

## บทที่ 14

### การวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ

#### วัตถุประสงค์

เมื่อศึกษาและทำปฏิบัติการบทเรียนบทนี้จบแล้ว ควรจะสามารถ

1. บอกความหมายของคำว่า สารประกอบเชิงซ้อนและอธิบายการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้
2. อธิบายกระบวนการเกิด chelation
3. บอกได้ว่าปัจจัยที่ทำให้สมดุลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเปลี่ยนไป ได้แก่อะไรบ้าง
4. บอกข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารอินทรีย์และอินทรีย์ เป็นคอมเพลกซ์ซิง-เอเจนต์ ในการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน
5. บอกได้ว่าการไทเทรตสารละลายไอออนของโลหะด้วย EDTA มีกี่วิธี และแต่ละวิธีมีหลักการอย่างไร
6. บอกได้ว่าความกระด้างของน้ำคืออะไร เกิดจากอะไร และแบ่งได้กี่ชนิด อะไรบ้าง
7. หาความกระด้างของน้ำโดยการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ได้ทั้งความกระด้างชั่วคราวและความกระด้างถาวร
8. คำนวณหาความกระด้างของน้ำจากผลการทดลองได้

## บทที่ 14

### การวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ

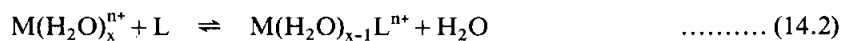
การวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคของการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เพราะไอออนที่ทำให้เกิดน้ำเกิดความกระด้าง สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคอมเพลกซิงเอเจนต์ที่ใช้เป็นไทเทรนต์ได้ดี ดังนั้น ก่อนที่จะศึกษาวิธีการวิเคราะห์ ควรมีความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีของการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนก่อน ซึ่งจะได้กล่าวไว้พอเข้าใจ

#### การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

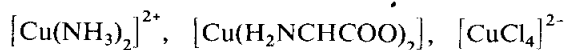
ตามปกติไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายของน้ำ จะถูกโมเลกุลของน้ำล้อมรอบโดยเกิดพันธะโคเวเลนต์ คือ โมเลกุลของน้ำจะให้คู่อิเล็กตรอนอิสระแก่ไอออนของโลหะ



เมื่อสารละลายของโลหะเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อน (complexation reaction) จะพิจารณาได้เหมือนกับเกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับคอมเพลกซิงเอเจนต์ หรือลิแกนด์ ที่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ



การเกิดปฏิกิริยานี้ สามารถเกิดเป็นขั้น ๆ (Stepwise) จนกระทั่งโมเลกุลของน้ำถูกแทนที่หมดเป็น  $ML_x^{n+}$  ค่า  $x$  คือ จำนวนพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างลิแกนด์กับไอออนของโลหะ เรียกว่า ค่าโคออดิเนชันนัมเบอร์ของโลหะ (coordination number) ถ้าไอออนของโลหะมีค่าโคออดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 4 การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนก็จะมีทั้งหมด 4 ขั้น เนื่องจาก  $L$  คือ ลิแกนด์ ที่เป็นได้ทั้งโมเลกุลที่เป็นกลางและโมเลกุลที่มีประจุ ดังนั้น สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น จึงเป็นได้ทั้งโมเลกุลที่เป็นกลาง โมเลกุลที่มีประจุบวก และโมเลกุลที่มีประจุลบ เช่น



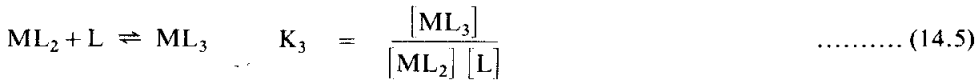
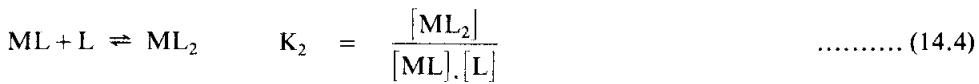
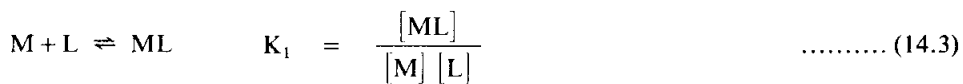
เราสามารถจัดแบ่งชนิดของลิแกนด์ได้อีกหลายประเภท ตามจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนอิสระดังนี้ คือ

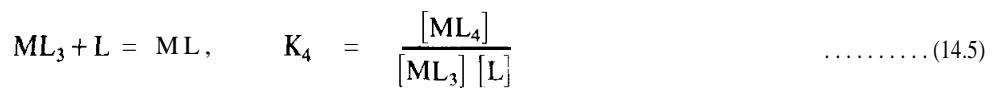
1. ลิแกนด์ที่มีอิเล็กตรอนอิสระ 1 คู่ เรียกว่า monodentate ligand ตัวอย่างเช่น  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{N}^{3-}$  ถ้าลิแกนด์ชนิดนี้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะที่มีโคออดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 4 ก็จะใช้ลิแกนด์ทั้งหมด 4 ตัว มีขั้นตอนในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน 4 ขั้นตอน

2. ลิแกนด์ที่มีอิเล็กตรอนอิสระ 2 คู่ เรียกว่า bidentate ligand ตัวอย่าง เช่น ethylene diamine ( $\text{NH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{NH}_2$ ) ถ้าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะที่มีโคออดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 4 ก็จะใช้ลิแกนด์ทั้งหมด 2 ตัว และมีขั้นตอนในการเกิดสารประกอบ 2 ขั้นตอน แต่ถ้าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะที่มีโคออดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 6 เช่น โคบอลต์ เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเอริสไนด์อะมีน จะใช้เอริสไนด์อะมีน 3 ตัว ให้สารประกอบเชิงซ้อน  $[\text{Co}(\text{en})_3]^{3+}$  ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเป็นวง 5 เหลี่ยม (five membered ring) ทั้งหมด 3 วง ซึ่งกระบวนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นวง เรียกว่า Chelation

