

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 1

หน่วยที่ 1 แก๊สและของแข็ง

บทเรียนที่ 1.1 แก๊ส

จำนวนชั่วโมง 3

จุดประสงค์การสอน (จุดประสงค์ทั่วไป)

1. เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของแก๊ส

ผลการเรียนรู้ (จุดประสงค์เฉพาะ)

1. บอกสมบัติของแก๊ส
2. คำนวณกฎของแก๊ส
3. คำนวณปริมาณสัมพันธ์ของแก๊ส
4. อธิบายทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สและพฤติกรรมของแก๊สจริง

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยาย และอภิปราย
2. กิจกรรมกลุ่มในชั้นเรียน (Work@class)

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. เอกสารคำสอน วิชาเคมี 2
2. เอกสาร powerpoint
3. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=11425
4. <https://www.facebook.com/chemographics>
5. <https://www.slideshare.net/woravith>

การวัดผล

1. ประเมินจากกิจกรรมในชั้นเรียน
2. ประเมินจากกิจกรรมแบบฝึกหัด หรืองานที่มอบหมาย
3. ประเมินจากการสรุปประเด็นสำคัญ หรือการนำเสนอผลของการสืบค้นที่ได้รับมอบหมาย
4. ประเมินจากการสอบย่อยรายหน่วยเรียน

หน่วยที่ 1 แก๊สและของแข็ง

บทเรียนที่ 1.1 แก๊ส

1.1.1 สมบัติแก๊ส

แก๊ส หรือ ก๊าซ (gas) เป็นสถานะของสสารสถานะหนึ่งที่มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคของแก๊สด้วยกันน้อยมาก ทำให้สมบัติทางกายภาพของแก๊สแตกต่างจากของแข็งและของเหลวหลายประการ เช่น

- แก๊สมีรูปร่างและปริมาตรไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับรูปร่างภาชนะที่บรรจุ สมบัตินี้เหมือนกับของเหลว

- อนุภาคของแก๊สเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาอย่างไร้ระเบียบและไม่มีทิศทางที่แน่นอน
- สามารถบีบอัดให้มีปริมาตรลดลง
- มีอัตราการแพร่เร็ว
- แก๊สผสมกันได้ทุกอัตราส่วนเป็นเนื้อเดียว
- มีความหนาแน่นต่ำมาก
- ความดันและอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อปริมาตรของแก๊ส
- แก๊สโดยทั่วไปมีลักษณะโปร่งใส มองทะลุผ่านได้ แต่บางชนิดอาจมีสมบัติเฉพาะตัว

การศึกษาทดลองเกี่ยวกับสมบัติของแก๊สเริ่มตั้งแต่ เฮลมอนท์ (Jan Baptista van Helmont, ค.ศ.1580-1644) นักฟิสิกส์ชาวเบลเยียม ซึ่งได้เริ่มพิจารณาว่าสสารอากาศจริง ๆ แล้วประกอบด้วยสารหลาย ๆ ชนิดที่เรียกรวม ๆ ว่า “แก๊ส” มาจากคำว่า “chaos” ต่อมาได้มีการทดลองศึกษาแก๊สที่เกิดจากการเผาไม้วิลโลว์ (willow tree) ซึ่งจะเกิดแก๊สชนิดหนึ่งที่ไม่ใช่อากาศแต่มีสมบัติหลาย ๆ ประการที่คล้ายอากาศ ในขณะนั้นยังไม่ทราบว่าเป็นแก๊สชนิดใด ตอนหลังทราบคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในการศึกษาสมบัติของแก๊ส เราแบ่งแก๊สออกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) แก๊สอุดมคติ (ideal gas) หรือ แก๊สสมบูรณ์ (perfect gas) เป็นแก๊สที่เราสมมติขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมบางอย่างของแก๊สตามกฎของแก๊ส ดังนั้น แก๊สอุดมคติจึงไม่มีอยู่จริงในธรรมชาติ โดยแก๊สอุดมคติจะถือว่าไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (ถือว่าเป็นเพียงจุดที่อยู่ในภาชนะที่บรรจุแก๊สเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมากจนถือว่าไม่มีปริมาตร)

- 2) แก๊สจริง (real gas) เป็นแก๊สที่มีอยู่จริงในธรรมชาติ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล มีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามกฎของแก๊ส แต่แก๊สจริงจะมีพฤติกรรมคล้ายกับแก๊สอุดมคติเมื่ออยู่ที่อุณหภูมิสูง ๆ และความดันต่ำ ๆ ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของแก๊สอยู่ห่างกันมาก ทำให้มีจำนวนโมเลกุลน้อย ซึ่งถือว่าแก๊สไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

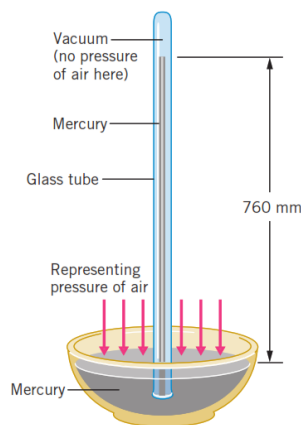
1) ความดันบรรยากาศ

ทอริเชลลี (Evangelista Torricelli, ค.ศ.1643) นักฟิสิกส์และนักคณิตศาสตร์ชาวอิตาลีเป็นผู้ประดิษฐ์มาตรวัดความดันอากาศที่เรียกว่า บารอมิเตอร์ (barometer) เพื่อวัดความดันของอากาศ โดยมีเรื่องเล่าต่อกันมาเกี่ยวกับการขุดบ่อลึก 40 ฟุต แล้วใช้สูบ เพื่อสูบน้ำขึ้นมา แต่พบว่าสูบน้ำเท่าไร น้ำขึ้นมาได้สูงเพียง 34 ฟุตเท่านั้น เพราะอากาศบนผิวโลกกดดันอยู่ ทอริเชลลีได้ทดลองใช้ปรอท (mercury) บรรจุในหลอดแก้วยาว 36 นิ้ว ปลายข้างหนึ่งปิด คั่วหลอดแก้วนี้ลงในอ่างปรอทปรากฏว่าปรอทในหลอดแก้วลดลงเหลือเพียง 30 นิ้วเท่านั้น (ภาพที่ 1.1) จากการทดลองนี้เขาอธิบาย

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

ว่า ปรอทสูง 30 นิ้ว หนักเท่ากับน้ำสูง 34 ฟุต เขาประดิษฐ์ท่อที่มีความยาวประมาณ 1 เมตร บรรจุด้วยปรอท ปลายข้างหนึ่งปิดสนิท แล้วให้ปลายอีกข้างจมอยู่ในอ่างปรอท พบว่าปรอทในท่อสูง 760 มิลลิเมตร วิธีนี้เป็นที่มาของหน่วยเทียบความดันของอากาศ โดยความดันอากาศที่ระดับน้ำทะเลเท่ากับ 760 มิลลิเมตรของปรอท (mmHg) และที่ระดับความสูงกว่าระดับน้ำทะเล ความดันอากาศจะน้อยกว่า 760 mmHg จากการค้นพบนี้สรุปได้ว่า บรรยากาศเป็นตัวการทำให้เกิดแรงกดของอากาศเปลี่ยนไปในเวลาต่างกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันในบรรยากาศส่วนใหญ่จะวัดระดับความสูงของปรอท ดังนั้นหน่วยของความดันโดยทั่วไปจึงนิยมใช้เป็น mmHg ที่อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทอร์รี่ (torr) เพื่อเป็นเกียรติแก่ทอร์รี่เชลลี โดยเทียบ 1 mmHg หรือ 1 ทอร์รี่ เท่ากับประมาณ 133.322 Pa ในหน่วยอนุพัทธ์เอสไอ

ความดันบรรยากาศ (atmospheric pressure, atm) คือความดันของบรรยากาศโลก หรือความดันของอากาศในชั้นบรรยากาศต่ำสุดที่ปกคลุมพื้นผิวโลก ความดันนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพอากาศและความสูงจากพื้นดินที่ระดับน้ำทะเล ความดันบรรยากาศจะมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 101,325 Pa เรียกว่า ความดัน 1 บรรยากาศ (atm)



ภาพที่ 1.1 บารอมิเตอร์ของทอร์รี่เชลลี. ที่มาจาก *Chemistry: The Molecular Nature of Matter* (p. 479), by N.D. Jespersen et al., 2012, John Wiley & Sons, Inc

เมื่อระดับปรอทในหลอดแก้วคงที่แสดงว่า ความดัน (P) ของอากาศที่กดบนผิวปรอทในอ่าง เท่ากับความดันปรอทที่อยู่ในหลอดคดลงมา ซึ่งความดันปรอท คือแรงกดจากน้ำหนักของปรอทที่อยู่ในหลอดที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของหลอด ดังนั้น แรงกดที่เกิดจากลำปรอทในหลอดแก้วสามารถคำนวณได้จาก

$$F = ma \quad \text{.....(1.1)}$$

เมื่อ $F =$ แรงกดของปรอท

$m =$ น้ำหนักของปรอท

$a =$ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

เนื่องจากน้ำหนักของเหลวในทรงกระบอกขึ้นอยู่กับปริมาตรและความหนาแน่นของของเหลว ดังสมการ

$$m = V\rho \quad \text{.....(1.2)}$$

ถ้าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกแทนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ดังนั้น แรงกดปรอทในหลอดแก้ว เขียนได้เป็น

$$F = V\rho g \quad \text{.....(1.3)}$$

ปริมาตรของเหลว (V) ในหลอดแก้ว คำนวณได้จาก

$$V = \pi r^2 h \quad \text{.....(1.4)}$$

ดังนั้น แรงกดปรอทในหลอดแก้ว คือ

$$F = [(\pi r^2 h)\rho]g \quad \text{.....(1.5)}$$

เมื่อ $F =$ แรงกดของปรอท

$r =$ รัศมีของหลอดแก้ว

$h =$ ความสูงของปรอทในหลอดแก้ว

$\rho =$ ความหนาแน่นของปรอท (13.47 g/cm^3)

$g =$ แรงโน้มถ่วงของโลก (980.7 cm/s^2)

เนื่องจาก ความดัน คือแรงที่กระทำต่อหน่วยพื้นที่

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{.....(1.6)}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad P = \left[\frac{(\pi r^2 h)\rho}{A} \right] g \quad \text{.....(1.7)}$$

$$\text{หรือ} \quad P = \left[\frac{(\pi r^2 h)\rho}{\pi r^2} \right] g \quad \text{.....(1.8)}$$

$$P = h\rho g \quad \text{.....(1.9)}$$

เมื่อ $P =$ ความดันบรรยากาศ

จากสมการ (1.9) เมื่อ ρ และ g เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ความดัน (P) จึงแปรผันกับความสูงของปรอท ถ้าลำปรอทมีระดับสูง แสดงว่ามีความดันบรรยากาศสูง

2) ความดันมาตรฐาน

ความดันมาตรฐาน คือความดัน 1 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 0°C ซึ่งเป็นความดันเฉลี่ยของบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล จากการทดลองของทอริริเชลลี ที่พบว่าที่ความดัน 1 บรรยากาศ ระดับปรอทสูงเท่ากับ 760 มิลลิเมตร เมื่อความหนาแน่นของปรอทเท่ากับ 13.47 g/cm^3 และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 980.7 cm/s^2 ดังนั้น ความดันบรรยากาศคำนวณได้จากสมการ (1.9) ดังนี้

$$\begin{aligned} P &= h\rho g \\ &= (76 \text{ cm})(13.47 \text{ g/cm}^3)(980.7 \text{ cm/s}^2) \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{ g/cm} \cdot \text{s}^2 \\ &= 1.013 \times 10^2 \text{ kg/cm} \cdot \text{s}^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความดัน 1 บรรยากาศ เท่ากับ $1.013 \times 10^2 \text{ kg/cm} \cdot \text{s}^2$

ความดันมีหน่วยในระบบ SI เป็นนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือเรียกอีกชื่อว่า ปาสคัล (Pa) ซึ่งมาจากชื่อนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสที่ชื่อปาสคัล (Blaise Pascal) โดย 1 Pa เท่ากับ 1 N/m^2 หน่วยของความดันนิยมใช้อีกหลายหน่วย เช่น บาร์ (bar) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) มิลลิเมตรปรอท และ ทอร์ การเทียบหน่วยความดัน แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 หน่วยความดันแก๊สและการเทียบหน่วยความดันแก๊ส

	Pa	bar	atm	torr	psi
1 Pa	1 N/m^2	10^{-5}	9.869×10^{-6}	7.500×10^{-3}	1.450×10^{-4}
1 bar	10^5	10^6 dyn/cm^2	0.9869	750.0	14.50
1 atm	1.013×10^5	1.013	1	760	14.69
1 torr	133.3	1.333×10^{-3}	1.315×10^{-3}	1 mmHg	1.933×10^{-2}
1 psi	6.894×10^3	6.894×10^{-2}	6.804×10^{-2}	51.71	1 lb/in^2

การเปลี่ยนความดันแก๊ส ทำได้โดยนำความดัน (หน่วยเริ่มต้น) คูณกับแฟกเตอร์เปลี่ยนหน่วย เช่น

$$\text{เปลี่ยนความดัน torr เป็น atm} \quad P_{\text{atm}} = P_{\text{torr}} \times \left(\frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ torr}} \right)$$

$$\text{เปลี่ยนความดัน torr เป็น Pa} \quad P_{\text{Pa}} = P_{\text{torr}} \times \left(\frac{1 \text{ Pa}}{7.500 \times 10^{-3} \text{ torr}} \right)$$

$$\text{เปลี่ยนความดัน atm เป็น Pa} \quad P_{\text{Pa}} = P_{\text{atm}} \times \left(\frac{1 \text{ Pa}}{9.869 \times 10^{-6} \text{ atm}} \right)$$

ตัวอย่าง 1.1 การเปลี่ยนหน่วยความดันเป็น atm, Pa และ mmHg จากความดันอากาศที่วัดได้ 490 torr

วิธีคิด
$$P_{\text{atm}} = 490 \text{ torr} \times \left(\frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ torr}} \right) = 0.640 \text{ atm}$$

$$P_{\text{Pa}} = 490 \text{ torr} \times \left(\frac{1 \text{ Pa}}{7.500 \times 10^{-3} \text{ torr}} \right) = 6.53 \times 10^4 \text{ Pa}$$

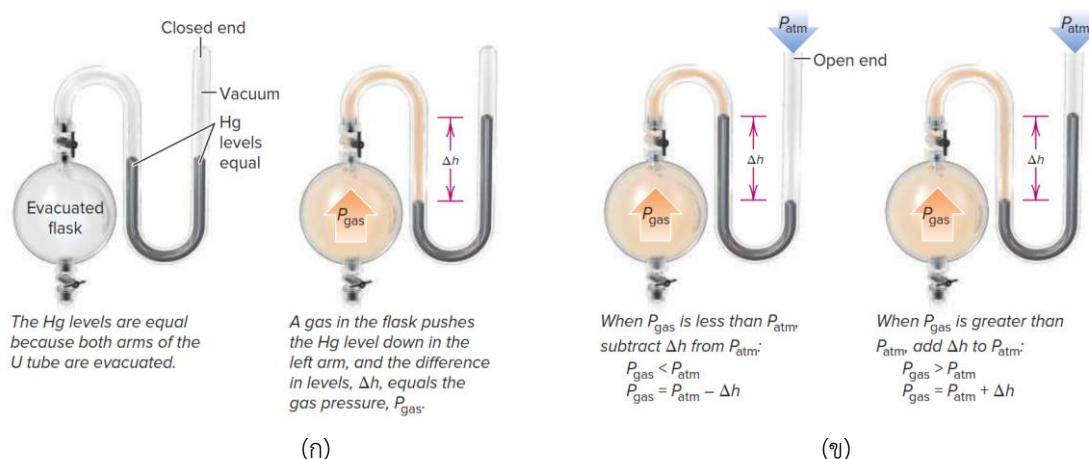
$$P_{\text{mmHg}} = 490 \text{ torr} \times \left(\frac{1 \text{ mmHg}}{1 \text{ torr}} \right) = 490 \text{ mmHg}$$

3) การวัดความดันแก๊ส

อุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันของแก๊ส เรียกว่า แมนอมิเตอร์ (manometer) ซึ่งเป็นหลอดแก้วรูปตัวยู (U-shape) ภายในบรรจุปรอท ปลายอีกข้างหนึ่งนั้นต่อกับภาชนะบรรจุแก๊สที่ต้องการวัดความดัน ส่วนปลายอีกข้างอาจเป็น 2 แบบคือ

1) แมนอมิเตอร์ ชนิดปลายปิด ดังภาพที่ 1.2(ก) ช่องว่างเหนือสารปรอทที่ปลายหลอดข้างปิดเป็นสุญญากาศ (ไม่มีอากาศ) ถ้าภาชนะบรรจุแก๊สเป็นสุญญากาศเช่นกัน ระดับสารปรอททั้งสองข้างของปลายหลอดจะเท่ากัน แต่เมื่อมีแก๊สใด ๆ แก๊สจะดันสารปรอทให้สูงขึ้นทางด้านปลายปิด ดังนั้น ความดันของแก๊สเท่ากับ Δh

2) แมนอมิเตอร์ ชนิดปลายเปิด ดังภาพที่ 1.2(ข) แก๊สใด ๆ ที่บรรจุในภาชนะมีความดันน้อยกว่าความดันบรรยากาศ ระดับสารปรอทจะสูงทางด้านที่ต่อกับภาชนะ ดังนั้น ความดันของแก๊สเท่ากับความดันบรรยากาศ + Δh แต่ถ้าแก๊สใด ๆ นั้นมีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศ ระดับสารปรอทจะสูงทางด้านปลายเปิด ดังนั้น ความดันของแก๊ส เท่ากับความดันบรรยากาศ - Δh



ภาพที่ 1.2 แมนอมิเตอร์สำหรับวัดความดันของแก๊ส (ก) แบบปลายปิด และ (ข) แบบปลายเปิด. ที่มาจาก *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (p. 207). M.S. Silberberg & P.G. Amateis, 2021, McGraw-Hill Publishing Company.

4) ปริมาตร

ปริมาตรของแก๊ส (volume, V) จะขึ้นกับภาชนะที่บรรจุ หรืออาจกล่าวได้ว่า ปริมาตรของแก๊ส หมายถึง ปริมาตรของภาชนะของแก๊สที่บรรจุแก๊สนั้น ๆ หน่วยวัดปริมาตรของแก๊สที่ใช้กันทั่วไปคือ

หน่วย SI คือ ลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3) และ ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

หน่วยระบบเมตริก คือ ลิตร (L) หรือ มิลลิลิตร (mL)

ดังนั้น หน่วยปริมาตรจึงนิยมใช้กันทั้งสองระบบ โดย

$$1 \text{ L} = 1000.027 \text{ cm}^3 = 1 \text{ dm}^3 \text{ (โดยประมาณ)}$$

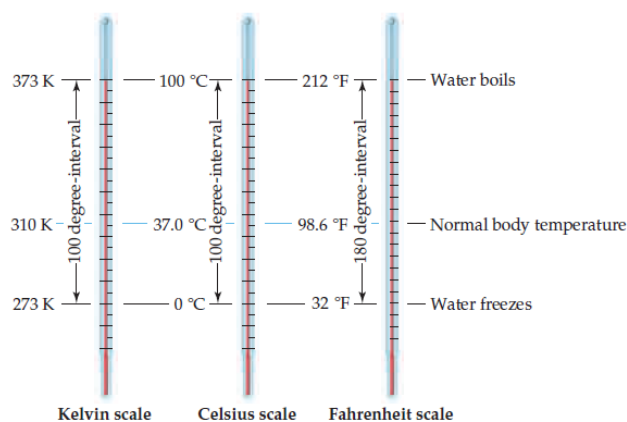
$$1 \text{ mL} = 1.000027 \text{ cm}^3 = 1 \text{ cm}^3 \text{ (โดยประมาณ)}$$

$$\text{ดังนั้น } 1 \text{ dm}^3 = 10^3 \text{ cm}^3 = 1 \text{ L} = 10^3 \text{ mL}$$

5) อุณหภูมิ

อุณหภูมิ (temperature, T) เป็นมาตราวัดระดับความร้อนของสาร เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ หน่วย SI ของอุณหภูมิคือ เคลวิน (K) แต่หน่วยของอุณหภูมียังมีหลายหน่วยที่นิยมใช้ เช่น องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) และองศาฟาเรนไฮต์ (F) การกำหนดมาตราส่วนของอุณหภูมิ

ในเทอร์โมมิเตอร์มักจะใช้จุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำที่ความดัน 1 บรรยากาศเป็นหลัก แล้วแบ่งช่วงระยะระหว่างจุดเดือดกับจุดเยือกแข็งเป็นช่องมาตราส่วนเท่าๆ กัน ดังภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 แสดงการเปรียบเทียบมาตราส่วนหน่วยอุณหภูมิ. ที่มาจาก *Chemistry: The Central Science* (p.20), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

การศึกษาสมบัติของแก๊สหรือการคำนวณเกี่ยวกับแก๊ส จะใช้หน่วยอุณหภูมิเป็นหน่วยเคลวินเสมอ การเปลี่ยนหน่วยองศาเซลเซียสให้เป็นหน่วยเคลวิน ทำได้โดย

$$\text{อุณหภูมิ (K)} = 273.15 + \text{°C}$$

หรือ
$$\text{อุณหภูมิ (°C)} = \text{K} - 273.15$$

การเปลี่ยนหน่วยฟาเรนไฮต์ให้เป็นหน่วยเคลวิน หรือหน่วยองศาเซลเซียส ทำได้โดย

$$\text{อุณหภูมิ (K)} = \frac{5}{9} (\text{F} + 459.7)$$

หรือ
$$\text{อุณหภูมิ (°C)} = \frac{9}{5} (\text{F} - 32)$$

6) อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน

เนื่องจากปริมาตรของแก๊สเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนไป เพื่อให้การเปรียบเทียบปริมาตรของแก๊สถูกต้องตรงกัน จึงมีการตั้งอุณหภูมิมาตรฐานและความดันมาตรฐาน เรียกว่า อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (standard temperature and pressure, STP) หมายถึง “สถานะที่อุณหภูมิ 273 เคลวิน และความดัน 1 บรรยากาศ”

1.1.2 กฎของแก๊ส

กฎของแก๊ส (gas law) เป็นกฎที่อธิบายพฤติกรรมของแก๊สอุดมคติที่เกี่ยวกับปริมาตร ความดัน อุณหภูมิ และจำนวนโมล เพื่อสะดวกในการศึกษาและการคำนวณเกี่ยวกับกฎของแก๊ส จึงใช้อักษรย่อและหน่วยระบบเมตริก หรือหน่วยที่นิยมใช้โดยมาก ดังนี้

- ปริมาตร สัญลักษณ์ย่อคือ V หน่วยที่นิยมใช้คือ มิลลิลิตร (mL) หรือลิตร (L)
- ความดัน สัญลักษณ์ย่อคือ P หน่วยที่นิยมใช้คือ ความดัน บรรยากาศ (atm) หรือ มิลลิเมตรปรอท (mmHg) หรือ พาสคัล (Pa)

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

- อุณหภูมิ สัญลักษณ์ย่อคือ T หน่วยที่นิยมใช้คือ องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) หรือองศาเคลวิน (K)
- จำนวนโมล สัญลักษณ์ย่อคือ n หน่วยที่ใช้คือ โมล (mol)

1) กฎของบอยล์

บอยล์ (Robert Boyle, ค.ศ.1627-1691) นักเคมีชาวอังกฤษ ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของแก๊ส ที่อุณหภูมิคงที่ โดยใช้หลอดแก้วตัวเจ (J-shape) ที่ปลายด้านหนึ่งปิด บอยล์ทดลองเปลี่ยนความดันโดยการบรรจุปรอทลงไปหลอดแก้ว และพบว่าปริมาตรของแก๊สลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น และจากการค้นพบลักษณะกายภาพหลายประการของอากาศโดยเฉพาะในกระบวนการเผาไหม้ในปี ค.ศ.1662 ต่อมาเรียกว่า กฎของบอยล์ (Boyle's law) กล่าวคือ “ที่อุณหภูมิคงที่ ปริมาตรของแก๊สแปรผกผันกับความดัน” เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$V \propto \frac{1}{P} \quad \text{.....(1.10)}$$

$$V = \frac{1}{P} \quad \text{.....(1.11)}$$

$$PV = k \quad \text{.....(1.12)}$$

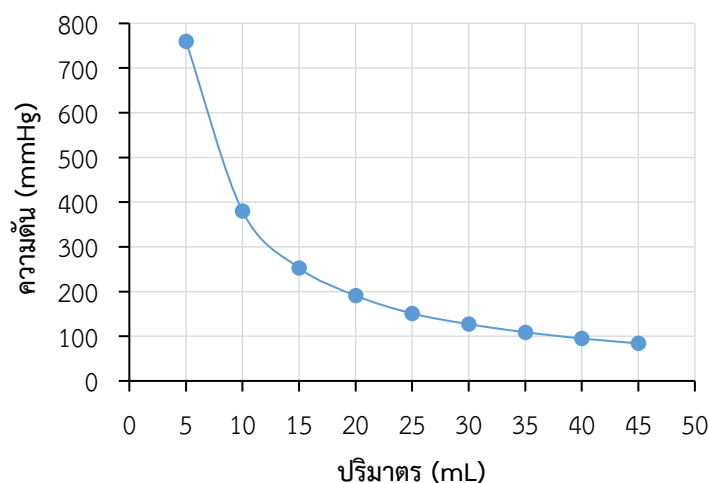
กฎของบอยล์ ใช้คำนวณปริมาตรของแก๊สเมื่อความดันเปลี่ยน หรือคำนวณความดันเมื่อปริมาตรของแก๊สเปลี่ยน จากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่ง จากสมการ

