บทที่ 6

แก๊ส

6.1 บทนำ

โดยทั่วไปสสารแบ่งออกเป็น 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สถานะแก๊สเป็นสถานะที่ง่ายที่สุดที่สามารถอธิบายได้ ทั้งทางทฤษฎีและทางการทดลอง การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องของสารต่างๆ ในสถานะแก๊สนี้ จะสามารถให้ข้อมูลและตัวอย่างของวิธีการทางวิทยาศาสตร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากจะแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้วยังสามารถนำไปสู่การคำนวณ ทางปริมาณสารสัมพันธ์ได้อีกด้วย

ลักษณะของแก๊ส คือ ไม่มีรูปร่างหรือปริมาตรที่แน่นอน มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย ทำให้มีการฟุ้งกระจาย เพราะโมเลกุลมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว และไม่มีทิศทางที่แน่นอน เมื่อเคลื่อนที่ไปชนผนังภาชนะ จะทำให้เกิดความดัน สามารถถูกอัดได้ง่ายและมากกว่าของเหลว ถ้าแก๊สมีการเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน จะทำให้ปริมาตรเปลี่ยนแปลง โดยปริมาตรของแก๊สจะมีส่วนผกผันกับความดันที่มากระทำ และเมื่อนำแก๊สหลายชนิดมาใส่ในภาชนะเดียวกัน จะเกิดการรวมกันเป็นเนื้อเดียวอย่างสมบูรณ์ (ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541)

คุณสมบัติบางประการของแก๊สที่แตกต่างจาก ของแข็งและ ของเหลว คือ

1) แก๊สมีลักษณะโปร่งใส

2) มีความหนาแน่นน้อยกว่าของแข็งและของเหลว

3) รูปร่างและปริมาตรไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุ

4) อนุภาคของแก๊สอยู่ห่างกันมากกว่าของแข็งและของเหลว

5) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ปริมาตรของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงได้มากกว่าของแข็งและของเหลว

6) แก๊สสามารถถูกอัดได้มากกว่าของเหลว

นักวิทยาศาสตร์ได้ริเริ่มศึกษาเกี่ยวกับแก๊สอย่างเป็นรูปแบบในปี ค.ศ.1660 Robert Boyle ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความดันของแก๊ส โดยคิดว่าอากาศเป็นอนุภาคเล็กที่มีมวลและมีการยืดหดได้ ซึ่งต่อมาได้กลายเป็นกฎที่เรียกว่า กฎของบอยล์ ในระหว่างปี ค.ศ.1805 – 1815 Joseph Louis Gay-Lussac ได้ศึกษาการรวมตัวโดยปริมาตรของแก๊สชนิดหนึ่ง แล้วได้แก๊สอีกชนิดหนึ่ง และผลการศึกษานี้ได้รับการยืนยันโดยสมมติฐานของอาโวกาโดร (Amaedeo Avogadro, 176 – 1856) ต่อมาในปี

ค.ศ.1858 Stanislav Cannizzaro ได้ใช้สมมติฐานของอาโวกาโดรในการคำนวนน้ำหนักอะตอมของธาตุจนได้ทฤษฎีจลน์โมเลกุลของแก๊สขึ้น

การศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของแก๊ส มีตัวแปรที่สำคัญ คือ อุณหภูมิ ปริมาตร ความดัน และปริมาณของแก๊สหรือจำนวนโมลของแก๊สนั่นเอง และเพื่อความสะดวกในการศึกษาเกี่ยวกับแก๊ส นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งแก๊สออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. แก๊สอุดมคติ หรือแก๊สสมมติ (Ideal gas) คือแก๊สที่ไม่มีอยู่จริง และมีสมบัติคือ ไม่มีขนาดโมเลกุล และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุล โดยจะมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎต่างๆของแก๊สอุดมคติ

2. แก๊สจริง (Real gas) เป็นแก๊สที่มีอยู่จริงตามธรรมชาติ มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล มีขนาดของโมเลกุล ไม่เป็นไปตามกฎของแก๊สอุดมคติ แต่แก๊สจริงจะมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับแก๊สอุดมคติ เมื่อมีความดันต่ำมากๆ หรือมีอุณหภูมิสูงมากๆ

6.2 ตัวแปรที่สำคัญของแก๊ส

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ตัวแปรที่มีความสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของแก๊ส คือ ปริมาตร อุณหภูมิ และความดัน

6.2.1 ปริมาตรของแก๊ส (Volume; V)

เนื่องจากโมเลกุลของแก๊ส มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระ และมีการฟุ้งกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ ดังนั้น ปริมาตรของแก๊สจึงหมายถึง ปริมาตรของภาชนะที่บรรจุแก๊สนั้นๆ หน่วยของปริมาตรที่ใช้ แสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงหน่วยของปริมาตรที่ใช้ทั่วไป และหน่วย SI*

