

## บทที่ 4 ของแข็ง (SOLID)

สิ่งที่ทราบกันว่าอนุภาคของก๊าซและของเหลวทุกชนิดจะมีการเคลื่อนที่ไปมาอยู่ตลอดเวลา เมื่อลดอุณหภูมิลงถึงจุดหนึ่ง ก๊าซและของเหลวจะเปลี่ยนสถานะมาเป็นของแข็ง ทำให้อนุภาคของสารหยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่ จะมีก็แต่เพียงการสั่นสะเทือน (vibration) เท่านั้น เป็นผลให้ของแข็งมีพลังงานจลน์น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานจลน์ของของเหลวและก๊าซ

แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคในของแข็งจะมีมากกว่าในของเหลวและก๊าซตามลำดับ ทำให้อนุภาคในของแข็งอยู่ชิดกันและเป็นระเบียบมากกว่าในของเหลวและก๊าซ ดังนั้นของแข็งจึงมีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวและก๊าซ (ยกเว้นกรณีของน้ำแข็งซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว) ของแข็งมีรูปร่างที่แน่นอน มีปริมาตรคงที่เมื่อไม่มีสิ่งใดจากภายนอกมาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแข็งที่เป็นโลหะสามารถแผ่ออกเป็นแผ่นบางหรือยืดออกเป็นเส้นยาวได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำความร้อนหรือนำไฟฟ้าได้แล้วแต่ชนิด แต่บางชนิดก็ไม่นำไฟฟ้า

เราสามารถแบ่งของแข็งโดยการพิจารณาการจัดเรียงตัวของอนุภาคในของแข็งออกเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ คือ

1. ของแข็งผลึก (Crystalline solid) ได้แก่ ของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคอย่างมีระเบียบ และมีจุดหลอมเหลวที่คงที่ (sharp melting point) กล่าวคือสารจะเปลี่ยนสถานะทันทีเมื่อถึงจุดหลอมเหลว การจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในผลึกเป็นสิ่งสำคัญซึ่งจะเป็นแบบเดียวกันเสมอสำหรับสารชนิดเดียวกัน ตัวอย่างของแข็งผลึก เช่น เกลือแกง น้ำตาลทราย กำมะถัน

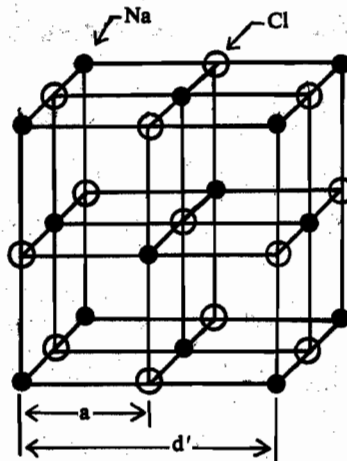
2. ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous solid) ได้แก่ของแข็งที่ไม่มีรูปผลึก และอนุภาคของของแข็งนี้จะอยู่ปะปนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ของแข็งอสัณฐานเมื่อเปลี่ยนสถานะมาเป็นของเหลวจะมีจุดหลอมเหลวที่ไม่เด่นชัด กล่าวคือ จะค่อย ๆ อ่อนตัวลงและในที่สุดจะเริ่มไหลได้ นอกจากนี้ยังมีความหนืดสูงอีกด้วย เช่น แก้ว ซีเมนต์ พลาสติก

นอกจากนี้ยังมีของแข็งบางชนิดที่เป็นผงหรือเป็นก้อน เมื่อดูลักษณะภายนอกน่าจะเป็นของแข็งอสัณฐาน แต่เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ตรวจ จะพบว่าประกอบไปด้วยผลึกชิ้นเล็กมารวมกัน เรียกผลึกของแข็งนี้ว่า Polycrystalline solid เช่น โลหะต่าง ๆ

ในที่นี้จะกล่าวถึงของแข็งผลึกเท่านั้น ซึ่งน่าสนใจมากกว่าของแข็งอสัณฐาน

#### 4.1 โครงผลึก (Crystal Lattice)

โครงผลึกเกิดจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคหรืออะตอม โมเลกุล หรือ อีออน อย่างเป็นระเบียบ ตามแบบเรขาคณิตและเป็นสามมิติ โดยมีด้านตัดกันเป็นเหลี่ยม มีมุมที่แน่นอนเฉพาะตัว ซึ่งทำให้ผลึกมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป เช่น ผลึกเกลือแกง (NaCl) หรือ KCl จะมีโครงสร้างดังนี้



