kristal intan dan  $\text{SiO}_2$  tersusun atas molekul-molekul, istilah massa molekul memang tepat, tetapi istilah ini tidak tepat lagi untuk senyawa ionik. Istilah massa rumus akan lebih tepat untuk senyawa ionik, karena bisa lebih menggambarkan rumus perbandingan ion-ion pembentuknya.
  - 4) Perbandingan jejari = 0,54.  
Angka banding jejari sebesar 0,54 menunjukkan bilangan koordinasi enam.
  - 5) Jarak antar inti untuk bilangan koordinasi enam adalah  $166 + 167 \text{ pm} = 333 \text{ pm}$ . Untuk sistem dengan bilangan koordinasi delapan maka:

$$d_8 = 333 \left( \frac{4A_6}{3A_8} \right)^{\frac{1}{9,5-1}} = 343 \text{ pm}$$

$$r_{Cr} \text{ (bilangan koordinasi 8)} = 167 \left( \frac{8 \times 1,75}{6 \times 1,76} \right)^{\frac{1}{9-1}} = 173 \text{ pm}$$

Jarak ikatan  $\text{RbCl} = 343 \text{ pm}$ .



Sifat senyawa ionik berbeda dari senyawa kovalen, karena adanya kation dan anion di dalam kisi kristal. Terdapat susunan geometri dari ion-ion dalam kisi, yang menghasilkan tingginya gaya tarik kation dan anion serta kecilnya gaya tolak kation-kation dan anion-anion. Jika kation dan anion dalam senyawa ionik berantarakasi hanya karena gaya-gaya elektrostatik, mereka berusaha menyusun dirinya sendiri dalam susunan geometrik tertentu sehingga gaya tolak-menolak di antara muatan sejenis berkurang, sedangkan tarik-menarik di antara muatan yang berbeda menjadi maksimal. Kisi ionik yang paling umum dan stabil adalah tetrahedral, oktahedral dan bangun kubus sesuai dengan bilangan koordinasi masing-masing 4, 6 dan 8.



Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Kelima pernyataan di bawah ini adalah sehubungan dengan kristal garam dengan sel satuan jenis NaCl dengan  $a$  menyatakan panjang rusuk sel satuan. Di bawah ini yang merupakan pernyataan yang tidak benar adalah ....
  - A. tiap ion positif dikelilingi enam ion negatif
  - B. perbandingan jejari ionnya adalah  $1,37 r_a : 2,44 r_c$
  - C. ion negatif maupun positif berkisi kubus pusat muka
  - D. jarak terdekat ion positif dan negatif adalah  $\frac{1}{2} a_3$
  
- 2) Ion manakah di bawah ini yang mengandung elektron d?
  - A.  $K^+$
  - B.  $Ca^{2+}$
  - C.  $Sc^{3+}$
  - D.  $Fe^{2+}$(Nomor atom K, Ca, Sc dan Fe masing-masing adalah 19, 20, 21, dan 26)
  
- 3) Bilangan koordinasi  $Cs^+$  dan  $Cl^-$  dalam kristal CsCl adalah ....
  - A. 6
  - B. 8
  - C. 10
  - D. 12

- 4) Jari-jari ion  $A^+$  dan  $B^-$  masing-masing adalah 1,48 dan 2,16 angstrom. Bilangan koordinasi ion  $A^+$  dalam kisi kristal  $A^+B^-$  adalah ....
- 4
  - 6
  - 8
  - 12
- 5) Data jari-jari ion  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Tl^+$ ,  $Br^-$ , dan  $F^-$  masing-masing adalah 0,6; 0,9; 1,3; 0,7; 1,9; dan 1,4 angstrom. Berdasarkan data jari-jari ion tersebut, garam yang boleh jadi akan mempunyai kristal dengan sel satuan jenis CsCl adalah ....
- NaBr
  - KBr
  - LiF
  - TlBr

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali  
 80 - 89% = baik  
 70 - 79% = cukup  
 < 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 3. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

### KEGIATAN BELAJAR 3

## Ketidakhurnian dan Ketidakhempurnaan Kristal

Walaupun proses penciptaan alam semesta ini sempurna, tetapi selalu terdapat pengecualian di dalamnya. Struktur padatan yang baru saja diuraikan pada kegiatan belajar sebelumnya ternyata banyak pengecualiannya. Kadang-kadang pengecualian tersebut hanya terjadi pada kuantitas yang sangat sedikit, misalnya terdapat sebuah atom di antara  $10^{10}$  atom yang tidak berada pada posisi yang seharusnya. Beberapa padatan ternyata juga tidak memiliki keteraturan berjangkauan panjang, sehingga bentuk kristalnya tidak dapat diamati. Meskipun demikian ketidakhurnian dan ketidakhempurnaan tersebut mungkin justru memegang peranan yang sangat berarti pada kegunaan sebuah material padatan.

Kecacatan sebuah kristal akan menentukan sifat semikonduktor, menentukan kekenyalan logam dan penguatan paduan (alloy). Ketidakhempurnaanlah yang turut menentukan warna batu mulia. Ketidakhurnian dan ketidakhempurnaan juga memungkinkan pergerakan atom selama pemanasan, sehingga dapat membentuk struktur baru dan sifat-sifat yang lebih baik.

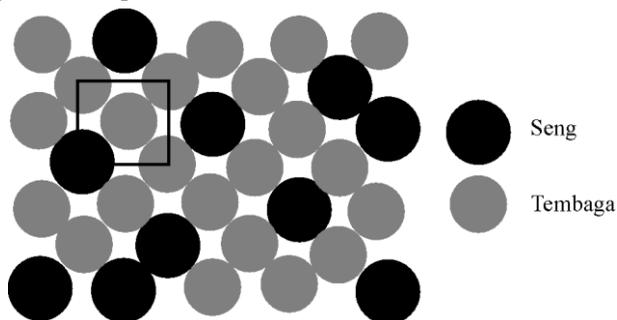
### A. KETIDAKHURNIAAN DALAM PADATAN

Di sekeliling Anda, tentunya sering terdengar bagaimana orang menggemari sesuatu yang asli atau dibuat asli. Emas asli 24 karat, madu asli, dan gula murni tentu lebih disukai orang dibandingkan dengan sudah tercampur dengan bahan lainnya. Meskipun benda sempurna, murni atau asli itu lebih baik, adakalanya karena faktor harga, pengadaan atau sifat-sifat tertentu, diperlukan adanya ketidakhurnian. Perak murni dengan kemurnian 99% memang kualitasnya lebih tinggi dan harganya lebih mahal. Pencampuran perak dengan tembaga dalam perak *sterling*, yang mengandung tembaga 7,5% dan perak 92,5% ternyata membuat perak itu lebih kuat, keras dan awet dengan harga yang lebih murah. Hal itu ternyata juga tidak mengubah penampilannya.

