การทดลองที่ 9
ปฏิกิริยาผันกลับได้และสมดุลเคมี
(Reversible reaction and Chemical equilibrium)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีต่อสมดุลเคมี
2. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อสมดุลเคมี

หลักการ

ปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible reaction) คือปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ก็จะเกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นสารตั้งต้นได้อีก โดยในปฏิกิริยาผันกลับนี้จะใช้เครื่องหมายลูกศรไปกลับ ($\leftrightharpoons$) ระหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดได้ทั้ง 2 ทิศทาง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาเรียก ปฏิกิริยาไปข้างหน้า และปฏิกิริยาที่เกิดกลับจากขวามาซ้ายเรียก ปฏิกิริยาย้อนกลับ หรือปฏิกิริยาผันกลับ เช่นปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{3+} กับ I^- เกิด Fe^{2+} และ I_2 เป็นปฏิกิริยาไปข้างหน้าและในขณะเดียวกัน Fe^{2+} กับ I_2 เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ Fe^{3+} และ I^- ดังปฏิกิริยาที่ 9.1

$$Fe^{3+} + I^- \leftrightharpoons Fe^{2+} + I_2 \qquad (9.1)$$

หรือการผลิตแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) จากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับแก๊สไนโตรเจน (N_2) ดังปฏิกิริยาที่ 9.2

$$3H_2(g) + N_2(g) \leftrightharpoons 2NH_3(g) \qquad (9.2)$$

ในการเกิดปฏิกิริยานี้ แก๊ส H_2 และ N_2 เป็นสารตั้งต้น ทำปฏิกิริยากันกลายเป็นแก๊ส NH_3 และในทันทีที่เกิดแก๊ส NH_3 แก๊ส NH_3 ที่เกิดขึ้นจะสลายตัวกลับไปเป็นแก๊ส H_2 และ N_2 อย่างเดิม ฉะนั้นในเวลาเดียวกันจึงมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น 2 กระบวนการพร้อมๆ กัน [1]

สมดุลเคมี (Chemical equilibrium) คือสภาวะที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลงอีกแม้เวลาผ่านไป เราจะเรียกว่าปฏิกิริยาเคมีนั้นอยู่ในภาวะสมดุล (Equilibrium) [4]
ระบบที่จะเกิดภาวะสมดุลได้ ประกอบด้วย [5]

1) เป็นระบบปิด
2) เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้
3) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า = อัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ
4) ระบบมีสมบัติคงที่ เช่น สีของสารคงที่ ความดันคงที่ หรืออุณหภูมิคงที่ เป็นต้น

ถึงแม้การดำเนินไปของปฏิกิริยาได้สิ้นสุดลง แต่ระบบยังคงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เรียกว่า สมดุลไดนามิค หรือสมดุลพลวัต (Dynamic equilibrium)

การที่ระบบอยู่ในภาวะสมดุลที่มีสมบัติต่างๆ ของระบบคงที่ เมื่อระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลถูกรบกวนโดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสมดุลของระบบ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่จะลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลอีกครั้ง ซึ่งเป็นไปตามหลักของ เลอชาเตอรลิเอร์ (Le Chatelier's Principle) [6]

โดยปัจจัยที่มีผลที่ทำให้เกิดการรบกวนสมดุล มีดังนี้

1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
2) การเปลี่ยนแปลงความดันหรือปริมาตรของแก๊ส
3) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสาร
4) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
5) การเติมตัวเร่ง และตัวหน่วงปฏิกิริยา

ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อภาวะสมดุล 2 ประการ

1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (Concentration effect) [3]