รูปที่ (4.1) แสดงโครงสร้างของผลึกเกลือแกง

ถ้าเราแบ่งโครงผลึกย่อยลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้เล็กที่สุด โดยผลึกที่เล็กที่สุดนั้นยังคงรักษารูปร่างลักษณะ ตลอดจนแบบแผนของการเรียงตัวของอนุภาคทางเรขาคณิตไว้ได้เหมือนกับโครงผลึกเดิมทุกประการ ส่วนที่เล็กที่สุดเราเรียกว่าหน่วยเซลล์ (unit cell)

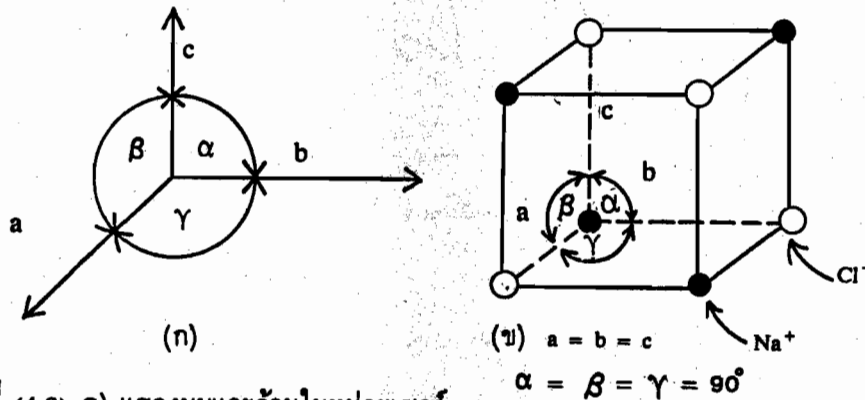
ในการศึกษาเกี่ยวกับผลึกของสารเพื่อความสะดวกและให้เข้าใจยิ่งขึ้น เราจะจำลองแบบโครงผลึกโดยใช้จุดหรือลูกบอลกลมแสดงตำแหน่งของอนุภาคเหล่านั้น โดยตำแหน่งหรือจุดที่อนุภาคอยู่คือจุดแลตทิซ (lattice point) และอนุภาคที่อยู่ตามจุดแลตทิซ เรียกว่าหน่วยอนุภาค (unit particle) เมื่อหน่วยอนุภาคถูกจัดเรียงตัวในตำแหน่งแบบสามมิติแล้วแบบจำลองที่ได้เราเรียกว่าโครงผลึก (crystal lattice หรือ space lattice) ซึ่งโครงผลึกนี้จะเต็มไปด้วยจุดหรือหน่วยอนุภาคที่ยึดโยงกันเป็นโครงตาข่าย แสดงให้เห็นลักษณะของการจัดเรียงตัวของหน่วยอนุภาคภายในผลึก และการจัดเรียงตัวของหน่วยอนุภาคนั้นจะเป็นแบบที่ซ้ำกันเรื่อยไปทั่วทั้งโครงผลึก

#### 4.2 ระบบผลึก (Crystal Systems)

ผลึกของแข็งมีรูปผลึกได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอนุภาคที่มีอยู่ในผลึก ถ้าจัดการเรียงตัวของอนุภาคให้เป็นระบบแล้ว เราสามารถแบ่งรูปผลึกได้เป็น 7 ระบบด้วยกัน

ดังแสดงไว้ในตารางที่ (4.1) โดยอาศัยหลักเกณฑ์การแบ่งที่แตกต่างกัน 2 ข้อคือ

1. มุมระหว่างแกน (กำหนดให้  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  เป็นมุมระหว่างแกน)
2. ความยาวของแกนหรือด้าน (โดยกำหนดให้ความยาวของแกนหรือด้านเป็น  $a$ ,  $b$  และ  $c$ )

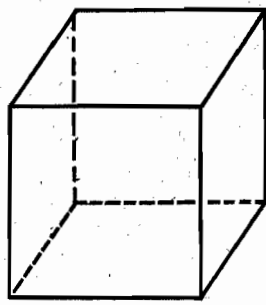


รูปที่ (4.2) ก) แสดงมุมและด้านในหน่วยเซลล์  
ข) แสดงหน่วยเซลล์ของ NaCl

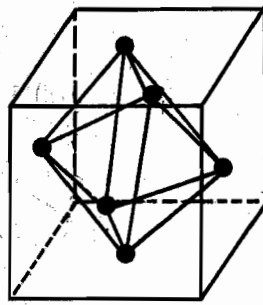
ตารางที่ (4.1) แสดงระบบผลึกทั้ง 7 แบบ

ระบบ	ความยาวแกน	มุม	ตัวอย่าง
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Rock salt
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	White tin
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Rhombic sulfur
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	Monoclinic sulfur
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Calcite
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Graphite
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Potassium dichromate

