

บทที่ 3

การจัดตัวของอะตอมหรือไอออนในของแข็ง

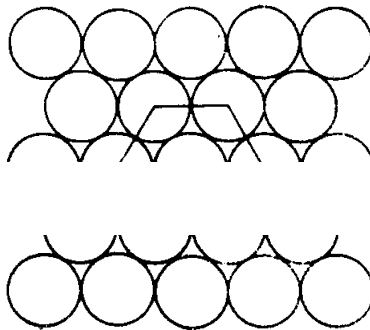
(The Packing of Atoms or Ions in Crystal)

1. จุดประสงค์ของการทดลอง

เพื่อดูการจัดตัวของไอออน หรืออะตอม หรือโมเลกุลของสาร ว่ามีการจัดตัวอย่างเป็นระเบียบแบบไหนได้บ้าง โดยดูการจัดตัวของหนึ่งหน่วยเซลล์ว่าประกอบด้วยไอออนบวกไอออนลบเป็นเท่าไร มีช่องว่างแบบไหนได้บ้าง และสารหนึ่งที่มีการจัดหน่วยเซลล์แบบหนึ่ง ๆ ควรจัดตัวเป็นชนิดไหน

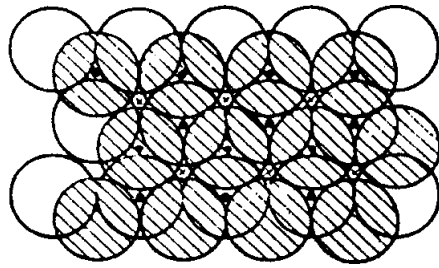
2. บทนำ

สารต่าง ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพที่เป็นของแข็งโดยทั่วไปมักจะมีการจัดตัวของอะตอมหรือไอออนหรือโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบ โดยถือว่าอะตอมหรือไอออนหรือโมเลกุลนั้นมีลักษณะเป็นวัตถุแข็งทรงกลม (hard sphere) ในกรณีของแข็งประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันอาจถือได้ว่าของแข็งนั้นประกอบด้วยวัตถุแข็งทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันหมดและจัดตัวอย่างเป็นระเบียบถ้าให้ทรงกลมที่เหมือนกัน (isomeric sphere) แทนด้วยลูกปิงปองในทรงกลมดังกล่าวและบรรจุในภาชนะทรงสี่เหลี่ยม เมื่อเขย่ากล่องแล้วดูการจัดเรียงตัวของลูกปิงปองเหล่านั้น จะเห็นว่ามันพยายามจัดตัวมันเองเพื่อให้ใช้เนื้อที่น้อยที่สุด เรียกการจัดตัวของลูกปิงปองเหล่านี้ว่า โคลสแพค (Close packed) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแพปิงปองซึ่งจัดเรียงตัวแบบโคลสแพค (close packed) ในลักษณะ 2 มิติ ด้วยเนื้อที่ 60.4 เปอร์เซ็นต์ ในปริภูมิ (space)

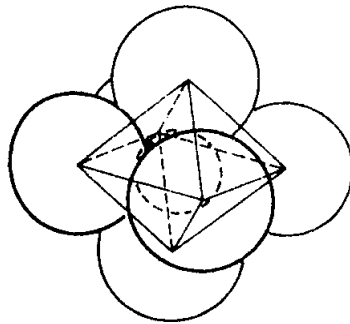
และเมื่อวางแพบิงปองชั้นที่สองลงบนชั้นที่หนึ่งโดยให้ใช้ปริมาตรน้อยที่สุด จะเห็นว่าช่องว่างระหว่างลูกบิงปองได้ 2 ชนิด* ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงแพบิงปองสองชั้นวางซ้อนกันและมีช่องว่าง 2 ชนิด คือ

- ช่องว่างเตตระฮีดรัล
- × ช่องว่างออกตะฮีดรัล

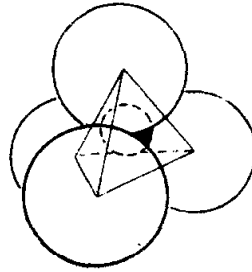
ช่องว่างออกตะฮีดรัล ช่องว่างแบบนี้เกิดโดยที่มีลูกบิงปองอยู่ชิดติดกันที่สุดได้ 6 ลูก และจัดตัวอยู่ที่มุมของรูปออกตะฮีดรัล ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงช่องว่างที่เกิดจากลูกบิงปองจัดตัวชิดที่สุด 6 ลูก

