

## บทที่ 7 ของแข็ง (Solid)

### 7.1 ลักษณะทั่วไปของของแข็ง

ของแข็งจัดว่าเป็นสถานะหนึ่งของสสารที่มีรูปร่างและขนาดที่แน่นอน ในของแข็งถ้ามองลึกลงไปถึงระดับอะตอมเล็ก ๆ แล้วก็จะพบว่าประกอบด้วยอนุภาค (อะตอม โมเลกุล ไอออน) ที่เกาะเกี่ยวกันด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่เรียกว่า พันธะเคมี อนุภาคเหล่านั้นบางทีก็มีการจัดเรียงอย่างมีระบบเป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ มีระยะห่างต่างกันหรือความหนาแน่นต่างกัน การจัดเรียงตัวของอนุภาคในของแข็งทำให้ของแข็งมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติเคมีต่างกันไป เช่น ความเบา ความแข็ง ความเปราะ ความวาว การนำไฟฟ้าความร้อน การเป็นฉนวน และความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น

ของแข็งจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solid) เป็นของแข็งที่เกิดจากการจัดเรียงอนุภาคไม่เป็นระเบียบ ไม่มีรูปร่างทางเรขาคณิตที่แน่นอน เช่น แก้ว ยาง พลาสติก เป็นต้น

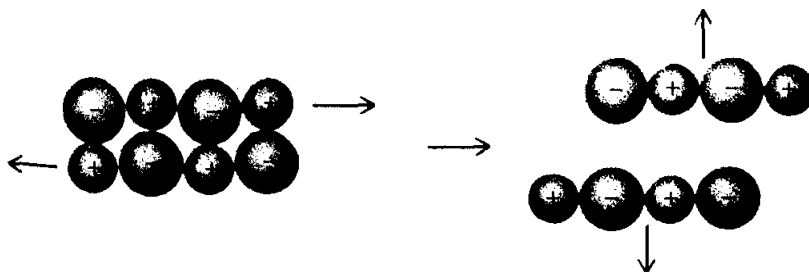
2. ของแข็งหรือผลึก (crystalline solid) เป็นของแข็งที่เกิดจากการจัดเรียงของอนุภาคอย่างเป็นระเบียบทางเรขาคณิตเป็นสามมิติ มีด้านตัดเป็นเหลี่ยม มีมุมที่เฉพาะทำให้มีรูปร่างต่าง ๆ กัน เช่น โซเดียมคลอไรด์ คอปเปอร์ซัลเฟต แกรไฟต์ โลหะบริสุทธิ์ เป็นต้น การที่ผลึกของแข็งมีอนุภาคจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบนี้ทำให้มีสมบัติทางกายภาพที่แน่ชัด เช่น ดัชนีหักเห จุดหลอมเหลว

### 7.2 ชนิดของผลึก

ผลึกสามารถจำแนกตามแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคในผลึกได้ 4 ชนิด คือ ผลึกไอออนิก ผลึกโคเวเลนต์ ผลึกโมเลกุลและผลึกโลหะ

1. **ผลึกไอออนิก** ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ โดยทั่วไปไอออนทั้งสองมักมีขนาดแตกต่างกัน เช่น โซเดียมคลอไรด์ พันธะระหว่างไอออนภายในผลึกเกิดจากการดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ซึ่งมีความแข็งแรง ทำให้สารประกอบไอออนิกมีจุดหลอมเหลวและเดือดสูง ผลึกไอออนิกโดยทั่วไปมีความแข็งแต่เปราะ ทั้งนี้เกิดจากการเคลื่อนที่

ของระนาบไอออนอันหนึ่งบนอีกระนาบหนึ่ง ดังรูปที่ 7.1 ทำให้ไอออนบนระนาบมีประจุเหมือนกัน ตรงกัน และผลักกัน ทำให้ผลึกแตกออกเป็นส่วนเล็กๆ ผลึกไอออนิกไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากแต่ละไอออนต่างถูกยึดหรืออยู่กับที่ด้วยแรงที่อยู่รอบข้างในผลึก ทำให้ไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ อีกทั้งอิเล็กตรอนในผลึกก็จะยึดแน่นอยู่ที่แต่ละไอออน ทำให้ไม่มีการนำไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีการไหลของอิเล็กตรอน เมื่อผลึกได้รับพลังงานความร้อนจนหลอมละลายเป็นของเหลว หรือผลึกถูกละลายในน้ำเป็นสารละลาย ทำให้ไอออนสามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระ นำไฟฟ้าได้ดี

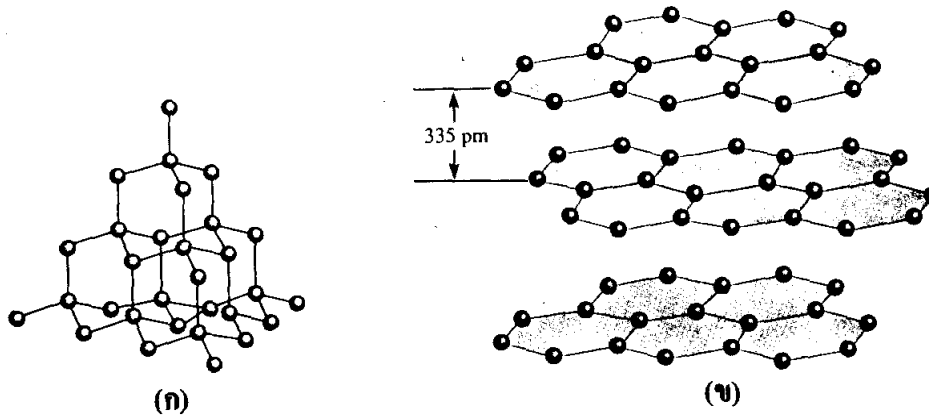


รูปที่ 7.1 การเคลื่อนที่ของระนาบในผลึกไอออนิก

2. **ผลึกโคเวเลนต์** ในผลึกอะตอมจะยึดกันอยู่ด้วยพันธะโคเวเลนต์ ที่แตกแขนงขยายออกเป็นโครงร่างแหแบบ 3 มิติขนาดใหญ่ ตัวอย่างผลึกนี้ศึกษาได้จากอันยรูปของคาร์บอน คือ เพชร และแกรไฟต์

คาร์บอนในเพชร แต่อะตอมจะเกิดพันธะกับอะตอมอื่นอีก 4 อะตอม แบบ tetrahedral ติดต่อกันเป็นโครงสร้างแห 3 มิติ ขนาดใหญ่ในผลึก ทำให้เพชรมีความแข็งแกร่งเป็นพิเศษมากกว่าสารใด ๆ (มีความแข็ง = 10 ในโมร์สเกล) จุดหลอมเหลวสูง  $3550^{\circ}\text{C}$

สำหรับแกรไฟต์ อะตอมของคาร์บอนมีจัดเรียงตัวแบบเป็นวงหกเหลี่ยม เชื่อมติดต่อกันเป็นแพ เป็นชั้น (ดังรูปที่ 7.2) คาร์บอนแต่ละอะตอมมีไฮบริดไดเซชันแบบ  $sp^2$  ที่เกิดพันธะโคเวเลนต์กับอีก 3 อะตอม คาร์บอนอื่นที่อยู่ข้างเคียงในระนาบเดียวกัน



รูปที่ 7.2 แสดงการจัดเรียงอะตอมคาร์บอนในโครงสร้าง ก. เพชร ข. แกรไฟต์

อะตอมของคาร์บอนเหล่านี้ยังเหลืออิเล็กตรอนใน 2p-orbital ที่ไม่ถูกไฮบริดไดส์ สามารถเกิดพันธะไพ (π-bond) ทำให้แต่ละระนาบของแกรไฟต์มีอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปทั่วระนาบ ดังนั้นแกรไฟต์จึงนำไฟฟ้าได้ดีในทิศทางตามแนวระนาบของอะตอมคาร์บอน แต่ละระนาบอะตอมคาร์บอนยึดกันอยู่ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ ระยะห่างระหว่างระนาบ = 335 พิโคเมตร (0.335 nm) ส่วนพันธะโคเวเลนต์ระหว่างอะตอมคาร์บอน (ความยาวพันธะ 142 พิโคเมตร) ในระนาบเดียวกัน ทำให้แกรไฟต์มีความแข็ง ขณะที่แรงดึงดูดระหว่างระนาบเป็นแรงที่อ่อน ทำให้แต่ละระนาบสามารถเลื่อนไหลอีกระนาบหนึ่งได้ ทำให้แกรไฟต์มีความลื่น จึงใช้ประโยชน์เป็นสารหล่อลื่น ทำไส้ดินสอ และหมึกพิมพ์ในเครื่องพิมพ์ดีด

ตัวอย่างผลึกโคเวเลนต์อีกชนิดหนึ่งคือ ควอตซ์ (quartz)  $\text{SiO}_2$  ในโครงผลึกมีการจัดอะตอมของที่คล้ายคลึงกับของอะตอมคาร์บอนในเพชรมาก ต่างกันที่จะมีหนึ่งอะตอมของออกซิเจนอยู่ระหว่าง 1 คู่ของอะตอมของซิลิกอน และพันธะ Si-O เป็นแบบ polar (เนื่องจาก Si และ O มีค่า electronegativity ต่างกัน) อย่างไรก็ดี ผลึก  $\text{SiO}_2$  มีความแข็งแรงมาก และมีจุดหลอมเหลวสูง  $1610^\circ\text{C}$

### 3. ผลึกโมเลกุล

ผลึกชนิดนี้อนุภาคภายในผลึกเป็นโมเลกุลมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ และ/หรือพันธะไฮโดรเจน ตัวอย่างผลึกโมเลกุล เช่น ของแข็ง  $\text{SO}_2$  ซึ่งมีแรงดึงดูดแบบ dipole-dipole น้ำแข็งมีโครงสร้างแบบ tetrahedral เชื่อมต่อกันลักษณะแบบ 3 มิติมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ตัวอย่างผลึกโมเลกุลอื่น ๆ เช่น  $\text{I}_2$ ,  $\text{P}_4$ ,  $\text{S}_8$  เป็นต้น ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลแบบ London force โดยทั่วไป (ยกเว้นน้ำแข็ง) โมเลกุลต่าง ๆ ในผลึกโมเลกุลจะพยายามจัดตัวให้ใกล้ชิดกันที่สุดเท่าที่ชิดได้ตามขนาดและรูปร่างของโมเลกุล และเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแรงที่อ่อน ทำให้ผลึกโมเลกุลค่อนข้างจะแตกหักได้ง่ายกว่าผลึกไอออนิกและผลึกโคเวเลนต์ และมีจุดเดือดต่ำกว่า  $100^\circ\text{C}$  โดยทั่ว

ไปแล้วผลึกโมเลกุลเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เลวมากหรือไม่นำไฟฟ้าเลย (ไม่ว่าสภาพของแข็งหรือของเหลว) เนื่องจากแต่ละโมเลกุลยังคงรักษาเอกลักษณ์ของตัวเองอยู่โดยอิเล็กตรอนจำกัดที่อยู่ในเฉพาะแต่ละโมเลกุลเท่านั้น จึงไม่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลอื่น ๆ

#### 4. ผลึกโลหะ

โครงสร้างของอิเล็กตรอนในโลหะ มีความแตกต่างจากสารอื่น ๆ ที่วาเลนซ์อิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมไม่ได้ยึดเฉพาะอะตอมนั้น ๆ แต่สามารถเคลื่อนที่ไปยังอะตอมอื่น ๆ ได้ ทั่วผลึกของโลหะอย่างอิสระ คล้ายกับเป็นทะเลของอิเล็กตรอน และมีกลุ่มของไอออนบวก (ส่วนที่เหลือของอะตอม) จมอยู่ในท่ามกลางทะเลอิเล็กตรอน ที่เคลื่อนที่ได้ ทำให้โลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับทะเลอิเล็กตรอนนี้เรียกพันธะโลหะ ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทำให้โลหะส่วนใหญ่มีจุดหลอมเหลวสูง มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากโครงสร้างไอออนบวกในผลึกมีการจัดเรียงแบบชิดที่สุด (closest packed) ในผลึกโลหะระนาบของอะตอมอาจเคลื่อนที่บนระนาบอื่น ๆ ได้ง่าย ทำให้โลหะมีสมบัติที่หักงอได้ และสามารถตีแผ่และรีดเป็นเส้นได้