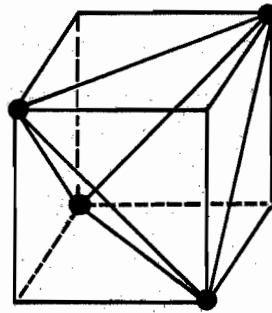
ผลึกอาจมีรูปร่างภายนอกแตกต่างกันแต่จัดอยู่ในระบบเดียวกัน ตัวอย่าง เช่น Octahedron และ Tetrahedron จะอยู่ในระบบผลึกเดียวกันคือ Cubic system ดังรูปที่ (4.3)



Cubic system



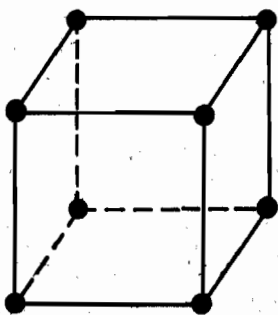
Octahedron



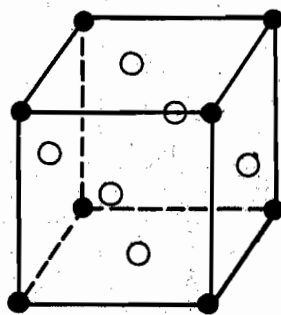
Tetrahedron

รูปที่ 4.3 แสดงหน่วยเซลล์ของระบบผลึกแบบ Cubic system

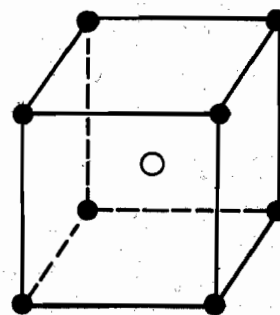
การจัดระบบผลึกที่กล่าวมาจะอาศัยเพียงความยาวของแกนและมุมเป็นหลักซึ่งเป็นการจัดแบบกว้าง ๆ ตามโครงสร้างภายนอกเท่านั้น แต่พบว่าระบบผลึกบางระบบยังมีอนุภาคอยู่ที่ตำแหน่งอื่น ๆ ได้อีก นอกเหนือไปจากจุดที่แบ่งตามมุมของหน่วยเซลล์ ดังตัวอย่างในรูปที่ (4.3) เช่น อนุภาคอาจอยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน้าทั้งหก หรือมีอนุภาคอยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน่วยเซลล์ก็ได้ ดังรูปที่ (4.4)



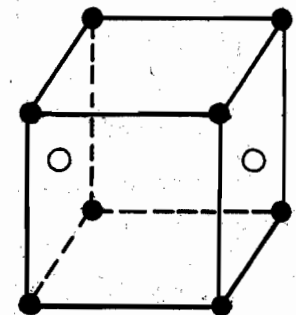
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ (4.4) แสดงหน่วยเซลล์ของระบบผลึกแบบ Cubic system ที่มีอนุภาคอยู่นอกเหนือไปจากจุดที่แบ่งตามมุมของหน่วยเซลล์

- ก) Simple Cubic
- ข) Face-centered Cubic
- ค) Body-centered Cubic
- ง) Base-centered Cubic

จากรูปที่ (4.4)

**Simple Cubic** เป็นระบบผลึกที่มีอนุภาคอยู่เฉพาะตรงมุมของหน่วยเซลล์เท่านั้น

**Face-centered Cubic** เป็นระบบผลึกที่มีอนุภาคอยู่ที่มุมของหน่วยเซลล์ และอยู่ที่จุดกึ่งกลางด้านทั้ง 6 ของหน่วยเซลล์

**Body-centered Cubic** เป็นระบบผลึกที่มีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์ และมีอีกหนึ่งอนุภาคอยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน่วยเซลล์

**Base-centered Cubic** เป็นระบบผลึกที่มีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปดของหน่วยเซลล์และยังมีอนุภาคอยู่ที่จุดกึ่งกลางของด้านเพียง 2 ด้านที่อยู่ตรงกันข้ามคู่ใดคู่หนึ่ง หรือเรียกระบบผลึกนี้อีกชื่อหนึ่งว่า **End-centered Cubic**

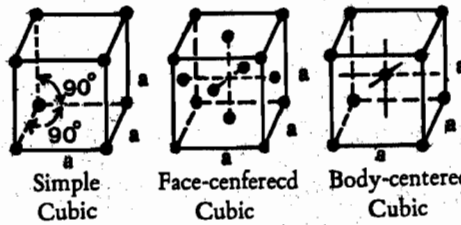
ต่อมา Bravais ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลึกและจัดโครงสร้างผลึกทั้ง 7 ระบบ ตามกฎเกณฑ์ดังกล่าวในข้างต้นออกเป็น 14 แบบ ดังแสดงไว้ในตารางที่ (4.2)