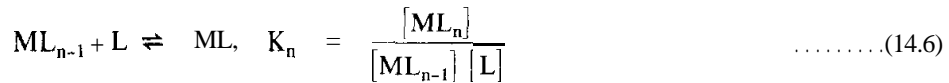
3. ลิแกนด์ที่มีอิเล็กตรอนอิสระมากกว่า 2 คู่ เรียกว่า multidentate ligand ตัวอย่าง เช่น ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) ซึ่งมีอิเล็กตรอนอิสระทั้งหมด 6 คู่ ดังนั้น จึงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะที่มีโคออดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ 6 ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยเกิด chelation ที่มีโครงสร้างเป็นรูป octahedral

**ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน** ในการพิจารณาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เพื่อความสะดวกไม่จำเป็นต้องเขียนโมเลกุลของตัวทำละลายที่เกิดพันธะกับไอออนของโลหะ และการเขียนทั่ว ๆ ไป ไม่ต้องเขียนประจุของโลหะและลิแกนด์ ให้ละไว้ในฐานที่เข้าใจ ดังนั้น เราสามารถเขียนขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ ดังนี้

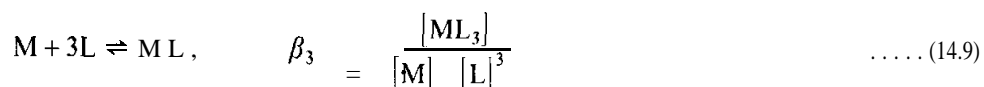
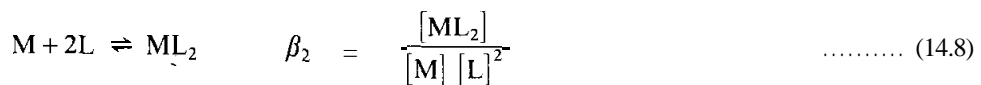
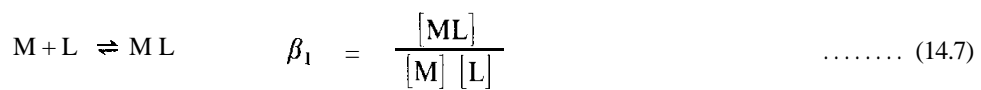




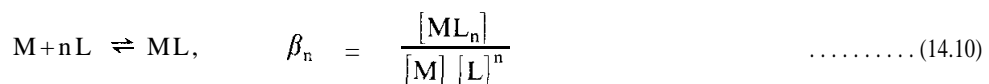
” ” ”  
 ” ” ”  
 ” ” ”



ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน สามารถแสดงถึงความอยู่ตัว หรือเสถียร (Stable) ของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น ถ้ามีค่ามาก แสดงว่าสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นมีความเสถียรมาก (high stability) ค่าคงที่ของสมดุลของปฏิกิริยา  $K_1, K_2, K_3 \dots K_n$  คือค่าคงที่ที่แสดงการเกิดปฏิกิริยาทีละขั้น (Stepwise stability constant) เราสามารถหาค่าคงที่ทั้งหมดของการเกิดปฏิกิริยา (overall formation constant,  $\beta$ ) ได้ดังนี้



” ” ”  
 ” ” ”



ค่าคงที่ของสมดุล  $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_n$  คือ ค่าคงที่ที่เรียกว่า overall stability constant ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ stepwise stability constant ดังนี้

$$\beta_1 = K_1 \quad \dots\dots\dots (14.11)$$

$$\beta_2 = K_1 K_2 \quad \dots\dots\dots (14.12)$$

$$\beta_3 = K_1 K_2 K_3 \quad \dots\dots\dots (14.13)$$

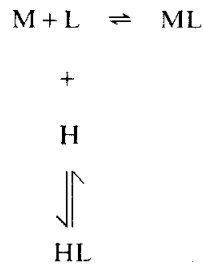
” ” ”

” ” ”

$$\beta_n = K_1 K_2 K_3 \dots K_n \quad \dots\dots\dots (14.14)$$

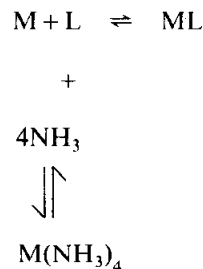
ปัจจัยที่มีผลทำให้สมดุลของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเปลี่ยนไป คือ

1. ผลของ pH ถ้าลิแกนด์ที่ใช้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน คือ แอนไอออนของสารประกอบที่มีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน พบว่า pH จะมีผลต่อความเข้มข้นของลิแกนด์ ซึ่งจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเปลี่ยนไป

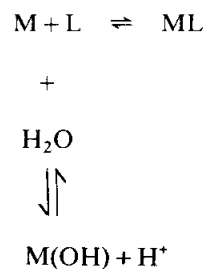


ถ้าในสารละลายมี pH ต่ำ จะทำให้มี L น้อย มีผลทำให้ความเสถียรของ ML ลดลง แต่ถ้า pH สูง จะทำให้มี L ในสารละลายมาก ML จะมีความเสถียรมากขึ้น

2. ผลของคอมเพลกซิงเอเจนต์ตัวอื่น ถ้าในสารละลายที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง M+L มีลิแกนด์ตัวอื่นปนด้วย เช่น  $NH_3$  ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ M ได้ด้วย พบว่าจะทำให้ความเสถียรของ ML ลดลง



3. ผลของการเกิดไฮดรอกไซด์ มีไอออนของโลหะหลายตัวสามารถเกิดไฮดรอกไซด์ในสารละลายของน้ำได้ดีพอ ๆ กับเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การไฮดรอกไซด์จะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อสารละลายมี pH สูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนลดลง



การวิเคราะห์หาปริมาณโดยการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) การไทเทรตโดยใช้คอมเพลกซิงเอเจนต์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Titration with Inorganic Complexing Reagents)

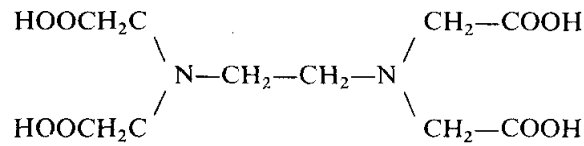
มีลิแกนด์ที่เป็นสารอนินทรีย์อยู่หลายตัว ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ตารางที่ 14.1 แสดงถึงการวิเคราะห์หาปริมาณโดยใช้ลิแกนด์ที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ ที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ดี ตามปกติลิแกนด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ใช้ทั้งหมด จะเป็นลิแกนด์ชนิดโมโนเดนเตลลิแกนด์ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาในการไทเทรตเป็นขั้นตามจำนวนโคออดิเนชันัมเบอร์ของไอออนของโลหะ ทำให้หาจุดสมมูลได้ยาก การวิเคราะห์จึงไม่นิยมใช้การไทเทรตด้วยวิธีนี้ จะใช้เท่าที่แสดงในตารางที่ 14.1

ตารางที่ 14.1 สารอนินทรีย์ที่ใช้เป็นไทเทรนต์ในการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

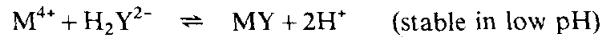
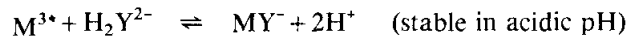
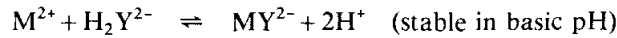
ไทเทรนต์	ใช้สำหรับวิเคราะห์	หมายเหตุ
Hg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Br <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , SCN <sup>-</sup> , CN <sup>-</sup> , fhiourea	ผลที่ได้คือ neutral mercury (II) complex
AgNO <sub>3</sub>	CN <sup>-</sup> (Liebig-Method)	ผลที่ได้คือ Ag(CN) <sub>2</sub> อินดิเคเตอร์คือ I <sup>-</sup> ไทเทรตจนกระทั่งเกิดตะกอน AgI
NiSO <sub>4</sub>	CN <sup>-</sup>	ผลที่ได้คือ Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> อินดิเคเตอร์คือ AgI ไทเทรตจนกระทั่งตะกอนของ AgI หายไป
KCN	Cu <sup>2+</sup> , Hg <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup>	ผลที่ได้คือ Cu(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Hg(CN) <sub>2</sub> , Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

2) การไทเทรตโดยใช้คอมเพลกซิงเอเจนต์ที่เป็นสารอินทรีย์ (Titration with organic complexing reagent)

สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดี คือ พวกอะมิโนโพลีคาร์บอกซิลิกแอซิด (aminopoly carboxylic acid) ทั้งนี้ เพราะสารประกอบเหล่านี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรได้กับโลหะหลายชนิด ในอัตราส่วน 1 : 1 สารประกอบอินทรีย์ชนิดนี้ที่ใช้กันมาก คือ Ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) ซึ่งมีโครงสร้าง ดังนี้



EDTA จะเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ไม่เหมาะในการที่จะนำมาใช้ในการไทเทรต จึงต้องใช้เกลือไดโซเดียม (disodium salt) ของ EDTA ( $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

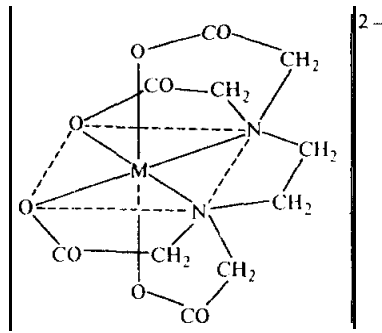


ความอยู่ตัวหรือเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย ซึ่งแบ่งได้กว้าง ๆ คือ ถ้าเป็นโลหะที่มีประจุ 2+ ส่วนใหญ่จะเสถียรใน pH ที่เป็นเบส ถ้าเป็นโลหะที่มีประจุ 3+ ส่วนใหญ่จะเสถียรใน pH ที่เป็นกรดเล็กน้อย แต่ถ้ามีประจุ 4+ ส่วนใหญ่จะเสถียรใน pH ที่เป็นกรดมาก ตารางที่ 14.2 ได้สรุปชนิดของไอออนบางตัวที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA และเสถียรในสารละลายที่มี pH ต่าง ๆ

ตารางที่ 14.2 ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อน M-EDTA ในสารละลายที่มี pH ต่าง ๆ

pH ต่ำสุดที่สารประกอบเชิงซ้อนจะเสถียรอยู่ได้	ชนิดของไอออนที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA และเสถียรอยู่ในสารละลาย
1 – 3	$\text{Zr}^{4+}$ , $\text{Hf}^{4+}$ , $\text{Th}^{4+}$ , $\text{Bi}^{3+}$ , $\text{Fe}^{3+}$
4 – 6	$\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Al}^{3+}$ , $\text{Cd}^{2+}$ , $\text{Sn}^{2+}$ , $\text{Zn}^{2+}$
8 – 10	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Sr}^{2+}$ , $\text{Ba}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$

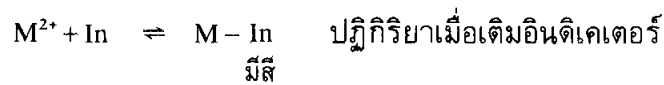
ลักษณะโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น จะมีรูปร่างเป็น octahedral และเป็นวง ดังแสดงในรูปที่ 14.1



