

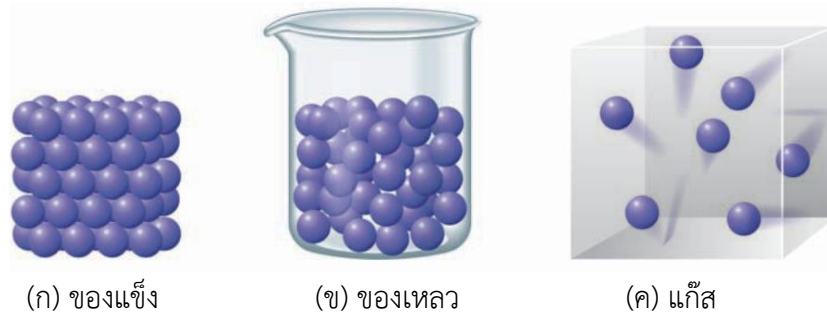
บทที่ 8 ของแข็ง

เมื่อทราบถึงสมบัติของของเหลวและแก๊สมาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงของแข็ง ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมากกว่าของเหลวและแก๊ส จึงทำให้ของแข็งมีความแข็งแรงมากเมื่อเทียบกับของเหลวและแก๊ส และมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจึงทำให้เกิดรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดเป็นผลึกขึ้น อาจจำแนกตามการจัดเรียงของอนุภาคตามชนิดของของแข็งได้เป็นของแข็งผลึกและของแข็งอสัณฐาน เนื่องจากของแข็งบางชนิดจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบทำให้ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตเกิดขึ้น หรือจำแนกตามแรงดึงดูดระหว่างของแข็งที่เกิดขึ้น ได้แก่ ผลึกโลหะ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุลและผลึกโคเวเลนต์ ผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีรูปทรงทางเรขาคณิตในรูปสามมิติที่แตกต่างกัน ตามความยาวของแกนและมุมของแกนที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ยังมีช่องว่างที่เกิดขึ้นและตำหนิของผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวอีกด้วย ในบทนี้จะอธิบายถึงสมบัติของของแข็ง การจำแนกประเภทของแข็ง โครงผลึก ระบบผลึก และ แลตทิซบราวเว การจัดเรียงอนุภาคในผลึกของแข็ง โครงสร้างผลึกสามัญบางชนิดและตำหนิของแลตทิซผลึก

สมบัติของของแข็ง (Properties of solids)

สำหรับอนุภาคของของแข็งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงมากเมื่อเทียบกับของเหลวและแก๊ส แสดงดังภาพประกอบที่ 8.1 เนื่องจากอนุภาคของของแข็งอยู่ห่างกันน้อยหรืออยู่ชิดกันมาก จึงทำให้ของแข็งมีสมบัติดังนี้ (ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ, 2555 : 77)

1. มีรูปร่างและปริมาตรที่แน่นอน ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ
2. การแพร่ทำได้ค่อนข้างยากมากเมื่อเทียบกับอนุภาคของเหลวและแก๊ส เนื่องจากโมเลกุลอยู่ชิดกันมาก
3. เมื่อลดอุณหภูมิ อนุภาคของของแข็งจะเกิดการหดตัวและจะขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน แต่การหดตัวหรือการขยายตัวน้อยมาก เมื่อเทียบกับของเหลวและแก๊ส เนื่องจากโมเลกุลอยู่ชิดกัน



ภาพประกอบที่ 8.1 การจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง ของเหลวและแก๊ส
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007 : 420)

การจำแนกประเภทของแข็ง (Classification of solids)

สำหรับการจำแนกชนิดของของแข็งจะแบ่งตามการจัดเรียงของอนุภาคได้แก่ ผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) และการจำแนกตามชนิดของแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาค ได้แก่ ผลึกโลหะ ผลึกไอออนิก ผลึกโมเลกุล และผลึกโคเวเลนต์

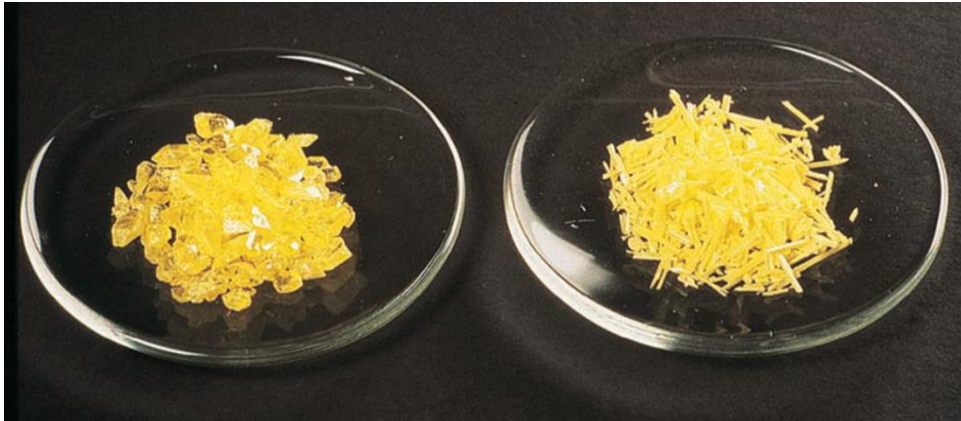
1. การจำแนกประเภทของแข็งตามการจัดเรียงอนุภาค (Classification of solids by particle arrangement)

สำหรับการจัดเรียงอนุภาคของแข็งตามการจัดเรียงของอนุภาคสามารถจำแนกได้เป็นของแข็งผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและของแข็งอสัณฐานที่มีการจัดเรียงไม่เป็นระเบียบ

1.1 ของแข็งผลึก (Crystalline solids)

อนุภาคของของแข็งมีการจัดเรียงอนุภาคชิดกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้เกิดเป็นรูปทรงทางเรขาคณิต ผิวหน้าเรียบและมีขอบตัดมุมระหว่างผิวหน้าที่แน่นอน ของแข็งประเภทนี้เรียกว่า ผลึก (Crystalline) เมื่อผลึกเกิดการแตกออกจะทำให้บางส่วนของผลึกหลุดออกไป แต่ยังคงมีบางส่วนหลงเหลืออยู่ในรูปผลึกแต่อาจเป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้รูปทรงภายนอกไม่เป็นไปตามรูปทรงทางเรขาคณิต แต่ยังคงสมบัติความเป็นผลึกอยู่ (กฤษณา ชูติมา, 2556 : 323 และรัชนีกร วันจันทิก, 2557 : 185)

หากของแข็งอยู่ในรูปผลึก จะทำให้สมบัติบางอย่าง เช่น การนำไฟฟ้า หรือ ดรรชนีการหักเหของแสงแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง เรียกสมบัตินี้ว่า ไอโซทรอปี (Isotropy) โดยแม้จะเป็นธาตุเดียวกัน แต่อาจเกิดรูปผลึกได้แตกต่างกันตามการจัดเรียงตัวของของแข็ง (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 158) ตัวอย่างเช่น กำมะถัน (S) รูปเสถียรคือ S_8 เมื่ออนุภาคของกำมะถันมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้ 2 รูป คือ ผลึกมอนอคลินิก (Monoclinic) มีลักษณะเป็นรูปเข็ม แสดงดังรูปที่ 8.2 (ก) และผลึก rombik (Rhombic) มีลักษณะเป็นรูปเหลี่ยม แสดงดังภาพประกอบที่ 8.2 (ข)



(ก) ผลึกรอมบิก (รูปเหลี่ยม)

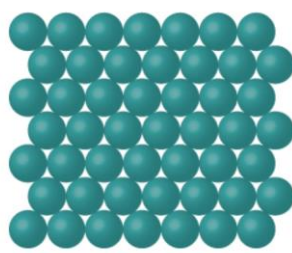
(ข) ผลึกมอนอคลินิก (รูปเข็ม)

ภาพประกอบที่ 8.2 ผลึกของกำมะถัน (S_8)

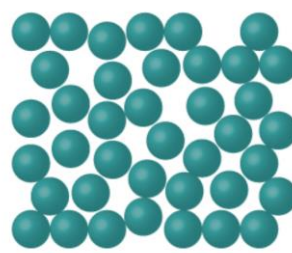
ที่มา : ดัดแปลงจาก Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007 : 245)

1.2 ของแข็งอสัณฐาน (Amorphous)

ในขณะที่ของแข็งบางประเภท อนุภาคมีการเรียงตัวชิดกันแต่ไม่เป็นระเบียบ จึงไม่มีรูปร่างทางเรขาคณิต เรียกของแข็งประเภทนี้ว่า อสัณฐาน (Amorphous) ของแข็งอสัณฐานไม่มีจุดหลอมเหลวที่เด่นชัด เมื่อเทียบกับของแข็งผลึกที่มีจุดหลอมเหลวที่ชัดเจน (พินิตี ระตะนานุกุล และคณะ, 2549 : 159 และรัชนิกร วันจันทิก, 2557 : 185) แสดงดังภาพประกอบที่ 8.3



(ก) ของแข็งผลึก

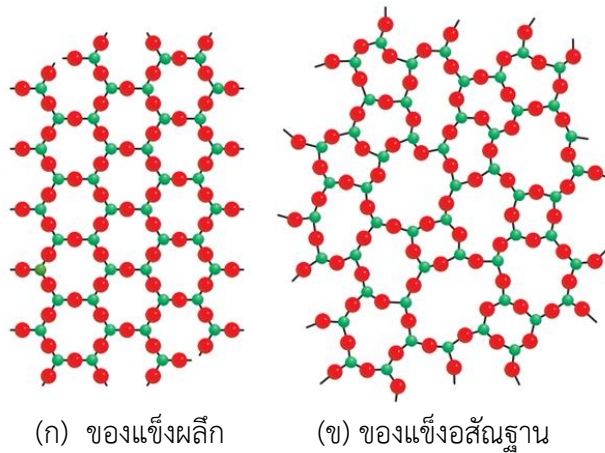


(ข) ของแข็งอสัณฐาน

ภาพประกอบที่ 8.3 แสดงวิภาคของแข็งที่มีการจัดเรียงตัวแบบซ้ำ ๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Flowers, P. et al. (2017 : 565)