Pemilihan sebuah bahan memang tergantung pada fungsinya. 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 dibandingkan pada tembaga, sehingga kita tetap menggunakan tembaga murni untuk penghantar listrik dan penggunaan sejenis lainnya dimana konduktivitas listrik diutamakan. Material paduan (*alloy*) seperti ini merupakan kombinasi dari dua atau lebih jenis logam. Kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin seperti besi dengan kubus pusat badan (bcc) dan besi karbida,  $Fe_3C$  dalam baja konstruksi atau dapat merupakan larutan padat seperti pada kuningan.

## B. LARUTAN PADAT DALAM PADATAN LOGAM

Larutan padat mudah terbentuk bila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan struktur elektron yang serupa. Tembaga dan seng dalam kuningan masing-masing mempunyai jejari atom 0,1278 nm dan 0,139 nm. Keduanya mempunyai 28 elektron subvalensi dan membentuk struktur kristal dengan bilangan koordinasi 12. Jika seng ditambahkan pada tembaga, maka dengan mudah seng dapat menggantikan kedudukan tembaga dalam kisi kristal kubus pusat mula (fcc) sampai maksimal menggantikan 40% dari atom tembaga. Larutan padat yang terbentuk melalui penggantian atom dalam struktur kristalnya seperti penggantian atom tembaga oleh seng disebut larutan padat substitusi. Pola kristalnya sendiri tidak berubah. Dalam larutan padat tembaga dan seng ini, distribusi dari seng terjadi secara acak seperti diperlihatkan pada Gambar 1.26.

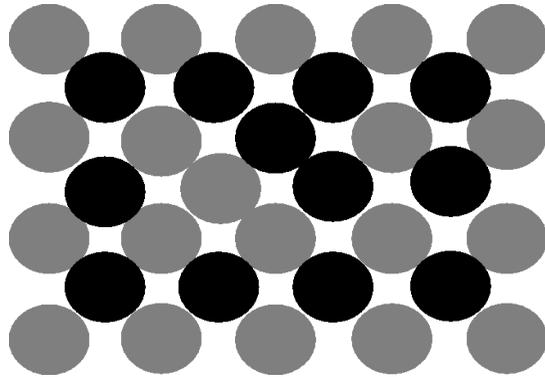


Gambar 1.26.  
Larutan Padat Substitusi Acak Seng dalam Tembaga.

Larutan padat seperti ini sering dijumpai dalam berbagai sistem logam. Pada monel, yakni larutan tembaga-nikel, nikel dapat menggantikan atom tembaga dalam struktur tembaga semula dalam segala perbandingan. Larutan padat tembaga - nikel berkisar dari 0% nikel dan 100% tembaga sampai 100% nikel dan 0% tembaga. Semua paduan tembaga-nikel berstruktur kubus pusat muka (fcc). Sebaliknya, timah putih secara terbatas sekali menggantikan tembaga, membentuk perunggu, dan tetap mempertahankan struktur tembaga semula yaitu kubus pusat muka (fcc). Timah putih yang melebihi daya larut padat maksimal akan membentuk fasa lain.

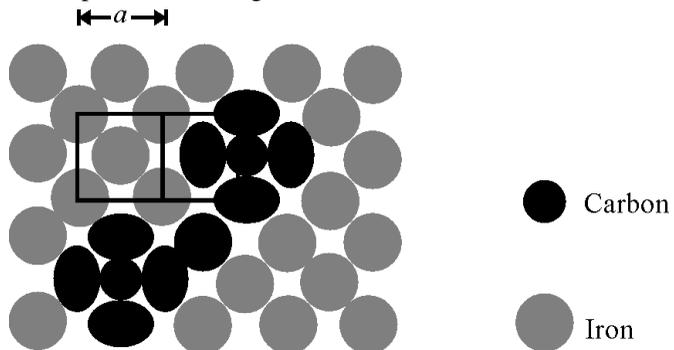
Untuk dapat menggantikan atom lainnya dengan jumlah yang cukup banyak dan membentuk larutan padat substitusi, ukuran atom harus sama atau hampir sama. Nikel dan tembaga mempunyai daya larut yang besar karena keduanya mempunyai struktur kubus berpusat muka (fcc) jejari atomnya masing-masing 0,1246 nm dan 0,1278 nm. Dengan meningkatnya perbedaan ukuran, menurunlah kemampuan substitusinya. Hanya 20% atom tembaga dapat digantikan oleh aluminium karena jejari aluminium adalah 0,1431 nm sedang jejari 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.

Pada Gambar 1.26 telah diperlihatkan 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 kasus ini tidak terjadi pengaturan substitusi kedua unsur. Akan tetapi, sering dijumpai penataan kedua jenis atom sehingga membentuk pengaturan khusus. Gambar 1.27 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 1.27.  
Larutan Padat Substitusi Tertata. Kebanyakan atom (tidak semua) terletak di antara atom bukan sejenis.

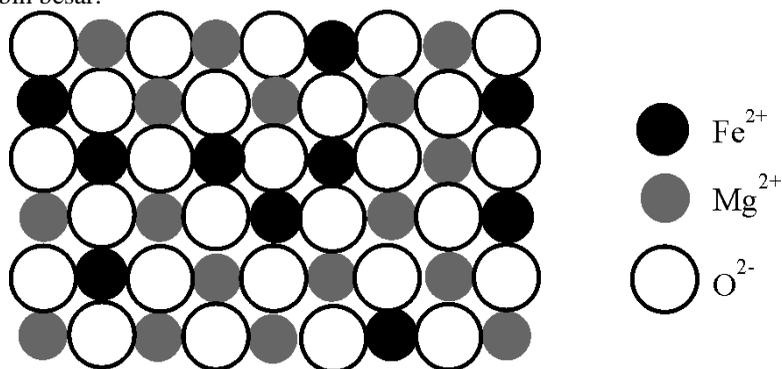
Jenis larutan padat lainnya digambarkan pada Gambar 1.28 yang disebut sebagai larutan padat intertisi. Pada jenis larutan padat ini atom yang kecil dikelilingi oleh atom-atom yang lebih besar. Pada suhu di bawah 912°C, besi murni mempunyai struktur kubus pusat badan. Di atas 912°C, terdapat daerah temperatur tertentu dimana besi mempunyai struktur kubus pusat muka. Pada kisi kubus pusat muka, 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-karbon. Pada suhu yang lebih rendah, dimana besi mempunyai struktur kubus pusat badan, ruang sisipan antara atom-atom jauh lebih kecil, akibatnya daya larut karbon dalam besi kubus pusat badan sangat terbatas.



