

การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทเจือด้วยซิงค์และเงินด้วยวิธี  
ไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของโลหะ

ZINC AND SILVER DOPED CARBON QUANTUM DOTS  
SYNTHESIZED BY MICROWAVE ASSIST FOR METAL ION  
DETECTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ZINC AND SILVER DOPED CARBON QUANTUM DOTS  
SYNTHESIZED BY MICROWAVE ASSIST FOR METAL ION  
DETECTION



PUNYAPAT PINIRAM  
SUPITCHAYA WANKHAM

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทเจือด้วยซิงค์และเงินด้วยวิธีไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของโลหะ

Zinc and silver doped carbon quantum dots synthesized by microwave assist for metal ion detection

ชื่อนักศึกษา นางสาวปญญาพัฒน์ พินิรัมย์ รหัสนักศึกษา 62050308

นางสาวสุพิชญา วันคำ รหัสนักศึกษา 62050349




ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2565

|  |   |
|--|---|
| คณะกรรมการสอบ  | ลายมือชื่อ  |
| ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี<br>ประธานกรรมการ               |  |
| รศ.ดร.การุณย์ สาดอ่อน<br>กรรมการ                       |   |
| รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ<br>กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยซิงค์และเงินด้วยวิธีไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของโลหะ

**ชื่อนักศึกษา** นางสาวปญญาพัฒน์ พิณรัมย์ รหัสนักศึกษา 62050308

นางสาวสุพิชญา วันคำ รหัสนักศึกษา 62050349

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

**ภาควิชา** เคมี

**คณะ** วิทยาศาสตร์

**มหาวิทยาลัย** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)

**ปีการศึกษา** 2565

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ดร.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอทจากสมบัติการเรืองแสง โดยการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทใช้กรดซัลฟิวริก (C) เป็นแหล่งคาร์บอน, ยูเรีย (U) เป็นแหล่งไนโตรเจน, โบแรกซ์ (B) เป็นแหล่งโบรอน และเจือด้วยโลหะได้แก่ Zn (สังกะสี) และ Ag (เงิน) โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ และหาเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ คาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้นำไปตรวจวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทด้วยเครื่อง ATR-FTIR, ตรวจวัดสมบัติการเรืองแสงด้วยเครื่อง Fluorescence spectrophotometer, ตรวจวัดสมบัติการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer และทดสอบสมบัติการตรวจจับโลหะต่าง ๆ ได้แก่  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  ที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะที่ต่างกัน จากการศึกษาพบว่า เวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท สูตร BCU คือ 3:05 นาที, สูตร BCU/Zn คือ 3:10 นาที และสูตร BCU/Ag คือ 3:00 นาที โดยจะเปล่งแสงสีฟ้าภายใต้แสงยูวี และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับโลหะไอออนพบว่าสูตร BCU มีประสิทธิภาพในการตรวจจับโลหะไอออนได้มากชนิด ในเชิงของความเข้มข้นของโลหะไอออนที่ต่ำสุดและการแยกความแตกต่างของความเข้มข้นในช่วงกว้าง ในขณะที่สูตร BCU/Zn มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้งานตรวจจับโลหะต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM

**คำสำคัญ** : การตรวจจับโลหะไอออน, คาร์บอนควอนตัมดอท, ฟลูออเรสเซนซ์, การโดปโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Title</b>         | Zinc and silver doped carbon quantum dots synthesized by microwave assist for metal ion detection |
| <b>Student</b>       | Miss Punyapat Pinirum Student ID 62050308<br>Miss Supitchaya Wankham Student ID 62050349          |
| <b>Degree</b>        | Bachelor of Science (Industrial chemistry)  |
| <b>Department</b>    | Chemistry   |
| <b>Faculty</b>       | Science   |
| <b>University</b>    | King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)   |
| <b>Academic Year</b> | 2022  |
| <b>Advisor</b>       | Assoc.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade  |

### Abstract

This research studied on the detection efficiency of carbon quantum dots (CDs) based on their fluorescence properties. The ingredient consisted of citric acid as a source of carbon, urea as a source of nitrogen and borax as a source of carbon doped with Zinc (Zn) and Silver (Ag) using microwave technique. The synthesized carbon quantum dots were analyzed by ATR-FTIR, fluorescence spectrophotometer, and UV-Visible spectrophotometer. The detection of metals i.e.  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  at various concentrations was carried out using fluorescence spectrophotometer. of ions. From the study, it was found that the optimum time for synthesizing carbon quantum dots : BCU at 3:05 min, BCU/Zn at 3:10 min and BCU/Ag at 3:00 min, which they emitted blue light under UV light. For metal ion detection efficiency, it was found that BCU gained highest effectiveness in metal detection for many types of metal ions, in terms of the lowest metal ion concentration and a wide concentration differentiation. Additionally, as low values of  $F/F_0$  in many metal ions of BCU/Zn, It has the potential to be applied for metal detection at concentrations below 0.0625 mM.

**Keywords :** Detection of metal ions, Carbon quantum dots, Fluorescence, Metal doping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รศ.ดร.ภัทธวูธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ของโครงการเล่มนี้จนประสบความสำเร็จ ผู้วิจัยขอกราบ ขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร.การุณย์ สาดอ่อน กรรมการสอบโครงการ พิเศษเล่มนี้ที่ให้คำแนะนำ และช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ ทำให้โครงการพิเศษเล่มนี้มีความสมบูรณ์ มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาเคมี เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาเคมี ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการจัดเตรียมสารเคมี รวมถึงเครื่องมือและ อุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทำโครงการพิเศษเล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา ขอบคุณ นายอาณัฐ ทรันเต้ เพื่อน และบุคคลอื่น ๆ ทุกคนที่ คอยดูแลให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ให้คำปรึกษาในหลาย ๆ เรื่อง และคอยให้กำลังใจกันเสมอมาผู้วิจัย ต้องขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

บุญญพัฒน์ พิณรัมย์  
สุพิชญา วันคำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|   |          |
|---|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ก        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | ข        |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค        |
| สารบัญ.....   | ง        |
| สารบัญตาราง.....  | ช        |
| สารบัญรูป.....  | ซ        |
| คำย่อ/สัญลักษณ์.....  | ฅ        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                         | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....                                | 2        |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....   | 3        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                              | 3        |
| <b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>               | <b>4</b> |
| 2.1 คาร์บอนควอนตัมดอท.....                                      | 4        |
| 2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท.....           | 4        |
| 2.1.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท.....                       | 5        |
| 2.1.3 การปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยใช้สารอะตอมอื่นนอกจากคาร์บอน..... | 12       |
| 2.1.3.1 การใช้โลหะ.....   | 12       |
| 2.1.3.2 การใช้ไอโลหะ.....                                       | 12       |
| 2.1.4 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนควอนตัมดอท.....                       | 13       |
| 2.1.5 สมบัติของคาร์บอนควอนตัมดอท.....                           | 13       |
| 2.1.5.1 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของคาร์บอนควอนตัมดอท.....             | 13       |
| 2.1.5.2 สมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท.....                   | 14       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  |           |
|--|-----------|
| 2.1.6 กลไกการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท.....                     | 15        |
| 2.1.7 กลไกการตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท .....                     | 15        |
| 2.1.7.1 Inner filter Effect.....                                   | 15        |
| 2.1.7.2 Forster Resonance Energy Transfer .....                    | 15        |
| 2.1.7.3 Photo-Induced Electron transfer.....                       | 16        |
| 2.1.8 การตรวจจับสารเคมี.....                                       | 17        |
| 2.1.8.1 การตรวจจับไอออนโลหะ .....                                  | 17        |
| 2.1.8.2 การตรวจจับโมเลกุลประจุลบ.....                              | 19        |
| 2.1.8.3 การตรวจจับสารอินทรีย์.....                                 | 20        |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                    | 19        |
| <b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....</b>                             | <b>26</b> |
| 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....                                   | 26        |
| 3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....                    | 27        |
| 3.3 การเตรียมสารละลาย .....  | 27        |
| 3.3.1 การเตรียมสารละลายโลหะ .....                                  | 27        |
| 3.3.2 การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอท.....                              | 28        |
| 3.3.3 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอท..... | 29        |
| 3.4 การวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติของคาร์บอนควอนตัมดอท .....          | 29        |
| 3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท .....  | 29        |
| 3.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท .....               | 29        |
| 3.4.3 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท.....           | 29        |
| 3.4.4 การทดสอบการตรวจจับโลหะ.....                                  | 30        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....</b>                           | <b>32</b> |
| 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท .....                           | 32        |
| 4.2 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท.....                  | 34        |
| 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท.....     | 35        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|   |           |
|---|-----------|
| 4.4 การทดสอบการตรวจจับโลหะต่าง ๆ.....           | 36        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b> | <b>50</b> |
| 5.1 สรุปผลวิจัย.....                            | 50        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                             | 51        |
| เอกสารอ้างอิง.....                              | 52        |
| ภาคผนวก.....                                    | 61        |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.1 อัตราส่วนสารเคมีในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท.....   | 28   |
| 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทสูตรต่าง ๆ .....  | 32   |
| 4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท .....  | 33   |
| 4.3 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ในสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีผลต่อ<br>สัดส่วนการลดลงของความเข้มของการเรืองแสงสูงสุด ( $F/F_0$ )..... | 37   |
| ง.1 ค่า $F/F_0$ .....   | 85   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 องค์ประกอบของคาร์บอนควอนตัมดอท .....  | 5    |
| 2.2 ปริมาณการใช้วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากบนลงล่าง .....   | 6    |
| 2.3 การสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน .....  | 7    |
| 2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากอิเล็กทรอนิกส์โดยวิธีออกซิเดชันเคมีไฟฟ้าและการเปลี่ยนสีของการเก็บคาร์บอนควอนตัมดอท .....   | 8    |
| 2.5 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากกากถ่านหินเหลวโดยวิธีออกซิเดชัน .....  | 8    |
| 2.6 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทโดยใช้ดอก Tagetes erecta เป็นแหล่งคาร์บอนและประยุกต์ใช้ตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช .....  | 9    |
| 2.7 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่ไม่ชอบน้ำโดยใช้เฮกเซนเป็นแหล่งคาร์บอน .....  | 10   |
| 2.8 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทโดยใช้ใบ Mangifera indica เป็นแหล่งคาร์บอน .....  | 11   |
| 2.9 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (Eu-CQDs) .....  | 11   |
| 2.10 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทและการตรวจจับแทนนิน .....  | 12   |
| 2.11 กลไกการเกิด Inner Filter Effect .....  | 15   |
| 2.12 กลไกการเกิด Forster Resonance Energy Transfer .....  | 16   |
| 2.13 กลไกการเกิด Photo-Induced Electron Transfer .....  | 17   |
| 2.14 สเปกตรัมการเรืองแสง และอัตราส่วนความเข้มข้นของการเรืองแสงที่แตกต่างกันของคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีไอออนโลหะหลายชนิด ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี Fe <sup>3+</sup> ที่ความยาวคลื่น 340 nm ..... | 18   |
| 2.15 กลไกทางเคมีไฟฟ้าของการตรวจจับ Mn <sup>2+</sup> โดยใช้คาร์บอนควอนตัมดอท .....   | 19   |
| 2.16 สเปกตรัมการเรืองแสง และอัตราส่วนความเข้มข้นของการเรืองแสงที่แตกต่างกันของคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีแอนไอออนหลายชนิด ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี ClO <sup>-</sup> ที่ความยาวคลื่น 340 nm .....  | 19   |
| 2.17 ภาพการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทและกลไกการตรวจจับกรดออกซาลิก .....  | 20   |
| 4.1 UV-Visible สเปกตราของตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท .....  | 34   |
| 4.2 ATR-FTIR สเปกตราของคาร์บอนควอนตัมดอท .....  | 35   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Fe^{2+}$ จาก $FeSO_4$ (ก-1) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.0625-0.5 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.75-50 mM (ข-1) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.0625-0.75 mM (ข-2) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 1-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้น.....                                 | 39   |
| 4.4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Fe^{2+}$ จาก $FeCl_2$ (ก-1) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.0625-2 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 3.125-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.0625-25 mM (ค-1) BCU/Ag ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 0.125-2 mM (ค-2) BCU/Ag ความเข้มข้นของ $Fe^{2+}$ ในช่วง 3.125-50 mM..... | 40   |
| 4.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Fe^{3+}$ จาก $Fe_2(SO_4)_3$ (ก) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.25-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.25-50 mM.....   | 42   |
| 4.6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Fe^{3+}$ จาก $FeCl_3$ (ก) BCU ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.125-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ $Fe^{3+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM.....  | 43   |
| 4.7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Zn^{2+}$ จาก $ZnSO_4$ (ก-1) BCU ความเข้มข้นของ $Zn^{2+}$ ในช่วง 0.0625-1 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ $Zn^{2+}$ ในช่วง 3.125-50 mM.....  | 44   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Hg^{2+}$ จาก $HgCl_2$ (ก) BCU ความเข้มข้นของ $Hg^{2+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Hg^{2+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ $Hg^{2+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM     | 45   |
| 4.9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Pb^{2+}$ จาก $Pb(NO_3)_2$ (ก) BCU ความเข้มข้นของ $Pb^{2+}$ ในช่วง 0.0625-25 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Pb^{2+}$ ในช่วง 0.0625-50 mM   | 46   |
| 4.10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Ni^{2+}$ จาก $NiCl_2$ (ก-1) BCU ความเข้มข้นของ $Ni^{2+}$ ในช่วง 0.0625-6.25 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ $Ni^{2+}$ ในช่วง 12.5-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Ni^{2+}$ ในช่วง 0.0625-6.25 mM | 47   |
| 4.11 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน $Cd^{2+}$ จาก $CdCl_2$ (ก) BCU ความเข้มข้นของ $Cd^{2+}$ ในช่วง 0.0625-12.5 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ $Cd^{2+}$ ในช่วง 0.0625-50 m   | 48   |
| 4.12 สรุปล่วงความเข้มข้นโลหะไอออนชนิดต่าง ๆ ที่คาร์บอนควอนตัมดอทมีประสิทธิภาพในการแยกความแตกต่าง (ก) BCU (ข) BCU/Zn (ค) BCU/Ag  | 48   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

| คำย่อ/สัญลักษณ์ | คำอธิบาย   |
|-----------------|--|
| C               | กรดซิตริก  |
| U               | ยูเรีย   |
| B               | บอแรกซ์  |
| Zn              | ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต                                |
| Ag              | ซิลเวอร์ไนเตรท                                       |
| BCU             | กรดซิตริก + ยูเรีย + บอแรกซ์                         |
| BCU/Zn          | กรดซิตริก + ยูเรีย + บอแรกซ์ + ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต |
| BCU/Ag          | กรดซิตริก + ยูเรีย + บอแรกซ์ + ซิลเวอร์ไนเตรท        |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไอออนโลหะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการชีวภาพและสิ่งแวดล้อมหลายอย่าง โดยพบได้ในแหล่งน้ำ และร่างกายของสิ่งมีชีวิต โลหะหนักมีความเป็นพิษสูงเนื่องจากเป็นสารที่คงตัว ไม่สามารถย่อยสลายได้ [32-34] อย่างไรก็ตาม โลหะก็มีประโยชน์ต่อร่างกายเช่นกันถ้ามีอยู่ในปริมาณไม่มากเกินไป มาตรฐาน ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี เป็นต้น สำหรับโลหะที่มีความเป็นพิษต่อร่างกาย ได้แก่ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม เป็นต้น [36] โลหะหนักจำพวกนี้เป็นพิษต่อระบบประสาทซึ่งสามารถตรวจพบได้ในอุตสาหกรรม [38] การตรวจจับไอออนของโลหะหนักจึงมีความจำเป็น เนื่องจากมลพิษที่เพิ่มขึ้นจากเชื้อ กระจก ยาสีฟัน ยา สีย้อมและเม็ดสี สารกึ่งตัวนำและวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศอย่างมากและส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ [27] และอาจนำไปสู่โรคต่าง ๆ เช่น โรคทางระบบประสาท โรคเบาหวาน โรคหลอดเลือดอักเสบ เป็นต้น การตรวจวัดปริมาณไอออนโลหะมีหลากหลายเทคนิค เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์เป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ตรวจวัดปริมาณไอออนโลหะโดยใช้หลักการวัดการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ที่เปล่งออกมาจากสารเปล่งแสงโดยใช้เครื่องวัดการเรืองแสงสเปกโตรฟลูออโรมิเตอร์ โดยสารเปล่งแสงชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ คือ คาร์บอนควอนตัมดอท เช่น การทำโครมาโทกราฟีของเหลว และเคมีไฟฟ้า [1]