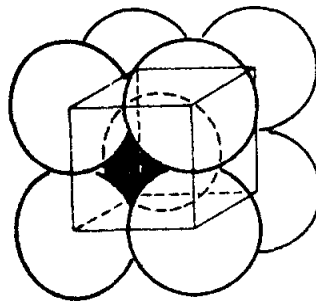
*ยังมีช่องว่างอีกแบบที่อะตอมทั้งแปดที่อยู่ชิดกันที่สุดจัดตัวอยู่ที่มุมของรูปลูกบาศก์ ช่องว่างนี้เรียกว่า ช่องว่างลูกบาศก์ ดังรูปที่ 3.5

ช่องว่างเตตระฮีดรัล ช่องว่างแบบนี้เกิดโดยที่มีลูกปิงปองอยู่ชิดกันที่สุดได้ 4 ลูก และจัดตัวอยู่ที่มุมของรูปเตตระฮีดรัล ดังรูปที่ 3.4



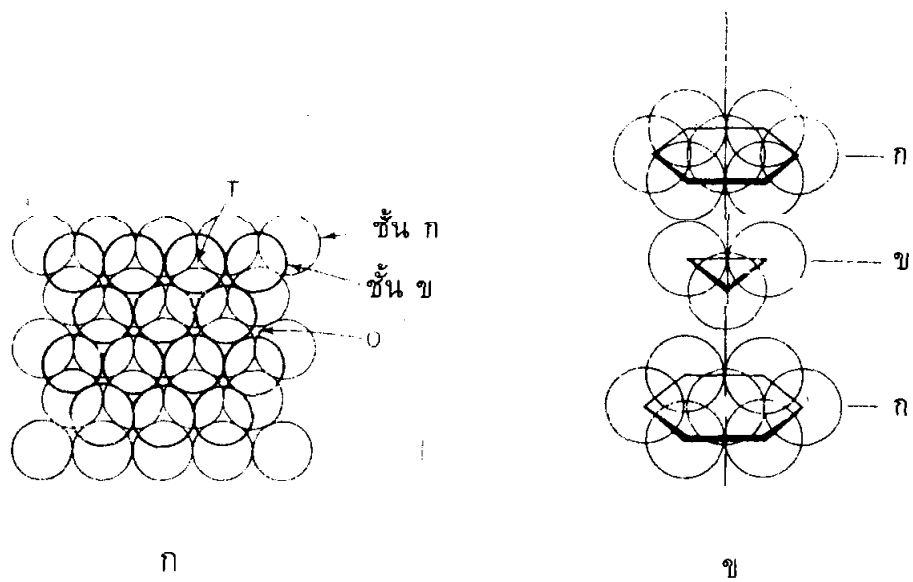
รูปที่ 3.4 แสดงช่องว่างที่เกิดจากลูกปิงปองจัดตัวชิดกันที่สุด 4 ลูก

ยังมีช่องว่างอีกชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการจัดตัวแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงช่องว่างที่เกิดจากลูกปิงปองจัดตัวชิดกันที่สุดจำนวน 8 ลูก

แบบที่หนึ่ง เป็นการวางแพบิงปองชั้นที่สามในตำแหน่งซึ่งตรงกับแพบิงปองชั้นที่หนึ่งพอดี และเมื่อวางแพบิงปองชั้นที่สี่ ก็ตรงกับตำแหน่งของแพบิงปองชั้นที่สอง ถ้าให้แพบิงปองชั้นแรกเป็น “ตำแหน่ง ก” ชั้นที่สองเป็น “ตำแหน่ง ข” ลำดับการจัดตัวของแพบิงปองแบบนี้ จะมีลักษณะเป็น กขกข....เรียกการจัดเรียงตัวแบบนี้ว่า เฮกซะโกนอลโคลสแพค (hexagonal closed packing : hcp) ดังรูป 3.6 ก. การจัดตัวแบบนี้จะมีหนึ่งหน่วยเซลล์* (unit cell) เป็นรูปเฮกซะโกนอล ดังรูป 3.6 ข



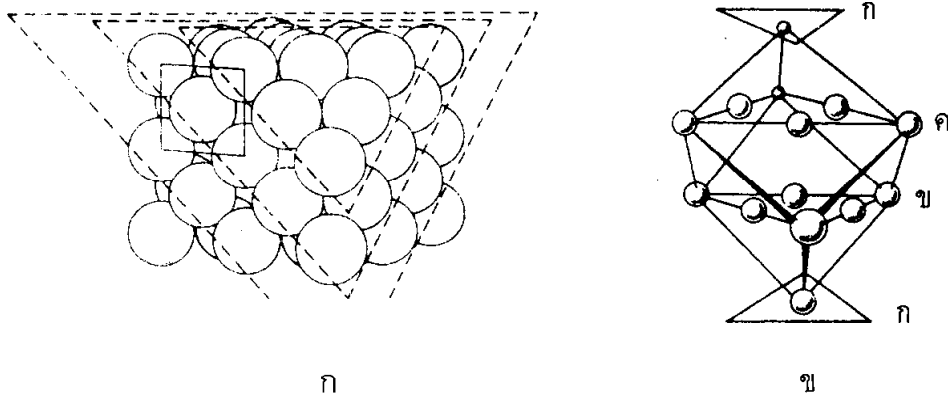
รูปที่ 3.6 ก ลักษณะการจัดลำดับชั้นของแพเป็น กขกข...

