

บทที่ 2

ปริมาณสัมพันธ์

เนื้อหา

- 2.1 อะตอม โมเลกุล ไอออน และสูตรเคมี
- 2.2 น้ำหนักอะตอม น้ำหนักโมเลกุล
- 2.3 การคำนวณหาสูตรโมเลกุล
- 2.4 โมล
- 2.5 สมการเคมี
- 2.6 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับสมการเคมี
- 2.7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานในปฏิกิริยาเคมี

ปริมาณสัมพันธ์ คือ การคำนวณหาปริมาณของสารที่ใช้ทำปฏิกิริยาและผลิตผลของปฏิกิริยา โดยใช้ประโยชน์จากสมการของปฏิกิริยาเคมี ตลอดจนปริมาณของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี

2.1 อะตอม โมเลกุล ไอออนและสูตรเคมี

2.1.1 อะตอม (atom) คืออนุภาคที่เล็กที่สุดของธาตุที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาเคมีได้ อะตอมประกอบด้วยแก่นกลางเรียกว่า นิวเคลียส (nucleus) ซึ่งประกอบด้วยโปรตอน (proton) และนิวตรอน (neutron) และอิเล็กตรอน (electron) วิ่งรอบนิวเคลียส

เลขอะตอม (atomic number) คือจำนวนโปรตอนที่มีอยู่ในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ โดยทั่ว ๆ ไปมักใช้ Z เป็นสัญลักษณ์

เลขมวล (mass number) คือผลรวมของจำนวนโปรตอนและนิวตรอน ที่มีอยู่ในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ มักใช้ A เป็นสัญลักษณ์

โดยทั่วไปการเขียนสัญลักษณ์ของอะตอมของธาตุ (X) ต้องบ่งค่าเลขอะตอมไว้
ตอนล่างข้างซ้าย และค่าเลขมวลไว้ตอนบนด้านซ้าย ดังนี้



ตัวอย่าง ${}^1_1\text{H}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$

ไอโซโทป (isotope) คืออะตอมของธาตุที่จำนวนโปรตอนเท่ากัน แต่มีจำนวน
นิวตรอนต่างกัน (อะตอมของธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากัน แต่มีเลขมวลต่างกัน) เช่น

ไฮโดรเจนมี 3 ไอโซโทป คือ ${}^1_1\text{H}$, ${}^1_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$ (ไอโซโทปทั้ง 3 ชนิดมีจำนวน
โปรตอนเท่ากันคือ 1 แต่มีจำนวนนิวตรอนเป็น 0, 1, 2 ตามลำดับ)

คาร์บอนมี 3 ไอโซโทป คือ ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$

ไนโตรเจนมี 2 ไอโซโทป คือ ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{15}_7\text{N}$

ออกซิเจนมี 3 ไอโซโทป คือ ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{18}_8\text{O}$

คลอรีน มี 2 ไอโซโทป คือ ${}^{35}_{17}\text{Cl}$, ${}^{37}_{17}\text{Cl}$

2.1.2 โมเลกุล (molecules) โมเลกุลเป็นอนุภาคที่เล็กที่สุดของธาตุหรือสารประกอบที่
สามารถอยู่ได้โดยลำพังอิสระ เช่น

monoatomic molecule ได้แก่ แก๊สเฉื่อย He, Ne, Ar, Kr, Xe และ Rn

diatomic molecule ได้แก่

(1) H_2 , O_2 , Cl_2 , Br_2 เรียกว่า homonuclear molecule

(2) CO , HF , NaCl เรียกว่า heteronuclear molecule

สำหรับโมเลกุลที่มีจำนวนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไปเรียกว่า polyatomic molecule
แบ่งเป็นพวก homonuclear molecule เช่น P_4 , S_8 และ heteronuclear molecule เช่น H_2O ,
 CH_4 เป็นต้น

2.1.3 ไอออน (Ions) คืออะตอมหรือกลุ่มอะตอมของธาตุที่มีประจุ โดยเหตุที่อะตอม
ของธาตุเป็นกลางทางไฟฟ้า จะมีจำนวนโปรตอน (ประจุบวก) เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอน (ประจุลบ)

ถ้าอะตอมของธาตุสูญเสียอิเล็กตรอนไป 1 อิเล็กตรอนหรือมากกว่าก็จะมีจำนวน
อิเล็กตรอนน้อยกว่าจำนวนโปรตอนเกิดเป็นไอออนบวก เรียกว่า Cation เช่น Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+}

ถ้าอะตอมของธาตุรับอิเล็กตรอนมาอีก 1 อิเล็กตรอน จะทำให้มีจำนวนอิเล็กตรอน
มากกว่าจำนวนโปรตอน จึงเกิดเป็นไอออนลบ เรียกว่า Anion เช่น Cl^- , F^- , O^{2-} , S^{2-}

ไอออนที่เป็นกลุ่มของอะตอมของธาตุที่มีประจุได้แก่ NH_4^+ , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 ชื่อและสัญลักษณ์ของไอออนบวก หรือ Cations ที่คุ้นเคย

1+ Cations		2+ Cations		3+ and 4+ Cations	
FROM GROUP IA		FROM GROUP IIA		FROM GROUP IIIA	
Hydrogen	H ⁺	Magnesium	Mg ²⁺	Aluminum	Al ³⁺
Lithium	Li ⁺	Calcium	Ca ²⁺		
Sodium	Na ⁺	Strontium	Sr ²⁺		
Potassium	K ⁺	Barium	Ba ²⁺		
OTHERS		OTHERS		OTHERS	
Ammonium	NH ₄ ⁺	Zinc	Zn ²⁺		
Silver	Ag ⁺	Cadmium	Cd ²⁺		
Copper(I) or cuprous	Cu ⁺	Copper(II) or cupric	Cu ²⁺		
Mercury(I) or mercurous	Hg ₂ ²⁺	Mercury(II) or mercuric	Hg ²⁺		
		Chromium(II) or chromous	Cr ²⁺	Chromium(III) or chromic	Cr ³⁺
		Manganese(II) or manganous	Mn ²⁺	Manganese(III) or manganic	Mn ³⁺
		Iron(II) or ferrous	Fe ²⁺	Iron(III) or ferric	Fe ³⁺
		Cobalt(II) or cobaltous	Co ²⁺	Cobalt(III) or cobaltic	Co ³⁺
		Nickel(II) or nickelous	Ni ²⁺	Nickel(III)	Ni ³⁺
		Tin(II) or stannous	Sn ²⁺	Tin(IV) or stannic	Sn ⁴⁺
		Lead(II) or plumbous	Pb ²⁺	Lead(IV) or plumbic	Pb ⁴⁺

ตารางที่ 2.2 ชื่อและสัญลักษณ์ของไอออนลบ หรือ Anions ที่คุ้นเคย

1- Anions		2- Anions		3- and 4- Anions	
Peroxide*	O ₂ ²⁻	Oxide	O ²⁻	Nitride	N ³⁻
Hydride	H ⁻	Sulfide	S ²⁻	Phosphide	P ³⁻
Fluoride	F ⁻	Selenide	Se ²⁻	Arsenide	As ³⁻
Chloride	Cl ⁻	Telluride	Te ²⁻	Carbide	C ⁴⁻
	Br ⁻				
Iodide	I ⁻				
Hydroxide	OH ⁻				
Hydrogen carbonate (bicarbonate)	HCO ₃ ⁻	Carbonate	CO ₃ ²⁻		
Hydrogen sulfate (bisulfate)	HSO ₄ ⁻	Sulfate	SO ₄ ²⁻	Phosphate	PO ₄ ³⁻
Hydrogen sulfite (bisulfite)	HSO ₃ ⁻	Sulfite	SO ₃ ²⁻	Phosphite	PO ₃ ³⁻
Thiocyanate	SCN ⁻	Thiosulfate	S ₂ O ₃ ²⁻		
Cyanide	CN ⁻				
Acetate	CH ₃ COO ⁻ or C ₂ H ₃ O ₂ ⁻	Oxalate	C ₂ O ₄ ²⁻		
Nitrate	NO ₃ ⁻	Chromate	CrO ₄ ²⁻		
Nitrite	NO ₂ ⁻	Dichromate	Cr ₂ O ₇ ²⁻		
Permanganate	MnO ₄ ⁻				
Perchlorate†	ClO ₄ ⁻				
Chlorate†	ClO ₃ ⁻				
Chlorite†	ClO ₂ ⁻				
Hypochlorite†	ClO ⁻				

*In peroxide each oxygen has an oxidation number of -1.

†Ions with bromine and iodine in place of chlorine are named similarly.

2.1.4 สูตรเคมี (Chemical formula) คือกลุ่มของสัญลักษณ์ของธาตุหรือสารประกอบ ซึ่งเขียนขึ้นเพื่อแสดงให้ทราบว่า หนึ่งโมเลกุลของสาร (ธาตุหรือสารประกอบ) นั้น ประกอบด้วย อะตอมของธาตุใดบ้าง และมีปริมาณเท่าใด เช่น H_2 , O_2 , H_2O , CO_2 , CH_4 , $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

สูตรเอมไพริคัล (Empirical formula) คือสูตรที่เขียนขึ้นเพื่อแสดงว่าหนึ่งโมเลกุลของสารนั้นประกอบด้วยธาตุอะไรว่าง และแสดงอัตราส่วนอย่างต่ำของจำนวนอะตอมของธาตุที่ประกอบขึ้นเป็นสารประกอบนั้น เช่น HO เป็นสูตรเอมไพริคัลของ H_2O_2 , CH_2O เป็นสูตรเอมไพริคัลของ $C_6H_{12}O_6$

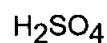
สูตรโมเลกุล (Molecular formula) คือสูตรที่เขียนขึ้นเพื่อแสดงว่า หนึ่งโมเลกุลของสารนั้นประกอบด้วยธาตุอะไรว่าง และอย่างละกี่อะตอม เช่น H_2 , H_2O , H_2O_2 สูตรโมเลกุลอาจเป็นสูตรอย่างเดียวกับสูตรเอมไพริคัลก็ได้ เช่น H_2O , CO_2 , SO_2 ฯลฯ แต่สูตรโมเลกุลอาจเป็นพหุคูณของตัวเลขลงตัวกับสูตรเอมไพริคัล เช่น H_2O_2 ดังนั้น จึงเขียนความสัมพันธ์ทั่วไปได้ดังนี้

$$\text{สูตรโมเลกุล} = (\text{สูตรเอมไพริคัล})_n$$

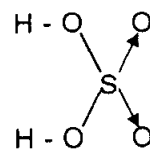
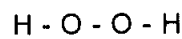
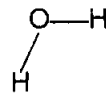
เมื่อ $n = 1, 2, 3, \dots$ (เป็นเลขจำนวนเต็ม)

สูตรโครงสร้าง (Structural formula) คือสูตรโมเลกุลนั่นเอง แต่เขียนแสดงการเกาะเกี่ยวของอะตอมในโมเลกุลด้วย เช่น

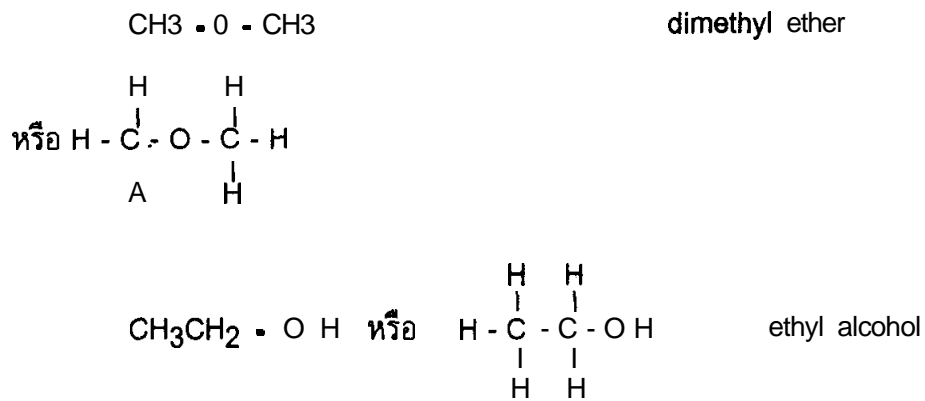
สาร



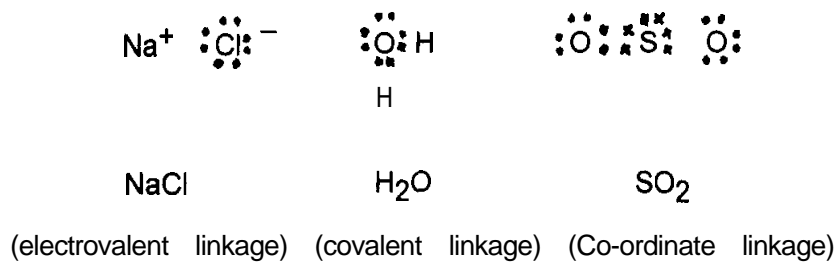
สูตรโครงสร้าง



สำหรับในเคมีอินทรีย์ (Organic Chemistry) สูตรโครงสร้างมีความสำคัญมาก เพราะมีหลายสารที่มีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน เช่น dimethyl ether กับ Ethyl alcohol มีสูตรโมเลกุลเหมือนกันเป็น C_2H_6O แต่สูตรโครงสร้างต่างกัน



สูตรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic formula) คือสูตรโมเลกุลที่แสดงว่า Valence electron ของแต่ละอะตอมเกาะเกี่ยวกันอย่างไร เช่น



2.2 น้ำหนักอะตอม น้ำหนักโมเลกุล

น้ำหนักอะตอม (atomic weight)

เนื่องจากอะตอมมีขนาดเล็กมาก ทำให้ไม่สามารถชั่งน้ำหนักของอะตอมโดยตรงได้ จึงนิยมใช้มวลเปรียบเทียบ (relative mass) เรียกว่า น้ำหนักอะตอม

น้ำหนักอะตอมของธาตุเป็นมวลเฉลี่ยของทุกไอโซโทปที่มีอยู่ในธรรมชาติของธาตุนั้น เปรียบเทียบกับมวลของธาตุมาตรฐาน นักวิทยาศาสตร์เคยใช้ธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็นมาตรฐานมาก่อน และตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 เป็นต้นมาได้เปลี่ยนมาใช้ ^{12}C ซึ่งเป็นไอโซโทปหนึ่งของคาร์บอนเป็นมาตรฐาน และได้กำหนด atomic mass unit (amu) ขึ้นว่าเป็น $\frac{1}{12}$ มวลของ C-12 1 อะตอม ดังนั้นมวลของ C-12 1 อะตอม = 12.000 amu (1 amu = 1.66×10^{-24} กรัม และเมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้เรียกหน่วย amu เป็น Dalton ซึ่งใช้อักษรย่อเป็น D) และใช้ค่า 1 amu (D) เป็นมาตรฐานในการหาค่าน้ำหนักอะตอมของธาตุ

น้ำหนักของอะตอมของธาตุในตารางธาตุ ไม่จำเป็นต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม ทั้งนี้ เพราะใช้น้ำหนักอะตอมเฉลี่ยของทุกไอโซโทปในธรรมชาติ โดยคิดตามอัตราส่วนของปริมาณของไอโซโทปที่มีปรากฏอยู่จริง ๆ ในธรรมชาติ เช่น ในธรรมชาติมีคลอรีนอยู่ 2 ไอโซโทป คือ ^{35}Cl และ ^{37}Cl โดยมี $^{35}\text{Cl} = 75.53\%$ และมี $^{37}\text{Cl} = 24.47\%$ (น้ำหนักของอะตอมของ $^{35}\text{Cl} = 34.97$ และ $^{37}\text{Cl} = 36.97$)

วิธีคำนวณน้ำหนักอะตอมของ Cl ในธรรมชาติดังนี้

$$\text{น้ำหนักอะตอม (เฉลี่ย) ที่มีในธรรมชาติ} = \left(\frac{75.53}{100} \times 34.97\right) + \left(\frac{24.47}{100} \times 36.97\right) = 35.45$$

น้ำหนักโมเลกุล เป็นน้ำหนักที่ได้มาจากผลบวกของน้ำหนักอะตอมของแต่ละธาตุในโมเลกุลนั้น

$$\text{น้ำหนักโมเลกุล } \text{H}_2\text{O} = 18 \text{ (เมื่อ H} = 1, \text{ O} = 16)$$

2.3 การคำนวณหาสูตรโมเลกุล

ในการคำนวณหาสูตรเอมไพริคัล เราต้องทราบที่สารนั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุทั้งหมดเป็นอย่างไร และจะต้องทราบน้ำหนักอะตอมของแต่ละธาตุด้วย เมื่อได้สูตรเอมไพริคัลแล้ว ก็จะคำนวณหาสูตรโมเลกุลได้ดังนี้

$$\text{สูตรโมเลกุล} = (\text{สูตรเอมไพริคัล})_n$$

$$\text{เมื่อ } n = 1, 2, 3 \dots\dots\dots$$

ตัวอย่างที่ 2.1 Ascorbic acid (วิตามินซี) ซึ่งสามารถใช้น้ำบัตโรคลักปิดลักเปิดได้ ประกอบด้วยคาร์บอน (C) ร้อยละ 40.92 ไฮโดรเจน (H) ร้อยละ 4.58 และออกซิเจน (O) ร้อยละ 54.50 โดยมวล จงหาสูตรเอมไพริคัลของ Ascorbic acid (H=1.008, C=12.01 และ O=16.00)

วิธีทำ	ถ้าสารประกอบนี้มีมวลเป็น	100	กรัม
	จะมีคาร์บอน (C)	=	40.92 กรัม
	ไฮโดรเจน (H)	=	4.58 กรัม
	และออกซิเจน (O)	=	54.50 กรัม
	อัตราส่วนโดยมวลของ C:H:O	=	40.92 : 4.58 : 54.50

$$\begin{aligned}
\text{อัตราส่วนโดยจำนวนอะตอมของ C:H:O} &= \frac{40.92}{12.01} : \frac{4.58}{1.008} : \frac{54.50}{16.00} \\
&= 3.407 : 4.54 : 3.406 \\
&= 1 : 1.33 : 1 \\
&= 3 : 4 : 3
\end{aligned}$$

∴ สูตรเอมไพริกัลของ Ascorbic acid คือ $C_3H_4O_3$

ตัวอย่างที่ 2.2 สูตรเอมไพริกัลของ acetic acid คือ CH_2O จงหาสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้ โดยกำหนดน้ำหนักโมเลกุลโดยประมาณ = 60 (H=1.008, C=12.01, O=16.00)

วิธีทำ สูตรเอมไพริกัลของ acetic acid คือ CH_2O
สูตรโมเลกุลของ acetic acid เป็น $(CH_2O)_n$

$$(CH_2O)_n = 60$$

$$[(1 \times 12.01) + (2 \times 1.008) + (1 \times 16.00)]n = 60$$

$$30.03n = 60$$

$$\therefore n = 2$$

∴ สูตรโมเลกุลของ acetic acid คือ $C_2H_4O_2$
หรือ $HC_2H_3O_2$

ตัวอย่างที่ 2.3 จากการวิเคราะห์สารประกอบชนิดหนึ่งพบว่าประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีน้ำหนักของคาร์บอน เป็น 32% ไฮโดรเจนเป็น 4% และนอกนั้นเป็นออกซิเจน จงคำนวณหาสูตรเอมไพริกัลและสูตรโมเลกุล ถ้าน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบนี้ = 150 (C = 12, O = 16, H = 1)

วิธีทำ ถ้าน้ำหนักของสารประกอบเป็น 100
สารประกอบนี้มี O หนัก = $100 - 32 - 4 = 64$
อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ C : H : O = 32 : 4 : 64

$$\begin{aligned}
\text{อัตราส่วนโดยจำนวนอะตอมของ C : H : O} &= \frac{32}{12} : \frac{4}{1} : \frac{64}{16} \\
&= 2.67 : 4 : 4
\end{aligned}$$

ทำให้อัตราส่วนเป็นเลขน้อย ๆ โดยการหารด้วย 2.67 ตลอด

$$= 1 : 1.49 : 1.49$$

$$= 2 : 2.98 : 2.98 \text{ (คูณด้วย 2)}$$

$$= 2 : 3 : 3$$

∴ สูตรเอมไพริกัลของสารประกอบนี้คือ $C_2H_3O_3$

$$\begin{aligned} \text{สูตรโมเลกุลเป็น } (C_2H_3O_3)_n \\ (C_2H_3O_3)_n &= 150 \\ [(12 \times 2) + (1 \times 3) + (16 \times 3)] n &= 150 \\ 75 n &= 150 \\ n &= 2 \end{aligned}$$

∴ สูตรโมเลกุลคือ $C_4H_6O_6$

ตัวอย่างที่ 2.4 การวิเคราะห์สารประกอบ methyl benzoate ที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำหอม พบว่าประกอบด้วย คาร์บอน 70.58% ไฮโดรเจน 5.93% และออกซิเจน 23.49% จงหาสูตรเอมไพริกัลและสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้ ถ้าน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบนี้ = 136 (H=1.01, C=12.01, O=16.00)

วิธีทำ	ถ้าสารประกอบนี้เป็น	100	กรัม
	จะมี	คาร์บอน	= 70.58 กรัม
		ไฮโดรเจน	= 5.93 กรัม
		ออกซิเจน	= 23.49 กรัม
	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ C:H:O		= 70.58 : 5.93 : 23.49
	อัตราส่วนโดยจำนวนอะตอมของ C:H:O		= $\frac{70.58}{12.01} : \frac{5.93}{1.01} : \frac{23.49}{16.00}$
			= 5.88 : 5.87 : 1.47
			= 4.00 : 3.99 : 1

สูตรเอมไพริกัลของสารประกอบนี้คือ C_4H_4O

สูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้ = $(C_4H_4O)_n$

$$\begin{aligned} (C_4H_4O)_n &= 136 \\ [(4 \times 12.01) + (4 \times 1.01) + (1 \times 16.00)] n &= 136 \\ 68.08 n &= 136 \\ \therefore n &= 2 \end{aligned}$$

∴ สูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้คือ $C_8H_8O_2$ หรือ $C_6H_5COOCH_3$

2.4 โมล (Mole)

ในปฏิกิริยาเคมี เรานิยมใช้ปริมาณสารเป็นโมล โดยหนึ่งโมล หมายถึง ปริมาณของสารที่มีจำนวนอนุภาค 6.02×10^{23} อนุภาค (อาจเป็นอะตอม หรือโมเลกุล หรือไอออน หรืออิเล็กตรอนก็ได้) ซึ่งเท่ากับจำนวนอะตอมของ ^{12}C ที่หนัก 12.000 กรัม เลขจำนวนนี้ เรียกว่า Avogadro's number เช่น 1 โมลของโซเดียมจะมีจำนวนอะตอมเท่ากับ 6.02×10^{23} อะตอม 1 โมล ของไฮโดรเจนจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ 6.02×10^{23} โมเลกุล ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลกับจำนวนอนุภาคเป็นดังนี้

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{จำนวนอนุภาค}}{6.02 \times 10^{23}}$$

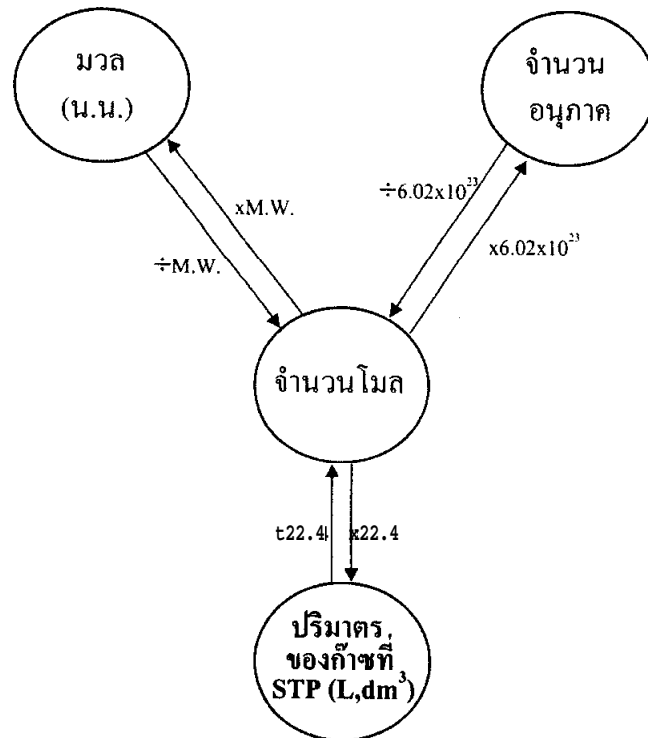
1 โมลอะตอม ของธาตุใด ๆ จะมีน้ำหนักเป็นกรัมเท่ากับ น้ำหนักอะตอมของธาตุนั้น ส่วน 1 โมล โมเลกุล ประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลเท่ากับ Avogadro's number และมีน้ำหนักเป็นกรัมเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้น เช่น H_2O 1 โมล มีน้ำหนัก 18 กรัม จะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ 6.02×10^{23} โมเลกุล ถ้ามี H_2O 9 กรัม จะมีจำนวนโมลเท่ากับ $\frac{9.0}{18}$ เท่ากับ $\frac{1}{2}$ โมล และจะมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ $\frac{6.02 \times 10^{23}}{2}$ เท่ากับ 3.01×10^{23} โมเลกุล หรือถ้ามี H_2O 36 กรัม ก็จะคิดเป็นโมลได้เท่ากับ $\frac{36}{18}$ เท่ากับ 2 โมล และมีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ 2 (6.02×10^{23}) โมเลกุล ดังนั้น จำนวนโมลของสารใด ๆ ย่อมหาได้จากสูตรดังนี้

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{น้ำหนัก (กรัม) ของสารนั้น}}{\text{น้ำหนักอะตอมหรือน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้น}}$$