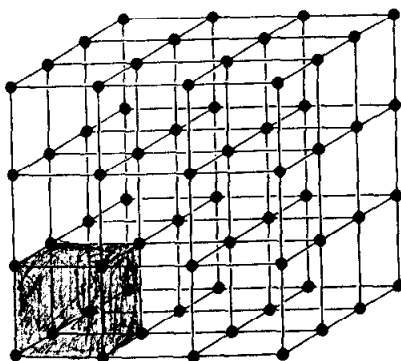
สมบัติของผลึกทั้ง 4 ชนิดได้สรุปในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ชนิดของผลึกและสมบัติของผลึก

ชนิดของผลึก	จุดแลตทิซ	แรงยึดเหนี่ยว	สมบัติทั่วไป	ตัวอย่าง
1. ไอออนิก	ไอออนบวกและไอออนลบ	แรงดึงดูดระหว่างประจุ	แข็ง เพราะ จุดหลอมเหลวสูง ไม่นำความร้อนและไฟฟ้าแต่ในสภาพหลอมเหลวหรือสารละลายในน้ำสามารถนำไฟฟ้าได้	NaCl, KCl, LiF, KI, MgO, CsCl, ZnS, CaF <sub>2</sub>
2. โคเวเลนต์	อะตอม	พันธะโคเวเลนต์	แข็ง จุดหลอมเหลวสูง ไม่นำความร้อนและไฟฟ้า	C (เพชร) C (แกรไฟต์) SiO <sub>2</sub> (ควอตซ์) AlCl <sub>3</sub> , Al(OH) <sub>3</sub>
3. โมเลกุล	โมเลกุลหรืออะตอม	แรงแผ่กระจายหรือแรงลอนดอนแรงไดโพล-ไดโพลพันธะไฮโดรเจน	อ่อน จุดหลอมเหลวต่ำ ไม่นำความร้อนและไฟฟ้า	SO <sub>2</sub> , P <sub>4</sub> , S <sub>8</sub> , Ar, CO <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>12</sub> (ซูโครส)
4. โลหะ	อะตอม	พันธะโลหะ	อ่อนถึงแข็ง จุดหลอมเหลวต่ำถึงสูง นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี	ธาตุโลหะทุกชนิด เช่น Na, Mg, Fe, Cu, Hg, Mn, Sn

### 7.3 ระบบของผลึก

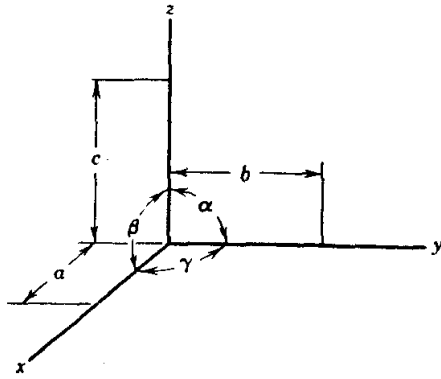
การที่ผลึกมีอนุภาคเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบทางเรขาคณิตแบบสามมิติ มีมุมตัดเฉพาะ ทำให้เกิดโครงสร้างของอนุภาคขึ้นภายในผลึก โดยจินตนาการว่าผลึกสร้างขึ้นจากจุดเล็ก ๆ ติดต่อกันแบบซ้ำ ๆ กันโดยให้จุดเล็ก ๆ นี้เป็นจุดแลตทิซ (Lattice point) จุดแลตทิซนี้อาจเป็นตำแหน่งของอนุภาค แต่ละจุดแลตทิซจะต้องมีสิ่งแวดล้อมเหมือนกับจุดอื่น ๆ ในทุกทิศทางที่เหมือนกัน จุดแลตทิซในสามมิติเรียกว่า space lattice หรือ crystal lattice ซึ่งเรียกสั้น ๆ ว่าแลตทิซ เมื่อโยงจุดแลตทิซในระนาบเดียวกัน เรียกระนาบแลตทิซซึ่งลักษณะเป็นระนาบหลายๆ ระนาบขนาดกันดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ (สีทึบ) ที่เรียงต่อกันขยายเป็นผลึกจุดสีดำแทนอะตอมหรือโมเลกุล

หน่วยเซลล์ (Unit cell) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของแลตทิซ ซึ่งยังคงรักษาสมบัติของผลึกทั้งหมด ดังนั้นผลึกจึงประกอบด้วยหลายหน่วยเซลล์ที่รวมตัวกัน ตัวอย่างเช่น ผลึกของรูปลูกบาศก์ ก็มีหน่วยเซลล์เป็นรูปลูกบาศก์เล็ก ๆ ที่เหมือนกันเรียงต่อกันทั่วผลึก และเนื่องจากผลึกประกอบขึ้นด้วยหน่วยเซลล์ที่มีผิวหน้า มุม และขอบตัดร่วมกัน ดังนั้นอนุภาคที่อยู่เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยเซลล์อันหนึ่ง จึงเป็นส่วนร่วมของอีกหน่วยเซลล์ที่อยู่ติดกัน

การบอกรูปร่างของผลึกทำได้โดยการตั้งแกนให้มีความสัมพันธ์กับรูปร่างภายนอกของผลึกนั้น ๆ และกำหนดให้  $a$ ,  $b$  และ  $c$  เป็นความยาวของด้านใน 3 มิติของหน่วยเซลล์บนแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับเรียกแกนคริสตัลโลกราฟีค (crystallographic axes) ตามรูปที่ 7.4



มุมที่อยู่ระหว่าง b กับ c เรียก  $\alpha$  (อัลฟา)

มุมที่อยู่ระหว่าง c กับ a เรียก  $\beta$  (เบต้า)

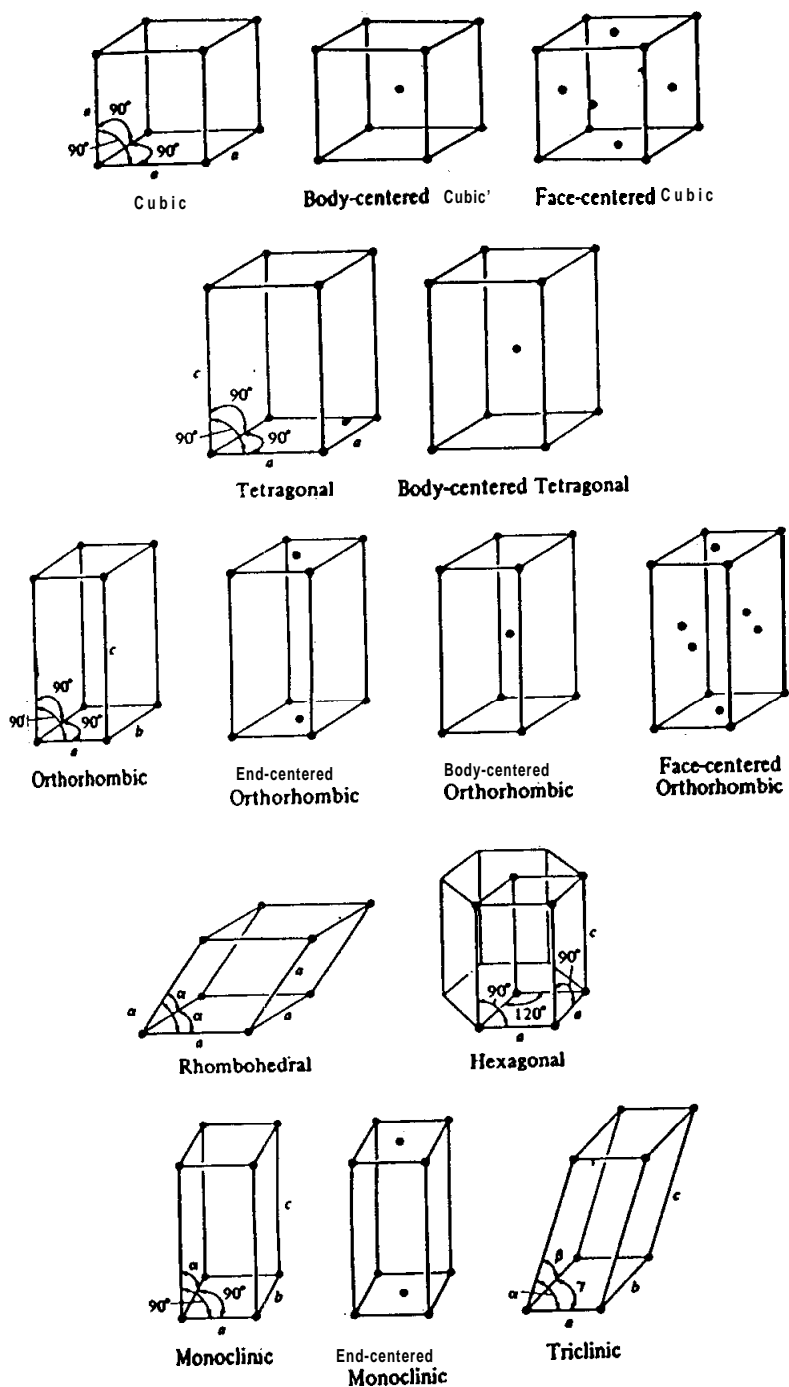
มุมที่อยู่ระหว่าง a กับ b เรียก  $\gamma$  (แกมมา)

**รูปที่ 7.4 แสดงแกน crystallographic  
ของผลึกรูปลูกบาศก์**

ในปี ค.ศ. 1848 บราวส์ (Bravais) ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกและได้จัดแบ่งลักษณะของผลึกต่างๆ ออกได้ 7 ระบบ ดังตารางที่ 7.2 และมีรูปแบบผลึกได้ 14 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 7.5

**ตารางที่ 7.2 ระบบผลึก 7 ชนิด**

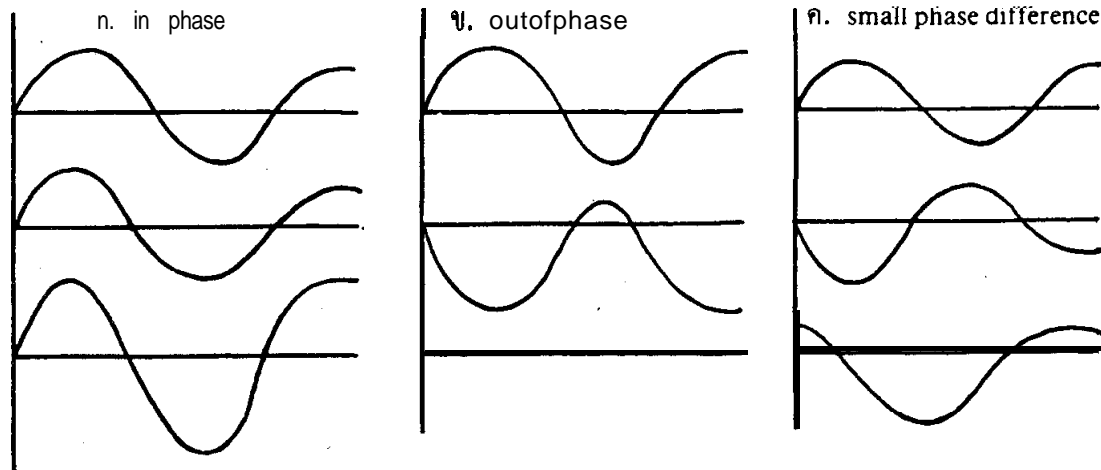
ระบบ	มุม	ความยาวของแกน
Triclinic	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	a f b f c
Monoclinic	$a = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	a f b f c
Orthorhombic	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a f b f c
Tetragonal	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a = b # c
Rhombohedral (Trigonal)	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	a = b = c
Hexagonal	$a = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	a = b # c
Cubic	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	a = b = c



รูปที่ 7.5 แลตติชบราเวสในแต้ละระบบของผลึก

## 7.4 การหาโครงสร้างผลึก

เราสามารถศึกษาหาโครงสร้างผลึกโดยใช้รังสีเอกซ์ (X-ray) ซึ่งเป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นประมาณ 0.001-10 nm มีพลังงานและอำนาจทะลุทะลวงสูง แนวทางเดินของรังสีมีได้ 3 ลักษณะ คือ ลักษณะที่คลื่นเสริมกัน (in phase) คลื่นหักล้างกัน (out of phase) และคลื่นหักล้างเป็นบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 7.6 แสงที่มีแนวเดินทางของคลื่นลักษณะที่เสริมกัน ทำให้แสงมีความเข้มหรือสว่างมาก แต่ถ้าเป็นลักษณะที่หักล้างกันบางส่วนหรือหักล้างกันหมด ความเข้มก็จะลดความสว่างลงจนกระทั่งมืดมิด