รูปที่ 14.1 โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน M-EDTA

การวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะ โดยการไทเทรตกับสารละลาย EDTA สามารถทำได้ 4 วิธี คือ

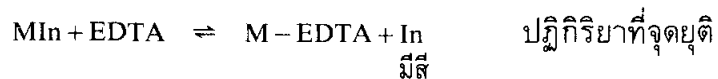
1) การไทเทรตโดยตรง (Direct titration) เมื่อนำสารละลายไอออนของโลหะไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA โดยตรง ต้องสามารถหาจุดยุติของการไทเทรตได้ คือ มีอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยา ก่อนทำการไทเทรตเมื่อเติมอินดิเคเตอร์ลงในสารละลายตัวอย่างของโลหะจะเกิดสีขึ้น เนื่องจากสีของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะกับอินดิเคเตอร์ ดังนี้



สารประกอบ M-In จะอยู่ในสารละลายจำนวนหนึ่ง ปนอยู่กับ  $M^{2+}$  เมื่อทำการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA  $M^{2+}$  จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน M-EDTA



เมื่อ EDTA ทำปฏิกิริยากับ  $M^{2+}$  หมดแล้ว EDTA จะเกิดปฏิกิริยากับ M-In ต่อไปอีก ทำให้สารละลายเกิดสารประกอบอิสระของอินดิเคเตอร์ที่มีสีอีกสีหนึ่ง เมื่อการไทเทรตกระทำจนกระทั่งเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนมาเป็นสีของ In ก็แสดงว่าปฏิกิริยาถึงจุดยุติแล้ว



แสดงว่า M-EDTA ต้องเป็นคอมเพลกซ์ที่เสถียรกว่า M-In จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาการแลกที่กันได้ และควรอยู่ตัวมากกว่ากันอย่างน้อย 10 เท่า สีของ MIn จะต้องแตกต่างจาก

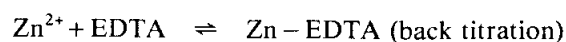
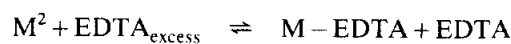


สีของ In และสามารถมองเห็นความแตกต่างของสีได้อย่างชัดเจน

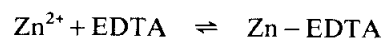
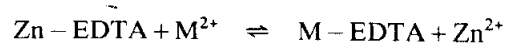
#### กิจกรรมที่ 14.1

ให้นักศึกษาค้นหารายชื่อของอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนมา 5 ชื่อ พร้อมทั้งบอกวิธีการใช้อินดิเคเตอร์นั้น ๆ ว่าเหมาะสำหรับการไทเทรตสารละลายชนิดใด และควรมี pH ในการไทเทรตเท่าใด

2) การไทเทรตย้อนกลับ (Back Titration) วิธีนี้หาปริมาณไอออนของโลหะได้โดยการเติมสารละลายมาตรฐาน EDTA ให้มากเกินไป เพื่อทำให้เกิดคอมเพล็กซ์ M-EDTA ที่เสถียรแล้วไทเทรต EDTA ที่มากเกินไป ด้วยสารละลายมาตรฐานของ  $Mg^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  วิธีการนี้ จะใช้ได้ดีเมื่อการไทเทรตไอออนของโลหะกับ EDTA เลือกหาอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมไม่ได้ และไอออนของโลหะสามารถเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ที่ pH ที่ทำการไทเทรต การไทเทรต EDTA ที่มากเกินไปด้วย  $Zn^{2+}$  หรือ  $Mg^{2+}$  จะทำได้เมื่อ Zn-EDTA อยู่ตัวน้อยกว่า M-EDTA มิฉะนั้น จะทำให้  $Zn^{2+}$  ดึงเอา EDTA จาก M-EDTA มาได้ ทำให้การทดลองผิดพลาด

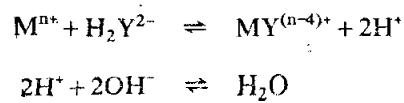


3) การไทเทรตแบบแทนที่ (Displacement titration) การไทเทรตโดยวิธีนี้ จะใช้ได้ดีกรณีที่การไทเทรตโดยตรงหาอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมไม่ได้เช่นกัน การทดลองทำได้โดยเติม Zn-EDTA หรือ Mg-EDTA ลงในสารละลายไอออนของโลหะที่ต้องการวิเคราะห์  $Zn^{2+}$  กับไอออนของโลหะจะเกิดการแลกเปลี่ยนที่กันขึ้น หลังจากนั้นให้ไทเทรตหาปริมาณของ  $Zn^{2+}$  ที่ถูกแทนที่ด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA อีกครั้ง



4) การไทเทรตด้วยเบส (Alkalimetric titration) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนของโลหะกับสารละลายมาตรฐาน EDTA จะทำให้เกิดไฮดรเจนไอออนได้ ปริมาณของ  $H^+$

ที่เกิดขึ้น จะสมมูลกับปริมาณของไอออนของโลหะ เมื่อนำ  $H^+$  ที่เกิดขึ้น มาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานเบสโดยใช้อินดิเคเตอร์กรด-เบส ก็สามารถคำนวณหาปริมาณของไอออนของโลหะได้



### การวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ

น้ำกระด้าง หมายถึง น้ำที่ประกอบด้วยไอออนของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งละลายอยู่ในรูปของเกลือไฮโดรเจนคาร์บอเนต, คลอไรด์ และซัลเฟต น้ำกระด้างที่เนื่องมาจากไฮโดรเจนคาร์บอเนต เช่น  $Ca(HCO_3)_2$  และ  $Mg(HCO_3)_2$  เมื่อนำมาต้ม จะเกิดตะกอนที่อยู่ในรูปของ  $CaCO_3$  และ  $MgCO_3$  น้ำกระด้างนี้เรียกว่า น้ำกระด้างชั่วคราว (temporary hardness) ส่วนน้ำกระด้างที่เกิดเนื่องจากเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟต เมื่อนำมาต้มก็จะไม่สามารถตกตะกอนแยกแคลเซียมและแมกนีเซียมออกมาได้ น้ำกระด้างที่เนื่องมาจากเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟตนี้เรียกว่า น้ำกระด้างถาวร (permanent hardness) เนื่องจากแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ได้ดี ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคของการไทเทรตแบบการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน สำหรับวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำได้ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

การหาความกระด้างของน้ำจะเป็นการหาปริมาณรวมของแคลเซียมและแมกนีเซียมและไอออนต่าง ๆ ทั้งหมดที่เป็นสาเหตุของการทำให้น้ำกระด้าง ซึ่งในการคำนวณผลที่ได้จะคำนวณผลออกมาเป็นปริมาณของ  $CaCO_3$  ซึ่งจำนวนโมลของแคลเซียมที่คำนวณได้ จะมีค่าเท่ากับจำนวนโมลของไอออนของโลหะต่าง ๆ ทั้งหมด การรายงานผลที่ได้จะรายงานเป็นจำนวนมิลลิกรัมของ  $CaCO_3$  ในน้ำ 1 ลบ.ดม. หรือ ppm. (part per million) ในการทดลองถ้าต้องการหาความกระด้างของน้ำที่เนื่องมาจากความกระด้างถาวร ทำได้โดยเอาน้ำตัวอย่างไปต้ม แล้วกรองน้ำเพื่อแยกตะกอน  $MgCO_3$  และ  $CaCO_3$  ออก แล้วนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA ถ้าน้ำความกระด้างถาวรที่ทดลองได้ หักออกจากความกระด้างทั้งหมดที่หาได้ ก็จะได้ความกระด้างชั่วคราว เราแบ่งชนิดของน้ำตามปริมาณความกระด้างของน้ำ ดังนี้

ชนิดของน้ำ	ความกระด้างของน้ำ (T.H.)
น้ำอ่อน (Soft Water)	0 – 60 ppm.
น้ำกระด้างปานกลาง	61 – 120 ppm.
น้ำกระด้าง	121 – 180 ppm.
น้ำกระด้างมาก	> 180 ppm.
T.H. หมายถึง ความกระด้างของน้ำทั้งหมด (Total hardness)	

## ปฏิบัติการทดลอง

การทดลองหาความกระด้างของน้ำ สามารถทำได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้

### 1. เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง

#### 1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ก. เกลือไดโซเดียมของ EDTA
- ข.  $\text{CaCO}_3$
- ค.  $\text{NH}_4\text{Cl}$
- ง.  $\text{NH}_3$  เข้มข้น
- จ. อินดิเคเตอร์ Eriochrom black – T
- ฉ. สารตัวอย่างน้ำบาดาล

#### 1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ก. บีเปต
- ข. บิวเรตพร้อมที่ตั้ง
- ค. ขวดวัดปริมาตร
- ง. ขวดรูปกรวย

### 2. วิธีทำการทดลอง

#### 2.1) เตรียมสารละลายปฐมภูมิของ $\text{Ca}^{2+}$ เข้มข้น 0.01 F

ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่บริสุทธิ์และอบให้แห้งแล้วอย่างละเอียด ให้น้ำหนักประมาณ 0.25 กรัม นำแคลเซียมคาร์บอเนตที่ชั่งได้มาละลายใน 1.0 F HCl จำนวนหนึ่ง จนละลาย

หมด พยายามใช้ 1.0 F HCl ให้น้อยที่สุดเท่าที่สามารถละลายแคลเซียมคาร์บอเนตได้ (อุ่นให้ร้อนถ้าจำเป็น) เจือจางสารละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยน้ำกลั่นในขวด วัดปริมาตรขนาด 250 ลบ.ซม. จนพอดีขีด เขย่าสารละลายให้ทั่ว

2.2) *เตรียมสารละลายมาตรฐาน EDTA เข้มข้น 0.01 F*

ชั่งเกลือไดโซเดียมของ EDTA ( $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) หนักประมาณ 1.8 กรัม ละลายในน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 500 ลบ.ซม. โดยใช้ขวดวัดปริมาตร

2.3) *เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10*

เตรียมโดยผสม 6.8 กรัม ของแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) กับ 57 ลบ.ซม. แอมโมเนีย เข้มข้น แล้วเจือจางสารละลายจนมีปริมาตรเป็น 100 ลบ.ซม.

2.4) *เตรียมอินดิเคเตอร์ Eriochrom black – T*

ใช้ Eriochrom black – T 0.1 กรัม และ hydroxylamine hydrochloride 1.0 กรัม ผสมกับเมธิลแอลกอฮอล์ 10 ลบ.ซม. (อินดิเคเตอร์นี้ทางห้องปฏิบัติการจะเตรียมไว้ให้ใช้ร่วมกัน)

2.5) *หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย 0.01 F EDTA*

ปิเปตสารละลายแคลเซียมที่เตรียมจากข้อ 2.1) มา 25 ลบ.ซม. ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลบ.ซม. เติม 10 ลบ.ซม. ของสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 หยดอินดิเคเตอร์ Eriochrom black – T 2–3 หยด นำไปไทเทรตกับสารละลาย EDTA สารละลายจะเปลี่ยนจากสีอู่นแดงได้เป็นสีน้ำเงิน ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลแล้วคำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลาย EDTA

2.6) *วิธีการทดลองหาความกระด้างของน้ำทั้งหมด (total hardness)*

ปิเปตตัวอย่างน้ำมา 50 ลบ.ซม. ใส่ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลบ.ซม. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 10 ลบ.ซม. 3–4 หยด ของ Eriochrom black – T ไทเทรตสารละลายด้วย 0.01 F EDTA จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีอู่นแดงเป็นสีน้ำเงิน ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง บันทึกผลและคำนวณความกระด้างของน้ำทั้งหมดเป็น ppm ของ  $\text{CaCO}_3$  (มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$  ในน้ำ 1 ลบ.ดม.)

