

การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

DETERMINATION OF HARDNESS IN WATER  
BY SPECTROPHOTOMETRY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องแก้ววิเคราะห์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

DETERMINATION OF HARDNESS IN WATER

BY SPECTROPHOTOMETRY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DETERMINATION OF HARDNESS IN WATER  
BY SPECTROPHOTOMETRY**

**MANCHAREE TANTIPALAKUL  
WISIT SOPHONADISAI  
SRISUDA SRINUWAT**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY- ANALYTICAL INSTRUMENTATION  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2012  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี Determination of Hardness in Water by Spectrophotometry		
นักศึกษา	นางสาวมัณฑริ	ตันติपालกุล	52050995
	นายวิศิษฐ์	โสภณอดิษฐ์	52051007
	นางสาวศรีสุดา	ศรีนุวัฒน์	52051009
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ณัฐวุฒิ เจริญชัย	
ดร.เสาวภาคย์ ธีราทรง	
ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การวิเคราะห์ความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี Determination of Hardness in Water by Spectrophotometry
นักศึกษา	นางสาว มัญชรี ตันติपालกุล นาย วิศิษฐ์ โสภณอดิษฐ์ นางสาวศรีสุดา ศรีนุวัฒน์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม-เครื่องมือวิเคราะห์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาวิธีวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี อาศัยปฏิกิริยาแทนที่ โดย  $Mg^{2+}$  ในสารเชิงซ้อน MgEDTA จะถูกแทนที่ด้วย  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  ที่หลุดออกมาจะจับกับอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที เกิดเป็นสารเชิงซ้อน MgEBT ซึ่งมีสีม่วงแดง ในสภาวะควบคุมโดยสารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 จากการทดลองได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำโดยผสมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต เข้มข้น 0.0005 , 0.005 , 0.010 , 0.015 M ปริมาตรในช่วง 0.5 ถึง 15 มิลลิลิตร ละลายสารละลายเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.05 % w/v ปริมาตร 5 มิลลิลิตร สารละลายสารเชิงซ้อน MgEDTA ในบัฟเฟอร์ pH 10 เข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรสารละลายเป็น 100 มิลลิลิตร ได้กราฟมาตรฐานเชิงเส้นตรง โดย  $Ca^{2+}$  มีความเข้มข้นในช่วง  $0.5 \times 10^{-3}$  ถึง  $15 \times 10^{-3}$  mol/L มีสมการเชิงเส้นคือ  $y = -114.4 x + 2.665$  ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.985 วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำให้ค่าร้อยละการคืนกลับในช่วง 90-113% ค่าความเที่ยงแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 4.27-13.23% ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเทียบกับวิธีมาตรฐานการไทเทรตพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความมั่นใจ 95% ( t-test , n = 5,  $t_{cal} = 2.13$ ,  $t_{Stat} = 1.48$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตามโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คำสำคัญ :** ความกระด้าง, สเปกโตรโฟโตเมตรี, ตัวอย่างน้ำ

**Title** Determination of Hardness in Water by Spectrophotometry  
**Student** Miss Mancharee Tantipalakul  
Mr. Wisit Sophonadisai  
Miss Srisuda Srinuwat  
**Degree** Bachelor of Science  
**Major Program** Industrial Chemistry – Analytical Instrumentation  
**Academic Year** 2012  
**Advisor** Dr. Wiboon Praditweangkum

### Abstract

This special project studies the determination of hardness in water by spectrophotometry. The  $Mg^{2+}$  in MgEDTA complex is replaced by  $Ca^{2+}$  and the released  $Mg^{2+}$  is bound to indicator eriochrome black T to form MgEBT complex. This reaction is controlled in buffer pH 10 solution. The determination of hardness in water by spectrophotometry was optimized by mixing standard calcium carbonate solution 0.0005, 0.005, 0.010, 0.015 M in 0.5 to 15 mL range, 5 mL of eriochrome black T solution 0.05 % w/v, 10 mL of 0.01 M MgEDTA solution in buffer pH 10 and the volume was adjusted to 100 mL in a volumetric flask. The calibration graph of  $Ca^{2+}$  concentration was linear in  $0.5 \times 10^{-3}$  to  $15 \times 10^{-3}$  mol/L range with a linear equation,  $y = -144.4x + 2.665$  and coefficient of determination ( $r^2$ ) = 0.985. The developed method was used to analyze water samples and the recovery was obtained in 90% to 113% range. Precision was indicated by the standard deviation in the range 4.27-13.23 %. This developed method was compared to the standard titration method and the result was shown that there was no significant difference at 95 % confidence level ( t-test ,  $n = 5$  ,  $t_{cal} = 2.13$  ,  $t_{Stat} = 1.48$  ).

**Keyword :** Hardness, Spectrophotometry, Water Samples



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	XI

## บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สาเหตุการเกิดความกระด้างของน้ำ.....	3
2.2 ประเภทของน้ำกระด้างและการแก้ไข.....	4
ความกระด้างของน้ำ	
2.3 การกำจัดความกระด้างของน้ำ.....	4
2.4 สารเชิงซ้อนคีเลต.....	6
2.5 การไทเทรตหาปริมาณโลหะด้วย EDTA.....	10
2.6 อินดิเคเตอร์สำหรับการไทเทรตด้วย EDTA.....	19
2.7 การหาความกระด้างของน้ำ.....	22
2.7.1 การหาปริมาณของแมกนีเซียม.....	22
2.7.2 การหาปริมาณของแคลเซียม.....	22
2.7.2 การหาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียม.....	23
2.8 ปัญหาต่างๆที่เกิดจากน้ำกระด้าง.....	24
2.9 ประโยชน์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 ผลกระทบต่อสุขภาพของความกระด้าง.....	25
2.11 เครื่องมือ-วิธีเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	25
2.11.1 Beer's Law.....	25
2.11.2 องค์ประกอบของเครื่อง.....	25
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์.....	32
3.1.1 สารเคมี.....	32
3.1.2 อุปกรณ์.....	32
3.2 การเตรียมสารละลาย.....	33
3.2.1 สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต 0.1 M.....	33
3.2.2 สารละลาย บัฟเฟอร์ (pH 10).....	33
3.2.3 สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 M.....	33
3.2.4 สารละลายเชิงซ้อน Mg EDTA 0.1 M.....	33
3.2.5 สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที.....	33
3.3 วิธีการทดลอง.....	34
3.3.1 วิธีการทดลองแบบมาตรฐาน.....	34
3.3.2 วิธีการทดลองแบบสเปกโตรโฟโตเมทรี.....	34
3.3.3 ทดสอบความใช้ได้ของวิธีหาความกระด้างของน้ำ.....	36
โดยวิธีทางสเปกโตรเมทรี	
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต.....	37
4.1.1 การศึกษาหาปริมาณเอริโอโครมแบล็คทีที่เหมาะสมต่อการทดลอง.....	37
4.1.2 การศึกษาหาปริมาณแมกนีเซียมอีดีทีเอที่เหมาะสมต่อการทดลอง.....	41
4.1.3 การศึกษาหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมต่อการทดลอง.....	44

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 ทดสอบความใช้ได้ของวิธีหาความกระด้างของน้ำโดยวิธีทางสเปกโตรเมทรี.....	46
4.2.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Regression).....	46
4.2.2 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD).....	47
4.2.3 ขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ(LOQ).....	48
4.2.4 ความเที่ยง ( Precision ).....	48
4.2.5 ความแม่นยำ (Accuracy).....	50
4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำโดยใช้เทคนิค.....	52
Spectrophotometry	
4.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสภาวะปกติ.....	52
4.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสภาวะที่เติม.....	56
สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ( Standard addition )	
4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสภาวะที่.....	66
ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำโดย.....	70
ใช้วิธีมาตรฐานการไทเทรต	
4.4.1 ผลการวิเคราะห์ของสารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M.....	70
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ของ Blank.....	70
4.4.3 ผลการวิเคราะห์ของสารตัวอย่าง.....	71
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปการดำเนินการวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>75</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>77</b>
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>82</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางแสดงเกณฑ์ความกระด้างของน้ำ.....	3
2 ค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับ EDTA.....	12
3 ค่า $\alpha_4$ ของ EDTA เมื่อสารละลายมี pH ต่าง ๆ กัน.....	15
4 เมแทลโลโครมิกอินดิเคเตอร์.....	21
5 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ .....	37
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เจือจาง 10 เท่า	
6 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ .....	38
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เจือจาง 25 เท่า	
7 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ .....	38
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เจือจาง 50 เท่า	
8 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ .....	39
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เจือจาง 75 เท่า	
9 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ .....	40
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เจือจาง 100 เท่า	
10 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ ในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ.....	41
11 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 5 ml.....	42
12 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 10 ml.....	42
13 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 15 ml.....	42
14 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 20 ml.....	43
15 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ .....	44
ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075	
16 ตารางแสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ และค่าการดูดกลืนแสง.....	47
17 ตารางแสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำคลอง.....	48
18 ตารางแสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำบาดาล.....	48
19 ตารางแสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำดื่ม.....	49
20 ตารางแสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำประปา.....	49
21 ตารางแสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ.....	49

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
22 ตารางแสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำคลองเมื่อเติม.....50 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.01 M	50
23 ตารางแสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพเมื่อเติม.....50 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.01 M	50
24 ตารางแสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำประปาเมื่อเติม.....50 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.01 M	50
25 ตารางค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำบาดาลเมื่อเติม.....51 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.01 M	51
26 ตารางแสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำดื่มเมื่อเติม.....51 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.01 M	51
27 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลอง.....52	52
28 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ.....53	53
29 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปา.....53	53
30 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาล.....54	54
31 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่ม.....55	55
32 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่เดิม.....56 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	56
33 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่เดิม.....57 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	57
34 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปาในสถานะที่เดิม.....58 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	58
35 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่เดิม.....59 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	59
36 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่เดิม.....60 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	60
37 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่เดิม.....61 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M	61

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
38 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะที่เดิม.....	62
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M	
39 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เดิม.....	63
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M	
40 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะที่เดิม.....	64
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M	
41 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่มในสภาวะที่เดิม.....	65
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M	
42 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลอง.....	66
ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
43 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ.....	67
ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
44 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปา.....	68
ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
45 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาล.....	68
ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
46 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่ม.....	69
ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ	
47 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตสารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M.....	70
48 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank.....	70
49 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำคลอง.....	71
50 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ.....	71
51 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำบาดาล.....	71
52 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำประปา.....	72
53 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำดื่ม.....	72

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.1 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลอง.....	77
ก.2 ตารางแสดงผลของการทำ Standard Addition.....	78
ก.3 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank.....	79
ก.4 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตสารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M .....	80
ก.5 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำคลอง.....	80

และผลของความกระด้างน้ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 เส้นโค้งของการไทเทรตสารละลาย 0.020M ของโลหะ M .....9 ปริมาตร 60.00mL ด้วย 0.020M เททระเดนเตทลิแกนด์(A), 0.040M ไบเดนเตทลิแกนด์ (B), 0.080M ยูนิเดนเตทลิแกนด์(C) โครงสร้างของ EDTA ligand	
2 โครงสร้างของ EDTA ligand.....11	
3 สูตรโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน M-EDTA.....11	
4 องค์ประกอบของสารละลาย EDTA ที่ pH ต่าง ๆ.....15	
5 เส้นโค้งของการไทเทรตไอออนของโลหะ $Mn^{+}$ เข้มข้น 0.010 M ปริมาตร 50.00 ml.....16 กับ 0.010 M EDTA	
6 ผลของ pH ที่มีต่อการไทเทรต 0.0100M $Ca^{2+}$ ด้วย 0.0100M EDTA.....17	
7 pH ต่ำสุดสำหรับการไทเทรตไอออนบวกต่าง ๆ ด้วย EDTA.....18	
8 อีริโอที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงกับ $Mg^{2+}$ .....20	
9 แสดงแหล่งกำเนิดแสง (ก) Hydrogen lamp (ข) Deuterium lamp.....26	
10 แสดงภาพเซลล์ใส่สารตัวอย่าง.....29	
11 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ $CaCO_3$ (M) กับค่าการดูดกลืนแสง.....37 ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเจือจาง 10 เท่า	
12 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ $CaCO_3$ (M) กับค่าการดูดกลืนแสง.....38 ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเจือจาง 25 เท่า	
13 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ $CaCO_3$ (M) กับค่าการดูดกลืนแสง.....39 ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเจือจาง 50 เท่า	
14 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ $CaCO_3$ (M) กับค่าการดูดกลืนแสง.....39 ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเจือจาง 75 เท่า	
15 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ $CaCO_3$ (M) กับค่าการดูดกลืนแสง.....40 ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเจือจาง 100 เท่า	
16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมแบล็คทีปริมาณต่างๆที่เติมลงใน.....40 สารละลายมาตรฐาน $CaCO_3$ 0.005 M และ $CaCO_3$ 0.010 M	
17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมแบล็คทีปริมาณต่างๆที่เติมลงใน.....41 สารละลายมาตรฐาน $CaCO_3$ 0.015 M และ $CaCO_3$ 0.02 M	

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นเอกสารอ้างอิงเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ 0.005 M.....	43
กับ $\text{CaCO}_3$ 0.010 Mในสภาวะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน	
19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ 0.015 M.....	43
กับ $\text{CaCO}_3$ 0.020 Mในสภาวะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน	
20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ .....	44
ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M	
21 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ .....	45
ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M	
22 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ .....	45
ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M	
23 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐาน.....	46
แคลเซียมคาร์บอเนต และค่าการดูดกลืนแสง	
24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน.....	47
แคลเซียมคาร์บอเนตและค่าการดูดกลืนแสง	
25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำคลองในสภาวะปกติ.....	52
26 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะปกติ.....	53
27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะปกติ.....	54
28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะปกติ.....	54
29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสภาวะปกติ.....	55
30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสภาวะที่เติม.....	56
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	
31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะที่.....	57
เติมสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	
32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เติม.....	58
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M	

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
33	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่เดิม.....59
34	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่ม.....60 ในสถานะที่เดิมสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.010 M
35	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่เดิม.....61 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M
36	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่เดิม.....62 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M
37	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสถานะที่เดิม.....63 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M
38	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่เดิม.....64 สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M
39	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่ม.....65 ในสถานะที่เดิมสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M
40	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ.....66
41	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ.....67 ในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ
42	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปา.....68 ในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ
43	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่ไม่เติม.....69
44	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ.....69
ก.1	กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M.....77
ข.1	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมเบิ้ลค์ที่ปริมาตรต่างๆที่เติมลงใน.....82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M และ  $\text{CaCO}_3$  0.010 M  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมเบิ้ลคทีที่ปริมาตรต่างๆที่เติมลงใน.....	82
สารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.015 M และ $\text{CaCO}_3$ 0.02 M	
ข.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ $\text{CaCO}_3$ 0.005 M .....	83
กับ $\text{CaCO}_3$ 0.010 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน	
ข.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ .....	83
$\text{CaCO}_3$ 0.015 M กับ $\text{CaCO}_3$ 0.020 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน	
ข.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M.....	84
ข.6 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ โดยใช้วิธีมาตรฐานและเทคนิคทางสเปกโตรโฟโตเมทรี (Spectrophotometry) การวิเคราะห์ความกระด้างในน้ำจะอาศัยหลักการ คือ EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) สามารถสร้างไอออนเชิงซ้อนที่เสถียรกับ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และไอออนประจุบวกสองอื่นๆที่เป็นสาเหตุของความกระด้างของน้ำ เมื่อเติม Eriochrome Black T Indicator ในน้ำตัวอย่างที่มีบัฟเฟอร์ pH  $10.0 \pm 0.1$  Eriochrome Black T จะรวมกับ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  เกิดเป็นสารเชิงซ้อนสีม่วง (ถ้าไม่มีไอออนของโลหะละลายอยู่จะได้สารละลายสีน้ำเงิน) เมื่อไทเทรตด้วย EDTA  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  และไอออนประจุบวกอื่นๆที่เป็นสาเหตุของความกระด้างของน้ำจะรวมตัวกับ EDTA เป็นสารเชิงซ้อน ซึ่งไม่มีสีและคงตัวกว่าสารเชิงซ้อนแรก โดยจะรวมตัวกับ  $\text{Ca}^{2+}$  ก่อน แล้วจึงมารวมตัวกับ  $\text{Mg}^{2+}$  เมื่อ EDTA รวมตัวกับไอออนดังกล่าวหมดแล้วจึงไปถึงไอออนโลหะ ( $\text{Mg}^{2+}$ ) มาจากสารเชิงซ้อนแรกจนหมดและปล่อย Eriochrome Black T เป็นอิสระ สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่าถึงจุดยุติ

ความกระด้างของน้ำจะแทนค่าด้วยความเข้มข้นทั้งหมดของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  โดยจะแสดงในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{mg/l as CaCO}_3$ ) อย่างไรก็ตามถ้าไอออนตัวอื่นๆดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นมีอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมากก็จะต้องคิดรวมด้วยโดยสามารถจัดแบ่งระดับคุณลักษณะของน้ำตามความกระด้างเป็น น้ำอ่อน ( $0 - 75 \text{ mg/l as CaCO}_3$ ) น้ำค่อนข้างกระด้าง ( $75 - 150 \text{ mg/l as CaCO}_3$ ) น้ำกระด้าง ( $150 - 300 \text{ mg/l as CaCO}_3$ ) และน้ำกระด้างมาก (มากกว่า  $300 \text{ mg/l as CaCO}_3$ ) ความกระด้างไม่มีผลเชิงลบต่อสุขภาพจึงไม่มีการกำหนดค่าสูงสุดของความกระด้าง

โครงการวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบวิธีการหาความกระด้างของน้ำ โดยใช้วิธีการไทเทรตเป็นวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาใหม่คือวิธีวัดการดูดกลืนแสงโดยultraviolet-visible spectrometry จะใช้สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต และเติม  $\text{MgEDTA}$  ( $\text{pH} = 10$ ) ที่มากเกินไป ซึ่ง  $\text{MgEDTA}$  จะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca}^{2+}$  จะได้  $\text{CaEDTA}$  และมี  $\text{Mg}^{2+}$  เหลืออยู่ ซึ่ง  $\text{Mg}^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับอินดิเคเตอร์ Eriochrome Black T ทำให้สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงแดง จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ด้วย Ultraviolet-Visible Spectrometer ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์น้อย ทั้งยังมีความถูกต้องรวดเร็ว ประสิทธิภาพการแยกสูง และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาความกระด้างของน้ำโดยใช้วิธีการไทเทรตเป็นวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาขึ้นคือวิธีวัดการดูดกลืนแสงโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสง

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาความกระด้างของน้ำโดยใช้วิธีการไทเทรตเป็นวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบกับวิธีวัดการดูดกลืนแสงโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

1.3.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำด้วยวิธีวัดการดูดกลืนแสงโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทบทวนทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี

1.4.3 เปรียบเทียบวิธีวิเคราะห์หาความกระด้างที่พัฒนาขึ้นกับวิธีมาตรฐานไทเทรตหาความกระด้างของน้ำ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้วิธีวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรีที่วิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วไม่ซับซ้อน มีความถูกต้อง และค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต่ำ

1.5.2 สามารถนำงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำ

1.5.3 ใ้ควบคุมคุณภาพของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สาเหตุของการเกิดความกระด้างน้ำ [1]

ความกระด้างของน้ำเกิดจากธาตุโลหะที่อยู่ในสภาพไอออนที่มีประจุบวก (Cation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพไอออนที่มีประจุ +2 เช่น แคลเซียมไอออน( $\text{Ca}^{2+}$ ), แมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) เป็นต้น และอาจมีธาตุอื่นๆ เช่น เหล็ก(II)ไอออน( $\text{Fe}^{2+}$ ), แมงกานีส(II)ไอออน( $\text{Mn}^{2+}$ ) และ สตรอนเซียมไอออน ( $\text{Sr}^{2+}$ ) แต่มีอยู่ในปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  สาเหตุที่น้ำมีความกระด้าง เกิดจากการที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ หรือที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์บนชั้นหน้าดินของแบคทีเรียรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิก(Carbonic acid)ซึ่งเป็นกรดอ่อนเมื่อไหลซึมไปสัมผัสกับชั้นหินที่เป็นด่าง โดยเฉพาะชั้นหินปูนซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{MgCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลักจะละลายหินปูนมากขึ้นทำให้มีปริมาณ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  มากขึ้นส่งผลให้ความกระด้างของน้ำเพิ่มขึ้นดังนั้น คำจำกัดความของความกระด้างของน้ำจะแทนค่าด้วยความเข้มข้นทั้งหมดของ  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  โดยจะแสดงในหน่วยของ มิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/l as  $\text{CaCO}_3$ ) อย่างไรก็ตามถ้าไอออนตัวอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น มีอยู่ในน้ำเป็นจำนวนมากก็จะต้องคิดรวมด้วย โดยสามารถจัดแบ่งระดับคุณลักษณะของน้ำตามความกระด้างดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงเกณฑ์ความกระด้างของน้ำ