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad \text{.....(1.13)}$$

เมื่อ P_1 และ P_2 = ความดันสถานะเริ่มต้น และความดันสถานะสุดท้าย ตามลำดับ
 V_1 และ V_2 = ปริมาตรสถานะเริ่มต้น และปริมาตรสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

จากกฎของบอยล์ นำผลการทดลองไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันจะได้ลักษณะของกราฟซึ่งมี 2 แบบดังนี้

แบบที่ 1 กราฟไฮเพอร์โบลา (hyperbola) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง P กับ V โดยพบว่าปริมาตรจะลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อมีความดันเพิ่มขึ้น 2 เท่า ดังภาพที่ 1.4



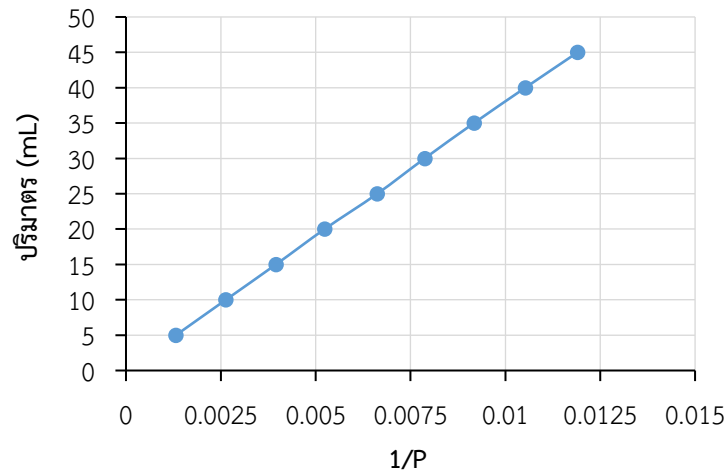
ภาพที่ 1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร เมื่ออุณหภูมิคงที่

แบบที่ 2 กราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด (จุด 0) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง P กับ $1/V$

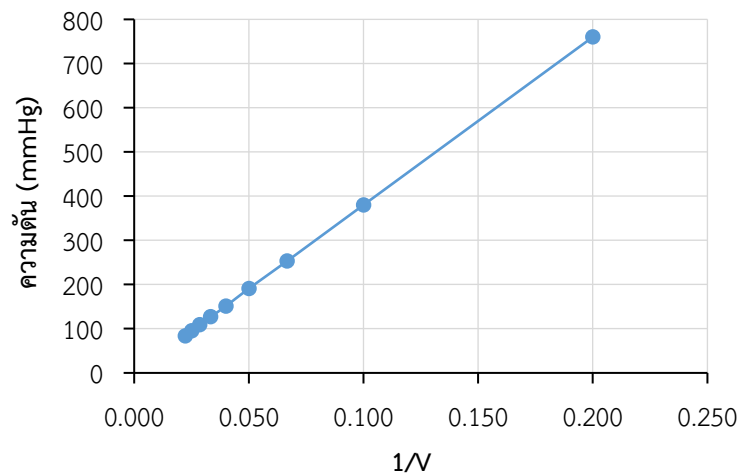
$$\text{จากสมการ (1.11)} \quad V = k \frac{1}{P} + 0 \quad \text{.....(1.14)}$$

$$\text{หรือ} \quad P = k \frac{1}{V} + 0 \quad \text{.....(1.15)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง V กับ $1/P$ หรือ P กับ $1/V$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับค่าคงที่ (k) และมีจุดตัดแกนที่จุด 0 ดังภาพที่ 1.5



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ (ก) ระหว่าง V กับ $1/P$ และ (ข) ระหว่าง P กับ $1/V$

จากภาพที่ 1.5 จะได้กราฟเส้นตรง แต่เมื่ออุณหภูมิแตกต่างกัน จะได้เส้นตรงที่มีความชันไม่เท่ากัน เส้นกราฟที่อุณหภูมิสูงจะมีความชันมากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าต่อเส้นกราฟออกไป เส้นกราฟจะไปพบกันที่จุด 0

ตัวอย่าง 1.2 แก๊สออกซิเจนจำนวนหนึ่งมีปริมาตร 5.00 L ภายใต้ความดัน 740 mmHg จงหาปริมาตรของแก๊สจำนวนนี้โดยความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิคงที่

วิธีคิด ความดันบรรยากาศเท่ากับ 760 mmHg

$$P_1 = 740 \text{ mmHg} \quad P_2 = 760 \text{ mmHg}$$

$$V_1 = 5.00 \text{ L} \quad V_2 = ?$$

$$\text{จากกฎของบอยล์} \quad P_1V_1 = P_2V_2$$

$$(740 \text{ mmHg})(5.00 \text{ L}) = (760 \text{ mmHg})V_2$$

$$V_2 = \frac{(740 \text{ mmHg})(5.00 \text{ L})}{760 \text{ mmHg}} = 4.87 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรแก๊สจะลดลงเหลือ 4.87 ลิตร

ตัวอย่าง 1.3 แก๊สฟร็อน (CCl_2F_2) ปริมาตร 1.53 L มีความดัน 5.6×10^3 Pa ถ้าปริมาตรของแก๊สลดลงเหลือ 0.52 L เมื่ออุณหภูมิคงที่ ความดันของแก๊สนี้จะเป็นกี่ mmHg

วิธีคิด $P_1 = 5.6 \times 10^3$ Pa $P_2 = ?$

$$V_1 = 1.53 \text{ L} \quad V_2 = 0.52 \text{ L}$$

$$\text{จากกฎของบอยล์} \quad P_1V_1 = P_2V_2$$

$$(5.6 \times 10^3 \text{ Pa})(1.53 \text{ L}) = P_2(0.52 \text{ L})$$

$$P_2 = \frac{(5.6 \times 10^3 \text{ Pa})(1.53 \text{ L})}{0.52 \text{ L}} = 1.65 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$\text{จาก } 1 \text{ Pa} = 7.500 \times 10^{-3} \text{ mmHg}$$

$$1.65 \times 10^4 \text{ Pa} = (1.65 \times 10^4 \text{ Pa})(7.500 \times 10^{-3} \text{ mmHg}) = 123.8 \text{ mmHg}$$

ดังนั้น ความดันแก๊สเท่ากับ 123.8 mmHg

2) กฎของชาร์ล

ชาร์ล (Jacques-Alexander-Cesar Charles, ค.ศ.1778) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาตรของแก๊ส พบว่า “เมื่อความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สแปรผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์” กล่าวคือ แก๊สจะขยายตัวมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และจะหดตัวมีปริมาตรน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลง เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$V \propto T \quad \text{.....(1.16)}$$

$$V = kT \quad \text{.....(1.17)}$$

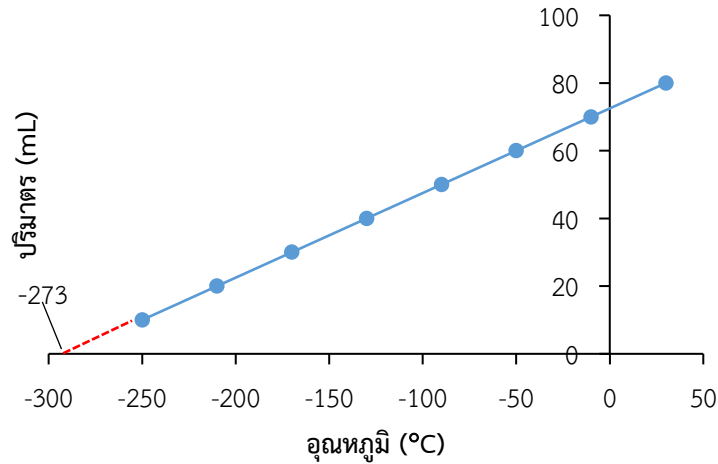
กฎของชาร์ลใช้หาปริมาตรของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน หรือหาอุณหภูมิเมื่อปริมาตรของแก๊สเปลี่ยน จากสมการ

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{.....(1.18)}$$

เมื่อ V_1 และ V_2 = ปริมาตรสภาวะเริ่มต้น และปริมาตรสภาวะสุดท้าย ตามลำดับ

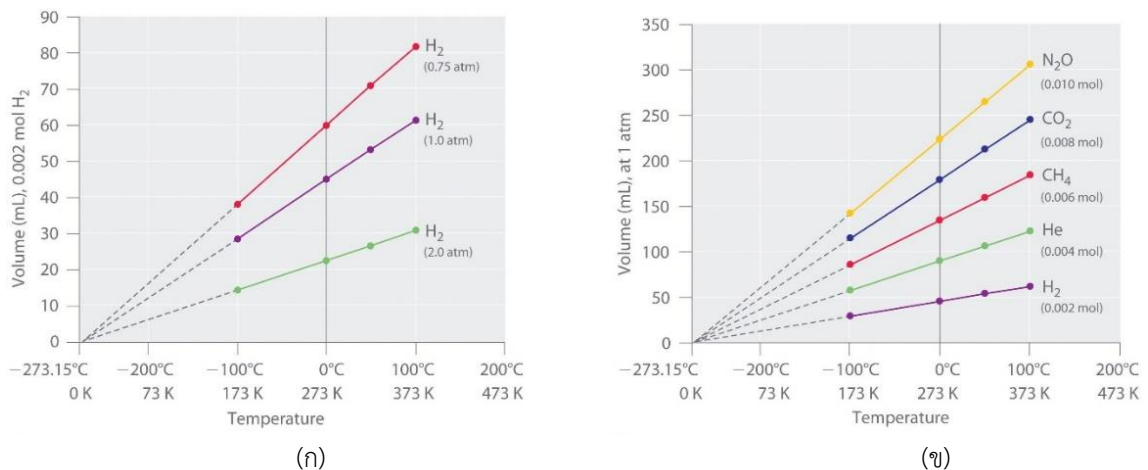
T_1 และ T_2 = อุณหภูมิสภาวะเริ่มต้น และอุณหภูมิสภาวะสุดท้าย ตามลำดับ

จากสมการ (1.18) ปริมาตรของแก๊สเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ เมื่อเขียนกราฟระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิ ดังภาพที่ 1.6 แล้วลากเส้นตรงมาตัดกับแกนอุณหภูมิ พบว่าแก๊สทุกชนิดจะตัดตรงจุดเดียวกันที่อุณหภูมิ -273°C แสดงว่าที่อุณหภูมินี้แก๊สทุกชนิดจะมีปริมาตรเท่ากับศูนย์ (หรือไม่มีปริมาตร) เรียกอุณหภูมิที่แก๊สมีปริมาตรเท่ากับศูนย์ว่า ศูนย์องศาสัมบูรณ์ (absolute zero)



ภาพที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรแก๊สกับอุณหภูมิ

จากกฎของชาร์ล สมการ (1.17) เมื่อเขียนกราฟระหว่างปริมาตรของแก๊สกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ จะได้กราฟเส้นตรงลากผ่านจุด 0 (0 K) และมีความชันเท่ากับ k ลักษณะของกราฟจะมีความชันแตกต่างกัน โดยแก๊สชนิดเดียวกันที่ความดันไม่เท่ากัน สภาวะความดันต่ำกราฟจะมีความชันมากกว่า สภาวะที่มีความดันสูง (ภาพที่ 1.7(ก)) ส่วนในกรณีแก๊สต่างชนิดกันที่ใช้ความดันเท่ากัน ความชันของกราฟจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊ส ดังภาพที่ 1.7(ข)



ภาพที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิเคลวิน (ก) แก๊สชนิดเดียวกัน (P ไม่เท่ากัน) และ (ข) แก๊สต่างชนิดกัน (P เท่ากัน). ที่มาจาก *Principles of General Chemistry* (Online), by B.A. Averill, 2012.

ตัวอย่าง 1.4 ปริมาตรแก๊ส H_2 ที่บรรจุในลูกบอลลูนเท่ากับ 1.00 L ที่ 25°C จงคำนวณปริมาตรบอลลูนจะเป็นเท่าเมื่อเย็นตัวลงสู่ที่อุณหภูมิต่ำ -78°C

วิธีคิด $V_1 = 1.00 \text{ L}$ $V_2 = ?$

$$T_1 = 273 + 25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K} \quad T_2 = 273 + (-78^{\circ}\text{C}) = 195 \text{ K}$$

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

จากกฎของชาร์ล (สมการ 1.18)

$$V_2 = \frac{(100 \text{ L})(195 \text{ K})}{298 \text{ K}} = 0.654 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรแก๊สจะลดลงเหลือ 0.654 ลิตร เมื่อลดอุณหภูมิเหลือ -78°C

3) กฎของเก-ลูซัค (Gay-Lussac's law)

ในปี ค.ศ.1808 เก-ลูซัค (Joseph-Louis Gay-Lussac) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊ส เมื่อนำแก๊ส 2 ชนิดขึ้นไปมาทำปฏิกิริยากันแล้วได้สารผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส ที่ความดันและอุณหภูมิคงที่สรุปเป็นกฎได้คือ “เมื่อความดันและจำนวนโมลของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สแปรผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์”

$$P \propto T \quad \text{.....(1.19)}$$

$$P = kT \quad \text{.....(1.20)}$$

$$\frac{P}{T} = k \quad \text{.....(1.21)}$$

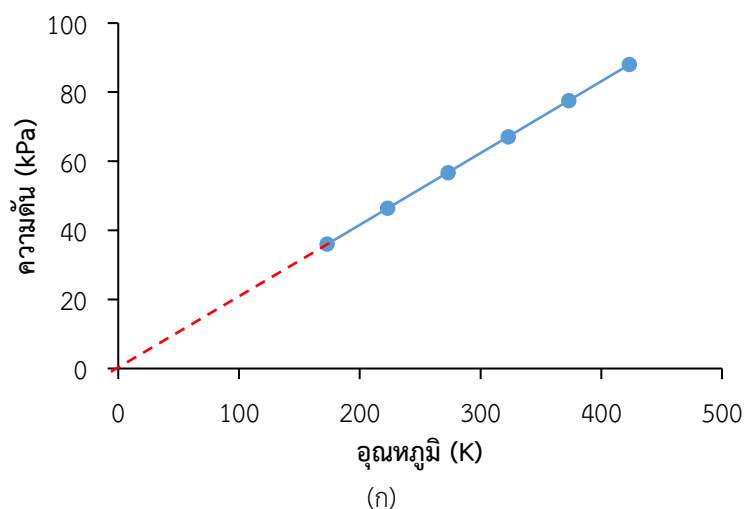
กฎของเก-ลูซัคใช้หาความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน ณ สถานะต่างกัน จากสมการ

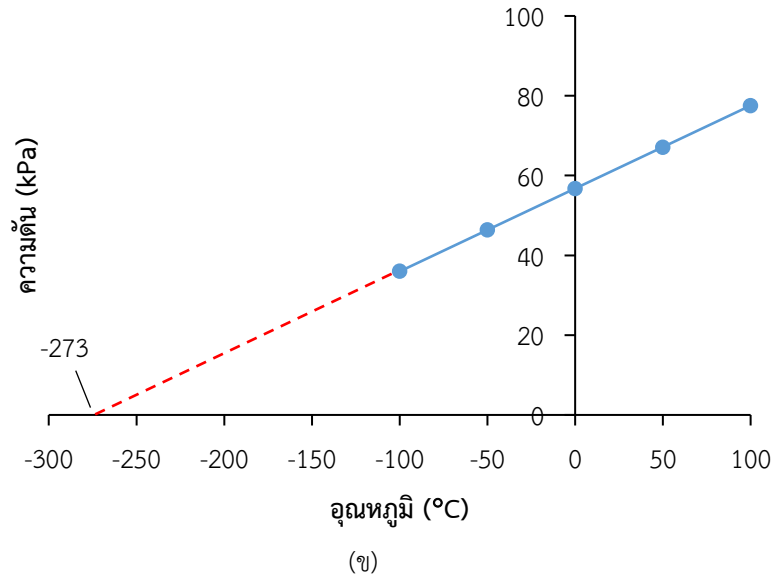
$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{.....(1.22)}$$

เมื่อ P_1 และ P_2 = ความดันสถานะเริ่มต้น และความดันสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

T_1 และ T_2 = อุณหภูมิสถานะเริ่มต้น และอุณหภูมิสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

ผลการศึกษาของเก-ลูซัค สอดคล้องกับกฎของชาร์ล แต่ให้ผลการทดลองที่ละเอียดขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแก๊สและความดันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ เมื่อจำนวนโมลของแก๊สคงที่ อาจเรียกรวมว่า กฎของชาร์ล-เก-ลูซัค (Charles-Gay-Lussac's law) จากสมการ (1.21) กราฟระหว่าง P กับ T (หน่วย K) หรือ P กับ T (หน่วย $^{\circ}\text{C}$) จะมีความชันเท่ากับ k (ภาพที่ 1.8)





ภาพที่ 1.8 แสดงความสัมพันธ์ (ก) ระหว่าง P กับ T (หน่วย K) และ (ข) ระหว่าง P กับ T (หน่วย °C)

4) กฎของอาโวกาโดร

อาโวกาโดร (Amedeo Avogadro, ค.ศ.1811) ศึกษาพฤติกรรมของแก๊ส พบว่า ภายใต้อุณหภูมิและความดันเดียวกัน แก๊สที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนโมเลกุลของแก๊สชนิดนั้นเท่ากัน

เมื่อจำนวนโมเลกุลสัมพันธ์กับจำนวนโมล คือ 1 โมลเท่ากับ 6.02×10^{23} โมเลกุล

เมื่อปริมาตรสัมพันธ์กับจำนวนโมล คือ 1 โมลของแก๊สใดๆ มีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร ที่ STP

กฎของอาโวกาโดร คือ “เมื่อความดันและอุณหภูมิคงที่ ปริมาตรของแก๊สแปรผันกับจำนวนโมลของแก๊ส” ดังสมการ

$$V \propto n \quad \text{.....(1.23)}$$

$$V = kn \quad \text{.....(1.24)}$$

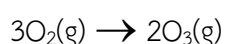
กฎของอาโวกาโดรใช้หาปริมาตรของแก๊สและจำนวนโมล ณ สภาวะต่างกัน จากสมการ

$$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} \quad \text{.....(1.25)}$$

เมื่อ V_1 และ V_2 = ปริมาตรสภาวะเริ่มต้น และปริมาตรสภาวะสุดท้าย ตามลำดับ

n_1 และ n_2 = จำนวนโมลสภาวะเริ่มต้น และจำนวนโมลสภาวะสุดท้าย ตามลำดับ

ตัวอย่าง 1.5 แก๊สออกซิเจน (O_2) 0.50 mol มีปริมาตร 12.2 L ที่ความดัน 1 atm และอุณหภูมิ $25^\circ C$ เมื่อทำการเปลี่ยนเป็นแก๊สโอโซน (O_3) ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกันจะได้แก๊สโอโซนปริมาตรเท่าใด วิธีคิด จะต้องหาจำนวนโมลของ O_3 จากสมการเคมีของการเปลี่ยนแก๊ส O_2 เป็นแก๊ส O_3 ดังนี้



$$\text{mol } O_3 = 0.50 \text{ mol } O_2 \times \left(\frac{2 \text{ mol } O_3}{3 \text{ mol } O_2} \right) = 0.33 \text{ mol}$$

$$n_1 = 0.50 \text{ mol} \quad n_2 = 0.33 \text{ mol}$$

$$V_1 = 12.2 \text{ L} \quad V_2 = ?$$

$$\text{จากสมการ (1.25)} \quad \frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2}$$

$$V_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) V_1 = \left(\frac{0.33 \text{ mol}}{0.50 \text{ mol}} \right) \times 12.2 \text{ L} = 8.1 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรแก๊สไอโซนเกิดขึ้นเท่ากับ 8.1 ลิตร

5) กฎรวมแก๊ส

กฎรวมแก๊ส เป็นสมการรวมกฎของบอยล์ และกฎของชาร์ล-เก-ลูซัก เข้าด้วยกัน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ความดัน และอุณหภูมิ ในขณะที่จำนวนโมลของแก๊สคงที่ ดังนี้

$$\text{จากกฎของบอยล์} \quad V \propto \frac{1}{P} \quad (\text{เมื่อ } T \text{ และ } n \text{ คงที่})$$

$$\text{จากกฎของชาร์ล} \quad V \propto T \quad (\text{เมื่อ } P \text{ และ } n \text{ คงที่})$$

รวมกฎของบอยล์และกฎของชาร์ล

$$V \propto \frac{T}{P} \quad \dots\dots(1.26)$$

$$\frac{PV}{T} = k \quad \dots\dots(1.27)$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \dots\dots(1.28)$$

เมื่อ P_1 และ P_2 = ความดันสถานะเริ่มต้น และความดันสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

V_1 และ V_2 = ปริมาตรสถานะเริ่มต้น และปริมาตรสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

T_1 และ T_2 = อุณหภูมิสถานะเริ่มต้น และอุณหภูมิสถานะสุดท้าย ตามลำดับ

สมการ (1.28) เรียกว่า กฎรวมแก๊ส ซึ่งใช้ได้เมื่อจำนวนโมเลกุลของแก๊สคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง (n คงที่) คำนวณหาความดัน ปริมาตรและอุณหภูมิของแก๊สเมื่อเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปอีกรัฐาหนึ่ง แต่ถ้า n ไม่คงที่ สมการ (1.28) เขียนได้เป็น

$$\frac{PV}{T} = nk \quad \dots\dots(1.29)$$

$$PV = nRT \quad \dots\dots(1.30)$$

เมื่อ P = ความดัน (atm)

V = ปริมาตรแก๊ส (L)

n = จำนวนโมล (mol)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (0.082 L·atm/K·mol)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

สมการ (1.30) เรียกว่า สมการสถานะของแก๊สอุดมคติ หรือ สมการแก๊สอุดมคติ (ideal gas law)

ตัวอย่าง 1.6 คำนวณโมลของแก๊ส H₂ ปริมาตร 8.56 L ที่ 0°C และ 1.5 atm

วิธีคิด

$$P = 1.5 \text{ atm}$$

$$V = 8.56 \text{ L}$$

$$T = 0^\circ\text{C} + 273 = 273 \text{ K}$$

$$R = 0.082 \text{ L}\cdot\text{atm}/\text{K}\cdot\text{mol}$$

จากสมการ (1.30) n หาได้จาก $n = \frac{PV}{RT}$

$$n = \frac{(1.5 \text{ atm})(8.56 \text{ L})}{(0.082 \text{ L}\cdot\text{atm}/\text{K}\cdot\text{mol})(273 \text{ K})} = 0.57 \text{ mol}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของแก๊ส H₂ เท่ากับ 0.57 โมล

ตัวอย่าง 1.7 เมื่อเผาไดโบเรน (B₂H₆) กลายเป็นไอที่ความดัน 345 torr ที่ -15°C มีปริมาตรเท่ากับ 3.48 L คำนวณปริมาตรของแก๊สนี้ ถ้าเปลี่ยนสภาวะเป็นที่ 36°C และความดัน 468 torr

วิธีคิด เนื่องจากจำนวนโมล (n) ของแก๊สคงที่ ดังนั้นจึงใช้สมการกฎรวมแก๊ส

$$P_1 = 345 \text{ torr}$$

$$P_2 = 468 \text{ torr}$$

$$T_1 = -15^\circ\text{C} + 273 = 258 \text{ K} \quad T_2 = 36^\circ\text{C} + 273 = 309 \text{ K}$$

$$V_1 = 3.48 \text{ L}$$

$$V_2 = ?$$

จากสมการ (1.28) $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1 T_2}{P_2 T_1}$$

$$V_2 = \frac{(345 \text{ torr})(3.48 \text{ L})(309 \text{ K})}{(468 \text{ torr})(258 \text{ K})} = 3.07 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรไดโบเรนเท่ากับ 3.07 ลิตร

6) ค่าคงที่ของแก๊ส (gas constant)