คาร์บอนควอนตัมดอท (CDs) เป็นวัสดุนาโนคาร์บอนที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักและมีสมบัติที่หลากหลายสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานทางการแพทย์เพื่อการวินิจฉัยโรค เช่น โรคไต โรคมะเร็ง เป็นต้น จากคาร์บอนควอนตัมดอทมีการนำไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ที่ดี สมบัติในการฟอกสีด้วยแสงและการกระพริบของภาพถ่าย สมบัติการเรืองแสง ความสามารถในการละลายที่ดีสำหรับตัวกลางที่เป็นน้ำ ความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ และไม่มีความเป็นพิษ เป็นต้น [12] คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถนำมาใช้ในการตรวจจับสารเคมี เช่น ไอออนโลหะ โมเลกุลที่มีประจุลบ โมเลกุลขนาดเล็ก และสารชีวโมเลกุล [2] การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทจากสารอินทรีย์มีเทคนิคที่ใช้หลากหลาย เช่น ไฮโดรเทอร์มอล การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่ข้อเสียที่สำคัญคือผลผลิตควอนตัมดอท [23] จึงมีงานวิจัยพัฒนาให้ผลผลิตควอนตัมเพิ่มโดยการเติมไอออนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การพัฒนาคาร์บอนควอนตัมดอทจะให้ผลผลิตควอนตัมเพิ่มขึ้นทำได้ โดยการเจือไอออนโลหะเพื่อปรับปรุงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์และช่วยให้การรวมตัวของอิเล็กตรอนง่ายขึ้นบนพื้นผิวคาร์บอนควอนตัมดอท งานวิจัยของ Ting Jiao รายงานการพัฒนาคาร์บอนควอนตัมดอทเรืองแสงสีฟ้าสังเคราะห์ด้วยวิธีที่ง่าย ไม่รุนแรง โดยทำปฏิกิริยาที่  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ใช้สารพอลิไวนิลไพโรลิโดน (PVP) กรดแอสคอร์บิก (AA) และเจือไอออนโลหะ ได้แก่  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการตรวจจับเตตราไซคลิน (TC) โดยพบว่าไอออนโลหะ  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  มีบทบาทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาและพบว่า  $\text{Cu}^{2+}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพมากกว่า  $\text{Fe}^{3+}$  ส่งผลให้คาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์มีผลผลิตควอนตัมค่อนข้างสูงที่ 39.74% (Fe-CDs) และ 44.42% (Cu-CDs) โดยการเพิ่ม  $\text{Fe}^{3+}$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  ช่วยยืดอายุการใช้งานของฟลูออเรสเซนซ์ได้อีกด้วย [24]

งานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอทโดยการเจือด้วยไอออนโลหะต่าง ใช้เทคนิคไมโครเวฟ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็ว ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นแหล่งคาร์บอน ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน บอแรกซ์เป็นแหล่งโบรอน และไอออนโลหะต่าง ๆ ได้แก่ สังกะสี (Zn) และ เงิน (Ag) คาร์บอนควอนตัมดอทที่เตรียมได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Attenuated total reflectance fourier transform infrared spectrometer: ATR-FTIR), เครื่องอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer) และเครื่องฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Fluorescence spectrophotometer) จากนั้นนำคาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบการตรวจจับโลหะต่าง ๆ ได้แก่  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  จาก  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  จาก  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  จาก  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  จาก  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  จาก  $\text{NiCl}_2$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  จาก  $\text{CdCl}_2$  โดยตรวจวัดสมบัติการเรืองแสง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอทจากสมบัติการเรืองแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากกรดซิตริก, ยูเรีย และบอแรกซ์ และเจือด้วยโลหะ ได้แก่  $Zn^{2+}$  และ  $Ag^+$  โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ
2. ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท
3. วิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทด้วยเครื่อง ATR-FTIR, วิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงด้วยเครื่อง Fluorescence spectrophotometer, วิเคราะห์สมบัติการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectro photo-meter
4. ทดสอบการตรึงโลหะต่าง ๆ เช่น  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  ที่ความเข้มข้นที่ต่างกันของไอออนโลหะ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำคาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ตรวจวัดปริมาณโลหะในน้ำดื่มและน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คาร์บอนควอนตัมดอท (Carbon quantum dots: CDs) [2,41,42]

วัสดุคาร์บอนเรืองแสง ถูกค้นพบบังเอิญโดย Xu et al. ในปี 2004 มีลักษณะพิเศษ เช่น สมบัติทางแสงที่ดี (Excellent Optical properties) ความเป็นพิษต่ำ (Low toxicity) เสถียรภาพทางเคมีที่ดี (Good chemical stability) ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) เป็นต้น คาร์บอนควอนตัมดอท (CDs) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการตรวจวัดโดยอาศัยสมบัติการเรืองแสง (Fluorescent sensing) การถ่ายภาพทางชีวภาพ (Bioimaging) สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronic devices) การเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysis) การส่งยา (Drug delivery) เป็นต้น

#### 2.1.1 องค์ประกอบและโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท [8,13,54]

คาร์บอนควอนตัมดอทเป็นอนุภาคนาโนทรงกลม (Quasispherical) 0 มิติขนาดอนุภาคประมาณ 2-10 นาโนเมตร มีระยะห่างภายในระนาบ (Lattice spacing) อยู่ในช่วง 0.18-0.24 นาโนเมตร และระยะห่างระหว่างระนาบ (Layer spacing) 0.33 นาโนเมตร ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ จุดแกนกลาง (Core quantum dot) เป็นส่วนอสัณฐาน (Amorphous) มีคาร์บอนกราฟิตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีไฮบริไดเซชัน (Hybridization) แบบ  $sp^2$  และส่วนที่เคลือบแกนกลาง (Core-shell coating) มีไฮบริไดเซชันแบบ  $sp^3$  เนื่องจากการสร้างพันธะที่ยังไม่สมบูรณ์ของกราฟิต (graphite) โดยบริเวณพื้นผิวคาร์บอนควอนตัมดอทประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น หมู่คาร์บอกซิล (-COOH), หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) เป็นต้น ซึ่งสามารถกำหนดหมู่ฟังก์ชันบนผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท ขึ้นกับสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของคาร์บอนควอนตัมดอท [13]

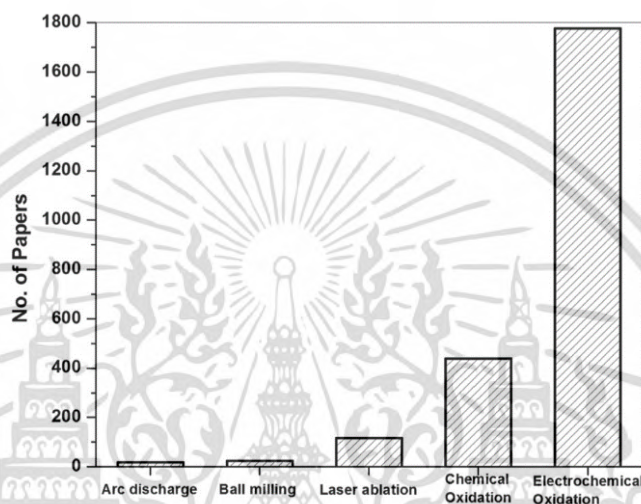
### 2.1.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท [2,39,40]

การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทเตรียมได้ 2 วิธีหลัก คือ วิธีสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down method) เช่น การสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Arc discharge) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) การขัดผิวด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical exfoliation) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) เป็นต้น และวิธีสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (Bottom-up method) เช่น การเผาไหม้ (Combustion thermal) ไพโรไลซิสด้วยไมโครเวฟ (Microwave pyrolysis) โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) เป็นต้น แหล่งคาร์บอนที่นำมาเตรียมพื้นผิวคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ รวมถึงสารอินทรีย์ เช่น แทงกราไฟต์ ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น สารอินทรีย์ เช่น กรดซิตริก กรดแอสคอบิก ของเหลวไอออนิก และแหล่งคาร์บอนที่มาจากธรรมชาติ เช่น สับปะรด สาหร่าย ผลแปะก๊วย รากบัว เปลือกปลาตะเพียนจีน เปลือกกล้วยแคะ เป็นต้น คาร์บอนควอนตัมดอทที่มาจากแหล่งคาร์บอนแตกต่างกัน ส่งผลให้การเรืองแสงแตกต่างกัน

#### 2.1.2.1 การสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down method) [3,53]

คาร์บอนควอนตัมดอทได้มาจากการตัดสารตั้งต้นคาร์บอนขนาดใหญ่ เช่น ท่อนาโนคาร์บอน แกรไฟต์ คาร์บอนแบล็ค ถ่าน และเขม่าเทียนให้เป็นเล็กลงโดยการใช้ไฟฟ้า ความร้อน พลังงานกลและอื่น ๆ กระบวนการทางกายภาพและกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์จากบนลงล่างคือ การสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Arc discharge) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

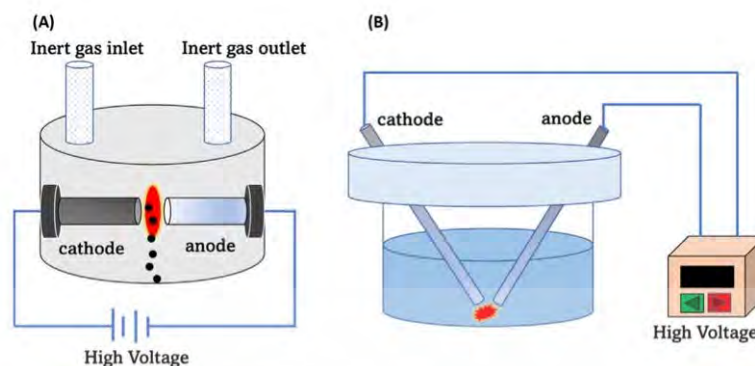
ablation) การกัดผิวด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical exfoliation) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) การบดวัตถุโดยใช้หลักการหมุน (Ball milling) โดยวิธีกัดผิวด้วยเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด ในขณะที่วิธีการสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นวิธีที่ใช้้น้อยที่สุด และวิธีการสังเคราะห์จากบนลงล่างเป็นพิษต่อเซลล์ที่ต้องถูกกระตุ้นด้วยแสง



รูปที่ 2.2 ปริมาณการใช้วิธีการสังเคราะห์จากบนลงล่าง (Top-down method) ระหว่างปี พ.ศ.2555-2565 [3]

1. การสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Arc discharge) เกิดจากสารตั้งต้นของคาร์บอนจำนวนมากถูกสลายตัวเพื่อสร้างอนุภาคนาโนคาร์บอนในบรรยากาศของพลาสมาเฉื่อยหรือในน้ำ โดยการใช้ไฟฟ้าแรงสูงผ่านขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าที่สูงมากซึ่งนำไปสู่การผลิตอนุภาคนาโนคาร์บอนที่ขั้วแคโทด [3]

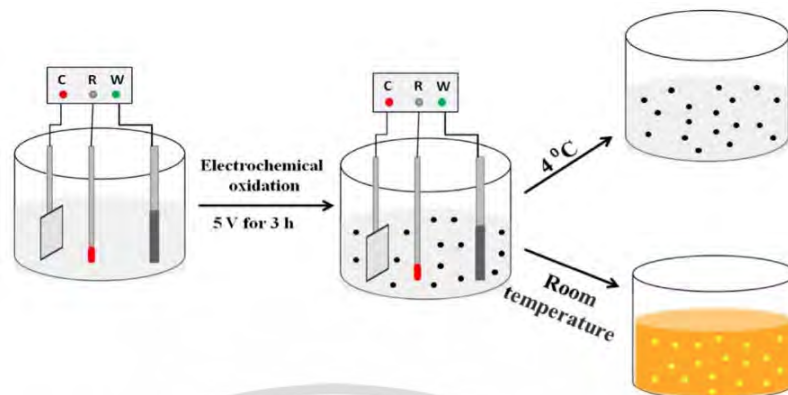
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การสลายตัวด้วยความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน: (A) ในเฟสก๊าซ  
เฉื่อยและ (B) ในน้ำ [3]

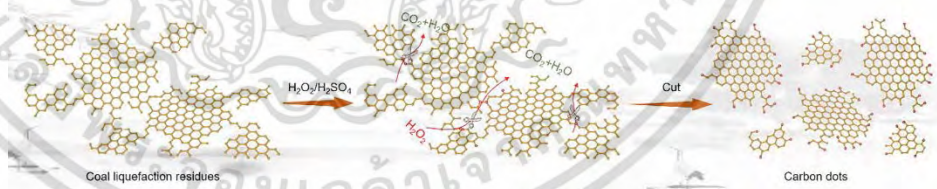
2. การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) เป็นวิธีทางกายภาพที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่เป็นเนื้อเดียวกัน (CQDs) โดยให้ผลผลิตควอนตัมสูงใช้สำหรับการแยกอนุภาคขนาดใหญ่ออกเป็นอนุภาคขนาดเล็กในช่วงของอนุภาคนาโนได้อนุภาคที่ละเอียดมากและมีความบริสุทธิ์สูงซึ่งมีความเป็นไปได้น้อยหรือไม่มีสิ่งเจือปนผสม [55-56]
3. การขีดผิวด้วยเคมีไฟฟ้า (Electrochemical exfoliation) วิธีนี้สามารถสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทปริมาณมากได้ เนื่องจากวัตถุดิบราคาถูก วิธีทำง่าย รวดเร็วและใช้เวลาสั้น คาร์บอนควอนตัมดอทถูกสังเคราะห์ภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสารตั้งต้นเป็นคาร์บอนประเภทแท่งคาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอน กราไฟต์และเขม่า โดยคาร์บอนถูกใช้เป็นตัวขั้วบวก ในวงจรปิดสารตั้งต้นของคาร์บอนจะผ่านกระบวนการออกซิเดชันหรือการขีดผิวเคมีไฟฟ้าซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท ขนาดและสมบัติของคาร์บอนควอนตัมดอทสามารถกำหนดได้จากสภาวะการสังเคราะห์ เช่น ศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ ความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้า อิเล็กโทรไลต์ และอุณหภูมิ [3,57]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากอิเล็กโทรดกราไฟต์โดยวิธีออกซิเดชันเคมีไฟฟ้าและการเปลี่ยนสีของการเก็บคาร์บอนควอนตัมดอท [3]

4. การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) ยกตัวอย่างการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากกากถ่านหินเหลว (CLR) มีตัวออกซิไดซ์คือ  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{SO}_4$  คาร์บอนควอนตัมดอทสังเคราะห์โดยการตัดสายอะลิฟาติกที่ทำปฏิกิริยาผ่านออกซิเดชันเนื่องจากโครงสร้างอะโรมาติกที่มีการควบแน่นสูงของถ่านหินถูกตัดบางส่วนให้เป็นโมเลกุลคอนจูเกตขนาดเล็กที่เชื่อมโยงด้วยสายอะลิฟาติก [58]



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมจากกากถ่านหินเหลวโดยวิธีออกซิเดชัน [58]

5. การบดวัตถุโดยใช้หลักการหมุน (Ball milling) วิธีนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกบดเป็นอนุภาคขนาดเล็กด้วยแรงทางกลเพื่อทำลายพันธะเคมีและทำให้อนุภาคแตกหักโดยไม่ต้องใช้สารเคมีอันตรายผลจากการบดจะนำไปสู่การลดขนาด การขัดสีและทำให้เกิดอนุภาคนาโนในที่สุด ขนาดของอนุภาคนาโนที่ได้ขึ้นอยู่กับ

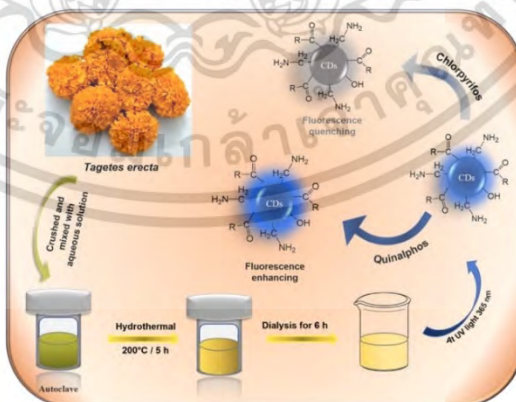
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาด จำนวน และประเภทวัสดุของลูกบอล ประเภทวัสดุของ กระบอกสูบ และความเร็วในการหมุน วิธีนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะได้วัสดุนาโนที่มี รูปร่างผิดปกติ [3,59]