Gambar 1.28.  
Larutan Padat Intertisi Karbon dalam Besi Kubus Pusat Muka

### C. LARUTAN PADAT DALAM PADATAN IONIK

Larutan padat substitusi terdapat dalam padatan logam maupun padatan ionik. Seperti juga dalam padatan logam, dalam padatan ionik ukuran ion merupakan faktor penting. Gambar 1.30 memperlihatkan larutan padat ionik. Struktur dasarnya adalah MgO dimana ion  $\text{Mg}^{2+}$  digantikan oleh ion  $\text{Fe}^{2+}$ . Karena jejari kedua ion tersebut masing-masing 0,066 nm dan 0,074 nm, substitusi sempurna mungkin terjadi. Sebaliknya, ion  $\text{Ca}^{2+}$  tidak dapat digantikan begitu saja oleh ion  $\text{Mg}^{2+}$  karena jejari ionnya yaitu 0,099 nm, lebih besar.



Gambar 1.29.  
Larutan Padat Substitusi dalam Padatan Ionik

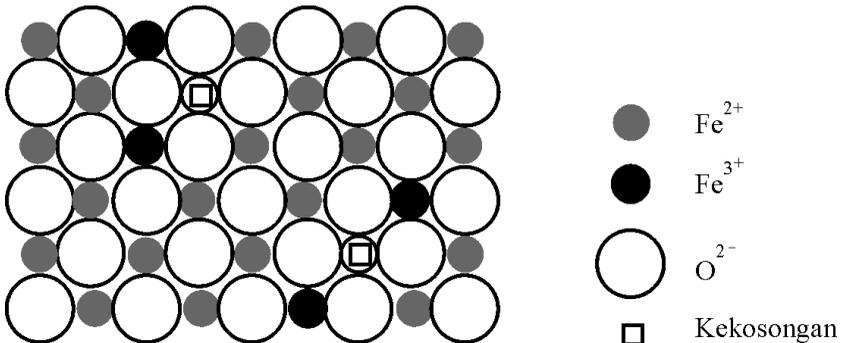
Persyaratan tambahan yang berlaku lebih ketat untuk larutan padat senyawa keramik seperti ini dibandingkan untuk larutan padat logam, ialah bahwa muatan ion yang digantikan harus sama dengan muatan ion baru. Sangat sulit untuk menggantikan  $\text{Mg}^{2+}$  dalam MgO dengan  $\text{Li}^+$ , meskipun keduanya mempunyai jejari yang sama karena akan terdapat selisih muatan.

Berbagai senyawa memiliki perbandingan unsur penyusun yang pasti seperti  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  dan sebagainya. Senyawa tersebut memiliki perbandingan atom yang tetap, oleh karena itu disebut senyawa stoikiometrik. Antara atom yang tak sejenis terbentuk ikatan, sehingga strukturnya akan lebih sempurna dibandingkan struktur pada Gambar 1.26. Senyawa lain menyimpang dari perbandingan utuh untuk kedua atau lebih unsur penyusunnya. Akan dijumpai senyawa  $\text{Cu}_2\text{Al}$  dengan perbandingan mulai dari 31% atom sampai 37% atom Al (atau 16% (berat) sampai 20% (berat) dan bukan tepat 33,3%(atom) Al. Hal serupa kita jumpai pada FeO.

Pada 1000°C, terdapat kadar oksigen dari 51% sampai 53% (atom) dan bukan tepat 50% (atom). Senyawa-senyawa seperti ini dikenal sebagai senyawa non-stoikiometrik karena tidak memiliki perbandingan atom penyusun yang tetap.

Senyawa non-stoikiometrik selalu mencakup larutan padat. Dalam senyawa  $\text{Cu}_2\text{Al}$ , atom-atom memiliki ukuran dan sifat-sifat elektronik yang hampir serupa sehingga dengan adanya kelebihan aluminium, beberapa atom tembaga digantikan oleh atom aluminium (maksimum 37% (atom) Al). Sebaliknya dengan adanya kelebihan tembaga, perbandingan atom Cu/Al mencapai 69/31, dengan pergantian beberapa atom aluminium dalam  $\text{Cu}_2\text{Al}$  oleh atom tembaga.

Pada kasus senyawa non-stoikiometrik lainnya seperti  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$  ion besi dan ion oksigen sangat besar bedanya sehingga terjadinya substitusi kurang dimungkinkan. Senyawa besi selalu mengandung ion ferri ( $\text{Fe}^{3+}$ ) di samping ion ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sehingga untuk keseimbangan muatan selalu harus ada lebih dari 50% (atom) oksigen. Sesungguhnya tiap pasangan ion  $\text{Fe}^{3+}$  memerlukan ion  $\text{O}^{2-}$  tambahan, atau setiap pasang ion  $\text{Fe}^{3+}$  harus disertai kekosongan kation seperti diperlihatkan pada Gambar 1.5. Hal ini dikenal sebagai struktur cacat, karena ada ketidakteraturan dalam tumpukan atom. Pada suhu 1000°C dan dengan adanya kejenuhan besi, komposisinya adalah  $\text{Fe}_{0,96}\text{O}$ ; dan dengan adanya kejenuhan oksigen, komposisinya menjadi  $\text{Fe}_{0,88}\text{O}$ .



Gambar 1.30.  
Struktur Cacat  $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$  ( $x = 0,04-0,16$ )

#### D. KETIDAKSEMPURNAAN DALAM KRISTAL

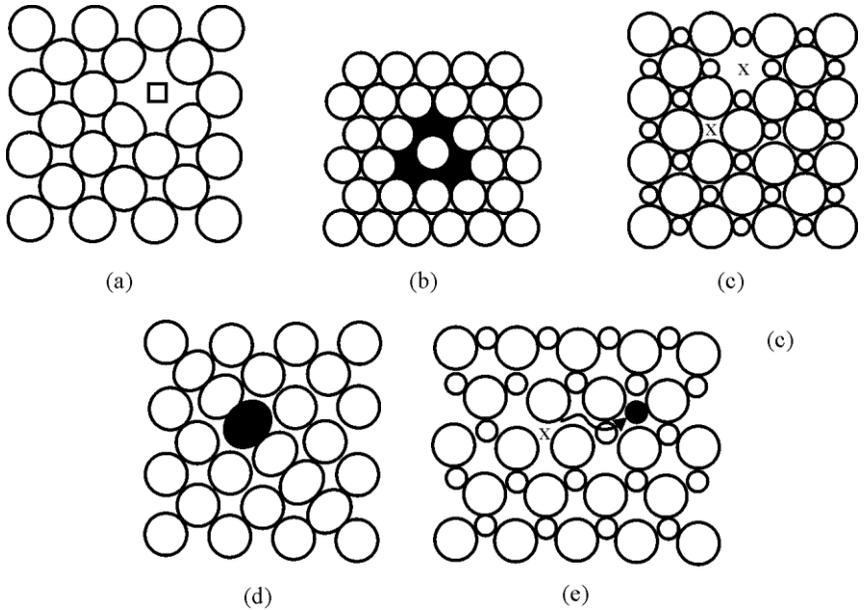
Kristal ideal adalah kristal yang setiap atomnya memiliki tempat keseimbangan tertentu pada kisi yang teratur. Kristal yang sebenarnya