รูปที่ 3.6 ข ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ในการจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค

แบบที่สอง เป็นการวางแพบิงปองชั้นที่สามโดยให้ลูกบิงปองแต่ละลูกอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกับช่องระหว่างออกตะฮีดรัลที่เกิดจากแพบิงปองชั้นแรกและชั้นที่สองให้แพบิงปองชั้นที่สามเป็น “ตำแหน่ง ค” และเมื่อวางแพบิงปองชั้นที่สี่ซ้อนลงไป ลูกบิงปองในชั้นนี้จะตรงกับตำแหน่งของลูกบิงปองชั้นแรกและแพบิงปองชั้นที่ห้าจะอยู่ตรงกับชั้นที่สอง จะได้ลำดับของการจัดแพบิงปองอย่างนี้เป็น กขคกขค.....

* หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) หน่วยที่เล็กที่สุดในผลึกของของแข็ง เมื่อนำมาต่อเข้าด้วยกันเป็นจำนวนมาก จะให้การจัดตัวของอะตอมเหมือนกับที่พบในผลึกของของแข็งทุกประการ และจำนวนช่องว่างออกตะฮีดรัลจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนลูกบิงปองหรือไอออนลบ และช่องว่างเตตระฮีดรัลจะมีจำนวนเป็น 2 เท่าของช่องว่างออกตะฮีดรัล และเมื่อวางแพบิงปองชั้นที่สามลงบนชั้นที่สอง สามารถวางได้ 2 แบบ โดยแต่ละแบบจะใช้น้อยที่น้อยที่สุด

เรียกการจัดเรียงตัวแบบนี้ว่า คิวบิกโคลสแพค (cubic closed packing ; ccp) ดังรูป 3.7 ก และลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีรูปร่างแบบ เฟสเซนเตอร์คิวบิก (face center cubic) ดังรูป 3.7 ข

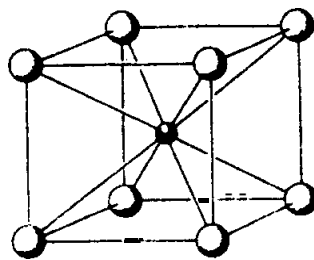


รูปที่ 3.7 ก ลักษณะการจัดแพ่งปองเป็นแบบ กขคกขค.....

รูปที่ 3.7 ข ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ในการจัดเรียงตัวแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก

2.1 การจัดตัวของอะตอมของโลหะต่าง ๆ (Structure of Metal)

จากการสมมุติว่าอะตอมของโลหะเป็นวัตถุแข็งทรงกลม การจัดตัวของอะตอมในโลหะที่พบโดยทั่วไปมีอยู่ 3 แบบ สองแบบแรกเป็นการจัดตัวในลักษณะโคลสแพค ได้แก่ เฮกซะโกนอลและคิวบิกโคลสแพค โครงสร้างของการจัดตัวทั้ง 2 แบบ อะตอมแต่ละตัวจะมีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 12 พลังงานที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างทั้ง 2 แบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นโลหะบางชนิดมีโครงสร้างได้ทั้ง 2 แบบ ผลึกของมันอาจจะจัดโครงสร้างเป็นคิวบิก หรือเฮกซะโกนอลแบบใดแบบหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม ยังพบโครงสร้างอีกแบบหนึ่งในโลหะบางชนิด คือ การจัดตัวแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก (body center cubic) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่จัดเรียงตัวแบบบอดีเซนเตอร์คิวบิก

การจัดตัวแบบนี้ไม่ใช่เป็นการจัดตัวแบบโคเลสเพค อะตอมแต่ละตัวในโครงสร้างแบบนี้จะมีเลขโคออดิเนชันเป็น 8 และโครงสร้างที่เรียกบอดีเซนเตอร์นั้นจะต้องมีอนุภาคที่มุมและที่ศูนย์กลางใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน โครงสร้างซึ่งเป็นแบบโครงสร้างที่ชิดกันที่สุดไม่ได้ เช่น ซีเซียมคลอไรด์ (CsCl) โดยที่คลอไรด์ไอออนหรือซีเซียมไอออนอยู่ที่มุมทั้งแปด และมีเคาน์เตอร์ไอออน (counter ion) อยู่ตรงกลาง นั่นคือทั้ง Cs และ Cl ต่างก็มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 8 ในสารประกอบอื่น ๆ ที่โครงสร้างแบบนี้ เช่น CsI, RbCl, NH_4Cl และ NH_4Br