ตารางที่ (4.2) Bravais lattices ในแต่ละระบบของผลึก

ระบบผลึก	จำนวนแบบ	Bravais lattice
Cubic	3	Simple, Face-centered, Body-centered
Tetragonal	2	Simple, Body-centered
Orthorhombic	4	Simple, Face-centered, Body-centered, Base-centered
Monoclinic	2	Simple, Base-centered
Rhombohedral (Trigonal)	1	Simple
Hexagonal	1	Simple
Triclinic	1	Simple

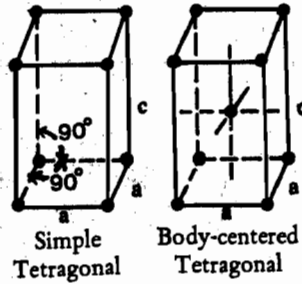
Cubic

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
$$a = b = c$$



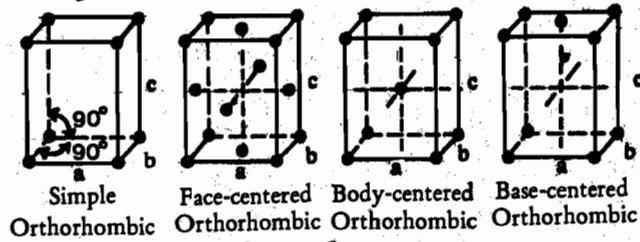
Tetragonal

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
$$a = b \neq c$$



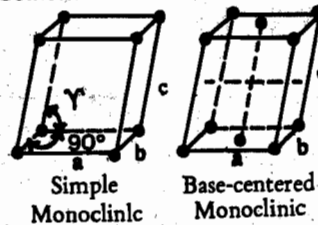
Orthorhombic

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$
$$a \neq b \neq c$$



Monoclinic

$$\alpha = \gamma = 90^\circ; \quad \beta \neq 90^\circ$$
$$a \neq b \neq c$$



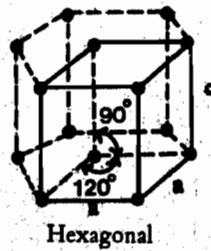
Rhombohedral

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$
$$a = b = c$$



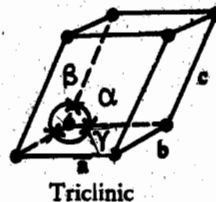
Hexagonal

$$\alpha = \beta = 90^\circ; \quad \gamma = 120^\circ$$
$$a = b \neq c$$



Triclinic

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$
$$a \neq b \neq c$$



รูปที่ (4.5) แสดง Bravais lattices  
ในแต่ละระบบของผลึก

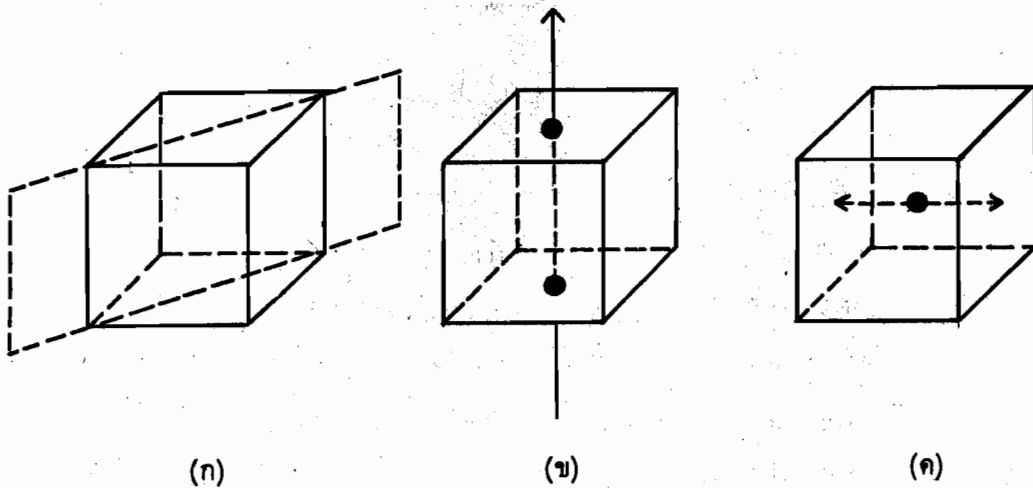
ในการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystallography) จะศึกษาถึงมุมระหว่างผิวหน้า ความยาวของด้านและสมมาตร (symmetry)