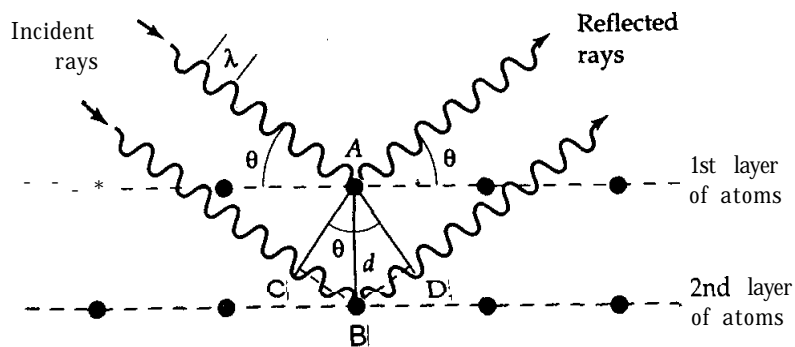
รูปที่ 7.6 แสดงแนวทางการเดินทางของแสง

ในปี ค.ศ. 1912 แมกซ์ ฟอน เลาเอ (Max von Laue) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้ค้นพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เมื่อฉายผ่านผลึก โดยมีแนวความคิดว่า อนุภาคเช่นอะตอมหรือไอออน ภายในผลึกที่อยู่กันอย่างมีระเบียบและมีระยะห่างกันสม่ำเสมอ จะทำหน้าที่เป็นดิฟแฟรกชันเกรตติ้ง (diffraction grating) ของแสงหรือรังสี มีความยาวคลื่นใกล้เคียงกับระยะระหว่างอนุภาคภายในผลึกได้ และพบว่ารังสีเอกซ์มีสมบัติที่ใช้ศึกษาการจัดเรียงอนุภาคในผลึกได้

เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ไปยังผลึก จะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อเอาแผ่นฟิล์มมาเป็นฉากรับรังสีเอกซ์ดังกล่าว จะเห็นเป็นจุดสว่างในแบบต่างๆ จากตำแหน่งของจุดเหล่านั้นสามารถคำนวณหาขนาดและรูปร่างของหน่วยเซลล์ในผลึกได้ และเมื่อทราบความเข้มของแต่ละจุด ก็สามารถคำนวณหาโครงสร้างของผลึกได้



ต่อมาในปี ค.ศ. 1913 วิลเลียม เฮนรี แบริก (William Henry Bragg) และบุตรชายชื่อวิลเลียม ลอเรนซ์ แบริก (William Lawrence Bragg) ได้แสดงให้เห็นว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อาจพิจารณาเสมือนกับการสะท้อนของรังสีเอกซ์จากระนาบของอะตอมหรือไอออนในผลึก กล่าวคือเมื่อผ่านรังสีเอกซ์ไปยังผลึก บางส่วนของรังสีเอกซ์จะสะท้อนออกไป บางส่วนก็ผ่านทะลุไปยังระนาบต่อๆ ไป และสะท้อนออกจากระนาบเหล่านั้น ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกจากระนาบต่างๆ เป็นแบบ out of phase ก็จะทำให้หักล้าง แต่ถ้าเป็นแบบ in phase ก็จะทำให้เกิดการเสริมกัน ทำให้มีความเข้มสูง (เป็นจุดสว่าง) ดังนั้น ถ้าให้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นคงที่ค่าหนึ่ง ฉายไปยังผิวหน้าของผลึก (ระนาบของอะตอมหรือไอออน) โดยมีมุมที่ตกกระทบที่คงที่คือ  $\theta$  ดังรูปที่ 7.7 แล้วทำให้รังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนอยู่ในลักษณะที่เสริมกันมากที่สุด จากการทดลองพบว่า เมื่อแปรค่ามุมต่างๆ กัน และบันทึกข้อมูลรังสีเลี้ยวเบน (ชนิดที่เสริมกัน) ด้วยเครื่องตรวจวัด ก็สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นหรือระนาบของอะตอมหรือไอออนได้ การทดลองอาจจะทำซ้ำๆ อีกโดยเลือกผิวหน้าด้านอื่นๆ ของผลึก



รูปที่ 7.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากอะตอมหรือไอออนในผลึก

จากรูประนาบของอะตอมหรือไอออน มีระยะระหว่างระนาบเท่ากับ  $d$  เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น  $\lambda$  ไปยังระนาบโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับ  $\theta$  รังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกจากระนาบเหล่านั้น ก็จะสะท้อนออกมาด้วยมุม  $\theta$  เช่นกัน การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นได้เมื่อรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกมาจะต้องเป็นลักษณะที่เสริมกัน นั่นคือ ระยะทางที่คลื่นรังสีเอกซ์ที่ 2 (ตามรูป) จะต้องเคลื่อนที่เพิ่มเป็นระยะทางเท่ากับ  $n\lambda$  (คือเลขจำนวนเต็มของความยาวคลื่น)

$$\begin{aligned} \text{นั่นคือ} \quad BC + BD &= n\lambda \\ BC = BD &= AB \sin \theta \\ \therefore n\lambda &= 2AB \sin \theta \\ n\lambda &= 2d \sin \theta \end{aligned}$$

สมการที่ได้นี้เรียกว่า สมการของแบรกก์ (Bragg's equation) การเลี้ยวเบนจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อ  $n$ ,  $\lambda$ ,  $d$  และ  $\theta$  มีความสัมพันธ์ตามสมการนี้เท่านั้น

**ตัวอย่างที่ 7.1** การสะท้อนของรังสีเอกซ์ first order และ second order ที่เกิดจากผิวหน้าหนึ่งของผลึก NaCl ซึ่งทำมุม  $5.9^\circ$  และ  $11.85^\circ$  โดยใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น  $58.5 \text{ pm}$ . ( $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$ ) จงคำนวณหาระยะระหว่างระนาบของไอออนที่ขนานกันในผลึก

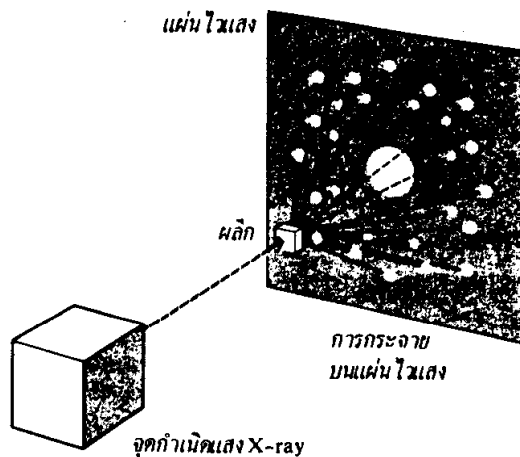
**วิธีทำ** จาก  $n\lambda = 2d \sin \theta$

$$\text{เมื่อ } n = 1 \quad \theta = 5.90^\circ \quad \sin \theta = 0.103 \quad \therefore d = \frac{58.5}{2 \times 0.103} = 284.0$$

$$n = 2 \quad \theta = 11.85^\circ \quad \sin \theta = 0.205 \quad \therefore d = \frac{2 \times 58.5}{2 \times 0.205} = 285.4$$

$\therefore$  ค่าเฉลี่ยระยะห่างระหว่างระนาบของไอออน = 285 pm **ตอบ**

ในทางปฏิบัติ เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปยังสารที่ใช้ศึกษา ซึ่งเป็นผงผลึกปริมาณเล็กน้อย ประกอบด้วยผลึกเล็กๆ จำนวนมากอยู่ในลักษณะทิศทางต่างๆ กัน แล้วทำการวัดมุมที่ถูกหักเหดังแสดงในรูปที่ 7.8



**รูปที่ 7.8** การใช้รังสีเอกซ์เพื่อศึกษาโครงผลึก

จากมุมที่วัดได้ สามารถคำนวณระยะระหว่างจุด (d) หรือระนาบจากสมการแบรกก์ โดยสมมุติให้จุดต่างๆ มีการจัดอย่างเป็นระเบียบ คือ มีระยะ d เท่ากันตลอดโครงสร้าง แต่ความเป็นจริง ผลึกจำนวนมากมีระยะ d ไม่เท่ากัน ดังนั้นในการวัดและศึกษาเปรียบเทียบความเข้มของรังสีที่หักเห จึงต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญการศึกษาทางผลึก เพื่อแปรผลและคาดคะเนโครงสร้างผลึก การศึกษาผลึกโดยอาศัยเทคนิคของรังสีเอกซ์นั้นนับว่ามีประโยชน์มาก ช่วยให้นักวิทยาศาสตร์สามารถทราบถึงโครงสร้างของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน เช่น โมเลกุลดีเอ็นเอ (DNA) โปรตีน และพอลิเมอร์ เป็นจำนวนมาก

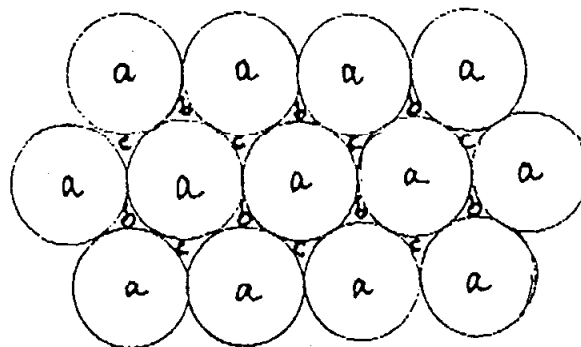
### 7.5 การจัดเรียงของอนุภาคในผลึก

ในธรรมชาติผลึกมีการจัดเรียงอนุภาคในลักษณะที่เป็นแถวของอะตอม (หรือโมเลกุล หรือไอออน) เรียงติดต่อกันและทับกันเป็นชั้นๆ เกิดเป็นโครงสร้างได้ 2 ประเภทคือ โครงสร้างแบบชิดที่สุด (closest packed structure) และโครงสร้างแบบไม่ชิดที่สุด (non-closest packed structure)

#### 7.5.1 โครงสร้างแบบชิดที่สุด

อนุภาคที่มีการจัดเรียงในลักษณะนี้จะเรียงสัมผัสชิดกัน มีความหนาแน่นมากที่สุด ซึ่งมักพบในบรรดาโลหะเกือบทั้งหมด การจัดเรียงโครงสร้างแบบชิดที่สุด แบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ โครงสร้างชิดที่สุดแบบรูปหกเหลี่ยม (hexagonal closest-packed structure, hcp) และโครงสร้างชิดที่สุดแบบรูปลูกบาศก์ (cubic closest-packed structure, ccp หรือ face center cubic, fcc)

จากการศึกษาโครงสร้างของโลหะโดยอาศัยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าอะตอมจากการศึกษาโครงสร้างจะพยายามจัดตั้งให้อยู่ใกล้ชิดกันที่สุดในแบบใดแบบหนึ่ง การศึกษาการจัดเรียงแบบชนิดที่ชิดที่สุด ทำได้โดยใช้ทรงกลมแทนอะตอมเรียงให้ชิดที่สุดดังรูปที่ 7.9



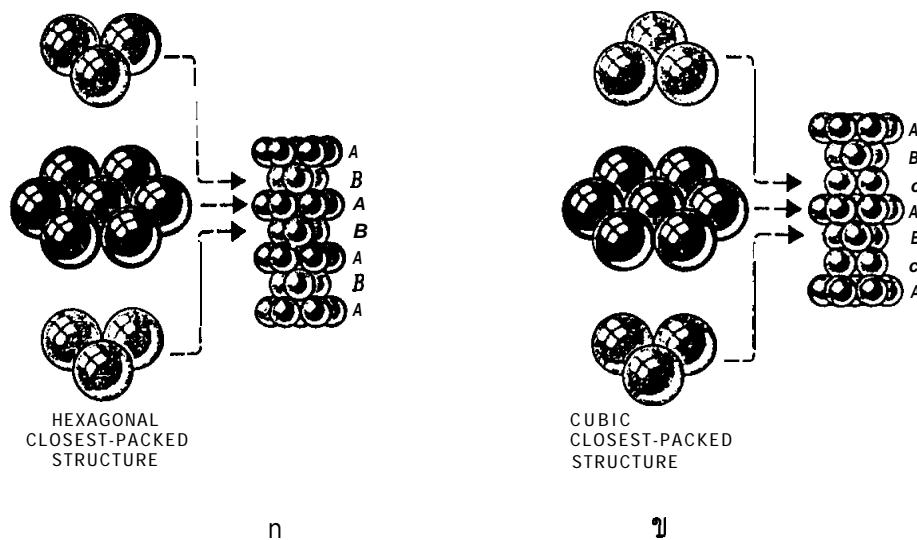
รูปที่ 7.9 แสดงการจัดเรียงลูกทรงกลมแบบชิดที่สุด