เกณฑ์ความกระด้างของน้ำ	ปริมาณความกระด้างของน้ำ(mg/l as $\text{CaCO}_3$ )
น้ำอ่อน	0-75
น้ำค่อนข้างกระด้าง	75-150
น้ำกระด้าง	150-300
น้ำกระด้างมาก	มากกว่า 300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ประเภทของน้ำกระด้าง และการแก้ไขความกระด้างของน้ำ [1]

ความกระด้างในน้ำที่มีอยู่ทุกประเภท จะรวมเรียกว่า ความกระด้างทั้งหมด (Total Hardness) แบ่งตามไอออนที่มีอยู่ในน้ำได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

### 1. ความกระด้างชั่วคราว (Temporary Hardness)

หรือความกระด้างคาร์บอเนต (Carbonate Hardness) ซึ่งได้แก่ คาร์บอเนตไอออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และไบคาร์บอเนตไอออน ( $\text{HCO}_3^-$ ) โดยส่วนใหญ่ในน้ำจะเป็นจำพวก  $\text{CaHCO}_3$  ซึ่งเมื่อทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ต้ม จะสามารถกำจัดความกระด้างประเภทนี้ได้ เพราะเมื่อถูกความร้อนจะตกตะกอนกลายเป็นหินปูน

- Calcium Hardness ไอออนประจุบวกในน้ำ ส่วนใหญ่เป็น  $\text{Ca}^{2+}$
- Magnesium Hardness ไอออนประจุบวกในน้ำ ส่วนใหญ่เป็น  $\text{Mg}^{2+}$

### 2. ความกระด้างถาวร (Permanent Hardness)

เป็นความกระด้างที่ไม่ใช่เกิดจากคาร์บอเนต (Non-Carbonate Hardness) ซึ่งเกิดจากไอออนอื่น ได้แก่ ซัลเฟตไอออน ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) คลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) ซึ่งอยู่ในรูปเกลือ ได้แก่ แคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมคลอไรด์ หรือ แมกนีเซียมซัลเฟต และแมกนีเซียมคลอไรด์ ละลายอยู่ ความกระด้างประเภทนี้จะไม่สามารถถูกกำจัดได้ด้วยการต้ม จะต้องทำให้อิออนที่มีอยู่ตกตะกอนแล้วอาจแยกออกด้วยการกรอง

## 2.3 กำจัดความกระด้างของน้ำ

1. เติมนูนขาว ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) และ โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ลงไปเพื่อตกตะกอนความกระด้างถาวรชนิดคลอไรด์ และซัลเฟตของแคลเซียมและแมกนีเซียมให้เกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนรูปเกลือแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งอยู่ในรูปสารละลายน้ำให้อยู่ในรูปตะกอน

1. ปฏิกิริยากำจัดความกระด้างไบคาร์บอเนตโดยใช้ปูนขาว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปฏิกริยากำจัดความกระด้างแมกนีเซียมด้วยปูนขาว



3. ปฏิกริยากำจัดความกระด้างถาวรเนื่องจากคลอไรด์ และซัลเฟตของเกลือแคลเซียมด้วยโซดาแอช



4. ปฏิกริยากำจัดความกระด้างบางชนิดคลอไรด์ และซัลเฟตของแมกนีเซียมด้วยปูนขาวปูนขาวและโซดาแอช



5. ปฏิกริยาระหว่างแคลเซียมคลอไรด์กับแมกนีเซียมคาร์บอเนตและโซดาแอชที่เหลือ



2. สารส้ม เป็นสารช่วยตกตะกอน เพื่อให้ตะกอนจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ และเกิดปฏิกิริยาเคมีเร่งให้การตกตะกอนเร็วยิ่งขึ้น

3. สารจับโลหะ(chelating agent) ได้แก่ EDTA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สารเชิงซ้อนคีเลต [3]

สารเชิงซ้อนที่ประกอบด้วยโลหะที่เกิดพันธะกับลิแกนด์ตั้งแต่ 2 พันธะขึ้นไป เรียกว่า chelate (คีเลต) และลิแกนด์ดังกล่าว เราเรียกว่า chelating agent โดย EDTA จัดว่าเป็น chelating agent ตัวหนึ่ง

สารเชิงซ้อนคีเลต (chelate complex compound) คือสารเชิงซ้อนที่เกิดจากลิแกนด์ชนิดพอลิเดนเทรตกับอะตอมของโลหะ ไคสารเชิงซ้อนชนิดที่เป็นวงตัวอย่างเช่น



เมื่อไอออนของโลหะอยู่ในสารละลายของน้ำ โมเลกุลของน้ำจะล้อมรอบไอออนของโลหะดังปฏิกิริยา



เมื่อเกิดสารเชิงซ้อนจะมีการแทนที่ของลิแกนด์ที่แรงกว่าน้ำ ดังสมการ

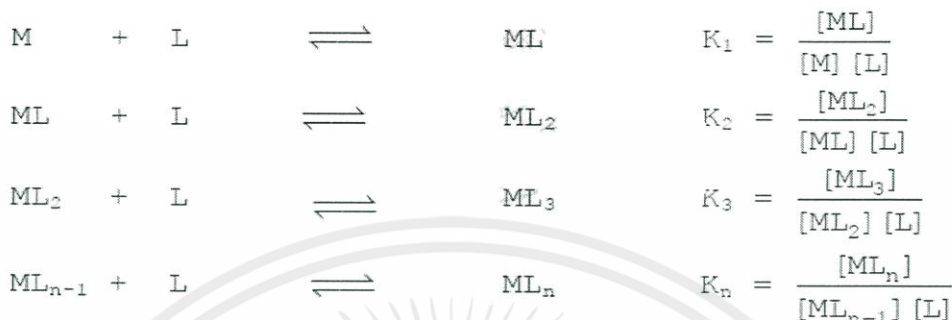


M คือ ไอออนของโลหะที่มีโคออร์ดิเนชันนัมเบอร์เท่ากับ n

L คือลิแกนด์ที่แรงกว่าน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้สะดวกในการเขียนสมการของการเกิดสารเชิงซ้อน จะไม่เขียนโมเลกุลของน้ำในสารประกอบดังนี้



ค่าคงตัวของสารเชิงซ้อน (formation constant,  $K$ ) แสดงถึงความเสถียรของสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น ค่าคงตัวทั้งหมดของแต่ละขั้นที่เกิดปฏิกิริยา จะให้สัญลักษณ์เป็น  $\beta$  หาได้ดังนี้



ความสัมพันธ์ระหว่าง  $K$  และ  $\beta$  เป็นดังนี้

$$\begin{array}{l}
 \beta_1 = \frac{[\text{ML}]}{[\text{M}] [\text{L}]} = K_1 \\
 \beta_2 = \frac{[\text{ML}_2]}{[\text{M}] [\text{L}]^2} = \frac{[\text{ML}]}{[\text{M}] [\text{L}]} \cdot \frac{[\text{ML}_2]}{[\text{ML}] [\text{L}]} = K_1 K_2 \\
 \beta_3 = \frac{[\text{ML}_3]}{[\text{M}] [\text{L}]^3} = \frac{[\text{ML}]}{[\text{M}] [\text{L}]} \cdot \frac{[\text{ML}_2]}{[\text{ML}] [\text{L}]} \cdot \frac{[\text{ML}_3]}{[\text{ML}_2] [\text{L}]} = K_1 K_2 K_3
 \end{array}$$

ในทำนองเดียวกัน  $\beta_n = K_1 K_2 K_3 \dots K_n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าปฏิกิริยาเกิดในทางตรงกันข้าม คือ สารเชิงซ้อนแตกตัวเป็น โลหะและลิแกนด์ ค่าคงตัวของการแตกตัวจะเป็นส่วนกลับกับค่าคงตัวของการเกิดสารเชิงซ้อน



สารเชิงซ้อนที่มีค่า  $\frac{1}{K_n}$  จะเสถียรกว่าสารเชิงซ้อนที่มีค่า  $\frac{1}{K_n}$  สูง

เส้นโค้งของการไทเทรตแบบเกิดสารเชิงซ้อน

เส้นโค้งของการไทเทรตได้จากการสร้างกราฟระหว่าง pM กับจำนวนไทแทรนด์โดยให้ pM เป็น



แกน Y จำนวนไทแทรนด์เป็นแกน X ถ้า L ทำปฏิกิริยากับ M ในอัตราส่วน 1:1 จะได้ กราฟมีช่วงความชัน 1 ช่วง และถ้า L ทำปฏิกิริยากับ M ในอัตราส่วน 1:2 จะได้กราฟมีช่วงความชัน 2 ช่วง ไทแทรนด์ที่ใช้ในการไทเทรตแบบเกิดสารเชิงซ้อนนิยมเลือกลิแกนด์ ชนิดพอลิเดนเตตลิแกนด์มากกว่าชนิดยูนิเดนเตตลิแกนด์เพราะ ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะมี เสถียรภาพสูง และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนของโลหะกับลิแกนด์ชนิดพอลิเดนเตตลิแกนด์มักจะมีเพียงปฏิกิริยาเดียว และให้ผลผลิตแน่นอนเพียงชนิดเดียว ตัวอย่างเช่นการไทเทรตสารละลาย M ด้วย ลิแกนด์ D (D เป็นลิแกนด์แบบเทตระเดนเตตลิแกนด์)  $K_f$  คือค่าคงตัวของการเกิดสารเชิงซ้อน เส้นโค้งของการไทเทรตจะมีความชัน สูงดังรูป 2 จึงสามารถหาจุดยุติได้จากเส้นโค้งของการไทเทรต

แต่ถ้าเป็นการไทเทรตสารละลาย M ด้วยไบเดนเตตลิแกนด์ B



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีสองขั้นตอนคือ



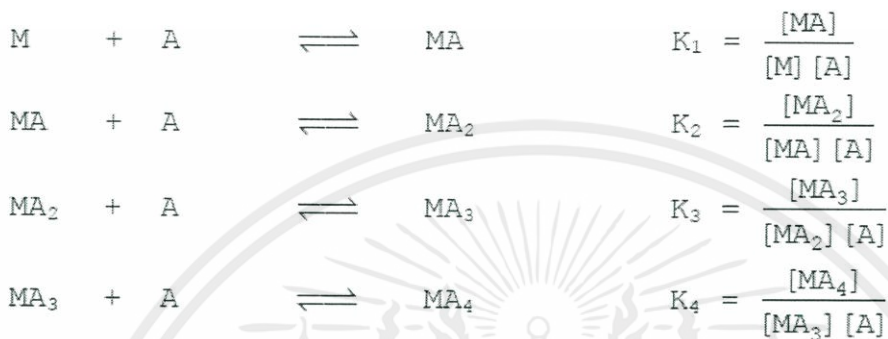
ไทเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 สารละลาย M  
 ไม่ว่าจะกรณใดทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา  $\frac{[MB_2]}{[M][B]^2}$  อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
 ด้วยมือโน

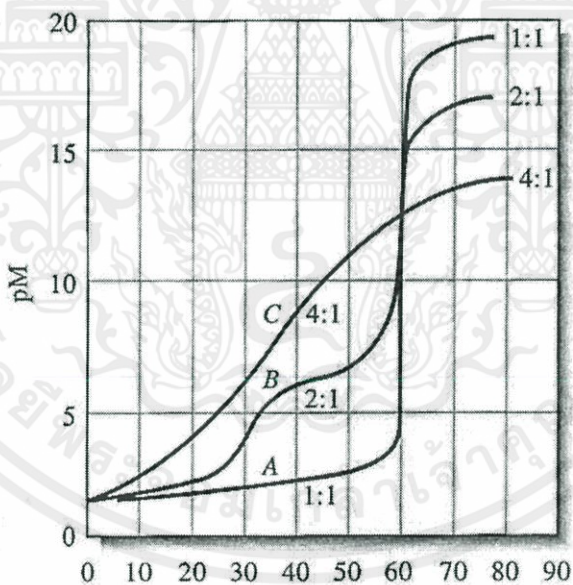
เดนเทลิแกนด์ A ปฏิกริยาจะเกิดดังนี้



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมี 4 ขั้นตอน คือ



$$\begin{aligned} \beta_4 &= K_1 K_2 K_3 K_4 \\ &= \frac{[MA_4]}{[M][A]^4} \end{aligned}$$



รูปที่ 1 เส้นโค้งของการไทเทรตสารละลาย 0.020M ของโลหะ M ปริมาตร 60.00 mL ด้วย 0.020 M เทตระเดนเทลิแกนด์(A), 0.040 M ไบเดนเทลิแกนด์ (B), 0.080 M ยูนิเดนเทลิแกนด์(C) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1 เส้นโค้ง(A)เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย M กับลิแกนด์ D ซึ่งมีค่า  $\beta = 1.0 \times 10^{20}$  เส้นโค้ง(B)เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย M กับลิแกนด์ B เส้นโค้งของการไทเทรต มีช่วงความชัน 2 ช่วง จึงมีจุดยุติ 2 จุด จุดยุติแรกเกิดจาก 1 โมลของ M ทำปฏิกิริยากับ 1 โมลของ B จุดยุติที่สองเกิดจาก 1 โมลของ MB ทำปฏิกิริยากับ 1 โมลของ B การไทเทรต สารละลาย M ด้วย B แล้วได้จุดยุติ 2 จุด เนื่องจากค่า  $K_1 = 1.0 \times 10^{12}$  และ  $K_2 = 1.0 \times 10^8$  ซึ่งค่า  $K_1$  และ  $K_2$  ต่างกันมากพอ

เส้นโค้ง(C)เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย M กับลิแกนด์ A ซึ่งมีปฏิกิริยา 4 ขั้นตอน มีค่า  $K_1 = 1.0 \times 10^8$ ,  $K_2 = 1.0 \times 10^6$ ,  $K_3 = 1.0 \times 10^4$  และ  $K_4 = 1.0 \times 10^2$  ซึ่งค่า  $\beta_4 = 1.0 \times 10^{20}$  เส้นโค้งของการไทเทรต มีความชันต่ำ ไม่สามารถแยกให้เห็นการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นได้ เพราะค่า K แต่ละขั้นไม่ต่างกันมากพอ

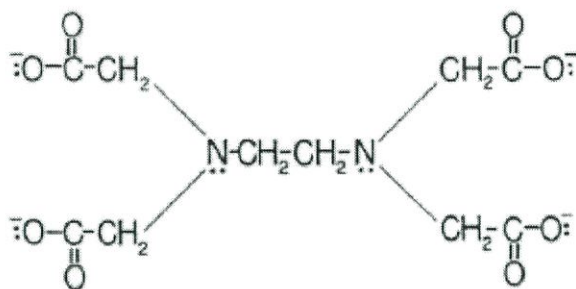
จะเห็นว่าเส้นโค้งของการไทเทรตระหว่างสารละลาย M กับลิแกนด์ที่ทำปฏิกิริยากัน ด้วยอัตราส่วน 1:1 ให้ผลการไทเทรตที่ดี สามารถหาจุดยุติได้ง่าย

## 2.5 การไทเทรตหาปริมาณโลหะด้วย EDTA [3]

EDTA ย่อมาจาก ethylenediaminetetraacetic acid เป็นสารทำให้เกิด chelates ที่ใช้กันมากและเป็นประโยชน์ในทางเภสัชกรรมเป็นสารในกลุ่ม aminopolycarboxylic acid มี 2 ตัว คือ ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) และเกลือของ EDTA เช่น disodium EDTA (มี  $\text{Na}_2$ ) Tetrasodium EDTA (มี  $\text{Na}_4$ ) โดย EDTA เป็น hexadentate ligand ที่มีอะตอมที่สามารถให้คู่อิเล็กตรอนได้ คือ ออกซิเจน 4 อะตอม และไนโตรเจน 2 อะตอม Chelates ที่เกิดขึ้นอาจทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหรืออาจได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่คงตัวและละลายน้ำได้ ในกรณีที่ chelate ที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายน้ำได้ จะเรียกปฏิกิริยานั้นว่า sequestration และเรียก ligand ที่ทำให้เกิด chelates ที่ละลายน้ำว่า sequestering agents EDTA ที่ใช้เป็น sequestering agent ในการกำจัด calcium ion ในน้ำกระด้างและยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิเคราะห์หาปริมาณ procainamide นอกจากนี้เนื่องจาก EDTA สามารถจับกับไอออนของโลหะหนัก เช่น iron, copper ions จึงสามารถนำมาใช้ในการป้องกันการเสื่อมสลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดจากโลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

EDTA เป็นกรดอ่อนชนิดทетระโปรติ ( $\text{H}_4\text{Y}$ ) มีโปรตอนที่ถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนของโลหะ 4 ตัว เป็นสารที่ใช้อย่างกว้างขวางในการหาปริมาณ โลหะ เพราะสามารถรวมกับไอออนของโลหะส่วนใหญ่ด้วยอัตราส่วนจำนวนโมล เท่ากับ 1:1 EDTA เป็นสารที่ละลายน้ำได้น้อยมากแต่เกลือไดโซเดียมของ EDTA ละลายน้ำได้ดี ดังนั้น คำว่า EDTA ที่พบเห็นและใช้กันอยู่ทั่วไปจึงหมายถึงเกลือไดโซเดียมของ EDTA หรือ  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y}$  สูตร โครงสร้างของ EDTA เขียนได้ดังนี้

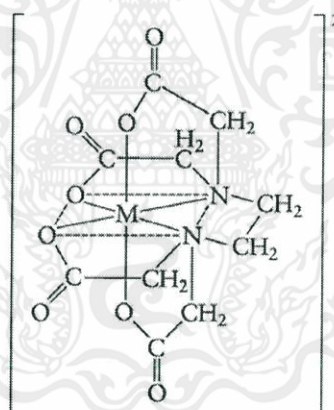
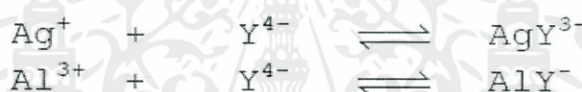
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 โครงสร้างของ EDTA ligand [5]

EDTA มีสมบัติเป็นกรดอ่อน มีค่า  $K_1=1.02 \times 10^{-2}$ ,  $K_2=2.14 \times 10^{-3}$ ,  $K_3=6.92 \times 10^{-7}$  และ  $K_4=5.50 \times 10^{-11}$  ใช้เป็นไทเทรนต์ในการไทเทรตหาปริมาณ โลหะหลายชนิดได้ดีเนื่องจาก

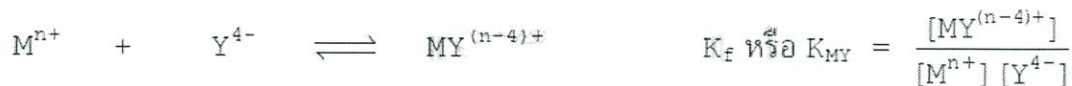
1. EDTA เป็นลิแกนด์ชนิดเฮกซะเดนเตทลิแกนด์ สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ โลหะได้หลายชนิดในอัตราส่วน 1:1 เช่น  $Ag^+$  และ  $Al^{3+}$  เมื่อรวมกับ EDTA จะได้ สารประกอบเชิงซ้อนดังนี้



รูปที่ 3 สูตร โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน M-EDTA [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะกับ EDTA มีค่าสูง ดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะกับ EDTA [7]

ไอออนบวก	$K_{MY}$	$\log K_{MY}$	ไอออนบวก	$K_{MY}$	$\log K_{MY}$
$Ag^+$	$2.1 \times 10^7$	7.32	$Cu^{2+}$	$6.3 \times 10^{18}$	18.80
$Mg^{2+}$	$4.9 \times 10^8$	8.69	$Zn^{2+}$	$3.2 \times 10^{16}$	16.50
$Ca^{2+}$	$5.0 \times 10^{10}$	10.70	$Cd^{2+}$	$2.9 \times 10^{16}$	16.46
$Sr^{2+}$	$4.3 \times 10^8$	8.63	$Hg^{2+}$	$6.3 \times 10^{21}$	21.80
$Ba^{2+}$	$5.8 \times 10^7$	7.76	$Pb^{2+}$	$1.1 \times 10^{18}$	18.04
$Mn^{2+}$	$6.2 \times 10^{13}$	13.79	$Al^{3+}$	$1.3 \times 10^{16}$	16.13
$Fe^{2+}$	$2.1 \times 10^{14}$	14.33	$Fe^{3+}$	$1.3 \times 10^{25}$	25.1
$Co^{2+}$	$2.0 \times 10^{16}$	16.31	$V^{3+}$	$7.9 \times 10^{25}$	25.9
$Ni^{2+}$	$4.2 \times 10^{18}$	18.62	$Th^{4+}$	$1.6 \times 10^{23}$	23.2

3. สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่าง EDTA กับไอออนของโลหะแต่ละชนิดจะมีความเสถียรที่ pH ต่างกัน จึงสามารถวิเคราะห์ไอออนของโลหะแต่ละชนิดได้โดยการควบคุม pH ของสารละลายที่นำมาวิเคราะห์

4. สารละลายของไอออนของโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำก็สามารถวิเคราะห์ได้โดยการไทเทรตกับ EDTA เช่นขนาดของตัวอย่างที่ใช้ประมาณ 0.01-0.05g ซึ่งจัดเป็นการวิเคราะห์กึ่งจุลภาค