ตัวอย่างของแข็งอัญฐาน เช่น พลาสติก แก้ว โดยแก้วเป็นของแข็งอัญฐานที่มีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งไม่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ แต่หากมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบจะได้เป็นของแข็งผลึก คือ ควอตซ์ (Quartz) (Chang, R., 2010 : 488) จะเห็นได้ว่าแม้จะมีสารที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกันนั่นคือ ซิลิกา แต่หากการจัดเรียงตัวไม่เหมือนกันจะทำให้ได้ทั้งรูปผลึก (ก) และอัญฐาน (ข) จากสารที่เป็นองค์ประกอบเดียวกัน โดยอนุภาคขนาดเล็ก (สีเขียว) แทนอะตอมของซิลิคอนและอนุภาคขนาดใหญ่ (สีแดง) แทนอะตอมของออกซิเจน แสดงดังภาพประกอบที่ 8.4



ภาพประกอบที่ 8.4 การจัดเรียงตัวของซิลิกาแบบผลึกและอัญฐาน

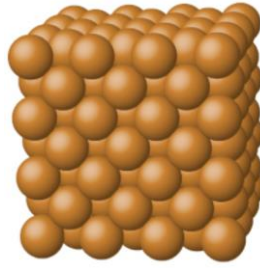
ที่มา : ดัดแปลงจาก Chang, R. (2010 : 488)

2. การจำแนกประเภทของแข็งตามชนิดของแรงดึงดูดของอนุภาค (Classification of solids by type of attraction units)

สำหรับการจัดเรียงอนุภาคของแข็ง โดยการจำแนกตามชนิดแรงดึงดูดหรือพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคสามารถจำแนกได้เป็น ผลึกโลหะ พันธะไอออนิก ผลึกโมเลกุลและพันธะโคเวเลนต์

2.1 ผลึกโลหะ (Metallic crystals)

ผลึกโลหะเกิดจากอะตอมของโลหะยึดกันด้วยพันธะโลหะ ไม่เพียงแต่โลหะเท่านั้น ทั้งนี้รวมถึงโลหะผสมด้วย โดยที่อุณหภูมิห้องโลหะทุกตัวจะมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลว โดยอนุภาคที่จุดแลตทิซคือ ไอออนบวกถูกล้อมรอบด้วยเวเลนซ์อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้อิสระ เรียกว่า ทะเลอิเล็กตรอน จึงช่วยให้มีแรงดึงดูดในผลึกระหว่างเวเลนซ์อิเล็กตรอนกับไอออนบวก จึงทำให้ผลึกโลหะนำไฟฟ้าได้ดี มีความแข็งแรง จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมาก แสดงดังภาพประกอบที่ 8.5 (รานี สุวรรณพฤกษ์, 2559 : 502)



ภาพประกอบที่ 8.5 ผลึกโลหะของทองแดง

ที่มา : Flowers, P. et al. (2017 : 556)

2.2 ผลึกไอออนิก (Ionic crystals)

ผลึกไอออนิกเกิดจากแรงดึงดูดแบบไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุของไอออนบวกและประจุของไอออนลบ ตัวอย่างเช่น ผลึกโซเดียมคลอไรด์ เกิดจากประจุบวกของโซเดียมไอออนและประจุลบของคลอไรด์ไอออน ซึ่งมีประจุตรงกันข้ามกันจึงดึงดูดด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแกร่งจึงทำให้ผลึกไอออนิกมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง แต่ถ้ามี่แรงกระทำต่อผลึกไอออนิกจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนบวกเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของไอออนลบ จึงเกิดการผลักกันของประจุตรงกันข้าม ซึ่งทำให้ผลึกเกิดการแตกหักได้ ดังนั้น ผลึกไอออนิกจึงมีความแข็งแต่เปราะและไม่นำไฟฟ้า แต่จะนำไฟฟ้าได้เมื่อเกิดการหลอมเหลวหรือเกิดการละลายน้ำ เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระของไอออนบวกและไอออนลบ ผลึกไอออนิกแสดงดังภาพประกอบที่ 8.6 (รานี สุวรรณพฤษ, 2559 : 492)

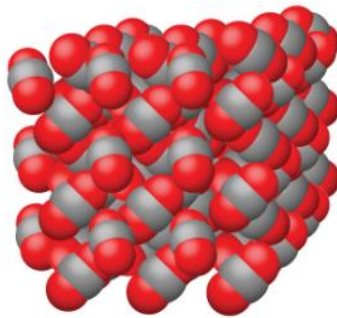


ภาพประกอบที่ 8.6 ผลึกไอออนิกของโซเดียมคลอไรด์

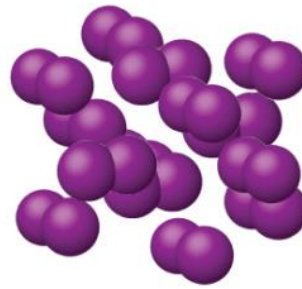
ที่มา : Flowers, P. et al. (2017 : 556)

2.3 ผลึกโมเลกุล (Molecular crystals)

ผลึกโมเลกุลเกิดจากโมเลกุลสร้างพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ได้แก่ แรงลอนดอน หรือ แรงดึงดูดระหว่างขั้ว หรือ พันธะไฮโดรเจน หรือ อาจจะเป็นแรงผสมกัน ตัวอย่างเช่น ไอโอดีน (I_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) หรือน้ำแข็งแห้ง มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแรงลอนดอน ซึ่งเป็นแรงที่อ่อนมากเมื่อเทียบกับแรงอื่น ๆ ในผลึกโมเลกุล ส่วนผลึกของน้ำ (H_2O) มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแบบพันธะไฮโดรเจน ซึ่งมีแรงดึงดูดที่แข็งแรงมากกว่าแรงลอนดอน แต่ยังคงอ่อนกว่าเมื่อเทียบกับผลึกไอออนิกและผลึกโลหะ จึงทำให้ผลึกโมเลกุลมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำ นำไฟฟ้าได้น้อยหรือไม่นำไฟฟ้าได้เลย เนื่องจากอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ระหว่างโมเลกุลได้ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.7 (รานี สุวรรณพฤษ, 2559 : 497)



(ก) คาร์บอนไดออกไซด์



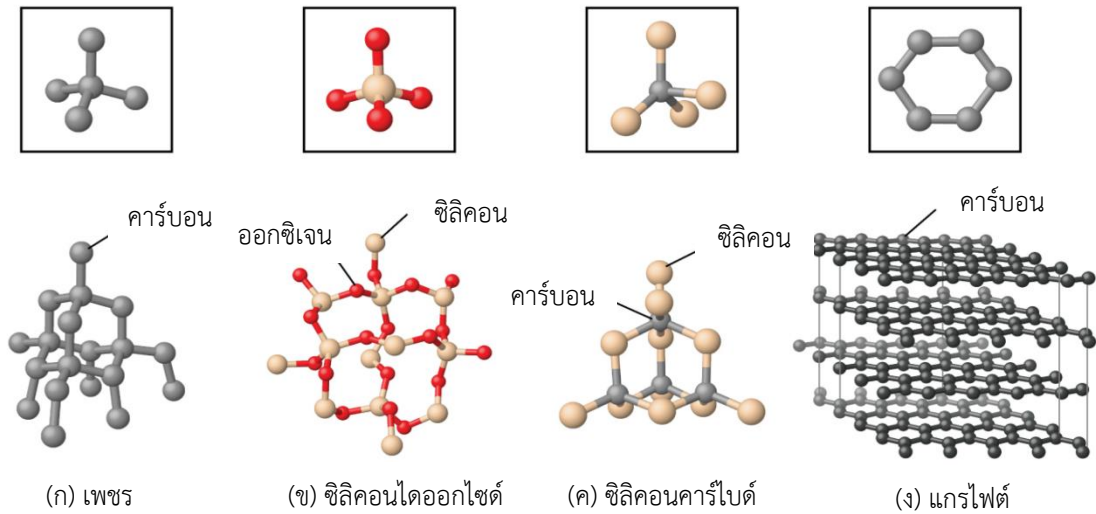
(ข) ไอโอดีน

ภาพประกอบที่ 8.7 ผลึกโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไอโอดีน (I_2)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Flowers, P. et al. (2017 : 557)

2.4 ผลึกร่างแหหรือผลึกโคเวเลนต์ (Network or covalent crystals)