ลูกทรงกลมทุกลูกจะมีจุดศูนย์กลางอยู่บนระนาบเดียวกัน ทรงกลมลูกหนึ่งถูกล้อมรอบด้วยทรงกลมอื่น 6 ลูก เรียกตำแหน่งที่กลมเหล่านี้ชื่อว่า "a" และระนาบนี้จัดเป็นชั้นที่ 1 ระหว่างทรงกลม 3 ลูกที่อยู่ชิดกันที่สุดจะเห็นว่ามีช่องว่างอยู่ 2 ลักษณะคือ ช่องว่าง  $\Delta$  และ  $\nabla$  ตามรูป ในการวางทรงกลมลงในชั้นที่ 2 จะเห็นว่าถ้าวางในตำแหน่งข้างบน b ก็จะไม่สามารถวางทรงกลมบนตำแหน่ง c ที่อยู่ติดกันได้ หรือในทำนองเดียวกัน ถ้าวางทรงกลมที่ตำแหน่ง c จะไม่สามารถวางทรงกลมบนตำแหน่ง b ที่อยู่ติดกันได้ นั่นคือในการวางทรงกลมในชั้นที่ 2 ต้องบนตำแหน่ง b หรือ c อย่างไม่อย่างหนึ่ง ในที่นี้จะเลือกวางบนตำแหน่ง b

ในทำนองเดียวกัน ถ้าต้องการวางทรงกลมในชั้นที่ 3 ต้องเลือกว่า จะวางให้ตรงกับตำแหน่ง a หรือ c อย่างไม่อย่างหนึ่ง

**แบบที่ 1** ถ้าวางทรงกลมในชั้นที่ 3 ให้ตรงกับ a (และในชั้นต่อ ๆ ไปก็จะตรงกับตำแหน่ง b a b ....) ลำดับของการจัดเรียงทรงกลมจึงเป็นแบบ ABAB AB... ซึ่งเรียกว่าเป็นการจัดเรียงอนุภาคแบบชิดที่สุดรูปเฮกซะโกนอล (รูปที่ 7.10 ก)

**แบบที่ 2** ถ้าวางทรงกลมในชั้นที่ 3 ให้ตรงกับ c (และในชั้นต่อ ๆ ไปก็จะตรงกับ abc abc....) ลำดับของการจัดเรียงทรงกลมจึงเป็นแบบ ABC ABC... ซึ่งเรียกว่าเป็นการจัดเรียงอนุภาคแบบชิดที่สุดรูปลูกบาศก์ (รูปที่ 7.10 ข)



รูปที่ 7.10 แสดงการจัดลูกทรงกลมแบบชิดที่สุด

ก. แบบรูปเฮกซะโกนอล

ข. แบบรูปลูกบาศก์

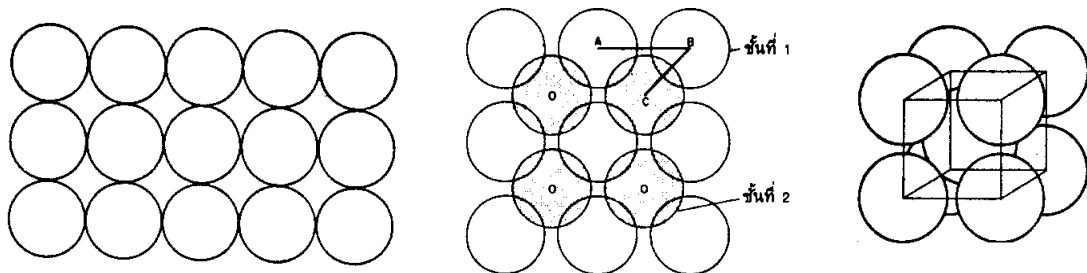
การจัดเรียงอนุภาคแบบชิดที่สุดที่กล่าวมาแล้วนั้น ทรงกลมแต่ละลูกในชั้นใดชั้นหนึ่ง จะสัมผัสชิดกับทรงกลมที่ล้อมรอบ 6 ลูกของชั้นเดียวกัน และสัมผัสชิดกับทรงกลม 3 ลูกในชั้นที่อยู่ข้างบน และสัมผัสชิดกับทรงกลมอีก 3 ลูกในชั้นที่อยู่ข้างล่าง ดังรูปที่ 7.10 ก. และ 7.10 ข. ซึ่งจำนวนทรงกลมที่ใกล้ที่สุดที่ล้อมรอบนี้เรียกว่าเลขโคออดิเนชัน (coordination number) นั่นคือเลขโคออดิเนชันของโครงสร้างแบบชิดที่สุดเท่ากับ 12 โครงสร้างแบบชิดที่สุดนี้ อนุภาคทั้งหมดจะครอบครองปริมาตรถึง 74% ของปริมาตรผลึก ตัวอย่างโลหะที่มีการจัดอะตอมชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนอล เช่น แมกนีเซียม โคบอล สังกะสี และแคดเมียม และชิดที่ชิดแบบลูกบาศก์ เช่น อลูมิเนียม แคลเซียม นิกเกิล ทองแดง เงิน ทองคำ

### 7.5.2 โครงสร้างแบบไม่ชิดที่สุด

ในการจัดเรียงอนุภาคที่มีโครงสร้างแบบไม่ชิดที่สุดนี้ เป็นการเรียงอนุภาคในลักษณะที่มีช่องว่างมากขึ้น มีความหนาแน่นลดลง ซึ่งแบ่งการจัดเรียงได้ 2 แบบ คือ

#### 1. แบบ body centered cubic (bcc)

ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคแบบ bcc นี้ เปรียบได้กับการจัดเรียงทรงกลมดังรูปที่ 7.11 ก. ซึ่งเป็นการเรียงทรงกลมที่มีช่องว่างมากขึ้น เมื่อขยายแยกทรงกลมในชั้นที่ 1 (A) นี้ให้ห่างออกจากกัน และวางทรงกลมในชั้นที่ 2 (B) ลงระหว่างช่อง ทำให้ทรงกลมแต่ละลูกสัมผัสกับทรงกลมชั้น A สี่ลูกตามรูปที่ 7.11 (ข) และเมื่อวางทรงกลมลงไปเป็นชั้นที่ 3 โดยให้ทรงกลมแต่ละลูกอยู่เป็นแนวตรงกับทรงกลมชั้น A และสัมผัสกับทรงกลมชั้น B จะได้ทรงกลมเรียงเป็นชั้นๆ เป็นแบบ ABAB โครงสร้างนี้เรียกว่า body centered cubic structure มีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของรูปลูกบาศก์ซึ่งล้อมรอบอนุภาคอีกลูกหนึ่งที่ตรงใจกลางของรูปลูกบาศก์ดังรูปที่ 7.12 (ข) อนุภาคในโครงสร้างแบบนี้มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 8 และอนุภาคจะครอบครองปริมาตร 68% ของปริมาตรผลึก ตัวอย่างโลหะที่มีโครงสร้างแบบนี้เช่น กลุ่มโลหะอัลคาไลด์ แบเรียม เหล็ก โครเมียม

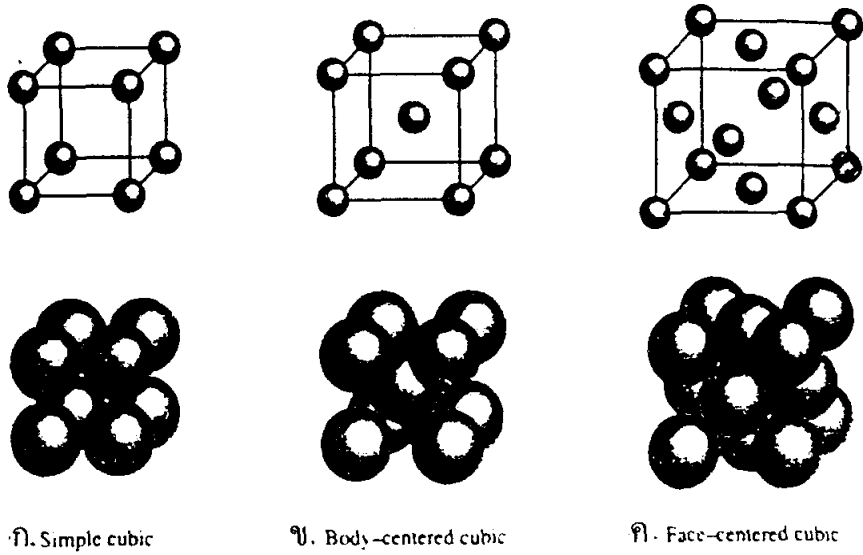


รูปที่ 7.11 (ก) การเรียงทรงกลมที่มีช่องว่างมาก

(ข) การจัดทรงกลมแบบ bcc

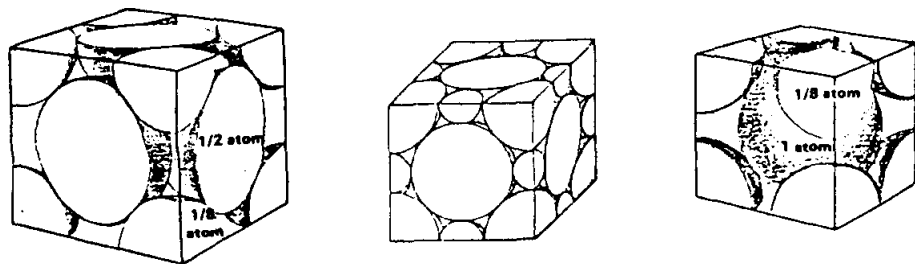
2. แบบ simple cubic (s.c.)

ลักษณะการจัดเรียงอนุภาคแบบ s.c. นี้ เปรียบได้กับทรงกลม มีการจัดเรียงตามรูปที่ 7.11 (ก) และเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ในแนวเดียวกัน โครงสร้างแบบนี้เรียกว่า simple cubic structure มีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้ง 8 ของรูปลูกบาศก์ ดังรูปที่ 7.12 (ก) แต่ละอนุภาคมีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 6 อนุภาคครอบครองปริมาตรเท่ากับ 52% และที่เหลือ 48% เป็นช่องว่าง ตัวอย่างโลหะที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบนี้ได้แก่ โพลโลเนียม (Po)



รูปที่ 7.12 แสดงโครงสร้างผลึกต่าง ๆ ของระบบลูกบาศก์

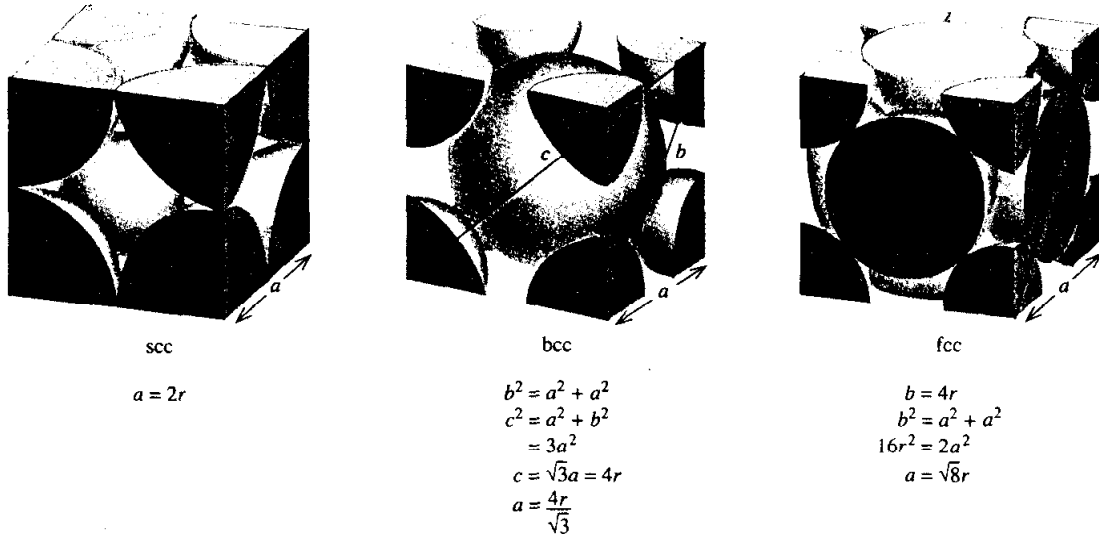
เนื่องจากผลึกประกอบขึ้นด้วยหน่วยเซลล์ที่มีผิวหน้า มุมและขอบตัดร่วมกัน ดังนั้นอนุภาคที่อยู่ทีมุมที่ผิวหน้าที่ขอบของเซลล์หนึ่งจะเป็นส่วนร่วมของอีกหน่วยเซลล์หนึ่งที่อยู่ติดกัน ในการนับจำนวนอนุภาคที่อยู่ในหน่วยเซลล์ทำได้ดังนี้