menyimpang jauh dari spesifikasi itu. Ketidaksempurnaan dalam struktur kristal, seperti kehilangan atom, atom yang tidak pada tempatnya, serta kehadiran atom asing mempunyai pengaruh cukup besar pada sifat fisisnya. Ketidaksempurnaan kristal yang disebabkan kekosongan sebuah atau beberapa atom disebut sebagai *cacat titik*. Ketidaksempurnaan lain dalam kristal dapat berupa garis, sehingga 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. Bentuk cacat lainnya adalah cacat dua dimensi yang mencakup *permukaan luar* atau *batas-batas* intern.

*Cacat Titik*. Cacat titik yang paling sederhana adalah kekosongan berupa hilangnya atom dalam kristal seperti diperlihatkan pada gambar 6. Cacat demikian merupakan hasil dari penumpukan yang salah sewaktu kristalisasi, atau dapat juga terjadi pada suhu tinggi meningkatnya energi termal. Bila energi termal tinggi kemungkinan bagi atom-atom untuk melompat meninggalkan tempatnya (pada energi terendah) akan naik pula. Kekosongan dapat berupa kekosongan tunggal [Gambar 1.31(a)], kekosongan ganda [Gambar 1.31(b)] atau kekosongan rangkap tiga.

*Kekosongan pasangan ion* (cacat Schottky) terdapat dalam senyawa yang harus mempunyai keseimbangan muatan [Gambar 1.31(c)]. Cacat ini mencakup kekosongan pasangan ion dengan muatan berlawanan. Kekosongan pasangan ion dan kekosongan tunggal mempercepat difusi atom. Suatu atom tambahan dapat pula berada dalam struktur kristal, khususnya bila faktor tumpukan atom rendah. Cacat semacam ini disebut *sisipan*, mengakibatkan terjadinya distorsi atom [Gambar 1.31(d)].

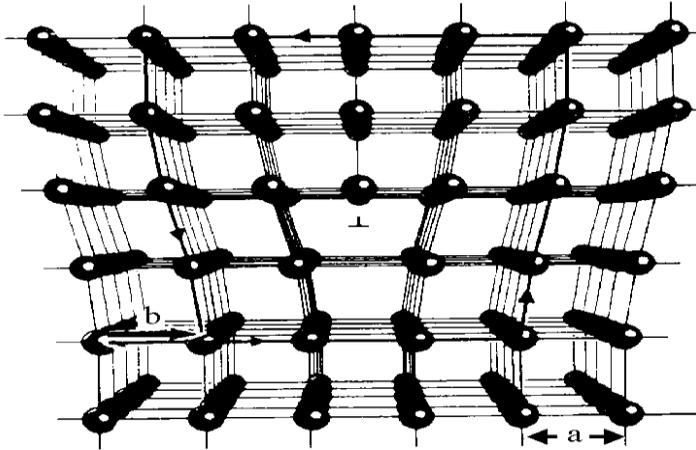
*Perpindahan ion* dari kisi ke tempat sisipan [Gambar 1.(31e)] disebut cacat Frenkel. Struktur tumpukan padat lebih sedikit sisipan dan ion pindahannya dibandingkan kekosongan, karena diperlukan energi tambahan untuk menyisipkan atom.



Gambar 1.31.

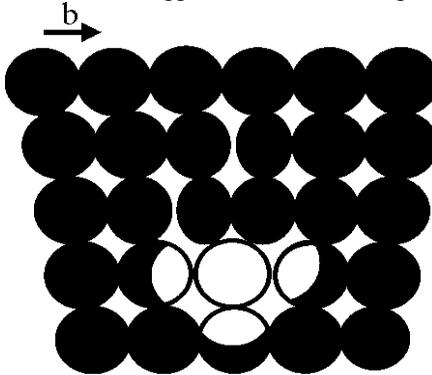
Cacat Titik [(a). Kekosongan, (b). Kekosongan Ganda (Dua Atom Hilang), (c). Kekosongan Pasangan Ion (Cacat Schottky), (d). Sisipan, (e) Ion Terpisah (Cacat Frenkel)]

*Cacat garis (dislokasi)*. Cacat garis yang paling banyak dijumpai di dalam kristal adalah dislokasi. Dislokasi garis dapat dilihat pada Gambar 1.32. Dislokasi ini digambarkan sebagai sisipan satu bidang atom tambahan dalam struktur kristal. Di sekitar suatu dislokasi garis terdapat daerah yang mengalami tekanan dan tegangan (Gambar 1.34) sehingga terdapat energi tambahan sepanjang dislokasi tersebut. Jarak geser atom di sekitar dislokasi disebut vektor geser (vektor Burgers). Vektor ini tegak lurus pada garis dislokasi.



Gambar 1.32.

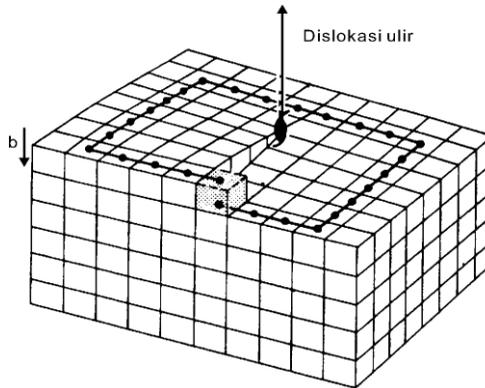
Dislokasi Garis,  $\perp$  [Terjadi Cacat Tinier pada Sisi Bidang-Atom Tambahan.  
Vektor Geser  $b$  Menggambarkan Hasil Pergeseran]



Gambar 1.33.