### 2.1.2.2 การสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (Bottom-up method) [4]

เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท โดยวิธีการ สังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และไมโครเวฟ (Microwave) วิธีการสังเคราะห์จากล่างขึ้นบนถือได้ว่าเหมาะสมสำหรับการผลิตจำนวนมาก ต้นทุนต่ำ และเป็นตัวเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สารตั้งต้นสามารถเลือกใช้สารอินทรีย์ชนิด ต่าง ๆ เช่น คาร์โบไฮเดรตและกรดอะมิโน ไปจนถึงวัสดุจากแหล่งต่าง ๆ เช่น ข้าว เมล็ด กาแฟ และวัสดุเหลือใช้

1. ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถทำได้ ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง สังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากอะซิโตนไนไตรล์ด้วยการ ฉายรังสีเลเซอร์ที่มีพลังงานสูง คาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ขึ้นมีการเรืองแสง ผลผลิตควอนตัมสูง และมีความเสถียร [4,51]

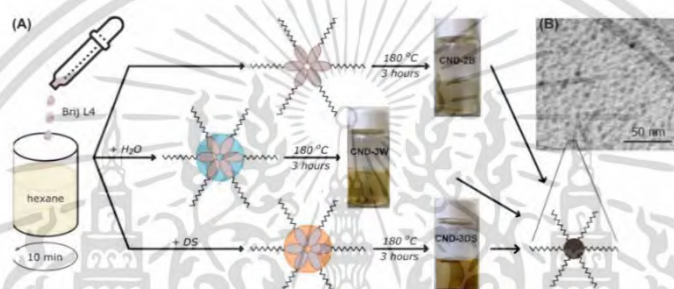


รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมโดยใช้ดอก Tagetes erecta เป็นแหล่ง

คาร์บอนและประยุกต์ ใช้ตรวจจับสารกำจัดศัตรูพืช [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยาดเห็นไปยังประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โซลโวเทอร์มอล (Solvothermal) เป็นเทคนิคของการตกผลึกของสารละลายที่ไม่ชอบน้ำที่อุณหภูมิและความดันไอสูง ยกตัวอย่างการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากเปลือกเมล็ดปาล์ม (PKS) โดยมี NN dimethylformamide เป็นตัวทำละลาย โดยคาร์บอนควอนตัมดอทเรืองแสงที่ 520 นาโนเมตรและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 นาโนเมตรสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ระบบจัดเก็บประจุไฟฟ้าและการปั่นด้วยไฟฟ้า [4,60]



รูปที่ 2.7 (A) การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่ไม่ชอบน้ำโดยใช้เฮกเซนเป็นแหล่งคาร์บอน (B) ภาพ TEM ของคาร์บอนควอนตัมดอทที่ไม่ชอบน้ำ [4]

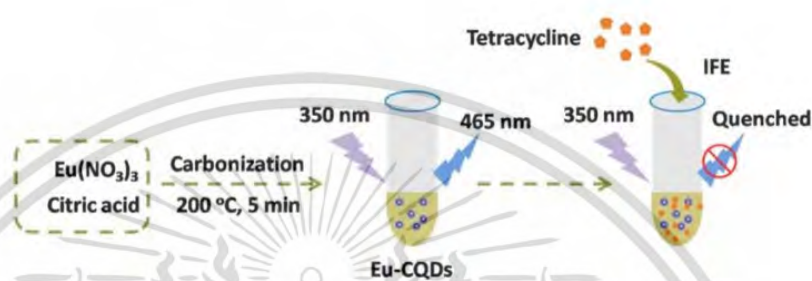
3. ไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นวิธีที่กระบวนการทางเคมีความร้อนที่ใช้กับวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ ทำที่อุณหภูมิสูงโดยการแยกทางเคมีและกายภาพออกเป็นโมเลกุลต่าง ๆ โดยไม่มีออกซิเจน [46-49]



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทโดยใช้ใบ Mangifera indica เป็นแหล่งคาร์บอน [4]

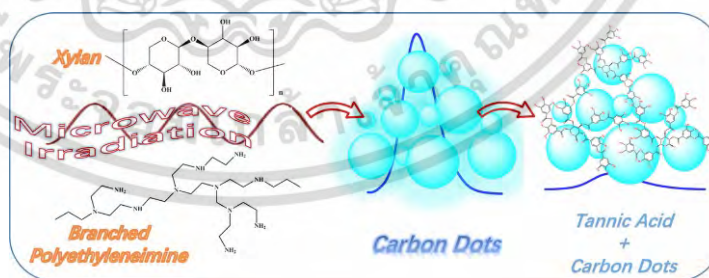
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นวิธีเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศ สามารถคุมอุณหภูมิและความดันของเตาเผาไหม้ จากรูปที่ 2.8 เป็นตัวอย่างงานวิจัยการเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยยูโรเปียม (Eu-CQDs) ด้วยวิธีคาร์บอนไนเซชันที่ง่ายและรวดเร็วซึ่งทำงานที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที Eu-CQDs มีการเรืองแสงสีน้ำเงิน [5]



รูปที่ 2.9 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท (Eu-CQDs) [4-5]

5. ไมโครเวฟ (Microwave) การให้ความร้อนวัตถุดิบหรือวัสดุต้นทางเรียกว่าการสังเคราะห์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ ตัวอย่างงานวิจัยเป็นการเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทที่เป็นพอลิเอมีน จากสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วยไซแลน (Xylan) ที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ และพอลิเอทิลีนที่มีกิ่ง (Branched Polyethyleneimine) สำหรับการตรวจจับกรดแทนนิก (TA) [6]



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทและการตรวจจับแทนนิก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.3 การปรับเปลี่ยนพื้นผิวโดยใช้สารอะตอมอื่นนอกจากคาร์บอน (Surface functionalization)

### 2.1.3.1 การใช้โลหะ [17,42]

คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีการเจือด้วยอะตอมอื่นหรือไอออนโลหะ สามารถเปลี่ยนการกระจายความหนาแน่นของประจุและช่องว่างพลังงานของคาร์บอนควอนตัมดอท จึงส่งผลทำให้สมบัติทางแสง ไฟฟ้า และแม่เหล็กมีประสิทธิภาพมากขึ้น ไอออนโลหะมีอิเล็กตรอนเปล่าหรือออร์บิทัล (Orbitals) มากกว่าและมีรัศมีอะตอมสูงกว่าอะตอมของโลหะ อีกทั้งการเจือด้วยไอออนโลหะยังช่วยเร่งปฏิกิริยาและเพิ่มความสามารถในการตรวจจับได้อีกด้วย

### 2.1.3.2 การใช้อโลหะ [17,50]

คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีการเจือด้วยอโลหะหรือเฮเทอโรอะตอม เช่น ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) เนื่องจากอะตอมของคาร์บอนและไนโตรเจนมีความคล้ายคลึงกัน ไนโตรเจนจึงเป็นธาตุเฮเทอโรอะตอมที่ใช้มากที่สุดในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทโดยวัสดุที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้ตรวจจับองค์ประกอบที่เป็นมลพิษในสิ่งแวดล้อมได้ นำไปสู่การแก้ไขปัญหาสำหรับการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อม

## 2.14 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนควอนตัมดอท (Quantum size) [9,52]

ขนาดอนุภาคของคาร์บอนควอนตัมดอทที่ไม่เท่ากันจะส่งผลต่อสมบัติการเรืองแสง โดยคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีขนาดเล็กประมาณ 1.2 นาโนเมตร จะคายพลังงานแสงอยู่ในช่วงยูวี (UV light) คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีขนาดกลางประมาณ 1.5-3 นาโนเมตร จะคายพลังงานแสงอยู่ในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) 400-700 นาโนเมตรและคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 3.8 นาโนเมตร จะคายพลังงานแสงในช่วงใกล้อินฟราเรด (Near-infrared)

## 2.1.5 สมบัติของคาร์บอนควอนตัมดอท [10-12]

คาร์บอนควอนตัมดอทมีสมบัติที่โดดเด่นจึงมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านชีวการแพทย์

หลายด้าน การตรวจจับและกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5.1 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของคาร์บอนควอนตัมดอท

- 1.) คาร์บอนควอนตัมดอทที่มีการถ่ายเทพะจุที่ดีเมื่อเทียบกับวัสดุนาโนที่มีคาร์บอนอื่นๆ ทำให้พื้นที่ผิวมีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น และความเป็นพิษที่ต่ำ
- 2.) คาร์บอนควอนตัมดอทมีหมู่ฟังก์ชัน เช่น คาร์บอกซิล (-COOH) ไฮดรอกซิล (-OH) และอะมิโนในโครงสร้าง ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีจึงทำให้มีความไว (Sensitivity) และการเลือก (Selectivity) เพิ่มมากขึ้น
- 3.) เมื่อเจือเฮเทอโรอะตอมลงในคาร์บอนควอนตัมดอท เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ โบรอน ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของสารดีขึ้น เนื่องจากความสามารถในการถ่ายโอนประจุภายในโมเลกุล
- 4.) คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถเพิ่มกระบวนการอิเล็กโทรแคทาไลซิส (Electrocatalysis process) ในปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า เช่น Oxygen evolution reaction (OER), Hydrogen evolution reaction (HER), Oxygen reduction reaction (ORR) และ Alcohol oxidation reaction (AOR)

### 2.1.5.2 สมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท

- 1.) การดูดกลืน (Absorption) การเปลี่ยนแปลง  $\pi-\pi^*$  ของพันธะ C=C ในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอทแสดงค่าดูดกลืนแสงตั้งแต่ 260-320 นาโนเมตร ช่วงการดูดกลืนแสงอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทและหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอนควอนตัมดอท
- 2.) การเรืองแสง Fluorescence เป็นปรากฏการณ์ที่ความยาวคลื่นกระตุ้นมากกว่าความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมา มีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้งานทางชีวภาพ มีความเข้ากันได้ของชีวภาพที่ดี
- 3.) การเรืองแสง Phosphorescence ใช้เวลาในการเรืองแสงออกมานานกว่าฟลูออเรสเซนต์และระดับพลังงานของโฟตอนที่ถูกคายออกมาจากกระบวนการ Phosphorescence นั้นจะมีค่าต่ำกว่าด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.) การเรืองแสงทางเคมี (Chemiluminescence) การเรืองแสงผ่านปฏิกิริยาเคมีภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) หรือกระตุ้นหลังจากออกซิเดชัน(Oxidation)โดยตรง
- 5.) การเรืองแสงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical luminescence) คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถปล่อยโฟตอนในช่วงที่มองเห็นได้ภายใต้การกระตุ้นด้วยไฟฟ้า การถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากคาร์บอน  $sp^2$  มีจำนวนมากในคาร์บอนควอนตัมดอท

### 2.1.6 กลไกการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท [8,30]

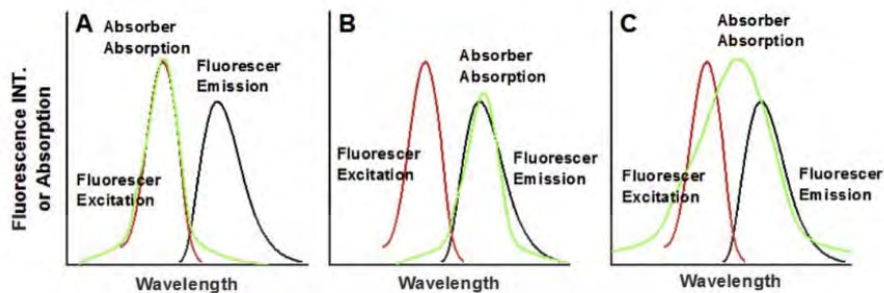
เมื่อคาร์บอนควอนตัมดอทได้รับการกระตุ้นจากพลังงานจะทำให้อิเล็กตรอนชั้นนอกสุดไปสู่สถานะกระตุ้น (The lowest unoccupied molecular orbital: LUMO) ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างอิเล็กตรอนในระดับพลังงานสถานะพื้น (The highest occupied molecular orbital: HOMO) และในระดับพลังงานสถานะกระตุ้นจะมีอิเล็กตรอนมากขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนตัวกลับลงมาในระดับพลังงานสถานะพื้นก็จะปลดปล่อยพลังงานในรูปของแสงออกมา

### 2.1.7 กลไกการตรวจจับของคาร์บอนควอนตัมดอท

#### 2.1.7.1 Inner filter Effect (IFE) [14]

การตรวจจับของกลไก IFE ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ตัวดูดซับ (Absorber) และสารเรืองแสง (Fluorescer) กลไก IFE เป็นกลไกการดับการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท เนื่องจากตัวดูดซับดูดกลืนแสงที่ใช้ในการกระตุ้นและในกลไกนี้สารดูดซับมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงซ้อนทับกับสเปกตรัมการกระตุ้นของสารเรืองแสง ส่งผลให้เกิดการลดความเข้มของการเรืองแสงโดยเกิดความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างความเข้มของการเรืองแสงที่สังเกตได้และความเข้มข้นของฟลูออเรสเซนต์

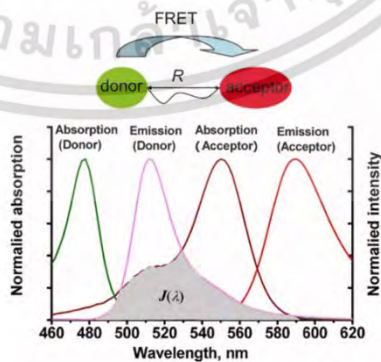
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิด Inner filter Effect (IFE) [14]

2.1.7.2 Forster Resonance Energy Transfer (FRET) [15]

การตรวจจับของกลไก FRET ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) คือคาร์บอนควอนตัมดอทและตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) คือสารที่ต้องการวิเคราะห์ หลักการของกลไก FRET คือ สเปกตรัมการปลดปล่อยของตัวให้อิเล็กตรอนซ้อนทับกับสเปกตรัมการดูดซับของตัวรับอิเล็กตรอนและกระตุ้นให้โมเลกุลของตัวให้อิเล็กตรอนเกิดการปลดปล่อยพลังงานให้โมเลกุลของตัวรับอิเล็กตรอนเกิดการเรืองแสง ดังนั้นความเข้มของการเรืองแสงของโมเลกุลตัวให้อิเล็กตรอนมีค่าลดลง พลังงานในกระบวนการนี้ถูกถ่ายโอนโดยไดโพล (Dipoles)

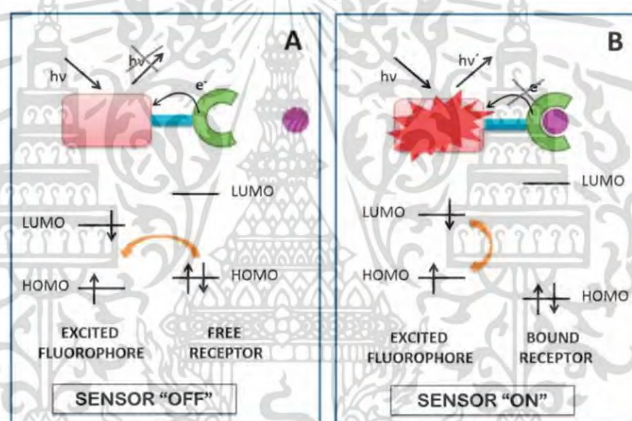


รูปที่ 2.12 กลไกการเกิด Forster Resonance Energy Transfer (FRET) [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไม่เหมาะสมตนการจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7.3 Photo-Induced Electron transfer (PET) [16]

การตรวจจับของกลไก PET ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) หลักการของกลไก PET ในสภาวะ sensor off จะถูกกระตุ้นด้วยแสง และดูดกลืนพลังงานในช่วงที่เหมาะสม ตัวรับอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (HOMO) จะรับพลังงานไปสู่สถานะกระตุ้น (LUMO) จากนั้นตัวให้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนไปอยู่ในสถานะพื้นทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ระหว่างการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้การเรืองแสงลดลง และในสภาวะ sensor on ตัวให้อิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะพื้น ตัวให้อิเล็กตรอนจะอยู่ในระดับพลังงานที่ต่ำกว่าสถานะพื้น ทำให้ไม่เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิด Photo-Induced Electron transfer (PET) [16]