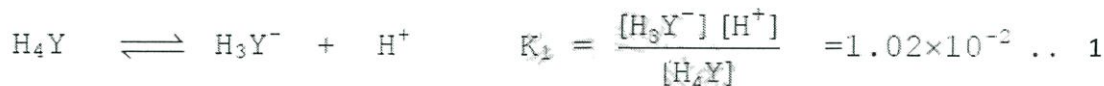
5. สามารถใช้อินดิเคเตอร์ในการตรวจหาจุดยุติได้ และให้ผลการทดลองที่ดี

6. สารละลาย EDTA ที่เตรียมจากเกลือไดโซเดียมของ EDTA มีราคาถูกและมีความบริสุทธิ์สูง สามารถเก็บไว้ใช้งานได้นาน ๆ แต่ต้องเก็บไว้ในขวดพลาสติกแทนขวดแก้ว มิฉะนั้น โลหะที่เป็นองค์ประกอบของแก้วอาจหลุดออกจากแก้วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลของ pH ที่มีต่อองค์ประกอบของ EDTA [3]

EDTA เป็นกรดอ่อนชนิดทรงแพรอติก ( $H_4Y$ ) มีค่าคงตัวของการแตกตัวดังนี้



จะเห็นว่าในสารละลายประกอบด้วย  $H_4Y$ ,  $H_3Y^-$ ,  $H_2Y^{2-}$ ,  $HY^{3-}$  และ  $Y^{4-}$  ซึ่งปริมาณขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย สามารถคำนวณหาเศษส่วนของแต่ละองค์ประกอบ ( $\alpha_n$ ) ที่ขึ้นอยู่กับ pH ได้ดังนี้

$$\alpha_0 = \frac{[H_4Y]}{C_T} \dots 5$$

$$\alpha_1 = \frac{[H_3Y^-]}{C_T} \dots 6$$

$$\alpha_2 = \frac{[H_2Y^{2-}]}{C_T} \dots 7$$

$$\alpha_3 = \frac{[HY^{3-}]}{C_T} \dots 8$$

$$\alpha_4 = \frac{[Y^{4-}]}{C_T} \dots 9$$

โดย  $\alpha_n$  เป็นเศษส่วนของแต่ละองค์ประกอบของ EDTA ในสารละลาย

$C_T$  เป็นผลรวมความเข้มข้นของแต่ละองค์ประกอบของ EDTA ที่ไม่ได้เกิดเป็นสารเชิงซ้อน นั่นคือ

$$C_T = [H_4Y] + [H_3Y^-] + [H_2Y^{2-}] + [HY^{3-}] + [Y^{4-}] \dots 10$$

จากค่า  $K_1, K_2, K_3$  และ  $K_4$  ในสมการ 1-4 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[H_3Y^-] = \frac{K_1[H_4Y]}{[H^+]} \quad \dots \quad 11$$

$$[H_2Y^{2-}] = \frac{K_2[H_3Y^-]}{[H^+]} = \frac{K_1K_2[H_4Y]}{[H^+]^2} \quad \dots \quad 12$$

$$[HY^{3-}] = \frac{K_3[H_2Y^{2-}]}{[H^+]} = \frac{K_1K_2K_3[H_4Y]}{[H^+]^3} \quad \dots \quad 13$$

$$[Y^{4-}] = \frac{K_4[HY^{3-}]}{[H^+]} = \frac{K_1K_2K_3K_4[H_4Y]}{[H^+]^4} \quad \dots \quad 14$$

แทนค่า (11)ถึง(14)ลงในสมการ(10)จะได้

$$C_T = [H_4Y] + \frac{K_1[H_4Y]}{[H^+]} + \frac{K_1K_2[H_4Y]}{[H^+]^2} + \frac{K_1K_2K_3[H_4Y]}{[H^+]^3} + \frac{K_1K_2K_3K_4[H_4Y]}{[H^+]^4}$$

ย้ายข้างสมการ จะได้

$$[H_4Y] = \frac{C_T [H^+]^4}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4} \quad \dots \quad 15$$

แทน(15)ลงใน(5)จะได้

$$\alpha_0 = \frac{[H^+]^4}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4}$$

แทนค่าในทำนองเดียวกันจะได้

$$\alpha_1 = \frac{K_1[H^+]^3}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4}$$

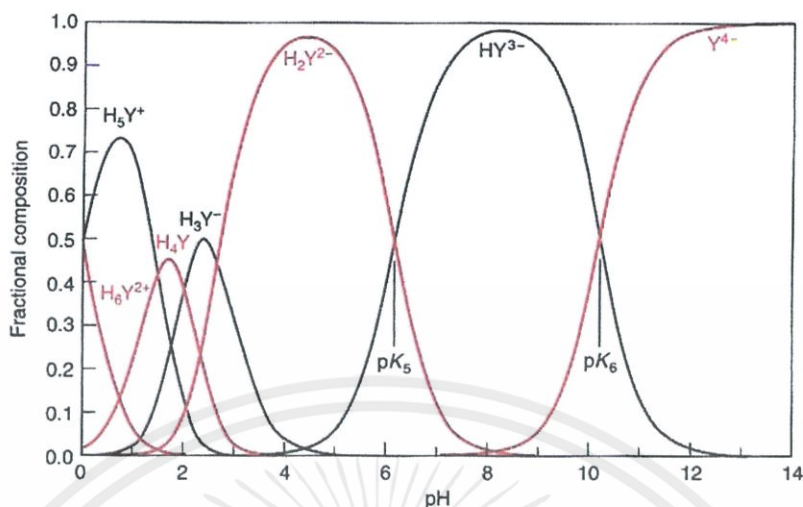
$$\alpha_2 = \frac{K_1K_2[H^+]^2}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4}$$

$$\alpha_3 = \frac{K_1K_2K_3[H^+]}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4}$$

$$\alpha_4 = \frac{K_1K_2K_3K_4}{[H^+]^4 + K_1[H^+]^3 + K_1K_2[H^+]^2 + K_1K_2K_3[H^+] + K_1K_2K_3K_4}$$

ค่า  $\alpha_n$  จะขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายเท่านั้นเมื่อกำหนดค่า  $\alpha_n$  ที่ pH ต่างๆแล้วนำมาสร้างกราฟจะได้รูปกราฟดังนี้

ไม่ว่าคุณได้เพียงส่วนใดก็ตามก็ยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 องค์ประกอบของสารละลาย EDTA ที่ pH ต่าง ๆ [6]

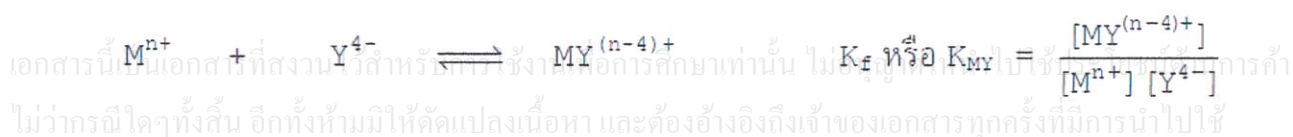
จากรูปจะเห็นว่าที่ pH เป็นกรดมาก ๆ EDTA ส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $H_4Y$  และ  $H_3Y^-$  ในช่วงที่สารละลายเป็นกรดเล็กน้อยหรือมี pH 3-6 องค์ประกอบของ EDTA จะอยู่ในรูป  $H_2Y^{2-}$  สำหรับสารละลายที่เป็นกลางหรือค่อนข้างเป็นเบสเล็กน้อย คือ pH อยู่ในช่วง 6-10 จะมี  $HY^{3-}$  เป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าสารละลายมี pH มากกว่า 10 องค์ประกอบของ EDTA จะเป็น  $Y^{4-}$  นั่นคือ  $[H_4Y]^+ [H_3Y^-] [H_2Y^{2-}] [HY^{3-}] [Y^{4-}]$  ต่างก็ขึ้นอยู่กับค่า pH ดังตารางที่ 3 ซึ่ง แสดงค่า  $\alpha_4$  ที่ขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลาย

ตารางที่ 3 ค่า  $\alpha_4$  ของ EDTA เมื่อสารละลายมี pH ต่าง ๆ กัน [9]

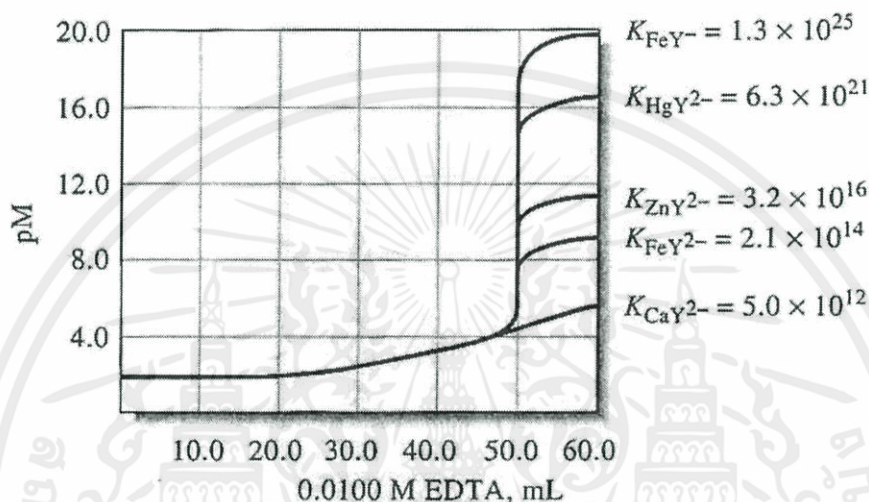
pH	$\alpha_4$	pH	$\alpha_4$
2.0	$3.7 \times 10^{-14}$	8.0	$5.4 \times 10^{-3}$
3.0	$2.5 \times 10^{-11}$	9.0	$5.2 \times 10^{-2}$
4.0	$3.6 \times 10^{-9}$	10.0	$3.5 \times 10^{-1}$
5.0	$3.5 \times 10^{-7}$	11.0	$8.5 \times 10^{-1}$
6.0	$2.2 \times 10^{-5}$	12.0	$9.8 \times 10^{-1}$
7.0	$4.8 \times 10^{-4}$		

### เส้นโค้งของการไทเทรตด้วย EDTA [3]

ลักษณะเส้นโค้งของการไทเทรตที่เกี่ยวข้องกับ EDTA ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย ค่า  $K_f$  ค่า pH ของสารละลายและความเข้มข้นของสารที่ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่นเมื่อไอออนของโลหะ  $M^{n+}$  รวมตัวกับ EDTA ดังปฏิกิริยา



ถ้าค่า  $K_{MY}$  มีค่ามากแสดงว่าปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับ EDTA จะเกิดขึ้นสมบูรณ์ เช่น ปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะต่าง ๆ เข้มข้น 0.010 M ปริมาตร 50.00 mL กับ 0.010 M EDTA ปริมาตรต่าง ๆ กัน จะได้เส้นโค้งของการไทเทรตมีลักษณะดังรูปที่ 4 ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนที่มีค่า  $K_{MY}$  สูงจะได้เส้นโค้งที่มีความชันมากและมีช่วงการเปลี่ยนแปลง pM กว้าง



รูปที่ 5 เส้นโค้งของการไทเทรตไอออนของโลหะ  $Mn^{2+}$  เข้มข้น 0.010 M ปริมาตร 50.00 mL กับ 0.010 M EDTA [10]

pH ของสารละลาย [4]

การไทเทรตเกี่ยวกับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ EDTA จะต้องควบคุม pH ของ สารละลายให้คงตัวจึงต้องใช้สารละลายบัฟเฟอร์ช่วย สำหรับการคำนวณหา pM ที่จุดต่าง ๆ เมื่อเติม EDTA ลงไปจะต้องใช้ค่า  $\alpha_4$  มาเกี่ยวข้องดังนี้ จากปฏิกิริยา



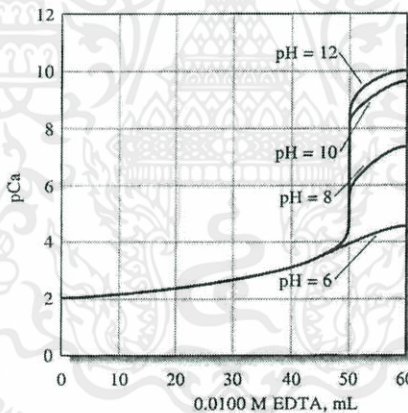
$$K_{MY} = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}][Y^{4-}]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{แต่ } \alpha_4 &= \frac{[Y^{4-}]}{C_T} \\ [Y^{4-}] &= \alpha_4 C_T \\ \text{ดังนั้น } K_{MY} &= \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}]\alpha_4 C_T} \\ K'_{MY} &= K_{MY} \cdot \alpha_4 = \frac{[MY^{(n-4)+}]}{[M^{n+}]C_T} \end{aligned}$$

เรียก  $K'_{MY}$  ว่าค่าคงตัวของกาเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอย่างมีเงื่อนไข (conditional formation constant หรือ effective formation constant) ซึ่งขึ้นอยู่กับ  $\alpha_4$  หรือขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายนั่นเอง

การไทเทรตสารละลายที่มี pH ต่าง ๆ กันจะได้เส้นโค้งของการไทเทรตแตกต่างกัน เช่น การไทเทรตสารละลาย  $Ca^{2+}$  ด้วย EDTA ในสารละลายที่มี pH มากกว่า 8 ขึ้นไป จะได้เส้นโค้งของการไทเทรตมีลักษณะชันมากและช่วงการเปลี่ยนแปลง pM กว้างดังรูป 8.5



รูปที่ 6 ผลของ pH ที่มีต่อการไทเทรต 0.0100M  $Ca^{2+}$  ด้วย 0.0100M EDTA [4]

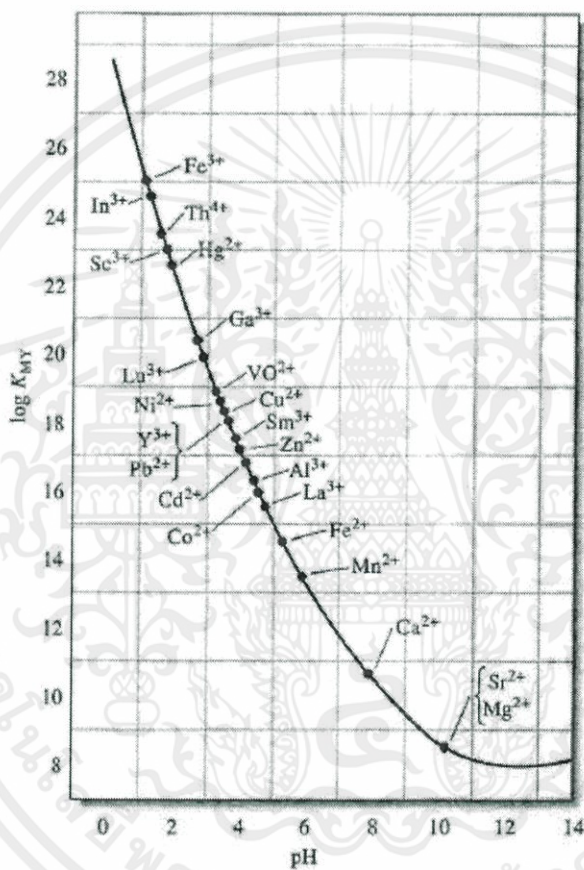
สำหรับ pH ที่ต่ำที่สุดที่เหมาะสมในการไทเทรตไอออนโลหะชนิดต่างๆ ด้วยสารละลาย EDTA แสดงดังรูปที่ 7 จากรูปอาจแบ่งไอออนของโลหะเป็น 3 ประเภท คือ

1. ไอออนของโลหะที่มีค่า  $\log K_{MY}$  สูงกว่า 20 เป็นพวกโลหะไตรวาเลนต์และเตตระวาเลนต์ ไทเทรตได้ในสารละลายที่มีความเป็นกรดคือมี pH ต่ำกว่า 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ไอออนของโลหะที่มีค่า  $\log K_{MY}$  อยู่ในช่วง 15-18 เป็นพวกโลหะทรานซิชันประเภทโคเวเลนต์ ไอออนของแรร์เอิร์ทและ  $Al^{3+}$  ไทเทรตได้ในสารละลายที่มีความเป็นกรดอ่อนๆหรือเป็นกลาง pH 4-7

3. ไอออนของโลหะที่มีค่า  $\log K_{MY}$  อยู่ในช่วง 8-11 เป็นพวกโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ไทเทรตในสารละลายที่เป็นเบส



รูปที่ 7 pH ต่ำสุดสำหรับการไทเทรตไอออนบวกต่าง ๆ ด้วย EDTA [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การแยกสลายด้วยน้ำ [4]

ไอออนของโลหะหลายชนิดสามารถเกิดการแยกสลายด้วยน้ำได้ดีพอ ๆ กับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ EDTA การแยกสลายด้วยน้ำจะเกิดได้ดีเมื่อสารละลายมี pH สูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ความเสถียรของสารประกอบเชิงซ้อนลดลง



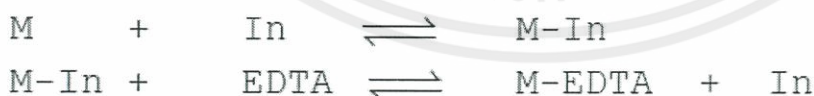
การแยกสลายด้วยน้ำจะได้ตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น การป้องกันไม่ให้เกิดตะกอนดังกล่าวอาจจะต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ทดลองที่จะตัดสินใจว่าในการไทเทรตดังกล่าวควรใช้ pH เท่าไร ตลอดจนอาศัยค่า  $K_{sp}$  ของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ช่วยพิจารณา

การเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น การไทเทรตสารละลาย  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  ด้วย EDTA ที่ pH=10 ทั้ง  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  จะถูกไทเทรตด้วย EDTA แต่ถ้าเพิ่ม pH มากกว่า 10 จะเกิดตะกอน  $Mg(OH)_2$  ทำให้  $Ca^{2+}$  ถูกไทเทรตเพียงตัวเดียวโดยที่  $Mg^{2+}$  จะไม่รบกวนการไทเทรต

### 2.6 อินดิเคเตอร์สำหรับการไทเทรตด้วย EDTA [3]

อินดิเคเตอร์ที่ใช้จะเป็นสารที่สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่มีสีได้กับไอออนของโลหะจึงเรียกอินดิเคเตอร์ชนิดนี้ว่า เมทัลโลโครมิก อินดิเคเตอร์ (metallochromic indicator) อินดิเคเตอร์จะมีสีแตกต่างกันในรูปที่รวมตัวกับโลหะเป็นสารประกอบเชิงซ้อน กับรูปที่เป็นอิสระ เมื่อเติมอินดิเคเตอร์ลงในสารละลายที่จะนำมาไทเทรตอินดิเคเตอร์จะรวมตัว กับไอออนของโลหะที่สนใจได้สารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี เมื่อเติมตัวไทเทรนต์ เช่น EDTA ลง ไปจะเกิดปฏิกิริยาแทนที่อินดิเคเตอร์ซึ่งรวมอยู่กับไอออนของโลหะอย่างไม่แข็งแรงด้วย EDTA ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แข็งแรงกว่า

ถ้าให้ M เป็นไอออนของโลหะ In เป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



M-In จะต้องมีเสถียรภาพน้อยกว่า M-EDTA เพื่อว่าที่จุดยุติ EDTA จะได้ไปดึง ไอออนของโลหะออกจาก M-In ได้ การเปลี่ยนจาก M-In ไปเป็น M-EDTA จะต้องเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น ค่า  $K_f$  ของ M-EDTA จะต้องมากกว่า 10 เท่าของค่า  $K_f$  ของ M-In จะทำให้ผลของการไทเทรตให้จุดยุติที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

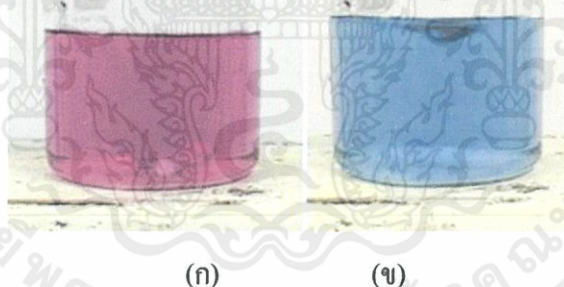
ตัวอย่างอินดิเคเตอร์ที่ใช้กันมากได้แก่อีริโอโครมแบล็กที (eriochrome black T) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า อีริโอที (erio T) ซึ่งจะให้สีแตกต่างกันในสารละลายที่มี pH ต่างกัน ดังนี้

pH < 5.5	pH 7-11	pH > 11.5
สีแดง	สีน้ำเงิน	สีส้ม
H <sub>2</sub> In <sup>-</sup>	HIn <sup>2-</sup>	In <sup>3-</sup>

ในการไทเทรตระหว่างไอออนของโลหะกับ EDTA ส่วนใหญ่จะทำในสารละลายที่มี pH ระหว่าง 10-11 ดังนั้นเมื่อหยดอีริโอทีลงไป สารละลายที่มีไอออนโลหะละลายอยู่ สารละลายจะมีสีแดง และเมื่อนำสารละลายนี้มาไทเทรตกับสารละลาย EDTA บริเวณใกล้จุดยุติจะได้สารละลายสีน้ำเงินคงปฏิกิริยา



(ก) ที่จุดสมมูลได้ Mg-EDTA อีริโอทีแยกตัวออกมาทำให้ได้สารละลายสีน้ำเงิน (ข)