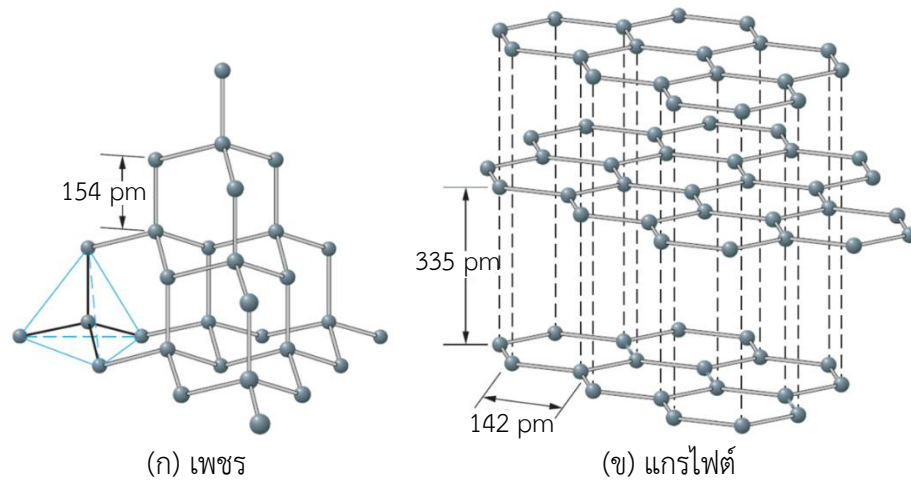
ผลึกโคเวเลนต์เกิดจากอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ต่อ ๆ กันเป็นแบบร่างแห ตัวอย่างเช่น เพชร ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนคาร์ไบด์และแกรไฟต์ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.8 เนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงสูง จะทำให้มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมาก (พินิติ รตะนานุกูล และคณะ, 2549 : 165)



ภาพประกอบที่ 8.8 ผลึกโคเวเลนต์ต่าง ๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Flowers, P. et al. (2017 : 557)

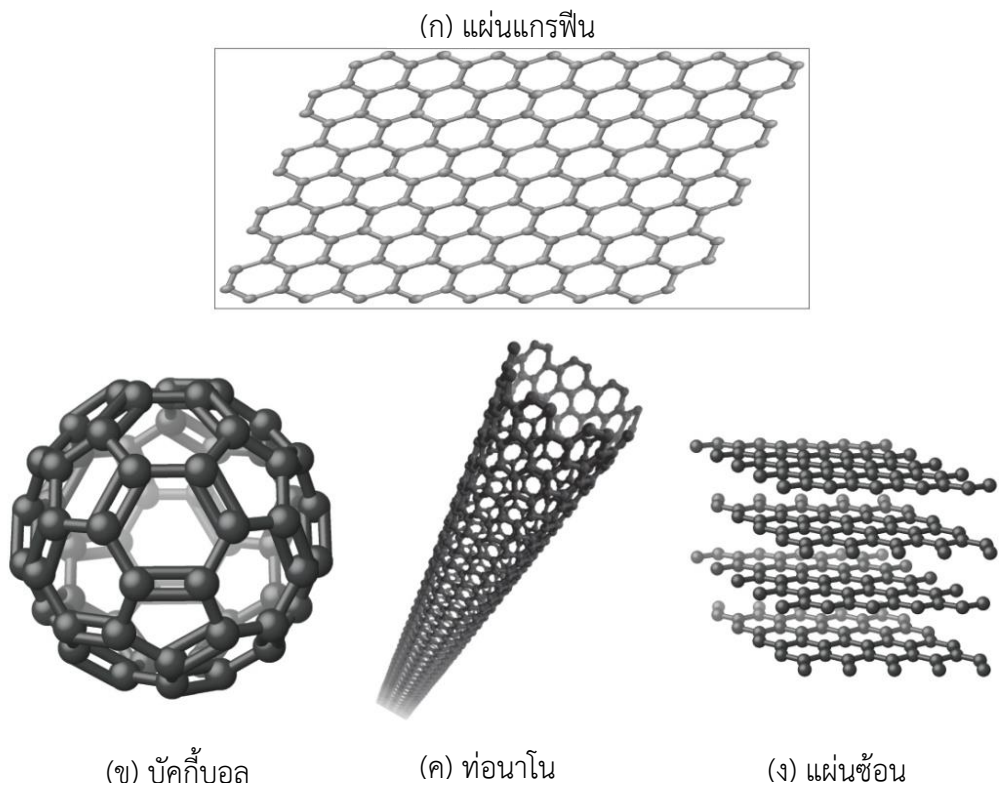
เพชร (Diamond) และแกรไฟต์ (Graphite) เป็นผลึกร่างแหหรือผลึกโคเวเลนต์ โดยเพชรเกิดจากอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวเป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ที่เป็นโครงสร้างแบบร่างแห จึงทำให้คาร์บอนอะตอมในโครงสร้างของเพชรไม่มีอิเล็กตรอนเหลืออยู่เนื่องจากคาร์บอนมีการสร้างพันธะเดี่ยวจนครบ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.9 (ก) จึงทำให้เพชรมีความแข็งแรงมากและไม่มีการนำไฟฟ้า แต่ต่างจากแกรไฟต์ที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยม โดยอะตอมของคาร์บอนนั้นสร้างพันธะเดี่ยวเพียงสามพันธะ จึงทำให้มีอิเล็กตรอนที่ว่างที่สามารถเคลื่อนได้อยู่ระหว่างแผ่นของแกรไฟต์ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.9 (ข) จึงทำให้แกรไฟต์นั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ในทิศทางขนานกับระนาบของแผ่นแกรไฟต์ แต่ในขณะที่ทิศทางตั้งฉากของอะตอมจะนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าทิศทางขนานของแผ่นแกรไฟต์ (ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ, 2560 : 246)



ภาพประกอบที่ 8.9 โครงสร้างของเพชรและแกรไฟต์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007 : 445)

นอกจากเพชรและแกรไฟต์แล้ว ยังมีอีกรูปอื่นของคาร์บอนอีกได้แก่ ฟูลเลอร์รีน แกรฟีน และท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังภาพประกอบที่ 8.10



ภาพประกอบที่ 8.10 อีกรูปอื่น ๆ ของคาร์บอน

ที่มา : ดัดแปลงจาก Flowers, P. et al. (2017 : 560)

แกรฟีน (Graphene) เกิดจากอะตอมของคาร์บอนมาต่อกันเป็นรูปหกเหลี่ยม เช่นเดียวกับแกรไฟต์ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.10 (ก) ซึ่งหากนำแกรไฟต์มาแค่เพียงชั้นเดียวนั้นคือแกรฟีน นั่นเอง เนื่องจากแกรฟีนมีความหนาของคาร์บอนอะตอมเพียงชั้นเดียว ซึ่งทำให้แกรฟีนเป็นวัสดุสองมิติ (ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ, 2560 : 66)

ฟูลเลอร์ีน (Fullerene) ประกอบด้วยคาร์บอน 40 อะตอมขึ้นไป แต่รู้จักกันดีในชื่อ หรือ บัคมินสเตอร์ฟูลเลอร์ีน (Buckminsterfullerene) ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 60 อะตอม (C_{60}) มีรูปหลายเหลี่ยมลักษณะคล้ายรูปฟุตบอล แสดงดังภาพประกอบที่ 8.10 (ข) บางครั้งจึงมีการเรียกอีกชื่อว่า บัคกี้บอล (Bucky ball) ประกอบด้วยรูปหกเหลี่ยม 20 รูปและรูปห้าเหลี่ยม 12 รูป โดยการสร้างพันธะของคาร์บอนอะตอมในฟูลเลอร์ีนมีลักษณะคล้ายกับแกรไฟต์ จึงทำให้ฟูลเลอร์ีนมีการนำไฟฟ้าได้เหมาะสมกับงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ (รานี สุวรรณพฤษ, 2559 : 501)

เมื่อนำแผ่นแกรฟีนมาม้วนเป็นท่อจะได้ท่อขนาดนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes) ซึ่งอาจเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบชั้นเดียว (Single wall nanotubes) หรือแบบหลายชั้น (Multiwalls nanotubes) (อภิชาติ ตำนานวิทย์กุล, 2553 : 13 และ Tangtubtim, S. and Saikrasun, S., 2017 : 236) แสดงดังภาพประกอบที่ 8.10 (ค)

สรุปสมบัติที่สำคัญของผลึกทั้ง 4 ประเภท แสดงดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 สมบัติที่สำคัญของผลึก

ประเภท สมบัติ	ผลึกโลหะ	ผลึกไอออนิก	ผลึกโมเลกุล	ผลึกโคเวเลนต์
อนุภาคที่จุด แลตทิซ	ไอออนบวก	ไอออนบวกและ ไอออนลบ	โมเลกุล	อะตอม
แรงยึดเหนี่ยวใน ผลึก	พันธะโลหะ	แรงดึงดูดระหว่าง ประจุบวกและ ประจุลบหรือ พันธะไอออน	แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุล แรง ลอนดอน แรง ระหว่างขั้ว พันธะไฮโดรเจน	พันธะโคเวเลนต์
ความแข็งของ ผลึก	อ่อนและแข็ง	แข็งและเปราะ	อ่อน	แข็งมาก

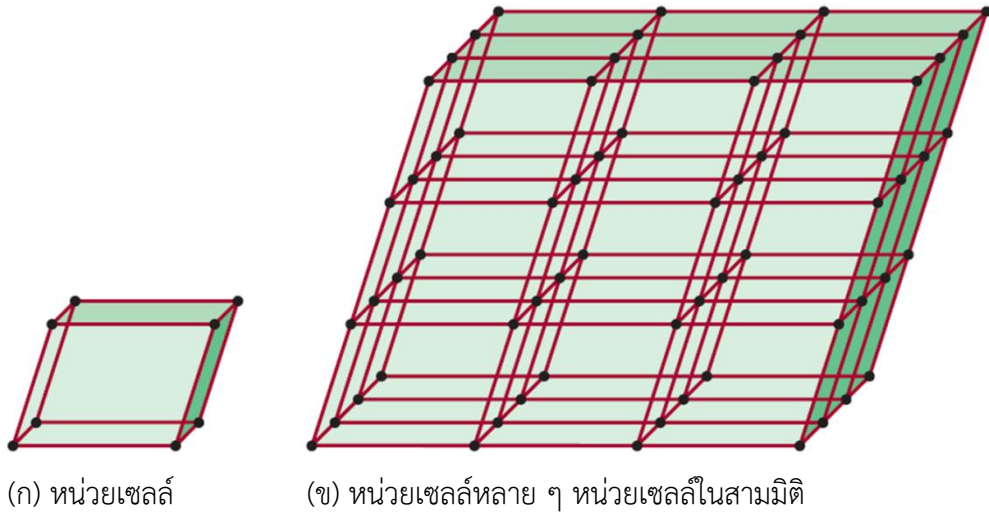
ตารางที่ 8.1 (ต่อ)