รูปที่ 7.13 การนับจำนวนอะตอมหรือไอออนที่มีอยู่ในหน่วยเซลล์

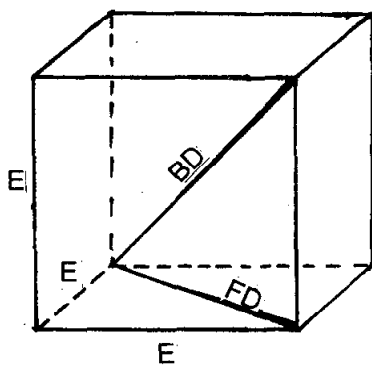
1. อนุภาคที่อยู่มุมให้หนัก  $\frac{1}{8}$  เพราะว่ามีการใช้ร่วมกันถึงแปดหน่วยเซลล์
2. อนุภาคที่อยู่กึ่งหน้าให้หนัก  $\frac{1}{2}$  เพราะว่ามีการใช้ร่วมกันสองหน่วยเซลล์
3. อนุภาคที่อยู่ขอบให้หนัก  $\frac{1}{4}$  เพราะว่ามีการใช้ร่วมกันสี่หน่วยเซลล์
4. อนุภาคที่อยู่ตรงกลางให้หนักเต็มคือ 1

จากข้อมูลของผลึกที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีอะตอม ( $r$ ) และความยาวขอบ (a) ของหน่วยเซลล์แบบ simple cubic แบบ body centered cubic และแบบ face-centered cubic สามารถคำนวณหารัศมีอะตอมได้ ดังสรุปในรูปที่ 7.14



รูปที่ 7.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของผลึกและรัศมีอะตอม ของหน่วยเซลล์แบบ simple cubic, body centered cubic และ face centered cubic

จากโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวขอบของหน่วยเซลล์ (E) กับรัศมีของอนุภาค ( $r$ ) ได้อีกวิธีหนึ่งดังนี้



- E = ความยาวขอบของหน่วยเซลล์
- F.D. = ความยาวเส้นทะแยงมุมที่ผิวหน้าเซลล์
- B.D. = ความยาวเส้นทะแยงมุมภายในเซลล์

$$\begin{array}{l} \text{จากรูป} \quad (FD)^2 = E^2 + E^2 = 2E^2 \\ \quad \quad \quad E = \frac{F.D.}{\sqrt{2}} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} (BD)^2 = E^2 + (FD)^2 = E^2 + 2E^2 = 3E^2 \\ \quad \quad \quad E = \frac{B.D.}{\sqrt{3}} \end{array} \right.$$

ดังนั้น  $E = E, F.D. = \sqrt{2} E, B.D. = \sqrt{3} E$

$$\therefore E : FD : BD = 1 : \sqrt{2} : \sqrt{3}$$

ความยาวเหล่านี้ แสดงในทอมของรัศมี (r) ของทรงกลมที่มีขนาดเท่ากัน สัมผัสกันในโครงสร้างผลึกระบบลูกบาศก์แต่ละแบบ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

โครงสร้างผลึก	จำนวนอนุภาค/หน่วยเซลล์	ทรงกลมสัมผัสกันตามแนว	ระยะในทอม r
S.C.	1	E	$E = 2r$
B.C.C.	2	BD	$BD = 4r$
F.C.C.	4	FD	$FD = 4r$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ สามารถนำไปคำนวณหาความหนาแน่น (d) ของลูกบาศก์ของแข็งเมื่อทราบองค์ประกอบและขนาดของหน่วยเซลล์ได้ดังนี้

$$d = \frac{Puc \times FW}{E^3 \times N_A} \text{ g/cm}^3$$

FW = น้ำหนักสูตรของสาร

Puc = อนุภาคต่อหน่วยเซลล์

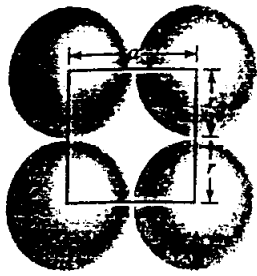
$N_A$  = เลขอโวกาโดร

E = ความยาวขอบของหน่วยเซลล์

ดังที่ทราบกันแล้วว่า การจัดตัวของผลึกมีหลายระบบ ผลึกของของแข็งจะพยายามจัดตัวให้แน่นที่สุด เราประมาณการจัดตัวของอนุภาคในผลึกด้วยประสิทธิภาพการบรรจุอนุภาค (packing efficiency) ซึ่งเป็นการหาความหนาแน่นของผลึกซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ประสิทธิภาพการบรรจุอนุภาค} = \frac{\text{ปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยเซลล์}}{\text{ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์}} \times 100\%$$

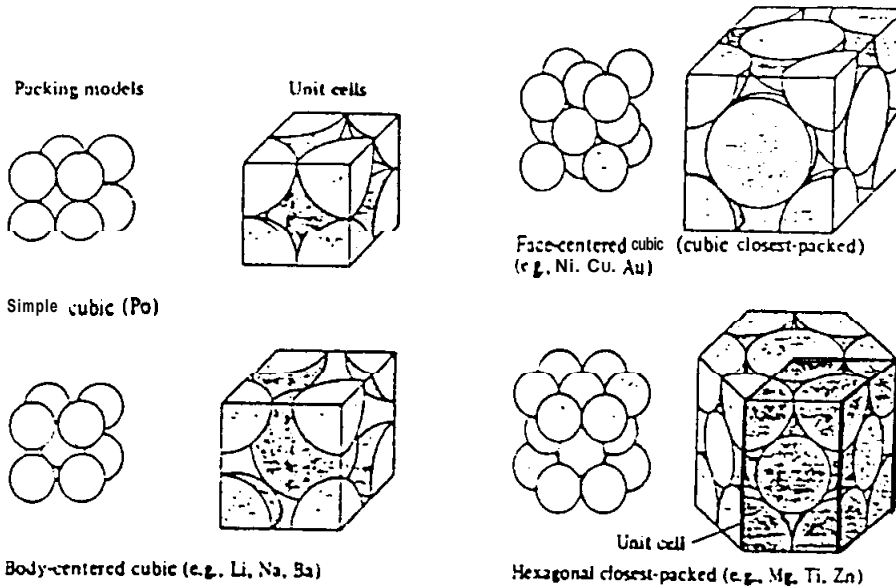




ในการหาค่า packing efficiency ของอนุภาคที่มีการจัดเรียงแบบ simple cubic ดังรูป อนุภาคมีรัศมีเท่ากับ  $r$  ดังนั้นความยาวขอบหนึ่งหน่วยเซลล์จะเท่ากับ  $2r$  ปริมาตรของอนุภาคในหนึ่งหน่วยเซลล์เท่ากับหนึ่งอนุภาคเท่ากับ  $\frac{4}{3}\pi r^3$  ปริมาตรของหน่วยเซลล์เท่ากับ  $(2r)^3$

$$\begin{aligned} \text{packing efficiency} &= \frac{4}{3}\pi r^3 / (2r)^3 \times 100\% \\ &= \frac{\pi}{6} \times 100\% \\ &= 52\% \end{aligned}$$

ดังนั้นการจัดเรียงอนุภาคแบบ simple cubic อนุภาคจะครอบครองปริมาตรเป็น 52% และที่เหลือ 48% เป็นช่องว่างสำหรับโครงผลึกและหน่วยเซลล์แบบต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 7.15



รูปที่ 7.15 แสดงโครงสร้างผลึกและหน่วยเซลล์แบบต่าง ๆ

ตัวอย่างที่ 7.2 ผลึกโลหะทองคำมีโครงสร้างแบบ cubic close-packed (fcc) จงคำนวณหาความหนาแน่นของทองคำให้รัศมีอะตอมของทองคำเท่ากับ 144 pm (u.u. อะตอม Au = 197)

**วิธีทำ** จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของผลึกและรัศมีอะตอม คือ  $a = \sqrt{8}r$

$$a = \sqrt{8}(144) = 407 \text{ pm.}$$

ปริมาตรของ 1 หน่วยเซลล์คือ  $V = a^3 = (407 \text{ pm})^3 \times \left[ \frac{1 \times 10^{-12} \text{ m}}{1 \text{ pm}} \right]^3 \times \left( \frac{1 \text{ cm}}{1 \times 10^{-2} \text{ m}} \right)^3$

$$= 6.74 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

ใน 1 หน่วยเซลล์มีจำนวนอะตอม  $= 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4$

ดังนั้น มวล (m) ใน 1 หน่วยเซลล์คือ  $m = \frac{4 \text{ atoms}}{1 \text{ unit cell}} \times \frac{197.0}{1 \text{ mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ atoms}}$

$$= 1.31 \times 10^{-21} \text{ g/unit cell}$$

$\therefore$  ความหนาแน่น (d) ของทองคำคือ  $d = \frac{m}{V} = \frac{1.31 \times 10^{-21} \text{ g}}{6.74 \times 10^{-23} \text{ cm}^3} = 19.4 \text{ g/cm}^3$  **ตอบ**

**หมายเหตุ** จากการทดลอง d ของทองคำ =  $19.3 \text{ g/cm}^3$

**แบบฝึกหัด** ผลึกของโลหะเงินมีโครงสร้างแบบ fcc. จงคำนวณหาความหนาแน่นของเงินให้รัศมีอะตอมของเงินเท่ากับ 408.7 pm. (น.อะตอม Ag = 107.9)  
(ตอบ  $10.50 \text{ g/cm}^3$ )

**ตัวอย่างที่ 7.3** โลหะแมกนีเซียมมีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal close-packed มีความหนาแน่น  $1.74 \text{ g/cm}^3$  จงคำนวณหารัศมีอะตอมของแมกนีเซียม (หน่วย pm) (ให้น.อะตอมของ Mg = 24.31)

**วิธีทำ** ขั้นแรกคำนวณหาปริมาตรของ hcp ใน 1 mol ของ Mg.

ให้  $V_{\text{hcp}}$  เป็น molar volume จะได้  $V_{\text{hcp}} = \frac{\text{molar mass ของ Mg.}}{\text{density ของ Mg.}}$

$$= \frac{2431 \text{ g. Mg/ mol. Mg.}}{1.74 \text{ g/cm}^3}$$

$$= 14.0 \text{ cm}^3/\text{mol.Mg}$$

ใน molar volume นี้มีจำนวนอะตอม Mg =  $6.02 \times 10^{23}$  อะตอม และเนื่องจาก hcp มี packing efficiency เท่ากับ 74% (ช่องว่าง 26%) ของปริมาตร

$$\text{ดังนั้น ปริมาตรของแมกนีเซียมอะตอม} = 0.74 \times 14.0 \text{ cm}^3/\text{mol.Mg.}$$

$$= 10.4 \text{ cm}^3/\text{mol.Mg.}$$

$$\text{ปริมาตรของ 1 อะตอม Mg} = \frac{10.4 \text{ cm}^3}{1 \text{ mol. Mg.}} \times \frac{1 \text{ mol Mg}}{6.02 \times 10^{23} \text{ Mg. atom}} = 1.73 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

$$\text{ให้ปริมาตร 1 อะตอมมีรัศมี (r) คือ } V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$\text{นั่นคือ } 1.73 \times 10^{-23} \text{ cm}^3 = \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$r^3 = 4.13 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

$$r = 1.60 \times 10^{-8} \text{ cm} = 160 \text{ pm. } \text{ตอบ}$$

**แบบฝึกหัด** ผลึกของธาตุกึ่งโลหะ Po มีโครงสร้างผลึกแบบ simple cubic ถ้าหน่วยเซลล์มีความยาว 336 pm จงหารัศมีอะตอมของ Po (นน.อะตอม Po 210)  
(ตอบ 168 pm.)