จากสมการแก๊สอุดมคติ สมการ (1.30) สามารถเขียนค่าคงที่ของแก๊ส (R) ได้เป็น

$$R = \frac{PV}{nT} \quad \dots\dots(1.31)$$

เมื่อพิจารณาจากแก๊สใดๆ จำนวน 1 โมล ซึ่งมีปริมาตร 22.4 ลิตรที่สภาวะ STP (ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 273 K) เมื่อแทนค่า P, V, T และ n ลงในสมการ (1.31) จะได้ค่า R ดังนี้

$$R = \frac{(1 \text{ atm})(22.4 \text{ L})}{(1 \text{ mol})(273 \text{ K})} = 0.082 \text{ L}\cdot\text{atm}/\text{K}\cdot\text{mol}$$

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmu.ac.th

ค่า R ยังมีอีกหลายค่า เช่น

$$R = 8.314 \times 10^7 \text{ ergs/K}\cdot\text{mol}$$

$$R = 8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$$

$$R = 1.987 \text{ cal/K}\cdot\text{mol}$$

หมายเหตุ สำหรับการเรียนวิชาเคมีในระดับนี้ส่วนใหญ่ใช้ค่า R เท่ากับ $0.082 \text{ L}\cdot\text{atm/K}\cdot\text{mol}$

1.1.3 ปริมาณสัมพันธ์ของแก๊ส

1) การคำนวณปริมาณสัมพันธ์ของแก๊ส

การคำนวณปริมาณสัมพันธ์ของแก๊ส อาศัยหลักปริมาณสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (g) จำนวนโมล (n) ปริมาตร (V) และจำนวนอนุภาค

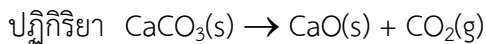
ตัวอย่าง 1.8 คำนวณจำนวนโมลของแก๊ส N_2 ที่มีปริมาตร 1.75 L ที่ STP

วิธีคิด เนื่องจาก 1 โมล ของแก๊สใดๆ ที่ STP มีปริมาตรเท่ากับ 22.4 L ดังนั้น จำนวนโมลของแก๊ส N_2 1.75 L ที่ STP จึงเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{mol N}_2 &= 1.75 \text{ L} \times \left(\frac{1 \text{ mol}}{22.4 \text{ L}} \right) \\ &= 7.81 \times 10^{-2} \text{ mol} \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนโมลของแก๊ส N_2 เท่ากับ 7.81×10^{-2} โมล

ตัวอย่าง 1.9 ควิกไลม์ (quicklime, CaO) ถูกเตรียมขึ้นมาจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) คำนวณปริมาตรของแก๊ส CO_2 ที่ได้จากการสลายตัวของ CaCO_3 น้ำหนัก 152 กรัม



วิธีคิด จากสมการที่ดุลแล้ว อัตราส่วนโมลของ CaCO_3 ที่สลายตัวต่อแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้น เป็น 1:1 ดังนั้น ถ้าทราบจำนวนโมลของ CaCO_3 ที่สลายตัวจะสามารถทราบจำนวนโมลของ CO_2 ที่เกิดขึ้น

$$\text{จำนวนโมลของ CaCO}_3 \text{ ที่สลาย} = \frac{152 \text{ g}}{100.1 \text{ g}} = 1.52 \text{ mol}$$

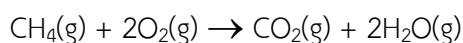
ดังนั้น จำนวนโมลของแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 1.52 โมลด้วย

$$\text{ปริมาตรของแก๊ส CO}_2 \text{ จำนวน 1.52 โมล} = 1.52 \text{ mol} \times \frac{22.4 \text{ L}}{1 \text{ mol}} = 34.1 \text{ L ที่ STP}$$

ดังนั้น ปริมาตรของแก๊ส CO_2 เท่ากับ 34.1 ลิตร ที่ STP

ตัวอย่าง 1.10 แก๊ส CH_4 ปริมาตร 2.80 L ที่ 25°C 1.65 atm เผาไหม้กับออกซิเจนที่มากเกินไป
คำนวณปริมาตรของแก๊ส CO_2 ที่เกิดขึ้นที่ 2.50 atm 125°C

วิธีคิด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการผสม CH_4 และ O_2 เป็นดังสมการ



คำนวณจำนวนโมล จากสมการแก๊สอุดมคติ ($PV=nRT$)

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1.65 \text{ atm})(2.80 \text{ L})}{(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})} = 1.89 \text{ mol}$$

เนื่องจากอัตราส่วนโดยโมลของ CH_4 ต่อ O_2 เป็น 1:1

ดังนั้น ถ้ามี CH_4 1.89 โมลจะเกิดแก๊ส CO_2 1.89 โมล

เนื่องจากสภาวะที่กำหนดไม่ใช่ที่ STP ดังนั้น การคำนวณปริมาตรของ CO_2 จึงต้องอาศัยสมการแก๊สอุดมคติ

$$n = 1.89 \text{ mol}$$

$$T = 125^\circ\text{C} + 273 = 398 \text{ K}$$

$$P = 2.50 \text{ atm}$$

จากสมการแก๊สอุดมคติ ($PV=nRT$)

$$V = \frac{(1.89 \text{ mol})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(398 \text{ K})}{2.50 \text{ atm}} = 2.47 \text{ L}$$

ดังนั้น ปริมาตรแก๊ส CO_2 เท่ากับ 2.47 ลิตร

2) สมการแก๊สอุดมคติกับน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของแก๊ส

สมการแก๊สอุดมคติสามารถคำนวณเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของแก๊สได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลกับน้ำหนัก คือ $n=g/M$ แทนลงในสมการ (1.30) จะได้

$$PV = \left(\frac{g}{M}\right)RT \quad \text{.....(1.32)}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } M = \left(\frac{g}{V}\right)\left(\frac{RT}{P}\right) \quad \text{.....(1.33)}$$

จากความหนาแน่น (d) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนัก (g) ต่อปริมาตร (V) กล่าวคือ $d = g/V$ แทน d ค่าลงในสมการ (1.33) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลกับความหนาแน่นของแก๊ส ดังนี้

$$M = \frac{dRT}{P} \quad \text{.....(1.34)}$$

$$\text{หรือ } d = M\left(\frac{P}{RT}\right) \quad \text{.....(1.35)}$$

เมื่อ g = น้ำหนักของแก๊ส (g)

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส (g/mol)

d = ความหนาแน่นของแก๊ส (g/mL)

ตัวอย่าง 1.11 แก๊สชนิดหนึ่งมีความหนาแน่น 1.95 g/L ที่ความดัน 1.50 atm อุณหภูมิ 27°C จงคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส

วิธีคิด จากสมการ (1.34) $M = \frac{dRT}{P}$

$$d = 1.95 \text{ g/L}$$

$$T = 27^\circ\text{C} + 273 = 300 \text{ K}$$

$$P = 1.50 \text{ atm}$$

$$M = \frac{(1.95 \text{ g/L})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(300 \text{ K})}{1.50 \text{ atm}} = 32.0 \text{ g/mol}$$

ดังนั้น แก๊สชนิดนี้มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 32.0 g/mol

1.1.4 ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สและพฤติกรรมของแก๊สจริง

ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส (kinetic theory of gases) เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายกฎปรากฏการณ์ หรือผลการทดลองที่เกี่ยวกับแก๊ส และพฤติกรรมของแก๊ส เพื่ออธิบายสมบัติต่าง ๆ ของแก๊สโดยศึกษาจากทิศทางเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊สและลักษณะของโมเลกุลแก๊ส

1) ความดันย่อยของแก๊สผสม

การศึกษาพฤติกรรมเกี่ยวกับความดันของแก๊สผสม กล่าวคือ ถ้านำแก๊สสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน โดยแก๊สเหล่านั้นต้องไม่ทำปฏิกิริยากัน ในปี ค.ศ.1801 ดอลตัน (John Dalton) พบว่า “ความดันรวมของแก๊สผสมจะเท่ากับผลรวมของความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดที่ผสมกัน” เรียกกฎนี้ว่า กฎความดันย่อยของดอลตัน (Dalton’s law of partial pressure) จากกฎความดันย่อยของดอลตัน ความดันแก๊สในแก๊สผสม มี 2 ประเภท คือ

(1) ความดันรวม (total pressure) คือความดันทั้งหมดที่วัดได้หลังจากที่แก๊สสองชนิดหรือมากกว่าผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

(2) ความดันย่อย (partial pressure) คือความดันของแก๊สแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแก๊สผสม

กฎความดันย่อยของดอลตัน เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P_{\text{total}} = P_A + P_B + P_C + \dots \quad \dots(1.36)$$

เมื่อ P_{total} = ความดันรวม

P_A , P_B และ P_C = ความดันย่อยของแก๊ส A, B และ C ในแก๊สผสม ตามลำดับ

ในการคำนวณหาความดันย่อยของแก๊สผสม เราสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 ใช้สมการแก๊สอุดมคติ

เมื่อทราบจำนวนโมล ปริมาตร และอุณหภูมิของแก๊สผสมนั้น ๆ สามารถคำนวณหาความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดได้จากสมการแก๊สอุดมคติ ($PV=nRT$) ดังนี้

ความดันของแก๊ส A เขียนได้เป็น $P_A = n_A \left(\frac{RT}{V} \right)$

ทำนองเดียวกัน ความดันของแก๊ส B และแก๊ส C คือ $P_B = n_B \left(\frac{RT}{V} \right)$ และ $P_C = n_C \left(\frac{RT}{V} \right)$

ตามลำดับ จากสมการ (1.36)

$$\begin{aligned} P_{\text{total}} &= n_A \left(\frac{RT}{V} \right) + n_B \left(\frac{RT}{V} \right) + n_C \left(\frac{RT}{V} \right) + \dots \\ &= (n_A + n_B + n_C + \dots) \left(\frac{RT}{V} \right) \\ P_{\text{total}} &= n_t \left(\frac{RT}{V} \right) \end{aligned} \quad \dots(1.37)$$

เมื่อ P_{total} = ความดันรวม
 n_t = จำนวนโมลรวม ($n_A + n_B + n_C + \dots$)

ตัวอย่าง 1.12 แก๊สประดำน้ำขนาดความจุ 5.0 L บรรจุแก๊สผสมระหว่าง O_2 ปริมาตร 4.6 L กับแก๊ส He ปริมาตร 1.2 L ที่ 25°C ที่ความดันบรรยากาศ คำนวณความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิด และความดันรวมของแก๊สผสมในถัง

วิธีคิด ความดันรวม หาได้จากสมการ (1.37) $P_{\text{total}} = n_t \left(\frac{RT}{V} \right)$

คำนวณจำนวนโมล O_2 และ He ที่ใช้ผสมในถังแก๊สนี้ โดยใช้สมการแก๊สอุดมคติ $n = \frac{PV}{RT}$

$$n_{O_2} = \frac{(1 \text{ atm})(4.6 \text{ L})}{(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})} = 0.19 \text{ mol}$$

$$n_{He} = \frac{(1 \text{ atm})(1.2 \text{ L})}{(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})} = 0.049 \text{ mol}$$

ดังนั้น ความดันรวมของแก๊ส หาได้จากสมการ (1.37)

$$P_{\text{total}} = (n_{O_2} + n_{He}) \left(\frac{RT}{V} \right)$$

$$P_{\text{total}} = (0.19 \text{ mol } O_2 + 0.049 \text{ mol He}) \left(\frac{(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})}{5.0 \text{ L}} \right)$$

$$= 1.17 \text{ atm}$$

ดังนั้น ความดันรวมเท่ากับ 1.17 atm

หรืออาจคำนวณได้จากสมการ (1.36) โดยต้องหาความดันย่อยของ O_2 และ He จากสมการแก๊สอุดมคติ ($PV=nRT$) จะได้

$$P_{O_2} = \frac{(0.19 \text{ mol})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})}{5.0 \text{ L}} = 0.93 \text{ atm}$$

$$P_{He} = \frac{(0.049 \text{ mol})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol})(298 \text{ K})}{5.0 \text{ L}} = 0.24 \text{ atm}$$

ดังนั้น

$$P_{\text{total}} = P_{O_2} + P_{He}$$

$$= 0.93 + 0.24 = 1.17 \text{ atm}$$

วิธีที่ 2 ใช้ความสัมพันธ์เศษส่วนโมลของแก๊สผสม

ถ้าทราบจำนวนโมลหรือปริมาณแก๊สเป็นกรัมและความดันรวม สามารถคำนวณความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิด

$$P_A = X_A(P_{\text{total}}) \quad \dots(1.38)$$

เมื่อ P_A = ความดันย่อยของแก๊ส A

X_A = เศษส่วนโมลของแก๊ส A

P_{total} = ความดันรวม

เศษส่วนโมลของแก๊ส คืออัตราส่วนจำนวนโมลของแก๊สชนิดหนึ่งต่อจำนวนโมลทั้งหมดของแก๊สผสม

$$X_A = \frac{n_A}{n_{\text{total}}} \quad \dots(1.39)$$

เมื่อ n_A = จำนวนโมลของแก๊ส A

n_{total} = จำนวนโมลทั้งหมดของแก๊สผสม

ตัวอย่าง 1.13 คำนวณความดันย่อยของแก๊สผสมระหว่างแก๊ส F_2 50.0 g แก๊ส O_2 80.0 g และแก๊ส N_2 60.0 g ที่มีความดันรวมเท่ากับ 750 torr

วิธีคิด ความดันย่อยในกรณีนี้ไม่สามารถหาได้จากสมการแก๊สอุดมคติ และโจทย์กำหนดความดันรวม ดังนั้นความดันย่อยหาได้จากสมการ (1.38)

คำนวณจำนวนโมล

$$n_{F_2} = 50 \text{ g } F_2 \times \left(\frac{1 \text{ mol } F_2}{38.0 \text{ g } F_2} \right) = 1.31 \text{ mol}$$

$$n_{O_2} = 80 \text{ g } O_2 \times \left(\frac{1 \text{ mol } O_2}{32.0 \text{ g } O_2} \right) = 2.50 \text{ mol}$$

$$n_{N_2} = 60 \text{ g } N_2 \times \left(\frac{1 \text{ mol } N_2}{28.0 \text{ g } N_2} \right) = 2.14 \text{ mol}$$

จำนวนโมลรวม = 1.31 + 2.50 + 2.14 = 5.95 โมล

คำนวณเศษส่วนจำนวนโมลของแก๊สแต่ละชนิด

$$\text{เศษส่วนโมลของ } F_2 = \frac{1.31}{5.95} = 0.220$$

$$\text{เศษส่วนโมลของ } O_2 = \frac{2.50}{5.95} = 0.420$$

$$\text{เศษส่วนโมลของ } N_2 = \frac{2.14}{5.95} = 0.360$$

คำนวณความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิด จากสมการ (1.38) จะได้

$$P_{F_2} = 0.220 \times 750 \text{ torr} = 165 \text{ torr}$$

$$P_{O_2} = 0.420 \times 750 \text{ torr} = 315 \text{ torr}$$

$$P_{N_2} = 0.360 \times 750 \text{ torr} = 270 \text{ torr}$$

2) กฎการแพร่ของแก๊ส

การแพร่ของแก๊ส (diffusion of gas) เป็นการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สชนิดหนึ่ง เคลื่อนที่กระจายออกไปจากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปหาบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า โดยแก๊สจะกระจายตัวให้มีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่า ๆ กันทุกบริเวณของภาชนะที่บรรจุ แก๊สนั้นจึงหยุดแพร่ แต่ยังคงมีการเคลื่อนที่โมเลกุลของแก๊สตลอดเวลา

ปี ค.ศ.1846 เกรแฮม (Thomas Graham) นักเคมีชาวสก็อต พบว่าอัตราการแพร่ของแก๊สที่เบากว่า (แก๊สที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลน้อยกว่า) จะแพร่ได้เร็วกว่าแก๊สที่หนักกว่า (แก๊สที่มีความหนาแน่นของโมเลกุลมากกว่า) เรียกว่า กฎการแพร่ของเกรแฮม (Graham's law of diffusion) กล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊สสองชนิด ภายใต้ความดันและอุณหภูมิเดียวกัน พบว่า “อัตราการแพร่ของแก๊สหนึ่ง ๆ แปรผกผันกับรากที่สองของความหนาแน่นของโมเลกุลของแก๊สนั้น ๆ”

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \text{.....(1.40)}$$

$$R = \frac{k}{\sqrt{d}} \quad \text{.....(1.41)}$$

เมื่อความหนาแน่นของโมเลกุลแก๊ส (d) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส (M) สมการ (1.41) เขียนแสดงอัตราการแพร่ของแก๊สสัมพันธ์กับความหนาแน่นของโมเลกุลแก๊สและน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส ได้ดังนี้

$$R = \frac{k}{\sqrt{d}} = \frac{k}{\sqrt{M}} \quad \text{.....(1.42)}$$

เมื่อ R = อัตราการแพร่ของแก๊ส

d = ความหนาแน่นของโมเลกุลแก๊ส

M = น้ำหนักโมเลกุลแก๊ส

เมื่อเปรียบเทียบแก๊สสองชนิด สมมติเป็นแก๊ส A กับแก๊ส B อัตราการแพร่ของแก๊สแต่ละชนิดตามสมการ (1.42) เขียนได้ดังนี้

แก๊ส A อัตราการแพร่ เขียนได้เป็น

$$R_A = \frac{k}{\sqrt{d_A}} = \frac{k}{\sqrt{M_A}}$$

แก๊ส B อัตราการแพร่ เขียนได้เป็น

$$R_B = \frac{k}{\sqrt{d_B}} = \frac{k}{\sqrt{M_B}}$$

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการแพร่ระหว่างแก๊ส A และแก๊ส B เขียนได้ดังนี้

$$\frac{R_A}{R_B} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad \text{.....(1.43)}$$

เมื่อ R_A และ R_B = อัตราการแพร่ของแก๊ส A และ B ตามลำดับ

d_A และ d_B = ความหนาแน่นของโมเลกุลแก๊ส A และ B ตามลำดับ

M_A และ M_B = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส A และ B ตามลำดับ

เนื่องจากอัตราการแพร่ของแก๊ส (R) แปรผกผันกับเวลา (t) กล่าวคือ แก๊สที่ใช้เวลาในการแพร่มากจะมีอัตราการแพร่ต่ำ เขียนได้ดังนี้

$$R \propto \frac{1}{t} \quad \text{.....(1.44)}$$

$$R = \frac{k}{t} \quad \text{.....(1.45)}$$

$$Rt = k \quad \text{.....(1.46)}$$

จากสมการ (1.46) ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง แก๊ส A กับแก๊ส B จะได้

$$R_A t_A = R_B t_B \quad \text{.....(1.47)}$$

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{t_B}{t_A} \quad \text{.....(1.48)}$$

ถ้าเปรียบเทียบอัตราการแพร่ของแก๊สในรูปการเคลื่อนที่ระยะทาง (S) ต่อหน่วยเวลา (t) จะเขียนได้เป็น $R = \frac{S}{t}$

ดังนั้น จากสมการ (1.48) อัตราการแพร่ของแก๊ส A และแก๊ส B ในรูปของระยะทาง (s) และเวลา (t) เขียนได้เป็น

$$\frac{R_A}{R_B} = \left(\frac{S_A}{t_A} \right) \left(\frac{t_B}{S_B} \right) \quad \text{.....(1.49)}$$

จากสมการ (1.43) และ (1.49) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{R_A}{R_B} = \left(\frac{S_A}{S_B} \right) \left(\frac{t_B}{t_A} \right) = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad \text{.....(1.50)}$$

จากสมการ (1.50) ถ้าในกรณีที่มีการแพร่ของแก๊สมีระยะทางเท่ากัน ($S_A=S_B$) จะได้

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{t_B}{t_A} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad \text{.....(1.51)}$$

จากสมการ (1.50) ในกรณีที่มีการแพร่ของแก๊สมีเวลาเท่ากัน ($t_A=t_B$) จะได้

$$\frac{R_A}{R_B} = \frac{S_A}{S_B} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad \text{.....(1.52)}$$

ตัวอย่าง 1.14 คำนวณอัตราส่วนของอัตราการแพร่ของแก๊ส H_2 และ UF_6 ซึ่งเป็นแก๊สที่ใช้ในกระบวนการผลิตแท่งเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

วิธีคิด จากสมการ (1.43)
$$\frac{R_{H_2}}{R_{UF_6}} = \sqrt{\frac{M_{UF_6}}{M_{H_2}}}$$

M_{H_2} = น้ำหนักโมเลกุลของ H_2 = 2.02 g/mol

M_{UF_6} = น้ำหนักโมเลกุลของ UF_6 = 352.02 g/mol

$$\frac{R_{H_2}}{R_{UF_6}} = \sqrt{\frac{352.02}{2.02}} = 13.2$$

ดังนั้น อัตราการแพร่ของแก๊ส H_2 จะมีอัตราการแพร่ได้เร็วกว่าแก๊ส UF_6 ประมาณ 13 เท่า

ตัวอย่าง 1.15 แก๊ส H_2 มีปริมาตร 1 L มีความหนาแน่น 0.09 g/L แพร่กระจายหมดในเวลา 1 นาที คำนวณหาเวลาที่แก๊ส NH_3 ซึ่งมีปริมาตร 1 L ความหนาแน่น 0.71 g/L แพร่กระจายได้ภาวะเดียวกัน

วิธีคิด จากสมการ (1.51)
$$\frac{t_B}{t_A} = \sqrt{\frac{d_B}{d_A}}$$

$$\frac{t_{H_2}}{t_{NH_3}} = \sqrt{\frac{d_{H_2}}{d_{NH_3}}}$$

$$\frac{1}{t_{NH_3}} = \sqrt{\frac{0.09}{0.71}}$$

$$t_{NH_3} = 2.8$$

ดังนั้น NH_3 ปริมาตร 1 ลิตร แพร่กระจายหมดในเวลา 2.8 นาที

3) ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส

ในช่วงศตวรรษที่ 17 นักวิทยาศาสตร์ได้สนใจศึกษาสมบัติของแก๊สในระดับโมเลกุล ในปี ค.ศ.1738 แบรินูลลี (Daniel Bernoulli) นักคณิตศาสตร์และฟิสิกส์ชาวสวิสได้เริ่มศึกษาสมบัติของแก๊สในระดับโมเลกุลและได้เสนอทฤษฎีแนวคิดทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส เพื่อใช้อธิบายกฎของบอยล์โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊ส จึงถือได้ว่า แบรินูลลีเป็นบิดาของทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส

ในศตวรรษที่ 19 โบลต์ซมันน์ (Ludwig Eduard Boltzmann) และ แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) พบว่าสมบัติทางกายภาพของแก๊สอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของแต่ละโมเลกุลของแก๊สเหล่านั้น ทฤษฎีสำคัญที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของแก๊ส เรียกว่า ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส

ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส คือทฤษฎีเพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมของแก๊สโดยการใช้แบบจำลองหรือทฤษฎีในระดับจุลภาค กล่าวคือ เป็นการศึกษาโมเลกุลของแก๊สเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเพื่อเป็นตัวแทนของโมเลกุลล้าน ๆ โมเลกุลในระดับมหภาค

ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊ส มีแนวคิดที่สำคัญคือ อนุภาคของแก๊สมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาเมื่อแก๊สมีการเคลื่อนที่ย่อมมีพลังงานจลน์โมเลกุลด้วย การศึกษาทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สอาศัยสมมติฐานดังนี้

1) แก๊สประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมากที่มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดภาชนะที่บรรจุ จนถือได้ว่าอนุภาคของแก๊สไม่มีปริมาตร

2) โมเลกุลของแก๊สอยู่ห่างกันมาก ทำให้แรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างโมเลกุลน้อยมาก จนถือได้ว่าไม่มีแรงกระทำต่อกัน

3) โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วในแนวเส้นตรง เป็นอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่และไม่เป็นระเบียบ จนกว่าจะมีการชนกันเองระหว่างโมเลกุลของแก๊ส หรือผนังภาชนะจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่กันได้ แต่พลังงานรวมของระบบคงที่ ณ อุณหภูมิเดียวกัน โมเลกุลของแก๊สแต่ละโมเลกุลมีการเคลื่อนที่อย่างไร้ระเบียบ ที่เรียกว่าการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) คือ การเคลื่อนที่ที่เปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลา

4) โมเลกุลของแก๊สที่ชนกันเอง หรือชนกับผนังภาชนะจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่กันได้ แต่พลังงานรวมของระบบคงที่ การชนนี้เกิดขึ้นบ่อยครั้งจนทำให้การเคลื่อนที่ของแก๊สไม่เป็นระเบียบ ซึ่งการชนนี้เป็นแบบยืดหยุ่น (elastic) คือพลังงานรวมของแก๊สทั้งสองโมเลกุลที่เข้าชนกันไม่เปลี่ยนแปลง โมเลกุลหนึ่งสูญเสียพลังงานจลน์ไปเท่าใด อีกโมเลกุลจะรับพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นเท่านั้น (แก๊ส 1 โมลที่ STP จะมีการชน 10^{30} ครั้งต่อวินาที โดยประมาณ) ถ้าสมมติว่าการชนไม่เป็นแบบยืดหยุ่น พลังงานจลน์รวมจะต้องลดลง โมเลกุลทั้งสองที่ชนกันจะสูญเสียพลังงานจลน์ไปเป็นพลังงานรูปอื่น ถ้าเป็นเช่นนั้นโมเลกุลของแก๊สย่อมจะเคลื่อนที่ช้าลงจนกระทั่งหยุดนิ่ง