ปริมาตรของก๊าซขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดัน การบอกปริมาตรของก๊าซ จึงต้องระบุอุณหภูมิและความดันด้วย นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดให้ 0°C หรือ 273K ความดัน 1 บรรยากาศ เป็นภาวะมาตรฐาน (Standard Temperature and Pressure) เขียนย่อว่า STP จากการทดลองสรุปได้ว่า ก๊าซใด ๆ 1 โมล จะมีปริมาตรเท่ากับ 22.4 ลิตร หรือลูกบาศก์เดซิเมตร (dm^3) ที่ STP เสมอ ดังนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมลกับปริมาตรของก๊าซที่ STP ได้ดังนี้

$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซที่ STP (ลิตร; dm}^3\text{)}}{22.4}$$

สรุปความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโมล จำนวนอนุภาค น้ำหนักของสาร (เป็นกรัม) และ ปริมาตรของก๊าซที่ STP ได้ดังนี้



การคำนวณเกี่ยวกับมวลและโมลหรือโมลและมวล

การเปลี่ยน โมล → กรัม

ตัวอย่างที่ 2.5 คาร์บอนไดออกไซด์ 0.50 โมลจะมีมวลเป็นเท่าไร (C=12.0, O=16.0)

วิธีทำ เปลี่ยน : 0.50 mol CO₂ → ?gCO₂

1 โมลของ C = 1 x 12.0 = 12.0 กรัม

2 โมลของ O = 2 x 16.0 = 32.0 กรัม

1 โมลของ CO₂ = 44.0 กรัม

CO₂ 0.50 โมล = (0.50)(44.0) = 22.0 กรัม

การเปลี่ยน : กรัม → โมล

ตัวอย่างที่ 2.6 จงเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ 28.6 กรัมไปเป็นโมล

วิธีทำ เปลี่ยน : 28.6 g CO₂ → ? mol CO₂

$$\text{CO}_2 \text{ 28.6 กรัม} = \frac{28.6}{44.0} = 0.65 \text{ กรัม}$$

การคำนวณเกี่ยวกับโมลและโมเลกุล

การเปลี่ยน : โมล → โมเลกุล

ตัวอย่างที่ 2.7 จงคำนวณจำนวนโมเลกุลใน propane, C₃H₈ จำนวน 0.35 โมล

(C=12.0, H=1.0)

วิธีทำ เปลี่ยน 0.035 mol C₃H₈ → ? molecules C₃H₈

C₃H₈ 1 โมล จะมีจำนวนโมเลกุล = 6.02 × 10²³ โมเลกุล

$$\therefore \text{C}_3\text{H}_8 \text{ 0.035 โมล จะมีจำนวนโมเลกุล} = (0.035)(6.02 \times 10^{23})$$

$$= 2.11 \times 10^{22} \text{ โมเลกุล}$$

ตัวอย่างที่ 2.6 ถ้ามีไอน้ำ 3.96 กรัม จงคำนวณหา

- จำนวนโมลของ H₂O
 - จำนวนโมเลกุลของ H₂O
 - จำนวนโมลอะตอมของแต่ละธาตุ
 - จำนวนอะตอมของแต่ละธาตุ
- (H = 1.0, O = 16.0)

วิธีทำ น้หนักโมเลกุลของ H₂O = 1.0 x 2 + 16.0 = 18.0 กรัม

$$\therefore \text{จำนวนโมลของ H}_2\text{O} = \frac{3.96}{18.0} = 0.22$$

ข. 1 โมล ของ H₂O มี = 6.02 × 10²³ โมเลกุล

$$\therefore 0.22 \text{ โมลของ H}_2\text{O มี} = 0.22 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ โมเลกุล}$$

$$= 1.3244 \times 10^{23} \text{ โมเลกุล}$$

ค. ใน 1 โมเลกุลของ H₂O มี H 2 อะตอม และ O 1 อะตอม

ฉะนั้น H₂O 1 โมล จึงประกอบด้วย H 2 โมล และ O 1 โมล

H₂O 0.22 โมล จึงประกอบด้วย H(2 x 0.22) = 0.44 โมล และ O 0.22 โมล

J. H₂O 1.3244 x 10²³ โมเลกุล จะมี H = 2 x 1.3244 x 10²³ อะตอม

= 2.6488 x 10²³ อะตอม

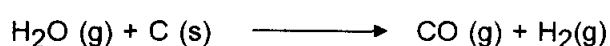
และ O = 1.3244 x 10²³ อะตอม

2.5 สมการเคมี (Chemical equations)

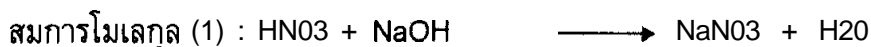
สมการเคมีเป็นสิ่งที่เขียนแทนปฏิกิริยาเคมี เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงของธาตุหรือสารประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยา (reactants) และสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (products) โดยเขียนสารที่เข้าทำปฏิกิริยาไว้ทางซ้ายมือ และสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ไว้ทางขวามือของลูกศรที่มีทิศทางชี้ไปทางสารที่เป็นผลิตภัณฑ์

สมการเคมีอาจเขียนได้ 2 แบบ คือ

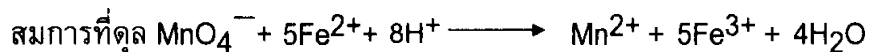
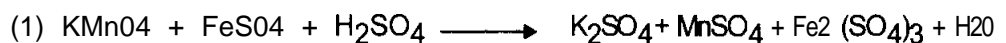
2.5.1 สมการโมเลกุล (molecular equations) เป็นสมการที่แสดงปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสาร โดยอาจแสดงสถานะของสารด้วยตัวอักษรย่อตัวเล็กไว้ในวงเล็บ เช่น g(gas) แทนก๊าซ l (liquid) แทนของเหลว s (solid) แทนของแข็ง และ aq ย่อมาจาก aqueous หมายถึงถึงสารละลายในน้ำ เป็นต้น



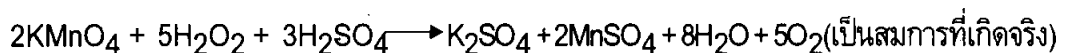
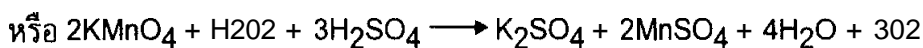
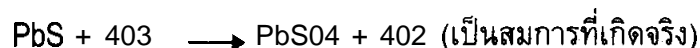
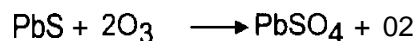
2.5.2 สมการไอออน (ionic equations) นิยมใช้กันมากสำหรับปฏิกิริยาที่มีสารประกอบไอออนิกเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยจะเขียนเฉพาะไอออนและโมเลกุลที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น ส่วนสารที่ไม่จำเป็นหรือไม่มีส่วนในปฏิกิริยา ไม่ต้องเขียนในสมการด้วย แต่สารที่เป็นอิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) สารที่ไม่ละลายหรือสารที่ตกตะกอนหรือสารที่เป็นก๊าซ ให้เขียนเป็นโมเลกุล เช่น



สมการไอออน (2) : $H^+ + OH^- \longrightarrow H_2O$

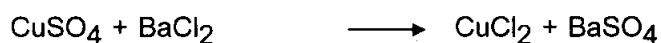


ในบางครั้งสมการที่ดุลแล้ว (ซึ่งตรวจดูเฉพาะจำนวนอะตอมหรือหมู่อะตอมของทุก 9 ตัวให้เท่ากันทั้งสองข้าง) ของปฏิกิริยาหนึ่ง อาจปรากฏมากกว่าหนึ่งสมการ เช่น



สมการเคมี อาจแบ่งตามชนิดของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างกว้าง ๆ ได้ 2 ประเภท คือ

1. **ปฏิกิริยาเคมีซึ่งธาตุหรืออะตอมไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน (Oxidation number) หรือไม่มีการรับหรือสูญเสียอิเล็กตรอน** เช่น ปฏิกิริยาการสะเทินของกรดและเบส และปฏิกิริยาการสลายตัวสองต่อ ตัวอย่างเช่น



2. **ปฏิกิริยาเคมีซึ่งธาตุหรืออะตอมเกิดการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน หรือมีการรับหรือสูญเสียอิเล็กตรอน**

ปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า Oxidation-Reduction reaction หรือเรียกสั้น ๆ ว่า Redox reaction ปฏิกิริยารีดอกซ์แยกออกได้เป็น 2 half reaction คือ

Oxidation reaction คือปฏิกิริยาเคมีที่อะตอมหรือไอออนมีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น หรือคือปฏิกิริยาที่ธาตุสูญเสียอิเล็กตรอน

Reduction reaction คือปฏิกิริยาเคมีที่อะตอมหรือไอออนมีเลขออกซิเดชันลดลง หรือคือปฏิกิริยาที่ธาตุรับอิเล็กตรอน

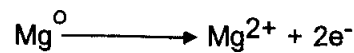
Oxidation reaction กับ Reduction reaction เกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน จึงเรียกว่า "Oxidation-Reduction reaction" หรือ "Redox reaction"

ตัวอย่างเช่น

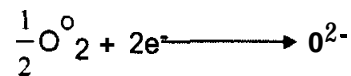


อะตอมของแมกนีเซียมสูญเสีย 2 อิเล็กตรอนให้กับอะตอมของออกซิเจน ดังนั้นแมกนีเซียมจึงถูกออกซิไดซ์ และออกซิเจนถูกรีดิวซ์ การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจเขียนแทนได้ด้วยครึ่งปฏิกิริยา ดังนี้

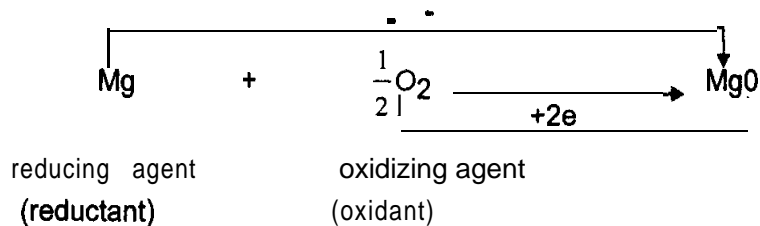
Oxidation reaction Mg มีเลขออกซิเดชันเพิ่มขึ้น จาก 0 เป็น +2



Reduction reaction O มีเลขออกซิเดชันลดลงจาก 0 เป็น -2



ออกซิเจนเป็นต้นเหตุสำหรับออกซิเดชันของแมกนีเซียม จึงเรียกว่า ตัวออกซิไดซ์ หรือออกซิแดนท์ แมกนีเซียมทำให้เกิดรีดักชันของออกซิเจน จึงเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ หรือรีดักแตนท์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในสมการรวม ได้ดังนี้



จะเห็นว่าตัวออกซิไดซ์รับอิเล็กตรอนและถูกรีดิวซ์ในขณะที่ตัวรีดิวซ์สูญเสียอิเล็กตรอนและถูกออกซิไดซ์

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันทั้งหมดเกี่ยวข้องกับประจุในเลขออกซิเดชันของอะตอมชนิดหนึ่งหรือมากกว่านั้น

ในเทอมของเลขออกซิเดชัน ออกซิเดชัน หมายถึงการเพิ่มเลขออกซิเดชัน และรีดักชัน หมายถึงการลดเลขออกซิเดชัน การตรวจสอบและการวิเคราะห์สมการจะแสดงให้เห็นเลขออกซิเดชันของธาตุที่เกี่ยวข้องและทำให้สามารถบอกได้ว่าเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน

หรือไม่ เพื่อความสะดวกเราจะใช้กฎของการกำหนดเลขออกซิเดชันมาช่วยทำสมการออกซิเดชันรีดักชันให้ดุล

กฎของการกำหนดเลขออกซิเดชัน อย่างย่อมีดังนี้

1. เลขออกซิเดชัน ของอะตอมของธาตุเป็นศูนย์
2. เลขออกซิเดชัน ของไอออนของอะตอมเดี่ยวเป็นประจุบนไอออน
3. เลขออกซิเดชัน ที่กำหนดขึ้นกับอะตอมที่รวมตัวกันในสารประกอบเคมีทั่ว ๆ ไป

เป็นดังนี้

ก. ออกซิเจน = -2 (ยกเว้นในเปอร์ออกไซด์ ซึ่ง = -1)

ข. ไฮโดรเจน = +1 (ยกเว้นในไฮไดรด์ซึ่ง = -1)

ค. หมู่ธาตุ IA = +1

ง. หมู่ธาตุ IIA = +2

จ. ไอออนของอะตอมของเฮไลเจนในสารประกอบธาตุคู่ = -1

4. โพลีอะตอมมิกไอออน พร้อมประจุที่สามัญมากของบางสารคือ SO_4^{2-} , OH^- , NO_3^- , CO_3^{2-} , $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$

5. ผลบวกของเลขออกซิเดชันบวกและเลขออกซิเดชันลบในสารประกอบเป็นศูนย์

6. ผลบวกทางพีชคณิตของเลขออกซิเดชันบวกและลบของอะตอมในโพลีอะตอมมิกไอออนเท่ากับประจุบนไอออน

7. เลขออกซิเดชันของอะตอมในสารประกอบที่ต้องการทราบ หาได้ดังนี้

ก. กำหนดเลขออกซิเดชัน (ตามกฎข้อที่ 1,2,3 และ 4) กับอะตอมของธาตุทั้งหมด ยกเว้นอะตอมของธาตุที่ต้องการทราบเลขออกซิเดชัน