หน่วยที่ใช้ทั่วไป	**หน่วย SI**
ลิตร(L)	ลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3)
มิลลิลิตร (mL)	ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)
	ลูกบาศก์เมตร (m^3)

*International system of units

6.2.3 อุณหภูมิ (Temperature; T)

อุณหภูมิในที่นี้คืออุณหภูมิของแก๊สที่บรรจุในภาชนะ เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิมีหลายชนิด ได้แก่ เทอร์มอมิเตอร์ (Thermometer) เทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple) และมาตรอุณหภูมิสูง(Pyrometer) โดยเครื่องมือที่นิยมและง่ายต่อการใช้วัดอุณหภูมิ คือ เทอร์มอมิเตอร์

หน่วยของอุณหภูมิมีหลายแบบ ขึ้นกับเครื่องมือที่ใช้วัด เช่น องศาเซลเซียส (^{o}C) องศาฟาเรนไฮต์ (^{o}F) และ เคลวิน (K) เป็นต้น ในการศึกษาเกี่ยวกับแก๊ส นิยมใช้หน่วย เคลวิน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับหน่วยองศาเซลเซียส ดังนี้

$$K = 273.15 + {}^{o}C$$

6.2.3 ความดัน (Pressure; P)

คือแรงกระทำต่อหน่วยพื้นที่ ถ้าแก๊สบรรจุในภาชนะ ความดันของแก๊สจะเกิดจากการที่โมเลกุลของแก๊สเคลื่อนที่ไปชนผนังภาชนะบรรจุ หน่วยของความดันของแก๊สมีหลายหน่วย เช่น นิวตันต่อตารางเมตร ($N\ m^{-2}$) ไดน์ต่อตารางเซนติเมตร ($dyne\ cm^{-2}$) ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ($lb\ in^{-2}$) มิลลิเมตรปรอท (mmHg) ทอรร์ (Torr) บรรยากาศ (atm) พีเอสไอ (psi) และ ปาสคาล (Pa) ซึ่งในแต่ละหน่วยมีความสัมพันธ์กันดังนี้

1 บรรยากาศ (atm) = 760 mmHg

= 750 torr

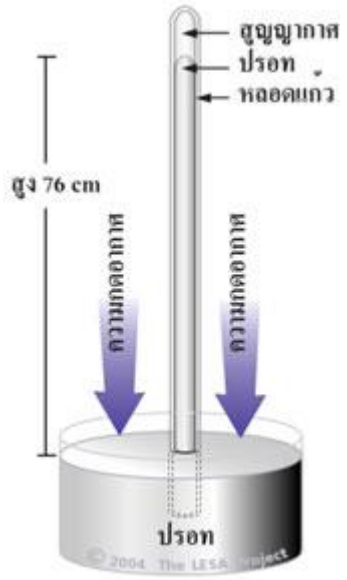
= 14.7 $lb\ in^{-2}$

= 1.011325×10^{6} $dyne\ cm^{-2}$

= 1.01325×10^{6} $N\ m^{-2}$

= 1.01325×10^{6} Pa

การวัดความดันบรรยากาศ สามารถวัดได้จากเครื่องมือที่เรียกว่า บารอมิเตอร์ที่สร้างโดยนักฟิสิกส์ชาวอิตาลี Evangelista Torricelli ในปีค.ศ.1643 ดังรูปที่ 6.1 ประกอบไปด้วยหลอดแก้วที่มีปลายด้านหนึ่งปิดสนิท บรรจุปรอทจนเต็ม คว่ำลงในอ่างที่บรรจุปรอทไว้เช่นกัน ลำปรอทจะลดลงเล็กน้อย ทำให้เกิดที่ว่างเป็นสุญญากาศเหนือลำปรอดในหลอดแก้ว เรียกว่า ที่ว่างตอร์รีเชลลี (Torricellian vacuum)



รูปที่ 6.1 บารอมิเตอร์ปรอท
(ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541)

จากรูปที่ 6.1 การที่ปรอทค้างอยู่ในหลอดแก้วได้นั้น เป็นเพราะมีอากาศกดอยู่ที่ผิวของปรอทในอ่าง แสดงว่าความดันของอากาศที่กดบนผิวของปรอทในอ่าง เท่ากับความดันเนื่องจากมวลของปรอทที่อยู่ในหลอดแก้วเหนือระดับปรอทในอ่าง

ความดันที่เกิดจากมวลของปรอทในหลอดแก้วเหนือระดับปรอดในอ่างคำนวณได้ดังนี้

$$\text{ความดัน} = \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่}}$$

กำหนดให้ P คือ ความดัน F คือ แรง และ A คือ พื้นที่ จะได้

$$P = \frac{F}{A} \qquad (6.1)$$

จากกฎของนิวตัน F = ma เมื่อ m คือ มวล และ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก แทนค่า F ใน (6.1)

$$P = \frac{mg}{A} \qquad (6.2)$$

จาก $D = \frac{m}{V}$; $m = DV$

แทนค่า m ใน (6.2) จะได้ $P = \frac{DVg}{A}$ (6.3)