หมายเหตุ: –

ถ้าตัวอย่างน้ำมีไอออนของโลหะอื่นปนอยู่ด้วย เช่น ทองแดง, เหล็ก, อะลูมิเนียม

และแมงกานีส ไอออนเหล่านี้จะรบกวนการหาความกระด้างของน้ำ เพราะจะทำให้การสังเกต สีที่จุดยุติไม่ชัดเจน แก้ไขการรบกวนแบบนี้ ทำได้โดยการเติมสารละลาย KCN และกรด แอสคอร์บิก (ascorbic acid) ลงไปด้วยก่อนทำการไทเทรต ยกเว้นการรบกวนที่เกิดจากอะลูมิเนียมเท่านั้น ที่แก้ไขโดยการเติมสารละลายไตรเอทานอลามีน (triethanolamine)

#### 2.7) วิธีการทดสอบหาความกระด้างถาวรของน้ำ (Permanent hardness)

นำตัวอย่างน้ำมา 250 ลบ.ซม.<sup>(1)</sup> ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 500 ลบ.ซม. ต้มให้เดือดเบา ๆ เป็นเวลา 20–30 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น กรองน้ำใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 ลบ.ซม. ไม่ต้องล้างกระดาษกรอง ให้เจือจางน้ำในขวดวัดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรถึงขีด เขย่าให้ทั่ว ปิเปิดน้ำตัวอย่างในขวดวัดปริมาตรมา 50.0 ลบ.ซม. เติมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 10 ลบ.ซม. เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ Eriochrom black-T 3–4 หยด ไทเทรตสารละลาย ด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA จนสารละลายเปลี่ยนจากสีอู้งุ่นแดงไปเป็นสีน้ำเงิน ทำการ ทดลอง 3 ครั้ง บันทึกผลและคำนวณความกระด้างถาวรของน้ำ

เมื่อนำความกระด้างทั้งหมดที่หาได้จากข้อ 2.6) ลบด้วยความกระด้างถาวรที่หาได้ จากข้อ 2.7) จะได้ความกระด้างชั่วคราวของน้ำ

เมื่อทำการทดลองได้ข้อมูลแล้ว ให้บันทึกข้อมูลลงในตารางข้อมูลที่ได้เตรียมไว้แล้ว ล่วงหน้าในการวางแผนงาน ดังแสดงในตัวอย่างที่ 14.1

#### กิจกรรมที่ 14.2

นอกเหนือจากตัวอย่างน้ำที่อาจารย์กำหนดให้ ให้นักศึกษานำตัวอย่างน้ำ มาจากบ้าน เพื่อศึกษาหาความกระด้างของน้ำนั้น ๆ ด้วย

(1) ตัวอย่างน้ำ 250 ลบ.ซม. ต้องนำมาอย่างถูกต้อง สามารถทำได้โดยนำตัวอย่างน้ำใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 ลบ.ซม. ให้พอดีขีด แล้วเทใส่ในบีกเกอร์ จากนั้นใช้น้ำกลั่นล้างขวดวัดปริมาตรแล้วเทน้ำล้างลงในบีกเกอร์ที่ใส่ตัวอย่างน้ำนั้นด้วย ให้แน่ใจว่าไม่มีตัวอย่างน้ำติดอยู่ในขวดวัดปริมาตรแล้วจึงนำไปต้ม

ตัวอย่างที่ 14.1 การบันทึกข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ลงในตารางข้อมูลที่ได้เตรียมไว้แล้ว  
ล่วงหน้า

1. เตรียมสารปฐุมภูมิ  $\text{Ca}^{2+}$

สิ่งที่ต้องชั่ง	น้ำหนักเป็นกรัม
น.น.ขวดชั่ง + น.น. $\text{CaCO}_3$	32.3856
น.น.ขวดชั่ง	32.1349
น.น. $\text{CaCO}_3$	0.2507

2. หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย EDTA

สารละลายปฐุมภูมิ	ไทแตรนต์ EDTA (ลบ.ชม.)				อินดิเคเตอรื	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอรื
	1	2	3	เฉลี่ย		
25.0 ลบ.ชม.	25.30	25.35	25.30	25.33	Eriochrom black -T	แดงอู่่น → สีน้ำเงิน

3. หาคความกระด้างของน้ำทั้งหมด (Total hardness)

ตัวอย่างน้ำ	ไทแตรนต์ EDTA (ลบ.ชม.)				อินดิเคเตอรื	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอรื
	1	2	3	เฉลี่ย		
50.0 ลบ.ชม.	10.30	10.30	10.25	10.28	Eriochrom black -T	แดงอู่่น → สีน้ำเงิน

#### 4. หาคความกระด้างถาวรของน้ำ

ตัวอย่างน้ำ	ไทเทรนต์ EDTA (ลบ.ชม.)				อินดิเคเตอร์	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอร์
	1	2	3	เฉลี่ย		
50.0 ลบ.ชม.	4.75	4.70	4.65	4.70	Eriochrom balck - T	แดงอู่น → สีน้ำเงิน

#### 3. การคำนวณผล

จากผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในตัวอย่างที่ 14.1 สามารถนำมาคำนวณผล เพื่อหาความกระด้างของน้ำได้ดังนี้

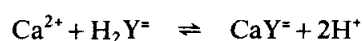
##### 3.1 หาคความเข้มข้นของสารละลายปรุุมภูมิ $Ca^{2+}$

จากการทดลองซึ่ง  $CaCO_3$  มาหนัก 0.2507 กรัม ละลายเป็นสารละลาย 250 ลบ.ชม.

$$\begin{aligned} \therefore M_{CaCO} &= \frac{0.2507}{100.09} \times \frac{1000}{250} \\ &= 0.01002 \end{aligned}$$

##### 3.2 หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐาน EDTA

จากการทดลองสารปรุุมภูมิ 25.0 ลบ.ชม. จะทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลาย EDTA 25.33 ลบ.ชม.