การเพิ่มความเข้มข้นของสาร เป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาให้มีโอกาสชนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามการลดความเข้มข้นของสารละลายเป็นการลดจำนวนโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารในภาวะสมดุล ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มหรือลดความเข้มข้น จะทำให้ระบบเสียภาวะสมดุลได้ โดยระบบจะต้องมีการปรับตัวให้กลับสู่สภาวะสมดุลใหม่เสมอ ตัวอย่างเช่น ในสมดุลของสมการเคมีของปฏิกิริยาการเกิด Ferric thiocyanate complex ($[Fe(SCN)]^{2+}$) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงเลือดนกที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้น คือ Fe^{3+} และ SCN^- ดังแสดงในปฏิกิริยา

$$Fe^{3+} + SCN^- \rightleftharpoons [Fe(SCN)]^{2+}$$

ไม่มีสี ไม่มีสี สีแดงเลือดนก

หากมีการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสีแดงเลือดนกก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยที่สีแดงเลือดนกเข้ม แสดงว่ามีปริมาณ $[Fe(SCN)]^{2+}$ มาก และหากสีแดงเลือดนกจาง แสดงว่าปริมาณ $[Fe(SCN)]^{2+}$ น้อย เมื่อพิจารณาความเข้มของสีแดงเลือดนก จะสามารถบอกปริมาณ $[Fe(SCN)]^{2+}$ ได้ ดังนั้นถ้าสีแดงเลือดนกเข้มขึ้น แสดงว่าระบบเกิดการปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้ $[Fe(SCN)]^{2+}$ เพิ่มขึ้น และในทางตรงข้าม ถ้าสีแดงเลือดนกจางลงแสดงว่าระบบจะปรับตัวเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับให้ $[Fe(SCN)]^{2+}$ ลดลง

2) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Temperature effect) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณี [2]

กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับภาวะสมดุลของปฏิกิริยาดูดความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ลดลง

กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับภาวะสมดุลของปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ลดลง หากลดอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมดุลของ Cobalt(II) complexes ระหว่าง $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ กับ $4Cl^-$ ที่เป็นสารตั้งต้น จะให้สารละลายมีสีชมพู แสดงได้โดยปฏิกิริยาสมดุล ดังแสดงในปฏิกิริยา

$$[Co(H_2O)_6]^{2+} + 4Cl^- \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-} + 6H_2O$$

สีชมพู สีน้ำเงิน

หากมีการเพิ่มอุณหภูมิ สารละลายสีน้ำเงินจะเปลี่ยนไปเป็นสีชมพู ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการลดอุณหภูมิ สารละลายสีชมพูจะเปลี่ยนกลับไปเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งการเปลี่ยนสีของสารละลายดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ระบบเกิดการปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับให้ $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ เพิ่มขึ้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินกลายเป็นสีชมพู และในทางตรงข้ามเกิดการเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าระบบจะปรับตัวเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้ $[CoCl_4]^{2-}$ มากขึ้น

อุปกรณ์

1. หลอดทดลอง
2. บีกเกอร์ขนาด 100 mL
3. กระบอกตวงขนาด 5 และ 10 mL
4. อ่างน้ำร้อน หรือ เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Hotplate stirrer)

สารเคมี

1. สารละลายเฟอริกไนเตรต (0.1M $Fe(NO_3)_3$)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (6M NaOH)
3. สารละลายเมอร์คิวรี(I) คลอไรด์ (0.1M $HgCl_2$)
4. สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (0.1M KSCN)
5. สารละลายโคบอลต์ไนเตรต (0.4M $Co(NO_3)_2$)
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. HCl)
7. น้ำสะอาด

CATRE LAB

วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีผลต่อสมดุล (Concentration effect)