A คือพื้นที่หน้าตัดของปรอท ดังนั้น $A = \pi r^2$

V คือปริมาตรของปรอทในหลอดแก้ว ดังนั้น $V = \pi r^2 h$

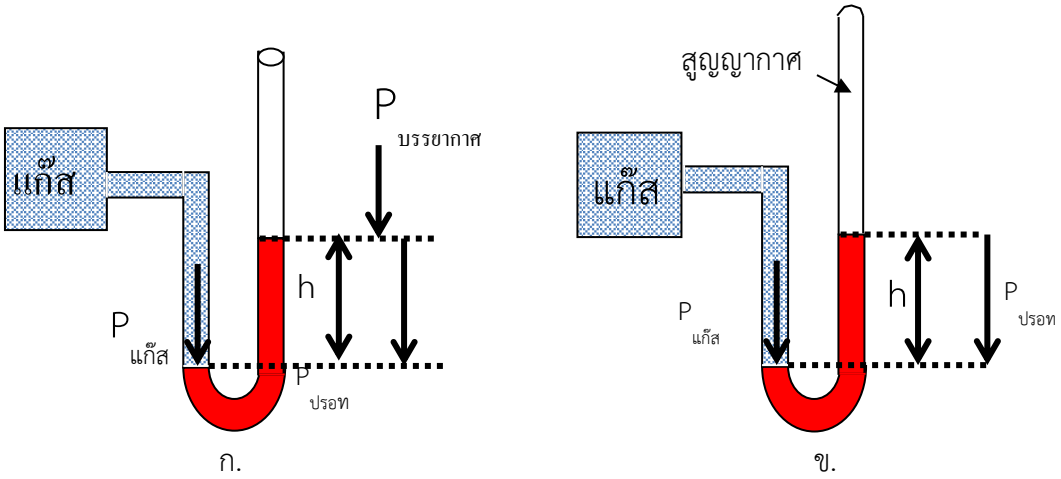
แทนค่า A และ V ใน (1.3) จะได้

$$P = \frac{D\pi\pi^2 hg}{\pi r^2}$$

$$P = Dgh \qquad (6.4)$$

จากสมการ 6.4 จะเห็นว่า D และ g เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ความดันจึงแปรผันโดยตรงกับความสูงของปรอทในหลอดแก้ว

สำหรับการวัดความดันของแก๊ส จะใช้เครื่องมือ แมนอมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งทำเป็นหลอดแก้วรูปตัวยู ภายในบรรจุปรอท หรือของเหลวอื่นที่ทราบความหนาแน่น มี 2 ชนิด คือ แมนอมิเตอร์ชนิดปลายเปิด และแมนอมิเตอร์ชนิดปลายปิด ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงแมนอมิเตอร์ ก. ชนิดปลายเปิด และ ข. ชนิดปลายปิด

จากรูป 6.2 ก. แมนอมิเตอร์ชนิดปลายเปิด สามารถหาความดันของแก๊สได้จาก

$$P_{แก๊ส} = P_{บรรยากาศ} + P_{ปรอท}$$

จากสมการ ค่าความดันบรรยากาศอ่านค่าได้จากบารอมิเตอร์ และความดันเนื่องจากความสูงของปรอท h คำนวณได้จากสมการที่ 6.4 จากรูป 6.2 ก. ถ้าระดับปรอทที่ต่ออยู่กับแก๊ส สูงกว่าระดับปรอททางปลายเปิด แสดงว่าความดันของแก๊สน้อยกว่าความดันบรรยากาศ

$$P_{แก๊ส} = P_{บรรยากาศ} - P_{ปรอท}$$

จากรูป 6.2 ข. เป็นแมนอมิเตอร์ชนิดปลายปิด ถ้าลำปรอทในหลอดแก้วปลายปิด สูงกว่าระดับปรอทที่ต่ออยู่กับแก๊สเท่ากับ h ความดันของแก๊สจะเท่ากับความดันเนื่องจากปรอทสูงเท่ากับ h

$$P_{แก๊ส} = P_{ปรอท}$$

ในความเป็นจริงปรอทจะมีความดันไอ แต่เนื่องจากความดันไอของปรอทมีค่าน้อยมาก จึงไม่คิดค่าความดันไอของปรอท

6.2.4 อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน(Standard Temperature and Pressure; STP)

ความดันมาตรฐาน หมายถึง ความดันเฉลี่ยของบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล ที่ทำให้ปรอทขึ้นไปสูง 760 มิลลิเมตร ที่ 0 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 1 บรรยากาศ

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ จึงกำหนดค่าอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน ดังนี้