2.2 การจัดเรียงตัวของไอออนในผลึกของสารประกอบไอออนิก

สารประกอบไอออนิก ประกอบด้วยไอออนิก 2 ชนิด คือ ไอออนที่มีประจุบวก (cation) และประจุลบ (anion) ไอออนทั้งสองชนิดจะมีพันธะด้วยแรงที่ยึดกันแบบแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic) และพันธะไอออนิกไม่มีทิศทางแน่นอน (undirected) ดังนั้นโครงสร้างของสารประกอบไอออนิกจึงถูกกำหนดโดยลักษณะทางโครงสร้างในเทอมของอัตราส่วนระหว่างรัศมีของไอออนบวก (r_+) และรัศมีของไอออนลบ (r_-)

เมื่อพิจารณาสารประกอบไอออนิกซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น MX จำนวนของไอออนบวก (M^+) จะเท่ากับจำนวนของไอออนลบ (X^-) โครงสร้างของสารประกอบพวกนี้ แบ่งได้ออกเป็น 3 ชนิดคือ

โครงสร้างแบบไซเดียมคลอไรด์

โครงสร้างแบบซีเซียมคลอไรด์

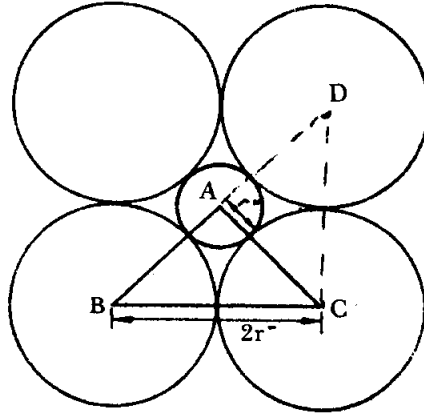
โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc blend)

$$\frac{AB}{BC} = \frac{AC}{BC} = \cos 45^\circ$$

เพราะฉะนั้น $\frac{r_+ + r_-}{2r_-} = \cos 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$r_+ = (\sqrt{2}r_-) - (r_-)$$

$$r_+/r_- = 0.41$$



รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างรัศมีของ Na^+ และ Cl^-

จะเห็นว่าอัตราส่วนของรัศมีมีค่า 0.41 ซึ่งเป็นอัตราส่วนต่ำสุดที่เป็นไปได้ที่จะทำให้ Na^+ สามารถเข้าไปอยู่ในช่องว่างออกตะระฮีดรัลได้ เมื่อ r_+/r_- มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.41 ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของรัศมีในโครงสร้างอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของรัศมี r_+/r_- ของโครงสร้างชนิดต่าง ๆ

เลขโคออดิเนชัน	อัตราส่วนของรัศมี (r_+/r_-)	โครงสร้างของ สารประกอบ	ช่วงของค่า r_+/r_-
4	0.23	ZnS	0.23–0.41
6	0.41	NaCl	0.41–0.73
8	0.73	CsCl	0.73–1

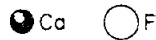
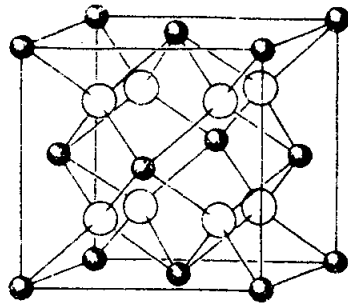
จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนรัศมี (r_+/r_-) ของสารประกอบบางชนิดจะมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าอัตราส่วนรัศมีที่พอดีกับเลขโคออดิเนชันในสารประกอบที่ประมาณจากการคำนวณข้างต้น ในกรณีที่อัตราส่วนรัศมีน้อยกว่า 0.41 นั่นคือ อีออนบวกมีขนาดเล็กหรืออีออนลบมีขนาดใหญ่ขึ้นก็ทำให้อีออนลบที่ล้อมรอบอีออนบวกมีจำนวนน้อยลง ดังนั้นสารประกอบอ็อกไซด์นี้จึงไม่เหมาะกับโครงสร้างแบบ NaCl แต่เหมาะสมที่จะมีโครงสร้างแบบ ZnS มากกว่าเพราะอัตราส่วนรัศมีมีค่าเพียง 0.23

การทำนายโครงสร้างของสารประกอบอ็อกไซด์โดยใช้รูปแบบวัตถุเชิงทรงกลมซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น และผลที่ได้ก็มักถูกต้อง (valid) และได้แสดงค่าของ r_+/r_- ของสารประกอบอ็อกไซด์ที่มีสูตรเป็น MX ในตารางที่ 3.2