1. นำสารละลาย $Fe(NO_3)_3$ 0.10 mol/L มา 20 หยด ผสมกับสารละลาย KSCN 0.10 mol/L 20 หยด ในบีกเกอร์ 100 mL แล้วเติมน้ำ 50 mL เพื่อให้สีแดงเลือดนกจางลง ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการสังเกตปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นต่อไป แบ่งสารละลายนี้ออกเป็น 6 ส่วน ส่วนละประมาณ 40 หยดใส่ในหลอดทดลอง แล้วทำการทดลองดังนี้
    1) หลอดที่ 1 เติมสารละลาย $Fe(NO_3)_3$ 0.10 mol/L 4-5 หยด
    2) หลอดที่ 2 เติมสารละลาย KSCN 0.10 mol/L 4-5 หยด
    3) หลอดที่ 3 เติมสารละลาย NaOH 6 mol/L 4-5 หยด
    4) หลอดที่ 4 เติมสารละลาย $HgCl_2$ 0.10 mol/L 4-5 หยด
    5) หลอดที่ 5 เติมน้ำ 4-5 หยด
    6) หลอดที่ 6 เก็บไว้สำหรับเปรียบเทียบสี
2. สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในหลอดที่ 1-5 เปรียบเทียบสีของสารละลายกับหลอดที่ 6 บันทึกสีของสารละลายหลอดที่ 1-5 เทียบกับหลอดที่ 6 ลงในตาราง ว่าสารละลายเพิ่มขึ้น (+) หรือลดลง (-) และจงอธิบายสิ่งที่สังเกตได้โดยใช้หลักการของเลอชาเตอลิเอร์

ตอนที่ 2 ศึกษาผลการรบกวนสมดุลโดยผลของอุณหภูมิ (Temperature effect)

1. นำสารละลาย $Co(NO_3)_2$ 0.40 mol/L ปริมาตร 1 mL ใส่ในหลอดทดลอง
2. ค่อยๆ เติม Conc. HCl ลงไปทีละหยด พร้อมทั้งเขย่าหลอดทดลองเพื่อให้สารละลายผสมกันได้ดี จนได้สารละลายสีน้ำเงิน (ขั้นตอนนี้ควรทำการทดลองในตู้ดูดควัน)
3. จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำลงไปทีละหยด พร้อมทั้งเขย่าหลอดทดลอง จนได้สารละลายสีชมพู
4. นำไปต้มในอ่างน้ำร้อน (อุณหภูมิประมาณ 100 °C) สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง
5. นำมาทำให้เย็นโดยจุ่มหลอดทดลองลงไปในน้ำเย็น สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง
6. วิเคราะห์ว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน

CATRE LAB

<u>รายงานผลการทดลองที่ 9 ปฏิกิริยาผันกลับได้และสมดุลเคมี</u>

<u>(Reversible reaction and Chemical equilibrium)</u>

ตอนที่ 1 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีผลต่อสมดุล (Concentration effect)

$$Fe^{3+} + SCN^{-} \rightleftharpoons [Fe(SCN)]^{2+}$$

ไม่มีสี ไม่มีสี สีแดงเลือดนก

หลอดที่	สารละลายที่เติมเพิ่มลงไปในระบบ	สีเข้มขึ้น (+) หรือจางลง (-)	ทิศทางของสมดุล
1	$Fe(NO_3)_3$	+	→
2	KSCN	+	→
3	NaOH	-	←
4	$HgCl_2$	-	←
5	H_2O	0	⇋

ตอนที่ 2 ศึกษาผลการรบกวนสมดุลผลของอุณหภูมิ (Temperature effect)

$$[Co(H_2O)_6]^{2+} + 4Cl^{-} \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-} + 6H_2O$$

สีชมพู สีน้ำเงิน

ขั้นตอนการทดลอง	สีที่สังเกตได้	ทิศทางของสมดุล
$Co(NO_3)_2$ + HCl ทีละหยด	น้ำเงิน	→
เติม H_2O ทีละหยด	ชมพู	←
อุ่นในอ่างน้ำ 100 °C	ม่วงอมน้ำเงิน	→
แช่ในน้ำเย็น	ชมพู	←

CATRE LAB

<u>สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</u>

จากการทดลองการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีผลต่อสมดุล (Concentration effect) โดยมี $Fe(NO_3)_3$ กับ KSCN เป็นสารตั้งต้น และได้เป็น $[Fe(SCN)]^{2+}$ Ferric thiocyanate complex เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ให้สีแดงเลือดนก เมื่อทดสอบกับสารละลาย 5 ชนิด เพื่อศึกษาภาวะสมดุลที่เกิดขึ้น