5) แก๊สแต่ละโมเลกุลมีพลังงานจลน์ต่างกัน แต่พลังงานจลน์เฉลี่ยของโมเลกุลทั้งหมดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของแก๊ส ($KE \propto T$) และพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สใด ๆ จะเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

พลังงานจลน์เฉลี่ย (KE) ของโมเลกุล มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุลและความเร็ว ดังสมการ

$$KE = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \quad \dots\dots(1.53)$$

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

เมื่อ $KE =$ พลังงานจลน์เฉลี่ย
 $m =$ น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส
 $\bar{v}^2 =$ ความเร็วกำลังสองเฉลี่ย

พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สใดๆ จะเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน ดังนั้น ถ้าเปรียบเทียบแก๊ส 2 ชนิด คือแก๊สชนิด A และแก๊ส B พลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊สเขียนได้เป็น

$$KE_A = KE_B \quad \text{.....(1.54)}$$

$$\frac{1}{2} m_A \bar{v}_A^2 = \frac{1}{2} m_B \bar{v}_B^2 \quad \text{.....(1.55)}$$

จากสมการ (1.55) เขียนสมการในรูปเปรียบเทียบของน้ำหนักของแก๊สชนิด A และแก๊ส B เขียนได้เป็น

$$\frac{\bar{v}_A^2}{\bar{v}_B^2} = \frac{m_B}{m_A} \quad \text{.....(1.56)}$$

จากสมการ (1.56) เมื่อนำหนักของแก๊ส (m) แปรผันกับน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส (M) เขียนได้เป็น

$$\frac{\bar{v}_A^2}{\bar{v}_B^2} = \frac{M_B}{M_A} \quad \text{.....(1.57)}$$

เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลของแก๊สเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักแก๊ส สมการ (1.57) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{\bar{v}_A}{\bar{v}_B} = \sqrt{\frac{m_B}{m_A}} = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} \quad \text{.....(1.58)}$$

เมื่อ \bar{v}_A และ $\bar{v}_B =$ ความเร็วของโมเลกุลแก๊สชนิด A และ B ตามลำดับ
 m_A และ $m_B =$ น้ำหนักของแก๊สชนิด A และ B ตามลำดับ
 M_A และ $M_B =$ น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สชนิด A และ B ตามลำดับ

ดังนั้น สมการ (1.58) สอดคล้องกับกฎการแพร่ผ่านของเกรแฮม เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (1.52) จะได้ว่าอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลแก๊สเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของโมเลกุลแก๊ส

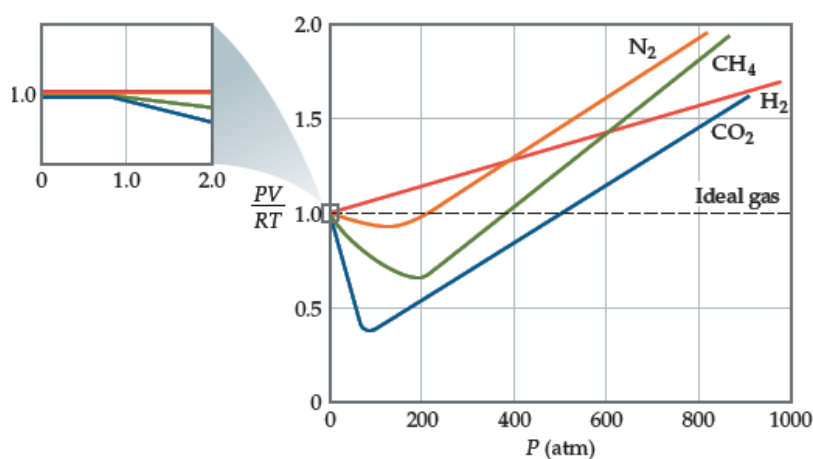
4) พฤติกรรมของแก๊สจริง

แก๊สจริง (real gas) คือแก๊สในธรรมชาติเกือบทั้งหมด แก๊สจริงมีพฤติกรรมไม่สอดคล้องตรงกับสมการของแก๊สอุดมคติ (ยกเว้นแก๊สมีสกุลบางชนิด) แก๊สที่มีอยู่จริงตามธรรมชาติมีหลายชนิด บางชนิดเป็นประโยชน์ต่อสิ่งมีชีวิต แต่บางชนิดเป็นพิษต่อมนุษย์

จากสมการแก๊สอุดมคติ $PV=nRT$ ถ้าใช้แก๊สอุดมคติที่มีจำนวนโมลเท่ากับ 1 โมล จะได้ค่า PV/RT จะเท่ากับ 1 เสมอ ไม่ว่าความดันของแก๊สจะเป็นเท่าใดก็ตาม

$$\frac{PV}{RT} = 1 \quad \dots\dots(1.59)$$

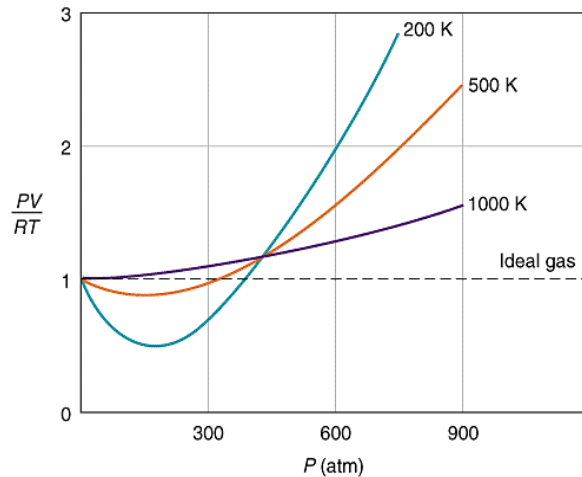
ค่าอัตราส่วน PV/RT เรียกว่า ค่าแฟกเตอร์การอัดของแก๊ส (compressibility factor) สำหรับแก๊สจริงจะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแก๊สอุดมคติได้ที่มีความดันต่ำมาก ๆ และอุณหภูมิสูงเท่านั้น เพราะเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจากแก๊สอุดมคติอย่างมาก ดังนั้น แก๊สจริงจำนวน 1 โมลเท่ากันเมื่อมีความดันสูงขึ้น ค่า PV/RT จะไม่เท่ากับ 1 และจะแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของแก๊ส จากการติดตามสมบัติต่าง ๆ ของแก๊สที่วัดได้จากการทดลอง ได้แก่ P , T , V และ n จะพบว่าค่า PV/RT ของแก๊สจริงขึ้นกับความดัน ซึ่งถ้าเขียนกราฟระหว่าง PV/RT กับ P จะได้กราฟดังภาพที่ 1.9 ซึ่งในกรณีของแก๊สอุดมคติ (เส้นประ) ค่า PV/RT จะคงที่เท่ากับ 1 เสมอ เส้นประที่ปรากฏมีความชันเป็นศูนย์ทุกช่วงความดัน



ภาพที่ 1.9 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P ของแก๊สจริงบางชนิด. ที่มาจาก *Chemistry: The Central Science* (p.419), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

แก๊สจริง 4 ชนิดคือ N_2 , H_2 , CH_4 และ CO_2 ที่อุณหภูมิ $0^\circ C$ ถ้าแก๊สเหล่านี้ประพฤติตนเช่นเดียวกับแก๊สอุดมคติ เส้นกราฟจะเป็นเส้นตรงเหมือนเส้นประ แต่จากการทดลองพบว่าแก๊สทุกชนิดไม่เป็นเช่นนั้น จากกราฟภาพที่ 1.9 ในช่วงความดันน้อย ๆ ($<1 atm$) แก๊สเหล่านี้มีค่า PV/RT ใกล้เคียงกับ 1 นั่นคือ ผลคูณของ PV ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่อความดันสูงขึ้น จะเกิดการเบี่ยงเบนไปเรื่อย ๆ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อโมเลกุลอยู่ใกล้กันมากขึ้น ที่ความดันสูง ๆ แก๊สจะมีความหนาแน่นสูงขึ้นและโมเลกุลอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น

แรงระหว่างโมเลกุลจึงมีผลต่อพฤติกรรมของแก๊สจริง ช่วงความดันระหว่าง 1-200 atm แก๊ส N_2 มีค่า PV/RT น้อยกว่า 1 หลังจากนั้นจะมีค่า PV/RT มากกว่า 1 และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความดันที่เพิ่มขึ้น ส่วน CH_4 ในช่วงความดัน 1-200 atm ค่า PV/RT จะลดลงแล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งที่ความดันประมาณ 400 atm และ CO_2 มีลักษณะคล้ายกับ CH_4 แต่ค่า PV/RT ของ CO_2 จะลดลงมากกว่าของ CH_4 แก๊สจริงทุกตัวจะมีแนวโน้มค่า PV/RT เพิ่มขึ้นและค่า PV/RT สูงกว่า 1 เมื่อความดันสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ



ภาพที่ 1.10 กราฟระหว่าง PV/RT กับ P สำหรับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่าง ๆ. ที่มาจาก *Chemistry: The Central Science* (p.420), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

จากการเขียนกราฟหาค่าของ PV/RT กับ P ของแก๊ส N_2 ที่อุณหภูมิใด ๆ (ดังภาพที่ 1.10) จะพบว่ายิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของ PV/RT ของ N_2 จะมีค่าเข้าใกล้แก๊สอุดมคติมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อความดันยิ่งต่ำและอุณหภูมียิ่งสูง แก๊สจริงจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ

พฤติกรรมของแก๊สจริงที่เบี่ยงเบนไปจากแก๊สอุดมคติเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) โดยนักฟิสิกส์ชาวเนเธอร์แลนด์ชื่อ วาลส์ (Johannes Diderik van der Waals, ค.ศ.1873) ได้ศึกษาความสัมพันธ์เพื่ออธิบายพฤติกรรมของแก๊สจริง โดยอาศัยสมการของแก๊สอุดมคติ

สมการแวนเดอร์วาลส์ เขียนได้เป็น

$$P = \frac{nRT}{(V-nb)} - a\left(\frac{n}{V}\right)^2 \quad \text{.....(1.60)}$$

$$\text{หรือ} \quad \left[P + a\left(\frac{n}{V}\right)^2 \right] (V - nb) = nRT \quad \text{.....(1.61)}$$

เมื่อ P = ความดันแก๊ส (atm)

V = ปริมาตรแก๊ส (L)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

n = จำนวนโมลของแก๊ส (mol)

a และ b = ค่าคงที่แวนเดอร์วาลส์ (ซึ่งเป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับแก๊สแต่ละชนิด ตารางที่ 1.2)

ตารางที่ 1.2 ค่าคงที่แวนเดอร์วาลส์ของแก๊สจริง

แก๊ส	a (atm L ² /mol ²)	b (L/mol)
He	0.034	0.02370
Ne	0.211	0.0171
Ar	1.35	0.0322
Kr	2.32	0.0398
Xe	4.19	0.0511
H ₂	0.244	0.0266
N ₂	1.39	0.0391
O ₂	1.36	0.0318
Cl ₂	6.49	0.0562
CO ₂	3.59	0.0427
CH ₄	2.25	0.0428
NH ₃	4.17	0.0371
H ₂ O	5.46	0.0305

หมายเหตุ. จาก *Chemistry: The Central Science* (p. 422), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

ตัวอย่าง 1.16 แก๊สมีเทน (CH₄) 5,000 โมล ในภาชนะ 1,000 L ที่ 25°C ทำให้ร้อนถึง 1,000°C ความดันแก๊ส CH₄ นี้เป็นเท่าใด ถ้าสมมติให้แก๊ส CH₄ มีพฤติกรรมเป็นแบบ ก) แก๊สจริง และ ข) แก๊สอุดมคติ

วิธีคิด T = 1,000°C + 273 = 1,273 K

$$V = 1,000 \text{ L}$$

$$n = 5,000 \text{ mol}$$

$$R = 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol}$$

จากตารางที่ 1.2 a = 2.25 atm L²/mol²

$$b = 0.0428 \text{ L/mol}$$

ก) ความดันของแก๊สจริง หาได้จากสมการแวนเดอร์วาลส์ สมการ (1.60)

$$P = \frac{(5,000 \text{ mol})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol})(1,273 \text{ K})}{(1,000 \text{ L} - (5,000 \text{ mol})(0.0428 \text{ L/mol}))} - 2.25 \text{ L}^2 \text{atm/mol}^2 \left(\frac{5,000 \text{ mol}}{1,000 \text{ L}} \right)^2$$

$$= 608.1 \text{ atm}$$

ข) ถ้าแก๊ส CH₄ นี้มีพฤติกรรมแบบแก๊สอุดมคติ ความดันของแก๊สหาได้จาก $P = \frac{nRT}{V}$

$$P = \frac{(5,000 \text{ mol})(0.082 \text{ L} \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{mol})(1,273 \text{ K})}{1,000 \text{ L}} = 522.3 \text{ atm}$$

สรุปท้ายบทเรียน

การศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของแก๊ส เราแบ่งแก๊สออกเป็นสองชนิดคือแก๊สอุดมคติและแก๊สจริง โดยที่แก๊สอุดมคติเป็นแก๊สที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล และไม่มีขนาดเมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างโมเลกุล กฎของแก๊ส เป็นการอธิบายพฤติกรรมของแก๊ส ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ปริมาตรแก๊ส อุณหภูมิ และจำนวนโมลของแก๊ส ประกอบด้วย กฎของบอยล์ กฎของชาร์ล กฎของเก-ลูซัก และกฎของอวอกาโดร ซึ่งแก๊สอุดมคติจะมีพฤติกรรมตามกฎของแก๊สอุดมคติที่เรียกว่า สภาวะแก๊สอุดมคติ การคำนวณปริมาณสัมพันธ์ของแก๊ส อาศัยหลักปริมาณสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก (g) จำนวนโมล (n) ปริมาตร (V) และจำนวนอนุภาค การคำนวณเกี่ยวกับน้ำหนักโมเลกุลและความหนาแน่นของแก๊ส จากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลกับน้ำหนักโดยอาศัยสมการแก๊สอุดมคติ

แก๊สผสมตั้งแต่สองชนิดหรือมากกว่าสองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ความดันรวมของแก๊สผสมจะเท่ากับผลรวมของความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิดที่ผสมกัน ตามกฎความดันย่อยของดอลตัน แก๊สที่มีขนาดต่างกัน จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่างกัน ทำให้การแพร่ของแก๊สแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน การคำนวณหาการแพร่ของแก๊สแต่ละชนิด สามารถคำนวณได้จากกฏการแพร่ของเกรแฮม กล่าวคือ อัตราการแพร่ของแก๊ส เป็นสัดส่วนผกผันกับรากที่สองของน้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส

ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สอธิบายพฤติกรรมของแก๊สโดยการใช้แบบจำลองหรือทฤษฎีในระดับจุลภาค ที่เป็นการศึกษาโมเลกุลของแก๊สเพียงหนึ่งหรือสองโมเลกุลเพื่อเป็นตัวแทนของโมเลกุลในระดับมหัพภาค สรุปได้คือ แก๊สประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมากแต่ละโมเลกุลของแก๊สอยู่ไกลกันมากเมื่อเทียบกับขนาดของโมเลกุล จนถือว่าไม่มีขนาดของโมเลกุลมาเกี่ยวข้อง โมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาโดยเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่มและเกิดการชนระหว่างโมเลกุลของแก๊ส จำนวนบ่อยครั้งมาก ๆ แก๊สไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล ยกเว้นเมื่อเกิดการกระทบกันและเมื่อโมเลกุลเข้าชนกัน ซึ่งจะเป็นการชนแบบยืดหยุ่น พลังงานอย่างเดียวกับแก๊สก็คือพลังงานการเคลื่อนที่ไปมาก็คือพลังงานจลน์

แก๊สจริงเป็นแก๊สที่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลและมีขนาดของโมเลกุล ทำให้แก๊สจริงไม่มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับแก๊สอุดมคติในสภาวะปกติ แต่แก๊สจริงจะมีพฤติกรรมเป็นแบบแก๊สอุดมคติได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความดันต่ำมาก ๆ หรือมีอุณหภูมิสูงมาก ๆ

กิจกรรม

ขั้นตอน	วิธีการ
แนะนำโจทย์ปัญหา (P)	แจกใบกิจกรรม 1.1
ไตร่ตรองทางแก้ไขเฉพาะตน (E)	แต่ละคนบอกวิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา (5 นาที)
ระดมสมองโดยกลุ่ม (T)	ให้รวมกลุ่ม มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่มระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการร่วมแสดงความคิดเห็น (10 นาที)
สื่อสารทางออก (C)	ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย (10 นาที)
ถอดรหัสปรับใช้ (D)	ผู้สอนสรุป ความถูกต้องและความผิดพลาด โดยเพิ่มเติมประเด็นที่เกี่ยวข้องให้สมบูรณ์

แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

1. จงคำนวณปริมาตรของแก๊ส CO_2 20 กรัม ที่บรรจุในภาชนะทำให้มีความดัน 740 mmHg ที่ 30°C สมมติว่าแก๊สนี้มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของแก๊สอุดมคติ
2. แก๊สฮีเลียมที่บรรจุอยู่ในบอลลูนยักษ์ลูกหนึ่งมีปริมาตร 1000 L ที่ 0°C เมื่อเผาให้ร้อนขึ้นจนถึง 200°C โดยความดันคงที่ จงหาปริมาตรของแก๊สฮีเลียม
3. แก๊สชนิดหนึ่งบรรจุในภาชนะมีปริมาตร 430 mL ที่อุณหภูมิ 28.2°C และความดัน 754.2 mmHg ถ้าทำให้แก๊สมีอุณหภูมิลดลงเป็น 20.0°C ความดันของแก๊สมีค่าเท่าใด
4. แก๊สมีปริมาตร 400 mL มีความดัน 0.92 atm และอุณหภูมิ 21°C จงหาปริมาตรแก๊สนี้ที่ความดัน 1.5 atm และอุณหภูมิ 21°C
5. ถ้าบรรจุแก๊สออกซิเจน 10 L ที่มีความดัน 50 atm และอุณหภูมิ 25°C ลงในถังที่ทนความดันได้ 70 atm แล้วทิ้งไว้ในโกดังเก็บของซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 38°C ถังจะระเบิดหรือไม่
6. นำแก๊ส N_2 200 mL ที่ 25°C ความดัน 250 torr และ O_2 350 mL ที่ 25°C ความดัน 300 torr มาผสมในภาชนะปริมาตร 300 mL จงหาความดันรวมของแก๊สผสมที่ 25°C
7. แก๊สผสมประกอบด้วยนีออน (Ne) 4.46 mol อาร์กอน (Ar) 0.74 mol และซีนอน (Xe) 2.15 mol จงคำนวณความดันย่อยของแก๊สทั้งหมด ถ้าความดันรวมเท่ากับ 2.00 atm ณ อุณหภูมิห้อง
8. แก๊ส A มีปริมาตร 125 mL วัดที่ 0.6 atm และแก๊ส B มีปริมาตร 150 mL วัดที่ 0.8 บรรยากาศ ถ้าย้ายแก๊สทั้งสองเข้าสู่ภาชนะที่มีความจุ 500 mL จงคำนวณหาความดันรวมของแก๊สผสม ในภาชนะ ณ อุณหภูมิเดียวกัน
9. ภาชนะใบหนึ่งมีปริมาตร 22.4 L บรรจุแก๊ส H_2 จำนวน 2 mol และ N_2 จำนวน 1 mol ที่ 273.15 K จงคำนวณ (ก) ความดันย่อยของแก๊สแต่ละตัว และ (ข) ความดันรวม
10. จงคำนวณความดันของแก๊ส CO_2 18.617 mol ซึ่งมีปริมาตร 10 L ที่ 100°C โดยใช้ (ก) กฎของแก๊สอุดมคติ และ (ข) สมการแวนเดอร์วาลส์

เอกสารอ้างอิง

- โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. (2557). *เคมี 3 (แก๊ส เทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลเคมี ไฟฟ้าเคมี จลนศาสตร์เคมี)*. บริษัทด้านสุทธาการพิมพ์ จำกัด.
- รานี สุวรรณพฤษ. (2553). *เคมีทั่วไป สำหรับสาขาวิศวกรรมศาสตร์ เล่ม 1 (พิมพ์ครั้งที่ 3)*. บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด.
- อภิสิทธิ์ ชงเสสน, สรณรินทร์ บังเกิดผล และอาทิตย์ สกลตันติเมธา. (2554). *เคมีทั่วไปสำหรับ วิศวกรรม*. บริษัททริฟเฟิ้ลกรุ๊ป จำกัด.
- อินทรา หาญพงษ์พันธ์ และบัญชา พูลโกคา. (2554). *เคมีทั่วไป สำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์ (ฉบับ ปรับปรุง) (พิมพ์ครั้งที่ 9)*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Averil, B.A. (2012). *Principles of General Chemistry* (Online ed.).
<https://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0m/index.html>
- Brown, L.S., & Holme, T.A. (2018). *Chemistry for Engineering Students* (4th ed.). Thomson Brook Cole.
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J., Woodward, P.M. & Stoltzfus, M.W. (2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson Education, Inc.
- Chang, R., & Goldsby, K.A. (2016). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill.
- Ebbing, D.D., & Gammon, S.D. (2017). *General Chemistry* (11th ed.). Cengage Learning.
- Jespersen, N.D., Brady, J.E., & Hyslop, A. (2012). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc
- Jones, A.Z. (2019, May 04). *Kinetic Molecular Theory of Gases*. ThoughtCo.
<https://www.thoughtco.com/kinetic-theory-of-gases-2699426>
- Kinetic Theory of Gases*. (n.d.). PSC Learning Chemistry.
<https://www.priyamstudycentre.com/2019/04/kinetic-theory-gases.html>
- Kinetic Theory*. (n.d.). <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/kinthe.html>
- Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, D.J., & Bissonnette, C. (2017). *General Chemistry: Principles and Modern Applications* (11th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Overby, J. & Chang, R., (2022). *Chemistry* (14th ed.). McGraw-Hill.
- Silberberg, M.S. (2013). *Principle of General Chemistry* (3rd ed.). McGraw-Hill Publishing Company.
- Silberberg, M.S. & Amateis, P.G. (2021). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (9th ed.). McGraw-Hill Publishing Company.