ข. บวกเลขออกซิเดชันทั้งหมดของทุกธาตุ ยกเว้นอะตอมที่ต้องการทราบเลขออกซิเดชัน

ค. เลขออกซิเดชันของอะตอมที่ต้องการทราบคือ ผลรวมของประจุทางไฟฟ้าของอะตอมที่ถูกกำหนดเลขออกซิเดชันกับอะตอมที่ต้องการทราบเลขออกซิเดชันในสูตรเพื่อทำให้สูตรมีประจุเป็นศูนย์ ถ้าอะตอมที่ต้องการทราบเลขออกซิเดชันมี subscript ในสูตรเลขออกซิเดชันนั้นต้องหารด้วย subscript ก่อน เพื่อให้เป็นเลขออกซิเดชันของอะตอมเดี่ยว

สมการที่ดุลของปฏิกิริยาแสดงให้เห็นถึงสูตรของสารที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนโมลของสารเหล่านั้นที่ทำปฏิกิริยากัน อัตราส่วนโมลอยู่ในรูปสัมประสิทธิ์ในสมการที่ดุล . และสัมประสิทธิ์ยังต้องแสดงถึงจำนวนอะตอมทางซ้ายเท่ากับจำนวนอะตอมทางขวาของสมการด้วย อิเล็กตรอนที่สูญเสียไปโดยตัวรีดิวซ์ เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับโดยตัวออกซิไดซ์

ในการเขียนสมการรีดอกซ์นั้นจะเริ่มด้วยการเขียนสมการโครงโมเลกุล ที่แสดงถึงสารที่เข้าทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ ในปฏิกิริยาเหล่านี้อิเล็กตรอนถูกถ่ายเทโดยตรงจากสารหนึ่งไปสู่อีกสารหนึ่ง จุดมุ่งหมายเบื้องต้นของเราก็คือจะต้องจัดหาสัมประสิทธิ์ที่จะทำให้สมการของปฏิกิริยาดุลสำหรับการทำสมการเหล่านั้นให้ดุล เราจะใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชัน

สมการโครงของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน อาจจะทำให้ดุลได้ โดยการหาการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน

วิธีการดุลวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถที่จำได้เกี่ยวกับตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์เลขออกซิเดชันของธาตุและเลขออกซิเดชันที่เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เมื่อสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารที่เป็นผลิตภัณฑ์กับเลขออกซิเดชันใหม่

ตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์สามัญ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และ 2.4 จะช่วยให้เราจำแนกธาตุที่มีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงได้

ตารางที่ 2.3 ตัวออกซิไดซ์สามัญ

ตัวออกซิไดซ์	สูตร (ธาตุที่ขีดเส้นใต้ถูกรีดิวซ์)	เลขออกซิเดชันของธาตุซึ่งเกิดรีดักชัน
Permanganate ion	MnO_4^-	+7
nitrate ion	NO_3^-	+5
Dichromate ion	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$	+6
Chlorate ion	ClO_3^-	+5
ceric ion	Ce^{4+}	+4
Chlorine	Cl_2	0
Bromine	Br_2	0

ตารางที่ 2.4 ตัวรีดิวซ์สามัญ

ตัวรีดิวซ์	สูตร (ธาตุที่ขีดเส้นใต้ถูกออกซิไดซ์)	เลขออกซิเดชันของธาตุซึ่งเกิดออกซิเดชัน
Metallic atoms	Zn, Na	0
Metallic ions(lower oxidation number)	Metallic ions	lower state
Nonmetallic ions	I^-	-1
hydrogen sulfide	H_2S	-2
oxalic acid	$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	+3

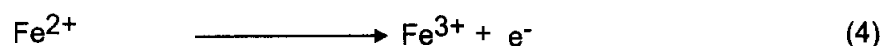
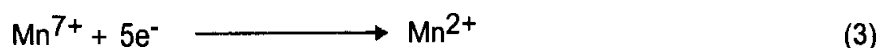
ในที่นี้จะใช้สมการของปฏิกิริยาระหว่าง potassium permanganate กับ iron (II) sulfate ในสารละลายกรดซัลฟริกเป็นตัวอย่างของการทำสมการให้ดุลในปฏิกิริยานี้ potassium permanganate เป็นตัวออกซิไดซ์และไปออกซิไดซ์ iron (II) sulfate เป็น iron (III) sulfate potassium permanganate ถูกรีดิวซ์โดย iron (II) sulfate กลายเป็น manganese (II) sulfate สมการโครงของปฏิกิริยา คือ



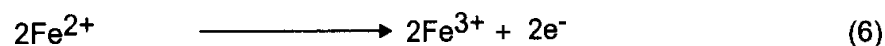
ขั้นที่ 1 : จำแนกธาตุที่มีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงและเขียนเลขออกซิเดชันเหล่านั้นไว้เหนือสัญลักษณ์ของธาตุนั้นทั้งสองข้างของสมการให้สำเร็จได้ดังนี้



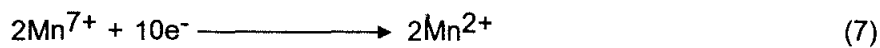
ขั้นที่ 2 : เขียนครึ่งปฏิกิริยาของแต่ละธาตุที่มีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงพร้อมแสดงจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียหรือได้รับโดยแต่ละอะตอมของธาตุในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเลขออกซิเดชันใหม่ของมัน



ขั้นที่ 3 : ถ้าธาตุที่กำหนดให้มีมากกว่าหนึ่งอะตอม เช่น จำนวนที่อยู่ในรูป subscript ในสูตร ในสมการโครง ต้องรวมจำนวนนี้เข้าเป็นสัมประสิทธิ์ในครึ่งปฏิกิริยาโดยทำครึ่งปฏิกิริยาของสมการเดิมและจำนวนอิเล็กตรอนเดิมให้ดุลในสมการ (1) เหล็กใน $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ มี subscript เป็น 2 ดังนั้นเราจะต้องคูณทุกๆ เทอมในสมการ (4) ด้วย 2



ขั้นที่ 4 : ทำจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียไปโดย Fe^{2+} กับจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับโดย Mn^{7+} ให้ดุลจำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกัน คือ ค.ร.น. ของจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสีย กับจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับ ในกรณีนี้ ค.ร.น.คือ 10 ดังนั้นในสมการ (5) คูณทุก ๆ เทอมด้วย 2 และคูณทุก ๆ เทอมในสมการ (6) ด้วย 5



ขั้นที่ 5 : นำสัมประสิทธิ์จากครึ่งปฏิกิริยาไปเขียนไว้ข้างหน้าสูตรที่ประกอบด้วยอะตอมเหล่านั้นตามลำดับในสมการโครง สัมประสิทธิ์ในครึ่งปฏิกิริยาแสดงจำนวนทั้งหมดของแต่ละสาร ดังนั้นเมื่อสารหนึ่งเช่น Fe^{3+} มี subscript ในสมการโครง สัมประสิทธิ์จากครึ่งปฏิกิริยาจึงต้องถูกหารด้วย subscript ก่อน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ข้างหน้าของ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ คือ $\frac{10}{2}$ หรือ 5



ขั้นที่ 6 : ทำไอออนบวก เช่น K^+ ion และ Na^+ ion ให้ดุล แต่ยังไม่ทำไฮโดรเจนให้ดุล ณ จุดนี้ ในสมการ (9) ไอออนบวกดุลแล้วไม่ต้องการสัมประสิทธิ์ใหม่อีกเลย

ขั้นที่ 7 : ทำไอออนลบ เช่น SO_4^{2-} , NO_3^- และ Cl^- ions ให้ดุล ขอให้สังเกตคำว่าไอออนที่ยกตัวอย่างในข้างของสารผลิตภัณฑ์ อาจจะเริ่มจากตัวออกซิไดซ์หรือตัวรีดิวซ์ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์ที่ได้รับเรียบร้อยแล้วจากครึ่งปฏิกิริยาในสมการ (9) ไอออนลบที่จะถูกตรวจ คือ SO_4^{2-} ion เท่านั้น ดังนั้นกรดซัลฟูริกจึงเป็นแหล่งของ SO_4^{2-} ion อีก โดยไม่มีความต้องการที่จะเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ของ FeSO_4 จะเห็นว่าทางขวาของสมการ (9) มี 18 SO_4^{2-} ions และทางซ้ายมีเพียง 10 SO_4^{2-} ions ที่ได้มาจาก FeSO_4 ฉะนั้นอีก 8 SO_4^{2-} ต้องได้มาจาก H_2SO_4



ขั้นที่ 8 : ทำอะตอมของไฮโดรเจนให้ดุล จะเห็นว่าทางซ้ายของสมการ (10) มี 16 อะตอมของไฮโดรเจน แต่เนื่องจากไฮโดรเจนทั้งหมดทางขวาอยู่ในรูปของน้ำ เพราะฉะนั้นน้ำ 8 โมเลกุลจึงได้มาจาก 16 อะตอมของไฮโดรเจน



สมการ (11) เป็นสมการออกซิเดชัน-รีดักชันที่ดุลแล้ว มีจำนวนอะตอมทั้งสองข้างของสมการจำนวนเดียวกัน ตัวออกซิไดซ์คือ KMnO_4 ตัวรีดิวซ์คือ FeSO_4 ธาตุที่ถูกออกซิไดซ์คือ Fe^{2+} และธาตุที่ถูกรีดิวซ์คือ manganese ใน MnO_4^- ion

ลำดับขั้นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการทำสมการรีดอกซ์ให้ดุลโดยใช้เลขออกซิเดชันที่เปลี่ยนแปลง สรุปได้ดังนี้

1. จำแนกธาตุซึ่งมีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลงและเขียนเลขออกซิเดชันของธาตุเหล่านั้นไว้ข้างบนสัญลักษณ์ของมันทั้งสองข้างของสมการ

2. เขียนครึ่งปฏิกิริยาสำหรับแต่ละธาตุที่มีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนแปลง แสดงจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียหรือได้รับโดยการเปลี่ยนแปลงในแต่ละอะตอมของธาตุไปสู่เลขออกซิเดชันใหม่ของมัน

3. กลับ subscript ในสมการโครงไปเป็นสัมประสิทธิ์ในครึ่งปฏิกิริยา

4. ทำจำนวนอิเล็กตรอนที่สูญเสียและที่ได้รับให้ดุล

5. ถ่ายเทสัมประสิทธิ์จากครึ่งปฏิกิริยาไปสู่สมการโครง และหารด้วยจำนวน subscript ถ้าจำเป็น

6. ทำไอออนบวก Na^+ ion และ K^+ ion ให้ดุล

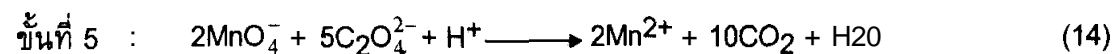
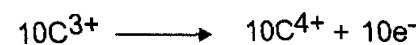
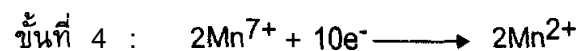
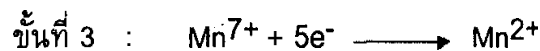
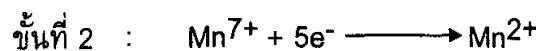
7. ทำไอออนลบ SO_4^{2-} ion และ NO_3^- ion ให้ดุล

8. ทำอะตอมของไฮโดรเจนหรือไฮโดรเจนไอออนให้ดุล

ในสมการไอออนประจุของไอออนทั้งหมดทางซ้ายมือของสมการไอออนต้องเท่ากับทางขวา

บางครั้งมีความจำเป็นที่จะต้องเขียนสมการไอออนของปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ส่วนใหญ่สมการไอออนสามารถทำสมการให้ดุลได้เช่นเดียวกับสมการโมเลกุล สมการโครงไอออนไม่ได้แสดงไอออนที่จะตรวจ ดังนั้นจึงไม่ต้องการตรวจไอออนในขั้นที่ 6 และ 7 ดังข้างต้น และยังไม่มีความต้องการเพื่อเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์ที่ได้รับจากครึ่งปฏิกิริยาเลย

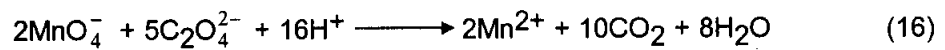
สมการไอออนแสดงถึงชนิดของประจุทางไฟฟ้า ฉะนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องนำเอาหลักของการดุลทางไฟฟ้ามาใช้ ซึ่งหมายถึงประจุของไอออนทั้งหมดทางซ้ายของสมการต้องเท่ากับประจุของไอออนทั้งหมดทางขวา สมการรีดอกซ์ไอออน สามารถนำไปสู่การดุลทางไฟฟ้าได้โดยการเขียนสัมประสิทธิ์ไว้ข้างหน้าไฮโดรเจนไอออนที่พบในสมการของปฏิกิริยาในสารละลายกรด หรือไว้ข้างหน้าไฮดรอกไซด์ไอออนถ้าปฏิกิริยาเกิดในสารละลายเบสิก เทคนิคนี้สามารถแสดงการดุลสมการไอออนของปฏิกิริยาระหว่าง permanganate ion, MnO_4^- กับ oxalate ion, $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ ในสารละลายกรด ได้ผลเป็น Mn^{2+} ion, CO_2 และ H_2O สมการโครงคือ