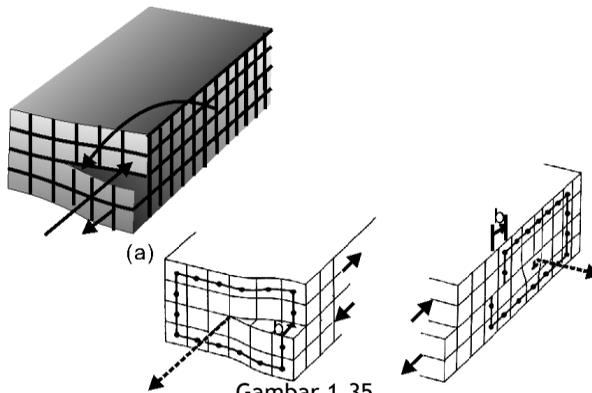
Energi Dislokasi [Atom yang Berdekatan dengan Dislokasi Mengalami Tekanan (warna gelap) dan tegangan (warna putih)]

*Dislokasi ulir* menyerupai spiral dengan garis cacat sepanjang sumbu ulir seperti diperlihatkan pada Gambar 1.34. Vektor gesernya sejajar dengan garis cacat. Atom-atom di sekitar dislokasi ulir mengalami gaya geser, sehingga terdapat energi tambahan di sekitar dislokasi tersebut. Seperti terlihat pada gambar, dislokasi ulir memudahkan pertumbuhan kristal karena atom dan sel satuan tambahan dapat tertumpuk pada setiap anak tangga ulir.



Gambar 1.34.  
Dislokasi Ulir [(Tampak Sel-sel Satuan). Vektor Geser  $b$  Sejajar dengan Cacat Garis]

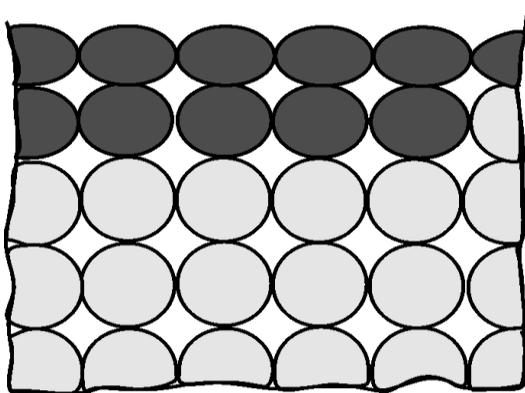
Kedua jenis dislokasi garis terjadi karena ada ketimpangan dalam orientasi bagian-bagian yang berdekatan dalam kristal yang tumbuh sehingga ada suatu deretan atom tambahan ataupun deretan yang kurang. Dislokasi mudah terjadi sewaktu deformasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.35 dimana suatu pergeseran 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 1.35.

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 dengan Arah Pergeseran, dan (c) Cacat Linier yang Terbentuk Disebut Dislokasi Garis. Garis Cacat Tegak Lurus Pada Arah Pergeseran

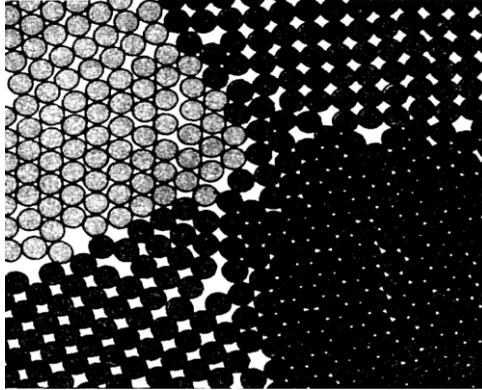
*Permukaan.* Ketidaktepatan kristal dalam dua dimensi merupakan suatu batas. Batas yang paling nyata adalah *permukaan luar*. Permukaan dapat dilukiskan sebagai akhir atau batas struktur kristal. Kita dapat memahami kenyataan bahwa koordinasi atom pada permukaan tidak sama dengan koordinasi atom dalam kristal. Atom permukaan hanya mempunyai tetangga pada satu sisi saja seperti diperlihatkan pada Gambar 1.36. Atom permukaan memiliki energi yang lebih tinggi dan ikatannya kurang kuat. Jika kita tambah atom pada permukaan, maka akan dilepaskan energi yang sama dengan energi penggabungan dua atom tunggal. Bukti yang paling jelas dijumpai pada tetes cairan yang berbentuk bulat agar luas permukaan per satuan volume minimal (demikian energi permukaannya). Penyerapan permukaan merupakan bukti tambahan adanya perbedaan energi pada permukaan.



Gambar 1.36.

Penggambaran Skematis Atom Permukaan [ Karena atom-atom ini tidak seluruhnya dikelilingi oleh atom lainnya, mereka memiliki energi lebih banyak dibandingkan dengan atom-atom di dalam]

*Batas Butir.* Meskipun bahan seperti tembaga dalam kawat listrik terdiri dari satu fasa saja, yaitu satu struktur kubus pusat muka (fcc), benda tersebut terdiri dari banyak sekali kristal dengan orientasi yang berbeda. Kristal-kristal ini disebut butir. Bentuk butir dalam padatan biasanya diatur oleh adanya butir-butir lain di sekitarnya. Dalam tiap butir, semua sel satuan teratur dalam satu arah dan satu pola tertentu. Pada butir, antara dua butir yang berdekatan terdapat daerah transisi yang tidak arah dengan pola dalam kedua butiran tadi seperti diperlihatkan pada Gambar 1.37.



Gambar 1.37.  
Batas Butir [Perhatikan daerah tanpa tata pada batas]

Meskipun kita tidak dapat melihat atom-atom itu satu per satu, tetapi seperti diperlihatkan pada Gambar 1.37, dengan mudah kita dapat melihat batas butir di bawah mikroskop. Untuk keperluan 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 di daerah transisi di antara butiran akan lebih mudah larut dibandingkan atom lainnya dan akan meninggalkan garis yang tampak oleh mikroskop.

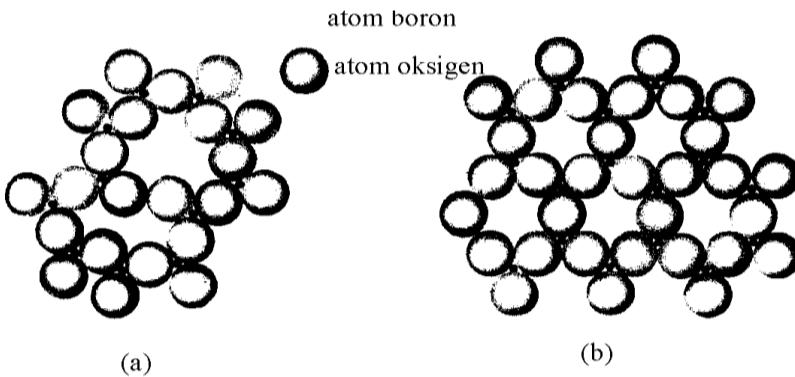
## E. BAHAN NON KRISTALIN

Sebagian besar zat padat berbentuk kristalin dengan atom-atom, ion-ion, atau molekul-molekul tersusun menjadi pola tiga dimensional yang teratur dan terulang. Kehadiran keteraturan berjangkauan panjang merupakan sifat pendefinisi dari zat padat.