**ตัวอย่างที่ 7.4** โลหะนิกเกิลมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc มีความยาวขอบของหน่วยเซลล์เท่ากับ 352 pm. นน.อะตอมของ Ni เท่ากับ 58.7 ความหนาแน่นเท่ากับ  $8.94 \text{ g/cm}^3$  จงคำนวณหาเลขอวกาศโคจรจากข้อมูลดังกล่าว

**วิธีทำ** ปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์ =  $r^3 = (3.52 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 4.36 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$

ใน 1 หน่วยเซลล์แบบ fcc มีจำนวนอะตอมได้ 4 อะตอม

$$4 \text{ อะตอม} = 4.36 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

จากความหนาแน่น  $1 \text{ cm}^3 = 8.94 \text{ g.Ni}$

จำนวนอะตอมที่มี Niหนัก 58.7 g คือ เลขอวกาศโคจร

$$\begin{aligned} \text{จำนวนอะตอม} &= 58.7 \text{ g.Ni} \left( \frac{1 \text{ cm}^3}{8.94 \text{ g.Ni}} \right) \left( \frac{1 \text{ atom}}{4.36 \times 10^{-23} \text{ cm}^3} \right) \\ &= 6.02 \times 10^{23} \text{ Atom} \quad \text{ตอบ} \end{aligned}$$

**แบบฝึกหัด** โลหะโซเดียมมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์มีความยาวขอบของหน่วยเซลล์เท่ากับ 430 pm. ความหนาแน่นของโซเดียมเท่ากับ  $0.963 \text{ g/cm}^3$ , นน.อะตอมของ Na = 23.0 จงหาจำนวนอะตอมของโซเดียมที่มีอยู่ใน 1 หน่วยเซลล์ และชนิดของหน่วยเซลล์แบบลูกบาศก์  
(ตอบ 2.00 อะตอม, body centered cubic)

**ตัวอย่างที่ 7.5** โลหะตะกั่วมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc. มีความหนาแน่น  $11.34 \text{ g/cm}^3$  อะตอมตะกั่วมีรัศมี  $1.75 \text{ \AA}$  จงคำนวณหา packing efficiency

**วิธีทำ** ในหนึ่งหน่วยเซลล์แบบ fcc. มีปริมาตรอะตอมของ Pb = 4 อะตอม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของตะกั่ว} \quad 4 \text{ อะตอม} &= 4 \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) = 4 \times \frac{4}{3} \times \frac{22}{7} \times (1.75 \times 10^{-8})^3 \text{ cm}^3 \\ &= 89.8 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความยาวขอบของหน่วยเซลล์แบบ fcc (a)} &= \sqrt{8} r = 2\sqrt{2} r \\ &= 2 \times 1.414 \times 1.75 \times 10^{-8} \text{ cm} = 4.95 \times 10^{-8} \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ปริมาตร 1 หน่วยเซลล์ (a)}^3 = 121.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

$$\text{Packing efficiency} = \frac{89.8 \times 10^{-24} \text{ cm}^3}{121.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^3} \times 100 = 74\% \quad \text{ตอบ}$$

**แบบฝึกหัด** โลหะทองแดงมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc. มีความยาวขอบของหน่วยเซลล์เท่ากับ 361 pm จงคำนวณหารัศมีอะตอมของทองแดง  
(ตอบ 128 pm)

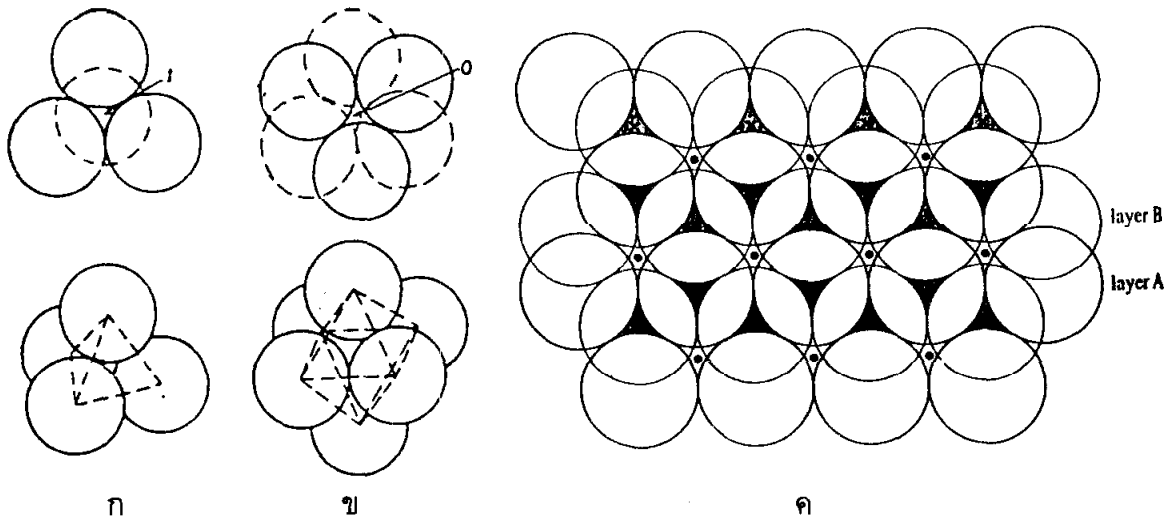
**แบบฝึกหัด** โพลโลเนียม (Po) มีโครงสร้างผลึกแบบ simple cubic มีความยาวขอบของหน่วยเซลล์เท่ากับ 0.336 nm ก. จงหามวลในหนึ่งหน่วยเซลล์ ข. ปริมาตรของหน่วยเซลล์ ค. ความหนาแน่นของ Po (ให้นน.อะตอม Po = 210)

$$\text{[ตอบ ก. } 3.49 \times 10^{-22} \text{g ข. } 3.8 \times 10^{-23} \text{ cm}^3 \text{ ค. } 9.18 \text{ g/cm}^3 \text{]}$$

**แบบฝึกหัด** โลหะเงินมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc. มีความยาวขอบของเซลล์ = 407.7 pm จงหาขนาดของลูกบาศก์ที่บรรจุ 1 โมล Ag (107.7 g)  
 [ตอบ ขนาดลูกบาศก์ 2.169 cm.]

**7.6 โครงสร้างผลึกของสารประกอบไอออนิกบางชนิด**

การจัดเรียงโครงสร้างแบบชิดที่สุดที่ได้กล่าวมา พบว่าเกิดช่องว่าง 2 ชนิดคือ ช่องว่างเตตระฮีดรอล (tetrahedral hole) และช่องว่างออกตะฮีดรอล (octahedral) ช่องว่างเตตระฮีดรอลล้อมรอบด้วยลูกทรงกลม 4 ลูก ส่วนช่องว่างออกตะฮีดรอลล้อมรอบด้วยทรงกลม 6 ลูก ดังรูปที่ 7.16 ก,ข



รูปที่ 7.16 ก. ช่องว่างเตตระฮีดรอล ข. ช่องว่างออกตะฮีดรอล ค. ตำแหน่งของช่องว่างเตตระฮีดรอล และออกตะฮีดรอลในโครงสร้างแบบชิดที่สุด

ช่องว่างเตตระฮีดรอลมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างออกตะฮีดรอล แต่มีจำนวนมากกว่าเป็น 2 เท่า โดยทรงกลมลูกหนึ่งจะล้อมรอบด้วยช่องว่างเตตระฮีดรอล 8 ช่อง และเนื่องจากช่องว่างเตตระฮีดรอลมีทรงกลมล้อมรอบ 4 ลูก นั่นคือจะเกิดช่องว่างเตตระฮีดรอล 2 ช่องต่อทรงกลม 1 ลูก ขณะเดียวกันทรงกลมแต่ละลูกล้อมรอบด้วยช่องว่างออกตะฮีดรอล 6 ช่อง แต่ละช่องว่างออกตะฮีดรอล มีลูกทรงกลมล้อมรอบ 6 ลูก ดังนั้นจะเกิดช่องว่างออกตะฮีดรอล 1 ช่อง ต่อทรงกลม 1 ลูก

ช่องว่างทั้งสองแบบสามารถให้อะตอมหรือไอออนที่มีขนาดแตกต่างกันเข้าบรรจุอยู่ได้ ในกรณีสารประกอบไอออนิกโดยทั่ว ๆ ไป ไอออนที่มีขนาดใหญ่จะเป็นตัวจัดแบบ ccp หรือ

hcp ส่วนไอออนที่มีขนาดเล็กจะเป็นตัวบรรจุในช่องว่าง แต่จะบรรจุในช่องว่างชนิดใดขึ้นอยู่กับขนาดสัมพัทธ์ (relative size) ของไอออนบวก และไอออนลบที่ประกอบเป็นผลึกนั้น ๆ หรืออาจจะกล่าวได้ว่า ขึ้นกับอัตราส่วนรัศมี (radius ratio) ซึ่งมีค่าเท่ากับรัศมีไอออนบวกหารด้วยรัศมีของไอออนลบ

$$\text{อัตราส่วนรัศมี} = \frac{\text{รัศมีของไอออนบวก } (r^+)}{\text{รัศมีของไอออนลบ } (r^-)}$$

ถ้าอัตราส่วนรัศมีมีค่าระหว่าง 0.225-0.414 ไอออนบวกจะบรรจุในช่องว่างเตตระฮีดรอล ถ้าอัตราส่วนรัศมีมีค่า 0.414-0.732 ไอออนบวกจะบรรจุในช่องว่างออกตะฮีดรอล ถ้าอัตราส่วนรัศมีมีค่าสูงกว่า 0.732 ไอออนบวกจะบรรจุในช่องว่างลูกบาศก์ (cubic hole) ซึ่งเป็นช่องว่างระหว่างระนาบของไอออนลบที่มีการจัดเรียงแบบ simple cubic ซึ่งเป็นแบบไม่ชิดที่สุด ตัวอย่างเช่นโครงผลึกของซีเซียมคลอไรด์ (CsCl) ตารางที่ 7.3 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างเลขโคออดิเนชันของไอออนบวกในผลึกไอออนิกและอัตราส่วนรัศมีของไอออน

ตารางที่ 7.3 อัตราส่วนรัศมี

อัตราส่วนรัศมี	เลขโคออดิเนชัน	ช่องว่างที่ไอออนบวกบรรจุ
0.225-0.414	4	tetrahedral holes
0.414-0.732	6	octahedral holes
0.732- 1	8	cubic holes
1	12	closest-packed structure

ตัวอย่างที่ 7.6 จงทำนายว่าสารประกอบผลึกต่อไปนี้ ก) NaCl ข) ZnS ค) TiO<sub>2</sub> ง) TiCl<sub>4</sub> และ จ) CsCl มีการบรรจุไอออนในช่องว่างใด ช่องว่างเตตระฮีดรอล ออกตะฮีดรอล หรือ ช่องว่างลูกบาศก์

วิธีทำ ก) NaCl ; รัศมี Na<sup>+</sup> = 0.095 nm, Cl<sup>-</sup> = 0.81 nm, อัตราส่วนรัศมี = 0.52 ตามตารางที่ 7.3 Na<sup>+</sup> จะบรรจุลงในช่องว่างออกตะฮีดรอล ระหว่างระนาบของ Cl<sup>-</sup> ที่จัดเรียงแบบชิดที่สุด

ข) ZnS ; รัศมี Zn<sup>2+</sup> = 0.074 nm และ S<sup>2-</sup> = 0.184 nm อัตราส่วนรัศมี = 0.40 ดังนั้น Zn<sup>2+</sup> น่าจะบรรจุลงในช่องว่างของเตตระฮีดรอล

ค) TiO<sub>2</sub> ; รัศมี Ti<sup>4+</sup> = 0.068 nm และ O<sup>2-</sup> = 0.140 nm อัตราส่วนรัศมี = 0.49 ดังนั้น Ti<sup>4+</sup> น่าจะบรรจุลงในช่องว่างออกตะฮีดรอล

ง)  $\text{TiCl}_4$  ; รัศมี  $\text{Ti}^{4+} = 0.068 \text{ nm}$  และ  $\text{Cl}^- = 0.81 \text{ nm}$  อัตราส่วนรัศมี = 0.38 ดังนั้น  $\text{Ti}^{4+}$  น่าจะบรรจุลงในช่องว่างเตตระฮีดรอล

จ)  $\text{CsCl}$  ; รัศมี  $\text{Cs}^+ = 0.169 \text{ nm}$  และ  $\text{Cl}^- = 0.81 \text{ nm}$  อัตราส่วนรัศมี = 0.933  $\text{Cs}^+$  มีขนาดโตเกินกว่าที่จะบรรจุลงในช่องว่างเตตระฮีดรอลและช่องว่างออกตะฮีดรอลของโครงสร้างแบบซิทที่สุด ดังนั้น จึงน่าจะบรรจุลงในช่องว่างแบบลูกบาศก์ของการจัดเรียงของ  $\text{Cl}^-$