รูปที่ 8 อีริโอทีเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงกับ Mg<sup>2+</sup>

ไอออนของโลหะที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอีริโอทีแล้วเปลี่ยนสีได้แก่

Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Hg<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Co<sup>2+</sup> และ Ni<sup>2+</sup> แต่ Cu<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Cov และ Ni<sup>2+</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

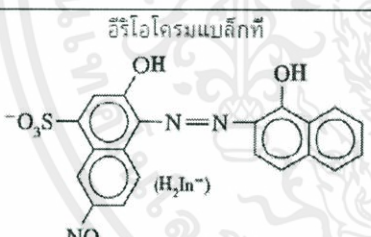
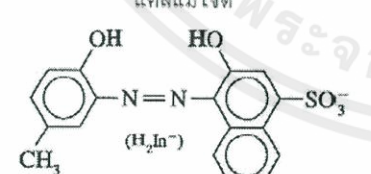
จะเกิด  $MIn$ - ที่มีเสถียรภาพมากกว่า  $MY^{2-}$  ข้อเสีย ของอีริโอที คือ สารละลายของอีริโอทีเมื่อตั้งทิ้งไว้นาน ๆ จะค่อย ๆ สลายตัว

นอกจากนี้ยังมีอินดิเคเตอร์อื่น ๆ ที่สามารถใช้ในการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้แก่ แคลแมกไนต์ (calmagite) เป็นอินดิเคเตอร์ที่มีสมบัติคล้ายกับอีริโอที แต่อยู่ต่ำกว่า ใช้กับการไทเทรต  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  ด้วย EDTA มีการเปลี่ยนแปลงสีที่คมชัดกว่าสามารถใช้แทนอีริโอทีได้

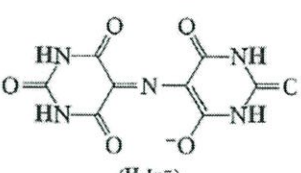
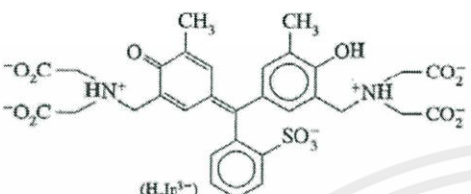
เมอร์กาไซด์ (murexide) เป็นเกลือแอมโมเนียมของกรดเพอร์ฟิวริก เกิดไอออนเชิงซ้อนกับโลหะหลายชนิดและสีจะเปลี่ยนไปตาม pH ของสารละลายเปลี่ยนแปลง ดังตาราง 8.3

ไซลีนอลออเรนจ์ (xylenol orange) เป็นอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตระหว่าง ไอออนของโลหะกับ EDTA ในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรดเป็นส่วนใหญ่ (pH 1.5-3.0) โดยในสารละลายที่เป็นกรดของไซลีนอลออเรนจ์จะมีสีเหลืองส่วนสารละลายของไอออนเชิงซ้อน ที่เกิดจากไซลีนอลออเรนจ์กับไอออนของโลหะ จะได้สารละลายสีแดง

ตารางที่ 4 เมแทลโลโครมิกอินดิเคเตอร์ [8]

อินดิเคเตอร์	pKa	สีของอินดิเคเตอร์อิสระ	สีเมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ
<p>อีริโอโครมแบล็กที</p>  <p><math>(H_2In)</math></p>	<p><math>pK_2 = 6.3</math> <math>pK_3 = 11.6</math></p>	<p><math>H_2In^-</math> <math>HIn^{2-}</math> <math>In^{3-}</math></p> <p>แดง น้ำเงิน ส้ม</p>	ไวน์แดง
<p>แคลแมกไนต์</p>  <p><math>(H_2In)</math></p>	<p><math>pK_2 = 8.1</math> <math>pK_3 = 12.4</math></p>	<p><math>H_2In^-</math> <math>HIn^{2-}</math> <math>In^{3-}</math></p> <p>แดง น้ำเงิน ส้ม</p>	ไวน์แดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<p>เมอเรกไซด์</p>  <p>(H<sub>4</sub>In<sup>-</sup>)</p>	<p>pK<sub>1</sub> = 9.2 pK<sub>3</sub> = 10.9</p>	<p>H<sub>4</sub>In<sup>-</sup> H<sub>3</sub>In<sup>2-</sup> H<sup>-</sup>In<sup>3-</sup></p>	<p>ม่วง-แดง ม่วง น้ำเงิน</p>	<p>เหลือง (กับ Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>) แดง (กับ Ca<sup>2+</sup>)</p>
<p>ไซลิโนลออกเร็นจ์</p>  <p>(H<sub>3</sub>In<sup>-</sup>)</p>	<p>pK<sub>1</sub> = 2.32 pK<sub>2</sub> = 2.85 pK<sub>3</sub> = 6.70 pK<sub>4</sub> = 10.47 pK<sub>5</sub> = 12.23</p>	<p>H<sub>3</sub>In<sup>-</sup> H<sub>2</sub>In<sup>2-</sup> H<sub>2</sub>In<sup>3-</sup> H<sub>2</sub>In<sup>4-</sup> HIn<sup>5-</sup> In<sup>6-</sup></p>	<p>เหลือง เหลือง เหลือง ม่วง ม่วง ม่วง</p>	<p>แดง</p>

### ประโยชน์ของวิธีการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน EDTA

สารละลายมาตรฐาน EDTA นำมาใช้ในการไทเทรตอย่างกว้างขวางดังที่กล่าวมาแล้ว สำหรับการไทเทรตเพื่อหาปริมาณ Mg และ Ca โดยใช้ EDTA ก็เป็นวิธีที่นิยมใช้กันเพราะเป็น วิธีที่ง่ายและสะดวกกว่าวิธีอื่น

## 2.7 การหาความกระด้างของน้ำ [9]

### 2.7.1 การหาปริมาณของแมกนีเซียม

นำสารละลายที่จะหาปริมาณของ Mg<sup>2+</sup> มาเติมสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อควบคุม pH ของ สารละลายให้เท่ากับ 10 โดยใช้สารละลาย NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub>Cl เดิมอีรีโอที 2-3 หยด ไทเทรต

### 2.7.2 การหาปริมาณของแคลเซียม

การหาปริมาณของแคลเซียม มี 2 แบบ คือ

1. การหาปริมาณของ Ca<sup>2+</sup> โดยไม่มี Mg<sup>2+</sup> เจือปนอยู่ด้วย ให้นำสารละลายนั้นมาเติม สารละลายบัฟเฟอร์ให้มี pH เท่ากับ 10 แล้วเติมอีรีโอที 2-3 หยด จากนั้นนำสารละลายไป ไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA ที่ผสม Mg<sup>2+</sup> ที่ทราบปริมาณจำนวนเล็กน้อยปนอยู่ด้วย เพื่อให้ Mg<sup>2+</sup> ทำปฏิกิริยากับอินดิเคเตอร์ Ca<sup>2+</sup> จะทำปฏิกิริยากับ EDTA ได้ CaY<sup>2-</sup> ที่เสถียรมากกว่า MgY<sup>2-</sup> นอกจากนั้น Ca<sup>2+</sup> บางส่วนยังเกิดปฏิกิริยากับ MgY<sup>2-</sup> ที่มีอยู่ในไทเทรนต์ด้วย ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Mg^{2+}$  จะทำปฏิกิริยากับอีริโอที



หลังจุดสมมูลแล้ว หยดต่อไปของ EDTA ซึ่งมากเกินไปจะทำปฏิกิริยากับ  $MgIn^-$  ให้อินดิเคเตอร์อิสระออกมา ซึ่งมีสีน้ำเงิน เมื่อนำจำนวน  $Mg^{2+}$  เล็กน้อยที่เติมลงไป ไปลบออกก็จะทราบปริมาณของ EDTA ที่ใช้ไทเทรตหาปริมาณของ  $Ca^{2+}$

2) การหาปริมาณของ  $Ca^{2+}$  อย่างเดียว ทำได้โดยนำสารละลายตัวอย่างมาทำให้เป็นเบสที่มี pH เท่ากับ 12 ด้วยสารละลาย NaOH แล้วเติมเมอร์แคปไซด์เป็นอินดิเคเตอร์ นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐาน EDTA จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีม่วง หรืออาจใช้แคลซิน (calcein) เป็นอินดิเคเตอร์ซึ่งที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองอมเขียวเป็นสีน้ำตาล

วิธีการหาปริมาณ  $Ca^{2+}$  วิธีนี้ ถ้าหากมีไอออนของ Mg และ Al ปริมาณไม่มากจนเกินไปนักเจือปนอยู่ จะไม่มีผลกระทบต่อการศึกษาปริมาณ  $Ca^{2+}$

### 2.7.3 การหาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียม

เป็นการหาปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีอยู่ในตัวอย่างชนิดเดียวกัน ทำได้โดยเติมสารละลายบัฟเฟอร์  $NH_3/NH_4Cl$  ลงในสารละลายตัวอย่างให้มี pH เป็น 10 แล้วไทเทรตโดยใช้สารละลายมาตรฐาน EDTA มีอีริโอทีเป็นอินดิเคเตอร์

การหาความกระด้างของน้ำจะใช้วิธีวิเคราะห์นี้ โดยหาปริมาณของไอออนของโลหะที่มี ประจุตั้งแต่ +2 ขึ้นไป โดยทั่วไปจะเป็น  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  ซึ่งคำนวณหาปริมาณเป็นมิลลิกรัม ของ  $CaCO_3$  ที่มีจำนวนโมล เท่ากับจำนวนโมลของ ไอออนของ โลหะที่เป็นสาเหตุแห่งความ กระด้างของน้ำ 1 L เรียกหน่วยความกระด้างนี้ เป็น ppm

วิธีวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำทำได้โดยนำน้ำกระด้างที่มีทั้ง  $Ca^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  มาไทเทรตกับ EDTA ก่อนไทเทรตเติมสารละลายบัฟเฟอร์ให้มี pH เท่ากับ 10 แล้วเติมอีริโอที เป็นอินดิเคเตอร์ อินดิเคเตอร์ จะทำปฏิกิริยากับ  $Mg^{2+}$  เกิดเป็น  $MgIn^-$  ที่มีความเสถียรน้อยกว่า  $MgY^{2-}$  หลังจากที  $Ca^{2+}$  อยู่ในรูปไอออนเชิงซ้อนหมดแล้ว คือ  $CaY^{2-}$  สารละลาย EDTA ที่เติม ลงไปจะไปแทนที่อินดิเคเตอร์ใน  $MgIn^-$  ให้อินดิเคเตอร์อิสระออกมา ซึ่งมีสีน้ำเงิน แต่ถ้ามี ตัวอย่างที่มีไอออนของ โลหะซึ่งเป็นสารรบกวนเจือปนอยู่ด้วย เช่น ไอออนของ Cu, Fe, Al และ Mn ให้ใช้ มาสกิงเอเจนต์ได้แก่ KCN และกรดแอสคอร์บิก ยกเว้น ไอออนของ Al ให้เติมสารละลายไตรเอทานอลามีน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณความกระด้างของน้ำใช้สูตรดังนี้

$$\text{ความกระด้างทั้งหมด (ppm)} = \frac{(V_{\text{EDTA}} / 1000) (C_{\text{EDTA}}) (f_w \text{CaCO}_3) (1000)}{V_{\text{sample}}}$$

เมื่อ V เป็นปริมาตร หน่วย mL

C เป็นความเข้มข้น หน่วย mol/L

## 2.8 ปัญหาต่างๆที่เกิดจากน้ำกระด้าง [15]

1. ทำให้เกิดตะกอนในหม้อน้ำ เครื่องทำความร้อน ท่อน้ำร้อน เครื่องใช้ในครัว ฯลฯ
2. เกิดตะกอนแข็งเกาะติดผิววัสดุต่าง ๆ เมื่อได้รับความร้อนพอเพียง
3. ทำให้การซักฟอกไม่มีฟอง เกิดความสิ้นเปลืองน้ำมากกว่าปกติ ในขณะที่อาบน้ำฟองสบู่เกิดได้ยาก
4. หากเป็นน้ำดื่มจะมีรสแปลกไปสำหรับผู้บริโภคที่ยังไม่คุ้นรส
5. เกิดสีเหลืองติดบนเสื้อผ้าหากซักล้างด้วยความร้อน

## 2.9 ประโยชน์ของแคลเซียมและแมกนีเซียม [10]

ในน้ำที่มีความกระด้างเท่ากับว่ามีแคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่ด้วย ซึ่งถ้าร่างกายบริโภคน้ำที่มีความกระด้างเล็กน้อยก็จะได้รับแคลเซียมและแมกนีเซียมด้วย จะมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

1. น้ำประปาจะยอมให้ความกระด้างสุดท้ายอยู่ในช่วง 70 ถึง 120 mg/l asCaCO<sub>3</sub> เพื่อป้องกันการกัดกร่อนในเส้นท่อ

2. ประโยชน์ในการซักล้างช่วยไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองน้ำในการซักล้าง  
แคลเซียม

1. ป้องกันโรคหัวใจ กล้ามเนื้อหัวใจมีความไวเป็นพิเศษต่อการขาดแคลเซียม ถ้าร่างกายขาดแคลเซียม จะทำให้หัวใจทำงานหนักอาจเกิดโรคหัวใจได้

2. ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง(Co-Factor)ให้กับเอนไซม์หลายชนิดในร่างกายมนุษย์

3. ช่วยรักษาสมดุลกรดด่างในร่างกาย

4. ช่วยป้องกันการเกิดโรคกระดูกพรุน

แมกนีเซียม

1. แมกนีเซียมจะทำงานร่วมกับแคลเซียมในการหดตัวและคลายตัวของกล้ามเนื้อ

2. ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง(Co-Factor)ให้กับเอนไซม์ ซึ่งมีหน้าที่เผาผลาญอาหาร แป้ง น้ำตาลและไขมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เป็นองค์ประกอบของเลซิติน(Lecitin) ปกป้องไม่ให้คอเลสเตอรอลในเลือดสูงขึ้น
4. ป้องกันการเกิดนิ่วเนื่องจากการจับตัวของแคลเซียมออกซาเลต (Calcium Oxalate) ในไตและในถุงน้ำดี

## 2.10 ผลกระทบต่อสุขภาพของความกระด้าง [10]

ความกระด้างไม่มีผลเชิงลบต่อสุขภาพ ผู้บริโภคมักได้รับข้อมูลไม่ถูกต้องจากผู้ขายเครื่องกรองน้ำว่าจะทำให้เกิดตะกอนในร่างกายโดยเฉพาะในไตทำให้เป็นนิ่วได้ ความจริงคือความกระด้างมีสารแคลเซียมและแมกนีเซียมซึ่งเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพดังที่กล่าวข้างต้น และอุณหภูมิในร่างกาย 37 องศาเซลเซียสไม่เพียงพอให้ความกระด้างเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนการเป็นนิ่วเกิดจากกระบวนการเผาผลาญในร่างกาย (Metabolism) ผิดปกติจากการได้รับสารอาหารไม่สมดุล

## 2.11 เครื่องยิวี - วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [11]

ใช้ในการตรวจหาชนิดและปริมาณของสาร โดยใช้หลักการที่ว่า สารแต่ละชนิดจะสามารถดูดกลืนรังสีได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน และปริมาณการดูดกลืนรังสีขึ้นกับความเข้มข้นของสารนั้น

### 2.11.1 Beer's Law

$$A = abc = \log P_0/P = -\log T$$

A = Absorbance

เมื่อ a = absorptivity

b = ความกว้างของ cell (cm)

c = concentration (g/l)

P<sub>0</sub> = ความเข้มของรังสีก่อนผ่านตัวกลาง

P = ความเข้มของรังสีหลังผ่านตัวกลาง

T = Transmittance

### 2.11.2 องค์ประกอบของเครื่อง

#### 1. แหล่งกำเนิดแสง

ต้นกำเนิดแสงที่ใช้ในงานทางสเปกโตรโฟโตเมทรีนั้น ควรจะต้องมีลักษณะดังนี้

1. จะต้องให้ลำแสง (Beam of radiation) ที่มีกำลังพอที่วัดได้ด้วยมาตรแสง (Photometer)
2. จะต้องให้การแผ่รังสี (Radiation) ออกมาตลอดเวลาในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ

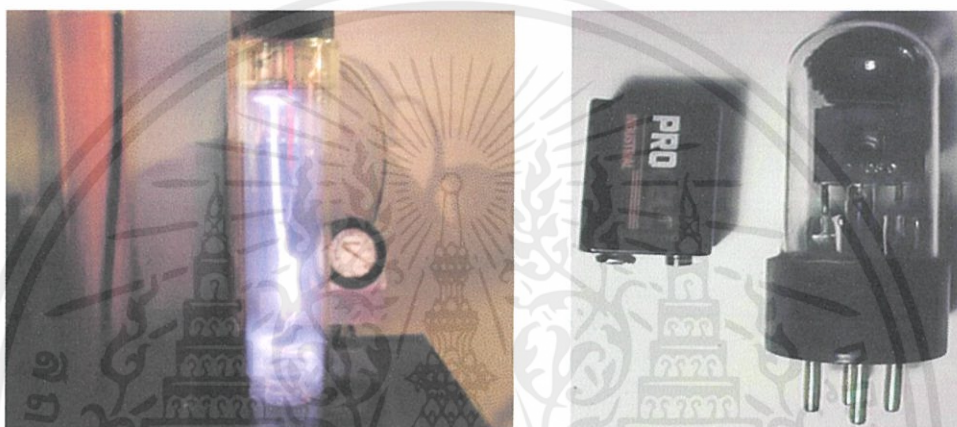
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จะต้องให้การแผ่รังสีที่คงที่ตลอดเวลา นั่นคือ Po ต้องคงที่ มิฉะนั้นแล้วผลของการวิเคราะห์จะไม่แม่นยำหรือไม่มีความเที่ยง

สำหรับเครื่องยูวี - วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์นั้น ต้นกำเนิดแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นหลอดไฮโดรเจน (Hydrogen lamp) หรือหลอดดีวเทอเรียม (Deuterium lamp) ให้แสงอยู่ช่วงความยาวคลื่น 185 ถึง 375 nm

(ก) Hydrogen lamp

(ข) Deuterium lamp



รูปที่ 9 แสดงแหล่งกำเนิดแสง (ก) Hydrogen lamp (ข) Deuterium lamp [12]

หลอดทังสเตน (Tungsten filament lamp) มีลักษณะคล้ายหลอดไฟธรรมดา โดยใช้ไส้หลอดเป็นทังสเตน เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไป ลวดทังสเตนจะถูกเผาให้ร้อน และเปล่งแสงออกมาให้อยู่ในช่วง 320 – 2500 nm ถ้าใช้อุณหภูมิสูงขึ้น ลักษณะของสเปกตรัมจะเคลื่อนที่ไปทางความยาวคลื่นสั้นมากขึ้น แต่อายุหลอดก็สั้นเข้าเช่นเดียวกัน จึงปรับปรุงหลอดให้มีความยาวขึ้นโดยใส่แก๊สไอโอดีนเข้าไปในหลอดที่ทำด้วย fused silica เรียกว่า หลอดควอร์ตซ์-ฮาโลเจน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน

นอกจากนั้นยังมีหลอดอื่นๆ ได้แก่ หลอดไอปรอท (Mercury-vapor lamp) มีความดันต่ำให้แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 365 nm ซึ่งไม่ค่อยนิยมใช้กับเครื่องยูวีอีกชนิดหนึ่งคือหลอดซีนอน (Xenon arc lamp) หลอดชนิดนี้เป็นหลอดที่ให้ความเข้มของแสงสูง โดยให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าผ่านบรรยากาศของซินอนจะได้ Continuous spectrum อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 250 – 600 nm แต่จะให้ความเข้มสูงที่สุดที่ความยาวคลื่น 500 nm ซึ่งหลอดชนิดนี้จะไม่ค่อยนิยมใช้ในเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## 2. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ส่วนประกอบที่ถือว่าเป็นหัวใจของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพราะเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสง โดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งพอลิโครเมติก (คือแสงที่ประกอบด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ) ให้เป็นแสงโมโนโครเมติกซึ่งเป็นแถบแสงแคบ ๆ ความจริงโมโนโครเมเตอร์จะประกอบไปด้วย

2.1 ช่องที่ปล่อยให้แสงเข้า (Entrance slit) เพื่อให้แสงเข้ามาแรงพอที่จะผ่านออกไปยังสารตัวอย่าง โดยติดต่อกันที่แสงผ่าน ดังนั้นความกว้างของสลิตจึงมีส่วนสำคัญ

2.2 กระจกและเลนส์ (Mirror และ lens) เพื่อใช้ทำให้แสงเกิดการสะท้อนไปมาในเครื่องบางครั้งทำให้แสงเกิดการรวมกัน ทั้งนี้เพื่อช่วยในการลดขนาดของเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้เล็กลง และบางครั้งทำให้แสงกลายเป็นลำแสงขนาน

2.3 ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ กันเพื่อให้เหมาะแก่การเลือกใช้หรืออาจเป็นส่วนที่ตัดแสงบางช่วงออกไปให้เหลือเฉพาะช่วงคลื่นแสงที่ต้องการอุปกรณ์ ส่วนนี้อาจประกอบไปด้วย