- อุณหภูมิมาตรฐาน คือ $0^{o}C$ หรือ 273.15 K

- ความดันมาตรฐาน คือ 1 atm หรือ 1.01325×10^{5} ปาสคาล(หรือ $N\ m^{-2}$) หรือเท่ากับ 760 ทอรร์

6.3 กฎของบอยล์ (Boyle's law)

ในปี ค.ศ.1662 โรเบิร์ด บอยล์(Robert boyle) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรของแก๊ส ที่อุณหภูมิและมวลของแก๊สคงที่ ผลที่ได้สามารถสรุปเป็นกฎของบอยล์ ได้ว่า "ณ อุณหภูมิและมวลของแก๊สคงที่ ปริมาตรของแก๊สจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความดันของแก๊สนั้น" ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$V \ \alpha \ \frac{1}{P}$$ เมื่อ T และ n คงที่

ดังนั้น $$V = \frac{k}{P}$$ k คือ ค่าคงที่

จะได้ $$PV = k$$ (6.5)

กำหนดให้ V = ปริมาตรของแก๊ส

P = ความดัน

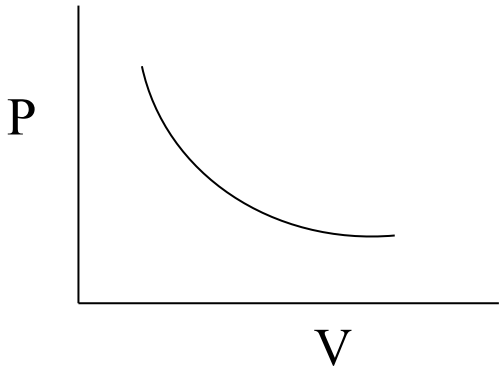
T = อุณหภูมิ

n = จำนวนโมลของแก๊ส

จากสมการ 6.5 เมื่อความดันของแก๊สเปลี่ยนจาก P_1 เป็น P_2 และปริมาตรเปลี่ยนจาก V_1 เป็น V_2 จะได้

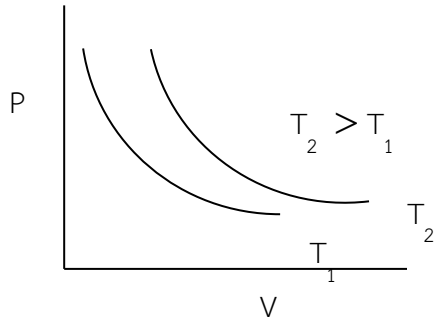
$$P_1V_1 = P_2V_2 \qquad (6.6)$$

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองของบอยล์มาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตร จะได้กราฟที่มีลักษณะเป็นไฮเปอร์โบลา(Hyperbola) เรียกว่า ไอโซเทอม(Isotherm) ดังรูป 6.3



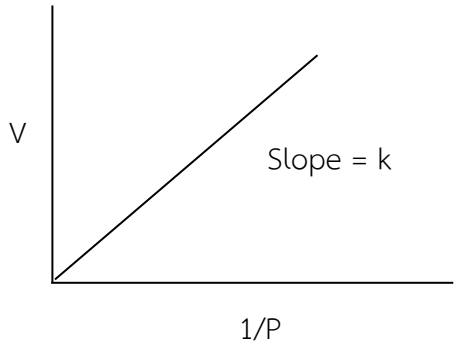
รูปที่ 6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และปริมาตร ตามกฎของบอยล์

เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะทำให้ไอโซเทอมที่ได้เปลี่ยนไปดังรูป 6.4



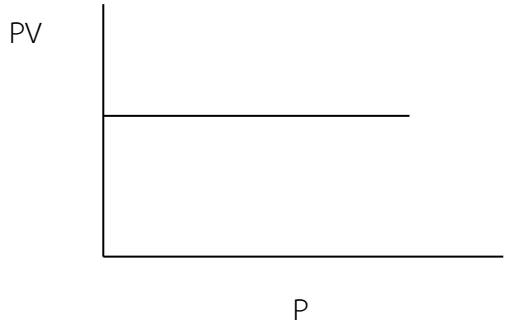
รูปที่ 6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และปริมาตร ตามกฎของบอยล์ ที่อุณหภูมิต่างกัน (ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541)

จากสมการ $V = \frac{k}{P}$ สามารถเปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง ได้เป็น $V = k\left(\frac{1}{P}\right)$ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง V กับ 1/P จะได้กราฟเส้นตรงผ่านจุด origin และมีความชันเท่ากับ k ดังรูป



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ 1/P

ถ้าเขียนกราฟระหว่าง PV กับ P จะได้กราฟเส้นตรงขนานแกน x ดังรูป



รูปที่ 6.6 กราฟแสดงกราฟระหว่าง PV กับ P

ตัวอย่างที่ 6.1 แก๊สชนิดหนึ่ง มีปริมาตร 350 cm^3 มีสภาวะอยู่ภายใต้ความดัน 0.92 atm ที่อุณหภูมิ 21 °C จงหาปริมาตรของแก๊สนี้ที่ 1.40 atm ณ อุณหภูมิเดียวกันนี้