แผนการสอนสัปดาห์ที่ 2

หน่วยที่ 1 แก๊สและของแข็ง
บทเรียนที่ 1.2 ของแข็ง

จำนวนชั่วโมง 3

จุดประสงค์การสอน (จุดประสงค์ทั่วไป)

1. เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับสมบัติของแข็ง

ผลการเรียนรู้ (จุดประสงค์เฉพาะ)

1. บอกสมบัติของแข็ง
2. อธิบายระบบผลึก
3. อธิบายการเรียงอนุภาคในผลึกของแข็ง
4. อธิบายการศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างผลึกสามัญ

วิธีสอนและกิจกรรมการเรียนการสอน

1. การบรรยาย และอภิปราย
2. กิจกรรมกลุ่มในชั้นเรียน (Work@class)

สื่อการสอน/อุปกรณ์การสอน

1. เอกสารคำสอน รายวิชา เคมี 2
2. เอกสาร power point
3. https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=11425
4. <https://www.facebook.com/chemographics>
5. <https://www.slideshare.net/woravith>

การวัดผล

1. ประเมินจากกิจกรรมในชั้นเรียน
2. ประเมินจากกิจกรรมแบบฝึกหัด หรืองานที่มอบหมาย
3. ประเมินจากการสรุปประเด็นสำคัญ หรือการนำเสนอผลของการสืบค้นที่ได้รับมอบหมาย
4. ประเมินจากการสอบย่อยรายหน่วยเรียน

บทเรียนที่ 1.2 ของแข็ง

1.2.1 สมบัติของแข็ง

ของแข็ง (solid) คือสสารที่อนุภาค (อะตอม ไอออน หรือโมเลกุล) เรียงตัวขึ้นเป็นผลึกของแข็งที่อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนและใกล้ชิดกันมาก จึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง ทำให้ของแข็งมีสมบัติทางกายภาพหลายประการ เช่น

- มีรูปร่างแน่นอน (definite shape) ไม่ขึ้นกับภาชนะที่บรรจุ
- อนุภาคภายในไม่มีการเคลื่อนที่ แต่มีการสั่นได้ จึงทำให้ของแข็งมีพลังงานจลน์ต่ำมากเมื่อเทียบกับแก๊ส ของแข็งเมื่อได้รับความร้อนจะมีการขยายตัวเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการสั่นของอนุภาค

- อัตราการแพร่ของของแข็งต่ำมาก (ช้ามาก) เมื่อเปรียบเทียบกับแก๊สหรือของเหลว
- ของแข็งบางชนิดเป็นตัวนำความร้อนและนำไฟฟ้า บางชนิดเป็นสารกึ่งตัวนำและบางชนิดเป็นฉนวน

- ของแข็งมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงกว่าของเหลวและแก๊ส
- สามารถตกเป็นผลึก ซึ่งผลึกที่ได้มีโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เรียกว่าของแข็งรูปผลึก ส่วนผลึกที่ไม่มีโครงสร้างรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เรียกว่า ของแข็งอสัณฐาน

1) ประเภทของแข็ง

1.1) ผลึกของแข็ง (crystalline) คือของแข็งที่อนุภาค (อะตอม ไอออน หรือโมเลกุล) จัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบและมีรูปร่างผลึกเป็นทรงเรขาคณิต ของแข็งประเภทนี้มีสมบัติที่เด่นชัด เช่น มีผิวหน้าเรียบ มีมุมระหว่างผิวหน้าแน่นอน มีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงแคบ ตัวอย่างผลึกของแข็ง เช่น เพชร คอวตซ์ ดังภาพที่ 1.11



แร่กาลีน่า (galena)

ควอตซ์ (quartz)

ไพไรต์ (pyrite)

ภาพที่ 1.11 ลักษณะผลึกของแข็ง

1.2) ของแข็งอสัณฐาน (amorphous) คือของแข็งที่ประกอบขึ้นด้วยอนุภาคที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ถ้าของเหลวเย็นตัวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว อนุภาค (อะตอมหรือโมเลกุล) ไม่มีเวลาพอที่จัดเรียงตัวในตำแหน่งที่เหมาะสม จึงมีลักษณะคือ ไม่มีรูปทรงเรขาคณิต ผิวหน้าไม่เรียบ มีมุมที่ไม่แน่นอน จุดหลอมเหลวอยู่ในช่วงกว้าง ทำให้จุดหลอมเหลวไม่เด่นชัด ตัวอย่างของแข็งอสัณฐาน เช่น แก้ว ยาง และพลาสติก

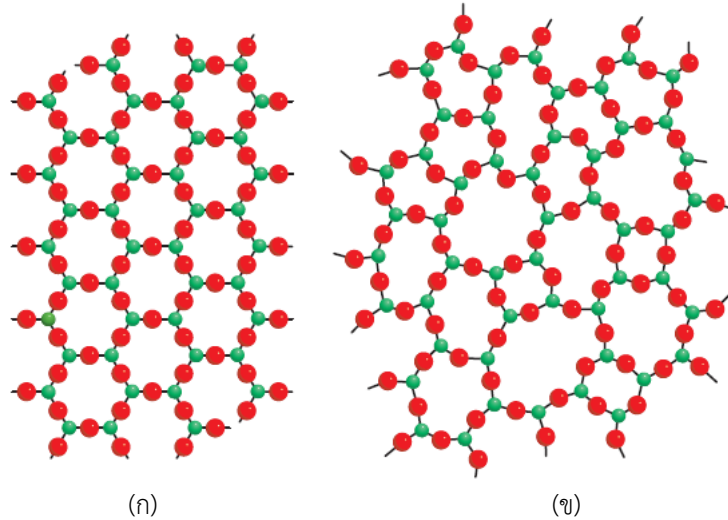
แก้วเป็นผลิตภัณฑ์ใสที่ได้จากการหลอมสารประกอบอนินทรีย์ ซึ่งเมื่อเย็นจะเข้าสู่สถานะของแข็งโดยที่ไม่มีการตกผลึก ในบางครั้งแก้วประพฤติตัวคล้ายของเหลวมากกว่าของแข็ง แก้วที่ใช้

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

ทั่วไปมีมากกว่า 800 ชนิด ภาพที่ 1.12 แสดงโครงสร้าง 2 มิติของผลึกของแข็งควอตซ์และแก้วที่ไม่เป็นรูปผลึก โดยทั้งคู่มีอะตอม Si และ O เป็นองค์ประกอบเหมือนกัน แต่แตกต่างกันในการเรียงตัว



ภาพที่ 1.12 โครงสร้าง 2 มิติ (ก) ผลึกของแข็งควอตซ์ และ (ข) แก้วที่ไม่เป็นรูปผลึก. ที่มาจาก *Chemistry* (p. 493), by R. Chang & K.A. Goldsby, 2016, McGraw-Hill.

จากโครงสร้าง 2 มิติ ในภาพที่ 1.12 วงกลมใหญ่ คือธาตุ Si ในโครงสร้าง 3 มิติและ Si จะพันธะกับ O 4 อะตอม รูปร่างเป็นแบบเตตระฮีดรัล แก้วมีสีต่างๆ ได้เนื่องจากมีโลหะออกไซด์ปนอยู่ด้วย เช่น

- แก้วมีสีเขียว มีเหล็ก(III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) หรือทองแดง(II) ออกไซด์ (CuO)
- แก้วมีสีเหลือง มียูเรเนียม(IV) ออกไซด์ (UO_2)
- แก้วสีน้ำเงิน มีโคบอลต์(II) ออกไซด์ (CoO) และทองแดง(II) ออกไซด์ (CuO)
- แก้วสีแดง มีอนุภาคขนาดเล็กของทองคำและทองแดง

ตารางที่ 1.3 องค์ประกอบและสมบัติของแก้วที่ไม่เป็นรูปผลึก

ชนิดแก้ว	องค์ประกอบ	สมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์
แก้วควอตซ์บริสุทธิ์	100% SiO_2	ขยายตัวด้วยความร้อนได้น้อย ยอมให้แสงผ่านได้ทุกความยาวคลื่น ใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับแสง
แก้วไฟเร็กซ์	60-80% SiO_2 10-25% B_2O_3 Al_2O_3 (เล็กน้อย)	ขยายตัวด้วยความร้อนได้น้อย ยอมให้รังสีวีลิสเปิดและอินฟราเรดผ่านได้ แต่รัง อัลตราไวโอเล็ตผ่านไม่ได้ ใช้ทำเครื่องแก้วในห้องทดลอง ภาชนะทำอาหาร
แก้วโซดาไลม์	75% SiO_2 15% Na_2O 10% CaO	แตกง่ายเมื่อร้อน ยอมให้รังสีวีลิสเปิดผ่านได้ แต่ดูดกลืนรังอัลตราไวโอเล็ต ใช้ทำกระจก ขวด

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก *Chemistry* (p. 493), by R. Chang & K.A. Goldsby, 2016, McGraw-Hill.

2) ผลึกของแข็ง

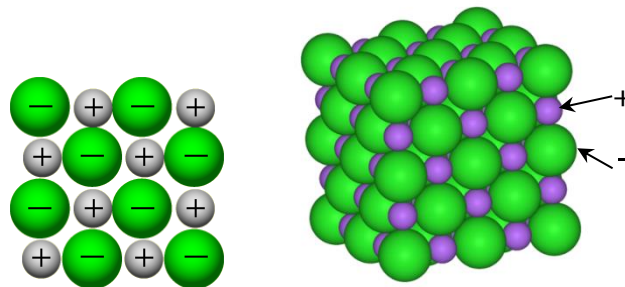
โครงสร้างและสมบัติของผลึกของแข็งสามารถพิจารณาได้จากชนิดของแรงที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่าง ๆ ในผลึก ชนิดของผลึกของแข็งแบ่งตามแรงที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคออกเป็น 4 ชนิดคือ

2.1) ผลึกไอออน

ผลึกไอออน (ionic crystal) เป็นผลึกที่เกิดจากไอออนบวกและไอออนลบเรียงตัวสลับกัน ทำให้ผลึกไอออนเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุที่ต่างกันที่แข็งแรง เรียกแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบว่า แรงคูลอมบ์ (coulombic force)

ผลึกไอออนจึงมีพลังงานแลตทิซสูง ลักษณะเฉพาะที่สำคัญของผลึกไอออน 2 ประการคือ

- ผลึกไอออนประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบเรียงตัวสลับกัน (ภาพที่ 1.13)
- ไอออนลบและไอออนบวกมีขนาดต่างกัน (ไอออนลบมีขนาดใหญ่กว่าไอออนบวก)

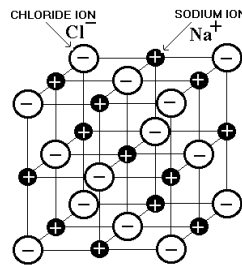


ภาพที่ 1.13 การเรียงตัวของผลึกไอออน

ตัวอย่างผลึกไอออนและโครงสร้างผลึกไอออนของ NaCl (ภาพที่ 1.14) และเซลล์หน่วยของผลึกไอออนบางชนิด แสดงดังภาพที่ 1.15

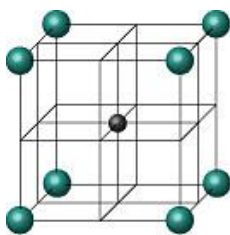


(ก)

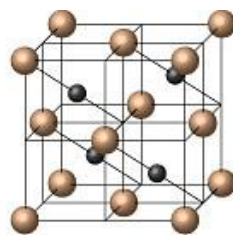


(ข)

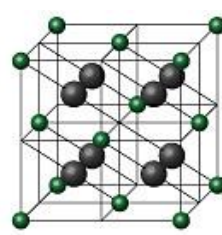
ภาพที่ 1.14 ผลึกของแข็ง NaCl (ก) ลักษณะผลึก และ (ข) การเรียงตัวของของโครงสร้างผลึก NaCl. ดัดแปลงจาก http://www.docbrown.info/page04/4_72bond2.htm



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1.15 เซลล์หน่วยโครงสร้างผลึกของ (ก) CsCl (ข) ZnS และ (ค) CaF₂. ดัดแปลงจาก

<http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/3082/3156196/blb1108.html>

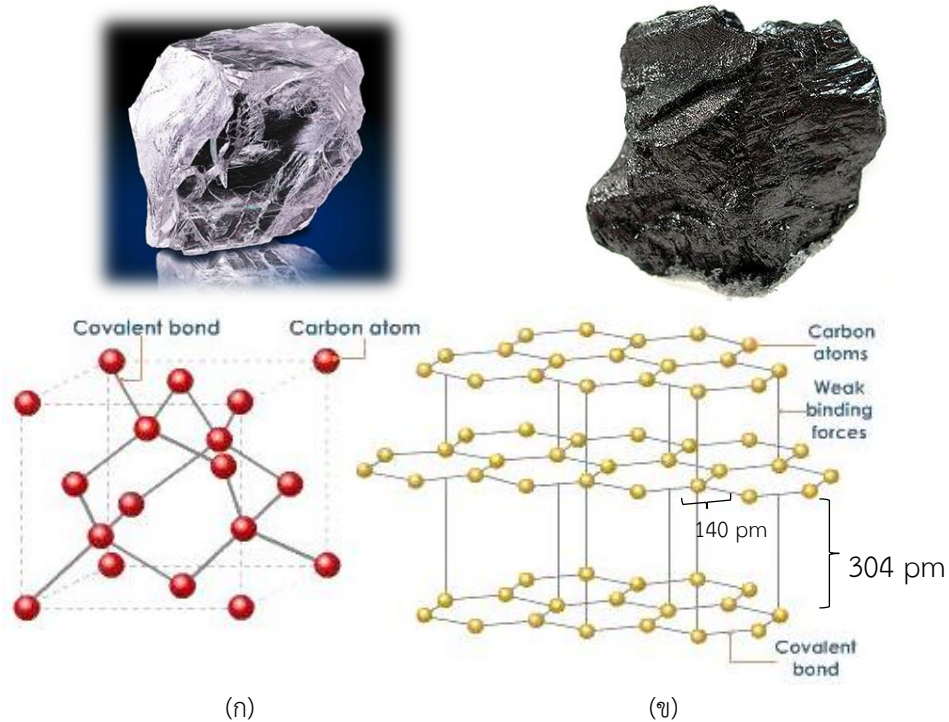
เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

2.2) ผลึกโคเวเลนต์

ผลึกโคเวเลนต์ (covalent crystal) หรือผลึกράงแห เป็นผลึกที่อะตอมยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ การใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกันเกิดเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล โดยอะตอมแต่ละอะตอมจะยึดเหนี่ยวกับอะตอมข้างเคียงด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรง ผลึกประเภทนี้มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดที่สูงมาก ตัวอย่างผลึกโคเวเลนต์ เช่น เพชร (diamond) แกร์ไฟต์ (graphite) แร่ควอตซ์ (quartz) และ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (silicon carbide) ภาพที่ 1.16 แสดงโครงสร้างผลึกโคเวเลนต์ของเพชรและแกร์ไฟต์



ภาพที่ 1.16 โครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนใน (ก) เพชร และ (ข) แกร์ไฟต์. ดัดแปลงจาก *Chemistry: The Central Science* (p. 495), by T.L. Brown et al., 2017, Pearson Education, Inc.

ผลึกของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันแต่การจัดเรียงตัวภายในโครงสร้างผลึกแตกต่างกันเรียกว่า อัญรูป โครงสร้างการจัดเรียงอะตอม C ในเพชรและแกร์ไฟต์แตกต่างกันเกิดเป็นอัญรูปที่สำคัญคือ

- 1) อัญรูปเพชร โดย C แต่ละอะตอมใช้เวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งหมดสร้างพันธะโคเวเลนต์กับอะตอม C อีก 4 อะตอมที่อยู่ล้อมรอบ ความยาวพันธะระหว่าง C ทุกอะตอมเท่ากันหมดทุกทิศทางเท่ากับ 154 พิโกเมตร การจัดอะตอมในผลึกเพชรคล้ายตาข่ายโยงกันทั้ง 3 มิติ (three-dimensional network) ดังภาพที่ 1.16(ก) เป็นผลให้อะตอม C ยึดกันไว้นานจึงมีความแข็งมากที่สุด เพชรไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากเวเลนซ์อิเล็กตรอนทั้ง 4 ตัวเกิดพันธะโคเวเลนต์ จึงไม่มีอิเล็กตรอนเหลือ
- 2) อัญรูปแกร์ไฟต์ อะตอม C จัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ และสร้างพันธะโคเวเลนต์ต่อกันเป็นวง วงละ 6 อะตอมต่อเนื่องกันอยู่ในภายในระนาบเดียวกัน พันธะระหว่างอะตอม C ที่อยู่ในชั้นเดียวกันมีความยาว 140 พิโกเมตร ส่วนอะตอม C ในแต่ละชั้นอยู่ห่างกัน 340 พิโกเมตร การจัดอะตอมเป็นโครงผลึกράงตาข่าย ดังภาพที่ 1.16(ข) ส่งผลให้อะตอม C ยึดกันไว้นาน ทำให้แกร์ไฟต์มีจุด

หลอมเหลวและจุดเดือดสูง อะตอม C ในโครงผลึกของแกรไฟต์มี 4 เวเลนซ์อิเล็กตรอน แต่ละอะตอมจะสร้างพันธะกับ C 3 อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกัน จึงเหลืออีก 1 อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อิสระไปทั่วภายในชั้น ทำให้แกรไฟต์นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีเฉพาะภายในชั้นเดียวกัน ระหว่างชั้นของแกรไฟต์อะตอม C อยู่ห่างกัน 340 พิโกเมตร (เป็นระยะที่มากกว่าความยาวพันธะเดี่ยวระหว่าง C) อะตอม C ระหว่างชั้นไม่ได้สร้างพันธะโคเวเลนซ์ แต่ยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ที่แข็งแรงน้อยกว่าพันธะโคเวเลนซ์ในชั้นเดียวกัน อะตอม C ในแกรไฟต์จึงมีลักษณะซ้อนเป็นแผ่นและเลื่อนไถลไปตามชั้นได้ง่าย

ตารางที่ 1.4 สมบัติของเพชรและแกรไฟต์

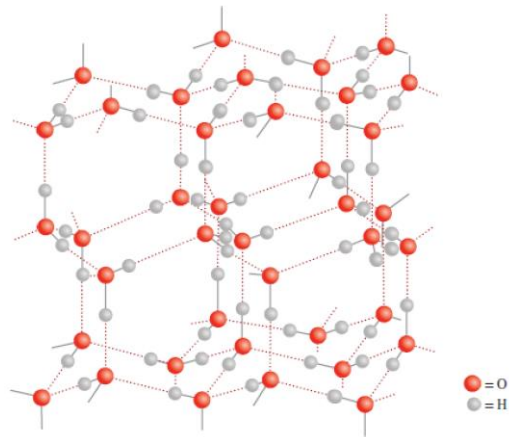
เพชร	แกรไฟต์
เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ	เกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติและผลิตขึ้นมาได้
มีความแข็งมากที่สุด (ระดับ 10)	อ่อนและสัมผัส (ระดับความแข็งน้อยกว่า 1)
มีความหนาแน่นสูง (3.51 g/cm^3)	มีความหนาแน่นปานกลาง (2.27 g/cm^3)
จุดเดือดสูง ($4,830^\circ\text{C}$)	ไม่แน่นอน
จุดหลอมเหลว ($3,550^\circ\text{C}$)	ไม่แน่นอน
ยอมให้แสงผ่านได้และมีดัชนีหักเหสูง	สีดำและทึบแสง
ไม่นำความร้อนและไม่นำไฟฟ้า	นำความร้อนและนำไฟฟ้าดี
เผาไหม้ในอากาศที่ 900°C	เผาไหม้ในอากาศที่ $700\text{-}800^\circ\text{C}$
โครงผลึกเป็นออกตะฮีดรัล	โครงผลึกเป็นเฮกซะโกนัล

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก *Principle of General of Chemistry* (p. 381), by M.S. Silberberg, 2013, McGraw-Hill Publishing Company.

ควอตซ์ เป็นผลึกโคเวเลนซ์อีกประเภทหนึ่งที่เป็นแร่ซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) ดังภาพที่ 1.16(ก) ประกอบด้วย Si และ O ร้อยละ 46.7% และ O 53.3% ตามลำดับ ควอตซ์ละลายได้ในกรดเกลือ แร่ควอตซ์เกือบจะเป็นสารประกอบทางเคมีที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุด แร่ควอตซ์แบ่งอย่างกว้างๆ ได้เป็น 2 พวก คือพวกที่เกิดเป็นผลึกหรือมีผลึกหยาบ (coarsely crystalline) และพวกที่เกิดเป็นผลึกละเอียดมากมีขนาดเล็กมากจนมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น (cryptocrystalline) แร่ควอตซ์นำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะต่างๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นรัตนชาติและหินประดับ ใช้ทำเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเครื่องมือทางแสง ทำเลนส์และปริซึม เนื่องจากมีคุณสมบัติโปร่งใสยอมให้รังสีอินฟราเรดและอัลตราไวโอเล็ต (ยูวี) ผ่านได้ดี

2.3) ผลึกโมเลกุล

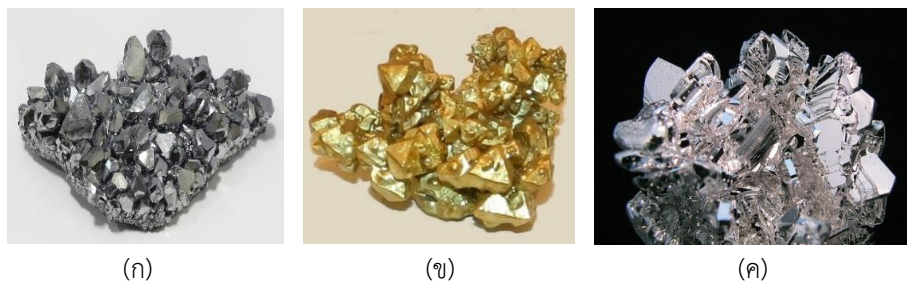
ผลึกโมเลกุล (molecular crystal) ประกอบขึ้นจากอนุภาคที่จุดแลตทิซอาจเป็นอะตอมหรือโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ประเภทแรงลอนดอน (London force) หรือแรงไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) อย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับตัวของโมเลกุล ผลึกชนิดนี้จึงมีจุดหลอมเหลวต่ำ ระเหยง่าย ความดันไอสูง ไม่นำไฟฟ้า ตัวอย่างผลึกโมเลกุล เช่น ของแข็งซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวแบบแรงไดโพล-ไดโพล หรือในกรณีของน้ำแข็ง เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลผ่านพันธะไฮโดรเจน ดังภาพที่ 1.17



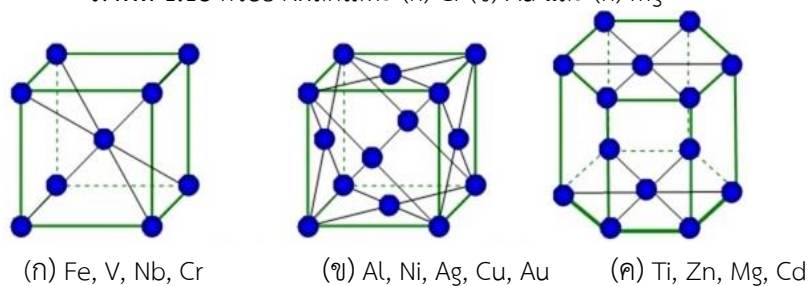
ภาพที่ 1.17 โครงสร้างผลึกของโมเลกุลน้ำแข็ง. ที่มาจาก *Chemistry* (p. 484), by J. Overby & R. Chang, (2022), McGraw-Hill.

2.4) ผลึกโลหะ

ผลึกโลหะ (metallic crystal) เป็นผลึกที่อนุภาคที่จุดแลตทิซเป็นไอออนบวกของโลหะอยู่ล้อมรอบด้วยกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน แต่ละอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั่วบริเวณของโลหะ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนบวกของอะตอมโลหะกับอิเล็กตรอนเกิดจากพันธะโลหะ ผลึกประเภทนี้มีความแข็งแรง จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมาก ติเป็นแผ่น ดึงเป็นเส้น บิดงอได้ง่าย นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แต่โลหะบางชนิดอาจมีสมบัติไม่สอดคล้องกับสมบัติข้างต้นทั้งหมด เช่น ตะกั่วนำไฟฟ้าได้ไม่ดี หรือโลหะหมู่แอลคาไล (หมู่ 1A) และแอลคาไลน์เอิร์ท (หมู่ 2A) ค่อนข้างอ่อน มีจุดเดือด จุดหลอมเหลวต่ำ โลหะแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกแตกต่างกันเฉพาะตัว เช่น เหล็ก (Fe), โครเมียม (Cr), ทองคำ (Au), เงิน (Ag), ไททานเนียม (Ti), สังกะสี (Zn), แมกนีเซียม (Mg) ตัวอย่างผลึกของโลหะ Cr, Au และ Mg แสดงดังภาพที่ 1.18 และเซลล์หน่วยของโครงสร้างผลึกโลหะบางชนิดแสดงในภาพที่ 1.19



ภาพที่ 1.18 ตัวอย่างผลึกโลหะ (ก) Cr (ข) Au และ (ค) Mg



ภาพที่ 1.19 เซลล์หน่วยผลึกโลหะ (ก) ลูกบาศก์กึ่งกลางตัว (ข) ลูกบาศก์กึ่งกลางหน้า และ (ค) เฮกซะโกนัล. ดัดแปลงจาก <http://apchemcyhs.wikispaces.com>

ตารางที่ 1.5 ชนิดของผลึกและสมบัติทั่วไป

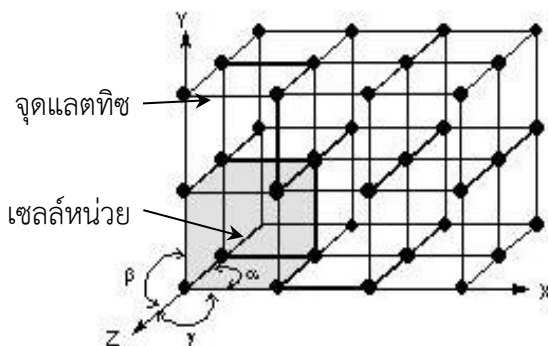
ชนิด	แรงที่ยึดเหนี่ยว	สมบัติ	ตัวอย่าง
ผลึกไอออน	แรงดึงดูดไฟฟ้าสถิต	แข็ง เปราะ จุดหลอมเหลวสูง, การนำไฟฟ้าและนำความร้อนต่ำ	NaCl, LiF, MgO, CaCO ₃
ผลึกโคเวเลนต์	พันธะโคเวเลนต์	แข็ง จุดหลอมเหลวสูง การนำไฟฟ้าและนำความร้อนต่ำ	C (เพชร), SiO ₂ (ควอตซ์)
ผลึกโมเลกุล	แรงลอนดอน แรงไดโพล-ไดโพล พันธะไฮโดรเจน	อ่อน จุดหลอมเหลวต่ำ การนำไฟฟ้าและนำความร้อนต่ำ	Ar, CO ₂ , I ₂ , H ₂ O, C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁
ผลึกโลหะ	พันธะโลหะ	อ่อนถึงแข็ง จุดหลอมเหลวต่ำถึงสูง นำความร้อนและไฟฟ้าที่ดี	โลหะทั้งหมด เช่น Na, Mg, Fe, Cu

หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก *General Chemistry: Principles and Modern Applications* (p. 547), by R.H. Petrucci et al., 2016, Pearson.