2.3.1 ฟิลเตอร์ (Filters) จัดว่าเป็นโมโนโครมาเตอร์ที่ง่ายที่สุด ซึ่งอาจประกอบไปด้วยกระจกสีต่างๆ ฟิลเตอร์ชนิดนี้จะให้ความกว้างแถบคลื่นแสงขนาด 25 nm หรือมากกว่านี้ ฟิลเตอร์ที่ใช้กัน มีอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า อินเตอร์เฟรนฟิลเตอร์ โดยเป็นฟิลเตอร์ที่ฉาบด้วยสารที่มีค่าดัชนีการหักเหต่ำและเป็นพวกไดอิเล็กทริก เช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ แล้วฉาบด้วยเงินบางๆ เพื่อให้แสงผ่านได้บางส่วน และประกอบด้วยกระจกเป็นแบบแซนวิชอีกครึ่งหนึ่ง ฟิลเตอร์นี้จะยอมให้แสงผ่านออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตามความยาวของแผ่นประมาณ 50 % เท่านั้น และความกว้างของแถบคลื่นแสงประมาณ 10 nm ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันแล้ว

2.3.2 ปริซึม (Prism) แสงจากต้นกำเนิดแสงเมื่อมาตกกระทบกระจก จะกลายเป็นลำแสงขนาน แล้วไปตกบนปริซึม แสงจะเกิดการหักเหแล้วสะท้อนกลับผ่านปริซึมอีกครั้ง จะช่วยทำให้แสงเกิดการกระจายไปเป็นความยาวคลื่นต่างๆ กัน แล้วทำให้เกิดโฟกัสใหม่ โดยให้แสงตกกระทบกระจก M2 ทำให้สามารถเลือกใช้แสงที่ความยาวคลื่นที่ต้องการได้โดยใช้กระจกราบและช่องแสงออก โดยทั่วไปในการออกแบบเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์มักนิยมใช้การหมุนปริซึมให้แสงที่ต้องการผ่านช่องทางแสงออกเลย แทนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลื่อนช่องแสงออก ปริซึมโมนโครเมเตอร์ทำงานได้ดีกว่าฟิลเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกใช้แสงขนาด Half band-width 1 nm หรือน้อยกว่าได้

2.3.3 เกรตติง (Grating) ในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สมัยใหม่ล้วนใช้เกรตติงเป็นส่วนกระจายแสงทั้งสิ้น เกรตติงที่ใช้มีอยู่ 2 แบบ

1. ทรานสมิชันเกรตติง (Transmission grating) ด้วยวัสดุโปร่งใสเพื่อให้แสงผ่านได้เป็นกระจกแล้วนำมาขีดให้ร่องขนานกัน จำนวนร่องต่อมิลลิเมตรมีมากน้อยได้แตกต่างกัน เกรตติงชนิดนี้ไม่ค่อยนิยมใช้แล้ว

2. รีเฟล็กชันเกรตติง (Reflection grating) หรือเกรตติงแบบสะท้อนแสง เป็นเกรตติงที่ใช้การสะท้อนแสง ดังนั้นผิวหน้าของร่องวัสดุที่ใช้ทำจะต้องเรียบและสะท้อนแสงได้ เกรตติงที่ใช้ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลควรจะต้องมีจำนวนร่อง 300 – 2000 ร่อง (ป) ต่อมิลลิเมตร แต่ที่ใช้กันทั่วไปจะอยู่ในราว 1200 ร่องต่อมิลลิเมตร เนื่องจากการทำร่องซึ่งจะต้องให้เหมือนกันทุกร่องและขนานกันสมัยก่อนทำได้ยาก จึงมีราคาสูง แต่ในปัจจุบันได้ใช้เทคนิคทาง ฮอโลกราฟี แล้วใช้วัสดุเป็นพวกพลาสติกหรือเรซินหล่อจากต้นแบบ (Replica) ฉาบด้วยอะลูมิเนียมบางๆ จึงทำได้ง่าย

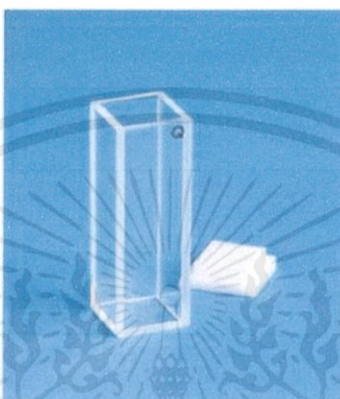
2.3.4 ช่องแสงออก (Exit slit) เป็นส่วนที่จะปล่อยให้แสงที่ผ่านสารตัวอย่างแล้วผ่านไปยังมาตรวัดแสง ตลอดจนเป็นส่วนที่ช่วยตัดแสงที่รบกวนออกอีกด้วย โดยทั่วไปช่องแสงเข้าแสงออกมักจะเปิดเท่ากันหรือสามารถปรับได้ตามต้องการ

ความกว้างของช่องแสงเป็นส่วนที่สำคัญที่แสดงถึงคุณภาพและการทำงานของเครื่องแสงโมนโครเมติกที่ผ่านออกไปจากโมนโครเมเตอร์จะมีแถบค่าแสงกว้างอย่างหนึ่ง ถ้าแสงโมนโครเมติกที่ความยาวคลื่น 500 nm แสงนี้จะประกอบด้วยแสงที่ความยาวคลื่น 497 nm ถึง 503 nm เมื่อแถบแสงกว้าง 3 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell Compartment)

เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบแล้วนำไปใส่สำหรับวัด ซึ่งส่วนนี้จะมีฝาปิดเพื่อ กันแสงจากภายนอกจะเข้าไปและถูกกั้นออกจากส่วนที่เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบแสงบางครั้งอาจ เรียกว่า คิวเวทท์ (Cuvettes) รูปแบบที่ใช้กันทั่วไปได้แก่



รูปที่ 10 แสดงภาพเซลล์ใส่สารตัวอย่าง

- เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา จะใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิล เพราะเนื้อแก้วธรรมดาถูกดูดกลืนแสง ในช่วงยูวีได้
- เซลล์ที่ทำด้วยซิลิกา และควอตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิลและยังมีเซลล์ที่มีกรดเป็น พิเศษเรียกว่า SpecialUVgrade

### 4. เครื่องวัดแสง (Radiation Detector)

เครื่องที่ใช้สำหรับวัดแสงนั้นมีด้วยกันหลายแบบซึ่งแต่ละแบบอาจแตกต่างกันบ้างที่ความกว้างของ ช่วงคลื่นที่สามารถตรวจสอบได้ ความเร็วของการตอบสนองต่อแสงสภาพไวของการรับแสง เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อต้องการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. เครื่องขยาย-แยกสัญญาณและประมวลผล

สัญญาณได้จากเครื่องวัดจะนำไปเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ขยายสัญญาณให้มากขึ้น หรืออาจเปลี่ยนสัญญาณ D.C. เป็น A.C. หรือ A.C. เป็น D.C. อาจมีการกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการออกไป หรือนำสัญญาณที่ได้ไปแยกออก (และเข้ากระบวนการทางคณิตศาสตร์) เข้าเครื่องอินทิเกรชัน หรือเปลี่ยนให้เป็น Log scale จากนั้นสัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นผลของการวิเคราะห์จึงได้เสนออกมามีหลายรูปแบบ โดยต่อเข้ากับ

5.1 มิเตอร์

5.2 ดิจิตอลมิเตอร์

5.3 เครื่องบันทึก เรคอร์ดเดอร์ หรือพรินเตอร์

5.4 เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์หรือไมโคร โปรเซสเซอร์

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. Saurina, E. Lopez-Aviles, A.L. Moal และ S. Hernández-Cassou [12] ได้ศึกษาการตรวจวัดหาปริมาณแคลเซียมและความกระด้างทั้งหมดในน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติโดยใช้วิธี potentiometric sensor array ซึ่งดำเนินการโดย sensor array ประกอบด้วยชุดของขั้วไฟฟ้าแบบเลือกจับไอออน (ISEs) สำหรับ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Li}^+$ , และ  $\text{H}^+$  โดยความเลือกเฉพาะของ  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ISEs จะไม่ดีถ้านำไปใช้กับแคทไอออนตัวอื่นๆเพราะอาจจะรบกวนการวิเคราะห์ แต่จะแก้ปัญหานี้ได้โดยใช้ array เพราะ ISEs แต่ละตัวจะสามารถเลือกแคทไอออนต่างชนิดกันได้ ข้อมูลของหลายตัวแปรในวิธีนี้สร้างขึ้นโดย sensor array จะทำให้ผลของข้อมูลการวิเคราะห์ที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องกับผลของวิธีมาตรฐาน (การไทเทรตเชิงซ้อน)

L.F. Capitán-Vallvey, M.D. Fernández-Ramos, P.A. de Cienfuegos, Gálvez และ F. Santoyo-González [14] ได้ทำการหาปริมาณความกระด้างของน้ำโดยศึกษาจากลักษณะของแถบทดสอบโปร่งใส โดยแถบทดสอบจะใช้กลไกการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งจะตอบสนองต่อ Mg และ Ca ได้ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถตรวจหาปริมาณความกระด้างของน้ำและอธิบายได้ แถบทดสอบโปร่งใสนี้ทำจากแผ่นพอลิเอสเตอร์โดยมีฟิล์มวงกลมของพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยจะบรรจุสารเคมีที่จำเป็นในกระบวนการ Mg และ Ca จะตอบสนองต่อไอโอโนฟอร์ (ionophore) ที่เป็นกลางเช่น 4,13-[bis(N-adamantylcarbamoyl)-acetyl]-1,7,10,16-tetraoxa-4,13-diazacyclooctadecane ซึ่งงานวิจัยนี้จะประเมินผลโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 655 nm และทุกตัวแปรจะมีผลต่อการตอบสนองของแถบสีเช่นความเลือกเฉพาะและเวลาในการตอบสนอง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองจะเป็นเส้นตรงเมื่อความกระด้างของน้ำถึง  $14,800 \text{ mg l}^{-1}$  และความสามารถในการวิเคราะห์ซ้ำคือ 7 % ข้อดีของวิธีนี้คือ รวดเร็ว ไม่แพง มีความเลือกเฉพาะ และใช้เครื่องมือที่ธรรมดา

I.S. Marta Ver'issimo, Jo'ao A.B.P. Oliveira และ M. Teresa S.R [15] ได้ศึกษาการหาปริมาณความกระด้างทั้งหมดในน้ำประปาโดยใช้การเซ็นเซอร์คลื่นเสียง ประโยชน์ของวิธีนี้คือ ควบคุมคุณภาพของน้ำที่ใช้ในครัวเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการใหม่ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับวิธีการไทเทรตแบบธรรมดา จะใช้วิธีการเคลือบผลึกเพียโซอิเล็กทริกควอตซ์ (piezoelectric quartz crystals) ด้วยเยื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ผสมกับพลาสติกไซเซอร์ (plasticizers) และ Mg หรือ Ca ซึ่งจะได้ผลความกระด้างของน้ำประปาในโปรตุเกสดังนี้ ใน Gouveia ( $9.4 \pm 0.8 \text{ mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) และ Vila Praia A'ncora ( $15 \pm 1 \text{ mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) ถือว่าเป็นน้ำอ่อน ใน Leiria ( $59 \pm 1 \text{ mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) กระด้างเล็กน้อย ใน Aveiro ( $74 \pm 1 \text{ mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) และ Esposende ( $104 \pm 1 \text{ mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) กระด้างปานกลาง ใน Tomar ( $225 \pm 1 \text{ mgL}^{-1} \text{ CaCO}_3$ ) กระด้างมาก ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือใช้สารเคมีน้อย ประหยัดเวลาและสารตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

##### 3.1.1 สารเคมี

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate ,CaCO<sub>3</sub>) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba
2. อีดีทีเอ (ethylene-diamine-tetra-acetic acid ,EDTA) เกรดคุณภาพวิเคราะห์
3. แมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium Sulphate ,MgSO<sub>4</sub>.7 H<sub>2</sub>O) เกรดคุณภาพวิเคราะห์
4. แอมโมเนียมคลอไรด์ (Ammonium Chloride ,NH<sub>4</sub>Cl) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ บริษัท Carlo erba
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxid ,NH<sub>4</sub>OH) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ บริษัท Fluka
6. เอริโอโอโครมแบล็กที (Eriochrome black T ,EBT) บริษัท Univar
7. Triethnolamine (TEA)
8. เอทานอล (Ethanol ,C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) เกรดคุณภาพวิเคราะห์
9. น้ำกลั่น (Distilled water)
10. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid ,HCl) เกรดคุณภาพวิเคราะห์
11. ไดโซเดียมอีดีทีเอ (disodium EDTA,Na<sub>2</sub>H<sub>2</sub>Y · 2H<sub>2</sub>O) เกรดคุณภาพวิเคราะห์ บริษัท Fluka

##### 3.1.2 อุปกรณ์

1. ขวดวัดปริมาตร
2. บีกเกอร์
3. ปิเปต
4. หลอดหยด
5. แท่งคนสาร
6. ช้อนตักสาร
7. เครื่องชั่งทศนิยม 5 ตำแหน่ง
8. เตาให้ความร้อน (hot plate)
9. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV1800 ยี่ห้อ SHIMADZU บริษัท BARA SCIEMIFIC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การเตรียมสารละลาย

#### 3.2.1 สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต 0.1 M

ชั่ง  $\text{CaCO}_3$  1 g แล้วเติม HCl เล็กน้อยจนกว่าจะละลาย จากนั้นเติมน้ำกลั่น 50 mL ต้มให้เดือด 2-3 นาที แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 mL

#### 3.2.2 สารละลาย บัฟเฟอร์ (pH 10)

ชั่งเกลือ  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1.179 g และ  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.78 g นำมาละลายในน้ำกลั่น 50 mL และเติม  $\text{NH}_4\text{Cl}$  16.9 g จากนั้นเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  143 mL ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 mL

#### 3.2.3 สารละลายมาตรฐาน EDTA 0.01 M

ชั่ง EDTA 3.723 g ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 1000 mL

#### 3.2.4 สารละลายเชิงซ้อน Mg EDTA 0.1 M

ชั่งเกลือ  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{Y} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  1.179 g และ  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.78 g นำมาละลายในน้ำกลั่น 50 mL และเติม  $\text{NH}_4\text{Cl}$  16.9 g จากนั้นเติม  $\text{NH}_4\text{OH}$  143 mL ผสมให้เข้ากัน ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 250 mL นำสารละลายที่เตรียมได้มา 30 mL แล้วหยดเอริโอโครมแบล็คที 2-3 หยด จะได้สารละลายสีน้ำเงินหรือม่วงแดง จะต้องปรับสารละลายที่ได้ไปอยู่ในสถานะที่ต้องการ 1 หยดของ 0.01 M EDTA แล้วจะเปลี่ยนจากม่วงแดงเป็นสีน้ำเงิน เติมน้ำกลั่นจนได้ Mg EDTA 0.1 M จากนั้นเจือจาง 10 เท่า

#### 3.2.5 สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที

ชั่งเอริโอโครมแบล็คที 1.5 g เติมนิโตรเอทานอล 5 mL และเอทานอล 15 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 100 mL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 วิธีการทดลองแบบมาตรฐาน

##### 3.3.1.1. หาคความเข้มข้นที่แน่นอนของ 0.01 EDTA

1. ชั่ง  $\text{CaCO}_3$  0.25 g เติม HCl เล็กน้อยจนกว่าจะละลาย ละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. ปิเปต  $\text{CaCO}_3$  มา 25 ml ลงในขวดรูปกรวยขนาด 250 ml เติมสารละลายบัฟเฟอร์ (pH 10) 5 mL และเอริโอโครมแบลคที 2-3 หยด
3. นำมาไทเทรตกับสารละลาย EDTA สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีอ่อนแดงเป็นสีน้ำเงินที่ไม่มีสีแดงปน
4. ทำซ้ำอีกครั้งแล้วคำนวณหาความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลาย EDTA

##### 3.3.1.2. หาคความกระด้างของน้ำ

1. ปิเปตตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ 100 mL ใส่ขวดรูปกรวยขนาด 250 mL เติมสารละลายบัฟเฟอร์ (pH 10) 5 mL และเอริโอโครมแบลคที 5-6 หยด
2. นำมาไทเทรตกับสารละลาย EDTA สีของสารละลายจะเปลี่ยนจากสีอ่อนแดงเป็นสีน้ำเงินที่ไม่มีสีแดงปน
3. ทำซ้ำอีกครั้งแล้วคำนวณหาความกระด้างของน้ำ

#### 3.3.2 วิธีการทดลองแบบสเปคโตรโฟโตเมทรี

##### 3.3.2.1. หาค่าการดูดกลืนแสงจากสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.0005, 0.005, 0.010, และ 0.015 M โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.1 M มา 0.5, 5, 10 และ 15 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเติมอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที 5 mL Mg EDTA 10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.0005, 0.005, 0.010, และ 0.015 M ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Set auto zero ด้วยน้ำกลั่น
3. เทสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตเข้มข้น 0.0005 ลงใน Cuvette ทำการสแกนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 400-800 nm
4. ทำซ้ำข้อ 3 โดยเปลี่ยนความเข้มข้น สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตเข้มข้น เข้มข้น 0.005, 0.010, และ 0.015 M ตามลำดับ
5. นำสเปกตรัมที่ได้หาค่าการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ติดตามค่าความกระด้างของน้ำ

### 3.3.2.2. หาค่าการดูดกลืนแสงจากสารตัวอย่าง

1. ปิเปิดตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ มา 20 ml ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเติมอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที 5 mL Mg EDTA 10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. Set auto zero ด้วยน้ำกลั่น
3. เทสารตัวอย่างลงใน Cuvette ทำการสแกนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 400-800 nm
5. นำสเปกตรัมที่ได้หาค่าการดูดกลืนแสงเพื่อใช้ติดตามค่าความกระด้างของน้ำ

### 3.3.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง

1. ช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$ 
  - 1.1 ปิเปิดสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  มา 0, 0.5, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75 mL ตามลำดับใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเติมอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที 5 mL Mg EDTA 10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจะได้สารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  เข้มข้น 0.00, 0.0005, 0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.030, 0.040, 0.050, 0.075 M ตามลำดับ
  - 1.2 เทสารตัวอย่างลงใน Cuvette ทำการสแกนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 400-800 nm
  - 1.3 นำสเปกตรัมที่ได้หาค่าการดูดกลืนแสงเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานหาช่วงความเข้มข้น ของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ความเข้มข้นของอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คที

2.1 ปิเปตสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบล็คทีที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.5 มาเจือจางโดยปิเปตมา 10, 4, 2, 1.3 mL จะได้เอริโอโครมแบล็คทีที่เจือจาง 10, 25, 50, 75 เท่าตามลำดับ

2.2 เตรียมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 M นำเอริโอโครมแบล็คทีที่เจือจาง 10 เท่าเติมลงไป 5 mL และ  $\text{MgEDTA}$  10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2.3 ทำการสแกนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 400-800 nm บันทึกค่าการดูดกลืนแสง เปลี่ยนเอริโอโครมแบล็คทีที่ความเข้มข้นอื่นๆ โดยทำเหมือนกันทุกขั้นตอน นำกราฟค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณของเอริโอโครมแบล็คทีเปรียบเทียบเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทดลอง

## 3. ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{MgEDTA}$

3.1 เตรียมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ความเข้มข้น 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 M นำ เอริโอโครมแบล็คทีที่เจือจาง 10 เท่าเติมลงไป 5 mL ไม่เติม  $\text{MgEDTA}$

3.2 ทำการสแกนสเปกตรัมที่ความยาวคลื่น 400-800 nm บันทึกค่าการดูดกลืนแสงจากนั้นเปลี่ยนปริมาณของ  $\text{MgEDTA}$  ที่เติมเป็น 5, 10, 15, 20 mL ทำเหมือนกันทุกขั้นตอน นำกราฟค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณของ  $\text{MgEDTA}$  เปรียบเทียบเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมในการทดลอง

### 3.3.3 ทดสอบความใช้ได้ของวิธีหาความกระด้างของน้ำโดยวิธีทางสเปกโตรเมตรี โดยศึกษาดังนี้

- ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Regression)
- ชีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)
- ชีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ (LOQ)
- ความเที่ยง (Precision)
- ความแม่นยำ (Accuracy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

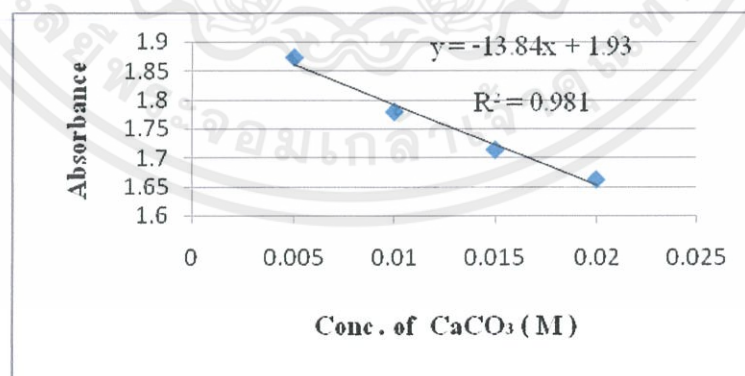
โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาความกระด้างของน้ำโดยใช้วิธีการไทเทรต เป็นวิธีมาตรฐานเปรียบเทียบกับวิธีที่พัฒนาขึ้นคือวิธีวัดการดูดกลืนแสงโดยวิธีสเปกโทรโฟโตเมตรีและเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสง