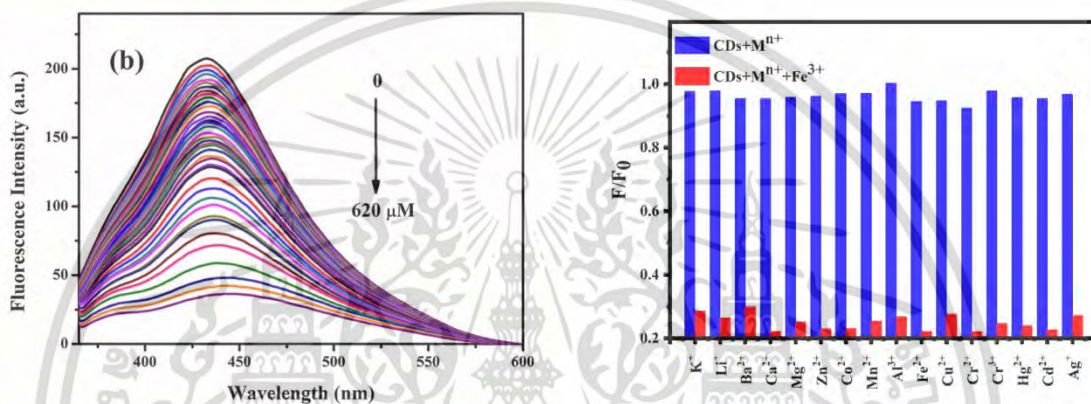
### 2.1.8 การตรวจจับสารเคมี [1-2]

มีการใช้คาร์บอนควอนตัมในการตรวจจับไอออนโลหะ การตรวจจับประจุลบ สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก และการตรวจจับสารชีวโมเลกุล เนื่องจากมีสมบัติทางแสงที่ดี มีเสถียรภาพทางเคมี และความสามารถในการละลายน้ำที่ดี

#### 2.1.8.1 การตรวจจับไอออนโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

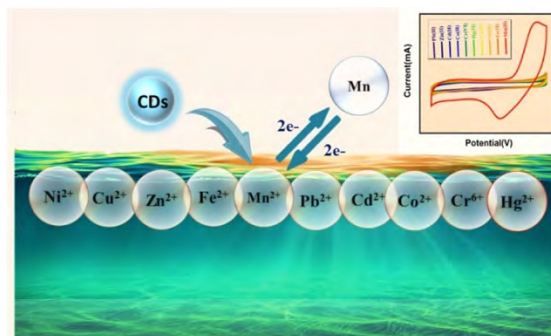
2.1.8.1.1 วิเคราะห์ตรวจจับไอออนของโลหะ  $\text{Fe}^{3+}$  โดยนักวิจัยสนใจใช้วิธีเซนเซอร์ฟลูออเรสเซนซ์ เนื่องจากมีความโดดเด่นหลายประการ อาทิ ความรวดเร็ว ใช้งานง่าย ราคาถูก มีความแม่นยำ และมีความไวสูง โดยใช้คาร์บอนควอนตัมเป็นตัวเซนเซอร์เรืองแสง มีการเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอกจากแคโรนเบอร์รี่ซึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอนด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สามารถดัดแปลงการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อความเข้มข้นของไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  มีค่า  $620 \mu\text{M}$  โดยวิธีนี้สามารถนำไปใช้ตรวจจับ  $\text{Fe}^{3+}$  ในน้ำประปาและน้ำพุธรรมชาติ [1]



รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการเรืองแสง และอัตราส่วนความเข้มข้นของการเรืองแสงที่แตกต่างกันของคาร์บอนควอนตัมดอตที่มีไอออนโลหะหลายชนิด ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ความยาวคลื่น 340 nm [1]

2.1.8.1.2 วิเคราะห์ตรวจจับไอออนของโลหะ  $\text{Mn}^{2+}$  โดยคาร์บอนควอนตัมดอตถูกใช้เป็นเซนเซอร์เรืองแสงสังเคราะห์โดยใช้กรดซิตริกและทรिसเบส (tris base) เป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีไมโครเวฟ และทดสอบการตรวจจับ  $\text{Mn}^{2+}$  ด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า มีค่า LOD ประมาณ  $0.37 \text{ nM}$  และวิธีนี้สามารถนำไปใช้ตรวจจับ  $\text{Mn}^{2+}$  ในน้ำประปาและแม่น้ำ [7]

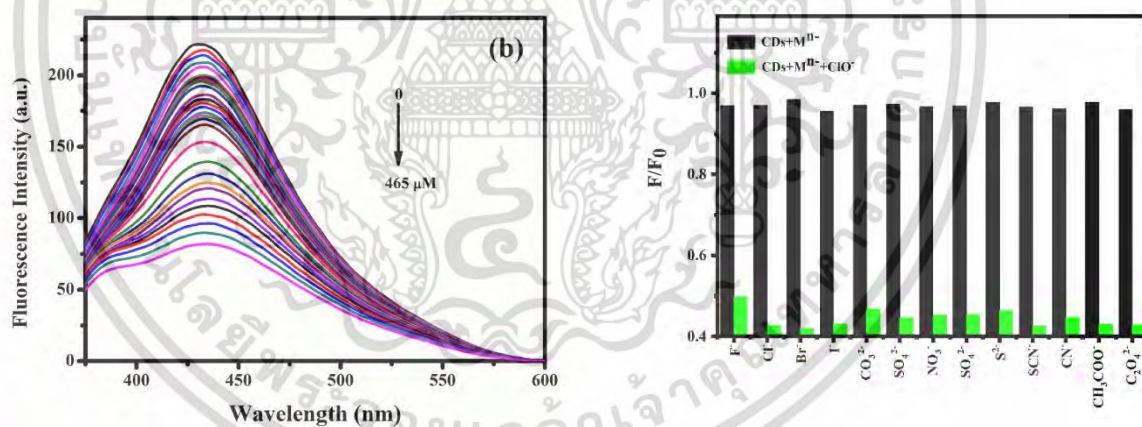
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กลไกทางเคมีไฟฟ้าของการตรวจจับ  $Mn^{2+}$  โดยใช้คาร์บอนควอนตัมดอท [7]

### 2.1.8.2 การตรวจจับโมเลกุลประจุลบ

2.1.8.2.1 วิเคราะห์ตรวจจับแอนไอออน  $ClO^-$  โดยคาร์บอนควอนตัมดอทถูกใช้เป็นเซนเซอร์เรืองแสง เมื่อนำมาตรวจจับไอออน  $ClO^-$  พบว่าการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทมีค่าต่ำกว่าแอนไอออนชนิดอื่น ๆ การเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทสามารถดับลงเมื่อความเข้มข้นของไอออน  $ClO^-$  มีค่า  $465 \mu M$  วิธีนี้สามารถใช้ตรวจจับ  $ClO^-$  ในน้ำประปาและน้ำพุธรรมชาติ [1]

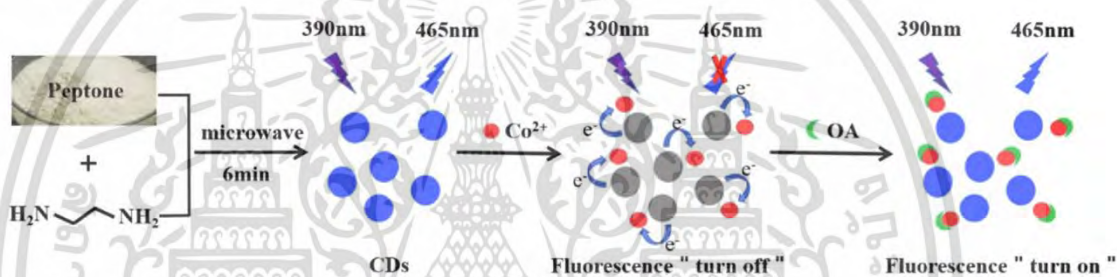


รูปที่ 2.16 สเปกตรัมการเรืองแสง และอัตราส่วนความเข้มข้นของการเรืองแสงที่แตกต่างกันของคาร์บอนควอนตัมดอทที่มีแอนไอออนหลายชนิด ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี  $ClO^-$  ที่ความยาวคลื่น 340 nm [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.8.3 การตรวจจับสารอินทรีย์

2.1.8.3.1 วิเคราะห์ตรวจจับกรดออกซาลิก (OA) ซึ่งกรดออกซาลิกเป็นกรดอินทรีย์ที่อยู่ในพืชหลายชนิด ถ้ามีปริมาณมากเกินไปในอาหารจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของร่างกาย ระดับกรดออกซาลิกในปัสสาวะใช้เป็นตัววินิจฉัยโรคไตได้ คาร์บอนควอนตัมดอทที่ใช้ศึกษาสังเคราะห์โดยใช้เปปโทนเป็นแหล่งคาร์บอนซึ่งให้ผลผลิตควอนตัมสูงสามารถตรวจจับกรดออกซาลิกด้วยวิธีตรวจจับการเรืองแสงของของผสมระหว่าง  $\text{Co}^{2+}$  และกรดออกซาลิก โดยอาศัยสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทที่ลดลง (turn off) เมื่อมี  $\text{Co}^{2+}$  ในขณะที่การเติมกรดออกซาลิกส่งผลให้การเรืองแสงกลับคืนมา (turn on) โดยมีขีดจำกัดการตรวจจับที่ความเข้มข้นต่ำถึง 0.288 mg./L แสดงถึงวิธีตรวจจับฟลูออเรสเซนซ์ในระบบนี้มี ความไวสูง โดยสามารถนำไปตรวจจับกรดออกซาลิกในตัวอย่างมะเขือเทศและมะเขือเทศเชอร์รี่ได้ [2]



รูปที่ 2.17 ภาพการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทและกลไกการตรวจจับกรดออกซาลิก [2]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Oguz Gencer และคณะ [18] ศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทที่ถูกกระตุ้นโดยการส่งผ่านหมู่คาร์บอกซิลิกบนพื้นผิวด้วย Zinc (II) สารตั้งต้นที่ใช้ คือ กรดซิตริกโมโนไฮเดรต, ซิงค์คลอไรด์ ด้วยอัตราส่วนโมลาร์ที่ 1:1 และ 1:10 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตร ใช้วิธีให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 20 นาที ปล่อยให้เย็นตัวลงในจานเพาะเชื้อจนได้เจลที่มีสีเหลือง นำมาละลายในน้ำบริสุทธิ์ 10 มิลลิลิตร จากนั้นกรองผ่านฟิลเตอร์ขนาด 0.22 ไมโครเมตร และปั่นกวนที่ 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที จากอัตราส่วนที่แตกต่างกันทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดของการปลดปล่อยพลังงานและสมบัติของโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วย Zinc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Hari Krishna Shadhanala และคณะ [19]** ศึกษาการตรวจจับไอออนของแมกนีเซียมในน้ำ และการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับไอออนโลหะของแมกนีเซียมภายในเซลล์ จากคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจน โดยสารตั้งต้นที่ใช้ คือ 4-ไฮดรอกซีเบนซาลดีไฮด์, 1, 2, 4, 5-เบนเซเนตตระมีนเตตระไฮโดรคลอไรด์, ควินินซัลเฟต และเกลือ ละลายน้ำบริสุทธิ์ 20 มิลลิลิตร แล้วคนสารละลายเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปให้ความร้อนโดยหม้อน้ำความดันสแตนเลสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส รอให้เตาอบเย็นลงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำไปปั่นจนเป็นเวลา 30 นาที จะได้สารละลายสีเหลืองเข้มข้นไปกรองผ่านฟิเตอร์ขนาด 0.22 ไมโครเมตร จนได้สารละลายสีเหลืองใสแล้วนำไปปลูกโตอะไลซ์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในน้ำ พบว่าคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนมีการตรวจจับไอออนโลหะของแมกนีเซียมและการตรวจจับไอออนโลหะของแมกนีเซียมภายในเซลล์ได้ดี

**Thuy S. Ngo และคณะ [20]** ศึกษาตัวดูดซับแบบไฮบริดและการกำจัดไอออนของโลหะโครเมียม (IV) และโคบอลต์ (III) ออกจากน้ำเสีย โดยสารตั้งต้นที่ใช้ คือ ไคตินจากเปลือกกุ้ง, กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น, เอทิลีนไดเอมีน, เหล็ก (III) คลอไรด์, แมกนีเซียมคลอไรด์, อะลูมิเนียมไนเตรท และโซเดียมคลอไรด์ นำเปลือกกุ้ง 5 กรัม มาผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยกรด โดยถูกต้มในน้ำ DI 150 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 140 องศาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไปทีละหยด 50 มิลลิลิตร หลังจากนั้นไปทำการรีฟลักซ์ที่ 140 องศา เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้เย็นลงโดยการนำไปเติมน้ำเย็นและปล่อยให้ตกตะกอนข้ามคืน สารที่ลอยขึ้นมาถูกเทออกและนำไปปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ตะกอนถูกโตอะไลซ์ในน้ำ DI เป็นเวลา 2-3 วัน โดยเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 2-3 ชั่วโมง ตัวดูดซับนี้มีความเสถียรเป็นเวลาอย่างน้อย 30 วัน และการเรืองแสงมีความเข้มข้นมากที่สุดที่ pH 6-7 และสามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักได้ง่ายโดยการใช้กรดหรือเบสสำหรับการฟื้นฟูตัวดูดซับ

**Sobhi Daniel และคณะ [21]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือไนโตรเจนและไนโตรเจน/ซัลเฟอร์ของโลหะทรานซิชัน ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$ ) โดยใช้วิธีไมโครเวฟโดยใช้กำลังไฟ 500 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที สารตั้งต้นที่ใช้ คือ ยูเรีย 1.2 มิลลิกรัม, โทโอยูเรีย 1.52 มิลลิกรัม และ EDTA 0.05 มิลลิโมลาร์ ละลายในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร นำไปผสมกับน้ำมะนาวสด 10 มิลลิลิตร จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม หลังจากนั้นนำไปละลายน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร และนำไปปั่นจน เก็บส่วนที่อยู่เหนือตะกอนไปเจือกับไนโตรเจนและไนโตรเจน/ซัลเฟอร์ของโลหะทรานซิชัน สารที่เจือด้วย  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  และ  $Co^{2+}$  มีการเพิ่มประสิทธิภาพการกักเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเกือบ 5 เท่า และคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือไนโตรเจนและไนโตรเจน/ซัลเฟอร์ของโลหะทรานซิชัน ( $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$ ) มีสมบัติการเรืองแสงที่เพิ่มขึ้น

**Aline C.C. Pena และคณะ [22]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากถ่านชีวภาพสำหรับขนาดเล็กลำสำหรับการตรวจจับโครเมียม โดยนำมวลชีวภาพของสาหร่ายขนาดเล็กลำผ่านกระบวนการไพโรไลซิส หลังจากนั้นนำมาสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทด้วยการดีพอลิเมอไรเซชัน โดยเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตทั้งหมด 5 ความเข้มข้น ได้แก่ 0, 1.46, 5, 8.54 และ 10% แล้วเติมน้ำ 20 มิลลิลิตร หลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยานำสารไประเหยน้ำออกโดยใช้เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุนแล้วนำไปสกัดสารด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นนำไปไดอะไลซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปกรองเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่ผ่านกระบวนการดีพอลิเมอไรเซชันทางความร้อนด้วย  $KMnO_4$  ที่ความเข้มข้น 8.54 และ 10 มีความเสถียรและความเข้มของการเรืองแสงที่ดี แต่เมื่อเติมโครเมียมลงในตัวอย่างพบการดับของแสงฟลูออเรสเซนซ์เมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะเพิ่มขึ้น

**Kunfeng Liu และคณะ [25]** ศึกษาการดัดแปลงพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนและกำมะถันโดยใช้โพลีเอทิลีนนิมีนเป็นตัวเจือเพื่อเป็นการตรวจจับไอออนของปรอท ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำในทะเลสาบและข้าวเป็นตัวอย่างจริงในการศึกษาประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์เรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนและกำมะถันในการตรวจจับไอออนของปรอทโดยการเตรียมโพลีเอทิลีนนิมีน 0.5 กรัม และซิสเทอีน 0.25 กรัม สารละลายถูกนำมาให้ความร้อนให้หม้อความดันที่อุณหภูมิ 180 องศา เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.22 ไมโครเมตร และนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที นำสารละลายที่ได้ไปไดอะไลซ์ (1,000 Da) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากการดัดแปลงพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนและกำมะถันพบว่าไอออนของปรอทสามารถดับความเข้มของการเรืองแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไอออนของปรอทยังเป็นเซ็นเซอร์ที่แสดงความไวสูงในตัวอย่างน้ำทะเลและข้าวอีกด้วย