สมมาตร หมายถึง สารใด ๆ ก็ตามเมื่อถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนแล้ว ทั้งสองส่วนนั้นจะมีรูปร่างลักษณะเหมือนกันทุกประการ ซึ่งมีสมมาตรอยู่ 3 แบบด้วยกันคือ

ก) ระนาบสมมาตร (plane of symmetry) หมายถึงระนาบจินตนาการ (imaginary plane) ที่เราสมมติให้แบ่งสารใด ๆ ออกเป็นสองส่วนได้เท่ากันและสองส่วนนั้นจะสมมาตรกัน

ข) แกนสมมาตร (axis of symmetry) หมายถึงแกนของผลึกเมื่อหมุนผลึกรอบแกนนั้นไปครบหนึ่งรอบจะเห็นรูปร่างผลึกที่เหมือนกันมากกว่าหนึ่งครั้ง

ค) จุดศูนย์กลางสมมาตร (center of symmetry) หมายถึงจุดศูนย์กลางของผลึก ถ้าลากเส้นจากด้านใดด้านหนึ่งที่ตั้งฉากไปยังด้านตรงข้ามให้ผ่านจุดนี้แล้ว ระยะทางระหว่างจุดนี้กับด้านทั้งสองจะเท่ากัน

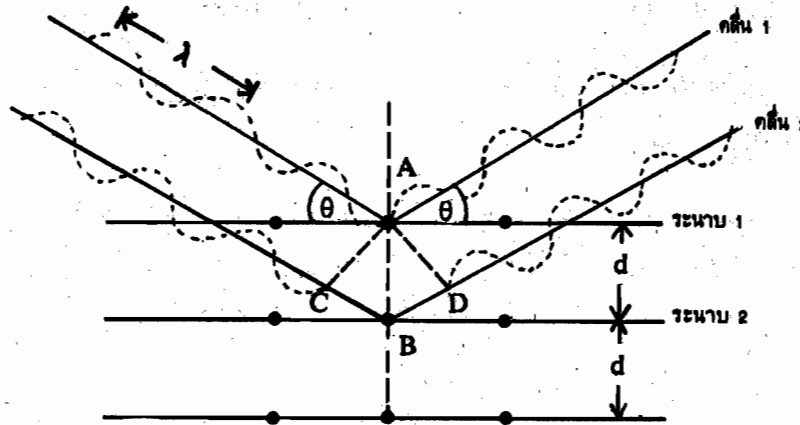


รูปที่ (4.6) แสดงสมมาตรแบบต่าง ๆ

- ก) ระนาบสมมาตร
- ข) แกนสมมาตร
- ค) จุดศูนย์กลางสมมาตร

### 4.8 โครงสร้างของผลึก (Crystal Structure)

จากการวัดมุมและด้านของรูปผลึกแล้ว เราไม่สามารถทราบโครงสร้างภายในของผลึกได้ ต่อมาแบรก (Bragg) และลูกชายชื่อลอเรนซ์ (Lawrence) ได้ศึกษาโครงสร้างของผลึกโดยการผ่านลำแสงของรังสีเอกซ์ (X-ray) ที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic) เข้าไปในผลึก พบว่าผลึกสามารถให้ลำแสงผ่านออกมาและมีบางส่วนที่สะท้อนกลับออกไป ดังรูปที่ (4.7)



รูปที่ (4.7) แสดงการเกิดดิฟแฟรกชัน(diffraction) จากอะตอมหรือออรอนในผลึก

จากรูป เมื่อผลึกเรียงขนานกันมีระยะห่างเท่ากับ  $d$  (lattice spacing) รังสีเอกซ์ (X-ray) มีความยาวคลื่นเท่ากับ  $\lambda$

ถ้ามุมตกกระทบระนาบเท่ากับ  $\theta$  (Bragg's angle) จะทำให้คลื่นแสงที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่าง ๆ ในผลึกเป็นคลื่นแบบเสริมกัน (constructive interference)

เมื่อพิจารณา คลื่น 2 ที่มาตกกระทบระนาบ 2 แล้วสะท้อนออกไปนั้น จะต้องเดินทางไกลกว่าคลื่น 1 ที่มาตกกระทบระนาบ 1 เป็นระยะทางเท่ากับ  $CB + BD$  และเพื่อที่จะให้คลื่นของแสงที่สะท้อนออกไปเป็นคลื่นเสริมกัน (in phase) แล้วระยะ  $CB + BD$  จะต้องเท่ากับความยาวคลื่นหรือ  $n$  เท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เมื่อ  $n$  เป็นเลขจำนวนเต็ม

$$\therefore CB + BD = n \lambda \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