#### 4.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต( $\text{CaCO}_3$ )

##### 4.1.1 การศึกษาหาปริมาณเอริโอโครมแบล็คที่ที่เหมาะสมต่อการทดลอง

ตารางที่ 5 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสภาวะที่เติมเอริโอโครมแบล็คความเข้มข้น 0.05%w/v

เอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.05 %w/v		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	535	1.872
0.010	535	1.779
0.015	535	1.714
0.020	535	1.663

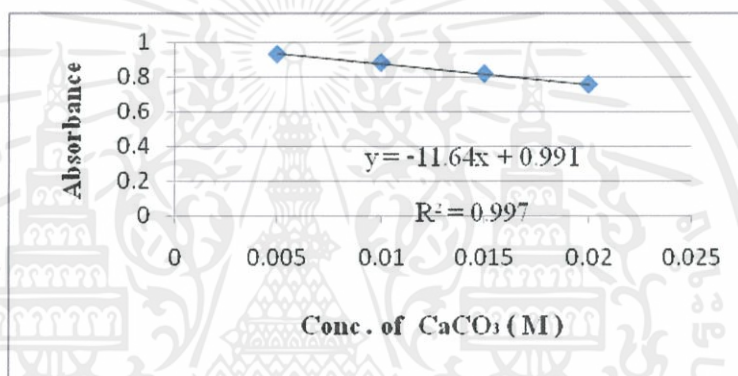


รูปที่ 11 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ  $\text{CaCO}_3$  (M) กับค่าการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยและพัฒนาทรัพยากรน้ำใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.0184 %w/v

เอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.0184 %w/v		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	550	0.929
0.010	548	0.880
0.015	545	0.817
0.020	540	0.756

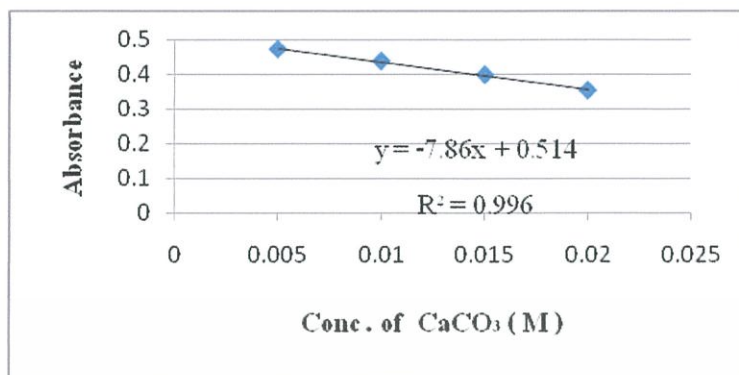


รูปที่ 12 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ  $\text{CaCO}_3$  (M) กับค่าการดูดกลืนแสง ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.0184 %w/v

ตารางที่ 7 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.0092 %w/v

เอริโอโครมแบล็คที่เข้มข้น 0.0092 %w/v		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	550	0.472
0.010	548	0.438
0.015	547	0.399
0.020	545	0.354

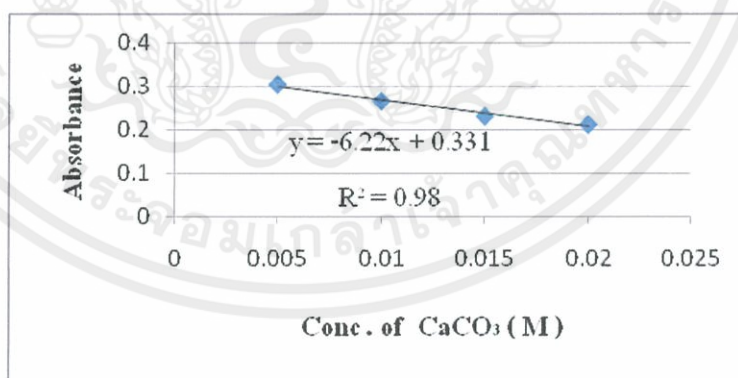
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ  $\text{CaCO}_3$  (M) กับค่าการดูดกลืนแสง  
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0092 %w/v

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น  
0.0069 %w/v

เอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0069 %w/v		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	549	0.304
0.010	548	0.266
0.015	547	0.231
0.020	546	0.212

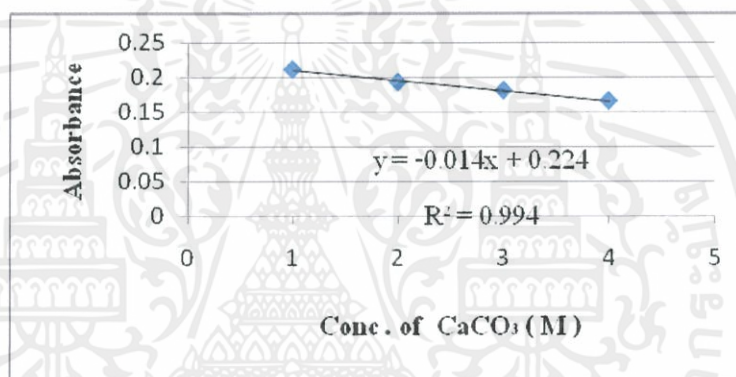


รูปที่ 14 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ  $\text{CaCO}_3$  (M) กับค่าการดูดกลืนแสง  
ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0069 %w/v

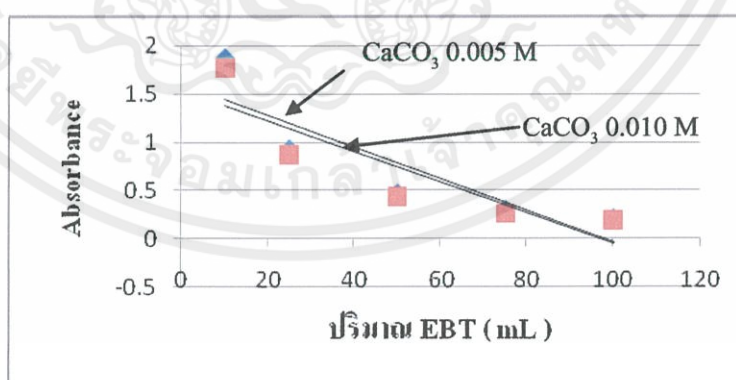
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0046 %w/v

เอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0046 %w/v		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	536	0.211
0.010	536	0.193
0.015	543	0.181
0.020	543	0.166



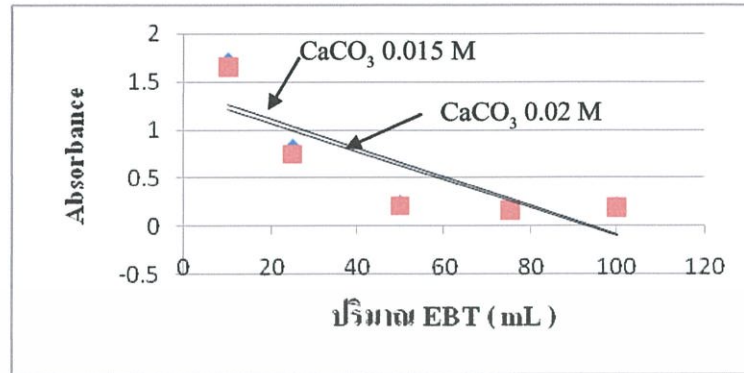
รูปที่ 15 กราฟมาตรฐานระหว่างค่าความเข้มข้นของ  $\text{CaCO}_3$  (M) กับค่าการดูดกลืนแสง ในสถานะที่เติมเอริโอโครมแบล็คทีเข้มข้น 0.0046 %w/v



รูปที่ 16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมแบล็คทีปริมาณต่างๆที่เติมลงใน

สารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M และ  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมเบิ้ล็คที่ปริมาตรต่างๆที่เติมลงในสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.015 M และ  $\text{CaCO}_3$  0.02 M

ในการทดลองนี้เลือกใช้เอริโอโครมเบิ้ล็คที่ที่เจือจาง 10 เท่า (เข้มข้นมากที่สุดของช่วงการทดลอง) เหตุผลเพราะในการทดลองนี้ต้องการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ในช่วงกว้าง ซึ่งถ้าเลือกใช้เอริโอโครมเบิ้ล็คที่ที่เจือจางมาก (ความเข้มข้นต่ำ) จะทำให้วัดค่าการดูดกลืนแสงได้ในช่วงแคบ

#### 4.1.2 การศึกษาหาปริมาณแมกนีเซียมอดีทีเอที่เหมาะสมต่อการทดลอง

ตารางที่ 10 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอดีทีเอ

ไม่เติมแมกนีเซียมอดีทีเอ		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	554	0.764
0.010	558	0.630
0.015	549	0.593
0.020	542	0.590

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสภาวะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 5 mL.

เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 5 mL.		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	550	0.929
0.010	548	0.880
0.015	545	0.817
0.020	540	0.756

ตารางที่ 12 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสภาวะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 10 mL.

เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 10 mL.		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	535	0.958
0.010	535	0.882
0.015	535	0.835
0.020	535	0.784

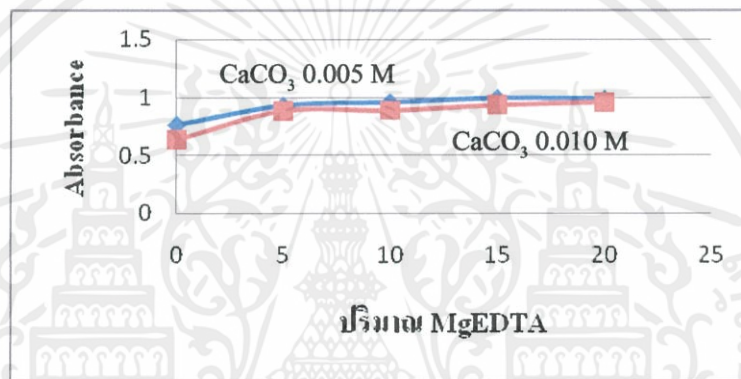
ตารางที่ 13 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสภาวะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 15 mL.

เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 15 mL.		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	548	0.994
0.010	546	0.930
0.015	535	0.728
0.020	535	0.685

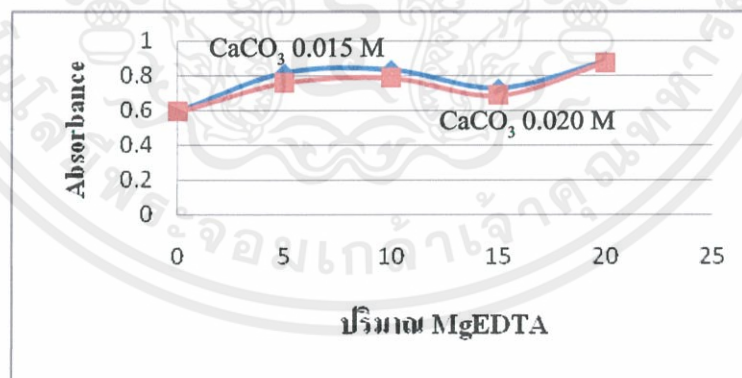
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 20 mL.

เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ 20 mL.		
ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$	$\lambda_{\text{max}}$	Absorbance
0.005	549	0.987
0.010	546	0.953
0.015	543	0.882
0.020	542	0.871



รูปที่ 18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  0.005 M กับ  $\text{CaCO}_3$  0.010 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน

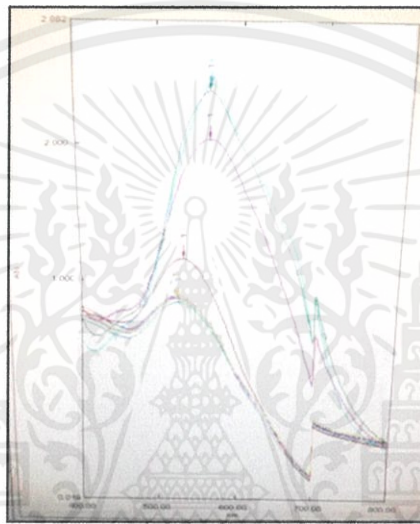


รูปที่ 19 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ  $\text{CaCO}_3$  0.015 M กับ  $\text{CaCO}_3$  0.020 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 18 และ 19 จะเห็นได้ว่าการเติมแมกนีเซียมอีดีทีเอในช่วง 5 , 10 , 15 และ 20 mL จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ได้ทำให้ผลการทดลองต่างกันมากนักแต่การทดลองนี้เลือกเติมแมกนีเซียมอีดีทีเอที่ 10 mL เพราะอยู่ในช่วงกลางเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการปิเปตมากหรือน้อยเกินไปซึ่งจะอยู่ในช่วงที่แก้ไขได้

#### 4.1.3 การศึกษาหาปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่เหมาะสมต่อการทดลอง



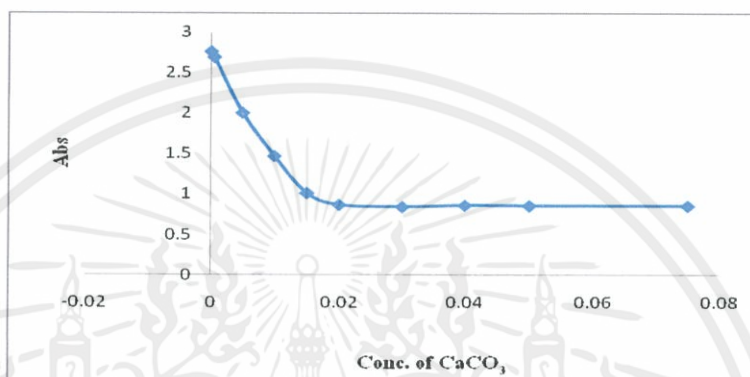
รูปที่ 20 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M

ตารางที่ 15 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M

ความเข้มข้นของ $\text{CaCO}_3$ (M)	$\lambda_{\text{max}}$	Abs.
0.0000	567	2.76
0.0005	566	2.69
0.005	563	2.001
0.010	563	1.468
0.015	531	1.012
0.020	524	0.867

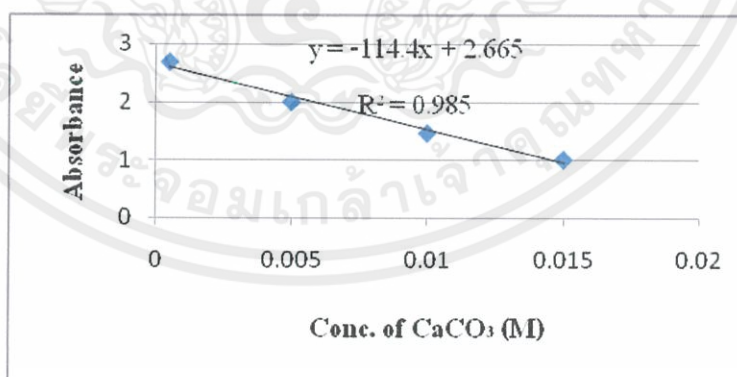
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาน่าสนใจ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ทรงที่มีการนำไปใช้

0.030	524	0.842
0.040	521	0.860
0.050	524	0.856
0.075	521	0.855



รูปที่ 21 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M

จากรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าช่วงความเข้มข้นที่ 0.0005-0.015 M เป็นช่วงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงครอบคลุมช่วงค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกช่วงความเข้มข้นนี้มาวิเคราะห์ เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานจะให้  $r^2 = 0.9859$  ซึ่งถือว่ามีความเป็นเส้นตรงที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 21



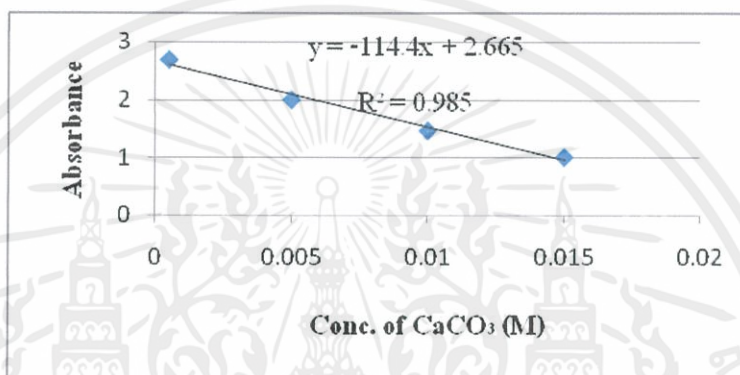
รูปที่ 22 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ทดสอบความใช้ได้ของวิธีหาความกระด้างของน้ำโดยวิธีทางสเปกโตรโฟโตเมทรี

### 4.2.1 ช่วงความเป็นเส้นตรง (Linear Regression)

หาค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตในช่วงความเข้มข้น 0.0005, 0.005, 0.01, 0.015 M และนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต (แกน X) และค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y) จะได้กราฟมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของสารมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต และค่าการดูดกลืนแสง

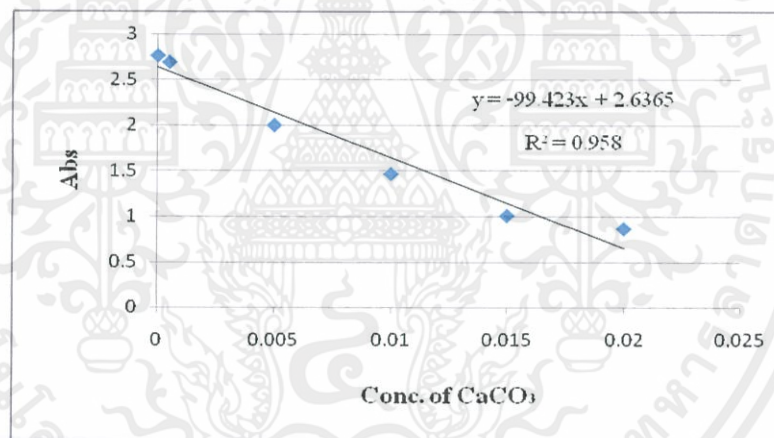
จากกราฟมาตรฐานจะพบว่าช่วงความเข้มข้น 0.0005-0.015 M จะให้  $R^2 = 0.985$  ซึ่งถือว่าเป็นค่าความเป็นเส้นตรงที่ดี เพราะฉะนั้นจะสามารถนำวิธี spectrophotometry มาใช้ในการหาค่าความกระด้างของน้ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD)

ตารางที่ 16 แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  และค่าการดูดกลืนแสง

Concentration of $\text{CaCO}_3$	Abs
0.0000	2.76
0.0005	2.69
0.005	2.0
0.010	1.46
0.015	1.01
0.020	0.86



รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  และค่าการดูดกลืนแสง

คำนวณขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดจากสูตร  $\text{LOD} = Y_B + 3S_B$  โดยที่  $S_B = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - Y)^2}{n-2}}$  จะได้

$\text{LOD} = 6.2 \text{ mg/L}$  หมายความว่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดความกระด้างของน้ำคือ  $\text{LOD} = 6.2 \text{ mg/L}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 ขีดจำกัดต่ำสุดของการหาปริมาณ(LOQ)

คำนวณขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจวัดจากสูตร  $LOQ = Y_B + 10S_B$  โดยที่  $S_B = \sqrt{\sum \frac{(Y_i - Y)^2}{n-2}}$  จะได้

$LOQ = 177$  mg/L หมายความว่าขีดจำกัดต่ำสุดในการตรวจหาปริมาณความกระด้างของน้ำคือ 177 mg/L

#### 4.2.4 ความเที่ยง ( Precision )

การทดสอบความเที่ยงจะใช้ค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) ในการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ } \%RSD = \frac{SD}{\bar{X}}$$

ผลการคำนวณดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 17 แสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำคลอง

ตัวอย่างน้ำคลอง	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	%RSD
ขวดที่ 1	0.0036	0.0037	4.27
ขวดที่ 2	0.0039		
ขวดที่ 3	0.0037		

ตารางที่ 18 แสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำบาดาล

ตัวอย่างน้ำ บาดาล	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	%RSD
ขวดที่ 1	0.000013	0.000014	7.1
ขวดที่ 2	0.000015		
ขวดที่ 3	0.000014		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 19 แสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำดื่ม

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	%RSD
ขวดที่ 1	0.000010	0.000010	7.07
ขวดที่ 2	0.000010		
ขวดที่ 3	0.000011		

ตารางที่ 20 แสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำประปา

ตัวอย่างน้ำประปา	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	%RSD
ขวดที่ 1	0.0012	0.0012	5.9
ขวดที่ 2	0.0013		
ขวดที่ 3	0.0012		

ตารางที่ 21 แสดงค่า % RSD ของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ

ตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	%RSD
ขวดที่ 1	0.0017	0.0020	13.23
ขวดที่ 2	0.0021		
ขวดที่ 3	0.0022		