**Dejian Dai และคณะ [26]** ศึกษาการตรวจจับไอออนของปรอทโดยอาศัยการดับด้วยแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทโดยใช้การทดลองร่วมกับการคำนวณทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นขึ้นกับเวลา (TDDFT) สังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล โดยใช้แอมโมเนียมซัลเฟต 3 กรัม และแอมโมเนียโบคาร์บอเนต 1 กรัม เจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร และนำมาบำบัดด้วยคลื่นความถี่สูง 100 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที สรุปได้ว่าจากการศึกษาทั่วโลกการดับการเรืองแสงของคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอนตัมคอตจากการตรวจจับไอออนของปรอทโดยการใช้การทดลองร่วมกับการคำนวณ TDDFT ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิสัมพันธ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างไอออนของปรอทกับหมู่เอไมด์บนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมคอตนำไปสู่การดักจับของไอออนของปรอท

**Chechia Hu และคณะ [27]** ศึกษาการเตรียมคาร์บอนควอนตัมคอตที่เจือด้วยไนโตรเจนโดยใช้กากน้ำมันชาวมที่ผ่านการบำบัดด้วยไฮโดรเทอร์มอลด้วยยูเรียเพื่อตรวจหาไอออนของโลหะโดยการตรวจสอบการดับโฟโตลูมิเนสเซน โดยเตรียมจากกากน้ำมันชาวมถูกล้างด้วยสารละลายเมทานอลในน้ำและน้ำปราศจากไอออน 3 ครั้ง บดให้ละเอียด และนำไปอบในเตาหลอมแบบท่อเพื่ออบความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศา เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาบดและล้างหลังจากนั้นทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศา เพื่อเตรียมไปเจือด้วยไนโตรเจน จากงานวิจัยพบว่าคาร์บอนควอนตัมคอตที่ได้มาจากกากน้ำมันชาวมที่มีไนโตรเจนสามารถใช้เป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพสำหรับการตรวจจับไอออนของเหล็กและไอออนของปรอท

**S. Gokul Eswarn และคณะ [31]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมคอตจากเศษขนมปังและการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ไอออนตะกั่ว สังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมคอตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยที่วิธีการเตรียมคือนำขนมปังมาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปโดอะไลซ์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้ น้ำกลั่น 1 ลิตร และเปลี่ยนน้ำทุก ๆ 30 นาที หลังจากนั้นนำไปตรวจจับไอออนตะกั่ว และวิเคราะห์กับตัวอย่างจริง ได้แก่ น้ำ, น้ำในแม่น้ำ และน้ำดื่ม จากงานวิจัยนี้พบว่าการสังเคราะห์เศษขนมปังด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลมีความเสถียรสามารถนำสารตัวอย่างมาใช้ได้ภายในระยะเวลา 7 เดือน และยังสามารถตรวจจับไอออนตะกั่วในตัวอย่างสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้อีกด้วย

**Neeraj Sohal และคณะ [35]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมคอตที่เจือและไม่ได้เจือด้วย heteroatom เพื่อไปตรวจจับไอออนตะกั่ว คาร์บอนควอนตัมคอตเจือด้วยไนโตรเจนและกำมะถัน โดยมีกรดซิติคเป็นสารตั้งต้นของคาร์บอน และซิสเทอีนเป็นสารตั้งต้นของไนโตรเจน โดยไม่มีตัวทำละลายใด ๆ และนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 5 นาที จนคาร์บอนควอนตัมเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองหรือสีแดง จากนั้นเติมน้ำ DI 5 มิลลิลิตร แล้วไปปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที นำส่วนที่เหนือตะกอนไปโดอะไลซ์เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปตรวจจับไอออนตะกั่วในตัวอย่างจริง เช่น น้ำในแบตเตอรี่ จากงานวิจัยพบว่าการตรวจพบไอออนของโลหะด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectroscopy (ASS) แสดงให้เห็นว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้กับการวิเคราะห์ตัวอย่างได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จริง ทั้งตัวที่เจือและไม่ได้เจือด้วย heteroatom แต่ตัวที่เจือด้วย heteroatom นั้นมีความเสถียรภาพทางแสงที่ดีกว่าตัวที่ไม่ได้เจือด้วย heteroatom

**Ting-Yi Wang และคณะ [37]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทผ่านกระบวนการรีฟลักซ์แบบขั้นตอนเดียว โดยสารตั้งต้นที่ใช้ คือ L-cysteine 20 มิลลิลิตร, กาแลคโตส 10 มิลลิโมลาร์ ผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.4 โมลาร์ โดยผ่านกระบวนการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อได้สารตัวอย่างได้สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน ตามลำดับ นำสารตัวอย่างที่ได้มาทำให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องและนำไปโคเอโลไลซ์ หลังจากนั้นนำไป Freeze-dried เป็นเวลา 2 วัน จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าวิธีการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่ผ่านกระบวนการรีฟลักซ์แบบขั้นตอนเดียวนั้นเมื่อนำไปดู UV light มีสีที่แตกต่างกันเนื่องจากการปรับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยา เพื่อให้นำไปใช้งานจริงในการตรวจจับโมเลกุลต่าง ๆ โดยที่คาร์บอนควอนตัมดอทสีน้ำเงินนำไปตรวจจับคาเฟอีนโดยตรงในตัวอย่างเชิงซ้อน คาร์บอนควอนตัมดอทสีเขียวนำไปตรวจจับเมลามีน และคาร์บอนควอนตัมดอทสีเหลืองนำไปตรวจจับเพนิโทรธอน งานวิจัยนี้ยืนยันได้ว่าคาร์บอนควอนตัมดอทที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับวัสดุอื่น ๆ รวมไปถึงเป็นเซนเซอร์และการตรวจจับในร่างกาย

**Nithya Selvaraju และคณะ [43]** ศึกษาประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยไนโตรเจนโดยสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สารตั้งต้นคือ น้ำผลไม้ซีตรัสเมดิคากายใต้สภาวะต่าง ๆ เช่น ค่า pH อุณหภูมิ และเวลา (5 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง) ตัวอย่างของคาร์บอนควอนตัมดอทที่เตรียมที่เวลาต่างกัน 2 ช่วง คือ 5 ชั่วโมง และ 8 ชั่วโมง อุณหภูมิแตกต่างกัน 3 องศา 180 องศา, 210 องศา และ 240 องศา ค่า pH ที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 1, 7 และ 14 มีการนำไปเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และนำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอทที่ได้ไปทดสอบลิเธียมสวิตช์โวลแทมเมตรี, อิมพีแดนซ์ และโครโนโพเทนซีโอเมตรี จากงานวิจัยนี้พบว่า การเติมไนโตรเจนเข้าไปทำให้ช่วยปรับปรุงการดูดซับไฮโดรเจนและเร่งจลนพลศาสตร์ของประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาไฟฟ้าได้ดีขึ้น

**Hailong Shen และคณะ [44]** ศึกษาการสังเคราะห์กราฟีนที่เจือด้วยไนโตรเจนที่สามารถทำได้ในเวลาสั้น ๆ ที่อุณหภูมิต่ำโดยรังสี UV ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนของแอมโมเนียมโบคาร์บอเนต โดยกราฟีนออกไซด์ถูกเคลือบบนแผ่นโพลีเมอร์ Ni ถูกใช้ในสารกระจายตัวกราฟีนออกไซด์ด้วยความเข้มข้น 2 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที แล้วทำให้แห้งเป็นเวลาหลายชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำแผ่นกราฟีนที่ได้ไปผนึกไว้ในหลอดควอทซ์และเติมด้วยก๊าซอาร์กอนจากนั้นฉายรังสีด้วยหลอดไอปรอทเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 120 นาที หลังจากนั้นก๊าซแอมโมเนียจะถูกปล่อยออกมาจากการสลายตัวด้วยความร้อน การรวมกันของรังสี UV และก๊าซแอมโมเนียสามารถทำให้เกิดการลดลงอย่างรวดเร็วและการเติมไนโตรเจนของกราฟีนออกไซด์เกิดการรีดิวซ์ของกราฟีน จากงานวิจัยพบว่าการเติมไนโตรเจนนั้นเป็นการกำจัดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนออกจากกราฟีนออกไซด์

**Lawen Abdulsatar Esmail และคณะ [45]** ศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทจากกรดไวโอลูริกสำหรับการตรวจจับไอออนของสังกะสีในซอสมะเขือเทศ โดยเตรียมกรดไวโอลูริก 0.8 กรัม และน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิ 180 องศา เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นทำให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องและนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที กรองด้วยฟิลเตอร์ขนาด 0.2 ไมโครเมตร จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศา จากงานวิจัยพบว่าการตรวจหาสังกะสีในตัวอย่างอาหารขึ้นอยู่กับการดับของการเรืองแสง อุณหภูมิ และเวลาของปฏิกิริยาคาร์บอนในเซนเซอร์แบบไฮโดรเทอร์มอลของกรดไวโอลูริก วิธีการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทขั้นนี้แสดงให้เห็นถึงการตรวจจับไอออนของสังกะสีได้ดีที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำ DI (Deionized Water)
2. กรดซิตริก (Citric acid:  $C_6H_8O_7$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
3. ยูเรีย (Urea:  $CO(NH_2)_2$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
4. บอแรกซ์ (Borax) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
5. ซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate:  $(CH_3COO)_2Zn \cdot 2H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Lobachemie จำกัด
6. ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate:  $AgNO_3$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Fisher จำกัด
7. ไอออน (II) คลอไรด์ (Iron (II) Chloride:  $FeCl_2$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Alorich จำกัด
8. ไอออน (II) ซัลเฟต (Iron (II) Sulfate:  $FeSO_4$ ) เกรดวิเคราะห์
9. ไอออน (III) ซัลเฟต มอนอไฮเดรต (Ferric sulphate Monohydrate:  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Lobachemie จำกัด
10. ไอออน (III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (Iron (III) chloride hexahydrate:  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
11. คอปเปอร์ (II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต (Copper (II) nitrate trihydrate:  $Cu(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Sigmaaldrich จำกัด
12. แมงกานีส (II) คลอไรด์ เตตระไฮเดรต (Manganese (II) chloride:  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
13. ซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต (Zinc Sulfate:  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Lobachemie จำกัด
14. เมอร์คิวรี (II) คลอไรด์ (Mercury (II) Chloride:  $HgCl_2$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Quality Reagent Chemical จำกัด
15. เลด (II) ไนเตรต (Lead (II) Nitrate:  $Pb(NO_3)_2$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Ajax Finechem
16. นิกเกิล (II) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต (Nickel (II) Chloride hexahydrate) เกรดวิเคราะห์, บริษัท CARLO ERBA Reagents จำกัด
17. แคดเมียมคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต (Cadmium Chloride:  $CdCl_2 \cdot 5H_2O$ ) เกรดวิเคราะห์, บริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals Limited CAN จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องแก้ว และอุปกรณ์พื้นฐาน
2. เข็มฉีดยา ขนาด 1.2 X 25 มิลลิลิตร, บริษัท NIPRO จำกัด
3. ที่กรองสารสำหรับไซริงค์ เนื้อไนลอน (Syringe filter nylon) ขนาด 13 มิลลิลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 ไมโครเมตร, บริษัท Vertical จำกัด
4. จานเพาะเชื้อพลาสติก (Plastic petri dish)
5. ตู้อบ (Oven) : รุ่น UF 110 Memmert, บริษัท ITS (Thailand) จำกัด
6. ไมโครเวฟกำลังไฟ 800 วัตต์ รุ่น R-220, บริษัท SHARP จำกัด
7. เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง : รุ่น SI-234, บริษัท DENVER INSTRUMENT จำกัด
8. Hot plate และ Magnetic stirrer : บริษัท IKA จำกัด
9. หลอด UV (Ultraviolet lamps) กำลังไฟ 36 วัตต์ : รุ่น TUV T8, บริษัท PHILIPS จำกัด
10. เครื่อง UV-Vis spectrophotometer : รุ่น BlueStar B spectrophotometer, บริษัท Lab Tech จำกัด
11. เครื่อง Attenuated total reflectance fourier transform infrared spectrophotometer (ATR-FTIR) : รุ่น IRTracer-100, บริษัท SHIMADZU จำกัด
12. เครื่อง Fluorescence spectrophotometer : รุ่น FP-6300, บริษัท SHIMADZU จำกัด

### 3.3 การเตรียมสารละลาย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายโลหะ

1. ชั่งซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต (Zn) 0.0548 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายซิงค์อะซิเตต ไดไฮเดรต (Zn) ความเข้มข้น 1M
2. ชั่งซิลเวอร์ไนเตรท (Ag) 0.0425 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท (Ag) ความเข้มข้น 1M

การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอทอ้างอิงจากโครงการพิเศษการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่เจ็ดด้วยโลหะเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับเหล็กไอออนของนางสาว ฐิติพันธ์ พัฒนพงษ์ นางสาวพิมพ์สิริกานต์ มิกขุนทด และนางสาวไหมแพรว เย็นแย้ม หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาดกระบัง ปีการศึกษา 2564 และงานวิจัยของนางสาวญาณิกา ศักดิ์บริบูรณ์ จากหน่วยวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์และวัสดุเฉพาะทาง โดยมีรายละเอียดดังนี้

### 3.3.2 การเตรียมคาร์บอนควอนตัมดอท

1. ชั่งกรดซิตริก, ยูเรีย และบอแรกซ์ อย่างละ 3 กรัม ลงในปิกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำ DI 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนสารด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ตวงสารตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 จากนั้นใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที
4. เมื่อครบเวลาลบปล่อยให้ของผสมเย็นตัวลง แล้วเติมน้ำ DI 20 มิลลิลิตร
5. จากนั้นกรองสารละลายด้วยไซริงค์ นำสารละลายที่ได้ใส่ลงจานเพาะเชื้อ
6. นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
7. นำสารที่ได้มาเก็บไว้ในซิลิกาเจล

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนสารเคมีในการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท

| สูตร   | B+C+U<br>(มิลลิลิตร) | H <sub>2</sub> O<br>(มิลลิลิตร) | Zn<br>(มิลลิลิตร) | Ag<br>(มิลลิลิตร) |
|--------|----------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|
| BCU    | 20                   | 15                              | -                 | -                 |
| BCU/Zn | 20                   | -                               | 15                | -                 |
| BCU/Ag | 20                   | -                               | -                 | 15                |

หมายเหตุ: C: Citric acid, U: Urea, B: Borax, Zn: Zinc Acetate, Ag: Silver nitrate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การเตรียมสารละลายความเข้มข้นต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอท

1. นำคาร์บอนควอนตัมดอทที่ได้จากหัวข้อ 3.3.2 ปริมาณ 0.3 กรัม เติมน้ำ DI 30 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนสารด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
3. นำสารละลายที่ได้บรรจุลงในขวดไวแอล (Vial) ด้วยความเข้มข้น 1%w/v โดยการเตรียมสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอท 5 มิลลิลิตร

### 3.4 การวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติของคาร์บอนควอนตัมดอท

#### 3.4.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท

นำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) ที่ช่วงความยาวคลื่น  $700-4000\text{ cm}^{-1}$  ที่ค่าความละเอียด  $2\text{ cm}^{-1}$

#### 3.4.2 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท

นำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ที่ความเข้มข้น 1 %w/v ไป ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร

#### 3.4.3 การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท

นำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ที่ความเข้มข้น 1 %w/v มาศึกษาสมบัติการเรืองแสง และประสิทธิภาพการเรืองแสง (Quantum yield) ด้วยเทคนิค Fluorescence spectroscopy โดยใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นที่เหมาะสมกับคาร์บอนควอนตัมดอท นำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ที่ความเข้มข้น 1 %w/v มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับความเข้มของการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท ด้วยเทคนิค Fluorescence spectroscopy ซึ่งความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้ในการกระตุ้น และการปลดปล่อยเท่ากับ 5 นาโนเมตร ความเร็วในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 6,000 นาโนเมตรต่อนาที่โดย BCU ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นเท่ากับ 330 นาโนเมตร ในขณะที่ BCU/Zn และ BCU/Ag ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นเท่ากับ 350 นาโนเมตร