วิธีทำ จากโจทย์ อุณหภูมิ (T) คงที่ $V_1 = 350\ cm^3$

$P_1 = 0.92$ atm

$P_2 = 1.40$ atm

$V_2 = ?$

จากสมการ $P_1V_1 = P_2V_2$

$V_2 = P_1V_1/P_2$

แทนค่าจากโจทย์ $V_2 = (0.92\ \text{atm} \times 350\ cm^3)/\ 1.40\ \text{atm}$

$= 230\ cm^3$ **ตอบ**

6.4 กฎของชาร์ล (Charles's law)

ปีค.ศ. 1787 Jacques A.C. Charles นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับแก๊ส พบว่าแก๊สแต่ละชนิดขยายตัวได้เท่าๆกัน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1802 – 1805 Joseph Louis Gay-Lussac นักเคมีและฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ได้ทดลองในทำนองเดียวกับชาร์ล แต่มีความละเอียดกว่า โดยทำการศึกษาปริมาตรของแก๊สที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้ความดันคงที่ พบว่า "ถ้าให้ความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สใดๆ ที่จำนวนโมลคงที่ จะเพิ่มขึ้น 1/273.15 เท่าของปริมาตรเดิมของแก๊สนั้นที่ 0 องศาเซลเซียส ทุกๆครั้งที่มีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส" เรียกว่า กฎของชาร์ล ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$V_t = V_0(1 + \alpha t) \quad (6.7)$$

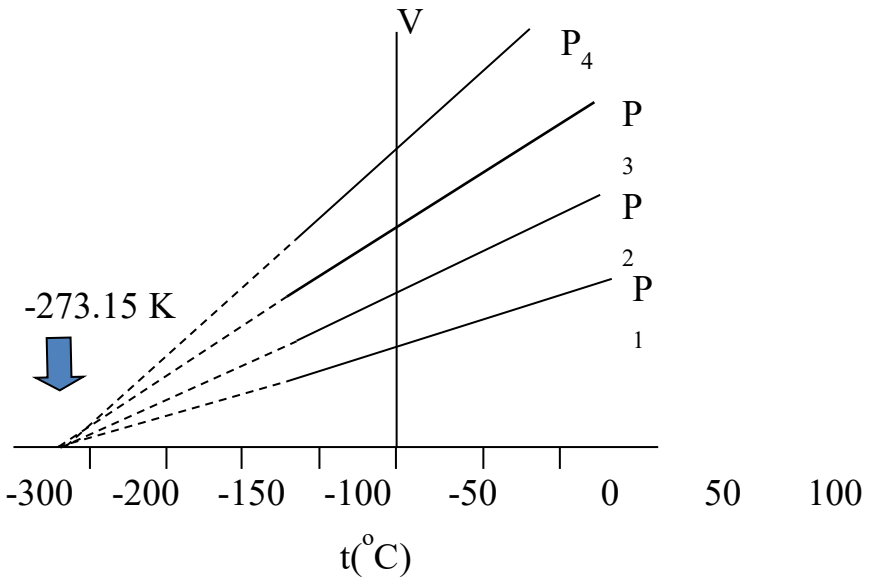
$$V_t = V_0 + V_0\alpha t \quad (6.8)$$

เมื่อ V_t เป็นปริมาตรของแก๊สที่อุณหภูมิ t °C

V_0 เป็นปริมาตรของแก๊สที่ 0°C

t เป็นอุณหภูมิของแก๊สในหน่วย °C

α เป็นสัมประสิทธิ์ของการขยายตัว (coefficient of expansion) เมื่อความดันคงที่ ค่า α จะมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะเป็นแก๊สชนิดใดๆ และจะเปลี่ยนแปลงไปได้ในช่วงหนึ่ง แต่จะมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่ำ และสูงมากๆ จากสมการที่ 1.8 เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของแก๊ส กับอุณหภูมิจะได้กราฟเส้นตรง ความชันเท่ากับ $V_0\alpha$ และตัดแกน y ที่ค่า V_0 ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 6.7 แสดงกราฟระหว่าง V และ t ที่ความดันคงที่ ($P_1 > P_2 > P_3 > P_4$) (ที่มา: Chang, 1992)