Zat padat yang lain tidak memiliki keteraturan berjangkauan panjang dalam susunan partikel pembangunannya dan dapat dianggap sebagai zat cair superdingin yang kekakuannya timbul dari viskositas (kekentalan) yang sangat tinggi. Gelas, termos dan banyak plastik merupakan contoh dari zat padat yang amorf (tanpa bentuk).

Zat padat amorf memiliki keteraturan berjangkauan pendek dalam strukturnya. Perbedaan antara kedua keteraturan itu tergambar dengan jelas pada senyawa boron trioksida ( $B_2O_3$ ) yang dapat berada dalam bentuk kristalin dan amorf. Dalam masing-masing kasus, atom boron dikelilingi oleh tiga atom oksigen yang menyatakan adanya keteraturan berjangkauan

pendek. Dalam kristal  $B_2O_3$  keteraturan berjangkauan panjang juga terdapat, seperti yang ditunjukkan dalam representasi dua dimensi dalam Gambar 1.38, sedangkan  $B_2O_2$  amorf merupakan zat seperti gelas atau kaca, tidak memiliki keteraturan tambahan ini. Pengkristalan (penghabluran) bentuk seperti gelas berlangsung demikian lamban dan biasanya boleh dikatakan tidak terjadi, namun ada juga yang kita kenal terjadinya seperti gelas dapat mengalami devitrifikasi jika dipanaskan sampai hampir mulai lunak, dan gelas yang sangat tua kadang-kadang didapatkan telah mengkristal.



Gambar 1.38.

Representasi Dua-Dimensi dari  $B_2O_3$ . (a)  $B_2O_3$  amorf menunjukkan terdapatnya keteraturan berjangkauan pendek saja. (b)  $B_2O_3$  kristalin menunjukkan juga terdapatnya keteraturan berjangkauan panjang.

Kerapatan suatu zat cair biasanya dekat dengan zat padat yang bersesuaian. Hal ini menyarankan bahwa derajat kekentalan keduanya serupa. Penalaran ini didukung oleh kompresibilitas keadaan bahan itu. Data difraksi menunjukkan bahwa banyak zat cair memiliki struktur berjangkauan pendek tertentu dalam setiap saat, sangat mirip dengan zat padat amorf, kecuali pengelompokan molekul zat cair terus-menerus mengalami pergeseran. Contoh yang jelas terdapatnya keteraturan berjangkauan pendek dalam zat cair ialah pada air sedikit di atas titik bekunya yang menghasilkan kerapatan yang lebih kecil dibandingkan pada temperatur lebih tinggi, karena molekul  $H_2O$  kurang tetap ketika terdang dalam bentuk kristal dibandingkan ketika molekul itu bebas bergerak.

Karena zat padat amorf pada hakikatnya zat cair, zat itu tidak memiliki titik leleh. Kita dapat menafsirkan perilaku ini atas dasar mikroskopik dengan memperhatikan bahwa karena zat padat amorf tidak memiliki keteraturan

berjangkauan panjang, ikatan terlemahnya terputus pada temperatur yang lebih rendah daripada yang lainnya, sehingga zat itu melunak secara berangsur-angsur. Dalam zat padat kristalin transisi antara keteraturan berjangkauan panjang dan berjangkauan pendek (atau tanpa keteraturan) berkaitan dengan putusya ikatan yang kekuatannya hampir sama, dan pelelehan terjadi tepat pada suatu temperatur tertentu.



## LATIHAN

---

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Larutan padat tertata dapat dianggap sebagai senyawa. Jelaskan!
- 2) AlMg bersifat nonstoikiometrik tanpa terjadinya kekosongan, sedangkan FeO yang juga nonstoikiometrik mempunyai kekosongan. Mengapa?
- 3) Dari dua faktor berikut, yakni faktor yang berkaitan dengan ukuran relatif ion dan derajat kepolaran, manakah yang berpengaruh pada cacat Schottky dan cacat Frenkel?
- 4) Dari semua jenis cacat kristal, fenomena *half-melting* atau elektrolit padat termasuk cacat jenis apa?
- 5) Manakah yang akan memberikan pola difraksi sinar-x yang sederhana, padatan kristalin atau padatan amorf?

### *Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Kaitkan jawaban Anda dengan homogenitas ukuran struktur elektron dalam larutan padat tertata dan bandingkan sifat masing-masing penyusun dengan sifat larutan padat tertata.
- 2) Kaitkan jawaban Anda dengan perbedaan relatif ukuran antara Al dengan Mg dibandingkan perbedaan relatif Fe dengan O.
- 3) Cacat Schottky menyangkut kekosongan kation dan anion yang stoikiometris, menyukai senyawa ionik dan ion-ion yang relatif sama ukurannya. Cacat Schottky akan meminimalkan distorsi mekanik dan perpindahan muatan. Cacat Frenkel menyangkut migrasi ion-ion ke dalam bagian interstisial, lebih menyukai senyawa yang relatif kovalen dan anion-anion dengan ukuran besar dan mudah terpolarkan. Anion dengan ukuran yang besar (sekaligus mudah terpolarkan) akan

membuatnya lebih mudah mengakomodasi kation yang berpindah dan meminimalkan faktor tolakan.

- 4) Elektrolit padat umumnya mempunyai cacat Frenkel untuk penyediaan kation dengan mobilitas tinggi. Istilah *half-melting* merujuk pada transisi yang bergantung pada suhu. Di atas suhu ini kation akan bebas bermigrasi.
- 5) Padatan kristalin akan memberikan pola difraksi yang relatif sederhana. Kaitkan dengan keteraturan struktur kristal keduanya.



## RANGKUMAN

---

Walaupun proses penciptaan alam semesta ini sempurna, tetapi selalu terdapat pengecualian di dalamnya. Struktur padatan tidak selalu sempurna, selalu ditemukan adanya ketidaksempurnaan dan ketidakmurnian di dalamnya. Kecacatan sebuah kristal akan menentukan sifat semikonduktor, menentukan kekenyalan logam dan penguatan paduan (*alloy*). Ketidaksempurnaanlah yang turut menentukan warna batu mulia. Ketidakmurnian dan ketidaksempurnaan juga memungkinkan pergerakan atom selama pemanasan, sehingga dapat membentuk struktur baru dan sifat-sifat yang lebih baik. Kristal ideal adalah kristal yang setiap atomnya memiliki tempat keseimbangan tertentu pada kisi yang teratur. Kristal yang sebenarnya menyimpang jauh dari spesifikasi itu. Ketidaksempurnaan dalam struktur kristal, seperti kehilangan atom, atom yang tidak pada tempatnya, serta kehadiran atom asing mempunyai pengaruh cukup besar pada sifat fisisnya. Ketidaksempurnaan kristal yang disebabkan kekosongan sebuah atau beberapa atom disebut sebagai cacat titik. Ketidaksempurnaan lain dalam kristal dapat berupa garis, sehingga 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. Bentuk cacat lainnya adalah cacat dua dimensi yang mencakup permukaan luar atau batas-batas intern. Zat padat yang tidak memiliki keteraturan berjangkauan panjang dalam susunan partikel pembangunannya dan dapat dianggap sebagai zat cair superdingin yang kekakuannya timbul dari viskositas (kekentalan) yang sangat tinggi. Gelas, termos dan banyak plastik merupakan contoh dari zat padat yang amorf (tanpa bentuk).