### 3.4.4 การทดสอบการตรวจจับโลหะ

เตรียมสารละลายของโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  จาก  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  จาก  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  จาก  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  จาก  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  จาก  $\text{NiCl}_2$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  จาก  $\text{CdCl}_2$  ตามลำดับ โดยใช้ความเข้มข้นของเหล็กเท่ากับ 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3.125, 6.25, 12.5, 25, 50, 100 mM เติมลงในสารละลายตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag โดยมีการเตรียมโลหะไอออนดังนี้

1. ชั่งไอออน (II) คลอไรด์ ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 0.3169 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายไอออน (II) คลอไรด์ ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
2. ชั่งไอออน (II) ซัลเฟต ( $\text{Fe}^{2+}$ ) 0.3798 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายไอออน (II) ซัลเฟต ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
3. ชั่งไอออน (III) ซัลเฟต มอนอไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 0.9998 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายไอออน (II) ซัลเฟต มอนอไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ความเข้มข้น 1%
4. ชั่งไอออน (III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) 0.6756 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายไอออน (III) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ความเข้มข้น 1%
5. ชั่งคอปเปอร์ (II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 0.6040 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายคอปเปอร์ (II) ไนเตรต ไตรไฮเดรต ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
6. ชั่งแมงกานีส (II) คลอไรด์ ( $\text{Mn}^{2+}$ ) 0.4948 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายแมงกานีส (II) คลอไรด์ ( $\text{Mn}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
7. ชั่งซิงค์ซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{Zn}^{2+}$ ) 0.7188 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายซิงค์ซัลเฟต ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
8. ชั่งเมอร์คิวรี (II) คลอไรด์ ( $\text{Hg}^{2+}$ ) 0.6788 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายเมอร์คิวรี (II) คลอไรด์ ( $\text{Hg}^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ชั่งเลด (II) ไนเตรต ( $Pb^{2+}$ ) 0.8280 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายเลด (II) ไนเตรต ( $Pb^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
10. ชั่งนิกเกิล (II) คลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $Ni^{2+}$ ) 0.5942 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายนิกเกิล (II) คลอไรด์ ( $Ni^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%
11. ชั่งแคดเมียมคลอไรด์ เพนตะไฮเดรต ( $Cd^{2+}$ ) 0.5709 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำ DI จะได้สารละลายแคดเมียมคลอไรด์ ( $Cd^{2+}$ ) ความเข้มข้น 1%

นำสารละลายโลหะไอออนแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปผสมกับสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอท ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จะให้ความเข้มข้นสุดท้ายของโลหะไอออนเท่ากับ 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3.125, 6.25, 12.5, 25 และ 50 mM ตามลำดับ แล้วนำไปศึกษาประสิทธิภาพการเรืองแสงด้วยเทคนิค Fluorescence spectroscopy โดยสูตร BCU ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นเท่ากับ 330 นาโนเมตร ในขณะที่สูตร BCU/Zn และ BCU/Ag ใช้ความยาวคลื่นกระตุ้นเท่ากับ 350 นาโนเมตร ได้ค่าการตรวจวัด  $F_0$  คือค่าความเข้มการเรืองแสงสูงสุดที่ไม่มีโลหะไอออนผสมอยู่ในคาร์บอนควอนตัมดอท และค่า  $F$  คือค่าการเรืองแสงสูงสุดที่มีสารละลายโลหะไอออนผสมอยู่ในคาร์บอนควอนตัมดอท และนำมาหาค่า  $F/F_0$  เพื่อประเมินค่าการดับการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ของคาร์บอนควอนตัมดอท ด้วยสมบัติการเรืองแสงการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากโครงการพิเศษของนางสาว จุติพันธ์ พัฒนพงษ์ และคณะ [28] และวิทยานิพนธ์ของนางสาวญานิกา ศักดิ์บริบูรณ์ [29] โดยใช้เทคนิคไมโครเวฟ มีกรดซิตริกเป็นแหล่งคาร์บอน ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน บอแรกซ์เป็นแหล่งโบรอน และเจือไอออนโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zn) และ เงิน (Ag) ข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้า [28,29] พบว่ามีผลผลิตควอนตัม (Quantum yield) ความยาวคลื่นในการกระตุ้นและความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทสูตรต่าง ๆ [28,29]

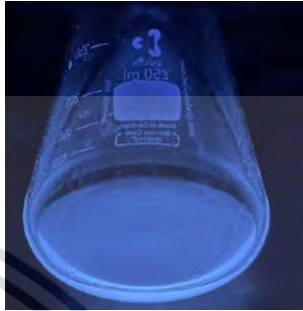

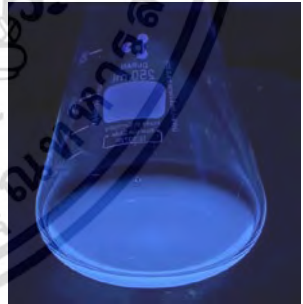
| สูตร   | เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาท) | Quantum yield (%) | Excitation (nm) | Emission (nm) |
|--------|----------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| BCU    | 3:20                       | 19                | 330             | 430           |
| BCU/Zn | 3:10                       | 56                | 350             | 435           |
| BCU/Ag | 3:00                       | 26                | 350             | 438           |

#### 4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท

การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทด้วยเทคนิคไมโครเวฟ ด้วยระยะเวลาของปฏิกิริยาต่างกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของคาร์บอนควอนตัมดอท เวลาที่เหมาะสมจะสังเกตสีจากการเรืองแสงที่มีสีเป็นไปทางเดียวกัน (Homogeneous) โดยเวลาของปฏิกิริยาที่เหมาะสมของงานวิจัยก่อนหน้าแสดงดังตารางที่ 4.1 และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจากงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยมีสีจากการเรืองแสงภายใต้แสง UV เป็นสีฟ้าและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสูตร BCU, BCU/Zn และBCU/Ag เท่ากับ 3:05, 3:10 และ 3:00 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

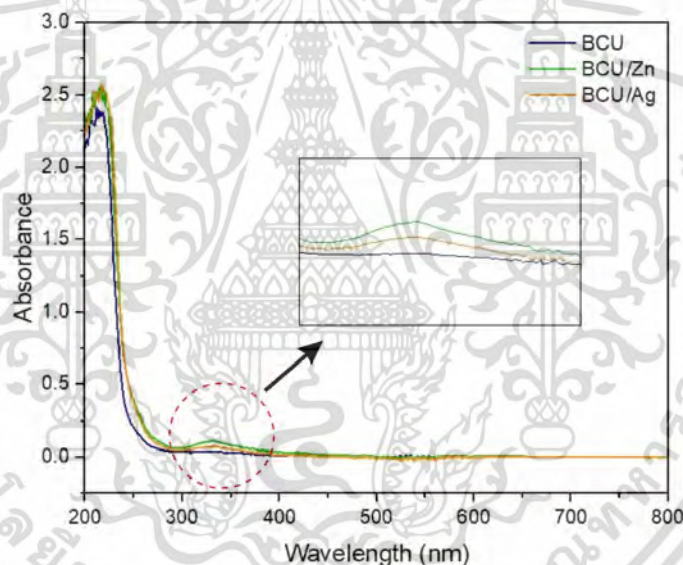
ตารางที่ 4.2 การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอท

| สูตร   | เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที) | สีของการเรืองแสง  |
|--------|-----------------------------|---|
| BCU    | 3:05                        |    |
| BCU/Zn | 3:10                        |   |
| BCU/Ag | 3:00                        |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาสมบัติทางแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท

การวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag โดยเตรียมเป็นสารละลายในน้ำที่ความเข้มข้น 1% w/v และตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบสเปกตรัม โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดูดกลืนแสง และความยาวคลื่น (nm) ดังรูปที่ 4.1 โดยพบพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 220 นาโนเมตร เป็นการเปลี่ยนแปลง  $\pi-\pi^*$  ของพันธะ C=C ในโครงสร้างของคาร์บอนควอนตัมดอท [10] และพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 340 นาโนเมตร เป็นทรานซิชันของ  $n-\pi^*$  ที่พบในบริเวณพื้นที่ผิวที่ห่อหุ้มแกนกลางของคาร์บอนควอนตัมดอท [30]

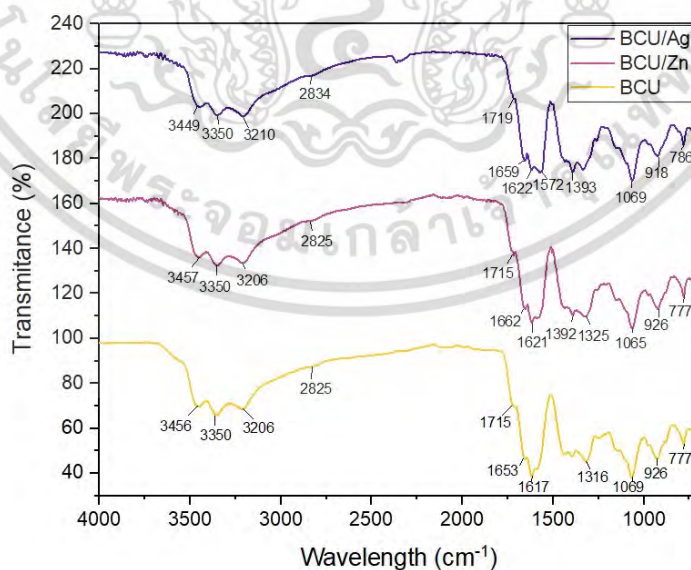


รูปที่ 4.1 UV-Visible สเปกตรัมของตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปแบบสเปกตรัม โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Transmittance (%) และเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) ดังรูปที่ 4.2 โดยพบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอทมีความคล้ายกัน โดยพบพีคที่ความยาวคลื่นช่วง  $3600\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ O-H Stretching จากกรดซिटริก พีคที่ความยาวคลื่นช่วง  $3400\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ N-H Stretching จากยูเรีย พีคที่ความยาวคลื่นช่วง  $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C-H Stretching จากกรดซिटริก พีคที่ความยาวคลื่นประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C=O Stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ในกรดซिटริก พีคที่ความยาวคลื่นช่วง  $1600\text{-}1500\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C=C Stretching จากส่วนที่เป็นแกนกลางของคาร์บอนควอนตัมดอท พีคที่ความยาวคลื่นช่วง  $1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C-O Stretching จากกรดซिटริก และบอแร็กซ์ และพีคที่ความยาวคลื่นในช่วง  $900\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นแบบ C-H Bending จากกรดซिटริก อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ไม่พบพีคที่สัมพันธ์กันโลหะเนื่องจากในการทดลองมีการใส่สารละลายโลหะในปริมาณที่น้อยมากทำให้การสั่นของพีคโลหะนั้นเกิดขึ้นน้อยหรือเกิดซ้อนกับหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ จึงไม่พบพีคที่แสดงสัญญาณของโลหะในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท



รูปที่ 4.2 ATR-FTIR สเปกตรัมของคาร์บอนควอนตัมดอท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดสอบการตรวจจับโลหะต่าง ๆ

การทดสอบการตรวจจับโลหะโดยใช้สารละลายโลหะไอออนชนิดต่าง ๆ ได้แก่  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$  และ  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  และ  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  จาก  $\text{MnCl}_2$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  จาก  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Hg}^{2+}$  จาก  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  จาก  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  จาก  $\text{NiCl}_2$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  จาก  $\text{CdCl}_2$  ที่ความเข้มข้น 0.125, 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 6.25, 12.5, 25, 50 และ 100 mM เติมลงในสารละลายตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ความเข้มข้น 1%w/v ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร ซึ่งจะได้ความเข้มข้นของสารละลายโลหะสุดท้ายเป็น 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3.125, 6.25, 12.5, 25 และ 50 mM ตามลำดับ ผลการตรวจวัดแสดงในภาคผนวก ข.1-ข.33 ซึ่งเมื่อผสมสารละลายโลหะกับสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอทมีผลทำให้ค่าความเข้มของการเรืองแสงโดยส่วนใหญ่ลดลงเมื่อเทียบกับค่าของสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอทที่ไม่มีการผสมสารละลายโลหะ โดยเป็นหลักการของกลไก Photo-Induced Electron transfer (PET) ในสถานะ sensor off จะถูกกระตุ้นด้วยแสง และดูดกลืนพลังงานในช่วงที่เหมาะสม ซึ่งบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนผ่านอิเล็กตรอนสามารถเกิดจากสถานะพื้น (HOMO) ไปสู่สถานะกระตุ้น (LUMO) จากนั้นตัวให้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในสถานะพื้นทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้ระหว่างการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างโมเลกุลส่งผลให้การเรืองแสงลดลง [16,30] เพื่อให้การเปรียบเทียบชัดเจนขึ้นจึงนำค่าความเข้มสูงสุดของการเรืองแสงมาคำนวณหาค่า  $F/F_0$  ได้ข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ในสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอทที่

มีผลต่อสัดส่วนการลดลงของความเข้มของการเรืองแสงสูงสุด ( $F/F_0$ )

| สูตร   | โลหะไอออน                    | ความเข้มข้นของสารละลายโลหะ (mM) | $F/F_0$ | ค่ามาตรฐานความเป็นพิษของโลหะในน้ำดื่มและน้ำทิ้งในอุตสาหกรรม (mM) |
|--------|------------------------------|---------------------------------|---------|--|
| BCU    | $Fe^{2+}$ ( $FeSO_4$ )       | 0.0625                          | 0.77    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Fe^{2+}$ ( $FeCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.73    |  |
|        | $Fe^{3+}$ ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) | 0.0625                          | 0.93    |  |
|        | $Fe^{3+}$ ( $FeCl_3$ )       | 0.0625                          | 0.90    |  |
|        | $Cu^{2+}$ ( $Cu(NO_3)_2$ )   | 1                               | 0.93    | ไม่เกิน 0.031 [62]   |
|        | $Mn^{2+}$ ( $MnCl_2$ )       | 12.5                            | 0.95    | ไม่เกิน 0.091 [62]   |
|        | $Zn^{2+}$ ( $ZnSO_4$ )       | 0.0625                          | 0.85    | ไม่เกิน 0.079 [62]   |
|        | $Hg^{2+}$ ( $HgCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.50    | ไม่เกิน 0.00002 [62]   |
|        | $Pb^{2+}$ ( $Pb(NO_3)_2$ )   | 0.0625                          | 0.78    | ไม่เกิน 0.001 [62]   |
|        | $Ni^{2+}$ ( $NiCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.77    | ไม่เกิน 0.017 [62]   |
|        | $Cd^{2+}$ ( $CdCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.53    | ไม่เกิน 0.0003 [62]  |
| BCU/Zn | $Fe^{2+}$ ( $FeSO_4$ )       | 0.0625                          | 0.38    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Fe^{2+}$ ( $FeCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.37    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Fe^{3+}$ ( $Fe_2(SO_4)_3$ ) | 0.25                            | 0.85    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Fe^{3+}$ ( $FeCl_3$ )       | 0.125                           | 0.92    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Cu^{2+}$ ( $Cu(NO_3)_2$ )   | 2                               | 0.95    | ไม่เกิน 0.031 [62]   |
|        | $Mn^{2+}$ ( $MnCl_2$ )       | 25                              | 0.92    | ไม่เกิน 0.091 [62]   |
|        | $Zn^{2+}$ ( $ZnSO_4$ )       | 50                              | 0.87    | ไม่เกิน 0.079 [62]   |
|        | $Hg^{2+}$ ( $HgCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.25    | ไม่เกิน 0.00002 [62]   |
|        | $Pb^{2+}$ ( $Pb(NO_3)_2$ )   | 0.0625                          | 0.39    | ไม่เกิน 0.001 [62]   |
|        | $Ni^{2+}$ ( $NiCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.33    | ไม่เกิน 0.017 [62]   |
|        | $Cd^{2+}$ ( $CdCl_2$ )       | 0.0625                          | 0.40    | ไม่เกิน 0.0003 [62]  |
| BCU/Ag | $Fe^{2+}$ ( $FeSO_4$ )       | 1                               | 0.84    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
|        | $Fe^{2+}$ ( $FeCl_2$ )       | 0.125                           | 0.76    | ไม่เกิน 0.009 [61]   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายโลหะชนิดต่าง ๆ ในสารละลายคาร์บอน**