จากกราฟจะตัดแกน x ที่ –273.15 °C หรือ 0 K เสมอ เมื่อพิจารณาจากกราฟจะสังเกตได้ว่า ที่อุณหภูมินี้ ปริมาตรของแก๊สเป็นศูนย์ แต่ความจริง สารจะเปลี่ยนเป็น ของแข็ง และจากกราฟจะพบว่าค่า α เป็นค่าที่แน่นอน เท่ากับ 1/273.15 ดังนั้นเมื่อแทนค่า α ลงในสมการ 6.7 จะได้

$$V_t = V_0(1 + t/273.15) \quad (6.9)$$

$$V_t = V_0 + V_0t/273.15 \quad (6.10)$$

$$V_t = V_0/273.15(273.15 + t) \qquad (6.11)$$

เมื่อ 273.15 + t = T(K) สมการ 2.11 จะได้

$$V_t = V_0T/273.15$$

$$V_t = kT \qquad ; k = V_0/273.15$$

$$\frac{V}{T} = k \qquad (6.12)$$

จากสมการ 2.12 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับอุณหภูมิได้ว่า $V \alpha T$ ดังนั้นอาจนิยามกฎของชาร์ลได้อีกแบบว่า “เมื่อความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สที่มีจำนวนโมลคงที่ จะแปรผันโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์”

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน k คือค่าคงตัว แก๊สที่มีปริมาตร V_1 เปลี่ยนเป็นปริมาตร V_2 และอุณหภูมิจาก T_1 เปลี่ยนเป็น T_2 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \qquad (6.13)$$

ตัวอย่างที่ 6.2 แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 79.5 cm^3 ที่ 45 ^0C แก๊สจะมีปริมาตรเท่าใดที่ 0 ^0C ณ ความดันคงที่

วิธีทำ จากโจทย์ P คงที่ $V_1 = 79.5\ cm^3$

$t_1 = 45\ ^oC$ $T_1 = 45 + 273.15 = 318.15\ K$

$t_2 = 0\ ^oC$ $T_2 = 0 + 273.15 = 273.15\ K$

$V_2 = ?$

จากสมการ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

$$V_2 = \frac{V_1T_2}{T_1}$$

แทนค่า $$V_2 = \frac{79.5\,cm^3 \times 273.15K}{318.15K}$$

$= 68.3\ cm^3$ **ตอบ**

จากการทดลองของโจเซฟ เกย์-ลุสแสค (Joseph Gay-Lussac) พบว่า เมื่อ ปริมาตรคงที่

$$P \propto T$$

$$P = kT \quad (V \text{ คงที่})$$

$$\text{หรือ} \quad P/V = k$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่ หรือเขียนได้ว่า

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = k \qquad (6.14)$$

ตัวอย่างที่ 6.3 เมื่อบรรจุแก๊สลงในภาชนะขนาด 10 ลิตร(L) ที่อุณหภูมิ 273.15 K พบว่ามีความดัน 2.00 atm อยากทราบว่า ที่อุณหภูมิเท่าใด จึงจะมีความดัน 2.50 atm

วิธีทำ จากโจทย์ V คงที่ $P_1 = 2.00$ atm

$P_2 = 2.50$ atm

$T_1 = 273.15$ K

$T_2 = ?$

จากสมการ $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$

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

แทนค่า $$T_2 = \frac{273.15 \times 2.50\,\text{atm}}{2.00\ \text{atm}}$$

$= 341$ K หรือ 68°C **ตอบ**

นอกจากนี้Joseph Gay-Lussac ยังศึกษาเพิ่มเติมถึง การเปลี่ยนแปลง V เมื่อผสมแก๊ส 2 ชนิดขึ้นไปมาทำปฏิกิริยากันได้ผลิตผลเป็นแก๊สที่ T และ P คงที่ พบว่า $V_{\text{สารตั้งต้น}}/ V_{\text{สารผลิตผล}}$ = อัตราส่วนระหว่างเลขจำนวนเต็มค่าน้อยๆเสมอ จากผลการทดลองนี้ทำให้อะมาดีโอ อาโวกาโดร (Amadeo Avogadro)เสนอ กฎของอาโวกาโดร(Avogadro’s law) ว่า “ ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิและความดัน

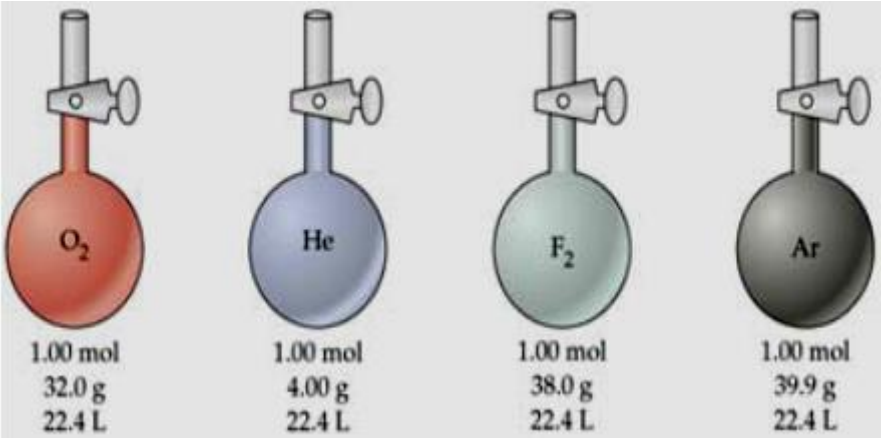
คงที่ แก๊สที่มีปริมาตรเท่ากันจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากัน” ดังแสดงในรูปที่ 6.8 กล่าวอีกอย่างคือ “ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สใดๆจะแปรผันตรงกับ จำนวนโมลของแก๊สนั้น”
นั่นคือ

$$V \propto n \qquad (6.15)$$

จะได้

$$V = k\,n \qquad (6.16)$$

เมื่อ k คือค่าคงตัว และ n คือจำนวนโมลของแก๊ส



รูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรและโมเลกุลของแก๊สตามกฎของอาโวกาโดร
(ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย, 2541)