จากตารางด้านบนพบว่า %RSD ของตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆเมื่อใช้วิธี spectrophotometry อยู่ในช่วง 4.7-13.23 % ซึ่งถือว่าค่าการเบี่ยงเบนไม่มากเกินไป ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาใหม่มาเป็นเทคนิคที่มีความเที่ยง ซึ่งสามารถนำไปใช้หาความกระด้างของน้ำได้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ความแม่นยำ (Accuracy)

ตารางที่ 22 แสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำคลองเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M

ตัวอย่างน้ำคลอง	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	Hardness (mg/L)	% Recovery
ขวดที่ 1	2.253	0.0036	0.0037	370.00	113
ขวดที่ 2	2.219	0.0039			
ขวดที่ 3	2.242	0.0037			

ตารางที่ 23 แสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M

ตัวอย่างน้ำจากตึก พระเทพ	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	Hardness (mg/L)	% Recovery
ขวดที่ 1	2.333	0.0029	0.00297	297.00	97
ขวดที่ 2	2.322	0.0030			
ขวดที่ 3	2.322	0.0030			

ตารางที่ 24 แสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำประปาเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M

ตัวอย่างน้ำประปา	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	Hardness (mg/L)	% Recovery
ขวดที่ 1	2.356	0.0027	0.00297	297.00	110
ขวดที่ 2	2.414	0.0022			
ขวดที่ 3	2.425	0.0021			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 25 แสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำบาดาลเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M

ตัวอย่างน้ำบาดาล	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	Hardness (mg/L)	% Recovery
ขวดที่ 1	2.551	0.000996	0.00093	93.00	99.77
ขวดที่ 2	2.552	0.000991			
ขวดที่ 3	2.552	0.000991			

ตารางที่ 26 แสดงค่า % Recovery ของตัวอย่างน้ำดื่มเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	Hardness (mg/L)	% Recovery
ขวดที่ 1	2.559	0.00093	0.000927	92.70	91.7
ขวดที่ 2	2.559	0.00093			
ขวดที่ 3	2.560	0.00092			

จากตารางแสดงค่า % Recovery จะพบว่า การเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.01 M ลงในตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ จะให้ค่า % Recovery อยู่ในช่วง 91.7-113% ซึ่งพบว่าค่าที่ได้ใกล้เคียง 100% จะสรุปได้ว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้มีความแม่นยำในช่วงที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

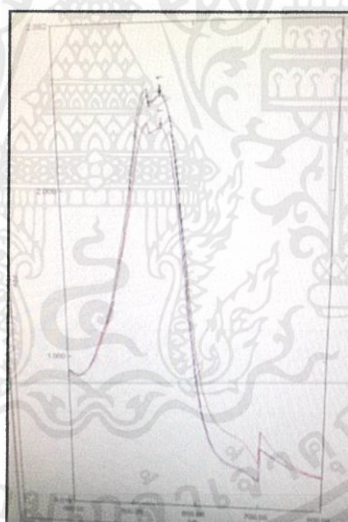
### 4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำโดยใช้เทคนิคSpectrophotometry

#### 4.3.1 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสภาวะปกติ

##### 4.3.1.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำ 20 ml + MgEDTA 10 mL + EBT 5 mL

ตารางที่ 27 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำทดลอง

ตัวอย่างน้ำ ทดลอง	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.402	0.0023	0.00257	257.00	17.97
ขวดที่ 2	2.311	0.0031			
ขวดที่ 3	2.402	0.0023			



รูปที่ 25 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำทดลองในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 28 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ

ตัวอย่างน้ำจากตึก พระเทพ	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	%RSD
ขวดที่ 1	2.471	0.0017	0.0020	200.00	13.23
ขวดที่ 2	2.425	0.0021			
ขวดที่ 3	2.414	0.0022			

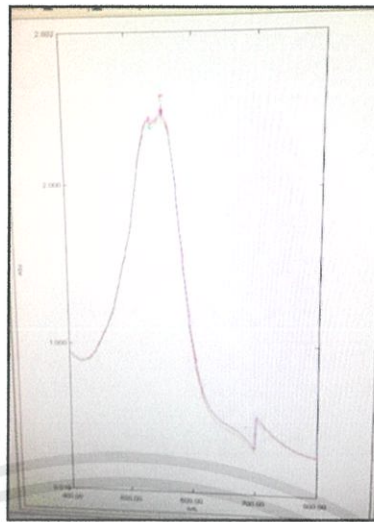


รูปที่ 26 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะปกติ

ตารางที่ 29 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปา

ตัวอย่าง น้ำประปา	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	%RSD
ขวดที่ 1	2.528	0.0012	0.0012	169.00	5.90
ขวดที่ 2	2.517	0.0013			
ขวดที่ 3	2.528	0.0012			

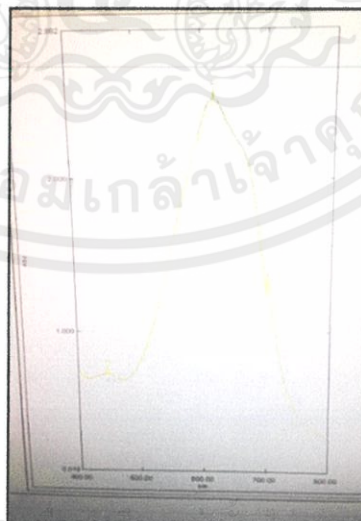
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะปกติ

ตารางที่ 30 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาล

ตัวอย่างน้ำบาดาล	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.665	0.000013	0.000014	1.40	7.10
ขวดที่ 2	2.664	0.000015			
ขวดที่ 3	2.663	0.000014			



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะปกติ

ตารางที่ 31 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่ม

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.664	0.000010	0.000010	1.00	7.07
ขวดที่ 2	2.664	0.000010			
ขวดที่ 3	2.664	0.000011			



รูปที่ 29 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสภาวะปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  
แคลเซียมคาร์บอเนต (Standard addition)

4.3.2.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำ 20 mL + MgEDTA 10 mL + EBT 5 mL + CaCO<sub>3</sub> 0.010 M  
10 mL.

ตารางที่ 32 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  
CaCO<sub>3</sub> 0.010 M

ตัวอย่างน้ำ คลอง	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.253	0.0036	0.0037	370.00	113.00	4.27
ขวดที่ 2	2.219	0.0039				
ขวดที่ 3	2.242	0.0037				

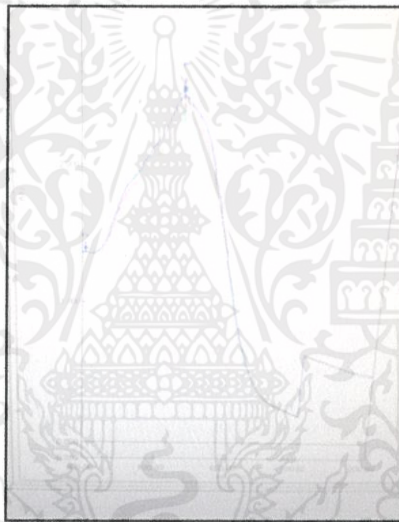


รูปที่ 30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่เติม  
สารละลายมาตรฐาน CaCO<sub>3</sub> 0.010 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 33 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

ตัวอย่างน้ำ จากตึกพระเทพ	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.333	0.0029	0.00297	297.00	97.00	1.95
ขวดที่ 2	2.322	0.0030				
ขวดที่ 3	2.322	0.0030				

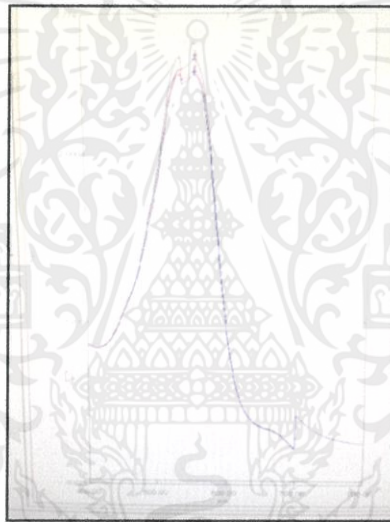


รูปที่ 31 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 34 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

ตัวอย่างน้ำประปา	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.356	0.0027	0.00297	297.00	110.00	28.39
ขวดที่ 2	2.414	0.0022				
ขวดที่ 3	2.425	0.0021				



รูปที่ 32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 35 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

ตัวอย่างน้ำบาดาล	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.551	0.000996	0.00093	93.00	99.77	7.00
ขวดที่ 2	2.552	0.000991				
ขวดที่ 3	2.552	0.000991				



รูปที่ 33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 36 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.559	0.00093	0.000927	92.70	91.70	0.62
ขวดที่ 2	2.559	0.00093				
ขวดที่ 3	2.560	0.00092				



รูปที่ 34 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่ม  
ในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.010 M ลงในตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ แล้วจะสามารถคำนวณ % Recovery 91.7–113 % ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำการวิเคราะห์หาค่ากลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2.3 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำ 20 mL + MgEDTA 10 mL + EBT 5 mL + CaCO<sub>3</sub> 0.005 M  
5 mL.

ตารางที่ 37 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลองในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  
CaCO<sub>3</sub> 0.005 M

ตัวอย่างน้ำ คลอง	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.316	0.00305	0.00306	306.00	98.00	0.40
ขวดที่ 2	2.314	0.00307				
ขวดที่ 3	2.316	0.00305				

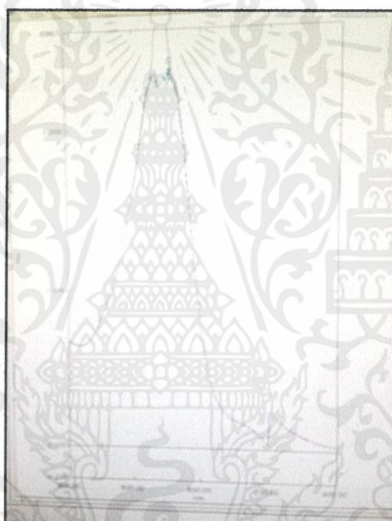


รูปที่ 35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำคลองในสภาวะที่เติม  
สารละลายมาตรฐาน CaCO<sub>3</sub> 0.005 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 38 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

ตัวอย่างน้ำจาก ตึกพระเทพ	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.386	0.00244	0.00245	245.00	90.00	0.41
ขวดที่ 2	2.385	0.00245				
ขวดที่ 3	2.384	0.00246				

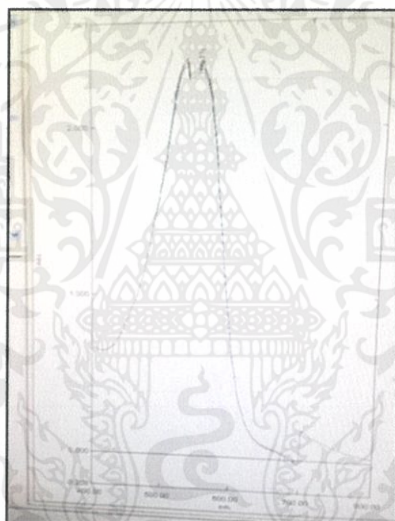


รูปที่ 36 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 39 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

ตัวอย่างน้ำประปา	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.466	0.00174	0.00169	169.00	98.00	3.29
ขวดที่ 2	2.479	0.00163				
ขวดที่ 3	2.471	0.00170				

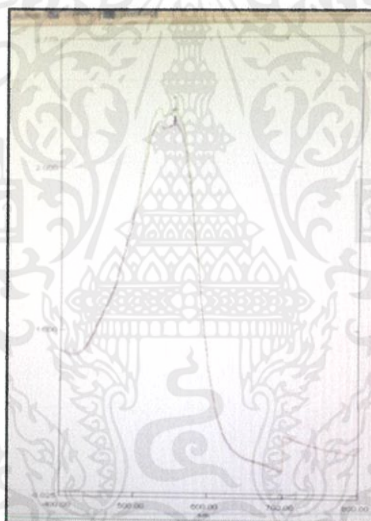


รูปที่ 37 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 40** ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

ตัวอย่างน้ำบาดาล	Abs.	Conc. (M)	Conc. Avg. (M)	ความกระด้าง (mg/L)	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.562	0.00090	0.000583	58.30	109.54	47.67
ขวดที่ 2	2.621	0.00047				
ขวดที่ 3	2.622	0.00038				



**รูปที่ 38** สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 41 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	% Recovery	%RSD
ขวดที่ 1	2.610	0.000484	0.00049	49.00	96.00	1.86
ขวดที่ 2	2.608	0.000501				
ขวดที่ 3	2.609	0.000487				



รูปที่ 39 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่ม  
ในสถานะที่เติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อเติมสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M ลงในตัวอย่างน้ำจากแหล่งต่างๆ แล้วจะสามารถคำนวณ % Recovery 90–109.54% ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่สามารถยอมรับได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถทำการวิเคราะห์หาค่ากลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

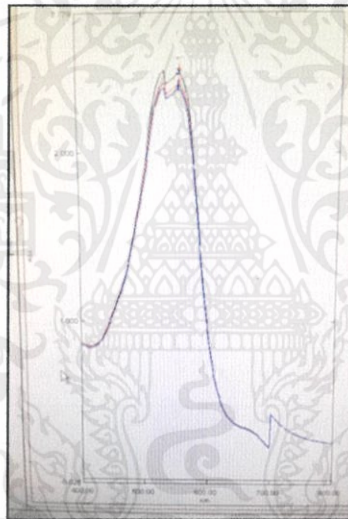
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

##### 4.3.3.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำ 20 mL + EBT 5 mL

ตารางที่ 42 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตัวอย่างน้ำคลอง	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.255	0.0036	0.0033	330.00	11.54
ขวดที่ 2	2.270	0.0035			
ขวดที่ 3	2.339	0.0029			

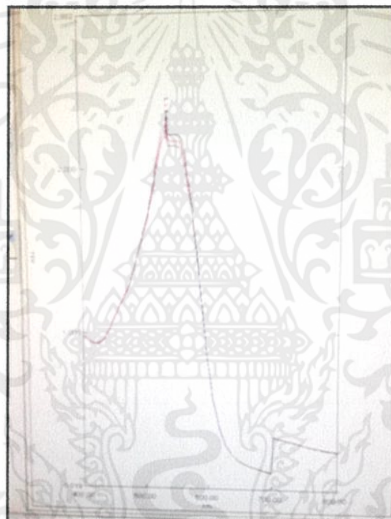


รูปที่ 40 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำคลองในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 43 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่ไม่เต็มแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตัวอย่างน้ำจาก ตึกพระเทพ	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.234	0.0038	0.0037	370.00	2.70
ขวดที่ 2	2.257	0.0036			
ขวดที่ 3	2.247	0.0037			



รูปที่ 41 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพในสถานะที่ไม่เต็มแมกนีเซียมอีดีทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 44 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตัวอย่างน้ำประปา	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.234	0.0038	0.0039	390.00	2.56
ขวดที่ 2	2.303	0.0040			
ขวดที่ 3	2.213	0.0039			

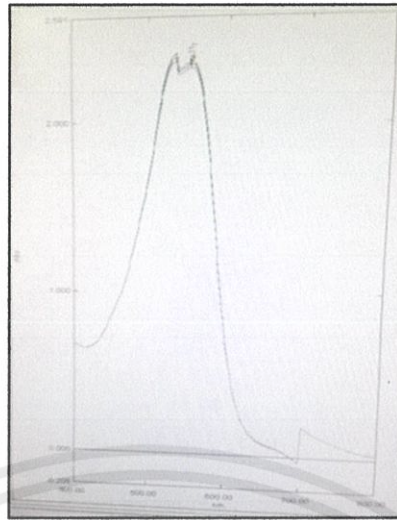


รูปที่ 42 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำประปาในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตารางที่ 45 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำบาดาลในสภาวะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตัวอย่างน้ำบาดาล	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.327	0.0029	0.00287	287.00	2.02
ขวดที่ 2	2.349	0.0028			
ขวดที่ 3	2.337	0.0029			

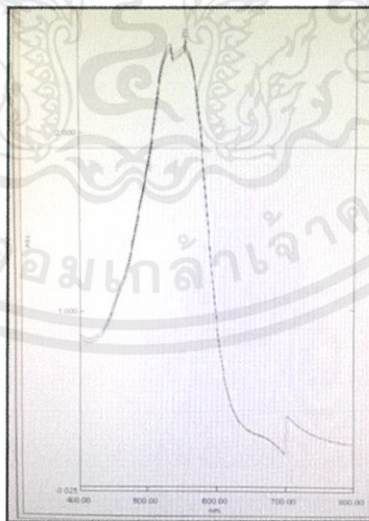
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 43 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำบาดาลในสถานะที่ไม่เติม

ตารางที่ 46 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

ตัวอย่างน้ำดื่ม	Abs.	Conc. ( M )	Conc. Avg. ( M )	ความกระด้าง ( mg/L )	%RSD
ขวดที่ 1	2.482	0.0016	0.00173	173.00	18.58
ขวดที่ 2	2.495	0.0015			
ขวดที่ 3	2.430	0.0021			



รูปที่ 44 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างน้ำดื่มในสถานะที่ไม่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความกระด้างในตัวอย่างน้ำโดยใช้วิธีมาตรฐานการไทเทรต

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ของสารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$ 0.005 M

ตารางที่ 47 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตสารมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

สารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	24.10	24.10	24.07	470.00
ขวดที่ 2	0.00	24.00	24.00		
ขวดที่ 3	0.00	24.10	24.10		

##### 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ของ Blank

ตารางที่ 48 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

Blank	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)
ขวดที่ 1	0.00	0.40	0.40	0.43
ขวดที่ 2	0.40	0.80	0.40	
ขวดที่ 3	0.80	1.3	0.50	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ของสารตัวอย่าง

ตารางที่ 49 ตารางแสดงปริมาณ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำคลอง

ตัวอย่างน้ำคลอง	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	13.90	13.90	13.93	270.00
ขวดที่ 2	13.90	27.90	14.00		
ขวดที่ 3	31.90	45.80	13.90		

ตารางที่ 50 ตารางแสดงปริมาณ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำจากตึกพระเทพ

ตัวอย่างน้ำจาก ตึกพระเทพ	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	12.30	12.30	12.40	240.00
ขวดที่ 2	12.30	24.80	12.50		
ขวดที่ 3	24.80	37.2	12.40		

ตารางที่ 51 ตารางแสดงปริมาณ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำบาดาล

ตัวอย่างน้ำ บาดาล	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	9.10	9.10	9.13	170.00
ขวดที่ 2	9.10	18.30	9.20		
ขวดที่ 3	18.30	27.4	9.10		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 52 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำประปา

ตัวอย่างน้ำประปา	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	0.60	0.60	0.63	4.00
ขวดที่ 2	0.60	1.30	0.70		
ขวดที่ 3	1.30	1.90	0.60		

ตารางที่ 53 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำดื่ม

ตัวอย่างน้ำดื่ม	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้าง (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	0.5	0.50	0.567	2.74
ขวดที่ 2	0.50	1.10	0.60		
ขวดที่ 3	1.10	1.70	0.60		

จากการทดลองจะพบว่าความกระด้างของน้ำที่หาจากเทคนิคที่พัฒนาใหม่คือ Spectrophotometry และวิธีมาตรฐานการไทเทรตนั้นให้ค่าความกระด้างของน้ำที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะถือว่าทั้งสองวิธีนี้สามารถใช้แทนกันได้ แต่เทคนิคที่พัฒนาใหม่จะมีความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากตรวจวัดโดยใช้ detector ส่วนวิธีการไทเทรตนั้นจะสังเกตการเปลี่ยนสีที่จุดยุติโดยใช้ตาคนซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากผลการทดลองพบว่า การตรวจวัดหาความกระด้างของน้ำสามารถใช้เทคนิค UV-Vis Spectrophotometry ในการวิเคราะห์หาความกระด้างของน้ำได้ โดยใช้สารละลาย MgEDTA ทำปฏิกิริยากับ สารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ในช่วงความเข้มข้น 0.0005-0.015 M โดยใช้อินดิเคเตอร์เป็นสารละลายเอริโอ โครมแบล็คที พบว่าค่าการดูดกลืนแสงมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาสร้างเป็นกราฟเส้นตรงได้ค่า  $R^2 = 0.9859$  ซึ่งมีความเป็นเส้นตรงค่อนข้างดี จึงเป็นไปได้ที่จะนำวิธีข้างต้นมาใช้ในการหาความกระด้างของตัวอย่างน้ำ

2. ความเข้มข้นของ EBT ที่ใช้ในการทดลองพบว่า EBT ที่เจือจาง 10 เท่า ให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด โดยพบว่าค่าการดูดกลืนแสงจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มข้นของ EBT เนื่องจาก EBT ที่ความเข้มข้นมากจะสามารถจับกับ metal ion ได้ดีกว่า EBT ที่ความเข้มข้นน้อยๆ

3. ปริมาณของ MgEDTA ที่ใช้ในการทดลองพบว่า การเติม MgEDTA ที่ช่วง 5 mL, 10 mL และ 15 mL จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าช่วงอื่นๆ ที่ทำการทดลอง แต่การทดลองนี้เลือกเติม MgEDTA ที่ 10 mL เพราะว่าเป็นค่าที่อยู่กึ่งกลางของช่วงความเป็นเส้นตรงเพื่อป้องกันการเกิด error เพราะส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงที่จะทำให้สูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริง

4. การทำ Standard Addition ทำเพื่อการศึกษาความถูกต้อง (Accuracy) โดยเติมสารมาตรฐานให้มี ความเข้มข้นต่างกัน 2 ความเข้มข้นลงไป ในสารละลายตัวอย่าง แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ได้พัฒนาขึ้น และคำนวณหาร้อยละการกลับคืน (% recovery) ของแต่ละความเข้มข้น โดยเทียบจากค่าความเข้มข้นของสาร มาตรฐานที่ควรจะเป็น ซึ่งในการทดลองนี้ได้ค่า % recovery เข้าใกล้ 100 % ซึ่งถือว่าเป็นผลที่ยอมรับได้

5. ผลของ MgEDTA ถ้าไม่เติมลงไป จะมีผลอย่างไร จากการทดลองได้ผลว่าการเติม MgEDTA และการไม่เติม MgEDTA มีค่าการดูดแสงที่ใกล้เคียงกัน เพราะที่เราใช้แค่อินดิเคเตอร์ก็สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีสีกับไอออนของโลหะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

6. การตรวจวัดด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรีจะมีข้อดีเหนือกว่าวิธีการไทเทรตคือสามารถลดความผิดพลาดและมีความสะดวกรวดเร็วในการวิเคราะห์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. cell ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วควรทำการล้างให้สะอาดก่อนการใช้งานครั้งต่อไปเพราะค่าที่วัดได้มีถูกต้องไม่เกิดความคลาดเคลื่อน
2. ใส່ cell ในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ให้ถูกด้านและปิดฝาครอบเครื่องทุกครั้งเพื่อป้องกันความผิดพลาดของค่าการดูดกลืนแสงจาก Stay light
3. ในการเตรียมสารเคมีต่างๆควรสวมถุงมือ และเสี้อกราวนทุกครั้งเพื่อป้องกันไม่ให้สารเคมีสัมผัสถูกผิวหนังซึ่งอาจเป็นอันตรายได้



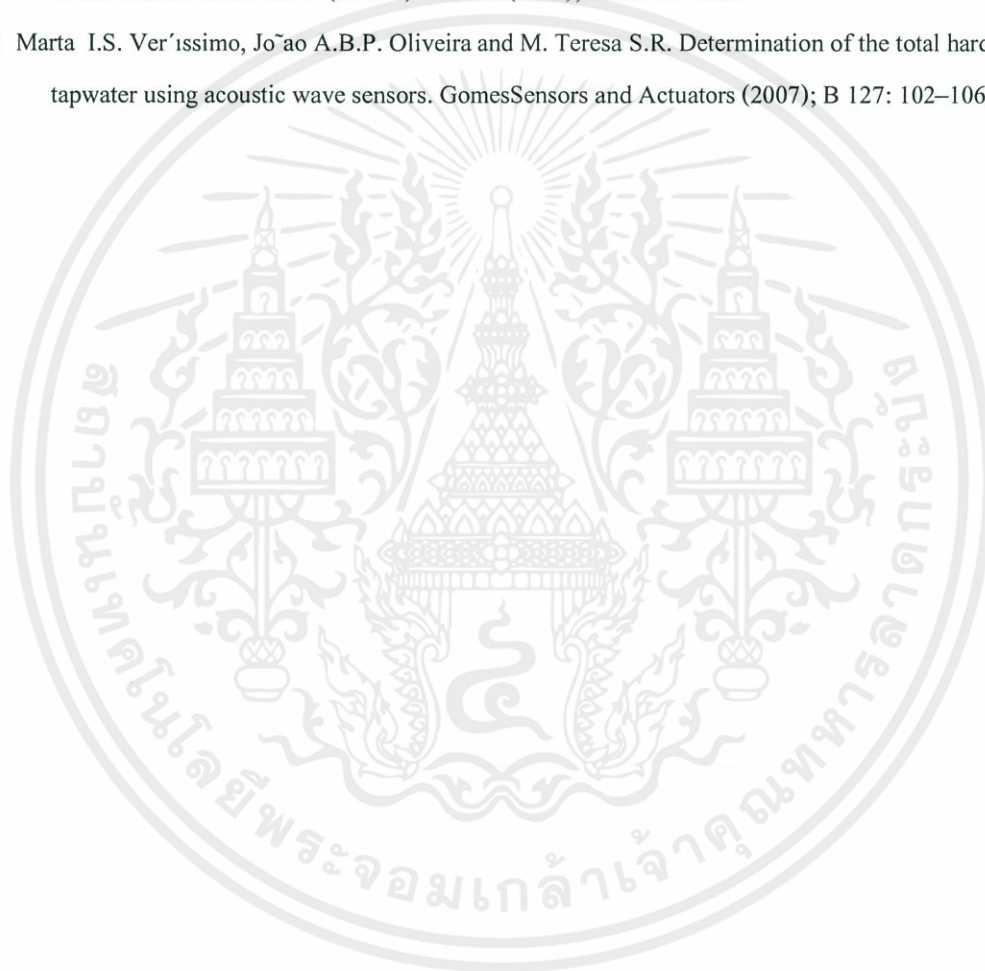
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรรณิการ์ สิริสิงห์. เคมีของน้ำ น้ำโสโครก และ การวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ ฯ : บริษัท สารมวลชน จำกัด, 2522.
- [2] การแก้ไขความกระด้างของน้ำ. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://ced.sci.psu.ac.th/km/testing\\_km/e01e32e23e41e01e49e44e02e04e27e32e21e01e23e30e14e49e32e07e02e2de07e19e49](http://ced.sci.psu.ac.th/km/testing_km/e01e32e23e41e01e49e44e02e04e27e32e21e01e23e30e14e49e32e07e02e2de07e19e49). วันที่ค้นข้อมูล 25 กันยายน 2555.
- [3] การไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อน. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : [http://science.psu.ac.th/pdf/teaching/Analyze\\_chem8.pdf](http://science.psu.ac.th/pdf/teaching/Analyze_chem8.pdf). วันที่ค้นหาข้อมูล 25 กันยายน 2555.
- [4] D. A. Skoog, D. M. West and F. J. Holler. Student Solutions Manual for Skoog/West/Holler/Crouch's Fundamentals of Analytical Chemistry. 9<sup>th</sup> ed. Cole: Thomson Brooks, 1997, p.279-290.
- [5] Water Hardness determination of Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup> in parallel.[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.medchem.upol.cz/en/WATER%20HARDNESS.pdf>. วันที่ค้นหาข้อมูล 25 กันยายน 2555.
- [6] Trtitration EDTA. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.vcharkarn.com/vcafe/135753>. วันที่ค้นหาข้อมูล 20 มีนาคม 2556.
- [7] สุภาพ รมณีย์พิกุล. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. พิษณุโลก : โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, 2542 หน้า 550.
- [8] Hardness. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.diw.go.th/research/%E0%B9%80%E0%B8%AD%E0%B8%81%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B9%80%E0%B8%9C%E0%B8%A2%E0%B9%81%E0%B8%9E%E0%B8%A3%E0%B9%88/9-hardness-w.pdf>. วันที่ค้นหาข้อมูล 20 มีนาคม 2556.
- [9] ประพีร์ ผลอนันต์. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2526.
- [10] สมศักดิ์ วรรคามิน. น้ำเพื่อชีวิต. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ ฯ : บริษัท สามเจริญพาณิชย์ (กรุงเทพฯ) จำกัด, 2549.
- [11] ศุภชัย ไข่เทียมวงศ์. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพฯ ฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] J. Saurina, E. López-Aviles, A. Le Moal and S. Hernández-Cassou. Determination of calcium and total hardness in natural waters using a potentiometric sensor array. *Analytica Chimica Acta* (2002); 464: 89–98.
- [13] สมดุลของน้ำในร่างกาย. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://health.kapook.com/view6653.html>. วันที่ค้นหาข้อมูล 20 มีนาคม 2556.
- [14] G. Z. Tsogas, D. L. Giokas and A. G. Vlessidis. A fast assay of water hardness ions based on alkaline earth metal induced coacervation (HALC). *Talanta* (2010); 80: 2049–2056.
- [15] Marta I.S. Ver´issimo, Jo˜ao A.B.P. Oliveira and M. Teresa S.R. Determination of the total hardness in tapwater using acoustic wave sensors. *Gomes Sensors and Actuators* (2007); B 127: 102–106.

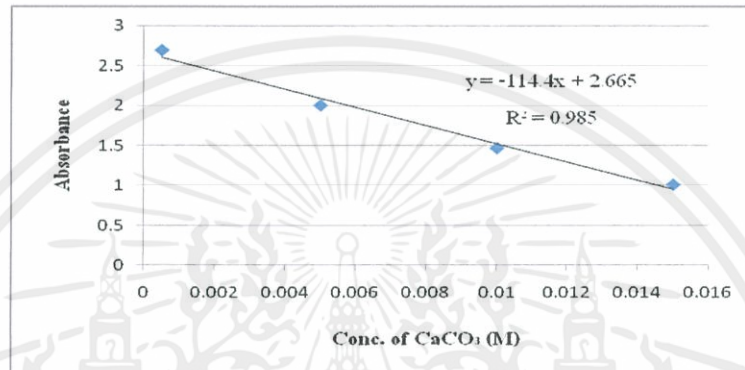


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก (ก)

### การคำนวณ

#### 1.คำนวณความเข้มข้นของตัวอย่าง



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน CaCO<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M

#### ตัวอย่างคำนวณความเข้มข้น

ตัวอย่างน้ำคลอง	Abs.	Conc. (M)	Avg.
ขวดที่ 1	2.402	0.0023	0.00257
ขวดที่ 2	2.311	0.0031	
ขวดที่ 3	2.402	0.0023	

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารตัวอย่างน้ำคลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของตัวอย่างจากสมการถดถอยเชิงเส้น คือ

ตัวอย่างการคำนวณขวดที่ 1

$$Y = -114.45X + 2.6654$$

แทนค่า Abs. ในตัวแปร Y

$$X = \frac{Y - 2.6654}{-114.45}$$

$$X = \frac{2.402 - 2.6654}{-114.45}$$

## 2. การคำนวณค่าการคืนกลับ (% recovery)

$$\% \text{ Recovery} = \frac{(\text{Spiked sample} - \text{Control sample}) \times 100}{\text{Std.}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงผลของการทำ Standard Addition

ตัวอย่างนำคลอ	Std.	Spiked sample	Control sample
ขวดที่ 1	0.010 M	0.0036	0.0023
ขวดที่ 2		0.0039	0.0031
ขวดที่ 3		0.0037	0.0023
เฉลี่ย		0.0037	0.00257

$$\% \text{ Recovery} = \frac{(0.0037 - 0.00257) \times 100}{0.010} = 113$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 หมายเหตุ สำหรับการเติมสารละลายมาตรฐาน 0.005 M ก็คำนวณเช่นเดียวกัน  
 ไม่ว่ากรณีใดๆที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การคำนวณหา %RSD

##### 4.1 การคำนวณหา SD

การหาค่า SD คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ ความเข้มข้นเฉลี่ย  
 $x_i$  คือความเข้มข้นที่หาได้  
 $n$  คือจำนวนครั้งในการทำซ้ำ

##### 4.2 การคำนวณหา %RSD

การหาค่า %RSD คือร้อยละความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (relative standard deviation)

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100$$

#### 4. การหาความกระด้างของน้ำโดยใช้วิธีมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความกระด้างของสารมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

Blank	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)
ขวดที่ 1	0.00	0.40	0.40	0.43
ขวดที่ 2	0.40	0.80	0.40	
ขวดที่ 3	0.80	1.3	0.50	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาและการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตสารมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M

สารมาตรฐาน $\text{CaCO}_3$	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้างน้ำ (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	24.10	24.10	24.07	472
ขวดที่ 2	0.00	24.00	24.00		
ขวดที่ 3	0.00	24.10	24.10		

คำนวณจากสูตร

$$\text{ความกระด้างของสารมาตรฐาน } \text{CaCO}_3 = (A - B) \times 20$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตสารมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$

B คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

แทนค่า ความกระด้างของสารมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3 = (24.07 - 0.43) \times 20$   
 $= 472 \text{ mg/L}$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความกระด้างของตัวอย่างน้ำ

ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำคลองและผลของความกระด้างน้ำ

ตัวอย่างน้ำคลอง	ปริมาตรเริ่ม (mL)	ปริมาตรสุดท้าย (mL)	ปริมาตรที่ใช้ (mL)	ปริมาตรเฉลี่ย (mL)	ความกระด้างน้ำ (mg/L)
ขวดที่ 1	0.00	13.90	13.90	13.93	0.0027
ขวดที่ 2	13.90	27.90	14.00		
ขวดที่ 3	31.90	45.80	13.90		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คำนวณจากสูตร

$$\text{ความกระด้างของตัวอย่างน้ำคลอง} = (A - B) \times 20$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำคลอง

B คือ ปริมาตรของ EDTA ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า ความกระด้างของสารมาตรฐาน CaCO}_3 &= (13.93 - 0.43) \times 20 \\ &= 270 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

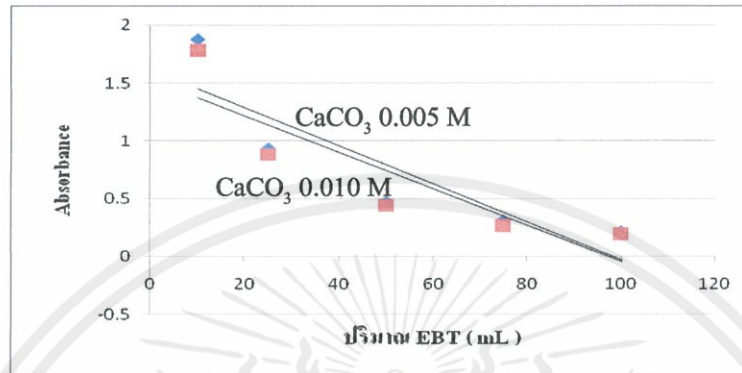
หมายเหตุ สำหรับตัวอย่างน้ำจากแหล่งอื่นก็คำนวณเช่นเดียวกัน



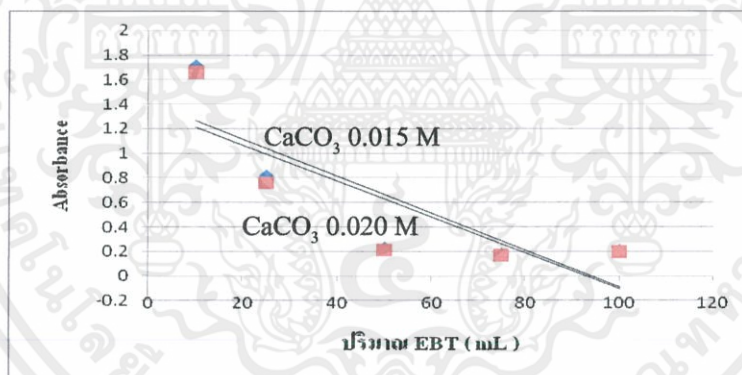
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก (ข)

### 1. การเลือกใช้เอริโอโครมเบล็คที



รูปที่ ข.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมเบล็คทีที่ปริมาตรต่างๆที่เติมลงในสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.005 M และ  $\text{CaCO}_3$  0.010 M

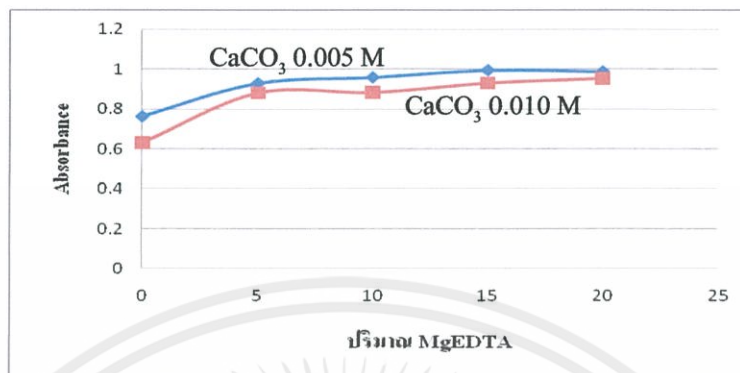


รูปที่ ข.2 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณเอริโอโครมเบล็คทีที่ปริมาตรต่างๆที่เติมลงในสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  0.015 M และ  $\text{CaCO}_3$  0.02 M

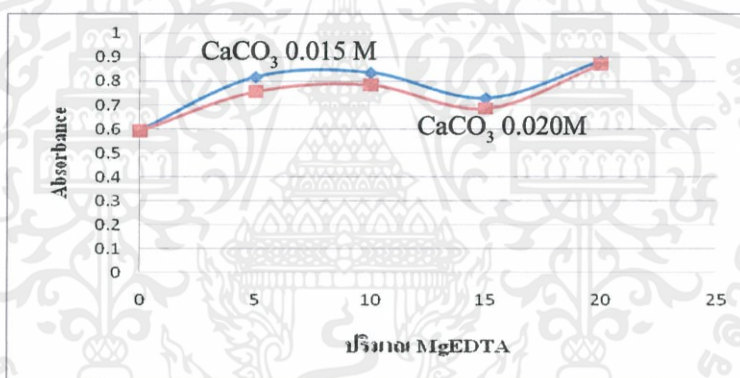
ในการทดลองนี้เลือกใช้เอริโอโครมเบล็คทีที่เจือจาง 10 เท่า (เข้มข้นมากที่สุดของช่วงการทดลอง) เหตุผลเพราะในการทดลองนี้ต้องการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงช่วงความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน  $\text{CaCO}_3$  ในช่วงกว้าง ซึ่งถ้าเลือกใช้เอริโอโครมเบล็คทีที่เจือจางมาก (ความเข้มข้นต่ำ) จะทำให้วัดค่าการดูดกลืนแสงได้ในช่วงแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. การเลือกใช้แมกนีเซียมอีดีทีเอ



รูปที่ ข.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ CaCO<sub>3</sub> 0.005 M กับ CaCO<sub>3</sub> 0.010 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน

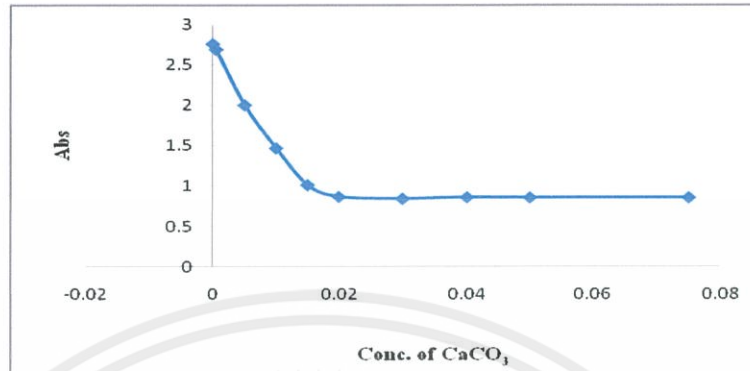


รูปที่ ข.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของ CaCO<sub>3</sub> 0.015 M กับ CaCO<sub>3</sub> 0.020 M ในสถานะที่เติมแมกนีเซียมอีดีทีเอปริมาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ ข.3 และ ข.4 จะเห็นได้ว่าการเติมแมกนีเซียมอีดีทีเอในช่วง 5 , 10 , 15 และ 20 mL จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ได้ทำให้ผลการทดลองต่างกันมากนัก แต่การทดลองนี้เลือกเติมแมกนีเซียมอีดีทีเอที่ 10 mL เพราะอยู่ในช่วงกลางเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดจากการปิเปตมากหรือน้อยเกินไปซึ่งจะอยู่ในช่วงที่แก้ไขได้

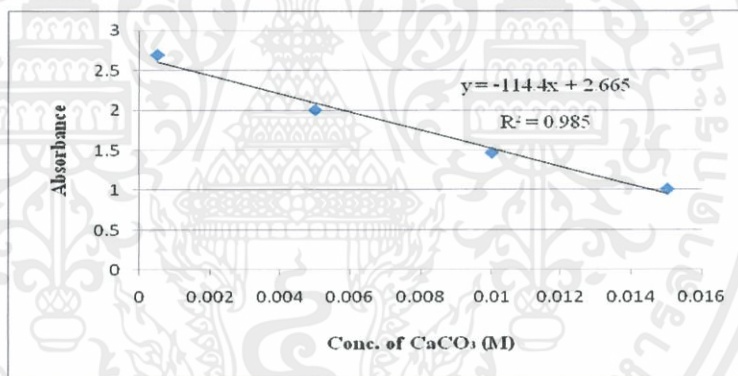
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเลือกใช้แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณเหมาะสมต่อการทดลอง



รูปที่ ข.5 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน CaCO<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.075 M

จากรูป ข.5 จะเห็นได้ว่าช่วงความเข้มข้นที่ 0.0005-0.015 M เป็นช่วงที่มีความเป็นเส้นตรงสูงกว่าช่วงอื่น เพราะฉะนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกช่วงความเข้มข้นนี้มาวิเคราะห์ เมื่อนำมาสร้างเป็นกราฟมาตรฐานจะให้  $r^2 = 0.9859$  ดังรูป ข.6



รูปที่ ข.6 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน CaCO<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.0005 ถึง 0.015 M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้