เมื่อ  $n =$  เลขจำนวนเต็ม ซึ่งอาจเท่ากับ 1,2,3,....

$$\text{ระยะ } AB = d$$

$$\therefore \text{ระยะ } CB = \text{ระยะ } BD = d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(4.2)$$



แทนค่าในสมการ (4.1) ด้วยสมการ (4.2) จะได้สมการใหม่คือ

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

$$\text{หรือ } n \lambda = 2d \sin \theta \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

สมการ (4.3) นี้เราเรียกว่า สมการแบรกก (Bragg's equation) ซึ่งบอกถึงว่าดิฟแฟรกชันจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อเป็นไปตามสมการของแบรกกเท่านั้น และ  $n$  เป็นอันดับของดิฟแฟรกชัน (order of diffraction) ซึ่งเป็นตัวเลขที่ลงตัว เนื่องจากความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก ( $d$ ) จะมีค่าแน่นอนสำหรับผลึกหนึ่ง ๆ จากสมการ (4.3) จะเห็นว่า  $n$  จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า  $\sin \theta$  หรือค่ามุม  $\theta$  ที่แสงตกกระทบระนาบและค่า  $\sin \theta$  จะมีค่าสูงสุดไม่เกินหนึ่ง ( $\theta = 90^\circ$ )

ตัวอย่างที่ 4.1 เมื่อผ่านรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น  $1.90 \times 10^{-10}$  เมตร กระทบระนาบของผลึกโลหะชนิดหนึ่งเป็นมุม  $28^\circ$  จะพบว่ารังสีเอกซ์จะสะท้อนออกมาและมีอันดับของดิฟแฟรกชันเท่ากับหนึ่ง จงคำนวณ

- ก. ระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก
- ข. การสะท้อนอันดับที่สองจะเกิดขึ้นได้เมื่อใด

วิธีทำ ก) จำนวนระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก

$$\text{จากสูตร } n \lambda = 2 d \sin \theta$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ที่โจทย์กำหนดมาให้

$$(1) (1.90 \times 10^{-10} \text{ m}) = 2 d \sin 28^\circ$$

$$= 2d (0.469)$$

$$\therefore d = 1.90 \times 10^{-10} \text{ m} / 0.938$$

$$= 2.03 \times 10^{-10} \text{ m}$$

นั่นคือ ผลึกโลหะนั้นจะมีระยะห่างระหว่างชั้นเท่ากับ  $2.03 \times 10^{-10}$  เมตร หรือ 203 พิโคเมตร

- ข.) จำนวนมุมตกกระทบของรังสีเอกซ์ที่ทำให้อันดับดิฟแฟรกชันเท่ากับสอง  
จากการคำนวณ ทำให้เราทราบระยะห่างระหว่างชั้นของผลึก ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2.03 \times$

$10^{-10}$  เมตร (คงที่) นอกจากนี้ยังทราบความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ เพราะฉะนั้น เราสามารถคำนวณมุมตกกระทบของรังสีเอกซ์ได้ดังนี้

$$\therefore n \lambda = 2d \sin \theta$$

แทนค่าในสมการ

$$(2)(1.90 \times 10^{-10} \text{m}) = 2(2.03 \times 10^{-10} \text{m}) \sin \theta$$

$$\sin \theta = 0.936$$

$$\therefore \theta = 69.4$$

ดังนั้น รังสีเอกซ์จะต้องตกกระทบระนาบของผลึกโลหะเป็นมุม  $69.4$  องศา เพื่อให้การสะท้อนมีอันดับดิฟแฟรกชันเท่ากับสอง

#### 4.4 ชนิดของของแข็ง (Types of Solid)

ของแข็งผลึกมีคุณสมบัติสำคัญ 2 ประการคือ เป็นพวกแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) และมีรูปร่างทางเรขาคณิตที่แน่นอน จากการศึกษาแรงดึงดูดระหว่างโครงผลึก (crystal lattice) ทำให้เราแบ่งของแข็งผลึกออกเป็น 4 ชนิด หรือจะพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่า เราแบ่งตามชนิดของหน่วยอนุภาคที่อยู่ตามจุดแลตทิซของโครงผลึก โดยหน่วยอนุภาคนั้นอาจเป็น อีออน อะตอมหรือโมเลกุล