ควอนตัมดอทที่มีผลต่อสัดส่วนการลดลงของความเข้มของการเรืองแสงสูงสุด

(F/F<sub>0</sub>)

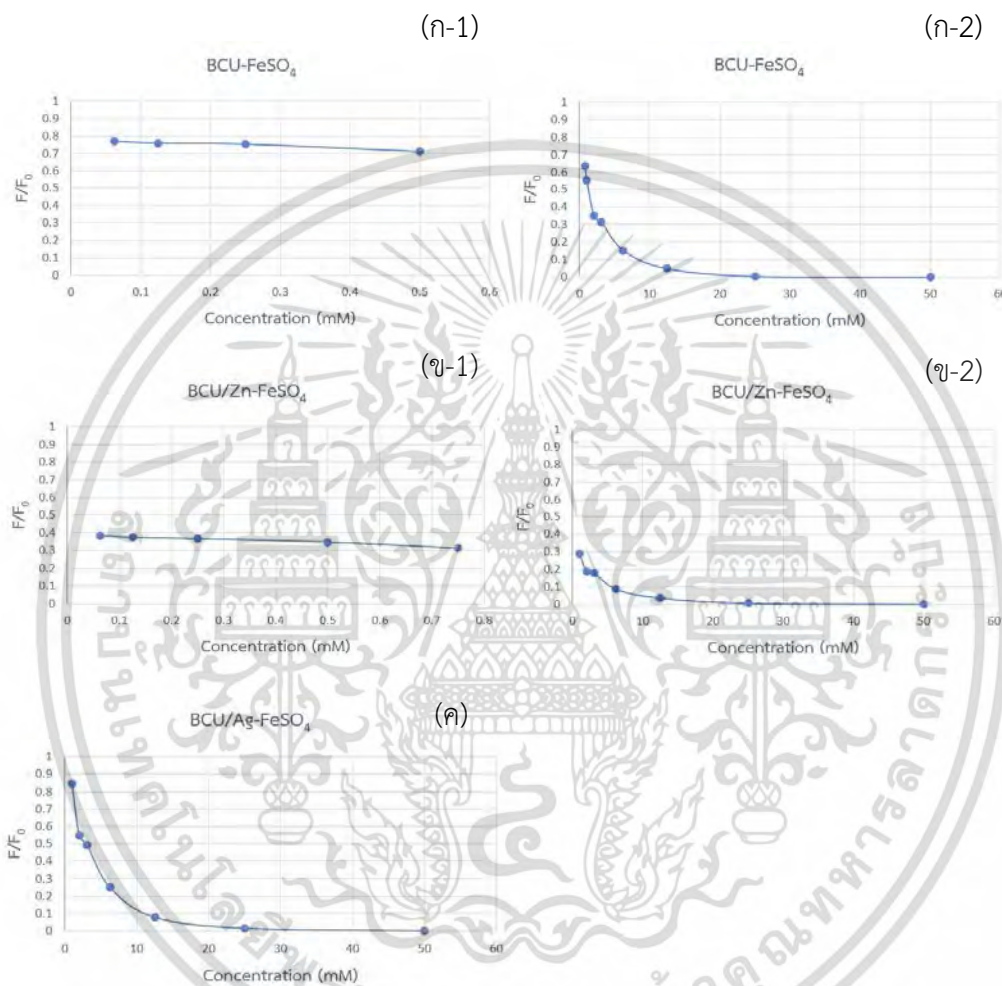
|   |        |      |                      |
|---|--------|------|----------------------|
| Fe <sup>3+</sup> (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) | 0.25   | 0.87 | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
| Fe <sup>3+</sup> (FeCl <sub>3</sub> )                               | 0.0625 | 0.92 | ไม่เกิน 0.009 [61]   |
| Cu <sup>2+</sup> (Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )               | 2      | 0.95 | ไม่เกิน 0.031 [62]   |
| Mn <sup>2+</sup> (MnCl <sub>2</sub> )                               | 25     | 0.91 | ไม่เกิน 0.091 [62]   |
| Zn <sup>2+</sup> (ZnSO <sub>4</sub> )                               | 25     | 0.93 | ไม่เกิน 0.079 [62]   |
| Hg <sup>2+</sup> (HgCl <sub>2</sub> )                               | 0.0625 | 0.87 | ไม่เกิน 0.00002 [62] |
| Pb <sup>2+</sup> (Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )               | 50     | 0.87 | ไม่เกิน 0.001 [62]   |
| Ni <sup>2+</sup> (NiCl <sub>2</sub> )                               | 12.5   | 0.93 | ไม่เกิน 0.017 [62]   |
| Cd <sup>2+</sup> (CdCl <sub>2</sub> )                               | >50    |      | ไม่เกิน 0.0003 [62]  |

หมายเหตุ : ค่ามาตรฐานความเป็นพิษของโลหะในน้ำดื่ม [61] และค่ามาตรฐานความเป็นพิษของโลหะน้ำทิ้งในอุตสาหกรรม [62]

F/F<sub>0</sub> บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทเมื่อเจือด้วยโลหะชนิดต่าง ๆ จากการคำนวณหาค่า F/F<sub>0</sub> แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าคาร์บอนควอนตัมดอท สูตร BCU ที่เจือด้วยโลหะไอออน Cu<sup>2+</sup> และ Mn<sup>2+</sup>, สูตร BCU/Zn ที่เจือด้วยโลหะไอออน Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> และ Zn<sup>2+</sup> และสูตร BCU/Ag ที่เจือด้วยโลหะไอออน Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> และ Cd<sup>2+</sup> มีค่า F/F<sub>0</sub> ประมาณ 1 ในช่วงความเข้มข้นต่ำของสารละลายโลหะ นั่นคือไม่สามารถตรวจจับการมีอยู่ของโลหะได้ และค่า F/F<sub>0</sub> เริ่มลดลงต่ำกว่า 1 ในช่วงความเข้มข้นของโลหะที่สูงขึ้น โดยจากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษ และกระทรวงอุตสาหกรรม [61-62] พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่สูงขึ้นเป็นค่าที่เกินค่ามาตรฐานความเป็นพิษไปมาก ดังนั้นจึงไม่น่าตัวอย่างเหล่านี้มาศึกษาต่อ โดยนำสภาวะคาร์บอนควอนตัมดอทเจือโลหะที่นอกเหนือจากข้างต้นมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง (F/F<sub>0</sub>) กับความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นของโลหะไอออนเพื่อศึกษาพฤติกรรมการลดลงของการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทเมื่อมีการเจือโลหะความเข้มข้นสูงขึ้นแสดงผลดังรูปที่ 4.3 – 4.11 โดยในแต่ละการตรวจวัดอาจมีการแยกการพลอตกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงความเข้มข้นที่มีค่า  $F/F_0$  ใกล้เคียงกันกับช่วงที่มีค่า  $F/F_0$  แตกต่างกัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้น

ของโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeSO_4$

(ก-1) BCU ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 0.0625-0.5 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ

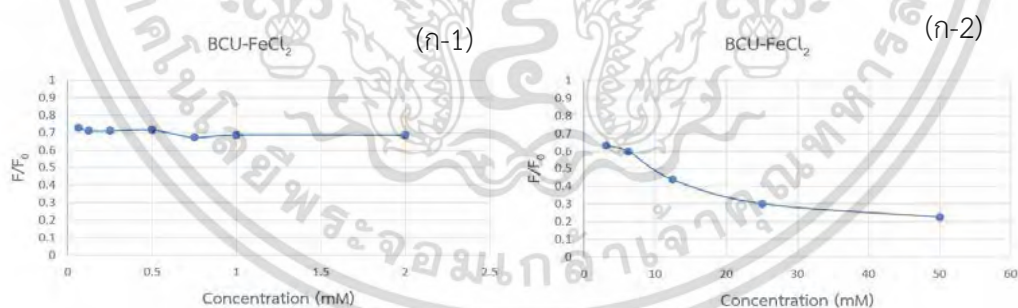
$Fe^{2+}$  ในช่วง 0.75-50 mM (ข-1) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 0.0625-0.75

mM (ข-2) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 1-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

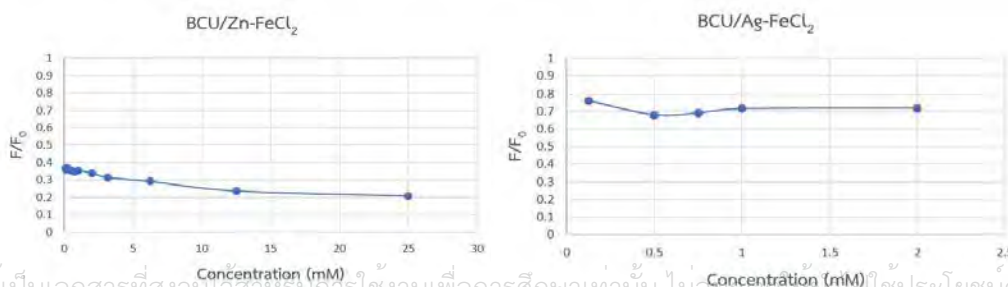
ของ  $\text{Fe}^{2+}$  ในช่วง 1-50 mM

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$  พบว่า สูตร BCU มีการตอบสนองต่อการจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ในช่วงความเข้มข้นต่ำ 0.0625-0.5 mM ไม่ค่อยแตกต่างกันโดยพิจารณาจากค่า  $F/F_0$  ที่มีค่าใกล้เคียงกันจึงไม่สามารถแยกแยะค่าความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า  $F/F_0$  มีความแตกต่างที่ชัดเจนในช่วงความเข้มข้น 0.75-12.5 mM จึงสามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นนี้ สำหรับสูตร BCU/Zn มีการตอบสนองต่อความเข้มข้นของโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ได้ดี ในช่วงความเข้มข้น 1-12.5 mM และ มีประสิทธิภาพต่ำกว่าในช่วง 0.0625-0.75 mM อย่างไรก็ตามสูตร BCU/Zn มีการดับการเรืองแสงสูงถึง 62% ที่ความเข้มข้นต่ำสุดของการทดลองที่ 0.0625 mM แสดงถึงแนวโน้มที่จะสามารถตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่ำกว่างานวิจัยนี้ได้ และสูตร BCU/Ag พบว่ามีการตอบสนองต่อความเข้มข้นของโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  ในช่วงความเข้มข้น 1-12.5 mM ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่สามารถตรวจวัดที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 1 mM ได้ ดังนั้นในการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$  สูตร BCU มีช่วงที่สามารถแยกความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพกว้างกว่าสูตร BCU/Zn และสูตร BCU/Ag (1-12.5 mM) อย่างไรก็ตามสูตร BCU/Zn มีค่า  $F/F_0$  ต่ำกว่าสูตรอื่นแสดงถึงศักยภาพในการตรวจวัด  $\text{Fe}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM

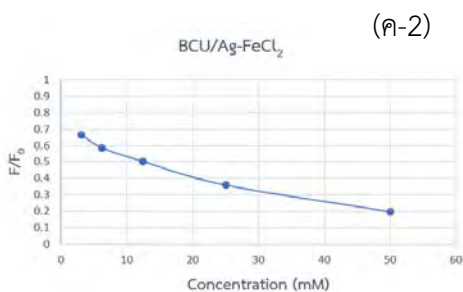


(ค-1)

(ข)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้น

ของโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeCl_2$

(ก-1) BCU ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 0.0625-2 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้น

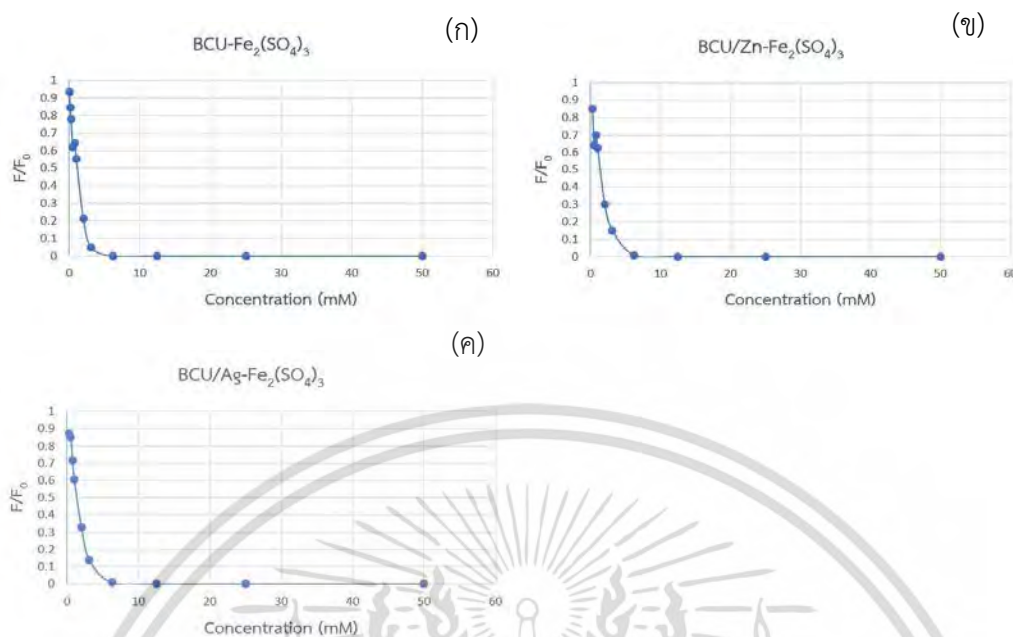
ของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 3.125-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 0.0625-

25 mM (ค-1) BCU/Ag ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 0.125-2 mM (ค-2) BCU/Ag

ความเข้มข้นของ  $Fe^{2+}$  ในช่วง 3.125-50 mM

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeCl_2$  จะเห็นได้ว่า  
 สูตร BCU แม้ว่าจะมีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  ได้ดีตั้งแต่ค่าความเข้มข้น 0.0625  
 mM แต่เริ่มมีประสิทธิภาพในการแยกความเข้มข้นได้ดีในช่วงความเข้มข้น 3.125-50 mM สำหรับสูตร  
 BCU/Zn พบว่ามีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  ได้ดีแต่มีประสิทธิภาพในการแยกความ  
 แยกต่างของความเข้มข้นได้ต่ำ อย่างไรก็ตามในสูตรนี้มีการดับเรืองแสงสูงถึง 63% ที่ความเข้มข้น 0.0625  
 mM ซึ่งคาดว่าสามารถนำไปทดสอบการตรวจจับที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้ สำหรับสูตร  
 BCU/Ag สามารถตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0.125 mM โดยสามารถแยกความ  
 แยกต่างของค่าความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ในช่วง 3.125-50 mM ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  
 $Fe^{2+}$  สูตร BCU, BCU/Zn สามารถตรวจจับที่ความเข้มข้นต่ำได้ โดยสูตร BCU จะมีช่วงที่สามารถตรวจ  
 แยกความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพกว้าง แต่สูตร BCU/Zn อาจนำไปใช้ในการตรวจจับที่ความเข้มข้น  
 ต่ำกว่า 0.0625 mM ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

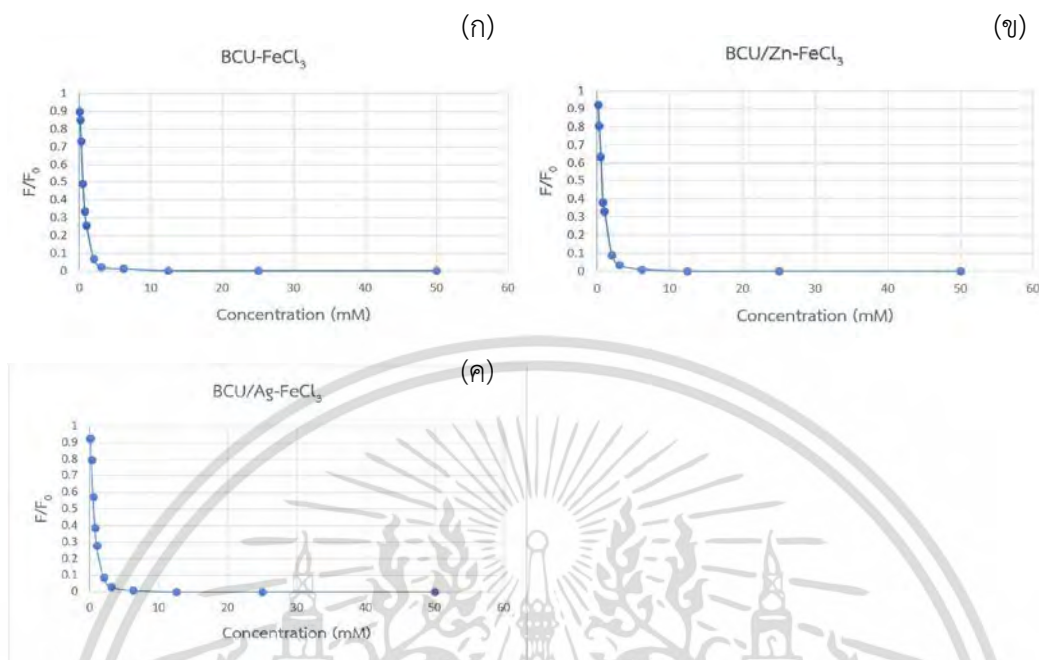


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $Fe_2(SO_4)_3$   
 (ก) BCU ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.25-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.25-50 mM