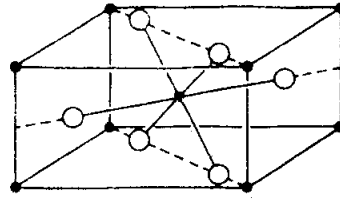
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของรัศมี r_+/r_- ของสารประกอบชนิดต่าง ๆ

โครงสร้าง ZnS		โครงสร้าง NaCl		โครงสร้าง CsCl	
เกลือ	r_+/r_-	เกลือ	r_+/r_-	เกลือ	r_+/r_-
ZnS	0.40	NaCl	0.53	CsCl	0.93
ZnSe	0.44	NaI	0.44	CsI	0.76
BaSe	0.20	KCl	0.73	TlCl	0.77
BeSe	0.18	KI	0.62	TlBr	0.83

สารประกอบอ็อกไซด์อื่น ๆ ที่มีสูตรทั่วไปเป็นแบบ MX_2 และ M_2X ซึ่งจะตกผลึกในรูปของโครงสร้างแบบอื่นได้แก่ แคลเซียมฟลูออไรด์มีโครงสร้างแบบฟลูออไรด์ (fluorite structure) และทิเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งมีโครงสร้างแบบรูไทล์ (rutile structure) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ก, ข จากการพิจารณาการจัดเรียงตัวแบบคิวบิกโคลสแพค เช่น โครงสร้างของโซเดียมคลอไรด์ เราจินตนาการว่าวัตถุทรงกลมเป็นคลอไรด์อีออน โดยมีโซเดียมอีออนอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัลและอีออนลบที่สัมผัสกันหมด แต่ความจริงแล้ว การวาดภาพพจน์ของโครงสร้างของโซเดียมคลอไรด์แบบนี้ไม่ถูกต้องทั้งหมด เพราะขนาดของโซเดียมที่ใหญ่กว่าช่องว่างออกตะฮีดรัล จะมีแรงผลักให้คลอไรด์อีออนไม่สัมผัสซึ่งกันและกันจึงไม่เป็นโคลสแพค แต่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโซเดียมและคลอไรด์อีออนยังคงเหมือนเดิม โครงสร้างอ็อกไซด์ที่กล่าวข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.3



ก.



ข.

รูปที่ 3.11 ลักษณะของสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบ ก. ฟลูออไรด์
ข. รูไทล์

ตารางที่ 3.3 โครงสร้างผลึกที่มีการจัดเรียงตัวแบบโคเลสเพคของสารประกอบอ็อกไซด์บางชนิด

โครงสร้าง	เลขโคออดิเนชัน	รายละเอียดของโครงสร้างในรูปของโคเลสเพค
โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	6 : 6	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ ccp ของคลอไรด์ไอออน โดยมีโซเดียมไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัลทั้งหมด
นิกเกิลอาร์เซไนด์ (NiAs)	6 : 6	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ hcp ของอาร์เซไนด์ไอออน โดยมีนิกเกิลไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัลทั้งหมด
ซิงค์เบลนด์ (ZnS)	4 : 4	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ ccp ของซัลไฟด์ไอออน โดยมีซิงค์ไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างเตตระฮีดรัลจำนวนครึ่งหนึ่ง
วิวคไซต์ (Wurtzite) (ZnS)	4 : 4	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ hcp ของซัลไฟด์ไอออน โดยมีซิงค์ไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างเตตระฮีดรัล จำนวนครึ่งหนึ่ง

โครงสร้าง	เลขโคออดิเนชัน	รายละเอียดของโครงสร้างในรูปของโคเลตแพค
ฟลูออไรต์ (CaF_2)	8 : 4	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ ccp ของแคลเซียมไอออน โดยมีฟลูออไรต์ไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างเตตระฮีดรัลทั้งหมด
แคดเมียมไอโอไดด์ (CdI_2)	6 : 3	ประกอบด้วยการจัดตัวแบบ hcp ของไอโอไดด์ โดยแคดเมียมไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัลทั้งหมด ซึ่งอยู่ระหว่างทุก ๆ 2 ชั้น เช่น ช่องว่างออกตะฮีดรัลที่อยู่ระหว่างชั้น 1 และ 2, ชั้น 3 และ 4, ชั้น 5 และ 6 ส่วนช่องว่างออกตะฮีดรัลที่อยู่ระหว่างชั้น 2 และ 3, ชั้น 4 และ 5, ชั้น 6 และ 7 ไม่มีไอออนของแคดเมียมบรรจุอยู่
คอร์ันดัม (Corundum) (Al_2O_3)	6 : 4	ประกอบด้วยการจัดเรียงตัวแบบ hcp ของออกไซด์-ไอออน โดยมีลูมิเนียมไอออนบรรจุอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัลเพียง 2 ใน 3 ของทั้งหมด