##### ก) ผลึกไอออนิก (Ionic Crystals)

ของแข็งผลึกประเภทนี้ ประกอบด้วยอีออนบวกและอีออนลบเรียงตัวกัน เช่น ผลึก NaCl ประกอบด้วย  $\text{Na}^+$  และ  $\text{Cl}^-$  เป็นหน่วยอนุภาค และแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคในของแข็งประเภทนี้คือ แรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) หรือแรงคูลอมบิก (coulombic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่แรงมาก ทำให้ของแข็งประเภทนี้มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง นอกจากนี้ผลึกไอออนิกมักจะแข็งและเปราะ ที่อุณหภูมิปกติอีออนทุกตัวจะอยู่ตามจุดแลตทิซที่แน่นอนและเป็นระเบียบ ทำให้อีออนเคลื่อนที่ได้ยาก ถ้าให้ความร้อนต่อของแข็งผลึกนี้จนหลอมเหลว จะพบว่าอีออนเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างกระจัดกระจายและสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วย เช่น ผลึกของ  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{AgCl}$  เป็นต้น

##### ข) ผลึกโมเลกุล (Molecular Crystals)

ผลึกพวกนี้ประกอบด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่ไม่มีประจุ แต่ยึดกันอยู่ด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ (vander Waals force) หรือ แรงดึงดูดไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interaction) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่อ่อนกว่าแรงคูลอมบิก ผลึกพวกนี้จะมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดต่ำ นอกจากนี้ยังไม่สามารถนำไฟฟ้าได้เพราะโมเลกุลหรืออะตอมไม่มีประจุ เช่น  $\text{Ar}$ ,  $\text{Xe}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{I}_2$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$  น้ำตาลทราย เป็นต้น

### ค) ผลึกโคเวเลนต์ (Covalent Crystals)

ผลึกชนิดนี้ประกอบด้วยอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรงมาก จึงทำให้ผลึกพวกนี้มีจุดหลอมเหลวสูงมากและแข็ง เพราะการทำลายพันธะโคเวเลนต์ทำได้ยากและไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ นอกจากนี้แล้วยังไม่สามารถนำไฟฟ้า เนื่องจากอิเล็กตรอนจะอยู่ประจำตำแหน่งภายในพันธะโคเวเลนต์ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้จึงไม่นำไฟฟ้า เช่น เพชร (diamond), ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC), ซิลิคอน (Si) เป็นต้น

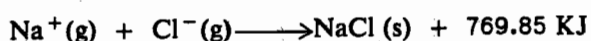
### ง) ผลึกโลหะ (Metallic Crystals)

ผลึกพวกนี้จะมีหน่วยอนุภาคเป็นอ็อนบวกของโลหะที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาได้โดยรอบ (delocalized electron) นั่นคืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังอะตอมอื่น ๆ ได้โดยไม่อยู่ประจำกับอะตอมใดอะตอมหนึ่ง และเป็นสมบัติส่วนรวมของทุกอะตอมทั่วทั้งผลึก ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวในผลึกพวกนี้คือ พันธะเมทัลลิก (metallic bond) ซึ่งเป็นแรงระหว่างอิเล็กตรอนกับอ็อนบวกโดยที่อิเล็กตรอนจะยึดเอาอ็อนบวกทั้งหมดมารวมกัน โดยทั่ว ๆ ไปแรงยึดเหนี่ยว (metallic bond) แบบนี้จะแข็งแรงกว่าแรงยึดเหนี่ยวในผลึกโมเลกุล (van der Waals force) แต่อ่อนกว่าแรงยึดเหนี่ยวในผลึกอ็อนิก (coulombic force) และผลึกโคเวเลนต์ (covalent bond)

ผลึกโลหะมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี เปลี่ยนรูปได้ ซึ่งสามารถทาบให้เป็นแผ่นบางหรือดึงให้เป็นเส้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากพันธะเมทัลลิกไม่มีทิศทางเฉพาะเหมือนพันธะโคเวเลนต์ นอกจากนี้ผลึกโลหะยังมีประกายแวววาว เช่น เงิน ทอง ทองคำขาว เป็นต้น

## 4.5 พลังงานโครงผลึก (Crystal Lattice Energy)

พลังงานที่ใช้ในการยึดอ็อนบวกและอ็อนลบในผลึกของสารประกอบพวกผลึกอ็อนิก (ionic crystals) เรียกว่าพลังงานแลตทิซ (lattice energy) หรือพูดอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาเมื่ออ็อนก๊าซ (ion gas) ที่มีประจุต่างกันรวมกันเป็น 1 โมลของผลึกอ็อนิก ตัวอย่างเช่น



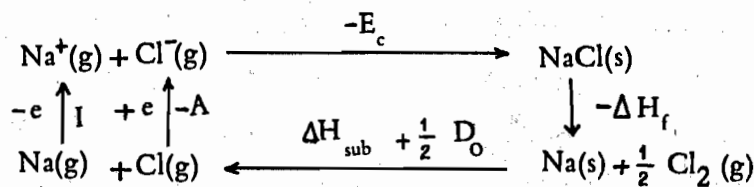
$$\therefore \text{พลังงานแลตทิซ } (E_c) = -769.85 \text{ KJ}$$