**TES FORMATIF 3**

---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Larutan padat mudah terbentuk bila pelarut dan atom yang larut memiliki ....
  - A. ukuran dan struktur elektron yang serupa
  - B. titik didih dan titik leleh yang sama
  - C. kekerasan dan konduktivitas yang serupa
  - D. jumlah dan konsentrasi yang sama
  
- 2) Larutan padat yang terbentuk melalui penggantian atom dalam struktur kristalnya seperti penggantian atom tembaga oleh seng disebut larutan padat ....
  - A. interstisial
  - B. substitusi
  - C. sisipan
  - D. eliminasi
  
- 3) Ketidaksempurnaan kristal yang disebabkan kekosongan sebuah atau beberapa atom disebut sebagai cacat ....
  - A. butir
  - B. dislokasi
  - C. titik
  - D. garis
  
- 4) Cacat kristal yang terjadi karena kekosongan pasangan ion dengan muatan berlawanan disebut sebagai cacat ....
  - A. Frenkel
  - B. garis
  - C. titik
  - D. Schottky
  
- 5) Bahan berikut merupakan contoh dari bahan non kristalin yang amorf adalah ....
  - A. gelas, termos dan plastik
  - B. garam dapur dan garam Inggris
  - C. garam halida dari unsur perak
  - D. seng blende dan rutil

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 3 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 3.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 3, terutama bagian yang belum dikuasai.

## Kunci Jawaban Tes Formatif

### *Tes Formatif 1*

- 1) A. 1,43. Lihat pembahasan tentang kerapatan ideal kristal.
- 2) B. Kubus pusat muka. Lihat pembahasan tentang susunan atom dalam kisi kristal logam.
- 3) B. A dan C. Lihat pembahasan tentang susunan atom dalam kisi kristal logam.
- 4) C. 2,89. Lihat pembahasan tentang geometri kristal logam.
- 5) D. Al, Au, dan Ag. Lihat pembahasan tentang sifat umum logam dan susunan atom dalam kisi kristal logam.
- 6) B. Si. Lihat pembahasan tentang konduktor, isolator, dan semi-konduktor.
- 7) D. Penghantar listrik. Lihat pembahasan tentang sifat umum logam.
- 8) C. Penambahan unsur B. Lihat pembahasan tentang semikonduktor tipe n dan p.
- 9) D. Adanya tumpangtuh orbital 3s-3p. Lihat pembahasan tentang pita hantaran dari Mg.
- 10) A. Titik leleh. Lihat pembahasan tentang konduktor dan isolator.

### *Tes Formatif 2*

- 1) D. Jarak terdekat ion positif dan negatif adalah  $\frac{1}{2} a_3$ . Lihat pembahasan tentang struktur senyawa ionik dan perhitungan perbandingan jejari.
- 2) D.  $\text{Fe}^{2+}$ .  
Lihat konfigurasi elektronnya.
- 3) C. 8. Lihat pembahasan tentang struktur senyawa ionik.
- 4) C. 6. Lihat pembahasan tentang perhitungan perbandingan jejari.
- 5) D. TlBr. Lihat pembahasan tentang struktur senyawa ionik dan perhitungan perbandingan jejari.

### *Tes Formatif 3*

- 1) A. Ukuran dan struktur elektron yang serupa. Lihat pembahasan tentang larutan padat dalam padatan logam
- 2) B. Substitusi. Lihat pembahasan tentang larutan padat dalam padatan logam.

- 3) C. Titik. Lihat pembahasan tentang cacat kristal.
- 4) D. Schottky. Lihat pembahasan tentang cacat kristal.
- 5) A. Gelas, termos dan plastik. Lihat pembahasan tentang bahan non kristalin.

## Glosarium

Allotrop	Unsur yang terdapat dalam dua atau lebih struktur kristal yang berbeda sifat fisiknya tetapi dengan sifat kimia yang sama.
Alloy atau paduan logam	Dua logam atau lebih saling bercampur secara homogen menjadi satu
Bahan kristalin	Bahan berbentuk kristal yang menyerupai hablur atau telah menghablur. Zat padat yang lain memiliki keteraturan berjangkauan panjang dalam susunan partikel.
Bahan non kristalin	Zat padat yang lain tidak memiliki keteraturan berjangkauan panjang dalam susunan partikel.
Bentuk kanonik	Bentuk antara suatu senyawa yang beresonansi.
Bilangan koordinasi	Jumlah spesi lain (ligan, atom, ion, atau molekul) sekitar spesi pusat dalam geometri tertentu.
Cacat Frenkel	Ketidaktempurnaan kristal yang disebabkan perpindahan ion dari kisi ke tempat sisipan.
Cacat garis	Ketidaktempurnaan kristal yang disebabkan sisipan satu bidang atom tambahan dalam struktur kristal.
Cacat Schottky	Ketidaktempurnaan kristal yang disebabkan kekosongan pasangan ion dengan muatan berlawanan.
Cacat titik	Ketidaktempurnaan kristal yang disebabkan kekosongan sebuah atau beberapa atom.
Difraksi	Gejala pembelokan arah suatu gelombang elektromagnetik ketika gelombang tersebut melalui tepi suatu objek.
Efek perlindungan atau <i>shielding effect</i>	Efek perlindungan sebuah elektron terhadap tarikan inti dari elektron kulit sebelah dalamnya.
Energi kohesi, energi kristal atau energi kisi	Penurunan energi internal yang terjadi pada suhu nol mutlak jika satu mol padatan tersebut terbentuk dalam struktur kisi dari sejumlah ion dalam keadaan gas. Kenaikan energi internal yang terjadi pada pemecahan padatan kristal menjadi ion-ion gasnya.