ประเภท สมบัติ	ผลึกโลหะ	ผลึกไอออนิก	ผลึกโมเลกุล	ผลึกโควาเลนต์
การนำไฟฟ้า	นำไฟฟ้าได้ดี	ไม่นำไฟฟ้า (นำไฟฟ้าได้เมื่อ หลอมเหลว)	ไม่นำไฟฟ้า	ไม่นำไฟฟ้า
จุดเดือด	สูง	สูง	ต่ำ	สูง
ตัวอย่าง	Fe Cu Ag	NaCl CaSO ₄	น้ำแข็ง (H ₂ O) น้ำแข็งแห้ง (CO ₂) I ₂ P ₄ S ₈	เพชร (C) SiO ₂ SiC

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก ธานี สุวรรณพฤกษ์ (2559 : 503)

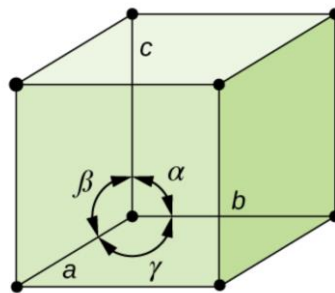
โครงผลึก ระบบผลึก และแลตทิซบราวเว (Crystal lattice, crystal system and Bravais lattice)

โครงผลึก (Crystal lattice) เกิดจากอนุภาคของของแข็งเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ มีรูปร่างทางเรขาคณิต มีด้านและมุมที่แน่นอนในรูปแบบสามมิติ ในการพิจารณาโครงผลึกจะมีอนุภาคในผลึกที่จุดต่าง ๆ เรียกว่า จุดแลตทิซ (Lattice point) ซึ่งมีการเชื่อมโยงไปยังจุดอื่น ๆ กันไปในรูปแบบสามมิติไปเรื่อย ๆ โดยหน่วยที่เล็กที่สุดของผลึกที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างสมบูรณ์เรียกว่า หน่วยเซลล์ (Unit cell) (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 163) แสดงดังภาพประกอบที่ 8.11 (ก) โดยจุดสีดำแทนจุดแลตทิซของอนุภาค และรูปที่ 8.11 (ข) แสดงหน่วยเซลล์หลาย ๆ หน่วยเซลล์เกิดการเชื่อมกันในรูปแบบสามมิติ



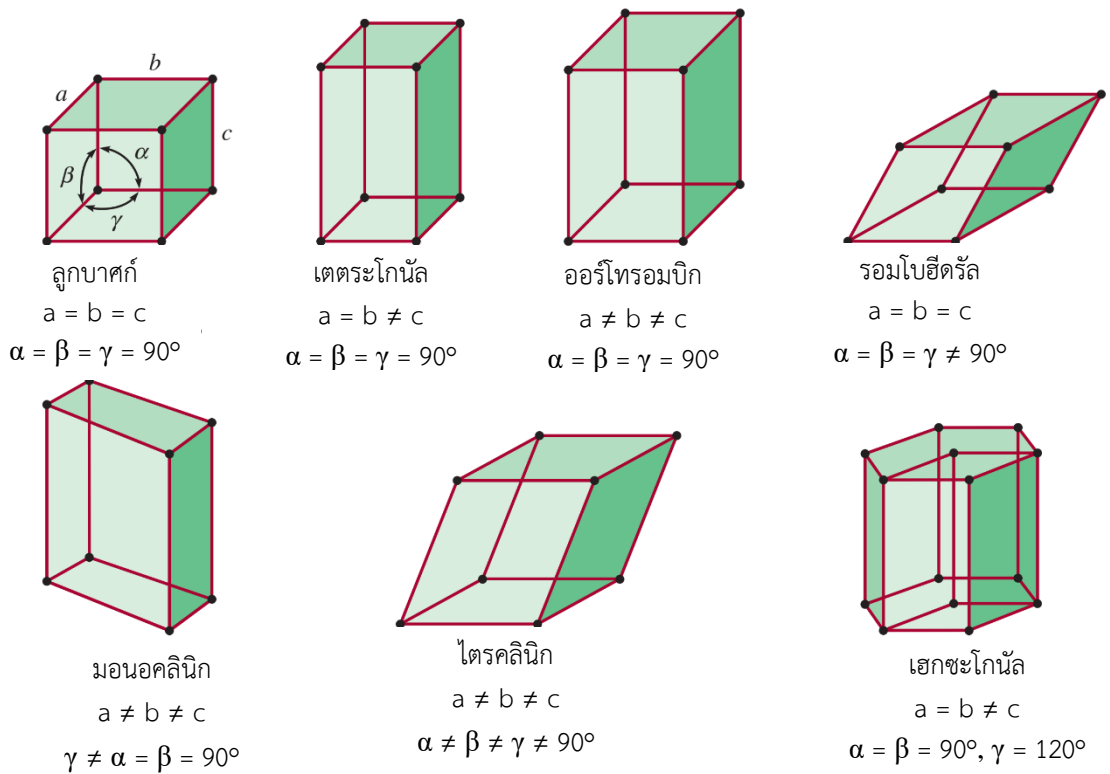
ภาพประกอบที่ 8.11 โครงผลึกของหน่วยเซลล์และหน่วยเซลล์หลาย ๆ หน่วยเซลล์ในสามมิติ
ที่มา : Chang, R. (2010 : 474)

เมื่อผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบต่อเนื่องจะเกิดรูปทรงทางเรขาคณิตในรูปแบบสามมิติ จึงทำให้เกิดแกนคริสตัลโลกราฟี (Crystallographic axes) และเกิดมุมระหว่างแกน แสดงดังภาพประกอบที่ 8.12



ภาพประกอบที่ 8.12 แกนคริสตัลโลกราฟีและแลตทิซพารามิเตอร์ในหน่วยเซลล์
ที่มา : Flowers, P. et al. (2017 : 569)

ด้วยความยาวของแกนและมุมของแกนที่แตกต่างกันไป ทำให้โครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจึงมีรูปทรงเรขาคณิตที่แตกต่างกันออกไปซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 7 ระบบ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.13 และตารางที่ 8.2



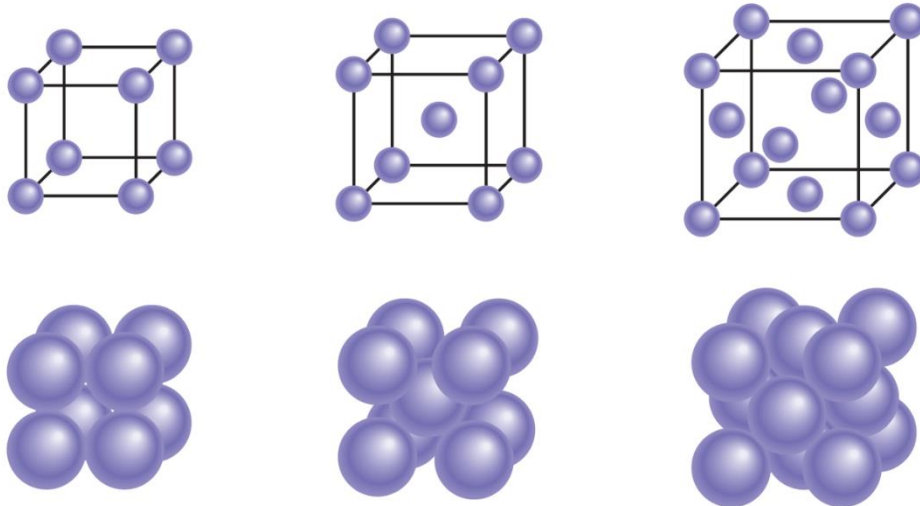
ภาพประกอบที่ 8.13 ระบบผลึกรูปทรงเรขาคณิต 7 ระบบ
 ที่มา : ดัดแปลงจาก Chang, R. (2010 : 474)

ตารางที่ 8.2 ระบบผลึก 7 ระบบ

ระบบผลึก	ความยาวแกน	มุมระหว่างแกน	ตัวอย่างผลึก
ลูกบาศก์ (Cubic)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	NaCl Cu
เตตระโกนัล (Tetragonal)	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	TiO ₂
ออร์โธโรมบิก (Orthorhombic)	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	BaSO ₄
มอนอคลินิก (Monoclinic)	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ$ และ $\beta \neq 90^\circ$	PbCrO ₄
รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	HgS
เฮกซะโกนัล (Hexagonal)	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ$ และ $\gamma \neq 120^\circ$	ZnO
ไตรคลินิก (Triclinic)	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	K ₂ Cr ₂ O ₇

ที่มา : ดัดแปลงมาจาก Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007 : 449)