พลังงานแลตทิซ ( $E_c$ ) ของผลึกอ็อนิกใด ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$E_c = - \frac{N_0 A e^2 Z^2}{10^{10} r_0} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \dots\dots\dots(4.4)$$

- เมื่อ  $E_c$  เป็นพลังงานแลตทิซ (กิโลจูล/โมล)  
 $N_0$  คือ ค่าคงที่อาโวกาโดรน์มเบอร์ ซึ่งเท่ากับ  $6.023 \times 10^{23}$  โมล<sup>-1</sup>  
 $A$  คือค่าคงที่มาเดลุง (Madelung constant) ขึ้นอยู่กับชนิดของโครงสร้างผลึก  
 $e$  คือประจุของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C หรือเท่ากับ  $4.803 \times 10^{-10}$  esu  
 $Z$  คือประจุของไอออน ในกรณีที่ประจุของไอออนบวกและไอออนลบมีค่าไม่เท่ากัน ( $Z^+ \neq Z^-$ ) ค่า  $Z^2$  ในสมการ (4.4) จะมีค่าเท่ากับ  $Z^+ Z^-$   
 $r_0$  คือ ระยะห่างระหว่างนิวเคลียสของไอออนทั้งสองในผลึก  
 $n$  คือ แฟกเตอร์ที่เกี่ยวกับแรงผลึกซึ่งขึ้นกับระยะระหว่างไอออนและ  $n$  มักมีค่าอยู่ระหว่าง 6 ถึง 10 สำหรับ NaCl มีค่า  $n = 8$

นอกจากนี้ยังสามารถหาพลังงานแลตทิซได้จากการทดลองโดยใช้วัฏจักรบอร์นฮาเบอร์ (Born-Haber cycle) มาคำนวณโดยอาศัยพลังงานที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมดในวัฏจักรจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ตัวอย่างเช่น หาพลังงานแลตทิซของ NaCl ซึ่งเขียนเป็นวัฏจักรได้ดังนี้



- เมื่อ  $E_c$  คือพลังงานแลตทิซ (lattice energy)  
 $\Delta H_f$  คือความร้อนของการเกิดสาร (enthalpy of formation)  
 $\Delta H_{\text{sub}}$  คือความร้อนของการระเหิด (enthalpy of sublimation)  
 $D_0$  คือพลังงานแตกตัว (dissociation energy)  
 $I$  คือพลังงานไอออนไนเซชัน (ionization energy)  
 $A$  คือพลังงานที่ปล่อยออกมา (electron affinity)

ในขบวนการวัฏจักร จะมีค่าพลังงานรวมในขบวนการเท่ากับศูนย์ (ดูกฎข้อหนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ประกอบ) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้คือ

$$(-E_c) + (-\Delta H_f) + (\Delta H_{\text{sub}}) + (\frac{1}{2} D_0) + (I) + (-A) = 0 \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\text{ดังนั้น } E_c = -\Delta H_f + \Delta H_{\text{sub}} + \frac{1}{2} D_0 + I - A \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

เราสามารถคำนวณ  $E_c$  ได้เมื่อทราบค่า  $\Delta H_f$ ,  $\Delta H_{\text{sub}}$ ,  $D_0$ ,  $I$  และ  $A$

#### แบบฝึกหัดสำหรับบทที่ 4

- 4.1 จงคำนวณหาความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ถูกดิฟแฟรคด้วยมุม 8.5 องศา จากผลึกที่มีความห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 200 ปีโคเมตร
- 4.2 เมื่อฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่น 200 ปีโคเมตร ลงบนผลึกชนิดหนึ่งที่มีระยะห่างระนาบเท่ากับ 300 ปีโคเมตร จงหามุมแบรกก์เล็กที่สุดที่เกิดขึ้นจากการดิฟแฟรคชัน
- 4.3 เมื่อฉายรังสีเอกซ์บนผลึกที่มีระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ  $2.20 \times 10^{-10}$  เมตร จะพบว่าการสะท้อนอันดับที่หนึ่งที่มีมุม 18 องศา จงคำนวณมุมของการสะท้อนอันดับที่สอง
- 4.4 ในการฉายรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ  $1.54 \times 10^{-10}$  เมตร บนผลึกโลหะสทอรอนเซียม จะพบว่ามุมที่เล็กที่สุดที่เกิดจากดิฟแฟรคชันมีค่ามุมเท่ากับ 14.7 องศา จงคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบของผลึกสทอรอนเซียม
-