6.5 สมการรวมกฎของแก๊ส

เมื่อนำกฎของบอยล์ และ ชาร์ล มารวมกันจะทำให้เกิดเป็นสมการใหม่ เรียกว่าสมการรวมกฎของแก๊ส หรือกฎรวมแก๊ส ดังนี้

จากกฎของบอยล์ คือ $V \alpha \frac{1}{P}$ เมื่อ T และ n คงที่

และจากกฎของชาร์ล $V \alpha T$ เมื่อ P และ n คงที่

ดังนั้น

$$V \alpha \left(\frac{1}{P}\right)T \qquad (6.17)$$

จะได้ $V = k\left(\frac{1}{P}\right)T$ เมื่อ k เป็นค่าคงตัว

$$\frac{PV}{T} = k \qquad \text{เมื่อ n คงที่} \qquad (6.18)$$

ค่า k เป็นค่าคงตัว ซึ่งขึ้นกับปริมาณ หรือจำนวนโมลของแก๊ส จากสมการ 1.18 อาจเขียนได้เป็น

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \qquad (6.19)$$

สมการที่6.19 เรียกว่า สมการรวมกฎของแก๊ส หรือกฎรวมแก๊ส

ตัวอย่างที่ 6.4 แก๊สชนิดหนึ่งมีปริมาตร 500 ml ที่ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 0°C ถ้าเปลี่ยนแก๊สจำนวนนี้ที่ 10 atm อุณหภูมิ 100°C จะมีปริมาตรเท่าใด

วิธีทำ P_1 = 1 atm P_2 = 10 atm

T_1 = 273.15 K T_2 = 373.15 K

V_1 = 500 mL V_2 = ?

จากสมการ $\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$

$$V_2 = \frac{P_1V_1T_2}{T_1}$$

แทนค่า $$V_2 = \frac{1\,\text{atm} \times 500\,\text{mL} \times 373.15\text{K}}{273.15\text{K} \times 10\,\text{atm}}$$

= 68.3 mL **ตอบ**

6.6 กฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law)

แก๊สอุดมคติไม่มีในธรรมชาติ แต่มีรูปแบบที่นักวิทยาศาสตร์กำหนดขึ้นเพื่อเป็นแบบจำลองหรือเป็นแนวทางที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมของแก๊ส กฎของแก๊สอุดมคติ เป็นการรวมกฎของบอยล์ กฎของชาร์ล และกฎของอาโวกาโดรเข้าด้วยกัน ซึ่งจากการรวมกฎของบอยล์และกฎของชาร์ลเข้าด้วยกันจะได้กฎรวมแก๊ส ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6.17 เมื่อนำมารวมกับกฎของอาโว

กาโดรที่กล่าวว่า “ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ปริมาตรของแก๊สใดๆ จะแปรผันโดยตรงกับจำนวนโมลของแก๊สนั้น” ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 6.15 เมื่รวมสมการที่ 6.17 และ 6.15 เข้าด้วยกัน จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V \quad \alpha \quad \left(\frac{1}{P}\right) T \; n$$

$$V \quad = \quad R \left(\frac{1}{P}\right) T \; n \qquad ; \text{เมื่อ R เป็นค่าคงตัว}$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ $PV = nRT$ (6.20)

สมการที่ 6.20 เป็นสมการสภาวะ(Equation of state)ของแก๊สอุดมคติ หรือเรียกว่า กฎของแก๊สอุดมคติ (Ideal gas law)

ค่า R เป็นค่าคงตัวที่เรียกว่า ค่าคงตัวสากลของแก๊ส (Universal gas constant) หรือค่าคงตัวของแก๊ส (Gas constant) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับหน่วยของ ปริมาตร อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ โดยค่า R ของแก๊สทุกชนิดมีค่าเท่ากัน สามารถคำนวณได้จากหลักการที่ว่า แก๊สใดๆ 1 โมล มีปริมาตร 22.4 ลิตร ที่ S.T.P. และนำไปแทนค่าในสมการที่ 6.20 ก็จะได้ค่า R ที่หน่วยต่างๆ แสดงในตารางที่ 6.2