เมื่อมีการเติมสารละลาย $Fe(NO_3)_3$ ลงในระบบที่สมดุล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่าง Fe^{3+} จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายมีสีแดงเลือดนกที่เข้มขึ้น แสดงว่าในระบบจะมี $[Fe(SCN)]^{2+}$ เกิดเพิ่มขึ้น จนสีเกิดการคงที่ ทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง และเมื่อเติมสารละลาย KSCN ลงในระบบภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่าง SCN^- จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายมีสีแดงเลือดนกที่เข้มขึ้น แสดงว่าในระบบจะมี $[Fe(SCN)]^{2+}$ เกิดเพิ่มขึ้น จนสีเกิดการคงที่ ทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง เหมือนดังกรณีแรก

ขณะที่ หลอดที่ 3-4 ที่เติม NaOH และ $HgCl_2$ ตามลำดับ ลงในระบบภาวะสมดุล ทำให้ OH^- ทำปฏิกิริยากับ Fe^{3+} เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ $Fe(OH)_3$ และทำให้ Hg^{2+} ทำปฏิกิริยากับ SCN^- เกิดเป็นสารประกอบที่ความสามารถแตกตัวได้น้อยมาก $Hg(SCN)_2$ ซึ่งการเติม NaOH และ $HgCl_2$ ลงในระบบภาวะสมดุลจึงเป็นการลดความเข้มข้นของสารตั้งต้น (Fe^{3+}, SCN^-) ทำให้สารละลายมีสีที่จางลง แสดงว่า $[Fe(SCN)]^{2+}$ เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ โดยสลายตัวเป็นสารตั้งต้น (Fe^{3+}, SCN^-)

และเมื่อทำการเติมน้ำลงไปในหลอดทดลองที่ 5 พบว่าสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าน้ำไม่ได้เข้าไปมีผลต่อภาวะสมดุล

จากการทดลองการศึกษาผลการรบกวนสมดุลของอุณหภูมิ ที่มี $Co(NO_3)_2$ และ HCl เป็นสารตั้งต้น จะให้สารละลายมีสีน้ำเงิน และทำการเติมน้ำลงไปพบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่อนำสารละลายที่อยู่ในสมดุลไปให้ความร้อน สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าทำให้มีความเข้มข้นของ $[CoCl_4]^{2-}$ มากขึ้น ขณะที่นำสารละลายที่อยู่ในสมดุลมาแช่ในน้ำเย็นจัด สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู ส่งผลให้ภาวะสมดุลมีการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของ $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ เพิ่มขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic reaction)

อ้างอิง

[1] กนกพร บุญนวน, “เอกสารประกอบดารสอน เรื่อง สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium),” 2019. [ออนไลน์]. Available: https://slideplayer.in.th/slide/14793211/.

[2] University of Colorado Boulder, “E720: Effect of temperature - [Co(H2O)6]^2+/[CoCl4]^2-,” 2017. [ออนไลน์]. Available: https://www.colorado.edu/lab/lecture-demo-manual/equilibrium/e720-effect-temperature-coh2o62cocl42.

[3] N. Foundation, “The equilibrium between two coloured cobalt species,” 30 11 2020. [ออนไลน์]. Available: https://edu.rsc.org/experiments/the-equilibrium-between-two-coloured-cobalt-species/1.article.

[4] W. Chansuvarn, “ปฏิกิริยาผันกลับและสมดุลเคมี (Reversible reactions and chemical equilibrium),” [ออนไลน์]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://web.rmutp.ac.th/woravith/upload/EngChemLab/ECL9.pdf.

[5] สุภาวรันต์ ทัพสุริย์, “เอกสารประกอบการสอน เรื่อง สมดุลเคมี CHEMICAL EQUILIBRIUM,” [ออนไลน์]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://dspace.bru.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/7065/7.%E0%B8%AA%E0%B8%A1%E0%B8%94%E0%B8%B8%E0%B8%A5%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A1%E0%B8%B5.pdf?sequence=7&isAllowed=y.

[6] อนุสิษฐ์ เกื้อกูล, “สมดุลเคมี,” 4 6 2017. [ออนไลน์]. Available: https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7134-2017-06-04-08-13-48#articleToc.

CATRE LAB