**ตัวอย่างที่ 7.7** Titanium dioxide ( $\text{TiO}_2$ ) เป็น pigment สีขาวที่ใช้ทำสี จงทำนายโครงสร้างของสารประกอบนี้

**วิธีทำ** สมมติว่า  $\text{TiO}_2$  ประกอบด้วย  $\text{Ti}^{4+}$  และ  $\text{O}^{2-}$  อัตราส่วนรัศมี = 0.49

$$\frac{r_+}{r_-} = \frac{0.068\text{nm}}{0.140\text{nm}} = 0.49$$

ตามตารางที่ 7.3  $\text{Ti}^{4+}$  น่าจะบรรจุลงในช่องว่างออกตะฮีดรอล ของ  $\text{O}^{2-}$  ที่จัดเรียงโครงสร้างแบบซิทที่สุดในโครงสร้างนี้ มี 1 ช่องว่างออกตะฮีดรอล ต่อ 1 ไอออน  $\text{O}^{2-}$  ถ้าทุกช่องว่างถูกบรรจุเต็ม อัตราส่วนของอะตอมระหว่าง  $\text{Ti} : \text{O}$  จะเท่ากับ 1 : 1 ดังนั้นสูตรของสารประกอบนี้ก็จะ เป็น  $\text{TiO}$  แต่เนื่องจากสารประกอบมี 1  $\text{Ti}^{4+}$  ต่อ 1 คู่ของ  $\text{O}^{2-}$  จึงสรุปได้ว่า ในโครงสร้างแบบซิทที่สุดช่องว่างออกตะฮีดรอลจะถูกบรรจุเพียงครึ่งเดียว ซึ่งได้ผลตรงกับการทดลองที่แสดงว่า  $\text{TiO}_2$  มีโครงสร้างผลึกที่อะตอม  $\text{O}$  จัดเรียงแบบ ccp และมีอะตอม  $\text{Ti}$  อยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรอลเพียงครึ่งเดียว

**ตัวอย่างที่ 7.8** โลหะ  $\text{Ti}$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{Cl}$  เกิดเป็นสารประกอบ  $\text{TiCl}_4$  ซึ่งเป็นของเหลวไม่มีสีที่อุณหภูมิห้อง จงทำนายโครงสร้างผลึกของสารนี้ที่จุดเยือกแข็ง  $-24^\circ \text{C}$

**วิธีทำ** สมมติว่า  $\text{TiCl}_4$  ประกอบด้วย  $\text{Ti}^{4+}$  และ  $\text{Cl}^-$  มีอัตราส่วนรัศมี = 0.38

$$\frac{r_+}{r_-} = \frac{0.068\text{nm}}{0.181\text{nm}} = 0.38$$

$\text{Ti}^{4+}$  น่าจะบรรจุลงในช่องว่างเตตระฮีดรอล ของ  $\text{Cl}^-$  ที่จัดเรียงแบบซิทที่สุดในโครงสร้างแบบนี้จะมีช่องว่างเตตระฮีดรอล 2 ช่อง ต่อ 1  $\text{Cl}^-$  ดังนั้น  $\text{Cl}^-$  4 ตัว จะเกี่ยวข้องกับช่องว่างเตตระฮีดรอล 8 ช่อง แต่  $\text{Ti}^{4+}$  1 ไอออน เกิดพันธะกับ  $\text{Cl}^-$  4 ไอออน ดังนั้น ช่องว่างเตตระฮีดรอลน่าจะถูกใช้ไปเพียง  $\frac{1}{8}$  ของช่องว่างทั้งหมด ซึ่งจากการทดลองพบว่า  $\text{TiCl}_4$  มีโครงสร้างที่อะตอม  $\text{Cl}$  จัดเรียงแบบ ccp และมีอะตอม  $\text{Ti}$  บรรจุในช่องว่างเตตระฮีดรอลเพียง  $\frac{1}{8}$  ของช่องว่างเตตระฮีดรอลทั้งหมด

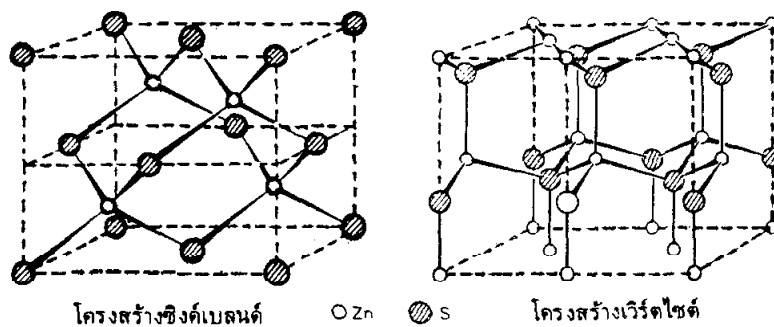
โครงสร้างผลึกของสารประกอบไอออนิกที่มีสูตรแบบ AB และ AB<sub>2</sub> ซึ่งประกอบด้วย ไอออน A และ ไอออน B การจัดโครงสร้างผลึกอาจทำให้ B เป็นแบบ ccp hcp sc โดยมี A บรรจุในช่องว่างเตตระฮีดรอลหรือช่องว่างออกตะฮีดรอลหรือช่องว่างลูกบาศก์ ตัวอย่างของสารประกอบไอออนิก ที่มีไอออนบรรจุในช่องว่างชนิดต่าง ๆ

### 1. การบรรจุในช่องว่างเตตระฮีดรอล

สารประกอบแบบ AB เช่น ZnS ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีเท่ากับ  $0.40 \left( \frac{r_{Zn^{2+}}}{r_{S^{2-}}} = \frac{0.074 \text{ nm}}{0.184 \text{ nm}} \right)$

มีการจัดเรียงไอออนทำให้มีโครงสร้างได้ 2 แบบคือ

แบบโครงสร้างซิงค์เบลนด์ (Zincblend structure) ซัลไฟด์ไอออนมีขนาดไอออนโตกว่าจะจัดเรียงโครงสร้างแบบ ccp (หรือ fcc) โดยมีซิงค์ไอออนซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจะเข้าอยู่ในช่องว่างเตตระฮีดรอลเพียงครึ่งเดียวของช่องว่างทั้งหมด ดังรูป 7.17 ก. แต่ละไอออนของซิงค์สัมผัสกับซัลไฟด์ไอออน 4 ไอออนและซัลไฟด์ไอออนสัมผัสกับไอออนของซิงค์สี่ไอออน ทำให้อัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันระหว่าง Zn<sup>2+</sup> : S<sup>2-</sup> = 4 : 4 ตัวอย่างสารที่มีโครงสร้างแบบนี้ เช่น CuF, CuCl, CuBr, AgI, HgS, SiC



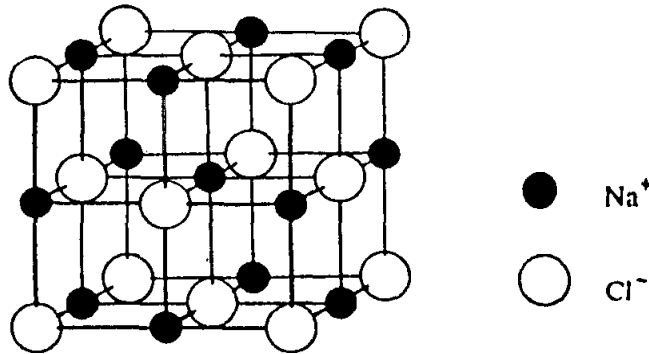
รูปที่ 7.17 เปรียบเทียบสองโครงสร้างของซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS)

แบบที่ 2 โครงสร้างเวิร์ตไซต์ (wurtzite structure) ซัลไฟด์ไอออนมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ hcp ส่วนการบรรจุของซิงค์ไอออน และอัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันระหว่าง Zn<sup>2+</sup> : S<sup>2-</sup> เหมือนกันกับโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ รูปเปรียบเทียบของทั้งสองโครงสร้างดูได้จากรูปที่ 7.17 ข. ตัวอย่างสารที่มีโครงสร้างแบบเวิร์ตไซต์ เช่น BeO, MnSe, MnTe, AlN, GaN, InN, NH<sub>4</sub>F



## 2. การบรรจุช่องว่างออกตะฮีตรอล

แบบ rock salt structure สารประกอบที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีเท่ากับ  $0.52 \left( \frac{r_{\text{Na}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = \frac{0.095 \text{ nm}}{0.181 \text{ nm}} \right)$  ในโครงสร้างนี้ ดังรูปที่ 7.18 คลอไรด์ไอออนจะจัดเรียงโครงสร้างแบบ ccp โดยมีโซเดียมไอออนเข้าบรรจุในช่องว่างออกตะฮีตรอลเต็มทุกช่อง โซเดียมไอออนมีขนาดโตกว่าช่องว่างออกตะฮีตรอลที่เกิดขึ้นจากคลอไรด์ไอออน ทำให้คลอไรด์ไอออนถูกผลักออกจากกันทำให้แต่ละคลอไรด์ไอออนไม่สัมผัสกัน แต่จะสัมผัสกับไอออนของโซเดียมหกไอออน และแต่ละโซเดียมไอออนกับสัมผัสกับไอออนคลอไรด์หกไอออนเช่นกัน อัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันระหว่าง  $\text{Na}^+ : \text{Cl}^- = 6 : 6$



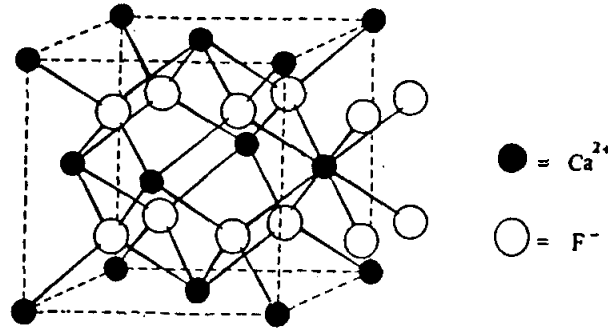
รูปที่ 7.18 โครงสร้างโซเดียมคลอไรด์ (rock-salt structure)

จากโครงสร้างของโซเดียมคลอไรด์ดังแสดงในรูปที่ 7.18 อาจมองได้อีกแง่หนึ่งว่าเป็น การซ้อนกันอยู่ระหว่าง face centered cubic structure ของคลอไรด์ไอออนกับ face centered cubic structure ของโซเดียมไอออน สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบ rock salt ได้แก่สารประกอบเฮไลด์ของโลหะอัลคาไล ออกไซด์และซัลไฟด์ของอัลคาไลนัเอิร์ท เช่น KCl, KBr, KI, LiI, CaO, CaS นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของธาตุอื่น ๆ เช่น AgCl, AgBr,  $\text{NH}_4\text{I}$ , MnS, MnO, NiO และ PbS เป็นต้น

## 3. การบรรจุช่องว่างลูกบาศก์

แบบโครงสร้างฟลูออไรต์ (fluorite structure) สารประกอบที่มีโครงสร้างลักษณะนี้มีสูตรแบบ  $\text{AB}_2$  เช่น  $\text{CaF}_2$  ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีเท่ากับ  $0.73 \left( \frac{r_{\text{Ca}^{2+}}}{r_{\text{F}^-}} = \frac{0.099 \text{ nm}}{0.136 \text{ nm}} \right)$  แคลเซียมไอออนมีขนาดโตเกินกว่าที่จะบรรจุลงในช่องว่างออกตะฮีตรอล ดังนั้นฟลูออไรด์ไอออนจึงมีการ

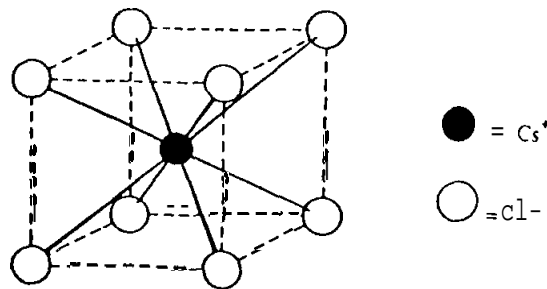
จัดเรียงโครงสร้างแบบ simple cubic โดยแคลเซียมไอออนเข้าบรรจุในช่องว่างลูกบาศก์เพียงครึ่งเดียวของช่องว่างทั้งหมด อัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันระหว่าง  $\text{Ca}^{2+} : \text{F}^- = 8 : 4$  จาก



รูปที่ 7.19 โครงสร้างของแคลเซียมฟลูออไรด์ (โครงสร้างฟลูออไรด์)