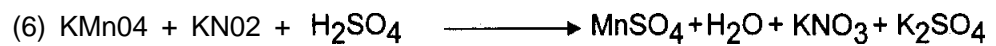
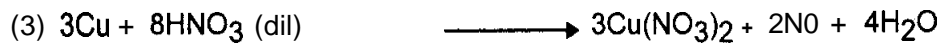
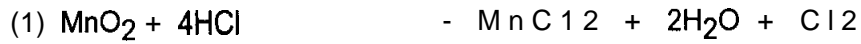
ขั้นที่ 6 : นับประจุรวมทั้งหมดแยกกันโดยนับไอออนทั้งหมดในแต่ละข้างของสมการ แต่ไม่นับไฮโดรเจนไอออนหรือไฮดรอกไซด์ไอออน ในสมการ (14) ประจุทั้งหมด คือ ทางซ้าย = -12 ทางขวา = +4 มีทางเดียวเท่านั้นที่จะทำให้ -12 กับ +4 ไปสู่การดุลได้ คือเพิ่มสัมประสิทธิ์ 16 ไว้หน้า H^+ ion ส่วนอนุภาคของประจุอื่น ๆ ทั้งหมดมีสัมประสิทธิ์คงเดิม สมการ (14) จะกลายเป็น



ขั้นที่ 7 : ทำไฮโดรเจนให้ดูล ซึ่งไฮโดรเจนทางขวาทั้งหมดอยู่ในรูปของน้ำ ดังนั้นจึงมีน้ำเกิดขึ้น 8 โมเลกุล สมการสุดท้าย คือ

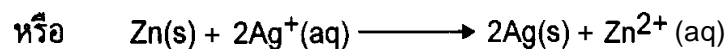
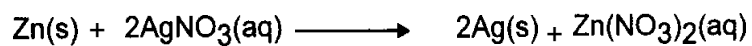


ตัวอย่างอื่น เช่น

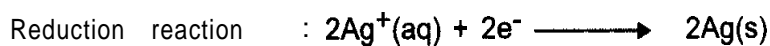


หมายเหตุ จงทำสมการในข้อ (6) - (9) ให้ดุลด้วย

ปฏิกิริยาโลหะสังกะสี ทำปฏิกิริยากับ aqueous silver nitrate ให้โลหะเงินกับ aqueous zinc nitrate สมการของปฏิกิริยานี้ คือ



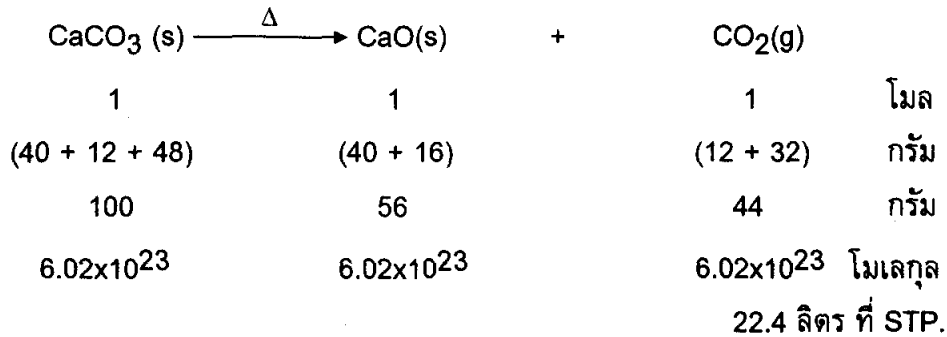
เขียนแยกเป็น 2 half reaction ได้ดังนี้



ปฏิกิริยานี้ เป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมีด้วย โดยจะก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในเรื่องเคมีไฟฟ้าต่อไป

2.6 การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับสมการเคมี

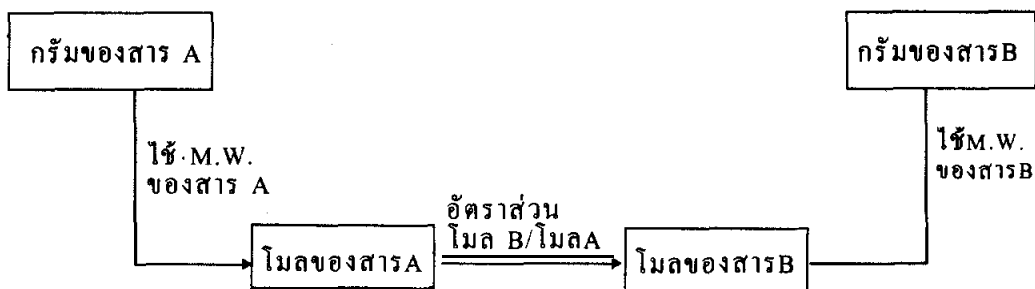
สมการเคมีนอกจากบอกให้ทราบถึงสารที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาเคมีแล้ว ยังบอกให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา และสามารถคำนวณหาปริมาณสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมีได้ด้วย เช่น เมื่อเผาหินปูน จะได้ปูนดิบและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (น้ำหนักอะตอมของ Ca = 40, C = 12, O = 16)



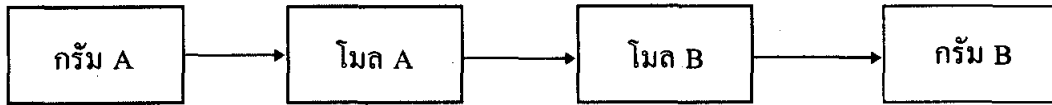
2.6.1 การคำนวณหาน้ำหนักจากน้ำหนักของสารในสมการ

จากสมการเคมีที่ดุลแล้วนำมาใช้ประโยชน์หาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของสารตั้งต้นกับน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ โดยมีแนวคิดดังนี้

เริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนจำนวนกรัมของสาร A ไปเป็นจำนวนโมลของสาร A ด้วยการหารด้วยน้ำหนักโมเลกุลของสาร A จากนั้นจึงเปลี่ยนจำนวนโมลของสาร A ไปเป็นจำนวนโมลของสาร B ด้วยการเทียบอัตราส่วนจำนวนโมลของสาร B ต่อจำนวนโมลของสาร A สุดท้ายจึงเปลี่ยนจำนวนโมลของสาร B ไปเป็นจำนวนกรัมของสาร B ด้วยการคูณด้วยน้ำหนักโมเลกุลของสาร B และอาจสรุปเป็นแผนภูมิง่าย ๆ ได้ดังนี้

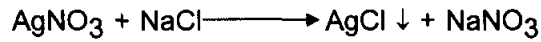


หรืออาจสรุปขั้นตอนความสัมพันธ์ย่อ ๆ ได้ดังนี้



ตัวอย่างที่ 2.9 จงคำนวณหาเงินคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากเงินไนเตรต 17 กรัม ทำปฏิกิริยากับ โซเดียมคลอไรด์ (N = 14, O = 16, Cl = 35.5, Ag = 108, Na = 23)

วิธีทำ ขั้นแรก : เขียนสมการที่ดุลแล้ว



ขั้นที่ 2 : เปลี่ยนเงินไนเตรต 17 กรัม ให้เป็นจำนวนโมลของเงินไนเตรต



1 โมล

1 โมล

1 โมลของ AgNO_3 หนัก : Ag 1(108) = 108 กรัม

N 1(14) = 14 กรัม

O₃ 3(16) = 48 กรัม

น้ำหนักโมเลกุล = 170 กรัม

1 โมลของ AgNO_3 หนัก

170 กรัม

$$\therefore \text{AgNO}_3 \text{ 17 กรัม} = \frac{17}{170} = 0.1 \text{ โมล}$$

จากสมการ ถ้าใช้ 1 โมล ของ AgNO_3 ได้ 1 โมล ของ AgCl

\therefore 0.1 โมล ของ AgNO_3 จะได้ 0.1 โมล ของ AgCl ด้วย

ขั้นที่สาม : เปลี่ยน 0.1 โมล ของ AgCl ที่เกิดขึ้นให้เป็นกรัม

1 โมล ของ AgCl หนัก : Ag 1 (108) = 108 กรัม

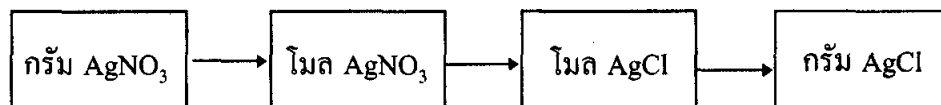
Cl 1(35.5) = 35.5 กรัม

น้ำหนักโมเลกุล AgCl = 143.5 กรัม

\therefore 0.1 โมล ของ AgCl หนัก = 0.1 x 143.5 = 14.4 กรัม

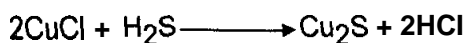
\therefore เงินคลอไรด์ที่เกิดขึ้น = 14.4 กรัม

สรุป :

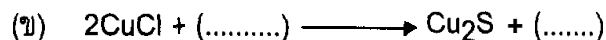


ตัวอย่างที่ 2.10 จงคำนวณหาคอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ ที่เกิดจาก 9.9 กรัม ของ CuCl ซึ่งทำปฏิกิริยากับก๊าซ H₂S ที่มากเกินไป (Cu = 63.5, S = 32, Cl = 35.5)

วิธีทำ ขั้นแรก : เขียนสมการที่ดุลแล้ว



ขั้นที่สอง : (ก) $9.9 \text{ กรัม CuCl} \div \frac{99 \text{ กรัม CuCl}}{\text{โมล}} = 0.1 \text{ โมลของ CuCl}$



2 โมล 1 โมล

1 โมล 0.5 โมล

(ค) $0.1 \text{ โมล ของ CuCl} = (0.1) (0.5) = 0.05 \text{ โมลของ Cu}_2\text{S}$

ขั้นที่สาม : เปลี่ยน 0.05 โมล ของ Cu₂S ไปเป็นกรัมของ Cu₂S

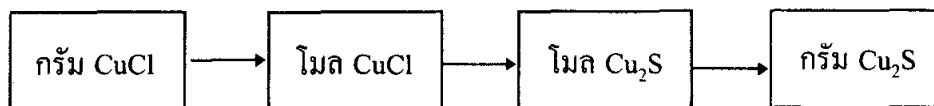
1 โมลของ Cu₂Sหนัก : $2\text{Cu} = 2(63.5) = 127 \text{ กรัม}$

$\text{S} = 1(32) = \underline{32 \text{ กรัม}}$

น้ำหนักโมเลกุล Cu₂S = 159 กรัม

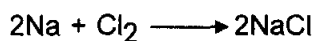
$\therefore \text{คอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น} = (0.05)(159) = 7.95 \text{ กรัม}$

สรุป :



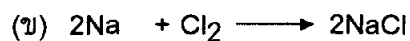
ตัวอย่างที่ 2.11 จงคำนวณหาคลอรีนที่ต้องการมาทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับ 10 กรัมของโซเดียม เพื่อให้เกิดเป็น NaCl (Na=23, Cl=35.5)

วิธีทำ ขั้นแรก : เขียนสมการที่ดุลแล้ว



ขั้นที่ 2 : เปลี่ยนโซเดียม 10 กรัม ให้เป็นจำนวนโมลของโซเดียม

(ก) $10 \text{ กรัม} \div \frac{23 \text{ กรัม Na}}{\text{โมล}} = \frac{10 \text{ กรัม Na}}{1} \times \frac{1 \text{ โมล Na}}{23 \text{ กรัม Na}} = 0.44 \text{ โมลของ Na}$



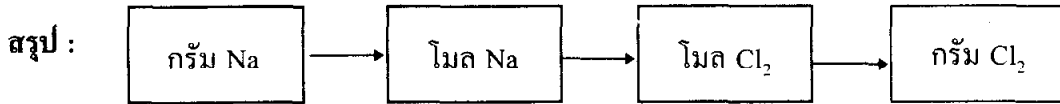
2 โมล + 1 โมล

1 โมล + 0.5 โมล

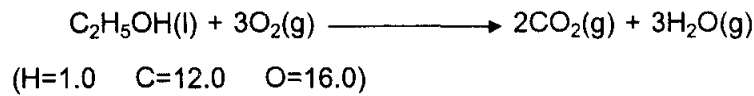
(ค) $(0.50)(0.44) = 0.22$ โมล ของ Cl_2 ที่ต้องการ (จำนวนโมลของ Cl_2)

ขั้นที่ 3 : เปลี่ยน 0.22 โมลของคลอรีนไปเป็นกรัม (น.น.) ของคลอรีน
น้ำหนักโมเลกุลของคลอรีน = $2(35.5) = 71$ กรัม