1.2.2 ระบบผลึก

1) โครงสร้างผลึก (crystal structure)

โครงสร้างผลึกของแข็งเป็นการเรียงตัวของอนุภาค (อะตอม ไอออน หรือโมเลกุล) ที่เป็นระเบียบแบบแผนทางเรขาคณิตในโครงข่ายระบบสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 1.20 เพื่อให้สะดวกจึงใช้รูปทรงกลมแทนตำแหน่งอนุภาคในโครงสร้างผลึกซึ่งปรากฏเป็นจุดตัดบนโครงข่ายสามมิติ เรียกว่า จุดแลตทิซ (lattice point) ซึ่งแสดงถึงอะตอมของในโครงข่าย โดยที่แต่ละจุดแลตทิซจะมีสิ่งแวดล้อมในทุกทิศทางเหมือนกัน โครงสร้างผลึกของแข็ง เรียกอีกอย่างว่า แลตทิซผลึก (crystal lattice)



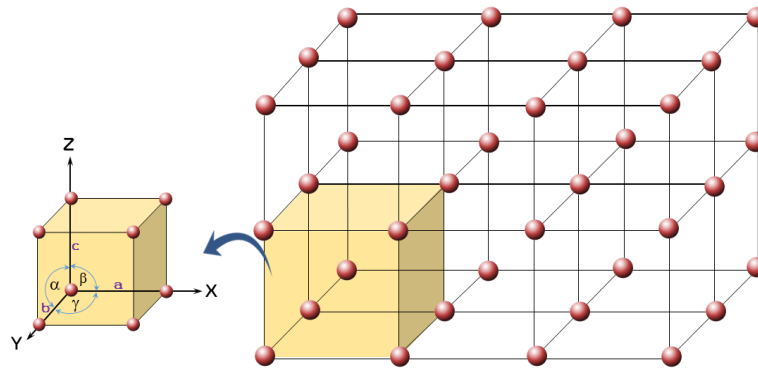
ภาพที่ 1.20 โครงสร้างผลึกของแข็ง

2) เลขโคออร์ดิเนชัน

เลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number, CN) คือจำนวนอะตอมที่ล้อมรอบอะตอมใดอะตอมหนึ่งที่ใกล้ชิดที่สุดด้วยระยะทางที่เท่ากัน ผลึกของแข็งที่มีเลขโคออร์ดิเนชันสูง จะมีความหนาแน่นมาก

3) เซลล์หน่วย

เซลล์หน่วย (unit cell) คือหน่วยโครงสร้างพื้นฐานที่เล็กที่สุดของแลตทิซผลึกที่แสดงให้เห็นลักษณะการจัดเรียงอนุภาคภายในผลึกอย่างสมบูรณ์ที่มีการจัดเรียงตัวซ้ำๆ กันทุกทิศทุกทาง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า แลตทิซผลึกเกิดจากการนำเซลล์หน่วยมาเรียงต่อกัน โดยถือว่าทรงกลมที่อยู่ตรงหน้าหรือมุมของเซลล์หน่วยหนึ่งจะเป็นส่วนของอีกเซลล์หน่วยหนึ่งที่อยู่ติดกันด้วย ขนาดและรูปร่างของเซลล์หน่วยกำหนดด้วยแลตทิซพารามิเตอร์ (lattice parameter) ที่กำหนดด้วยความยาวแต่ละด้านตามขอบ และกำหนดด้วยมุมของแกนในโครงสร้างสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 1.21



ภาพที่ 1.21 โครงสร้างผลึกและแลตทิซพารามิเตอร์

แลตทิซพารามิเตอร์ (ภาพที่ 1.21) กำหนดด้วยความยาวตามขอบของด้านและมุมระหว่างด้านของเซลล์หน่วย ความยาวด้านกำหนดตามความยาวของเวกเตอร์ตามแนวแกนทั้งสามแกนคือ x, y และ z กำหนดด้วยตัวอักษร a, b และ c ตามลำดับ ความยาวด้านกำหนดในหน่วยนาโนเมตร (nm) หรืออังสตรอม (Å, โดย $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ เมตร)

ส่วนมุมระหว่างเวกเตอร์ของความยาวด้านกำหนดด้วยตัวอักษร α , β และ γ โดยที่มุม α เป็นมุมระหว่างด้าน b กับ c มุม β เป็นมุมระหว่างด้าน a กับ c และมุม γ เป็นมุมระหว่างด้าน a กับ b

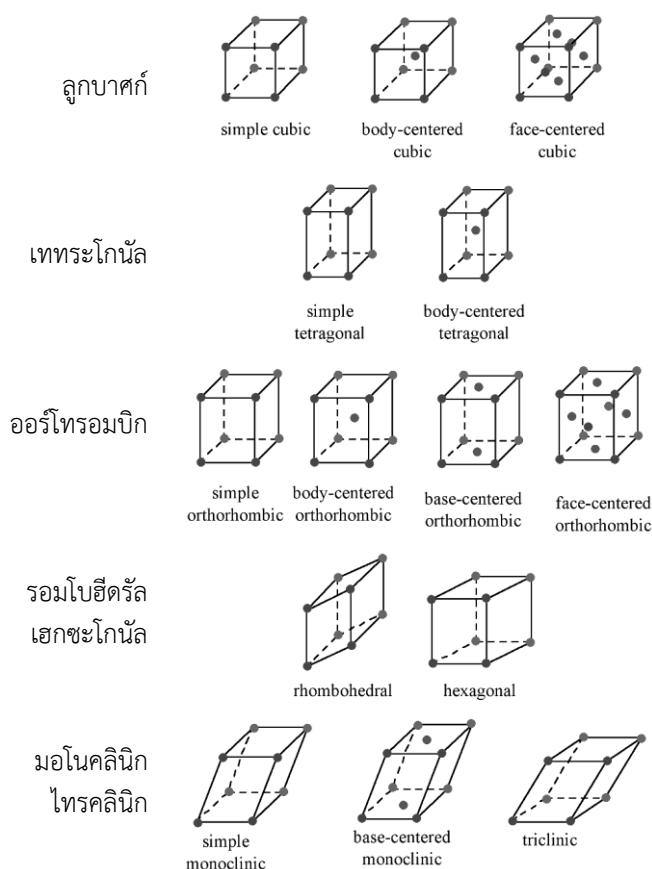
ในปี ค.ศ.1848 บราว (Auguste Bravais) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้เสนอการจัดตำแหน่งของจุดแลตทิซแบบสามมิติในเซลล์หน่วยมาตรฐาน (standard unit cell) ทั้งหมด 7 ระบบ ดังตารางที่ 1.6 แต่เนื่องจากตำแหน่งทรงกลมอาจอยู่ได้ในตำแหน่งที่ต่างกัน 4 แบบของเซลล์หน่วย คือ จุดแลตทิซอยู่ที่มุม (corner) จุดแลตทิซอยู่ที่ด้านหน้า (face) จุดแลตทิซที่กึ่งกลางตัว (center) และจุดแลตทิซอยู่ที่กลางปลาย (end) ดังนั้น จุดแลตทิซในเซลล์หน่วยจึงแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

- 1) แบบธรรมดา (simple) หรือพริมาทีฟ (primitive) คือทรงกลมอยู่ที่มุม (corner)
- 2) แบบกลางตัว (body-centered) คือทรงกลมอยู่ที่มุมและกึ่งกลางตัว (center-centered)
- 3) แบบกลางหน้า (face-centered) คือทรงกลมอยู่ที่มุมและด้านหน้า (face-centered)
- 4) แบบกลางปลาย (base-centered) คือทรงกลมอยู่ที่มุมและกลางปลาย (base-centered หรือ end-centered)

เซลล์หน่วยมาตรฐาน 7 ระบบ แบ่งออกเป็น 14 แบบ เรียกว่า แลตทิซบราวเว (Bravais lattice) ดังแสดงในตารางที่ 1.6

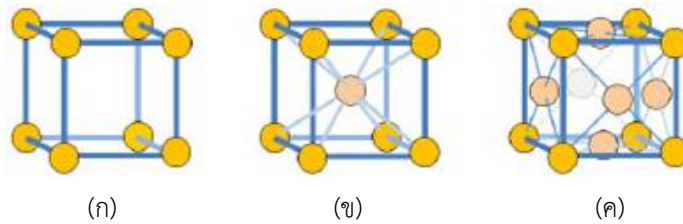
ตารางที่ 1.6 เซลล์หน่วยมาตรฐาน 7 ระบบ และแลตทิซบราวเว

ระบบเซลล์หน่วย	ความยาวด้าน ; มุม	แลตทิซบราวเว
ลูกบาศก์ (cubic)	$a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	ธรรมดา (simple) กลางตัว (body-centered) กลางหน้า (face-centered)
เทตระโกนัล (tetragonal)	$a=b\neq c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	ธรรมดา (simple) กลางตัว (body-centered)
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a\neq b\neq c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	ธรรมดา (simple) กลางตัว (body-centered) กลางหน้า (face-centered) กลางปลาย (base-centered)
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma\neq 90^\circ$	ธรรมดา (simple)
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a=b\neq c$; $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	ธรรมดา (simple)
มอโนคลินิก (monoclinic)	$a\neq b\neq c$; $\alpha=\gamma=90^\circ\neq\beta$	ธรรมดา (simple) กลางปลาย (base-centered)
ไตรคลินิก (triclinic)	$a\neq b\neq c$; $\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$	ธรรมดา (simple)



ภาพที่ 1.22 แลตทิซบราวเว 14 แบบ. ดัดแปลงจาก <http://cnx.org/content/m16927/latest/>

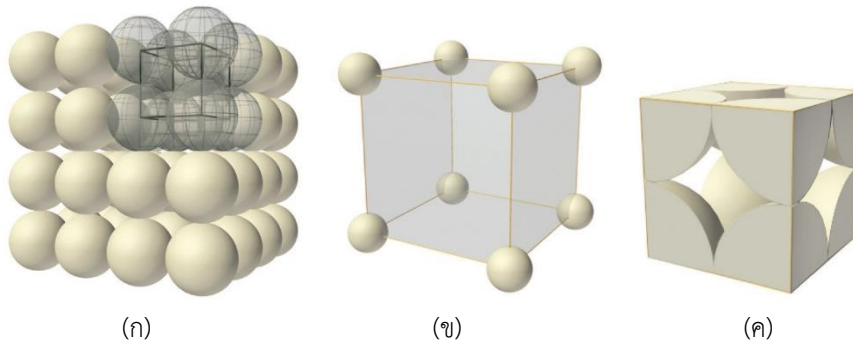
เซลล์หน่วยโครงสร้างผลึกระบบลูกบาศก์เป็นตัวอย่างโครงสร้างผลึกอย่างง่ายกว่าแบบอื่นๆ เนื่องจากมีด้านทั้งสามด้านเท่ากัน เซลล์หน่วยระบบลูกบาศก์ก็มีแลตทิซบราวเว 3 แบบ ดังภาพที่ 1.23



ภาพที่ 1.23 แลตทิซบราวเวของเซลล์หน่วยระบบลูกบาศก์ (ก) ลูกบาศก์ธรรมดา (ข) ลูกบาศก์กลางตัว และ (ค) ลูกบาศก์กลางหน้า. ดัดแปลงจาก *Principles of General Chemistry* (online), by B.A. Averill, 2012.

ลูกบาศก์ธรรมดา (simple cubic, sc) เป็นการเรียงตัวของทรงกลม (แทนอะตอม หรือไอออน หรือโมเลกุล) เป็นชั้น โดยแต่ละชั้นทรงกลมเรียงต่อกันที่จุดศูนย์กลางของแต่ละทรงกลมตรงกัน ดังภาพที่ 1.24(ก) ทรงกลมจะสัมผัสกับทรงกลม 4 ทรงกลมในชั้นเดียวกันและจะสัมผัสกับอีก 2 ทรงกลมของชั้นบนและชั้นล่าง เซลล์หน่วยจึงมีจุดแลตทิซ (หรืออนุภาค) เฉพาะตรงมุมของเซลล์หน่วยรวม 8 มุม โดยแต่ละมุมของเซลล์หน่วยมีลูกบาศก์ 8 ลูกมาติดกัน ดังภาพที่ 1.24(ข)

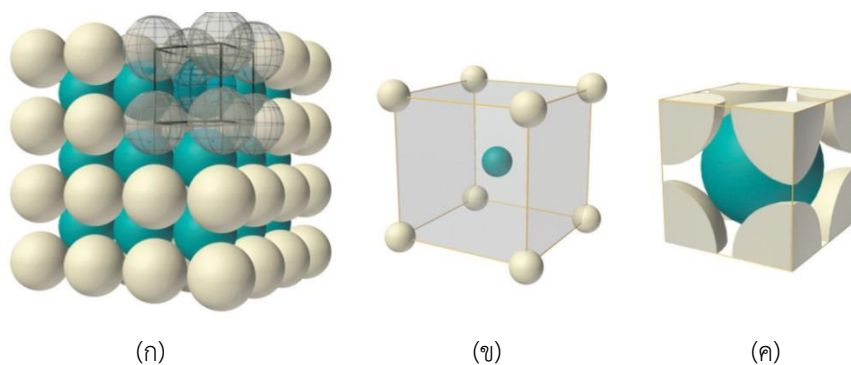
ดังนั้น เซลล์หน่วยแต่ละหน่วยจะได้เนื้อทรงกลมที่มุมเท่ากับ $1/8$ ของทรงกลม จำนวนเนื้ออนุภาคทั้งหมดในเซลล์หน่วยจึงเท่ากับ 1 ทรงกลม (อนุภาค) ดังภาพที่ 1.24(ค) เซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์ธรรมดามีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6 เพราะมีทรงกลมข้างเคียงมาสัมผัส 6 ทรงกลม



ภาพที่ 1.24 เซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา (ก) โครงสร้างผลึก (ข) เซลล์หน่วย และ (ค) ปริมาณอนุภาคในเซลล์หน่วย. ดัดแปลงจาก *Principles of General Chemistry* (online), by B.A. Averill, 2012.

ลูกบาศก์กลางตัว (body-centered cubic, bcc) การเรียงตัวของชั้นบนและชั้นล่างจะอยู่ตำแหน่งรูช่องว่างของทรงกลม 3 ทรงกลม ดังภาพที่ 1.25(ก) ดังนั้น เซลล์หน่วยจึงมีอนุภาคอยู่ที่มุมของเซลล์หน่วยและมีอีกหนึ่งอนุภาคอยู่ที่ตรงกลางของเซลล์หน่วย โดยแต่ละมุมของเซลล์หน่วยมีลูกบาศก์ 8 ลูกมาสัมผัสกันเช่นกัน ดังภาพที่ 1.25(ข)

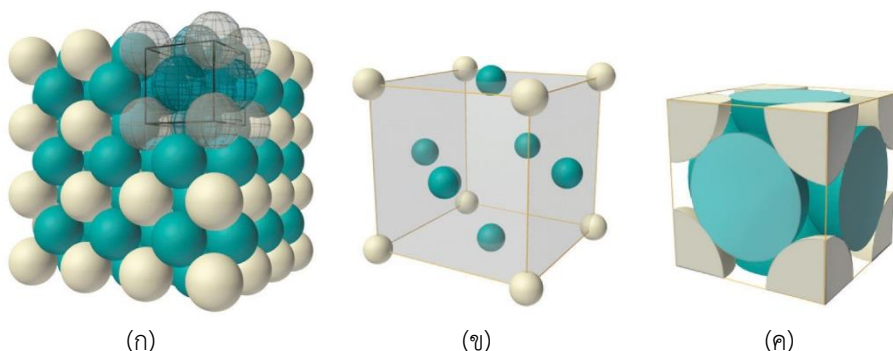
ดังนั้น เซลล์หน่วยแต่ละหน่วยจะได้เนื้อทรงกลมที่มุมเท่ากับ $1/8$ ของทรงกลม จำนวนเนื้ออนุภาคใน 8 มุมของเซลล์หน่วยเท่ากับ 1 ทรงกลม รวมอีก 1 อนุภาคอยู่ตรงกลางของเซลล์หน่วยทำให้จำนวนเนื้ออนุภาคทั้งหมดในเซลล์หน่วยจึงเท่ากับ 2 ทรงกลม (อนุภาค) ดังภาพที่ 1.25(ค) เซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์กลางตัว มีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 8 เพราะมีทรงกลมข้างเคียงมาสัมผัสด้านบนและด้านล่างอย่างละ 4 ทรงกลม



ภาพที่ 1.25 เซลล์หน่วยลูกบาศก์กลางตัว (ก) โครงสร้างผลึก (ข) เซลล์หน่วย และ (ค) ปริมาณอนุภาคในเซลล์หน่วย. ดัดแปลงจาก *Principles of General Chemistry* (online), by B.A. Averill, 2012.

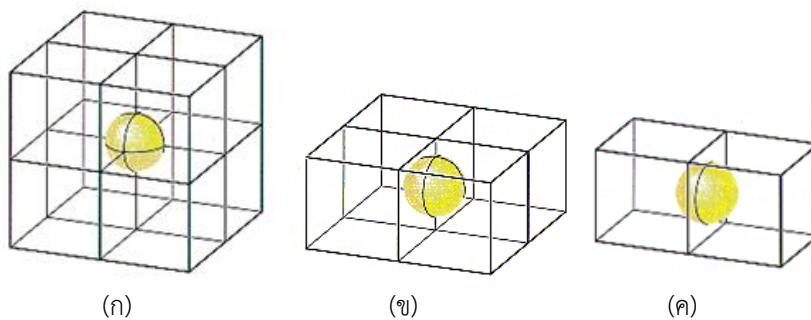
ลูกบาศก์กลางหน้า (face-centered cubic, fcc) มีอนุภาคอยู่ที่มุมของเซลล์หน่วยและมีอนุภาคอยู่ตรงกลางทุกด้านของเซลล์หน่วยแต่ละมุมของเซลล์หน่วยมีลูกบาศก์ 8 ลูกมาจดติดกันเช่นกัน ดังภาพที่ 1.26

ดังนั้น เซลล์หน่วยแต่ละหน่วยจะได้เนื้อทรงกลมที่มุมเท่ากับ $1/8$ ของทรงกลม จำนวนเนื้ออนุภาคใน 8 มุมของเซลล์หน่วยเท่ากับ 1 ทรงกลม และที่ตรงกลางหน้าของเซลล์หน่วยในแต่ละหน้า เนื้อทรงกลมที่หน้าเท่ากับ $1/2$ ของทรงกลม ใน 6 หน้า จึงมีจำนวนเนื้ออนุภาคเท่ากับ 3 ทรงกลม ทำให้จำนวนเนื้ออนุภาคทั้งหมดในเซลล์หน่วยจึงเท่ากับ 4 ทรงกลม (อนุภาค)



ภาพที่ 1.26 เซลล์หน่วยลูกบาศก์กลางหน้า (ก) โครงสร้างผลึก (ข) เซลล์หน่วย และ (ค) ปริมาณอนุภาคในเซลล์หน่วย. ดัดแปลงจาก *Principles of General Chemistry* (online), by B.A. Averill, 2012.

เนื่องจากแต่ละเซลล์หน่วยในผลึกของแข็งจะอยู่ติดกับเซลล์หน่วยอื่น ๆ ทุกทิศทาง ดังนั้น จุดแลตทิซ (อะตอมในเซลล์หน่วย) ส่วนใหญ่จะอยู่รวมกันกับเซลล์หน่วยข้างเคียงหลายลักษณะ เช่น ถ้าเป็นเซลล์หน่วยลูกบาศก์ทุกชนิด ที่แต่ละมุมของเซลล์หน่วยจะประกอบด้วยอะตอมจำนวน 8 หน่วย ดังนั้นเนื้ออนุภาคของแต่ละเซลล์หน่วยจะเท่ากับ $1/8$ ของทรงกลม การแบ่งอะตอมที่มุมของลูกบาศก์ ดังภาพที่ 1.27(ก) ถ้าเป็นลูกบาศก์กลางหน้า (fcc) นอกจากที่มุมแล้วยังมีอะตอมที่อยู่ติดกับเซลล์หน่วยแบบด้านหน้า ดังภาพที่ 1.27(ข)



ภาพที่ 1.27 ทรงกลมในเซลล์หน่วย (ก) ทรงกลมที่มุมซึ่งใช้ร่วมกัน 8 เซลล์หน่วย (ข) ทรงกลมที่มุมซึ่งใช้ร่วมกัน 4 เซลล์หน่วย และ (ค) ทรงกลมที่ใช้ร่วมกัน 2 เซลล์หน่วย.

ที่มาจาก <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch13/unitcell.php>

4) ประสิทธิภาพของการบรรจุ

เนื่องจากการบรรจุอนุภาคในเซลล์หน่วยแตกต่างกันทั้งตำแหน่งและจำนวนอนุภาค ดังนั้นในเซลล์หน่วยแต่ละชนิดจะมีปริมาตรที่ว่าง (พื้นที่ว่าง) ไม่เท่ากัน ดังนั้น ปริมาตรของเซลล์หน่วย ถูกบรรจุโดยทรงกลมจะบอกถึงความหนาแน่นของผลึก เรียกว่า ประสิทธิภาพของการบรรจุ (packing efficiency; PE) หรือ แฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอม (atomic packing factor; APF) คำนวณได้ดังนี้

$$\%APF = \frac{V_{(\text{particle in unit cell})}}{V_{(\text{unit cell})}} \times 100 \quad \dots\dots(1.62)$$

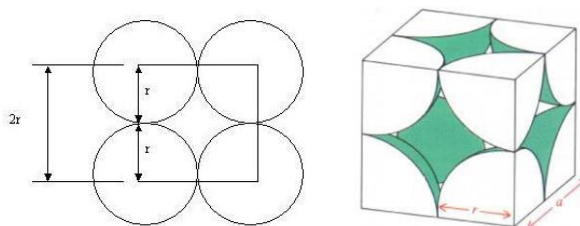
เมื่อ APF = แฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอม

$V_{(\text{particle in unit cell})}$ = ปริมาตรของทรงกลมใน 1 เซลล์หน่วย

$V_{(\text{unit cell})}$ = ปริมาตรของเซลล์หน่วย (= a^3)

การคำนวณร้อยละประสิทธิภาพของการบรรจุของเซลล์หน่วยลูกบาศก์ ดังนี้

1) ลูกบาศก์ธรรมดา โดยทรงกลมเรียงต่อกันที่จุดศูนย์กลางของแต่ละทรงกลมตรงกัน ทรงกลมจะสัมผัสกับทรงกลม 4 ทรงกลมในชั้นเดียวกันและจะสัมผัสกับอีก 2 ทรงกลมของชั้นบนและชั้นล่างรัศมีของทรงกลม (r) และความยาวตามขอบของเซลล์หน่วย (a) แสดงดังภาพที่ 1.28



ภาพที่ 1.28 รัศมีของทรงกลมและความยาวตามขอบของเซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา

ปริมาตรทรงกลม 1 ทรงกลม หาได้จาก

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad \dots\dots(1.63)$$

เมื่อ V = ปริมาตรทรงกลม

r = รัศมีทรงกลม

เมื่อ $a=2r$ ดังนั้น $r=\frac{a}{2}$ (จากภาพที่ 1.28) ปริมาตรทรงกลม 1 ทรงกลม คือ

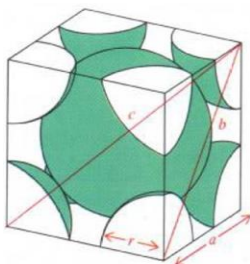
$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2} \right)^3$$

เนื่องจากทรงกลมที่มุ่มอยู่ร่วมกัน 8 เซลล์หน่วยและมีมุม 8 มุมในลูกบาศก์ 1 ลูก ดังนั้นจึงเท่ากับมีทรงกลม 1 ทรงกลมอยู่ในเซลล์หน่วยของลูกบาศก์ธรรมดา จากสมการ (1.62) ร้อยละแฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอมของเซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา คำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \%APF &= \frac{\frac{4}{3} \pi r^3}{a^3} \times 100 \\ &= \frac{\frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2} \right)^3}{a^3} \times 100 \\ &= \frac{\frac{4}{3} \pi \frac{a^3}{8}}{a^3} \times 100 = 52.4\% \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละแฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอมของเซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา เท่ากับ 52 หมายความว่า เซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา 1 เซลล์หน่วยจะมีเนื้ออนุภาคอยู่ร้อยละ 52 และมีพื้นที่ว่างเท่ากับร้อยละ 48