แสดงว่า  $Ca^{2+}$  1 โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ EDTA 1 โมล

$$\therefore \text{จำนวนโมล } Ca^{2+} = \text{จำนวนโมล EDTA}$$

$$\frac{M_{CaCO_3} \times V_{CaCO_3}}{1000} = \frac{M_{EDTA} \times V_{EDTA}}{1000}$$

$$\therefore M_{EDTA} = \frac{0.01002 \times 25.0}{25.33}$$

$$= 0.009889$$

$$= 9.889 \times 10^{-3}$$

### 3.3 หาความกระด้างของน้ำทั้งหมด

จากการทดลองน้ำตัวอย่าง 50.0 ลบ.ซม. จะทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายมาตรฐาน EDTA จำนวน 10.28 ลบ.ซม.

$$\begin{aligned}\therefore \text{ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง} &= \frac{M_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}}{V_s} \\ &= \frac{9.889 \times 10^{-3} \times 10.28}{50.0} \\ &= 2.033 \times 10^{-3} \text{ M}\end{aligned}$$

การรายงานความกระด้างของน้ำ ให้รายงานเป็นจำนวน ppm ของแคลเซียมคาร์บอเนต

$$\begin{aligned}\therefore \text{ในสารตัวอย่างน้ำจะมี CaCO}_3 &= 2.033 \times 10^{-3} \times 100.09 \text{ กรัม/ลบ.ดม.} \\ &= 203.48 \text{ มิลลิกรัม/ลบ.ดม.}\end{aligned}$$

$$\text{นั่นคือ ความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่าง} = 203.48 \text{ ppm.}$$

### 3.4 หาความกระด้างถาวรของน้ำ

จากการทดลองน้ำตัวอย่าง 50.0 ลบ.ซม. จะทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายมาตรฐาน EDTA จำนวน 4.70 ลบ.ซม.

$$\begin{aligned}\therefore \text{ความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง} &= \frac{M_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}}{V_s} \\ &= \frac{9.889 \times 10^{-3} \times 4.70}{50.0} \\ &= 9.296 \times 10^{-4} \text{ M}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \text{ในสารตัวอย่างจะมี CaCO}_3 &= 9.296 \times 10^{-4} \times 100.09 \text{ กรัม/ลบ.ดม.} \\ &= 93.04 \times 10^{-4} \text{ กรัม/ลบ.ดม.} \\ &= 93.04 \text{ มิลลิกรัม/ลบ.ดม.}\end{aligned}$$

$$\text{นั่นคือ ความกระด้างถาวรของน้ำตัวอย่าง} = 93.04 \text{ ppm}$$

### 3.5 หาความกระด้างชั่วคราว

$$\begin{aligned}\text{ความกระด้างชั่วคราว} &= \text{ความกระด้างทั้งหมด} - \text{ความกระด้างถาวร} \\ &= 203.48 - 93.04\end{aligned}$$



$$= 110.44 \text{ ppm}$$

### สรุปผลการทดลอง

$$\text{ความกระด้างทั้งหมดของน้ำตัวอย่าง} \cong 203.48 \text{ ppm}$$

$$\text{ความกระด้างถาวร} = 93.04 \text{ ppm}$$

$$\text{ความกระด้างชั่วคราว} = 110.44 \text{ ppm}$$

## บทสรุป

การไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ผลดี และหาจุดยุติของการไทเทรตได้ง่าย คือ การไทเทรตที่สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับลิแกนด์ ในอัตราส่วน 1 : 1 คือ มีขั้นตอนในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนเพียงขั้นเดียว ตัวคอมเพล็กซิงเอเจนต์ หรือลิแกนด์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับไอออนของโลหะได้ในอัตราส่วน 1 : 1 จะต้องเป็นลิแกนด์ชนิด multidentate ligand สารประกอบที่สามารถทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ชนิดนี้ได้ คือ สารประกอบอินทรีย์ ลิแกนด์ที่นิยมใช้ในการไทเทรตแบบนี้มากที่สุด คือ EDTA ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง EDTA กับไอออนของโลหะอย่างกว้างขวางพบว่าไอออนของโลหะเกือบทุกตัวสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA ได้ โดยมีความคงตัวที่ pH ต่าง ๆ กัน ทำให้การควบคุม pH ของสารละลายสามารถเกิดการเลือกชนิดไอออนของโลหะในการไทเทรตได้ เช่น ถ้ามีไอออนของ  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Sr}^{2+}$  ผสมกันอยู่ ถ้าต้องการไทเทรต  $\text{Ni}^{2+}$  เพียงตัวเดียว ควรเลือก pH ในการไทเทรตเท่ากับ 5 เพราะถ้าใช้ pH สูง เช่นที่ pH 10 พบว่าไอออนตัวอื่น ๆ จะถูกไทเทรตได้ด้วย นอกจากใช้ pH เป็นตัวควบคุมการเลือกไทเทรตแล้ว ยังสามารถใช้มาสกกิงเอเจนต์ (Masking agent) ในการทำให้เกิดการเลือกไทเทรตเฉพาะไอออนของโลหะที่สนใจได้ เช่น ถ้าต้องการไทเทรต  $\text{Mn}^{2+}$  แต่มีไอออน  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  และ  $\text{Zn}^{2+}$  ปนอยู่ พบว่า การไทเทรตจะเป็นไปได้เมื่อเติมมาสกกิงเอเจนต์  $\text{CN}^-$  ลงไปในสารละลายด้วย  $\text{CN}^-$  จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรมากกับไอออนที่ปนอยู่ ทำให้  $\text{Mn}^{2+}$  สามารถถูกไทเทรตกับ EDTA เพียงตัวเดียว จะเห็นได้ว่า การไทเทรตไอออนของโลหะกับ EDTA สามารถใช้เป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะต่าง ๆ ได้ดี และสามารถประยุกต์ใช้ในการหาความกระด้างของน้ำ นอกจากนี้การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะกับ EDTA หรือลิแกนด์ชนิดอื่น ๆ ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วิธีอื่น ๆ ได้อีก เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลายและการทำโครมาโตกราฟี

## คำถามท้ายบท

1. ทำไมลิแกนด์ของสารประกอบอินทรีย์ จึงใช้ในการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ดีกว่าลิแกนด์ของสารประกอบอนินทรีย์
2. Overall stability constant คืออะไร มีความสัมพันธ์กับ Stepwise stability constant อย่างไร
3. มีปัจจัยอะไรบ้าง ที่มีผลต่อสมดุลของปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน
4. จงอธิบายวิธีการไทเทรตต่อไปนี้ direct titration, back titration และ displacement titration
5. ทำไมสารละลายของ EDTA ไม่สมควรเก็บไว้ในขวดแก้ว
6. ทำไมการวิเคราะห์หาปริมาณของนิกเกิล จึงไม่สามารถทำได้โดยวิธีการไทเทรตโดยตรง
7. น้ำกระด้างถาวรคืออะไร
8. น้ำกระด้างชั่วคราวคืออะไร
9. การวิเคราะห์หาความกระด้างชั่วคราวของน้ำ ทำได้อย่างไร ?
10. จงคำนวณหาน้ำหนักของ  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้เตรียมเป็นสารละลายเข้มข้น 0.100 M จำนวน 500 ลบ.ซม.
11. สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคลอไรด์ เตรียมโดยการละลาย 0.200 กรัม ของแคลเซียมคาร์บอเนตในกรดเกลือเจือจางจำนวนที่น้อยที่สุดที่สามารถละลายได้ และเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 250 ลบ.ซม. โดยใช้ขวดวัดปริมาตร ปรากฏว่าสารละลายนี้ 25.00 ลบ.ซม. ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลาย EDTA 22.62 ลบ.ซม. จงคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย EDTA ในเทอม  $\text{mgCaCO}_3/\text{cm}^3\text{EDTA}$
12. จงคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของสังกะสีในสารตัวอย่างหนัก 0.200 กรัม ที่สามารถทำปฏิกิริยาพอดีกับ 24.18 ลบ.ซม. ของ 0.0100 M EDTA (สมมติว่าไม่มีโลหะอย่างอื่นปนอยู่ในสารตัวอย่าง มีเฉพาะสังกะสีเท่านั้น)

# ตารางสำหรับบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

## ผลการทดลองบทที่ 14

### เรื่อง การหาความกระด้างของน้ำ

ผู้ทดลอง 1. .... รหัส .....

2. .... รหัส .....

3. .... รหัส .....

ตอนที่ ..... กลุ่มที่ .....

ทำการทดลองวันที่ .....

1) เตรียมสารปฐุมภูมิ  $Ca^{2+}$

สิ่งที่ต้องชั่ง	น้ำหนักเป็นกรัม
น.น.ขวดชั่ง + น.น. $CaCO_3$ น.น.ขวดชั่ง น.น. $CaCO_3$	

2) หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย EDTA

สารละลายปฐุมภูมิ	ไทเทรนต์ EDTA (ลบ.ชม.)				อินดิเคเตอร์	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอร์
	1	2	3	เฉลี่ย		
25.0 ลบ.ชม.						

# ตารางสำหรับบันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

## ผลการทดลองบทที่ 14

### เรื่อง การหาความกระด้างของน้ำ

ผู้ทดลอง 1. .... รหัส .....

2. .... รหัส .....

3. .... รหัส .....

ตอนที่ ..... กลุ่มที่ .....

ทำการทดลองวันที่ .....

#### 1) เตรียมสารปฐุมภูมิ $\text{Ca}^{2+}$

สิ่งที่ต้องชั่ง	น้ำหนักเป็นกรัม
น.น.ขวดชั่ง + น.น. $\text{CaCO}_3$ น.น.ขวดชั่ง น.น. $\text{CaCO}_3$	

#### 2) หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย EDTA

สารละลายปฐุมภูมิ	ไทแทรนต์ EDTA (ลบ.ชม.)				อินดิเคเตอร์	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอร์
	1	2	3	เฉลี่ย		
25.0 ลบ.ชม.						

3) หาคความกระด้างของน้ำทั้งหมด (Total hardness)

ตัวอย่างน้ำ	ไทเทรนต์ EDTA (ลบ.ซม.)				อินดิเคเตอร์	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอร์
	1	2	3	เฉลี่ย		
50.0 ลบ.ซม.						

4) หาคความกระด้างถาวรของน้ำ

ตัวอย่างน้ำ	ไทเทรนต์ EDTA (ลบ.ซม.)				อินดิเคเตอร์	การเปลี่ยนแปลงสี ของอินดิเคเตอร์
	1	2	3	เฉลี่ย		
50.0 ลบ.ซม.						