สำหรับระบบผลึกทั้ง 7 แบบนั้นเป็นการพิจารณาโครงสร้างภายนอก แต่อาจมีตำแหน่งอื่น ๆ ที่แตกต่างกันภายในโครงผลึกไม่ได้มีเพียงอนุภาคที่มุมเท่านั้น อาจจะมีอนุภาคอยู่ที่หน้าตัดหรือมีอนุภาคอยู่ที่จุดศูนย์กลางของหน่วยเซลล์ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.14 แสดงโครงผลึกในระบบลูกบาศก์ (Cubic system) แตกต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ ลูกบาศก์อย่างง่าย (Simple cubic) จะมีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปดของลูกบาศก์ ลูกบาศก์กลางตัว (Body-centered cubic) จะมีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปดและมีอีกหนึ่งอนุภาคอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลูกบาศก์และลูกบาศก์กลางหน้า (Face-centered cubic) จะมีอนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปดและมีอนุภาคอยู่ตรงกลางของแต่ละหน้าลูกบาศก์ทั้งหมดด้านนอกจาก 3 ระบบนี้แล้วยังมีระบบผลึกบางระบบมีอนุภาคอยู่มุมทั้งแปดและมีอนุภาคอยู่ตรงกลางของหน้าลูกบาศก์ในด้านที่ตรงกันข้ามกัน เรียกว่า ลูกบาศก์กลางปลาย (End-centered cubic) (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 166)



(ก) ลูกบาศก์อย่างง่าย

(ข) ลูกบาศก์กลางตัว

(ค) ลูกบาศก์กลางหน้า

ภาพประกอบที่ 8.14 โครงสร้างผลึกในระบบลูกบาศก์

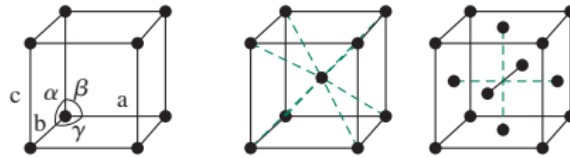
ที่มา : ดัดแปลงจาก Chang, R. (2010 : 475)

ต่อมา ออกัส บราวเว (August Bravais) ได้แบ่งระบบผลึกออกเป็น 14 แบบ ตามการศึกษาโครงผลึกที่มีลูกบาศก์ที่แตกต่างกันไปตามอนุภาคที่มีรายละเอียดมากขึ้น เรียกว่า ระบบแลตทิซบราวเว แสดงดังภาพประกอบที่ 8.15 และตารางที่ 8.3

ลูกบาศก์

$a = b = c$

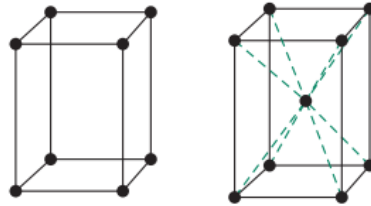
$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



เตตระโกนัล

$a = b \neq c$

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

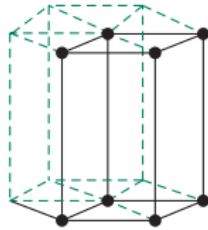


เฮกซะโกนัล

$a = b \neq c$

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

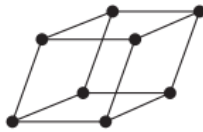
$\gamma = 120^\circ$



รอมโบฮีดรัล (ไตรโกนัล)

$a = b = c$

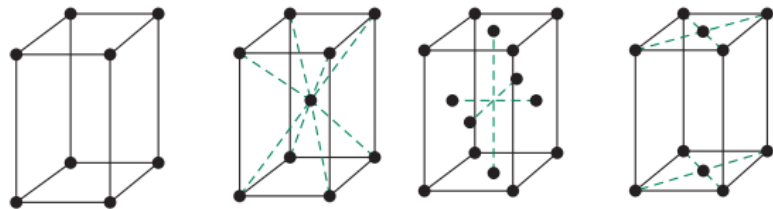
$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$



ออร์โทโรมบิก

$a \neq b \neq c$

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



มอนอคลินิก

$a \neq b \neq c$

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

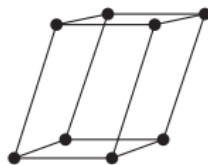
$\beta \neq 90^\circ$



ไตรคลินิก

$a \neq b \neq c$

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



ภาพประกอบที่ 8.15 แลตทิซบราวเวในระบบผลึก 7 ระบบ ทั้ง 14 แบบ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Miessle, G.L. et al. (2014 : 216)

ตารางที่ 8.3 แลตทิซผลึกแบบต่าง ๆ ของบราวเว

ระบบผลึก	จำนวนแบบแลตทิซ	ชื่อแบบแลตทิซ
ลูกบาศก์ (Cubic)	3	อย่างง่าย (Simple) กลางหน้า (Face-centered) กลางตัว (Body-centered)
เตตระโกนัล (Tetragonal)	2	อย่างง่าย (Simple) กลางตัว (Body-centered)
ออร์โธรมบิก (Orthorhombic)	4	อย่างง่าย (Simple) กลางหน้า (Face-centered) กลางตัว (Body-centered) กลางหน้าปลาย (Base-centered)
มอนอคลินิก (Monoclinic)	2	อย่างง่าย (Simple) กลางหน้าปลาย (Base-centered)
รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral)	1	อย่างง่าย (Simple)
เฮกซะโกนัล (Hexagonal)	1	อย่างง่าย (Simple)
ไตรคลินิก (Triclinic)	1	อย่างง่าย (Simple)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Miessle, G.L. et al. (2014 : 216)

การจัดเรียงอนุภาคในผลึกของแข็ง (Arrangement of particles in solid crystals)

หน่วยเซลล์เกิดจากการเรียงตัวของอนุภาคของแข็งมาล้อมรอบด้วยจำนวนอนุภาคที่แตกต่างกัน ซึ่งอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวให้ที่ชิดที่สุด แต่ยังมีช่องว่างที่เกิดขึ้น ดังมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

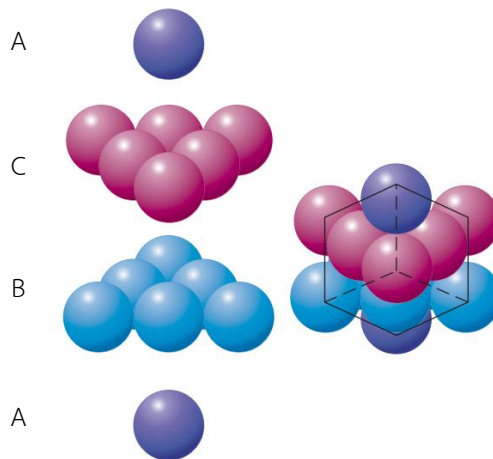
1. เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number)

การจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งเป็นหน่วยเซลล์จะมีอนุภาคมาล้อมรอบด้วยจำนวนอนุภาคที่แตกต่างกันไป โดยเรียกจำนวนอนุภาคที่มาล้อมรอบว่า เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number, CN) โดยอนุภาคในโครงผลึกที่มีเลขโคออร์ดิเนชันสูงจะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวได้หนาแน่น

มาก ในทางตรงข้ามถ้าโครงผลึกใดมีเลขโคออร์ดิเนชันน้อยจะทำให้เกิดการเรียงตัวที่มีความหนาแน่นน้อยเช่นกัน

2. การบรรจุชิดที่สุดของอนุภาคในผลึกของแข็ง (Closest packing of solid crystal particles)

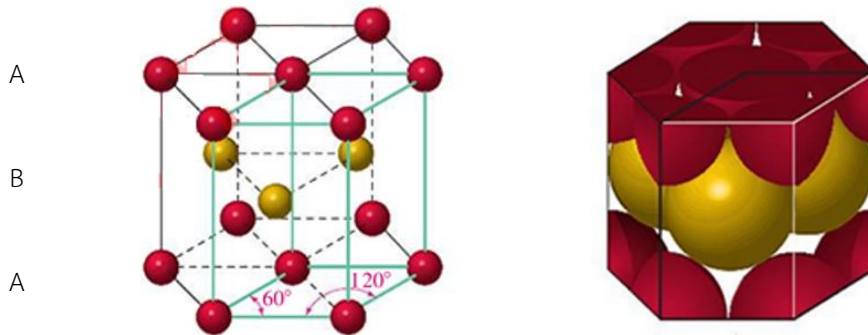
การที่อนุภาคมีการจัดเรียงตัวให้เกิดช่องว่างน้อยที่สุดและจัดเรียงตัวให้ชิดที่สุดเรียกว่า การบรรจุแบบชิด (Closed packing) โดยการบรรจุแบบชิดที่สุดชั้นแรก เรียกว่าชั้น A จะล้อมรอบด้วยลูกปิงปอง 3 ลูก เมื่อวางทรงกลมลงบนชั้นที่ 2 เรียกว่าชั้น B ปิดลงบนช่องว่างชั้นแรก ส่วนการวางทรงกลมจากชั้นที่ 3 ลงบนชั้นที่ 2 นั้น ทำได้ 2 แบบ ซึ่งแบ่งการบรรจุออกเป็นกรบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (Cubic closed packing, ccp) และแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal closed packing, hcp) โดยแบบลูกบาศก์เป็นการวางอนุภาคแบบ ABCABC..... คือ ทรงกลมในชั้นที่ 3 เรียกว่า ชั้น C วางลงบนตำแหน่งที่ไม่ตรงกับชั้นที่ 1 และ 2 โดยทรงกลมในชั้นที่ 1 จะมีตำแหน่งในแนวตั้งตรงกับชั้นที่ 4 พอดี วางซ้ำกันในลักษณะนี้เกิดการเรียงแบบ ABCABC..... แสดงดังภาพประกอบที่ 8.16 (ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ, 2560 : 236-237 และวิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2558 : 2)



ภาพประกอบที่ 8.16 การบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (Cubic closed packing, ccp)

ที่มา : Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007 : 454)

ในขณะที่การบรรจุแบบชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนอลเป็นการวางทรงกลมในชั้นที่ 3 ให้ตรงกับชั้นที่ 1 และชั้นที่ 4 วางตรงกับชั้นที่ 2 วางซ้ำกันในลักษณะนี้เกิดการเรียงแบบ ABABAB..... แสดงดังภาพประกอบที่ 8.17 (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2558 : 2)