2) ลูกบาศก์กลางตัว เซลล์หน่วยมีอนุภาคอยู่ที่มุมของหน่วย เช่นเดียวกับเซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา และมีอีกหนึ่งอนุภาคอยู่ที่ตรงกลางของเซลล์หน่วย โดยแต่ละมุมของเซลล์หน่วยมีลูกบาศก์ 8 ลูกมาสัมผัสกันเช่นกัน รัศมีของทรงกลม (r) และความยาวตามขอบของเซลล์หน่วย (a) แสดงดังภาพที่ 1.29



ภาพที่ 1.29 รัศมีของทรงกลมและความยาวตามขอบของเซลล์หน่วยลูกบาศก์กลางตัว

เมื่อ $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$ และ รัศมี $r = \frac{a\sqrt{3}}{4}$ ดังนั้น ปริมาตรทรงกลม 2 ทรงกลม คือ

$$V = 2 \times \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

$$V = 2 \times \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{a\sqrt{3}}{4}\right)^3$$

เนื่องจากทรงกลมที่มูอยู่ร่วมกัน 8 เซลล์หน่วยและมีทรงกลมกลางตัวอีก 1 ลูก ดังนั้นจึงเท่ากับมีทรงกลม 2 ลูกอยู่ในหน่วย ร้อยละประสิทธิภาพของการบรรจุ คำนวณได้เป็น

$$\%APF = \frac{2 \times \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{a\sqrt{3}}{4}\right)^3}{a^3} \times 100$$

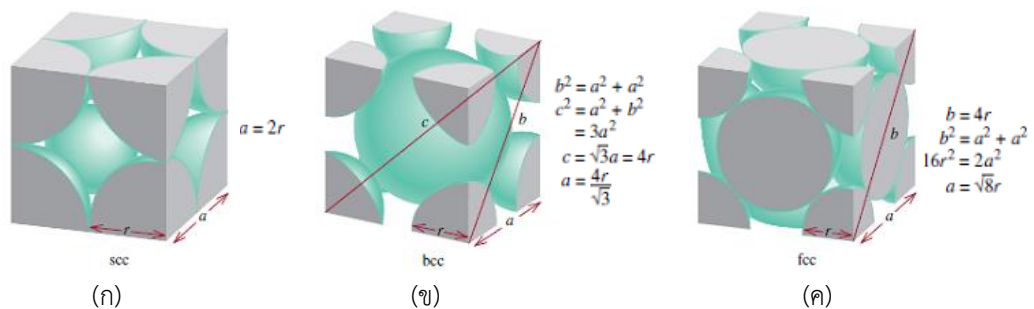
$$= \frac{2 \times \left(\frac{4}{3}\right) \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{4}\right)^3 a^3}{a^3} \times 100$$

$$= 68\%$$

ดังนั้น ร้อยละแฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอมของหน่วยลูกบาศก์กลางตัว เท่ากับ 68 หมายความว่า เซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดา 1 เซลล์หน่วยจะมีเนื้ออนุภาคอยู่ร้อยละ 68 และมีพื้นที่ว่างเท่ากับร้อยละ 32

5) ความหนาแน่นในเซลล์หน่วย

เมื่อพิจารณาจากเซลล์หน่วยลูกบาศก์ จำนวนอนุภาคของเซลล์หน่วยลูกบาศก์ธรรมดาเท่ากับ 1 อนุภาค ลูกบาศก์กลางตัวเท่ากับ 2 อนุภาค และลูกบาศก์กลางหน้าเท่ากับ 4 อนุภาค ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีอะตอมและความยาวตามขอบของเซลล์หน่วยลูกบาศก์แต่ละแบบ แสดงดังภาพที่ 1.30



ภาพที่ 1.30 รัศมีอะตอมและความยาวตามขอบของเซลล์หน่วย (ก) ลูกบาศก์ธรรมดา (ข) ลูกบาศก์กลางตัว และ (ค) ลูกบาศก์กลางหน้า. ที่มาจาก *Chemistry* (p. 482), by R. Chang & K.A. Goldsby, 2016, McGraw-Hill.

ตัวอย่าง 1.17 ฟลักทองคำ (Au) มีเซลล์หน่วยลูกบาศก์กลางหน้า (fcc) คำนวณหาความหนาแน่นของทองคำ (กำหนดรัศมีอะตอม Au=144 pm)

วิธีคิด จากภาพที่ 1.30 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตามขอบและรัศมีอะตอม เป็น $a = \sqrt{8}r$

ดังนั้น $a = \sqrt{8} \times 144 \text{ pm} = 407 \text{ pm}$

ปริมาตรของเซลล์หน่วย (หน่วย cm^3) หาได้จาก

$$V = a^3 = (407 \text{ pm})^3 = 6.74 \times 10^7 \text{ pm}^3$$

$$\text{จาก } 1 \text{ pm}^3 = 10^{-30} \text{ cm}^3$$

$$V = 6.74 \times 10^7 \times 10^{-30} \text{ cm}^3$$

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

จากเซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์กลางหน้ามีจำนวนอะตอมทั้งหมดเท่ากับ 4 อะตอม

$$\text{จาก } d = \frac{m}{v}$$

เมื่อ $m =$ น้ำหนัก (กรัม) ของอะตอมต่อเซลล์หน่วย

$v =$ ปริมาตร (cm^3) ของเซลล์หน่วย

น้ำหนัก (m) ของอะตอม 1 อะตอม คำนวณได้จาก

Au 197.0 กรัม มีอะตอม Au 6.02×10^{23} อะตอม

$$\text{Au 4 อะตอม หนัก} = \frac{4 \times 197.0 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.31 \times 10^{-21} \text{ กรัม}$$

ความหนาแน่น (d) ของอะตอมจึงเท่ากับ

$$d = \frac{m}{v} = \frac{1.31 \times 10^{-21} \text{ g}}{6.74 \times 10^{-23} \text{ cm}^3} = 19.4 \text{ g/cm}^3$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของผลึกทองคำเท่ากับ 19.4 g/cm^3

จากตัวอย่าง 1.17 มีการคำนวณหลายขั้นตอน แต่ถ้ารู้ปริมาตร หรือความยาวด้านของเซลล์หน่วย สามารถคำนวณความหนาแน่นของเซลล์หน่วยลูกบาศก์แบบต่าง ๆ ได้จาก

$$d = \frac{ZM}{NV} \quad \dots(1.64)$$

เมื่อ $d =$ ความหนาแน่นของเซลล์หน่วย (g/cm^3)

$Z =$ จำนวนอะตอมต่อเซลล์หน่วย

$M =$ มวลเชิงอะตอม (g/mol)

$N =$ เลขอาโวคาโดร (6.02×10^{23})

$V =$ ปริมาตรของเซลล์หน่วย (cm^3)

1.2.3 การจัดเรียงอนุภาคในผลึกของแข็ง

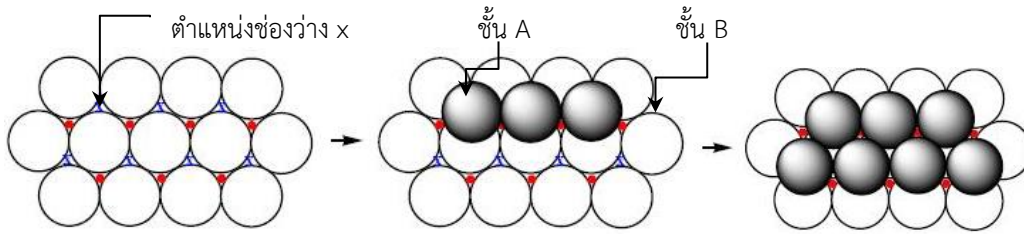
โครงสร้างผลึกของแข็งจะเป็นมีรูปร่างเรขาคณิตแบบใดนั้นขึ้นกับการจัดเรียงอนุภาคที่อยู่ใกล้กันว่าจัดให้ชิดกันแบบใด สมมติว่าอนุภาคเป็นทรงกลม การจัดเรียงตัวของทรงกลมที่มีขนาดเท่ากันจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด เมื่อมีการจัดเรียงตัวกันอย่างชิดที่สุดเท่าที่จะทำได้ เรียกว่า การบรรจุชิดที่สุด (closest packing) ซึ่งจะมีช่องว่างเหลือน้อยที่สุด

การบรรจุแบบชิดที่สุดเป็นการบรรจุทรงกลมในโครงสร้างผลึกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยการเริ่มจาก ทรงกลมแต่ละลูกจะสัมผัสกับทรงกลมในชั้นเดียวกันตามแนวราบ (ชั้นที่ 1) เรียกชั้นนี้ว่า ชั้น A ดังภาพที่ 1.31(ก) และในชั้นที่ 2 ให้บรรจุทรงกลมลงไปซ้อนทับช่องว่าง (สมมติคือช่อง x) ดังภาพที่

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

1.31 (ข) ของทรงกลมในชั้น A เพื่อให้ทรงกลมทั้งหมดอยู่ใกล้กันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เรียกชั้นที่ 2 นี้ว่า ชั้น B ดังภาพที่ 1.31(ค)

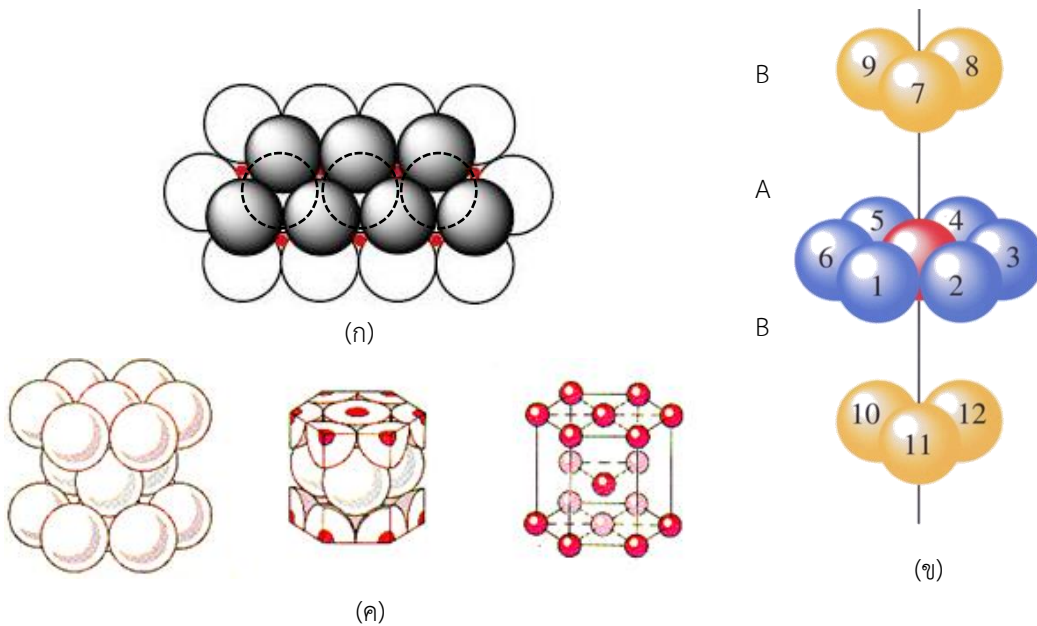
การเรียงในชั้นที่ 3 ทำได้ 2 ลักษณะ ซึ่งทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึก 2 ชนิดคือ การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล (hcp) และการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (ccp)



ภาพที่ 1.31 การบรรจุแบบชิดที่สุดของทรงกลมในชั้นที่ A และชั้นที่ B (มองจากด้านบน)

1) การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal closest-packed: hcp)

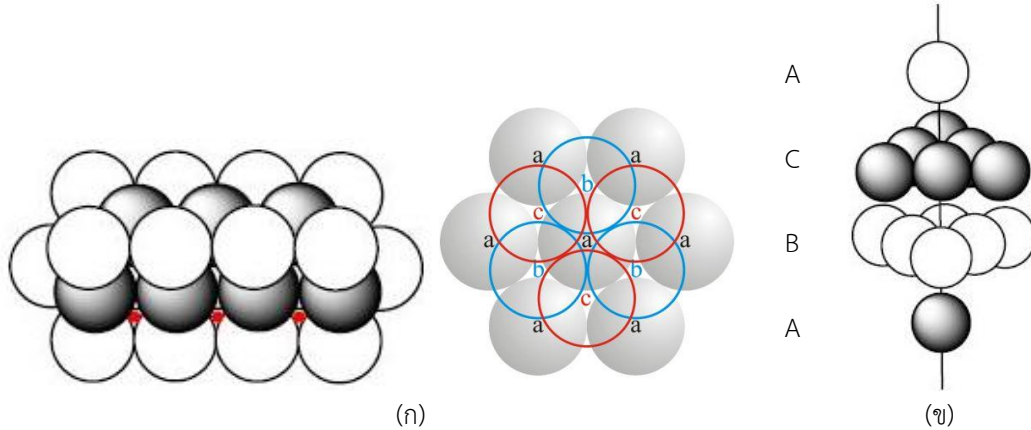
การบรรจุทรงกลมในชั้นที่ 3 โดยให้อยู่ตรงจุดศูนย์กลางชั้น A (ทรงกลมชั้น 1 และชั้น 3 ตรงกันในแนวตั้ง) การบรรจุชั้นที่ 3 ให้ตรงช่องว่างจุดวงกลมที่บ ซึ่งการจัดเรียงตัวของทรงกลมในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 3 เหมือนกันจึงเรียกชั้นที่ 3 ว่าเป็นชั้น A เช่นกัน ดังนั้นจึงเรียกการเรียงแบบนี้ว่า การบรรจุทรงกลมแบบ ABABAB... ดังภาพที่ 1.32(ก) จะเห็นว่าชั้นที่ 3 ทรงกลมจะตรงกับชั้นที่ 1 ดังภาพที่ 1.32(ข) การบรรจุชิดที่สุดรูปเฮกซะโกนัลมีพื้นที่ทั้งหมด (ประสิทธิภาพของการบรรจุ) 74% มีช่องว่างอยู่ 26% และมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 12 คือแต่ละทรงกลมสัมผัสกับทรงกลม 6 ลูกในชั้นเดียวกัน สัมผัสกับทรงกลม 3 ลูกในชั้นข้างบนและสัมผัสกับทรงกลมอีก 3 ลูกในชั้นข้างล่าง เซลล์หน่วยของการบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล แสดงดังภาพที่ 1.32(ค)



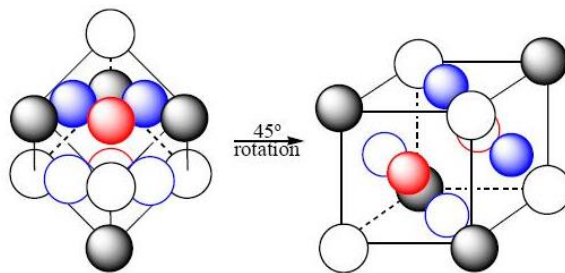
ภาพที่ 1.32 การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล (แบบ ABABAB) (ก) มองจากด้านบน (ข) มองจากด้านข้าง และ (ค) โครงสร้างเซลล์หน่วยแบบเฮกซะโกนัล

2) โครงสร้างการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (cubic closest-packed: ccp)

เป็นการบรรจุทรงกลมโดยชั้นที่ 3 (ชั้น C) ซ้อนทับลงช่องว่างของชั้น A คล้ายกับชั้น B แต่ตำแหน่งไม่ตรงกับชั้น B จึงเรียกการเรียงตัวแบบนี้ว่า ABCABCABC... โดยทรงกลมชั้นที่ 1 และชั้นที่ 4 จะมีศูนย์กลางตรงกัน ดังภาพที่ 1.33 เซลล์หน่วยของโครงสร้างนี้เป็นลูกบาศก์กลางหน้า (fcc) โดยโครงสร้างการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์มีพื้นที่ทั้งหมด 74% มีช่องว่างอยู่ 26% และมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 12 เช่นเดียวกับ hcp ดังภาพที่ 1.34



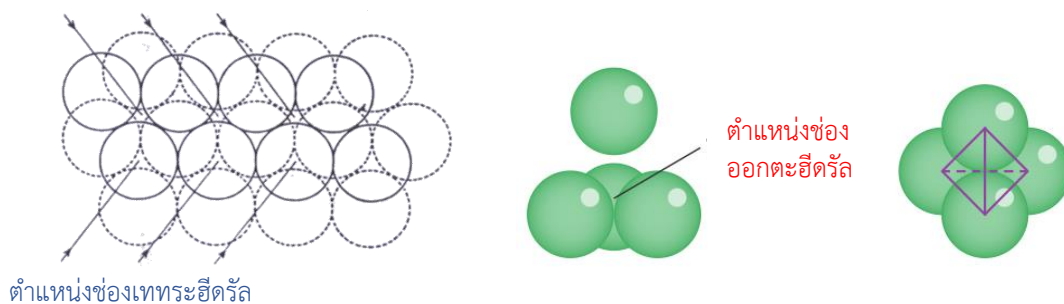
ภาพที่ 1.33 การบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (แบบ ABCABC...) (ก) มองจากด้านบน และ (ข) มองจากด้านข้าง



ภาพที่ 1.34 การบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (แบบ ABCABC...)

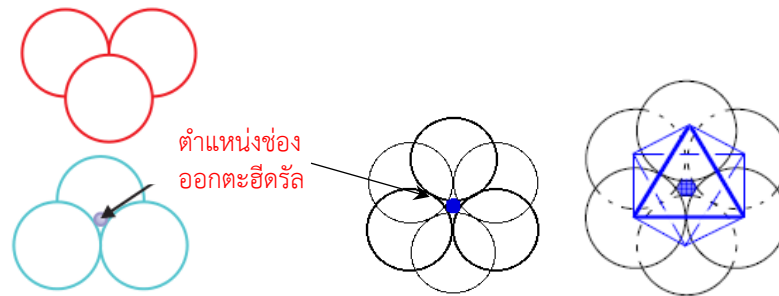
การบรรจุชิดที่สุดจะมีช่องว่างในโครงสร้างการบรรจุชิดที่สุดอยู่ 2 แบบ คือ

1) ช่องว่างเตตระฮีดรัล (tetrahedral hole, t) เกิดจากการเรียงทรงกลมสามลูกแบบชิดสุดบนระนาบเดียวกัน แล้ววางทรงกลมอีกลูกหนึ่งบนชั้นที่หนึ่งโดยให้จุดศูนย์กลางของทรงกลมนี้ทับด้านบนเมื่อเรลากเส้นจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคทั้ง 4 อนุภาค มาเชื่อมต่อกันจะได้เป็นรูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) ช่องว่างที่เกิดจากทรงกลมทั้งสามของชั้นที่หนึ่ง ดังภาพที่ 1.35



ภาพที่ 1.35 ตำแหน่งช่องว่างเตตระฮีดรัล

2) ช่องออกตะฮีดรัล (octahedral hole, o) เกิดจากการเรียงทรงกลมสามลูกแบบชิดสุดในระนาบเดียวกัน แล้ววางทรงกลมอีกสามลูกแบบชิดสุดบนชั้นที่หนึ่ง โดยให้ทรงกลมแต่ละลูกของชั้นที่สองอยู่บนรอยสัมผัสแต่ละแห่งของชั้นที่หนึ่ง และให้ช่องว่างของทั้งสองชั้นที่แต่ชั้นอยู่ในแนวเดียวกัน เมื่อเรลากเส้นจากจุดกึ่งกลางของอนุภาคทั้ง 6 อนุภาค มาเชื่อมต่อกันจะได้เป็นรูปทรงแปดหน้า (Octahedral) ดังภาพที่ 1.36

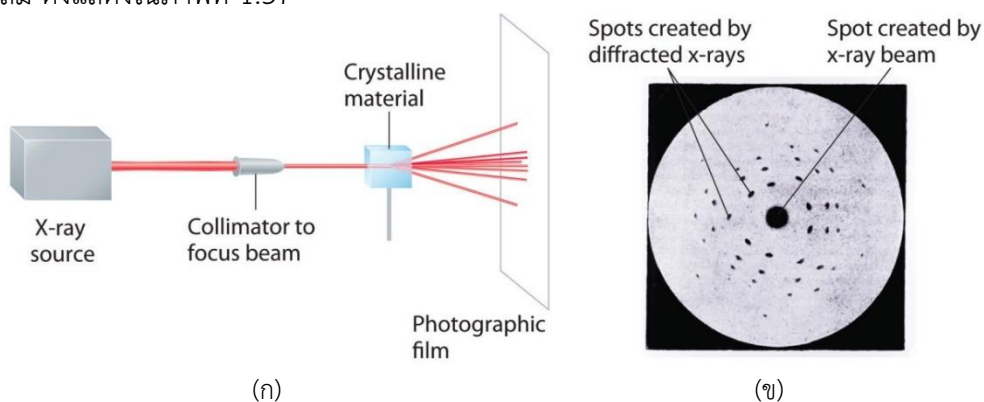


ภาพที่ 1.36 ช่องว่างออกตะฮีดรัล

1.2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกและโครงสร้างผลึกสามัญ

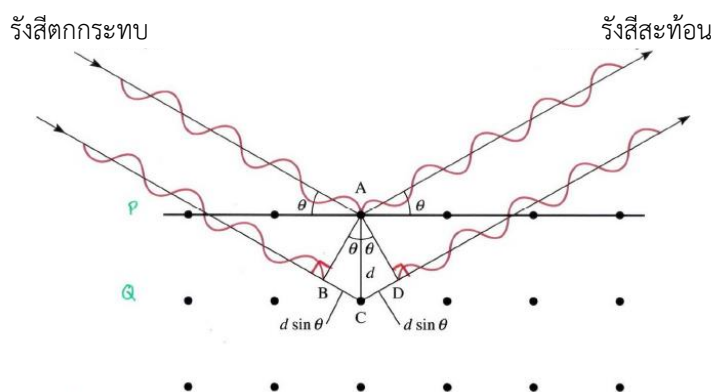
1) การศึกษาโครงสร้างผลึก

การศึกษาโครงสร้างผลึกของแข็งอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction) เมื่อรังสีเอ็กซ์ (x-ray) ตกกระทบพื้นผิวผลึกของแข็ง แล้วจึงนำแบบอย่างการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ที่ได้ไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของอนุภาคในผลึก ในปี ค.ศ.1919 เลาเอ (Max Theodor Felix von Laue) นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน (ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี ค.ศ.1914 จากการค้นพบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) พบว่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นสั้นประมาณ 0.01–10 นาโนเมตร ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างจุดแลตทิซในโครงผลึก ชั้นของโครงผลึกที่มีลักษณะเป็นร่องขนาดเล็กหลายๆ อันจำนวนหลายๆ ชั้น จึงเหมือนเกรตติง (grating) เมื่อรังสีเอ็กซ์ไปกระทบจึงเกิดการเลี้ยวเบนทำให้สามารถแสดงตำแหน่งอะตอมในโครงสร้างผลึกได้ สามารถสะท้อนรังสีเอ็กซ์ แบบอย่างการเลี้ยวเบนเป็นผลการกระจายของรังสีเอ็กซ์จากอะตอมต่างๆ ในผลึกบนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในภาพที่ 1.37



ภาพที่ 1.37 การศึกษาโครงสร้างผลึก (ก) ส่วนประกอบหลักของเครื่อง x-ray diffraction (ข) แบบอย่างของ x-ray diffraction ของผลึกสังกะสีที่เกิดการสะท้อนบนแผ่นฟิล์ม. ดัดแปลงจาก *Principles of General Chemistry* (online), by B.A. Averill, 2012.

แบบอย่างการเลี้ยวเบนของผลึกเกิดขึ้นเนื่องจากการกระจายของรังสีเอ็กซ์ โดยอะตอมที่อยู่ในระนาบที่ขนานกันสองระนาบ รังสีตกกระทบ (incident) สองรังสีเสริมกัน คือเมื่อจุดสูงสุดหรือจุดต่ำสุดของคลื่นทั้งสองอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน คลื่นบนจะถูกสะท้อนโดยอะตอมที่อยู่ในชั้นแรก ในขณะที่คลื่นล่างจะถูกสะท้อนโดยอะตอมที่อยู่ในชั้นที่สองเพื่อที่ให้คลื่นที่สะท้อนออกมาเสริมกันอีก ระยะทางที่คลื่นล่างเคลื่อนที่ไปมากกว่าคลื่นบน โดยเท่ากับผลคูณของตัวเลขลงตัวกับความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์



ภาพที่ 1.38 แสดงการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์จากอะตอมที่อยู่ในระนาบที่ขนานกัน 2 ระนาบ. ที่มาจาก *Chemistry* (p. 485), by R. Chang, & K.A. Goldsby, 2016, McGraw-Hill.

