

การทดลองที่ 9

ปฏิกิริยาผันกลับได้และสมดุลเคมี

(Reversible reaction and Chemical equilibrium)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีต่อสมดุลเคมี
2. เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีต่อสมดุลเคมี

หลักการ

ปฏิกิริยาผันกลับได้ (Reversible reaction) คือปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ เมื่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมแล้ว ก็จะเกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นสารตั้งต้นได้อีก โดยในปฏิกิริยาผันกลับนี้จะใช้เครื่องหมายลูกศรไปกลับ (\rightleftharpoons) ระหว่างสารตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เพื่อแสดงว่าปฏิกิริยาเกิดได้ทั้ง 2 ทิศทาง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากซ้ายไปขวาเรียก ปฏิกิริยาไปข้างหน้า และปฏิกิริยาที่เกิดกลับจากขวาซ้ายเรียก 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



หรือการผลิตแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) จากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับแก๊สไนโตรเจน (N_2) ดังปฏิกิริยาที่ 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 สมดุลไดนามิก หรือสมดุลพลวัต (Dynamic equilibrium)

การที่ระบบอยู่ในภาวะสมดุลที่มีสมบัติต่างๆ ของระบบคงที่ เมื่อระบบที่อยู่ในภาวะสมดุลถูกรบกวน โดยการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่มีผลต่อภาวะสมดุลของระบบ ระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่จะลดผลของการรบกวนนั้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลอีกครั้ง ซึ่งเป็นไปตามหลักของ เลอชาเตอลิเอร์ (Le Chatelier's Principle) [6]

โดยปัจจัยที่มีผลที่ทำให้เกิดการรบกวนสมดุล มีดังนี้

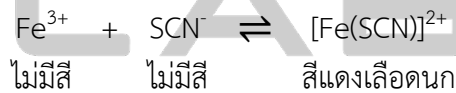
- 1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น
- 2) การเปลี่ยนแปลงความดันหรือปริมาตรของแก๊ส
- 3) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสาร
- 4) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
- 5) การเติมตัวเร่ง และตัวหน่วงปฏิกิริยา

ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อภาวะสมดุล 2 ประการ

- 1) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น (Concentration effect) [3]

การเพิ่มความเข้มข้นของสาร เป็นการเพิ่มจำนวนโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาให้มีโอกาสชนกันมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามการลดความเข้มข้นของสารละลายเป็นการลดจำนวนโมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

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



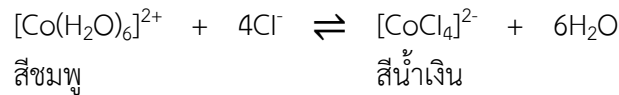
หากมีการเปลี่ยนแปลงภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสีแดงเลือดนกก็น่าจะเปลี่ยนแปลงไป โดยที่สีแดงเลือดนกเข้ม แสดงว่ามีปริมาณ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ มาก และหากสีแดงเลือดนกกาง แสดงว่าปริมาณ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ น้อย เมื่อพิจารณาความเข้มของสีแดงเลือดนก จะสามารถบอกปริมาณ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ ได้ ดังนั้นถ้าสีแดงเลือดนกเข้มขึ้น แสดงว่าระบบเกิดการปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ เพิ่มขึ้น และในทางตรงข้าม ถ้าสีแดงเลือดนกกางลงแสดงว่าระบบจะปรับตัวเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับให้ $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ ลดลง

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

กรณีที่ 1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับภาวะสมดุลของปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น และเมื่อลดอุณหภูมิจำทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ลดลง

กรณีที่ 2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับภาวะสมดุลของปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ลดลง หากลดอุณหภูมิจะทำให้สมดุลเปลี่ยนไปในทิศทางที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า ทำให้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลงและความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาตัวอย่างของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อสมดุลของ Cobalt(II) complexes ระหว่าง $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ กับ 4Cl^- ที่เป็นสารตั้งต้น จะให้สารละลายมีสีชมพู แสดงได้โดยปฏิกิริยาสมดุล ดังแสดงในปฏิกิริยา



หากมีการเพิ่มอุณหภูมิ สารละลายสีน้ำเงินจะเปลี่ยนไปเป็นสีชมพู ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการลดอุณหภูมิ สารละลายสีชมพูจะเปลี่ยนกลับไปเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งการเปลี่ยนสีของสารละลายดังกล่าว สามารถอธิบายได้ว่า ระบบเกิดการปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ด้วยการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับให้ $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ เพิ่มขึ้น จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีน้ำเงินกลายเป็นสีชมพู และในทางตรงข้ามเกิดการเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าระบบจะปรับตัวเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้ $[\text{CoCl}_4]^{2-}$ มากขึ้น



อุปกรณ์

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

สารเคมี

1. สารละลายเฟอร์ริกไนเตรต ($0.1\text{M Fe(NO}_3)_3$)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (6M NaOH)
3. สารละลายเมอร์คิวรี(I) คลอไรด์ (0.1M HgCl_2)
4. สารละลายโพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (0.1M KSCN)
5. สารละลายโคบอลต์ไนเตรต ($0.4\text{M Co(NO}_3)_2$)
6. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. HCl)
7. น้ำสะอาด



วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีผลต่อสมดุล (Concentration effect)

- นำสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.10 mol/L มา 20 หยด ผสมกับสารละลาย KSCN 0.10 mol/L 20 หยด ในปิกรเกอร์ 100 mL แล้วเติมน้ำ 50 mL เพื่อให้สีแดงเลือดนกจางลง ทั้งนี้เพื่อสะดวกในการสังเกตปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นต่อไป แบ่งสารละลายนี้ออกเป็น 6 ส่วน ส่วนละประมาณ 40 หยดใส่ในหลอดทดลอง แล้วทำการทดลองดังนี้
 - หลอดที่ 1 เติมสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ 0.10 mol/L 4-5 หยด
 - หลอดที่ 2 เติมสารละลาย KSCN 0.10 mol/L 4-5 หยด
 - หลอดที่ 3 เติมสารละลาย NaOH 6 mol/L 4-5 หยด
 - หลอดที่ 4 เติมสารละลาย HgCl_2 0.10 mol/L 4-5 หยด
 - หลอดที่ 5 เติมน้ำ 4-5 หยด
 - หลอดที่ 6 เก็บไว้สำหรับเปรียบเทียบสี
- สังเกตผลที่ได้จากการทดลองในหลอดที่ 1-5 เปรียบเทียบสีของสารละลายกับหลอดที่ 6 บันทึกสีของสารละลายหลอดที่ 1-5 เทียบกับหลอดที่ 6 ลงในตาราง ว่าสารละลายเพิ่มขึ้น (+) หรือลดลง (-) และจงอธิบายสิ่งที่สังเกตได้โดยใช้หลักการของเลอชาเตอลิเอร์

ตอนที่ 2 ศึกษาผลการรบกวนสมดุลโดยผลของอุณหภูมิ (Temperature effect)

- นำสารละลาย $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 0.40 mol/L ปริมาตร 1 mL ใส่ในหลอดทดลอง
- ค่อยๆ เติม Conc. HCl ลงไปที่ละหยด พร้อมทั้งเขย่าหลอดทดลองเพื่อให้สารละลายผสมกันได้ดี จนได้สารละลายสีน้ำเงิน (ขั้นตอนนี้ควรทำการทดลองในตู้ดูดควัน)
- จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำลงไปทีละหยด พร้อมทั้งเขย่าหลอดทดลอง จนได้สารละลายสีชมพู
- นำไปต้มในอ่างน้ำร้อน (อุณหภูมิประมาณ 100°C) สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง
- นำมาทำให้เย็นโดยจุ่มหลอดทดลองลงในน้ำเย็น สังเกตผลการเปลี่ยนแปลง
- วิเคราะห์ว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคูดหรือคายความร้อน

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่มีผลต่อสมดุล (Concentration effect) โดยมี $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ กับ KSCN เป็นสารตั้งต้น และได้เป็น $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ Ferric thiocyanate complex เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ให้สีแดงเลือดนก เมื่อทดสอบกับสารละลาย 5 ชนิด เพื่อศึกษาภาวะสมดุลที่เกิดขึ้น

เมื่อมีการเติมสารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ลงในระบบที่สมดุล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่าง Fe^{3+} จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายมีสีแดงเลือดนกที่เข้มข้น แสดงว่าในระบบจะมี $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ เกิดเพิ่มขึ้น จนสีเกิดการคงที่ ทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง และเมื่อเติมสารละลาย KSCN ลงในระบบภาวะสมดุล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่าง SCN^- จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สารละลายมีสีแดงเลือดนกที่เข้มข้น แสดงว่าในระบบจะมี $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ เกิดเพิ่มขึ้น จนสีเกิดการคงที่ ทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลอีกครั้ง เหมือนดังกรณีแรก

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

และเมื่อทำการเติมน้ำลงไปหลอดทดลองที่ 5 พบว่าสารละลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีเกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าน้ำไม่ได้เข้าไปมีผลต่อภาวะสมดุล

จากการทดลองการศึกษาผลการรบกวนสมดุลของอุณหภูมิ ที่มี $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ และ HCl เป็นสารตั้งต้น จะให้สารละลายมีสีน้ำเงิน และทำการเติมน้ำลงไปพบว่าสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพู เมื่อนำสารละลายที่อยู่ในสมดุลไปให้ความร้อน สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าภาวะสมดุลเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้าทำให้มีความเข้มข้นของ $[\text{CoCl}_4]^{2-}$ มากขึ้น ขณะที่นำสารละลายที่อยู่ในสมดุลมาแช่ในน้ำเย็นจัด สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู ส่งผลให้ภาวะสมดุลมีการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ ทำให้ความเข้มข้นของ $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ เพิ่มขึ้น ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic reaction)

อ้างอิง

- [1] กนกพร บุญนวน, “เอกสารประกอบการสอน เรื่อง สมดุลเคมี (Chemical Equilibrium),” 2019. [ออนไลน์]. Available: <https://slideplayer.in.th/slide/14793211/>.
- [2] University of Colorado Boulder, “E720: Effect of temperature - $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}/[\text{CoCl}_4]^{2-}$,” 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] สุภาวรัตน์ 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] อนุสิทธิ์ เกื้อกุล, “สมดุลเคมี,” 4 6 2017. [ออนไลน์]. Available: <https://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7134-2017-06-04-08-13-48#articleToc>.