ภาพประกอบที่ 8.17 การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal closed packing, hcp)

ที่มา : Petrucci, R.H. et al. (2011 : 533)

3. จำนวนอนุภาคในหน่วยเซลล์ (Number of particles in unit cell)

เมื่อพิจารณารูปลูกบาศก์ในโครงผลึกแล้วจะพบว่าจะมีจุดแลตทิซอยู่ที่มุม กลางหน้าและจุดศูนย์กลางของลูกบาศก์ทำให้อนุภาคเหล่านี้อาจมีการใช้อนุภาคร่วมกันระหว่างหน่วยเซลล์ แสดงดังภาพประกอบที่ 8.18 ดังนี้ (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 171-172)

3.1 อนุภาคที่มุม (Corner) อนุภาคทรงกลมของหน่วยเซลล์จะใช้ร่วมกันที่มุมของหน่วยเซลล์เท่ากัน $1/8$ ของอนุภาค

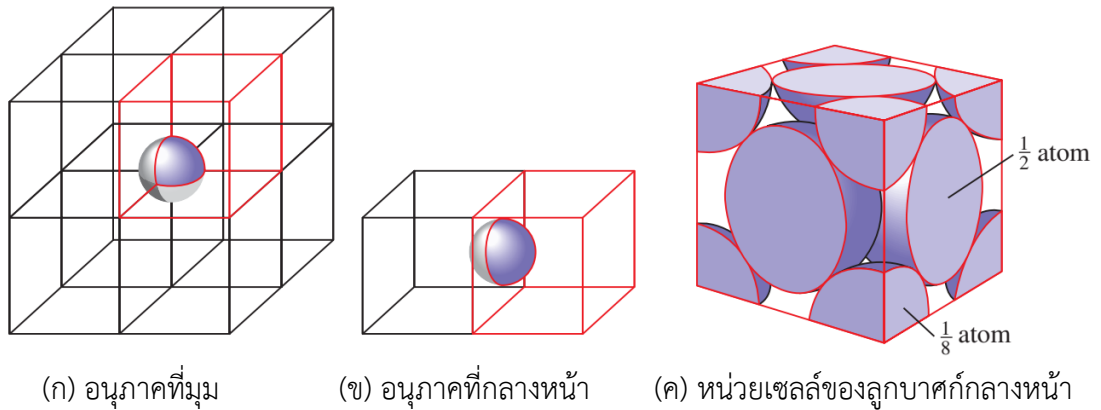
$$\begin{aligned} \text{จำนวนอนุภาคทั้งหมดในหนึ่งหน่วยเซลล์} &= (1/8) \times 8 \\ &= 1 \text{ อนุภาค} \end{aligned}$$

3.2 อนุภาคที่กลางหน้า (Face) อนุภาคทรงกลมของหน่วยเซลล์จะใช้ร่วมกันของหน่วยเซลล์เท่ากัน $1/2$ ของอนุภาค

$$\begin{aligned} \text{จำนวนอนุภาคทั้งหมดในหนึ่งหน่วยเซลล์} &= (\text{จำนวนอนุภาคที่มุมทั้ง } 8) + \\ &\quad (\text{จำนวนอนุภาคกึ่งกลางหน้าทั้ง } 6 \text{ หน้า}) \\ &= [(1/8) \times 8] + [(1/2) \times 6] \\ &= 4 \text{ อนุภาค} \end{aligned}$$

3.3 อนุภาคที่ภายใน (Body) อนุภาคทรงกลมของหน่วยเซลล์ไม่มีการใช้ร่วมกัน

$$\begin{aligned} \text{จำนวนอนุภาคทั้งหมดในหนึ่งหน่วยเซลล์} &= (\text{จำนวนอนุภาคที่มุมทั้ง } 8) + \\ &\quad (\text{จำนวนอนุภาคภายในลูกบาศก์}) \\ &= [(1/8) \times 8] + 1 \\ &= 2 \text{ อนุภาค} \end{aligned}$$



ภาพประกอบที่ 8.18 อนุภาคที่ตำแหน่ง ๆ

ที่มา : ดัดแปลงจาก Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2007 : 439)

4. ชนิดของช่องว่าง (Types of holes)

การจัดเรียงตัวของอนุภาคของของแข็งที่มีการบรรจุแบบชิดจะมีช่องว่างเกิดขึ้น โดยอาจจะ มีไอออนขนาดเล็กเข้าไปแทรกอยู่ภายในช่องว่างที่เกิดขึ้น โดยช่องว่างแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ช่องว่างเตตระฮีดรัล (Tetrahedral hole) และช่องว่างออกตะฮีดรัล (Octahedral hole)

4.1 ช่องว่างเตตระฮีดรัล (Tetrahedral hole)

ช่องว่างเตตระฮีดรัลเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นจากอนุภาคจำนวน 4 อนุภาค โดยเป็น ช่องว่างที่เกิดจาก 3 อนุภาคจัดเรียงตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมชิดกัน และมีอีก 1 อนุภาควางลงไปซ้อนทับ ช่องว่างที่เกิดจาก 3 อนุภาค เมื่อเรลากเส้นจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคทั้ง 4 อนุภาค มาเชื่อมต่อกัน จะได้เป็นรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 176) แสดงดัง ภาพประกอบที่ 8.19

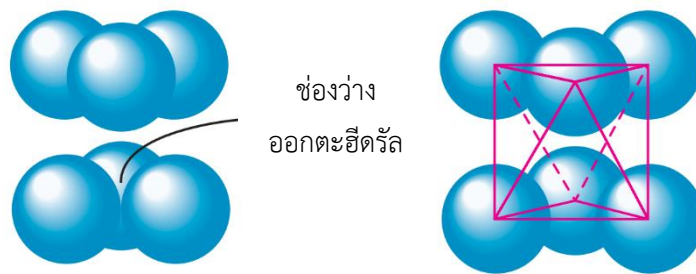


ภาพประกอบที่ 8.19 ช่องว่างเตตระฮีดรัล (Tetrahedral)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2007 : 456)

4.2 ช่องว่างออกตะฮีดรัล (Octahedral hole)

ช่องว่างเตตระฮีดรัลเป็นช่องว่างที่เกิดขึ้นจากอนุภาคจำนวน 6 อนุภาค โดยเป็นช่องว่างที่เกิดจาก 3 อนุภาคจัดเรียงตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมชิดกัน แล้วนำอนุภาคอีก 3 อนุภาคที่จัดเป็นรูปสามเหลี่ยมชิดกันอีกรูปวางซ้อนทับในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อเรลากเส้นจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคทั้ง 6 อนุภาค มาเชื่อมต่อกันจะได้เป็นรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) (พินิติ รัตนานุกูล และคณะ, 2549 : 175) แสดงดังภาพประกอบที่ 8.20



ภาพประกอบที่ 8.20 ช่องว่างออกตะฮีดรัล (Octahedral)

ที่มา : ดัดแปลงจาก Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2007 : 456)

โครงสร้างผลึกสามัญบางชนิด (Structures of some crystalline solids)

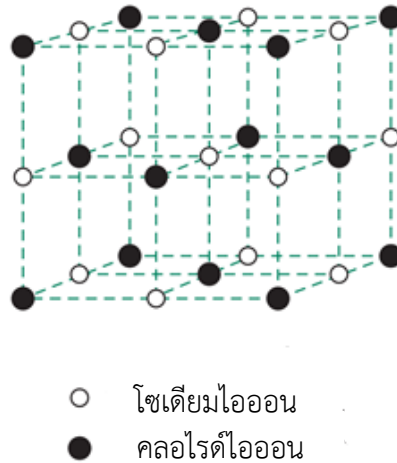
โครงสร้างผลึกของสารประกอบไอออนทั้งหมด 4 แบบ เรียกว่า โครงสร้างผลึกสามัญของแข็งไอออน คือ

1. โครงสร้างโซเดียมคลอไรด์ (Rock salt structure), NaCl
2. โครงสร้างซีเซียมคลอไรด์ (Cesium chloride structure), CsCl
3. โครงสร้างฟลูออไรด์ (Fluorite structure), CaF₂
4. โครงสร้างซิงก์เบลนด์ (Zinc-blends structure) และโครงสร้างเวิร์ตไซต์ (Wurtzite structure), ZnS

1. โครงสร้างโซเดียมคลอไรด์ (Rock salt structure), NaCl

โครงสร้างโซเดียมคลอไรด์ โดยทั่วไปเรียกว่า Rock salt structure ประกอบด้วยโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออน ซึ่งทั้งโซเดียมไอออนและคลอไรด์ไอออนมีโครงสร้างการบรรจุแบบชิดที่สุุดรูปลูกบาศก์ (ccp) โดยโซเดียมไอออนขนาดเล็กจะเข้าไปอยู่ในช่องออกตะฮีดรัลที่เกิดจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งโซเดียมไอออนล้อมรอบด้วยคลอไรด์ไอออน 6 ไอออน และคลอไรด์ไอออนล้อมรอบด้วยโซเดียมไอออน 6 ไอออนเช่นเดียวกัน จึงมีอัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 6 : 6 แสดงดังภาพประกอบที่ 8.21 สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้ได้แก่ สารประกอบเฮไลด์ของโลหะ

หมู่ IA เช่น KCl KBr LiI และสารประกอบออกไซด์และซัลไฟด์ของโลหะหมู่ IIA เช่น CaO CaS เป็นต้น (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2541 : 204)