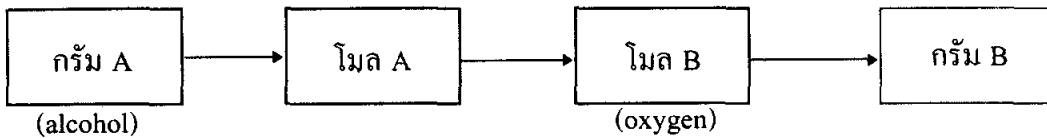
\therefore คลอรีนที่ต้องการใช้ทำปฏิกิริยา = $(71)(0.22) = 15.6$ กรัม



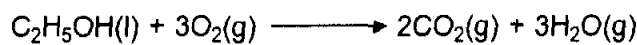
ตัวอย่างที่ 2.12 จงหาจำนวนกรัมของแก๊สออกซิเจนที่ต้องการเผาไหม้กับ ethyl alcohol จำนวน 10.0 กรัม สมการเคมีที่ดุลแล้วเป็นดังนี้



วิธีทำ ขั้นตอนการคำนวณมีความสัมพันธ์ดังนี้



ขั้นที่ 1 เขียนสมการที่ดุลแล้ว



ขั้นที่ 2 เปลี่ยน ethyl alcohol 10.0 กรัมให้เป็นจำนวนโมลของ ethyl alcohol

$$\text{ethyl alcohol } 10.0 \text{ กรัม} = \frac{10.0}{46.0} = 0.2174 \text{ โมล}$$

จากสมการ

ถ้าใช้ ethyl alcohol 1 โมล ต้องการแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา 3 โมล

\therefore ถ้าใช้ ethyl alcohol 0.2174 โมล ต้องการแก๊สออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยา = 3×0.2174 โมล
= 0.6522 โมล

ขั้นที่ 3 เปลี่ยน 0.6522 โมลของแก๊สออกซิเจนให้เป็นกรัมของแก๊สออกซิเจน

น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สออกซิเจน = $2 \times 16.0 = 32.0$ กรัม

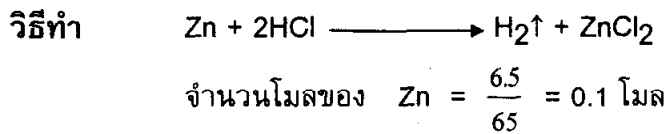
แก๊สออกซิเจนที่ต้องใช้เข้าทำปฏิกิริยา = (0.6522×32.0)

= 20.87 กรัม

2.6.2 การคำนวณหาน้ำหนักจากปริมาตรของก๊าซในสมการ

การหาปริมาณของก๊าซใช้วัดจากปริมาตร (ส่วนของแข็งและของเหลวได้จากการชั่ง) แล้วใช้ความสัมพันธ์ของน้ำหนักกับปริมาตรจากสมการของปฏิกิริยาคำนวณหาน้ำหนักของสารที่ต้องการ เช่น

ตัวอย่างที่ 2.13 จงคำนวณหาจำนวนลิตรของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ STP จากปฏิกิริยาของสังกะสี 6.5 กรัมกับกรดเกลือ ($Zn=65$, $Cl=35.5$)



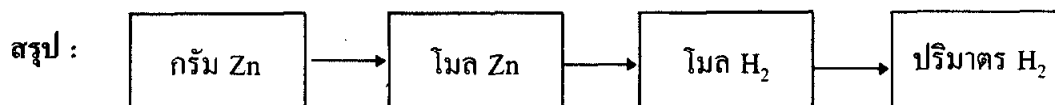
จากสมการ ใช้สังกะสี 1 โมล ได้ก๊าซไฮโดรเจน 1 โมล

∴ ถ้าใช้สังกะสี 0.1 โมล จะได้ก๊าซไฮโดรเจน 0.1 โมล ด้วย

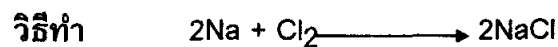
ก๊าซไฮโดรเจน 1 โมล มีปริมาตร 22.4 ลิตรที่ STP

ก๊าซไฮโดรเจน 0.1 โมล มีปริมาตร = $(0.1)(22.4) = 2.24$ ลิตร ที่ STP

∴ เมื่อใช้สังกะสี 6.5 กรัม ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ให้ก๊าซ H_2 เกิดขึ้น 2.24 ลิตรที่ STP



ตัวอย่างที่ 2.14 จงคำนวณหาโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของคลอรีน 112 ลิตร ที่ STP กับโซเดียมที่มากเกินไป ($Na=23$, $Cl=35.5$)



$$\text{จำนวนโมลของคลอรีน} = \frac{112 \times 1}{22.4} = 5.0 \text{ โมล}$$

จากสมการ ใช้คลอรีน 1 โมล ได้โซเดียมคลอไรด์ 2 โมล

ถ้าใช้คลอรีน 5 โมล ได้โซเดียมคลอไรด์ $(2)(5.0) = 10$ โมล

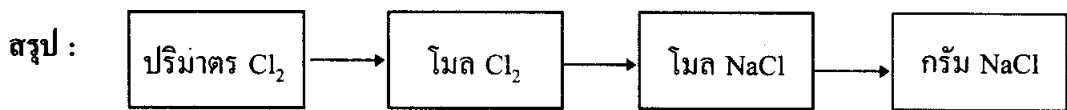
น้ำหนักโมเลกุลของ โซเดียมคลอไรด์ = $(23) + (35.5)$

$$= 58.5 \text{ กรัม}$$

∴ โซเดียมคลอไรด์ 10 โมลหนัก = $10 \times 58.5 = 585$ กรัม

∴ คลอรีน 112 ลิตร ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับโซเดียมที่มากเกินไปที่ STP

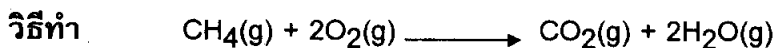
จะได้โซเดียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้น 585 กรัม



2.6.3 การคำนวณหาปริมาณจากปริมาณของก๊าซในสมการ

การคำนวณหาปริมาณของก๊าซชนิดหนึ่ง จากปริมาณที่ทราบแล้วของก๊าซอีกชนิดหนึ่ง โดยอาศัยประโยชน์จากสมการเคมี (โดยการเปลี่ยนจำนวนโมลให้เป็นลิตรแทนที่จะเปลี่ยนจำนวนโมลให้เป็นกรัม) เช่น

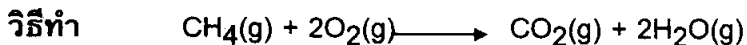
ตัวอย่างที่ 15 การเผาไหม้ของมีเทน 10 ลิตร จะต้องใช้ก๊าซออกซิเจนจำนวนกี่ลิตร



$$\text{จำนวนโมลของมีเทน} = \frac{1 \times 10.0}{22.4} = 0.446 \text{ โมล}$$

จากสมการ	มีเทน 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจน	= 2	โมล
	มีเทน 0.446 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับออกซิเจน	= (2)(0.446)	โมล
		= 0.892	โมล
	ก๊าซออกซิเจน 1 โมล มีปริมาตร	22.4 ลิตร	ที่ STP
∴	ก๊าซออกซิเจน 0.892 โมล มีปริมาตร	= 22.4 × 0.892	
		= 20 ลิตร	
∴	มีเทน 10 ลิตร จะถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ต้องใช้ ออกซิเจน	20 ลิตร	

จากตัวอย่างที่กล่าวไปนั้น อาจคำนวณโดยใช้ Gay-Lussac's Law of Combining Volumes ก็ได้ โดยเมื่อสมการของปฏิกิริยาเคมีที่ดุลแล้ว ตัวเลขสัมประสิทธิ์หน้าก๊าซต่าง ๆ แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของก๊าซเหล่านั้น ขณะที่อยู่ในภาวะเดียวกัน (คืออุณหภูมิและความดันอันเดียวกัน) ทั้งนี้ถือว่าไม่เกี่ยวข้องกับน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซและปริมาตรโมเลกุล

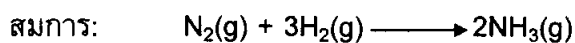


จากสมการ CH_4 1 ลิตร ต้องใช้ O_2 2 ลิตร (ที่ภาวะเดียวกัน)

∴ CH_4 10 ลิตร ต้องใช้ $\text{O}_2 = (2) (10) = 20$ ลิตร (ที่ภาวะเดียวกัน)

ตัวอย่างที่ 2.16 การผลิตแอมโมเนีย NH_3 จำนวน 120 ลิตร จะต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะเดียวกันจำนวนเท่าไร

วิธีทำ เมื่อสารเคมีทั้งหมดเป็นแก๊ส อัตราส่วนจำนวนปริมาตรจะเป็นอัตราส่วนเดียวกับอัตราส่วนจำนวนโมล



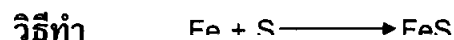
เริ่มต้นการคำนวณด้วยแอมโมเนีย NH_3 เพราะกำหนดปริมาตรมาให้

$$\text{ปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนที่ต้องใช้} = 120 \times \frac{3}{2} = 180 \text{ ลิตร (ที่ภาวะเดียวกัน)}$$

2.6.4 สารกำหนดปริมาณ (Limiting reagent)

เนื่องจากสารเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกันในอัตราส่วนโมลต่อโมลที่แน่นอน (กฎสัดส่วนคงที่) เช่น ไฮโดรเจน 2 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล เกิดน้ำขึ้น 2 โมล แต่ถ้าใช้ไฮโดรเจน 4 โมล ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล ไฮโดรเจนถูกใช้ทำปฏิกิริยาไป 2 โมล และคงเหลือ 2 โมลหรือถ้าใช้โซเดียม 9 โมล ทำปฏิกิริยากับคลอรีน 4 โมล ก็จะมีโซเดียมเหลือไม่ได้ทำปฏิกิริยา 1 โมล สารที่มีปริมาณน้อยกว่าจึงเป็นตัวกำหนดว่าปฏิกิริยาหนึ่งสามารถเกิดสารได้อย่างมากที่สุดเท่าไร และเรียกสารที่มีปริมาณน้อยกว่านี้ว่า สารกำหนดปริมาณ (limiting reagent หรือ Limiting reactant)

ตัวอย่างที่ 2.17 เหล็ก 7 กรัมและซัลเฟอร์ 8 กรัม ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นเหล็ก (II) ซัลไฟด์ จงหาว่าสารใดเป็นสารกำหนดปริมาณและสารใดที่เป็นสารที่มีมากเกินพอ (Fe = 56, S = 32)



$$\text{จำนวนโมลของเหล็ก (Fe)} = \frac{7}{56} = 0.125 \text{ โมล}$$

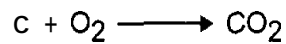
$$\text{จำนวนโมลของซัลเฟอร์ (S)} = \frac{8}{32} = 0.25 \text{ โมล}$$

จากสมการ เหล็ก 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับซัลเฟอร์ 1 โมล ได้เหล็ก (II) ซัลไฟด์ 1 โมล

∴ เหล็กจึงเป็นสารกำหนดปริมาณและซัลเฟอร์เป็นสารที่มีมากเกินพอ

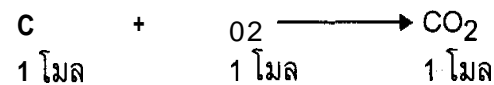
ตัวอย่างที่ 2.18 เมื่อใช้คาร์บอน 10 กรัม ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 20 ลิตร จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นกี่กรัม (C = 12, O = 16)

วิธีทำ



$$C \text{ 10 กรัม} = \frac{10}{12} = 0.833 \text{ โมล}$$

$$O_2 \text{ 20 ลิตร} = \frac{1 \times 20}{22.4} = 0.893 \text{ โมล}$$



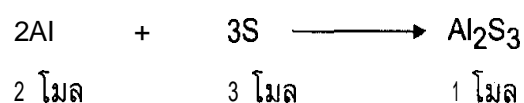
เนื่องจากจำนวนโมลของคาร์บอนมีน้อยกว่าจำนวนโมลของออกซิเจน

ฉะนั้นคาร์บอนจึงเป็นสารกำหนดปริมาณ

- ∴ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น = 0.833 โมลด้วย
- น้ำหนักโมเลกุลของ $CO_2 = (12) + 2(16) = 44$ กรัม
- ∴ คาร์บอนไดออกไซด์ 0.833 โมล = $(0.833)(44) = 36.7$ กรัม
- ∴ คาร์บอน 10 กรัม ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มากเกินไปได้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น 36.7 กรัม

ตัวอย่างที่ 2.19 เมื่อใช้ Aluminum 9 กรัม ทำปฏิกิริยากับ Sulfur 8 กรัม จะมี Aluminum sulfide เกิดขึ้นกี่กรัม (Al = 27, S = 32)

วิธีทำ



Aluminum

$$Al \text{ 9 กรัม} = \frac{9}{27} = \frac{1}{3} \text{ โมล}$$

$$\text{ใช้ Al 1 โมล ได้ } Al_2S_3 = \frac{1}{2} \text{ โมล}$$

$$\text{ถ้าใช้ Al } \frac{1}{3} \text{ โมล ได้ } Al_2S_3 = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6} \text{ โมล}$$