ตัวอย่างการหาค่า R

$$R = \frac{PV}{nT}$$

$$= \frac{1\,\text{atm} \times 22.4\,\text{L}}{1\,\text{mol} \times 273.15\,\text{K}}$$

$$= 0.08206\,\text{L atm K}^{-1}\text{mol}^{-1}$$

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าคงตัวของแก๊สในหน่วยต่างๆ

ค่า R	**หน่วย**
0.08206	L atm K^{-1} mol^{-1}
8.314	J K^{-1} mol^{-1}
8.314	kPa L $K^{-1}mol^{-1}$
1.364	Torr $K^{-1}mol^{-1}$
1.987	Cal $K^{-1}mol^{-1}$

6.6.1 การนำกฎของแก๊สอุดมคติไปใช้ในการคำนวณ

1) การหาความหนาแน่น และมวลโมเลกุลของแก๊ส

จากสมการที่ 1.20 สามารถหาความหนาแน่น และมวลโมเลกุลของแก๊สได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

กำหนดให้ g = น้ำหนัก หรือ มวลของแก๊ส

M = น้ำหนักโมเลกุลของแก๊ส

D = ความหนาแน่นของแก๊ส

จาก PV = nRT = (g/M)RT

$$M = \left(\frac{g}{V}\right)\left(\frac{RT}{P}\right) \qquad (6.21)$$

$$M = D\left(\frac{RT}{P}\right)$$

$$D = \frac{MP}{RT} \qquad (6.22)$$

ตัวอย่างที่ 6.5 จงคำนวณโมลของแก๊สสมบูรณ์แบบชนิดหนึ่ง ซึ่งมีปริมาตร 0.452 L ที่ 87 °C และที่ความดัน 0.620 atm

วิธีทำ จากโจทย์ กำหนดให้ T = 273.15 + 87 = 360.15 K

P = 0.620 atm

V = 0.452 L

n = ?

จากสมการ PV = nRT

$$n = \frac{PV}{RT}$$

แทนค่า

$$n = \frac{0.620\,\text{atm} \times 0.452\,\text{L}}{0.08206\ \text{L atm K}^{-1}\text{mol}^{-1} \times 360.15\,\text{K}}$$

$$= 9.49 \times 10^{-3}\ \text{g L}^{-1}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 6.6 จงหาความหนาแน่นของแก๊สออกซิเจนที่ 298 K ความดัน 0.987 atm

วิธีทำ จากโจทย์ กำหนดให้ T = 298 K

P = 0.987 atm

M = 16 x 2 = 32 g mol^{-1}

D = ?

จากสมการ $D = \frac{MP}{RT}$

แทนค่า

$$D = \frac{32\ \text{g mol}^{-1} \times 0.987\,\text{atm}}{0.08206\ \text{L atm K}^{-1}\text{mol}^{-1} \times 298\,\text{K}}$$

$$= 1.29\ \text{g L}^{-1}$$ **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 6.7 จงคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของแก๊สสมบูรณ์แบบชนิดหนึ่ง ซึ่งมีปริมาตร 500 cm^3 มีน้ำหนัก 0.326 g ที่ 100 °C และที่ความดัน 380 torr

วิธีทำ จากโจทย์ กำหนดให้ T = 273.15 + 100 = 373.15 K

P = 380 torr/760 = 0.5 atm

V = 500 cm^3 = 0.5 L

g = 0.326 g

M = ?

จากสมการ $M = \left(\frac{g}{V}\right)\left(\frac{RT}{P}\right)$

แทนค่า $$M = \left(\frac{0.326\,g}{0.5\,L}\right)\left(\frac{0.08205\,L\,atm\,K^{-1}mol^{-1} \times 373.15\,K}{0.5\,atm}\right)$$

$$= 39.9\ g\ mol^{-1}$$ **ตอบ**

2) การหาปริมาณสัมพันธ์ของแก๊สในปฏิกิริยา

นอกจากการหาค่าของตัวแปรต่างๆของแก๊สแล้ว กฎของแก๊สยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาปริมาณสัมพันธ์ของแก๊สได้ในกรณีที่โจทย์ให้ข้อมูลของสารที่อยู่ในสถานะแก๊ส ดังแสดงในตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 6.8 จากปฏิกิริยา

$$2Al\ (s) + 6HCl\ (aq) \longrightarrow 2AlCl_3\ (aq) + 3H_2\ (g)$$

จงหาปริมาตรของแก๊ส H_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาของ Al 1.00 g ที่ STP

วิธีทำ จากปฏิกิริยา พบว่า จำนวนโมลของ Al = 1.00 / 27 = 0.037 mol

จากสมการ Al 2 mol เกิด H_2 3 mol

Al 0.037 mol เกิด H_2 $\frac{3 \times 0.037}{2}$ mol

= 0.056 mol

แก๊ส H_2 1 mol ที่ STP มีปริมาตร 22.4 L

แก๊ส H_2 0.056 mol ที่ STP มีปริมาตร 22.4×0.056 L

= 1.24 **ตอบ**