ยังมีการหาโครงสร้างของผลึกโดยวิธีอื่น เช่น เอกซเรย์คริสตัลโรกราฟฟี (ดูจากภาคผนวกที่ 1) ซึ่งเป็นการหาโครงสร้างของสารประกอบได้อย่างสมบูรณ์

3. การทดลอง

ใช้ลูกปิงปองแทนวัตถุทรงกลม และดินน้ำมันขนาดต่างๆ แทนโลหะที่ใส่ในช่องว่าง ทำการทดลองต่อไปนี้

(1) การจัดเรียงลูกปิงปองชั้นที่ 1 (ชั้น ก)

1.1 ให้นักศึกษานำลูกปิงปองมาเรียงชิดกันเป็น 5 แถว ๆ ละ 5 ลูก นักศึกษาจะพบว่า สามารถจัดเรียงได้ 2 แบบคือ แบบแรกเกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส แบบที่สองเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน แล้วตอบคำถามต่อไปนี้

1.1.1 รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือขนมเปียกปูนใช้เนื้อที่น้อยกว่ากันอยู่ที่ %

1.1.2 ช่องว่างระหว่างลูกปิงปองในรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแต่ละช่องถูกล้อมด้วย

ลูกปิงปองก็ลูก และถ้าจะบรรจุดินน้ำมันลงในช่องว่างดังกล่าว ลูกกลมนั้นจะมีรัศมีใหญ่ที่สุด เป็นที่เท่าของลูกปิงปอง

1.1.3 ช่องว่างระหว่างลูกปิงปองในรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน แต่ละช่องถูกล้อมด้วยปิงปองก็ลูก และถ้าจะบรรจุดินน้ำมันลงในช่องว่างดังกล่าว ดินน้ำมันลูกกลมนั้นจะมีรัศมีใหญ่ที่สุดเป็นที่เท่าของลูกปิงปอง

(2) การจัดเรียงของลูกปิงปองในชั้นที่ 2 (ชั้น ข.)

2.1 ให้นักศึกษาจัดเรียงลูกปิงปองในชั้นที่ 1 เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 5×5

2.2 นำลูกปิงปองวางเรียงบนชั้นที่ 1 โดยวางบนร่องที่เกิดจากการเรียงตัวของลูกปิงปองในชั้นที่ 1 แล้วตอบคำถามต่อไปนี้

2.2.1 ร่องที่เกิดจากลูกปิงปองในชั้นที่ 1 มีทั้งหมดกี่ร่องและสามารถวางลูกปิงปองในชั้นที่ 2 ลงไปได้กี่ลูกโดยวางให้ชิดกัน เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น

2.2.2 ช่องว่างที่อยู่ระหว่างชั้นหนึ่งและชั้นที่สอง จะถูกล้อมรอบด้วยลูกปิงปองก็ลูก และถ้าบรรจุดินน้ำมันลงในช่องว่างดังกล่าวดินน้ำมันนั้นจะมีรัศมีใหญ่ที่สุด เป็นที่เท่าของลูกปิงปอง

(3) การจัดเรียงของลูกปิงปองในชั้นที่ 3 (ชั้น ก หรือชั้น ค)

3.1 ให้นักศึกษาจัดเรียงลูกปิงปองในชั้นที่หนึ่ง เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ขนาด 5×5

3.2 นำลูกปิงปองมาเรียงในชั้นที่สองให้เต็มเท่าที่จะสามารถวางได้โดยวางให้ชิดกัน

3.3 นำลูกปิงปองมาเรียงในชั้นที่สาม นักศึกษาจะพบว่าสามารถทำได้ 2 แบบคือ

3.3.1 แบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค แบบนี้ลูกปิงปองในชั้นที่สามจะซ้อนทับกับลูกปิงปองในชั้นที่หนึ่ง และถ้าเราเรียงเพิ่มขึ้นไปอีกชั้นหนึ่ง ลูกปิงปองในชั้นถัดไปจะต้องวางให้ซ้อนทับกับลูกปิงปองในชั้นที่สอง จึงเกิดการวางซ้อนแบบ กข กข กข ซ้ำกันไปเรื่อย ๆ

3.3.2 แบบคิวบิกโคลสแพค แบบนี้ลูกปิงปองในชั้นที่สามจะไม่ซ้อนทับกับลูกปิงปองในชั้นที่หนึ่ง หรือชั้นที่สองเลย แต่ถ้าเราเรียงเพิ่มขึ้นไปอีกชั้น ลูกปิงปองในชั้นที่สี่จะต้องวางให้ซ้อนทับกับลูกปิงปองในชั้นที่หนึ่ง จึงเกิดการวางซ้อนแบบ กขค กขค กขค ซ้ำกันไปเรื่อย ๆ