Sulfur

$$\text{S } 8 \text{ กรัม} = \frac{8}{32} = \frac{1}{4} \text{ โมล}$$

$$\text{ใช้ S } 1 \text{ โมล ได้ Al}_2\text{S}_3 = \frac{1}{3} \text{ โมล}$$

$$\text{ถ้าใช้ S } \frac{1}{4} \text{ โมล ได้ Al}_2\text{S}_3 = \frac{1}{3} \times \frac{1}{4} = \frac{1}{12} \text{ โมล}$$

เนื่องจากจำนวนโมลของ Sulfur น้อยกว่าจำนวนโมลของ Aluminum ฉะนั้น Sulfur จึงเป็นสารกำหนดปริมาณ

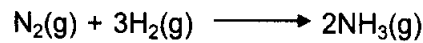
$$\therefore \text{Al}_2\text{S}_3 \text{ ที่เกิดขึ้น} = \frac{1}{12} \text{ โมล}$$

$$\text{น้ำหนักโมเลกุลของ Al}_2\text{S}_3 = 2(27) + 3(32) = 150 \text{ กรัม}$$

$$\therefore \text{Al}_2\text{S}_3 \text{ เกิดขึ้น} = \frac{1}{12}(150) = 12.5 \text{ กรัม}$$

ตัวอย่างที่ 2.20 ถ้าแก๊สไนโตรเจน 55.0 กรัม บรรจุอยู่ในภาชนะทดลองเดียวกับแก๊สไฮโดรเจน 55.0 กรัม จงหาว่าสารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ และแก๊สแอมโมเนียเกิดขึ้นกี่กรัม (H=1.01, N=14.0)

วิธีทำ



$$\text{จำนวนโมลของไนโตรเจน (N)} = \frac{55.0}{28.0} = 1.96 \text{ โมล}$$

$$\text{จำนวนโมลของไฮโดรเจน (H)} = \frac{55.0}{2.02} = 27.2 \text{ โมล}$$

การหาว่าสารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ ใช้อัตราส่วนจำนวนโมลจากสมการเคมีเพื่อหาจำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ต้องการใช้ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับไนโตรเจน คือ 3:1

$$\text{ไฮโดรเจนที่ต้องการใช้ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับไนโตรเจน} = 1.96 \times \frac{3}{1} = 5.88 \text{ โมล}$$

\therefore ไฮโดรเจนจึงเป็นสารที่มากเกินไปและ

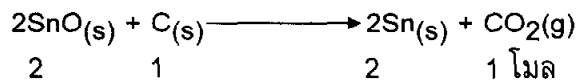
ไนโตรเจนเป็นสารกำหนดปริมาณ

ปริมาณของสารกำหนดปริมาณ, N_2 ถูกใช้หาปริมาณของแอมโมเนีย (เป็นกรัม) ซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยา ดังนี้

$$\therefore \text{แอมโมเนียเกิดขึ้น} = 1.96 \times \frac{2}{1} \times 17.0 = 66.6 \text{ กรัม}$$

2.6.5 ผลผลิตร้อยละ (Percentage yield)

การคำนวณหาผลผลิตทางทฤษฎี (Theoretical yield) จำเป็นต้องอาศัยสมการเคมีเพราะสมการเคมีที่ดุลแล้ว แสดงถึงอัตราส่วนจำนวนโมลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา และสารที่เป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา ผลผลิตทางทฤษฎีหมายถึง ผลผลิตที่มากที่สุดที่เกิดจากปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ จึงพิจารณาตัวอย่างต่อไปนี้



จากสมการข้างบนนี้ จะเห็นได้ว่า 2 โมลของ SnO ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับ 1 โมลของ C เกิด Sn 2 โมล และ CO₂ 1 โมล ดังนั้นผลผลิตทางทฤษฎีของ Sn และ CO₂ จึงเป็น 237.4 กรัม และ 44 กรัมตามลำดับ

ผลผลิตจริง (Actual yield) ที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้น ตามปกติจะได้น้อยกว่าผลผลิตทางทฤษฎี เช่น ผลผลิตจริงของ Sn อาจไม่ถึง 2 โมล และ CO₂ อาจไม่ถึง 1 โมลก็ได้ เนื่องจากอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) นอกเหนือจากที่เราต้องการได้

ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตจริง ผลผลิตทางทฤษฎีและผลผลิตร้อยละ อาจแสดงด้วยสูตรได้ดังนี้

$$\text{ผลผลิตร้อยละ} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100$$

ผลผลิตจริงและผลผลิตทางทฤษฎี อาจจะอยู่ในรูปของโมล, น้ำหนัก หรือปริมาตรก็ได้ แต่ต้องเป็นหน่วยเดียวกัน

ตัวอย่างที่ 2.21 (1)จงคำนวณหาผลผลิตทางทฤษฎีของโซเดียมคลอไรด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาของ NaHCO₃ 20.0 กรัม กับ 6M HCl 50.0 mL ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ



(2) ผลผลิตร้อยละเป็นเท่าไร ถ้าผลผลิตจริงของ NaCl เป็น 12.3 กรัม

$$(\text{H}=1.0, \text{C}=12.0, \text{O}=16.0, \text{Na}=23.0, \text{Cl}=35.5)$$

วิธีทำ (1) $\text{NaHCO}_3(\text{s}) + \text{HCl}(\text{aq}) \longrightarrow \text{NaCl}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2(\text{g})$

$$\text{จำนวนโมลของ NaHCO}_3 = \frac{20.0}{84.0} = 0.238 \text{ โมล}$$

$$\text{จำนวนโมลของ HCl} = \frac{6 \times 50}{1000} = 0.300 \text{ โมล}$$

จากสมการ

NaHCO₃ 1 โมลทำปฏิกิริยาพอดีกับ HCl 1 โมลได้ NaCl, H₂O และ CO₂ อย่างละ 1 โมล

ดังนั้น NaHCO₃ 0.238 โมล ต้องการ HCl เข้าทำปฏิกิริยา 0.238 โมล

∴ HCl จึงเป็นสารที่มากเกินไปและ

NaHCO₃ จึงเป็นสารกำหนดปริมาณ

NaCl ที่เกิดขึ้น = 0.238 โมล

$$= (0.238) (58.5) = 13.9 \text{ กรัม}$$

∴ ผลผลิตทางทฤษฎีของ NaCl = 13.9 กรัม

(2) ผลผลิตร้อยละหาได้จากสูตร

$$\text{ผลผลิตร้อยละ} = \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100$$

$$\therefore \text{ผลผลิตร้อยละของ NaCl} = \frac{12.3}{13.9} \times 100 = 88.5\%$$

ตัวอย่างที่ 2.22 ไทเทเนียมเป็นโลหะที่แข็ง น้ำหนักเบา ด้านทานการสึกกร่อนได้ดี ซึ่งถูกใช้ในการสร้างจรวด เครื่องบินและเครื่องบินไอพ่น ไทเทเนียมเตรียมได้โดยรีดักชันของ titanium (IV) chloride กับแมกนีเซียมที่หลอมเหลวระหว่าง 950°- 1150°C



ในการปฏิบัติการที่แน่นอน TiCl₄ 3.54 × 10⁴ kg ถูกทำปฏิกิริยากับ

Mg 1.13 × 10⁴ kg จงคำนวณ

(1) ผลผลิตทางทฤษฎีของ Ti เป็นกิโลกรัม

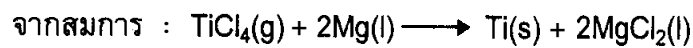
(2) ผลผลิตร้อยละ ถ้าผลผลิตจริงของ Ti = 7.91 × 10³ kg

$$(\text{Ti} = 47.88, \text{Mg} = 24.31, \text{Cl} = 35.45)$$

วิธีทำ (1) น้ำหนักโมเลกุลของ TiCl₄ และ Mg = 189.7 กรัม และ 24.31 กรัม ตามลำดับ และใช้ 1 kg = 1000 g จะได้

$$\text{จำนวนโมลของ TiCl}_4 = \frac{3.54 \times 10^7}{189.7} = 1.87 \times 10^5 \text{ ha}$$

$$\text{จำนวนโมลของ Mg} = \frac{1.13 \times 10^6}{24.31} = 4.65 \times 10^5 \text{ โมล}$$



TiCl₄ 1 โมล ทำปฏิกิริยาพอดีกับ Mg 2 โมล

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นจำนวนโมลของ Mg ที่ต้องการใช้ทำปฏิกิริยากับ TiCl}_4 & 1.87 \times 10^5 \text{ โมล} \\ & = 1.87 \times 10^5 \times 2 = 3.74 \times 10^5 \text{ โมล} \end{aligned}$$

จำนวนโมลของ Mg 4.65 × 10⁵ โมล ที่มีมากกว่าที่ต้องการใช้ทำปฏิกิริยากับ TiCl₄ Mg จึงเป็นสารที่มากเกินไป และ TiCl₄ เป็นสารกำหนดปริมาณ เมื่อ TiCl₄ 1 โมล ให้ Ti 1 โมล

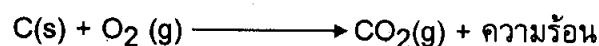
$$\begin{aligned} \text{ผลผลิตทางทฤษฎีของ Ti ที่เกิด} &= \frac{(3.54 \times 10^4) \times (47.88)}{189.7} \\ &= 8.93 \times 10^3 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \text{ ผลผลิตร้อยละ} &= \frac{\text{ผลผลิตจริง}}{\text{ผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100 \\ &= \frac{7.91 \times 10^3}{8.93 \times 10^3} \times 100 \\ &= 88.6 \% \end{aligned}$$

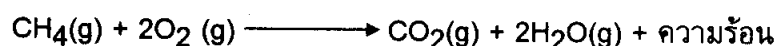
2.7 การเปลี่ยนแปลงพลังงานในปฏิกิริยาเคมี

ปฏิกิริยาเคมีนับว่าเป็นหัวใจของวิชาเคมี การศึกษาปฏิกิริยาเคมีที่สำคัญด้านหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละสาร และปรากฏออกมาในรูปต่าง ๆ เช่น ความร้อน ไฟฟ้า แสง พลังงานกล ฯลฯ เป็นต้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

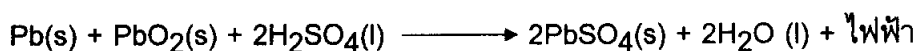
เมื่อใช้ถ่านหุงต้มอาหาร ถ่านจะทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนในอากาศให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมกับพลังงานความร้อน ดังสมการ



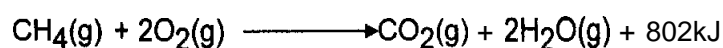
การเผาไหม้ก๊าซมีเทนต้องการก๊าซออกซิเจนในอากาศมาทำปฏิกิริยาให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำพร้อมกับคายพลังงานความร้อนออกมาดังสมการ



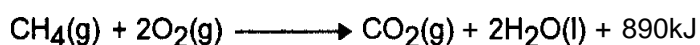
แบตเตอรี่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าให้นำไปสตาร์ทมอเตอร์ของรถยนต์ได้เกิดปฏิกิริยาขึ้นดังสมการ



จำนวนพลังงานที่เปลี่ยนแปลงซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับปริมาณสารเคมีที่ใช้และเงื่อนไขในการเกิดปฏิกิริยาด้วย เราสามารถเขียนสมการแสดงจำนวนพลังงานที่ให้ออกมาโดยเฉพาะได้ เช่น การเผาไหม้ $\text{CH}_4(\text{g})$ 1 โมล ต้องการ $\text{O}_2(\text{g})$ 2 โมล เพื่อผลิต $\text{CO}_2(\text{g})$ 1 โมล และ $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ 2 โมล พร้อมกับคายพลังงานความร้อน 802 kJ (192 kcal) ดังสมการ



การเปลี่ยนแปลงในพลังงานจะแตกต่างกัน เมื่อไอน้ำเปลี่ยนสถานะไปเป็นน้ำ (เหลว) เพราะไอน้ำมีความจุพลังงานมากกว่าน้ำ (เหลว) ดังสมการ

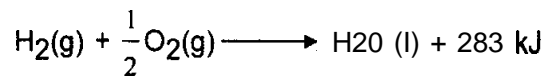


พลังงานที่คายออกมาระหว่างการเผาไหม้มีเทน แก๊สโซลีน แอลกอฮอล์ และเชื้อเพลิงอื่น ๆ ปฏิกิริยาเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการคายพลังงานความร้อนซึ่งเรียกว่า **ปฏิกิริยาคายความร้อน** (Exothermic reaction)

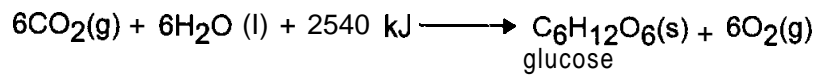
ปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อน (Endothermic reaction) เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนพลังงานความร้อน ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาเคมีส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แต่บางปฏิกิริยาก็เป็นปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อน ปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อนต้องการพลังงานสนับสนุนอย่างต่อเนื่องระหว่างเกิดปฏิกิริยา การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่หรือแหล่งกระแสไฟฟ้าตรงอื่น เป็นตัวอย่างที่ดีของปฏิกิริยาดูดกลืนความร้อน และรู้จักกันดีในชื่อของ electrolysis of water ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งของการผลิตก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง การแยกน้ำ 1 โมลต้องการพลังงาน 283 kJ (67.6 kcal) พลังงาน 283 kJ เขียนแสดงไว้ข้างซ้ายของสมการ