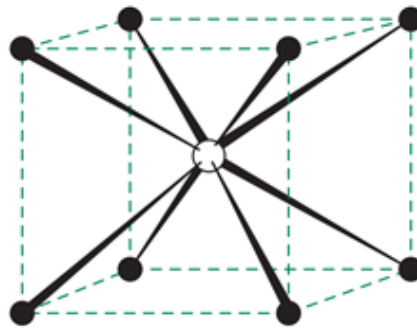


ภาพประกอบที่ 8.21 โครงสร้างโซเดียมคลอไรด์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Miessle, G.L. et al. (2014 : 222)

2. โครงสร้างซีเซียมคลอไรด์ (Cesium chloride structure), CsCl

โครงสร้างซีเซียมคลอไรด์ ประกอบด้วยซีเซียมไอออนและคลอไรด์ไอออน แต่ขนาดของไอออนบวกและไอออนลบมีขนาดใกล้เคียงกันจึงเป็นโครงสร้างที่บรรจุชิดที่สุดไม่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 8.22 ซึ่งมีโครงสร้างลูกบาศก์ธรรมดา (sc) ไอออนแต่ละชนิดซ้อนหากัน และหน่วยเซลล์เป็นแบบลูกบาศก์กลางตัว โดยซีเซียมไอออนล้อมรอบด้วยคลอไรด์ไอออน 8 ไอออน และคลอไรด์ไอออนล้อมรอบด้วยซีเซียมไอออน 8 ไอออนเช่นเดียวกัน จึงมีอัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 8 : 8 สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้ ได้แก่ CsBr CsI NH_4Cl NH_4Br เป็นต้น (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2541 : 204)



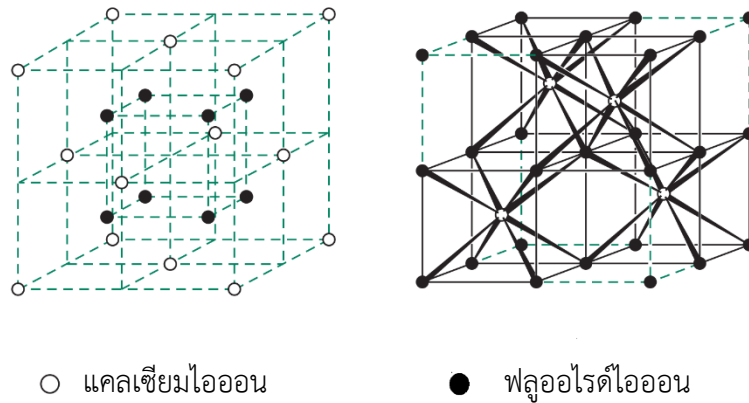
- ซีเซียมไอออน
● คลอไรด์ไอออน

ภาพประกอบที่ 8.22 โครงสร้างของซีเซียมคลอไรด์

ที่มา : ดัดแปลงจาก Miessle, G.L. et al. (2014 : 222)

3. โครงสร้างฟลูออไรต์ (Fluorite structure), CaF_2

โครงสร้างฟลูออไรต์ ประกอบด้วยแคลเซียมไอออนและฟลูออไรด์ไอออน ซึ่งแคลเซียมไอออนมีโครงสร้างการบรรจุแบบชิดที่สุดรูปลูกบาศก์ (ccp) โดยมีฟลูออไรด์ไอออนเข้าไปอยู่ในช่องเตตระฮีดรัล ซึ่งแคลเซียมไอออนล้อมรอบด้วยฟลูออไรด์ไอออน 8 ไอออน และฟลูออไรด์ไอออนล้อมรอบด้วยแคลเซียมไอออน 4 ไอออน จึงมีอัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 8 : 4 แสดงดังภาพประกอบที่ 8.23 สารประกอบที่มีโครงสร้างแบบนี้เช่น BaF_2 BaCl_2 SrCl_2 CdF_2 ZrO_2 เป็นต้น (ทบทวนมหาวิทยาลัย, 2541 : 205)



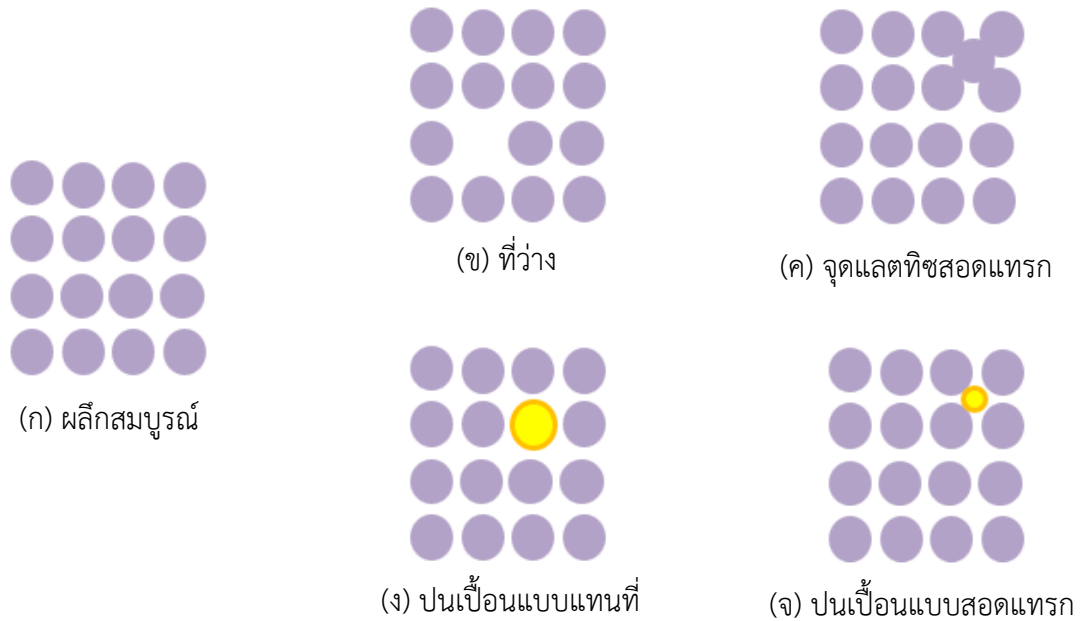
ภาพประกอบที่ 8.23 โครงสร้างของแคลเซียมฟลูออไรด์
ที่มา : ดัดแปลงจาก Miessle, G.L. et al. (2014 : 223)

4. โครงสร้างซิงก์เบลนด์และโครงสร้างเวิร์ตไซต์ (Zinc-blends structure and Wurtzite structure, ZnS)

โครงสร้างซิงก์เบลนด์ ประกอบด้วยสังกะสีไอออนและซัลไฟด์ไอออน ซึ่งซัลไฟด์ไอออนมีโครงสร้างการบรรจุแบบชิดที่สุดรูปลูกบาศก์ (ccp) โดยมีไอออนของสังกะสีเข้าไปอยู่ในช่องเตตระฮีดรัลเพียงครึ่งหนึ่งหรือช่องเว้นช่อง ซึ่งสังกะสีไอออนล้อมรอบด้วยซัลไฟด์ไอออน 4 ไอออน และซัลไฟด์ไอออนล้อมรอบด้วยสังกะสีไอออน 4 ไอออน จึงมีอัตราส่วนของเลขโคออร์ดิเนชันเป็น 4 : 4 ทั้งไอออนของสังกะสีและของซัลไฟด์ล้อมรอบแบบทรงสี่หน้า แสดงดังภาพประกอบที่ 8.24 (ก) (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541 : 205)

3. ปนเปื้อนแบบแทนที่ (Substitutional impurity) คือ อนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าไปอยู่ในช่องว่างแทน แต่อนุภาคนั้นไม่ใช่อนุภาคที่จุดแลตทิซที่เกิดจากการประกอบกันเป็นผลึก

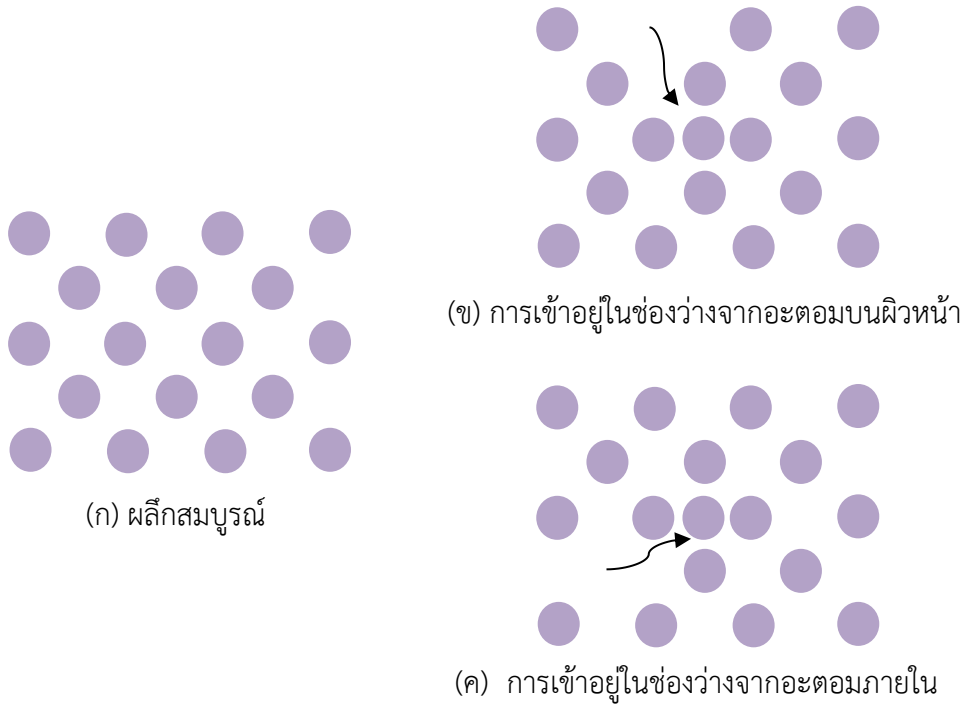
4. ปนเปื้อนแบบสอดแทรก (Interstitial impurity) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าเข้าไปอยู่ในช่องว่างแทน แต่อนุภาคนั้นไม่ใช่อนุภาคที่จุดแลตทิซที่เกิดจากการประกอบกันเป็นผลึก