จากภาพที่ 1.38 เขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบและมุมสะท้อน ได้เป็น

$$BC = CD = d \sin \theta$$

$$BC + CD = n\lambda \quad \text{โดยที่ } n = 1, 2, 3$$

$$BC + CD = 2d \sin \theta$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad \dots(1.67)$$

เมื่อ n = อันดับของการเลี้ยวเบน เป็นเลขจำนวนเต็ม (โดยทั่วไปมักใช้ค่า $n = 1$)

λ = ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (nm)

d = ระยะทางระหว่างระนาบที่อยู่ติดกันไป

θ = มุมที่รังสีเอ็กซ์ทำกับระนาบของผลึก

สมการ (1.67) เรียกว่า สมการของแบร็กก์ (Bragg's equation) ตามชื่อผู้ค้นพบคือแบร็กก์ (William Henry Bragg) และลูกชายของเขาคือ William Lawrence Bragg นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ (ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ปี ค.ศ.1915) สมการของแบร็กก์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมและระยะห่างระหว่างชั้นในโครงผลึก

ตัวอย่าง 1.18 เมื่อผ่านรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น 0.154 nm บนผลึกอะลูมิเนียมจะเกิดการสะท้อนของรังสีด้วยมุม 19.3° ถ้าสมมุติว่า $n=1$ คำนวณระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมอะลูมิเนียมที่เกี่ยวข้องกับมุมสะท้อนนี้

วิธีคิด $\lambda = 0.154 \text{ nm}$

$$n = 1$$

$$\theta = 19.3$$

เรียบเรียงโดย ผศ.ดร.วรวิทย์ จันทรสุวรรณ

ลิขสิทธิ์ ©2022 โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

woravith.c@rmutp.ac.th

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (1.67)} \quad d &= \frac{n\lambda}{2 \sin\theta} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta} \\ &= \frac{0.154 \text{ nm}}{2 \sin 19.3} = 0.233 \text{ nm} \end{aligned}$$

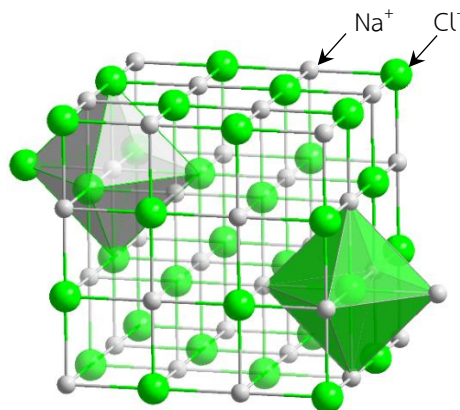
ดังนั้น ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมอะลูมิเนียมเท่ากับ 0.233 nm

2) โครงสร้างผลึกของสารไอออน

ลักษณะสำคัญโครงสร้างแบบซิดของโครงสร้างผลึกของสารประกอบไอออนคือไอออนบวกและไอออนลบเรียงตัวสลับกัน โดยไอออนลบมีขนาดใหญ่กว่าไอออนบวก จึงอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างสามัญของผลึกเกลือไอออนจะมีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ดังนี้

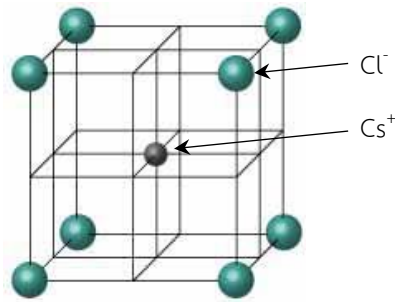
1.1) โครงสร้างแบบ rock salt คือโครงสร้างแบบซิดกันของไอออนลบที่มีไอออนบวกแทรกในช่องว่าง เช่น Na^+ ในเกลือ NaCl ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า Cl^- จึงแทรกอยู่ในช่องว่างออกตะฮีดรัล ทั้ง Na^+ และ Cl^- ต่างจะล้อมรอบซึ่งกันและกัน 6 ไอออน จึงมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 6:6 ดังภาพที่ 1.39

สารประกอบของเฮไลด์ของโลหะแอลคาไล ออกไซด์และซัลไฟด์ของแอลคาไลเอิร์ทที่มีสูตรทั่วไป AB (เมื่อ A คือแคตไอออน และ B คือแอนไอออน) เช่น KCl , KBr , KI , LiI , CaO , CaS , AgCl , AgBr , NH_4I , MnS , MnO และ PbS จะมีสูตรโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกัน



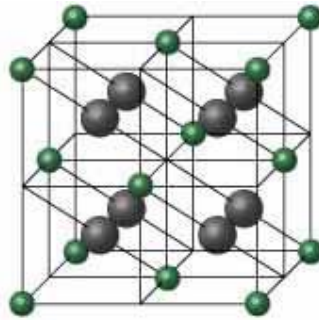
ภาพที่ 1.39 โครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์

1.2) โครงสร้างแบบซีเซียมคลอไรด์ (cesium chloride structure) คือโครงสร้างผลึกที่มีขนาดไอออนบวกและไอออนลบใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 1.40 รัศมีไอออนของ Cs และ Cl เท่ากับ 1.67 และ 1.81 นาโนเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นการเรียงไอออนทั้งสองจึงไม่เป็นแบบซิดกัน แต่จะเป็นแบบลูกบาศก์กลางตัว (bcc) โดยมีเลขโคออร์ดิเนชันเท่ากับ 8:8 สารประกอบเช่น CsBr , CsI , RbCl , RbBr , NH_4Cl และ NH_4Br จะมีสูตรโครงสร้างผลึกเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 1.40 โครงสร้างผลึกของซีเซียมคลอไรด์

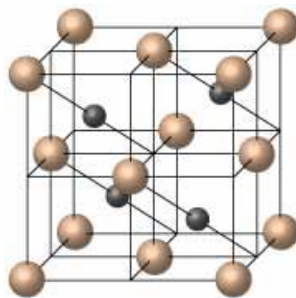
1.3) โครงสร้างแบบฟลูออไรต์ (fluorite structure) คือสารประกอบที่มีสูตรเป็น AB_2 เช่น CaF_2 จะมี Ca^{2+} เรียงแบบลูกบาศก์กลางหน้า โดย F^- เข้าแทรกในช่องว่างเตตระฮีดรัลทั้งหมด ดังนั้นจึงมี Ca^{2+} อยู่ใกล้ชิด 4 ไอออน และ Ca^{2+} จะมี F^- ล้อมอยู่ 8 ไอออน จึงมีเลขโคออร์ดิเนชัน 8:4 สารประกอบของ SrF_2 , $SrCl_2$, BaF_2 , CdF_2 , PbF_2 , ZrO_2 , HfO_2 , NpO_2 , ThO_2 , PuO_2 และ AmO_2 จะมีสูตรโครงสร้างผลึก ดังภาพที่ 1.41



ภาพที่ 1.41 โครงสร้างผลึกของแคลเซียมฟลูออไรต์

4) โครงสร้างแบบซิงค์ซัลไฟด์ (zinc sulfide structure) มี 2 แบบคือ แบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende) รัศมีของสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) เท่ากับ 74 pm และซัลไฟด์ (S^{2-}) เท่ากับ 190 pm อัตราส่วนระหว่างรัศมีของไอออนบวกและลบ (r_+/r_-) เป็น 0.39 จากค่า (r_+/r_-) น้อยกว่า 0.414 บอกจำนวนของเลขโคออร์ดิเนชันได้เท่ากับ 4 ซึ่งในผลึกที่มีสูตรเป็น AB (เมื่อ A คือไอออนบวก และ B คือไอออนลบ) จะมีโครงสร้างได้ทั้ง ซิงค์เบลนด์ (zinc blende) และ แบบเวิร์ตไซด์ (zinc wurtzite)

ถ้า S^{2-} จัดเรียงแบบการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ Zn^{2+} จะเข้าไปแทรกตามช่องเตตระฮีดรัล ได้เพียงครึ่งหนึ่งของจำนวนช่องเตตระฮีดรัลทั้งหมด เกิดเป็นโครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังภาพที่ 1.42



ภาพที่ 1.42 โครงสร้างผลึกของซิงค์ซัลไฟด์

3) โครงสร้างสามัญของผลึกโลหะ

ธาตุที่เป็นโลหะส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวแบบหนึ่งแบบใดระหว่าง การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล (hcp) และการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ (ccp)

ตารางที่ 1.7 รูปแบบโครงสร้างผลึกและสมบัติกายภาพของโลหะบางชนิด

โลหะ	โครงสร้างผลึก	รัศมีอะตอม (nm)	จุดหลอมเหลว (°C)	จุดเดือด (°C)
Al	fcc	0.1431	660	2,647
Cd	hcp	0.1490	321	767
Cr	bcc	0.1249	1,857	2,642
Co	hcp	0.1253	1,495	2,877
Cu	fcc	0.1278	1,084	2,582
Au	fcc	0.1442	1,064	3,080
Pb	fcc	0.1750	327	1,744
Ag	fcc	0.1445	961	2,212
Zn	hcp	0.1332	419	907

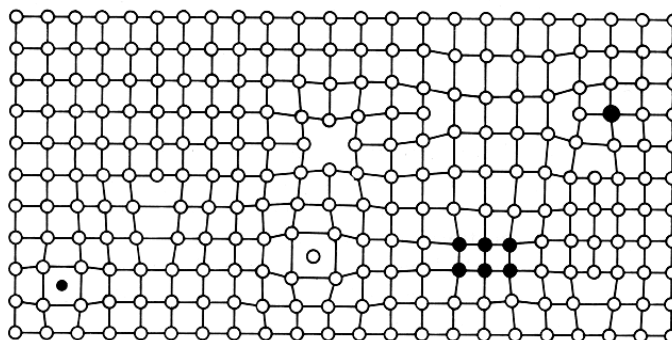
หมายเหตุ. ดัดแปลงจาก เคมี 2 (หน้า 177), สอน, 2551.

ชนิดโครงสร้างผลึกของโลหะเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ เช่น จุดหลอมเหลว จุดเดือด ความแข็ง และความหนาแน่น

โลหะที่สามารถดึงเป็นเส้นได้ ได้แก่ ทองแดง (Cu) เงิน (Ag) และทอง (Au) จะเป็นแบบ ccp ทั้งนี้เพราะมีจำนวนอะตอมที่อยู่ชิดกันมากและที่ว่างพอที่จะทำให้อะตอมยืดหดได้

4) ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

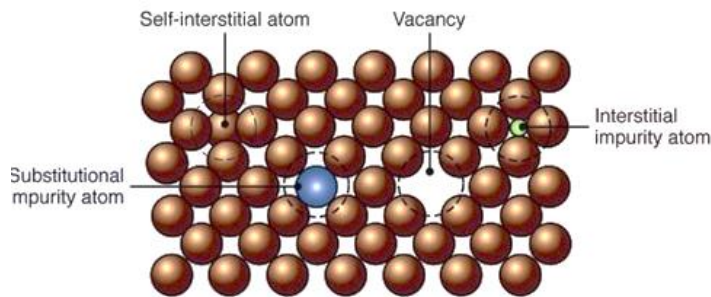
โครงสร้างของผลึกสมบูรณ์ (perfect crystal) ถ้าโครงสร้างของผลึกมีอนุภาค (อะตอม หรือโมเลกุล หรือไอออน) บางส่วนขาดหายไป เกิดเป็นช่องว่าง หรือมีอนุภาคอื่นเข้าแทนที่ หรือแทรกตัวในโครงผลึก ดังภาพที่ 1.43 ผลึกของแข็งจะมีความไม่สมบูรณ์ หรือตำหนิของผลึก (defect crystal) อันเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะตอมเอง หรือความไม่สมบูรณ์จากอิเล็กตรอนของอะตอมที่อยู่ในโครงผลึกนั้น ๆ



ภาพที่ 1.43 ลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึก

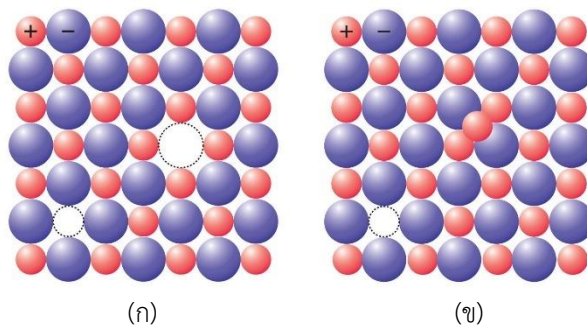
ปัจจัยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะมีผลทำให้การเรียงตัวของอนุภาคเกิดความไม่เป็นระเบียบขึ้นส่งผลให้ผลึกมีความบกพร่อง (imperfection) ความบกพร่องของผลึกเพียงเล็กน้อยมีผลให้คุณสมบัติของแข็งเปลี่ยนไปจากเดิม ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้

- 1) ตำหนิแบบจุด (point defects) จำแนกออกเป็นหลายชนิด แสดงดังภาพที่ 1.44 ดังนี้
 - 1.1) ช่องว่าง (vacancy) คือ อนุภาคที่จุดแลตทิซนั้นหายไปจากตำแหน่งเดิม
 - 1.2) จุดแลตทิซสอดแทรก (self-interstitial) คือ อนุภาคที่จุดแลตทิซเลื่อนไปอยู่ในตำแหน่งที่ว่างแต่ไม่ใช่ตำแหน่งเดิม
 - 1.3) ปนเปื้อนแบบแทนที่ (substitutional impurity) คือ อนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันเข้าไปอยู่ในช่องว่างแทน แต่อนุภาคนั้นไม่ใช่อนุภาคที่จุดแลตทิซที่เกิดจากการประกอบกันเป็นผลึก
 - 1.4) ปนเปื้อนแบบสอดแทรก (interstitial impurity) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าเข้าไปอยู่ในช่องว่างแทน แต่อนุภาคนั้นไม่ใช่อนุภาคที่จุดแลตทิซที่เกิดจากการประกอบกันเป็นผลึก



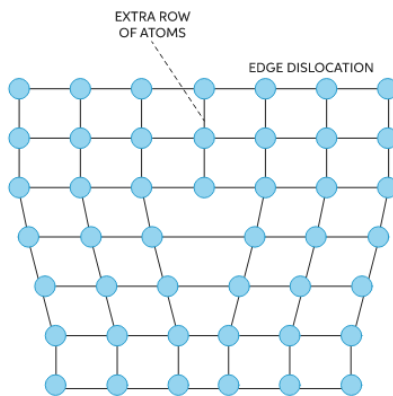
ภาพที่ 1.44 ตำหนิแบบจุด

นอกจากนี้ยังมีตำหนิแบบจุดอีก 2 แบบคือ ตำหนิแบบเฟรนเกล (Frenkel defect) และตำหนิแบบชอตทกี (Schottky defect) ดังภาพที่ 1.45 โดยแบบแรกตำหนิแบบเฟรนเกลเกิดจากไอออนเลื่อนไปอยู่ใน ช่องว่าง โดยเลื่อนจากผิวหน้าหรือเลื่อนจากภายในมายังช่องว่างของผลึก



ภาพที่ 1.45 ตำหนิแบบจุด (ก) ตำหนิแบบชอตทกี และ (ข) ตำหนิแบบเฟรนเกล

2) ตำหนิแบบเส้น (line defects หรือ dislocations) โครงผลึกมีการเรียงตัวผิดไปจากที่ควรจะเป็น ทำให้โครงผลึกบิดเบี้ยว รอบๆ เส้นตรง (สมมติ) เส้นหนึ่ง (ภาพที่ 1.46)



ภาพที่ 1.46 ตำนินแบบเส้น

ความผิดปกติของโครงผลึกทำให้สมบัติทางกายภาพบางประการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว การนำไฟฟ้า เป็นต้น เหล็กที่เรียกว่าเหล็กหล่อมีคาร์บอนปน 2.2-2.5% จะมีความแข็งแรงมาก แต่เปราะง่าย ส่วนที่เรียกว่าเหล็กพิตมีคาร์บอนเจือ 0.12-2.5% มีความแข็งแรงแต่เหนียวกว่า สามารถดึงเป็นเส้นได้และผลึกของแข็งบางอย่างเป็นผลึกสมบูรณ์ไม่นำไฟฟ้า ถ้ามีธาตุอื่นเจือปนอยู่อาจนำไฟฟ้า ผลึกเช่นนี้จะมีสมบัติที่เรียกว่าเป็นสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น ผลึก Ge บริสุทธิ์ เป็นฉนวนเมื่อผสมธาตุ Ga ลงไปเล็กน้อยทำให้เกิดช่องว่าง (hole)

สรุปท้ายบทเรียน

ของแข็งมีเรียงตัวขึ้นเป็นผลึกของแข็งที่อยู่ในตำแหน่งที่แน่นอนและใกล้ชิดกันมาก จึงทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง ผลึกของแข็งคือของแข็งที่อนุภาค (อะตอม ไอออน หรือโมเลกุล) จัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบและมีรูปร่างผลึกเป็นทรงเรขาคณิต ส่วนของแข็งอสัณฐานคือของแข็งที่ประกอบขึ้นด้วยอนุภาคที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เช่น แก้ว ยาง และพลาสติก ประเภทผลึกของแข็งแบ่งตามชนิดของแรงที่ยึดเหนี่ยวอนุภาคต่าง ๆ ในผลึก ประกอบด้วย ผลึกไอออน ผลึกโคเวเลนต์ ผลึกโมเลกุล และผลึกโลหะ โครงสร้างผลึกของแข็งเป็นการเรียงตัวของอนุภาคที่เป็นระเบียบแบบแผนทางเรขาคณิตในโครงข่ายระบบสามมิติ เรียกว่า แลตทิซผลึก ซึ่งด้วยเซลล์หน่วยมาเรียงต่อกัน โดยถือว่าทรงกลมที่อยู่ตรงหน้าหรือมุมของเซลล์หน่วยหนึ่งจะเป็นส่วนของอีกเซลล์หน่วยหนึ่งที่อยู่ติดกันด้วยขนาดและรูปร่างของเซลล์หน่วยกำหนดด้วยแลตทิซพารามิเตอร์ที่กำหนดด้วยความยาวแต่ละด้านตามขอบ และกำหนดด้วยมุมของแกนในโครงสร้างสามมิติ เซลล์หน่วยมาตรฐานมีทั้งหมด 7 ระบบ แบ่งออกเป็น 14 แบบ เรียกว่า แลตทิซบราว การจัดเรียงอนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวกันอย่างชิดที่สุดเท่าที่จะทำได้ เรียกว่า การบรรจุชิดที่สุด ซึ่งจะมีช่องว่างเหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึก 2 ชนิด คือ การบรรจุชิดที่สุดแบบเฮกซะโกนัล และการบรรจุชิดที่สุดแบบลูกบาศก์ โครงสร้างของผลึกไม่สมบูรณ์ เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างของผลึกมีอนุภาคบางส่วนขาดหายไป เกิดเป็นช่องว่าง หรือมีอนุภาคอื่นเข้าแทนที่ หรือแทรกตัวในโครงผลึก ผลึกของแข็งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเอง หรือความไม่สมบูรณ์จากอิเล็กตรอนของอะตอมที่อยู่ในโครงผลึก ซึ่งความผิดปกติของโครงผลึกทำให้สมบัติทางกายภาพบางประการเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความแข็งแรง ความเหนียว การนำไฟฟ้า เป็นต้น

กิจกรรม

ขั้นตอน	วิธีการ
แนะนำโจทย์ปัญหา (P)	แจกใบกิจกรรม 1.2
ไตร่ตรองทางแก้ไขเฉพาะตน (E)	แต่ละคนบอกวิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา (10 นาที)
ระดมสมองโดยกลุ่ม (T)	ให้รวมกลุ่ม มอบหมายโจทย์ให้แต่ละกลุ่มระดมสมองแก้ไขโดยวิธีการร่วมแสดงความคิดเห็น (10 นาที)
สื่อสารทางออก (C)	ให้แต่ละกลุ่มนำเสนอ วิธีการแก้ไขโจทย์ปัญหา 1) หลักการสำคัญหรือหลักพื้นฐานที่ถูกต้อง 2) วิธีการคำนวณค่าที่ถูกต้อง 3) วิธีอธิบายเชิงพฤติกรรม (วิธีปฏิบัติ) ที่ถูกต้อง โดยให้กลุ่มอื่น ๆ รับฟัง และซักถามในข้อที่สงสัย (10 นาที)
ถอดรหัสปรับใช้ (D)	ผู้สอนสรุป อภิปรายสรุป ความถูกต้องและความผิดพลาด โดยเพิ่มเติมประเด็นที่เกี่ยวข้องให้สมบูรณ์

แบบฝึกหัดท้ายบทเรียน

1. จงอธิบายเซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์ พร้อมวาดภาพเซลล์หน่วย
2. จงแสดงการคำนวณหาร้อยละแฟกเตอร์การบรรจุโดยอะตอม (%APF) ของลูกบาศก์กลางหน้า (fcc)
3. จงบอกเลขโคออร์ดิเนชันของเซลล์หน่วยแบบลูกบาศก์
4. โครงสร้างผลึกทองคำ (Au) เป็นแบบลูกบาศก์กลางหน้า (fcc) มีความยาวตามขอบของเซลล์หน่วยเท่ากับ 407.86 pm จงคำนวณหารัศมีของอะตอมของทองคำ (หน่วยพิโกเมตร)
5. รัศมีของอะตอมเงินเท่ากับ 144 pm จงหาความหนาแน่นของอะตอมเงินในหน่วย g/cm^3 และถ้าเงินตกผลึกได้โครงสร้างเป็นแบบ (ก) sc, (ข) bcc และ (ค) fcc กำหนด ความหนาแน่นของเงินที่แท้จริงมีค่าเท่ากับ 10.6 g/cm^3 โครงสร้างผลึกของเงินจะเป็นแบบใด
6. โลหะเงินมีความหนาแน่น 10.5 g/cm^3 มีผลึกที่มีความยาวตามขอบของเซลล์หน่วยเท่ากับ 0.41 nm จงหาจำนวนอะตอมที่มีในเซลล์หน่วย
7. รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่น 154 pm ไปถึงยังผลึกชนิดหนึ่ง วัดมุมการสะท้อนของรังสี 22.5° ถ้าสมมติว่า $n=1$ จงคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกชนิดนี้ (หน่วยพิโกเมตร) ที่เกี่ยวข้องกับมุมสะท้อนนี้

เอกสารอ้างอิง

- โครงการตำราวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์มูลนิธิ สอวน. (2551) *เคมี 2*. (พิมพ์ครั้งที่ 2). บริษัทด้าน
สุทธนาการพิมพ์ จำกัด.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. (2558). *เคมีวัสดุ เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- อภิสิทธิ์ ศงสะเสน, สรณนรินทร์ บังเกิดผล และอาทิตย์ สกุดตันติเมธา. (2554). *เคมีทั่วไปสำหรับ
วิศวกร*. บริษัททริฟเพิ้ลกรุ๊ป จำกัด.
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์ และปัญญา พูลโกคา. (2554). *เคมีทั่วไป สำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์* (ฉบับ
ปรับปรุง) (พิมพ์ครั้งที่ 9). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Averil, B.A. (2012). *Principles of General Chemistry* (Online).
[https://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-
v1.0m/index.html](https://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0m/index.html)
- Brown, L.S., & Holme, T.A. (2018). *Chemistry for Engineering Students* (4th ed.). Thomson
Brook Cole.
- Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J., Woodward, P.M. & Stoltzfus, M.W.
(2017). *Chemistry: The Central Science* (14th ed.). Pearson Education, Inc.
- Chang, R., & Goldsby, K.A. (2016). *Chemistry* (12th ed.). McGraw-Hill.
- Crystallographic Defects*. (n.d.). [https://www.tec-science.com/material-
science/structure-of-metals/crystallographic-defects/](https://www.tec-science.com/material-science/structure-of-metals/crystallographic-defects/)
- Ebbing, D.D., & Gammon, S.D. (2017). *General Chemistry* (11th ed.). Cengage Learning.
- Imperfections or Defects in a Solid*. (n.d.). [https://www.toppr.com/guides/chemistry/
the-solid-state/imperfections-or-defects-in-a-solid](https://www.toppr.com/guides/chemistry/the-solid-state/imperfections-or-defects-in-a-solid)
- Jespersen, N.D., Brady, J.E., & Hyslop, A. (2012). *Chemistry: The Molecular Nature of
Matter* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc
- Lattice Structure of Crystals*. (n.d.). [https://www.coursehero.com/sg/general-
chemistry/lattice-structure-of-crystals/](https://www.coursehero.com/sg/general-chemistry/lattice-structure-of-crystals/)
- Metals and Unit Cells*. (n.d.). [https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/
bp/materials/unitcell2.html](https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/materials/unitcell2.html)
- Petrucci, R.H., Herring, F.G., Madura, D.J., & Bissonnette, C. (2017). *General Chemistry:
Principles and Modern Applications* (11th ed.). Pearson Prentice Hall.
- Overby, J. & Chang, R., (2022). *Chemistry* (14th ed.). McGraw-Hill.
- Silberberg, M.S. (2013). *Principle of General Chemistry* (3rd ed.). McGraw-Hill Publishing
Company.
- Silberberg, M.S. & Amateis, P.G. (2021). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and
Change* (9th ed.). McGraw-Hill Publishing Company.