3.3.3 เมื่อนักศึกษาวางลูกปิงปองในชั้นที่สามแล้ว จงหาดูว่านอกจากช่องว่างที่พบแล้วในแบบข้อ 1.1.3 และ 2.2.2 ยังมีช่องว่างแบบอื่นอีกหรือไม่ ถ้ามีจะถูกล้อมด้วยลูกปิงปองก็ลูก และถ้าต้องการบรรจุดินน้ำมันลงในช่องว่างดังกล่าว ดินน้ำมันลูกกลมนั้นจะมีรัศมีใหญ่

ที่สุดเป็นที่เท่าของลูกปิงปอง

(4) หน่วยเซลล์

4.1 ให้นักศึกษาสร้างหนึ่งหน่วยเซลล์ของการเรียงลูกปิงปองเฮกซะโกนอลโคลสแพค, คิวบิกโคลสแพค ชนิดเฟซ เซนเตอร์ และคิวบิกโคลสแพค ชนิดบอดีเซนเตอร์ แล้วตอบคำถามต่อไปนี้

4.1.1 หนึ่งหน่วยเซลล์ ในแต่ละแบบจะต้องใช้ลูกปิงปองกี่ลูก (โดยต้องคิดว่าลูกปิงปองที่อยู่ที่มุมหรือด้านของหน่วยเซลล์ จะต้องใช้ร่วมกับหน่วยเซลล์ข้างเคียงด้วย)

4.1.2 ในหนึ่งหน่วยเซลล์ แต่ละแบบจะมีช่องว่างแบบเตตระฮีดรัล, ช่องว่างแบบออกตะฮีดรัล และช่องว่างแบบคิวบิก อยู่เท่าไร (ต้องคิดถึงการใช้ช่องว่างร่วมกับหน่วยเซลล์ข้างเคียงด้วย)

4.1.3 ถ้าจำนวนช่องว่างแบบออกตะฮีดรัลมีโลหะ M เข้าไปอยู่และลูกปิงปองคือไอโลหะ X ในหนึ่งหน่วยเซลล์ของเฮกซะโกนอลโคลสแพค และคิวบิกโคลสแพคจะมีสูตรโมเลกุลของ M_mX_n เป็นอย่างไร (ให้ดูเลขโดยอดิเนชันของลูกปิงปองประกอบด้วย)

4.1.4 ถ้าโลหะ M เข้าไปอยู่ในช่องว่างแบบเตตระฮีดรัล สูตรโมเลกุล M_mX_n จะเป็นอย่างไร

(5) โครงสร้างผลึก

5.1 จัดเรียงแบบลูกปิงปอง 3 ชั้นให้เกิดเป็นเฮกซะโกนอลโคลสแพค แล้วเติมดินน้ำมันสีฟ้าลงในช่องว่างออกตะฮีดรัลทั้งหมด นับจำนวนลูกปิงปองที่ล้อมรอบดินน้ำมัน และจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกปิงปองแต่ละลูก ยกตัวอย่างสารประกอบที่มีรูปร่างอย่างนี้

5.2 จัดเรียงแปดลูกปิงปอง 3 ชั้นให้อยู่ในรูปเฮกซะโกนอลโคลสแพค แล้วเติมดินน้ำมันสีแดงลงในช่องว่างเตตระฮีดรัลจำนวนครึ่งหนึ่งของทั้งหมด นับจำนวนลูกปิงปองที่ล้อมรอบดินน้ำมัน และจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกปิงปองแต่ละลูก ยกตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างอย่างนี้

5.3 จัดเรียงแปดลูกปิงปอง 5 ชั้น ให้อยู่ในรูปเฮกซะโกนอลโคลสแพค แล้วเติมดินน้ำมันสีฟ้าลงในช่องว่างออกตะฮีดรัล โดยชุดหนึ่งจะอยู่ระหว่างชั้นที่ 1 และ 2 อีกชุดหนึ่งจะอยู่ระหว่างชั้นที่ 3 และ 4 นับจำนวนลูกปิงปองที่ล้อมรอบดินน้ำมัน และจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกปิงปอง ยกตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้

5.4 จัดเรียงแปดลูกปิงปอง 3 ชั้นให้อยู่ในรูปของเฮกซะโกนอลโคลสแพค แล้วเติมดินน้ำมันสีฟ้าลงในช่องว่างออกตะฮีดรัล จำนวนครึ่งหนึ่งของทั้งหมด นับจำนวนลูกปิงปองที่ล้อมรอบดินน้ำมันและจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกปิงปอง ยกตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้