ภาพประกอบที่ 8.25 ตำแหน่งของจุดของแลตทิซผลึก

ที่มา : ดัดแปลงจาก ธานี สุวรรณพฤษ (2559 : 504)

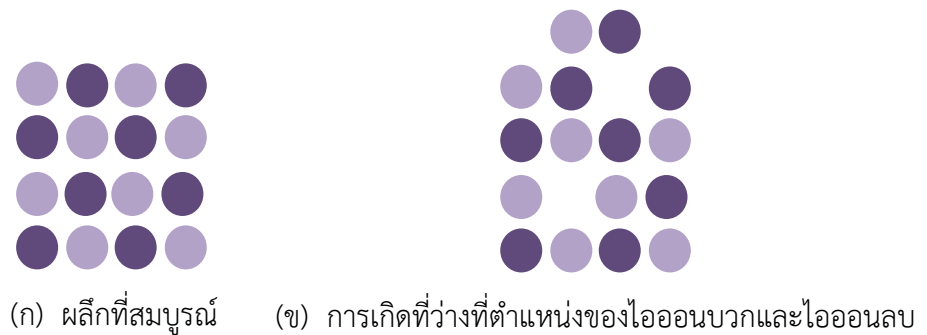
นอกจากนี้ยังมีตำแหน่งจุดอีก 2 แบบคือ ตำแหน่งเฟรนเกิล (Frenkel defect) และตำแหน่งชอตตี (Schottky defect) โดยแบบแรกตำแหน่งเฟรนเกิลเกิดจากไอออนเลื่อนไปอยู่ในช่องว่าง โดยเลื่อนจากผิวหน้าหรือเลื่อนจากภายในมายังช่องว่างของผลึก (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541 : 214) ลักษณะการเกิดแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 8.26



ภาพประกอบที่ 8.26 ตำหนิแบบเฟรนเกล

ที่มา : ดัดแปลงจาก ธานี สุวรรณพฤกษ์ (2559 : 504)

ส่วนตำหนิแบบชอตที้ (Schottky defect) เกิดจากการเคลื่อนตำแหน่งของไอออนบวกและไอออนลบจึงเกิดช่องว่างขึ้น การเกิดเช่นนี้จะรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากเกิดช่องว่างเป็นคู่ (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541 : 214) แสดงดังภาพประกอบที่ 8.27



ภาพประกอบที่ 8.27 ตำหนิแบบชอตที้

ที่มา : ดัดแปลงจาก ธานี สุวรรณพฤกษ์ (2559 : 505)

สรุปท้ายบท

ของแข็งมีรูปร่างและปริมาตรที่แน่นอน มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคสูงมาก จัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเกิดรูปทรงทางเรขาคณิตเรียกของแข็งประเภทนี้ว่า ผลึก หากอนุภาคจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบเรียกของแข็งประเภทนี้ว่า ออสัญฐาน นอกจากนี้ของแข็งสามารถจำแนกตามการจัดเรียงอนุภาคแล้วยังสามารถจำแนกตามชนิดของแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคได้ เป็นผลึกโลหะยึดด้วยพันธะโลหะ ผลึกไอออนิกยึดด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและลบ ผลึกโมเลกุลยึดด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล และผลึกโควาเลนต์ยึดด้วยพันธะโควาเลนต์ต่อ ๆ กันเป็นร่างแห

เมื่อผลึกมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบทำให้ความยาวและมุมของแกนแตกต่างกันออกไปสามารถแบ่งได้ 7 ระบบ ได้แก่ ลูกบาศก์ เตตระโกนัล ออร์โธโรมบิก มอนอคลินิก รอมโบฮีดรัล เฮกซะโกนัล และไตรคลินิก สำหรับระบบแลตทิซบราวเว จะพบว่าเมื่ออนุภาคอยู่ที่มุมทั้งแปด อนุภาคอยู่ตรงกลางของแต่ละหน้า และอนุภาคกลางตัวของหน่วยเซลล์ แบ่งได้ทั้งหมดเป็น 14 แบบ เมื่ออนุภาคของของแข็งมารวมตัวกัน จึงทำให้มีช่องว่างเกิดขึ้นระหว่างการบรรจุชิดที่สุด แบ่งช่องว่างออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ช่องว่างเตตระฮีดรัล และช่องว่างออกตะฮีดรัล แต่การจัดเรียงตัวของอนุภาคของของแข็งไม่ได้เกิดผลึกที่สมบูรณ์เสมอไป ยังคงมีผลึกส่วนที่ไม่สมบูรณ์ด้วย จึงทำให้มีตำหนิเกิดขึ้นทั้งแบบจุดและแบบเส้น

คำถามท้ายบทที่ 8

1. ในการจำแนกชนิดของของแข็งตามการจัดเรียงอนุภาคแบ่งเป็นกี่ประเภท อะไรบ้าง
2. จงจำแนกชนิดของผลึกตามพันธะที่เกิดขึ้น
Co AgCl S₈ CaF₂ SiO₂
3. จงยกตัวอย่างผลึกโคเวเลนต์ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นแรงลอนดอน และพันธะไฮโดรเจน ตามลำดับ
4. เพราะเหตุใดเพชรจึงไม่นำไฟฟ้าได้เหมือนแกรไฟต์
5. จงบอกชื่อของระบบผลึกให้ตรงกับความยาวและมุมระหว่างแกนที่กำหนดให้
 - 1) $a \neq b \neq c$ และ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
 - 2) $a = b = c$ และ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
6. จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - 1) ระบบผลึกมีทั้งหมดกี่ระบบ
 - 2) ระบบผลึกใดบ้างที่มีจุดแลตทิซ (อะตอม) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ครบ 4 แบบ
 - 3) ระบบผลึกใดที่มีแลตทิซบราวน์เป็นลูกบาศก์กลางหน้า (face-centered) มีระบบใดบ้าง
 - 4) ระบบผลึกใดบ้างที่มีจุดแลตทิซ (อะตอม) ที่มุมเพียงอย่างเดียว
7. การจัดเรียงอนุภาคในผลึกแบบบรรจุแบบชิด (close packed) โดยมีการบรรจุอนุภาคในชั้นต่าง ๆ เป็น ABCABCABC..... จงตอบคำถามต่อไปนี้
 - 1) จงเขียนชื่อเรียกการบรรจุชนิดนี้
 - 2) วาดรูปการบรรจุชนิดนี้
8. ช่องว่างภายในผลึกที่อนุภาคมีการบรรจุแบบชิดที่สุดมีกี่ชนิด ช่องว่างใดบ้าง
9. จงบอกเลขโคออร์ดิเนชันของโครงสร้างต่อไปนี้
 - 1) rock salt structure
 - 2) cesium chloride structure
 - 3) fluorite structure
 - 4) zinc sulphide structure
10. ตำหนิแบบใดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ตำแหน่งของไอออนบวกและไอออนลบเกิดช่องว่างเป็นคู่

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณา ชูติมา. (2556). **หลักเคมีทั่วไป 1**. (พิมพ์ครั้งที่ 19). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทบวงมหาวิทยาลัย. (2541). **เคมี 1**. (พิมพ์ครั้งที่ 11). กรุงเทพมหานคร : อักษรเจริญทัศน์.
- ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ. (2560). **เคมี 1 12/e**. กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล.
- ประภาณี เกษมศรี ณ อยุธยา และคณะ. (2555). **เคมีทั่วไปเล่ม 1**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พินิติ รตะนานุกูล และคณะ. (2549). **เคมี 2**. กรุงเทพมหานคร : มูลนิธิ สอวน.
- รัชนีกร วันจันทร์ทิพย์. (2557). **พื้นฐานและการประยุกต์ของจลนพลศาสตร์เคมี**. มหาสารคาม : อภิชาติการพิมพ์.
- รานี สุวรรณพฤกษ์. (2559). **เคมีทั่วไป เล่ม 1**. (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพมหานคร : วิทยพัฒน์.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. (2558). **เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ. (2560). **แกรฟีน วัสดุ 2 มิติ เพื่ออนาคต**. MTEC. มกราคม-มีนาคม 2560.
- อภิชาติ ด่านวิทยากุล. (2553). **ท่อนาโนคาร์บอน: วัสดุในอนาคต**. MTEC. ตุลาคม-ธันวาคม 2553.
- Chang, R. (2010). **Chemistry**. (10th Edition). United State of America : McGraw-Hill Higher Education.
- Ebbing, D.D. and Gammon, S.D. (2007). **General Chemistry**. (9th Edition). United State of America : Houghton Mifflin Company.
- Flowers, P., et al. (2017). **Chemistry**. United State of America : OpenStax.
- Miessle, G.L., et al. (2014). **Inorganic Chemistry**. (5th Edition). United State of America : Pearson Education, Inc.
- Petrucci, R.H., et al. (2011). **General Chemistry : Principles and Modern Applications**. (10th Edition). United State of America : MacMillan Publishing Company.
- Tangtubtim, S. and Saikrasun, S. (2017). **Effect of functionalized CNTs and liquid crystalline polymer on thermo-oxidative stability of polyethylene-based hybrid composites**. J Therm Anal Calorim 128 : 235–247.

Zumdahl, S.S. and Zumdahl, S.A. (2007). **Chemistry**. (7th Edition). United State of America : Houghton Mifflin Company.