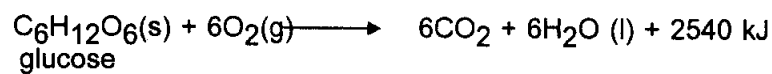
อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยานี้ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกี่ยวข้องกับคายพลังงานจำนวนเดียวกัน สำหรับการเผาไหม้ก๊าซไฮโดรเจน 1 โมล สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ส่วนที่เป็นสีเขียวของพืชต้องการพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมี ดังสมการ



ในทางตรงข้าม เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกเผาผลาญในร่างกาย ปฏิกิริยาเกิดขึ้นตรงข้ามกับปฏิกิริยาข้างบนดังนี้

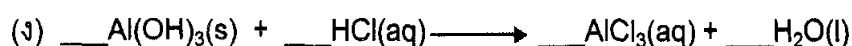
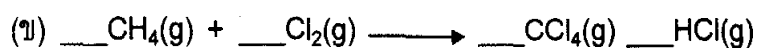
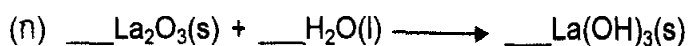


จากตัวอย่างที่กล่าวมาข้างต้นพอจะเห็นได้ว่า ปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีย่อมเกี่ยวข้องกับพลังงานรูปต่าง ๆ และจะกล่าวโดยละเอียดในบทต่อไป

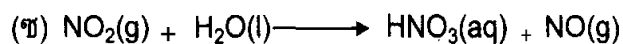
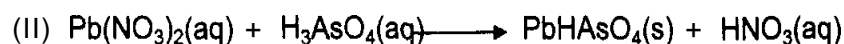
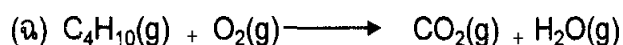
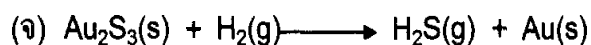
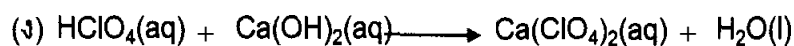
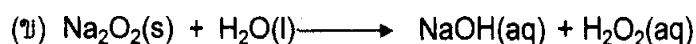
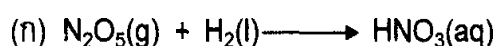
แบบฝึกหัด

สมการเคมี

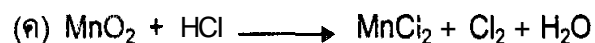
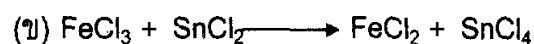
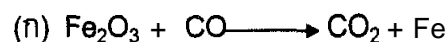
1. จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล โดยการเติมสัมประสิทธิ์ลงในช่องว่าง

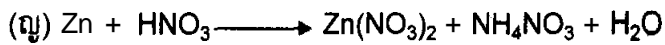
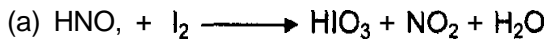
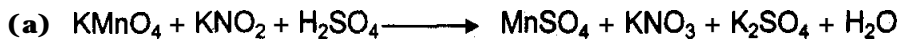
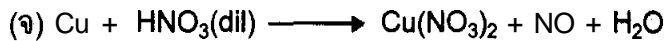


2. จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล

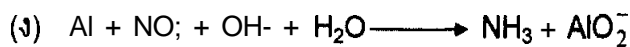
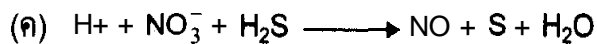
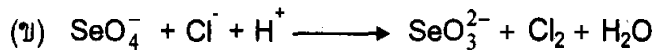
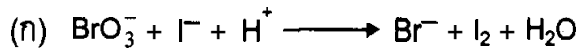


3. จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล และในแต่ละปฏิกิริยาจงแสดงว่า สารใดเป็นตัวออกซิไดส์ และสารใดเป็นตัวรีดิวซ์





4. จงทำสมการต่อไปนี้ให้ดุล



การคำนวณหาสูตรเอมไพริกัลและสูตรโมเลกุล

1. Phosgene เป็นแก๊สที่ใช้ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 ประกอบด้วย คาร์บอน 12.1% ออกซิเจน 16.2% และคลอรีน 71.7% โดยมวล จงหาสูตรเอมไพริกัลของ phosgene
(C = 12.0, O = 16.0, Cl = 35.5) **(ตอบ COCl_2)**
2. สารตัวอย่างของ methyl benzoate (สารประกอบที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำหอม) 5.325 กรัม พบว่าประกอบด้วยคาร์บอน 3.758 กรัม ไฮโดรเจน 0.316 กรัม และออกซิเจน 1.251 กรัม จงหาสูตรเอมไพริกัลของสารนี้ น้ำหนักโมเลกุลที่ได้จากการทดลองของสารประกอบนี้ = 136.0 จงหาสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้
(H = 1.0, C = 12.0, O = 16.0) **(ตอบ $\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2$)**
3. การวิเคราะห์สารตัวอย่างของ Ascorbic acid (Vitamin C) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีเพียงคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเท่านั้น การเผาไหม้ ascorbic acid 1.000 กรัม ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ 1.500 กรัม และน้ำ 0.405 กรัม น้ำหนักโมเลกุลที่หาได้จากการทดลองของ ascorbic acid = 176.0 จงหาสูตรโมเลกุลของสารประกอบนี้
(H = 1.01, C = 12.0, O = 16.0) **(ตอบ $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)**

**ความสัมพันธ์ของโมล มวล และจำนวน
อนุภาค**

1. จงหา (น) จำนวนโมลของกลูโคส $C_6H_{12}O_6$ ใน (1) 538 กรัม (2) 1.00 กรัม
 (ตอบ (1) 2.99 โมล (2) 5.56×10^{-3} โมล)
 (ข) จำนวนโมลของ $NaHCO_3$ ที่มีอยู่ในสารนี้ 5.08 กรัม
 (ตอบ 0.0605 โมล)
2. จงหา (ก) มวลเป็นกรัมของกลูโคส, $C_6H_{12}O_6$ 0.433 โมล (ตอบ 77.9 กรัม)
 (ข) มวลเป็นกรัมของ $NaHCO_3$ ที่มีอยู่ในสารนี้ 6.33 โมล (ตอบ 532 กรัม)
3. จงหา (ก) จำนวนโมเลกุลของกลูโคส ที่มีอยู่ในกลูโคส 5.23 กรัม (ตอบ 1.75×10^{22} โมเลกุล)
 (ข) จำนวนอะตอมของ O_2 ที่มีอยู่ใน $NaHCO_3$ 4.20 กรัม (ตอบ 9.03×10^{22} อะตอม)
 (ค) จำนวนอะตอมของคาร์บอนในกลูโคส, $C_6H_{12}O_6$ 0.350 โมล
 (ตอบ 1.26×10^{24} อะตอม)
 (จ) จำนวนอะตอมของไนโตรเจนใน $Ca(NO_3)_2$ 0.25 โมล
 (ตอบ 3.0×10^{23} อะตอม)

การคำนวณจากสมการเคมี

1. ในกระบวนการหลอมเหลวทองแดงโดยใช้ chalcopyrite, $CuFeS_2$ ซึ่งเป็นแหล่งแร่ของทองแดง เกิดปฏิกิริยาดังสมการ

$$2CuFeS_2(s) + 5O_2(g) \longrightarrow 2Cu(s) + 2FeO(s) + 4SO_2(g)$$
 จงหา (ก) มวลของทองแดง (ข) มวลของ SO_2 ที่ผลิตได้จาก $CuFeS_2$ 1.00 กรัม
 (Cu = 63.5, Fe = 55.8, S = 32, O = 16) (ตอบ (ก) = 0.347 กรัม (ข) = 0.70 กรัม)
2. น้ำที่เกิดจากการเผาไหม้กลูโคส, $C_6H_{12}O_6$ 1.00 กรัม มีจำนวนเท่าไร
 (C = 12.0, O = 16.0, H = 1.0) (ตอบ 0.60 กรัม)

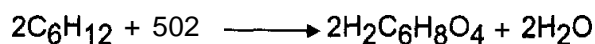
3. วิธีเตรียมแก๊สออกซิเจนจำนวนน้อย ๆ ในห้องปฏิบัติการ นิยมใช้การสลายตัวของ KClO_3
 ดังสมการ : $2\text{KClO}_3(\text{s}) \longrightarrow 2\text{KCl}(\text{s}) + 3\text{O}_2(\text{g})$
 แก๊สออกซิเจนที่เตรียมได้จาก KClO_3 4.50 กรัม เป็นเท่าไร
 ($\text{K} = 39.1, \text{Cl} = 35.5, \text{O} = 16.0$) (ตอบ 1.77 กรัม)
4. ในยานอวกาศใช้ลิเทียมไฮดรอกไซด์กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่หายใจออกมาโดยลิเทียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ลิเทียมคาร์บอเนตกับน้ำ ดังสมการ :
 $2\text{LiOH}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{Li}_2\text{CO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$
 จงหาจำนวนกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดโดยลิเทียมไฮดรอกไซด์ 1.00 กรัม
 ($\text{H} = 1.01, \text{Li} = 6.94, \text{C} = 12.00, \text{O} = 16.00$) (ตอบ 0.919 กรัม)
5. โพรเพน, C_3H_8 เป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับปรุงอาหารและให้ความร้อนภายในบ้าน มวลของแก๊สออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในการเผาไหม้โพรเพน 1.00 กรัม เป็นเท่าไร ($\text{C} = 12.00, \text{H} = 1.00, \text{O} = 16.00$) (ตอบ 3.64 กรัม)

สารกำหนดปริมาณ

1. ของผสมของ Al 1.5 โมล และ Cl_2 3 โมล ทำปฏิกิริยากันดังสมการ
 $2\text{Al}(\text{s}) + 3\text{Cl}_2(\text{g}) \longrightarrow 2\text{AlCl}_3(\text{s})$
 จงหา (n) สารใดเป็นสารกำหนดปริมาณ (ข) AlCl_3 เกิดขึ้นกี่กรัม
 ($\text{Al} = 27, \text{Cl} = 35.5$) (ตอบ (n) Al (ข) 200.25 กรัม)
2. Freon-12, CCl_2F_2 เป็นแก๊สที่ใช้ในเครื่องทำความเย็น เตรียมได้โดยปฏิกิริยาต่อไปนี้
 $3\text{CCl}_4 + 2\text{SbF}_3 \longrightarrow 3\text{CCl}_2\text{F}_2 + 2\text{SbCl}_3$
 ถ้าใช้ CCl_4 150 กรัม ทำปฏิกิริยากับ SbF_3 100 กรัม Freon-12, CCl_2F_2 เกิดขึ้นกี่กรัม
 ($\text{C} = 12, \text{F} = 19, \text{Cl} = 35.5, \text{Sb} = 122$) (ตอบ 101.6 กรัม)
3. จงพิจารณาปฏิกิริยา: $2\text{Na}_3\text{PO}_4(\text{aq}) + 3\text{Ba}(\text{NO}_3)_2(\text{aq}) \longrightarrow \text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2(\text{s}) + 6\text{NaNO}_3(\text{aq})$
 ถ้าสารละลายเกิดจากการผสมของ Na_3PO_4 3.50 กรัม กับ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 6.40 กรัม
 $\text{Ba}_3(\text{PO}_4)_2$ จะเกิดขึ้นกี่กรัม ($\text{Na}=23, \text{N}=14, \text{O}=16, \text{P}=31, \text{Ba}=137$) (ตอบ 4.92 กรัม)

ผลผลิตทางทฤษฎี ผลผลิตจริง และผลผลิตร้อยละ

1. Adipic acid, $\text{H}_2\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_4$ เป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไนลอนในทางการค้า เตรียมได้โดยออกซิเดชันของ cyclohexane, C_6H_{12} ดังสมการ



- (ก) ถ้าปฏิกิริยานี้เริ่มต้นด้วย cyclohexane 25.0 กรัม และ cyclohexane เป็นสารกำหนดปริมาณ ผลผลิตทางทฤษฎีของ adipic acid เป็นเท่าไร (ตอบ 43.5 กรัม)
- (ข) ถ้า adipic acid ที่เตรียมได้ = 33.5 กรัม ผลผลิตร้อยละของ adipic acid เป็นเท่าไร (ตอบ 77.0%)
2. จงพิจารณาปฏิกิริยา: $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 3\text{CO}(\text{g}) \longrightarrow 2\text{Fe}(\text{s}) + 3\text{CO}_2(\text{g})$
- (ก) ถ้าเริ่มต้นด้วย Fe_2O_3 150 กรัม และ Fe_2O_3 เป็นสารกำหนดปริมาณด้วย ผลผลิตทางทฤษฎีของ Fe เป็นเท่าไร (ตอบ 105 กรัม)
- (ข) ถ้าผลผลิตจริงของ Fe เป็น 87.9 กรัม ผลผลิตร้อยละเป็นเท่าไร (Fe = 56, O = 16) (ตอบ 83.7%)