โครงสร้างผลึกของโครงสร้างแบบฟลูออไรด์ ดังในรูปที่ 7.19 จะเห็นลักษณะโครงสร้างแบบ face centered cubic ซึ่งอาจจะพิจารณาได้ว่าแคลเซียมไอออน มีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ ccp และมีฟลูออไรด์ไอออน อยู่ ณ ตำแหน่งช่องว่างเตตระฮีดรอลทุกช่อง แต่ละแคลเซียมไอออน สัมผัสกับฟลูออไรด์แปดไอออน และแต่ละฟลูออไรด์ไอออนสัมผัสกับแคลเซียมไอออนเพียงสี่ไอออนเท่านั้น สารประกอบที่โครงสร้างแบบนี้ เช่น  $\text{SrF}_2$ ,  $\text{SrCl}_2$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{BaCl}_2$ ,  $\text{CdF}_2$ ,  $\text{PbF}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{NpO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{PuO}_2$ ,  $\text{AmO}_2$

ตัวอย่างสารประกอบที่มีการบรรจุช่องว่างลูกบาศก์อีกสารหนึ่งคือ ซีเซียมคลอไรด์ ( $\text{CsCl}$ ) ซึ่งมีอัตราส่วนรัศมีเท่ากับ  $0.93 \left( \frac{r_{\text{Cs}^+}}{r_{\text{Cl}^-}} = \frac{0.169 \text{ nm}}{0.181 \text{ nm}} \right)$  ซีเซียมไอออนมีขนาดโตเกินกว่าที่จะบรรจุในช่องว่างเตตระฮีดรอลและช่องว่างออกตะฮีดรอล เมื่อเป็นเช่นนี้คลอไรด์ไอออนจึงมีการจัดเรียงโครงสร้างแบบ simple cubic และซีเซียมไอออนเข้าบรรจุในช่องว่างลูกบาศก์ทุกช่องว่าง ดังนั้นซีเซียมคลอไรด์จึงประกอบด้วย simple cubic structure ของแต่ละไอออนชนกันเท่านั้น อัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันระหว่าง  $\text{Cs}^+ : \text{Cl}^- = 8 : 8$  จากโครงสร้างผลึกของซีเซียมคลอไรด์



รูปที่ 7.20 โครงสร้างของซีเซียมคลอไรด์

ดังรูปที่ 7.20 จะเห็นว่ามีลักษณะแบบ body centered cubic โดยมีคลอไรด์ไอออนอยู่ที่มุมทั้งแปดของลูกบาศก์ล้อมรอบซีเซียมไอออนซึ่งอยู่ตรงจุดกึ่งกลางภายในลูกบาศก์ ตัวอย่างสารที่มีโครงสร้างลักษณะนี้เช่น CsBr, CsI, RbCl, RbBr, NH<sub>4</sub>Cl, NH<sub>4</sub>Br

## แบบฝึกหัด

- 1) ลักษณะทั่วไปของของแข็งแตกต่างจากของเหลวและแก๊สอย่างไร
- 2) ของแข็งอสัณฐานคืออะไร แตกต่างจากผลึกอย่างไร
- 3) ผลึกจำแนกออกได้กี่ชนิด ถ้าสารเหล่านี้มีสถานะเป็นของแข็งให้จำแนกว่าเป็นผลึกชนิดใด
 

ก. $\text{CO}_2$	ข. $\text{H}_2\text{S}$	ค. Ni
ง. KCl	จ. Si	ฉ. $\text{Al}_2(\text{S}_4\text{O})_3$ ช. Ne
- 4) จงอธิบายความหมายของ ก. crystal lattice    ข. Unit cell
- 5) จงเขียนรูปและให้ชื่อผลึกประเภทลูกบาศก์ทั้ง 3 ประเภท
- 6) โครงสร้าง ccp แตกต่างกับโครงสร้าง hcp อย่างไร
- 7) ถ้าโครงสร้างผลึกของโลหะ A เป็นแบบ body-centered หมายความว่าในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของ A อยู่กี่อะตอม
- 8) จงคำนวณหาความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เลี้ยวเบนด้วยมุม  $8.40^\circ$  จากผลึกที่มีความห่างระหว่างระนาบเป็น 200 pm
- 9) ถ้านำผลึก A มาฉายแสงด้วยรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น  $= 1.540^\circ \text{A}$  วัดมุม  $\theta$  ได้  $= 22^\circ 33'$  จงคำนวณระยะห่างของไอออนของผลึกนี้ (แบบ order ที่หนึ่ง)
- 10) ลูกทรงกลมรัศมี  $r$  มีการจัดเรียงทรงกลมเป็นโครงสร้างแบบ face centered cubic หมายความว่าในผลึกของแข็งนี้มีพื้นที่ว่างที่เปอร์เซ็นต์
 

1. 26%	2. 32%	3. 45%	4. 18%	5. 51%
--------	--------	--------	--------	--------
- 11) สารใดต่อไปนี้ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมากที่สุด
 

1. $\text{H}_2\text{O}$	2. $\text{H}_2\text{S}$	3. $\text{H}_2\text{Se}$	4. $\text{H}_2\text{Te}$	5. $\text{H}_2$
-------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------------
- 12) Po มีโครงสร้างผลึกแบบ simple cubic จงหาจำนวนอะตอม Po ต่อหนึ่งหน่วยเซลล์
 

1. 1	2. 2	3. 4	4. 6	5. $6.02 \times 10^{23}$
------	------	------	------	--------------------------
- 13) โลหะโซเดียม มีโครงสร้างผลึกแบบ body centered cubic หมายความว่าอะตอมโซเดียมจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมข้างเคียงกี่อะตอม
 

1. 2	2. 4	3. 6	4. 8	5. 12
------	------	------	------	-------
- 14) จงหาปริมาตร (หน่วย  $\text{cm}^3$ ) ของหน่วยเซลล์ที่เกิดจากอะตอมที่มีรัศมี  $1.00^\circ \text{A}$  จัดเรียงโครงสร้างผลึกแบบ body centered cubic
 

1. $8.00 \times 10^{-24} \text{cm}^3$	2. $1.23 \times 10^{-23} \text{cm}^3$	3. $2.25 \times 10^{-23} \text{cm}^3$
4. $1.00 \times 10^{-24} \text{cm}^3$	5. $1.53 \times 10^{-24} \text{cm}^3$	

- 15) จงหาปริมาตรของหน่วยเซลล์ที่อะตอมที่มีรัศมี  $1.00\text{\AA}$  จัดเรียงโครงสร้างผลึกแบบ face centered cubic
1.  $8.00 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$
  2.  $1.23 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$
  3.  $2.26 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$
  4.  $1.00 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$
  5.  $1.53 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$
- 16) ผลึกของแข็งของ  $\text{CO}_2$  มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์ ซึ่งในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วย 4 โมเลกุลของ  $\text{CO}_2$  ถ้ามันเป็นโครงสร้างลูกบาศก์แบบใด
1. simple cubic
  2. primitive cubic
  3. body centered cubic
  4. face centered cubic
  5. ไม่มีรูปทรงที่กล่าวมา
- 17) โลหะเงินมีโครงสร้างผลึกแบบ face centered cubic มีความยาวขอบของหน่วยเซลล์เท่ากับ  $4.07\text{\AA}$  จงหาขนาดอะตอมของเงิน
1.  $1.76\text{\AA}$
  2.  $3.52\text{\AA}$
  3.  $2.04\text{\AA}$
  4.  $2.88\text{\AA}$
  5.  $1.44\text{\AA}$
- 18) ผลึกโลหะเหล็กมีโครงสร้างแบบ body centered cubic มีความยาวขอบของเซลล์  $2.8664\text{\AA}$  จงคำนวณหารัศมีอะตอมของเหล็ก
1.  $1.43\text{\AA}$
  2.  $1.01\text{\AA}$
  3.  $1.38\text{\AA}$
  4.  $1.12\text{\AA}$
  5.  $1.24\text{\AA}$
- 19) จากข้อมูลในข้อ 18 จงหาความหนาแน่นของผลึกโลหะเหล็ก
1.  $8.95 \text{ g/cm}^3$
  2.  $7.88 \text{ g/cm}^3$
  3.  $5.32 \text{ g/cm}^3$
  4.  $3.94 \text{ g/cm}^3$
  5.  $15.79 \text{ g/cm}^3$
- 20) ถ้าโลหะเหล็กมีโครงสร้างแบบ simple cubic และมีความยาวขอบของเซลล์  $2.8664\text{\AA}$  จงหาความหนาแน่นของผลึกโลหะเหล็ก (เปรียบเทียบกับ ข้อ 19)
- 21) ผลึกโลหะ Ca เป็นแบบ face centered cubic มีความยาวขอบของเซลล์  $5.57\text{\AA}$  จงหารัศมีอะตอมของ Ca
1.  $1.97\text{\AA}$
  2.  $2.79\text{\AA}$
  3.  $1.39\text{\AA}$
  4.  $0.985\text{\AA}$
  5.  $4.01\text{\AA}$
- 22) จากข้อ 21 จงหาจำนวนอะตอม Ca ในหนึ่งหน่วยเซลล์
1. 1
  2. 2
  3. 4
  4. 6
  5. 14
- 23) จากข้อมูลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $476^\circ\text{C}$  Pu มีโครงสร้างผลึกแบบ bcc มีความยาวขอบเซลล์  $3.638\text{\AA}$  และมีความหนาแน่น  $16.47 \text{ g/cm}^3$  แต่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $320^\circ\text{C}$  -  $451^\circ\text{C}$  Pu มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc วัดความยาวขอบเซลล์ได้  $4.637\text{\AA}$  มีความหนาแน่น  $15.92 \text{ g/cm}^3$  จากข้อมูลทั้งสองนี้ จงคำนวณหาเลขอะตอมของ Pu และเปรียบเทียบกับค่าเลขอะตอมของ Pu  $6.02 \times 10^{23}$  (กำหนดให้น้ำหนักอะตอม Pu = 239.1)

- 24) โครงสร้างผลึกของโลหะ K (มีรัศมีอะตอม =  $2.31 \text{ \AA}$  เป็นแบบ bcc ถ้าวัดว่า
- ในหนึ่งหน่วยเซลล์ มีจำนวนอะตอมเท่าใด
  - ความยาวขอบของหน่วยเซลล์
  - ปริมาตรของหน่วยเซลล์
  - ปริมาตรโมล (molar volume) ของ K
- 25) ผลึกของโลหะทองคำมีโครงสร้างผลึกแบบระบบลูกบาศก์ มีความยาวขอบเซลล์เท่ากับ  $4.079 \text{ \AA}$  ความหนาแน่นของโลหะทองคำเท่ากับ  $19.282 \text{ g/cm}^3$  ถ้าวัดว่าโครงสร้างผลึกของทองคำเป็นแบบใด
- simple cubic
  - Body centered cubic
  - Face centered cubic
- 26) ผลึกโลหะตะกั่ว มีโครงสร้างผลึกแบบ fcc มีความหนาแน่น  $11.34 \text{ g/cm}^3$  รัศมีอะตอมของตะกั่วเท่ากับ  $1.75 \text{ \AA}$  จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของตะกั่วในปริมาตรที่ว่างนั้น
- 27) ลูกทรงกลมที่มีการจัดเรียงเป็นโครงสร้างผลึกดังต่อไปนี้ แต่ละแบบมี Coordination No. เท่าใด
- simple cubic
  - Body centered cubic
  - Face centered cubic
  - hexagonal
- 28) ช่องว่างใดต่อไปนี้มีขนาดโตที่สุด Cubic hole, Octahedral hole, Tetrahedral hole และช่องว่างใดเหมาะสมกับสารที่มีอัตราส่วน  $r^+/r^-$  ต่ำ
- 29) หน่วยเซลล์อันหนึ่ง เป็นแบบลูกบาศก์มี anion อยู่ที่มุมและใจกลางของหน่วยเซลล์ และมี cation อยู่ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละผิวหน้าเซลล์ จงหาจำนวน cation และ anion ที่มีอยู่ใน 1 หน่วยเซลล์ และจงเขียนสูตรโมเลกุลอย่างง่ายที่สุดของสารประกอบนี้
- 30) ผลึก MgO มีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ รัศมี  $\text{Mg}^{++}$  มีค่า  $0.066 \text{ nm}$  และ  $\text{O}^-$  มีค่า  $0.140 \text{ nm}$  จงคำนวณหาอัตราส่วนรัศมีและให้อธิบายโครงสร้างผลึกของ MgO ควรเป็นเช่นไร