5.5 จัดเรียงแพลูกบิงปอง 3 ชั้นให้อยู่ในรูปคิวบิกโคลสแพค แล้วใส่ดินน้ำมันสีแดงลงในช่องว่างเตตระฮีดรัลทั้งหมด นับจำนวนดินน้ำมันสีแดงที่ล้อมรอบลูกบิงปองแต่ละลูก และนับจำนวนลูกบิงปองล้อมรอบดินน้ำมัน ยกตัวอย่างสารที่มีโครงสร้างแบบนี้

5.6 จัดเรียงแพลูกบิงปอง 3 ชั้นให้อยู่ในรูปคิวบิกโคลสแพค แล้วใส่ดินน้ำมันสีแดงลงในช่องว่างเตตระฮีดรัลจำนวนครึ่งหนึ่งของทั้งหมด นับจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกบิงปองแต่ละลูก และยกตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างอย่างนี้

5.7 จัดเรียงแพลูกบิงปอง 3 ชั้นให้อยู่ในรูปคิวบิกโคลสแพค แล้วใส่ดินน้ำมันสีฟ้าลงในช่องว่างออกตะฮีดรัลทั้งหมด นับจำนวนดินน้ำมันที่ล้อมรอบลูกบิงปองแต่ละลูก และยกตัวอย่างสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้

5.8 พิจารณาโครงสร้างผลึกจากแบบที่จัดไว้ของ TiO_2 และตอบคำถามต่อไปนี้

5.8.1 ออกซิเจนแต่ละตัวมี Ti ล้อมรอบกี่อะตอม

5.8.2 Ti แต่ละตัวมีออกซิเจนล้อมรอบกี่อะตอม

5.8.3 ออกซิเจนมีหน่วยเซลล์เป็นแบบอะไร

5.8.4 Ti มีหน่วยเซลล์เป็นแบบอะไร

5.9 พิจารณาโครงสร้างของ CaF_2 ในรูปที่ 3.11 และตอบคำถามต่อไปนี้

5.9.1 F มี Ca ล้อมรอบกี่อะตอม

5.9.2 Ca มี F ล้อมรอบกี่อะตอม

5.9.3 Ca มีหน่วยเซลล์เป็นแบบไหน

5.9.4 F มีหน่วยเป็นแบบไหน

คำถามท้ายบท

- 1) เหตุใดเกลือแกง (NaCl) จึงตกผลึกเป็นรูปลูกบาศก์ที่กั้นภาชนะ แต่จะเป็นรูปออกตะฮีดรัล ถ้าใช้เชือกแขวนผลึก NaCl ล่อไว้ในสารละลาย NaCl อิ่มตัว
- 2) การเปลี่ยนคุณสมบัติของเหล็ก โดยการเติมธาตุอื่น ๆ ลงไปผสม ธาตุเหล่านั้นจะเข้าไปอยู่ที่ไหนในผลึกของเหล็ก และจะทำให้คุณสมบัติเปลี่ยนไปได้อย่างไรบ้าง (พิจารณาจากคาร์บอนอะตอม ซึ่งนักศึกษสามารถค้นได้จากตำราทางอนินทรีย์เคมีทั่วไป)
- 3) สมมติว่าลูกปิงปองเป็นอะตอมของ Cl ซึ่งจัดเรียงแบบคิวบิก โคลสแพค ชนิดเฟซเซนเตอร์ ดังนั้นอะตอมของ Na จะต้องเข้าไปอยู่ที่ช่องว่างแบบไหนในหน่วยเซลล์ และเป็นจำนวนเท่าใดจึงจะได้อัตราส่วน Na : Cl = 1 : 1 (ผลึกแบบ Rock salt)
- 4) สมมติว่าลูกปิงปองเป็นอะตอมของซัลไฟด์ ไอออน ซึ่งจัดเรียงตัวแบบเฮกซะโกนอล โคลสแพค ดังนั้นอะตอมของ Zn จะต้องเข้าไปอยู่ที่ช่องว่างแบบไหนในหน่วยเซลล์ และเป็นจำนวนเท่าใดจึงจะได้อัตราส่วน Zn : S = 1 : 1 (ผลึกแบบ Wurtzite)
- 5) สมมติว่าลูกปิงปองเป็นอะตอมของ Cl ซึ่งจัดเรียงตัวแบบคิวบิก โคลสแพค ดังนั้นอะตอมของ Cs จะต้องเข้าไปอยู่ที่ช่องว่างแบบไหนในหน่วยเซลล์ และเป็นจำนวนเท่าใดจึงจะได้อัตราส่วน Cs : Cl = 1 : 1