Heksagonal terjal	Struktur dasar kristal yang dibentuk pertama kali dengan menyusun bola yang berbidang datar atau lapisan dimana setiap bola bersinggungan dengan enam bola lain yang diorientasikan ke arah sudut heksagonal. Bidang kedua dibentuk dengan menyusun bola di atas celah yang membentuk segitiga pada bidang pertama. Bola-bola pada bidang ketiga susunannya dapat diarahkan langsung di atas bola pada bidang pertama membentuk susunan dengan struktur berulang.
Inert atau lembam <i>Inert gas, noble gas</i> atau gas mulia	Tidak dapat bereaksi secara kimia. Golongan 18 dari sistem periodik yang awalnya dianggap tidak dapat bereaksi dengan unsur lainnya.
Interkasi atau gaya dipol	Interaksi atau gaya antar molekul yang memiliki dipol molekul.
Isolator atau insulator	Benda yang tidak dapat menghantarkan panas dan listrik dengan baik.
Kisi	Pengulangan susunan titik-titik atau partikel-partikel secara geometris.
Konduktansi	Sifat yang menggambarkan perpindahan panas atau listrik melalui bahan tanpa perpindahan molekul atau spesi penyusunnya.
Konduktor	Benda yang dapat menghantarkan panas dan listrik dengan baik.
Kristal	Padatan dengan partikel penyusun tersusun dengan pola pengulangan tertentu dan teratur.
Kubus sederhana	Struktur dasar kristal yang dibentuk dengan menyusun bola-bola itu membentuk bidang segi empat datar. Lapisan kedua bidang segi empat datar berada tepat di atas bola-bola lapisan pertama, dan ini dilakukan berulang-ulang. Setiap bola dalam struktur ini bersinggungan dengan empat bola lain yang identik dalam bidang datar yang sama. Selain itu juga bersinggungan dengan satu bola dari bidang atas dan satu bola dari bidang bawahnya.

Kubus pusat badan	Struktur dasar kristal yang dibentuk pertama kali dengan menyusun bola ke dalam bidang segi empat datar, tetapi satu sama lain tidak bersinggungan. Susunan bola untuk bidang segi empat datar kedua menempati celah-celah bidang datar pertama. Susunan bola bidang datar ketiga menempati celah-celah bidang datar kedua, dan seterusnya.
Kubus terjejal atau kubus pusat muka	Struktur dasar kristal yang dibentuk pertama kali dengan menyusun bola yang berbidang datar atau lapisan dimana setiap bola bersinggungan dengan enam bola lain yang diorientasikan ke arah sudut heksagonal. Bidang kedua dibentuk dengan menyusun bola di atas celah yang membentuk segitiga pada bidang pertama. Atom-atom pada bidang ketiga dapat disusun di atas celah bidang pertama yang tidak digunakan pada pembentukan bidang kedua.
Logam transisi atau logam d	Unsur-unsur yang memiliki orbital d sebagai orbital terluar; merupakan logam, umumnya berwarna dan mengkilap, penghantar listrik dan panas yang baik, mempunyai valensi lebih dari satu buah, dan sifat kimianya ditentukan oleh elektron di kedua orbital terluarnya, ns (n-1) d serta dapat membentuk senyawa atau ion kompleks.
Logam transisi dalam atau logam f	Kelompok unsur lantanida dan aktinida dimana orbital f mulai terlibat pengisian elektron.
Oktahedron	Bidang delapan beraturan, dengan delapan sisi dengan tiap sisi merupakan segitiga beraturan.
Pita energi	Tingkat-tingkat energi yang sama dari elektron dalam orbital-orbital.
Pita valensi	Pita energi tertinggi yang berisi elektron.
Pita konduksi	Pita energi di atas pita valensi yang kosong (tidak berisi elektron).

Pita terlarang	Selang energi ( <i>gap energy</i> ) yang tidak boleh dimiliki elektron. Pita dengan selang energi tanpa orbital molekul.
Polimorf	Dua atau lebih bahan kristalin yang terbentuk dari bahan yang sama tetapi mempunyai perbedaan struktur kristalnya (mempunyai susunan atom-atom yang berbeda).
Satuan sel	Satuan dasar penyusun kristal yang berulang tak terhingga dalam susunan tiga dimensi.
Sela energi ( <i>energy gap</i> )	Perbedaan energi antara pita valensi tertinggi dengan pita konduksi terendah.
Semikonduktor	Benda yang mempunyai sifat daya hantar listrik antara konduktor dan isolator.
Senyawa non stoikiometrik	Senyawa yang tidak memiliki perbandingan atom penyusun yang tetap.
Stereokimia	Bagian dari ilmu kimia yang mempelajari letak atom dalam ruang yang membentuk molekul atau ion. Bentuk ruang tiga dimensi molekul atau ion.
Sinar-X	Radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang dalam orde $10^{-8}$ cm yang dipancarkan jika logam ditembak dengan elektron berkecepatan tinggi.
Spesi	Istilah yang digunakan untuk menunjukkan atom, ion atau molekul atau kumpulannya.
Resonansi	Suatu keadaan yang menggambarkan dua atau lebih struktur kimia mempunyai stabilitas yang hampir sama dan mempunyai susunan inti atom sama tetapi berbeda dalam susunan elektronnya. Disebut sebagai hibrida resonansi jika struktur molekul tidak dapat dinyatakan oleh satu struktur pun.
Tingkat energi	Salah satu dari sejumlah energi diskret yang dapat dimiliki inti atom, atom, molekul atau sistem lainnya.
Tetrahedral	Polihedron berbidang empat, bidang empat, limas segitiga, limas bujursangkar, limas segi empat, limas segi lima.
Vitrifikasi	Proses perubahan menjadi seperti kaca.

## Daftar Pustaka

- Beiser, A. (1990). *Konsep Fisika Modern*. Edisi Keempat, a.b. The Houw Liong. Jakarta: Erlangga.
- Day, M. C. Jr. dan Selbin, J. (1987). *Kimia Anorganik Teori*, a.b. Wisnu Susetyo. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Douglas, B., McDaniels, D. H. dan Alexander, J. J. (1983). *Concepts and Models of Inorganic Chemistry*, 3<sup>th</sup> Edition. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Huheey, J. E., Keiter, E. A. dan Keiter, R. L. (1993). *Inorganic Chemistry: Principles of Structure and Reactivity*, Fourth Edition. New York: Harper Collins College Publishers.
- Manku, G. S. (1980). *Theoretical Principles of Inorganic Chemistry*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Miessler, G. dan Tarr, D. A. (1999). *Inorganic Chemistry*, Second Edition. New Jersey: Prentice Hall International, Ltd.
- Purcell, K. F. dan Kotz, J. C. (1980). *Inorganic Chemistry*. Philadelphia: Saunders College Publishing.
- Rodgers, G. E. (1994). *Introduction to Coordination, Solid State, and Descriptive Inorganic Chemistry*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Van Vlack, L. H. (1991). *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Edisi Kelima, a.b. Sriati Djaprie. Jakarta: Erlangga.