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $Fe_2(SO_4)_3$

โดยสูตร BCU สามารถตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  ที่ความเข้มข้น 0.0625-3.125 mM ได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่สูตร BCU/Zn และ BCU/Ag สามารถตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  อย่างมีประสิทธิภาพในช่วงความเข้มข้นแคบกว่า คือ 0.25-3.125 mM สำหรับในช่วงความเข้มข้น 6.25-50 mM ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้เนื่องจากของผสมไม่สามารถเรืองแสงได้ ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  สูตร BCU สามารถตรวจจับที่ความเข้มข้นต่ำสุดได้ และมีช่วงในการตรวจจับโลหะไอออนกว้างสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



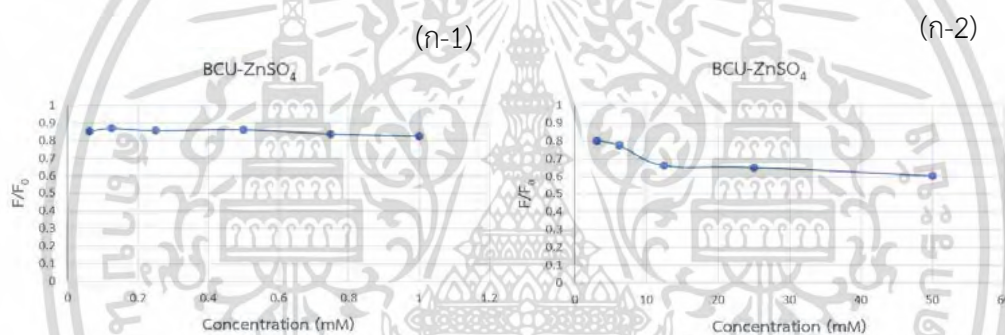
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $FeCl_3$   
 (ก) BCU ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.125-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $FeCl_3$  พบว่าสูตร BCU มีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  และแยกความแตกต่างได้ดีในช่วงความเข้มข้น 0.0625-3.125 mM สำหรับสูตร BCU/Zn มีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วง 0.125-3.125 mM และ BCU/Ag มีการตอบสนองการจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  ในช่วง 0.0625-3.125 mM โดยในช่วงความเข้มข้น 6.25-50 mM คาร์บอนคควอนตัมดอททั้ง 3 ชนิด ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากการดับแสงที่ความเข้มข้นช่วงดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  สูตร BCU และ BCU/Ag มีประสิทธิภาพในการตรวจจับที่สุด โดยมีประสิทธิภาพแยกความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะไอออนดีในช่วง 0.0625-3.125 mM

การตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{Fe}^{3+}$  เมื่อเทียบกับคาร์บอนควอนตัมดอททั้ง 3 สูตร พบว่าสูตร BCU สามารถตรวจจับได้ดีที่สุด เนื่องจากสามารถตรวจจับโลหะไอออนได้ตั้งแต่ความเข้มข้น 0.0625 mM และมีช่วงประสิทธิภาพในการแยกความแตกต่างของความเข้มข้นของโลหะไอออนในช่วงที่กว้างกว่าคาร์บอนควอนตัมดอทสูตรอื่น ๆ โดยคาร์บอนควอนตัมดอททั้ง 3 สูตรตอบสนองต่อ  $\text{Fe}^{3+}$  ได้ดีกว่า  $\text{Fe}^{2+}$  และพบว่า  $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{Cl}^-$  ไม่มีผลต่อค่าความเข้มข้นสูงสุดของการเรืองแสงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังพบว่า BCU/Zn มีการดับการเรืองแสงที่ประมาณ 60% เมื่อเจอกับ  $\text{Fe}^{2+}$  จากทั้ง  $\text{FeSO}_4$  และ  $\text{FeCl}_2$  แสดงถึงศักยภาพในการนำไปใช้ตรวจจับ  $\text{Fe}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้น

ของโลหะไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  จาก  $\text{ZnSO}_4$

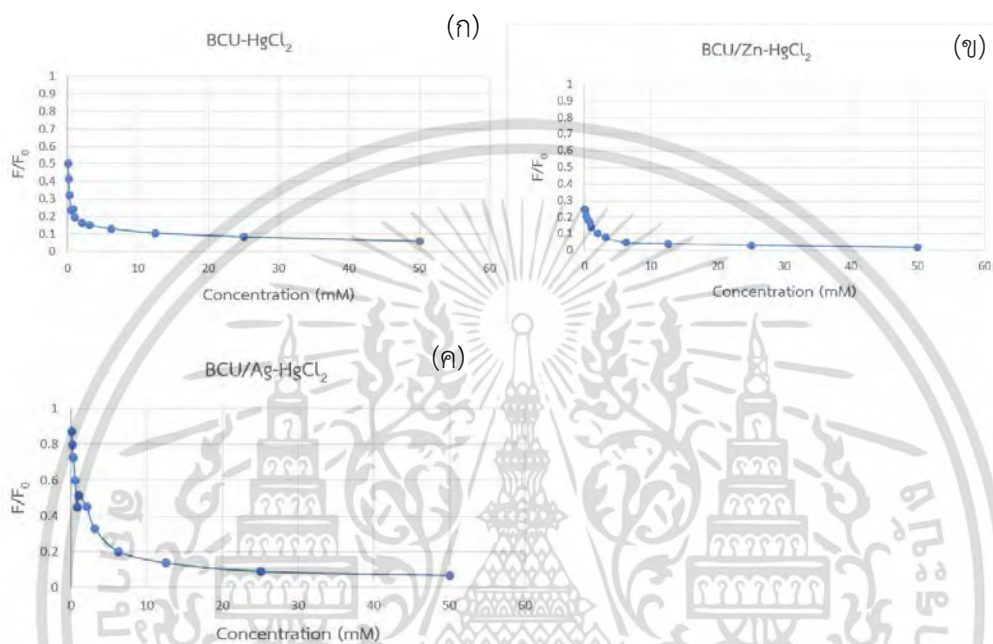
(ก-1) BCU ความเข้มข้นของ  $\text{Zn}^{2+}$  ในช่วง 0.0625-1 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ

$\text{Zn}^{2+}$  ในช่วง 3.125-50 mM

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  จาก  $\text{ZnSO}_4$  พบว่าสูตร BCU มีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  ได้ตั้งแต่ที่ความเข้มข้น 0.0625 mM แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในช่วงความเข้มข้น 3.125-50 สำหรับสูตร BCU/Zn เริ่มมีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Zn}^{2+}$  ที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์จากเอกสารนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้มข้นสูงถึง 50 mM และสูตร BCU/Ag มีการตอบสนองต่อการตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  ที่ความเข้มข้น 25-50 mM โดยมีค่าการดับการเรืองแสงที่น้อยเพียง 7% ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  สูตร BCU จึงสามารถตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  ได้ดีที่สุด



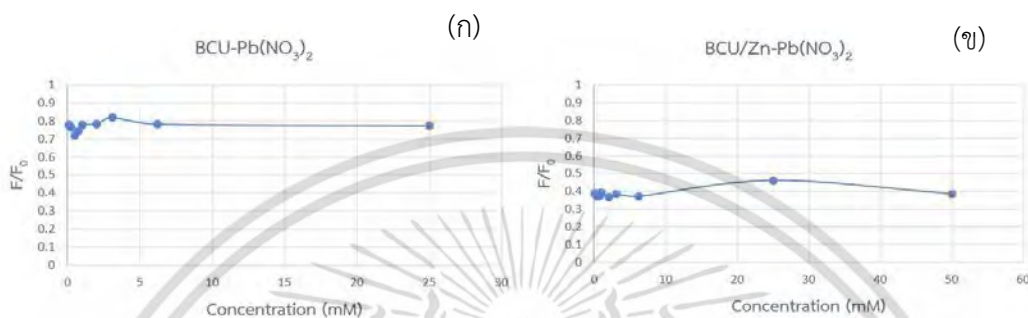
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$

(ก) BCU ความเข้มข้นของ  $Hg^{2+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Hg^{2+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM (ค) BCU/Ag ความเข้มข้นของ  $Hg^{2+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$  พบว่าทุกสูตร ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag สามารถตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$  ที่ความเข้มข้น 0.0625-50 mM ได้ โดยช่วงที่มีประสิทธิภาพสูงได้แก่ สูตร BCU ช่วงความเข้มข้น 0.0625-3.125 mM สูตร BCU/Zn และ BCU/Ag ช่วงความเข้มข้น 0.0625-6.25 mM และเนื่องจากสูตร BCU และ BCU/Zn มีค่า  $F/F_0$  ต่ำโดยมีค่าเท่ากับ 0.5 และ 0.25 ตามลำดับ เมื่อเจือ  $Hg^{2+}$  ที่ความเข้มข้น

ไม่ต่ำกว่า 0.1 mM ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

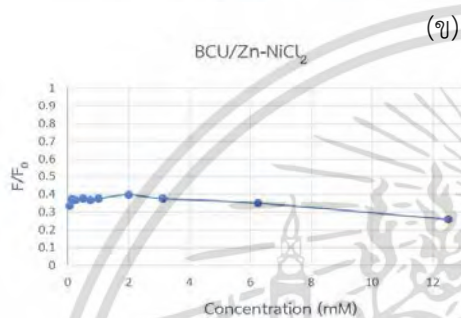
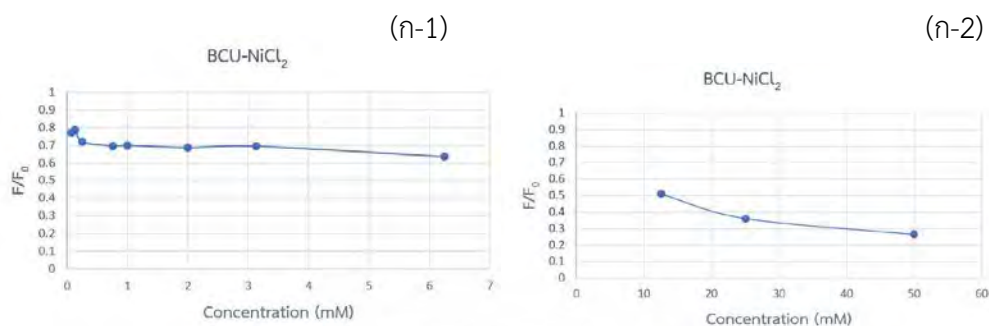
0.0625 mM จึงมีแนวโน้มในการนำไปตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Hg}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้ ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Hg}^{2+}$  คาร์บอนควอนตัมดอททั้ง 3 สูตร สามารถตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Hg}^{2+}$  ได้ดี สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $\text{Pb}^{2+}$  จาก  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$   
 (ก) BCU ความเข้มข้นของ  $\text{Pb}^{2+}$  ในช่วง 0.0625-25 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $\text{Pb}^{2+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Pb}^{2+}$  จาก  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  พบว่าสูตร BCU และ BCU/Zn สามารถตรวจวัดโลหะได้เริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0.0625 mM แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่สูตร BCU/Zn มีการดับการเรืองแสงสูงถึง 61% จึงคาดว่าสามารถนำไปตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Pb}^{2+}$  ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้ สำหรับสูตร BCU/Ag เริ่มตอบสนองต่อโลหะไอออน  $\text{Pb}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นสูงที่ 50 mM และมีค่าการดับการเรืองแสงน้อย (13%) ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Pb}^{2+}$  สูตร BCU และ BCU/Zn สามารถตรวจจับโลหะไอออนได้ดีกว่า โดยสูตร BCU/Zn มีศักยภาพในการนำไปใช้ทดสอบที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

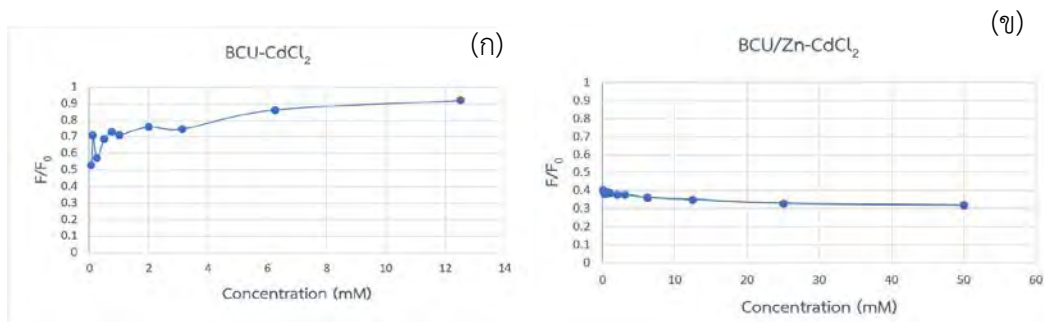


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$

(ก-1) BCU ความเข้มข้นของ  $Ni^{2+}$  ในช่วง 0.0625-6.25 mM (ก-2) BCU ความเข้มข้นของ  $Ni^{2+}$  ในช่วง 12.5-50 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Ni^{2+}$  ในช่วง 0.0625-6.25 mM

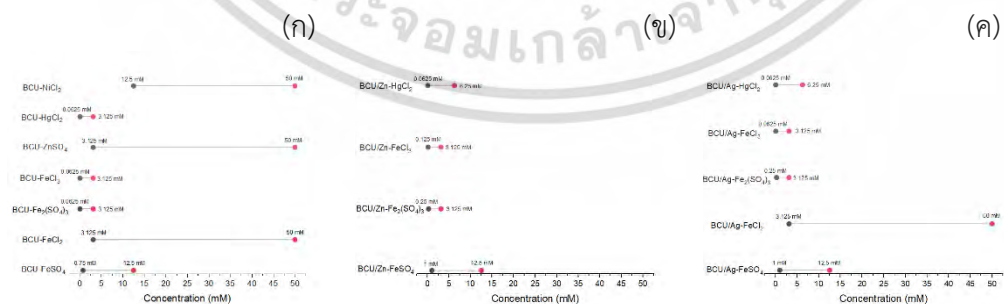
จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$  โดยสูตร BCU สามารถตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  ได้ตั้งแต่ที่ความเข้มข้น 0.0625 mM แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นในช่วง 0.0625-6.25 mM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่แยกได้ดีขึ้นในช่วงความเข้มข้น 12.5-50 mM สำหรับสูตร BCU/Zn มีการตอบสนองต่อการจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  ในช่วงความเข้มข้น 0.0625-12.5 mM แต่ไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน อย่างไรก็ตามสูตร BCU/Zn มีการดับการเรืองแสงสูงถึง 67% ที่ความเข้มข้น 0.0625 mM แสดงถึงศักยภาพในการนำไปตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอัตราส่วนความเข้มของการเรืองแสง ( $F/F_0$ ) และความเข้มข้นของโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  จาก  $CdCl_2$   
 (ก) BCU ความเข้มข้นของ  $Cd^{2+}$  ในช่วง 0.0625-12.5 mM (ข) BCU/Zn ความเข้มข้นของ  $Cd^{2+}$  ในช่วง 0.0625-50 mM

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าการตอบสนองการตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  จาก  $CdCl_2$  พบว่าสูตร BCU สามารถตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  ได้ในช่วง 0.0625-12.5 mM แต่ไม่สามารถแยกความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่สูตร BCU/Zn สามารถตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าในช่วง 0.0625-50 mM แต่ไม่สามารถแยกความเข้มข้นได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีการดับการเรืองแสงสูงถึง 60% ซึ่งคาดว่าสามารถนำไปจับโลหะไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำกว่านี้ได้ ดังนั้นการตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  สูตร BCU/Zn จึงมีความเหมาะสมในการนำมาตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  ได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.12 สรุปลักษณะความเข้มข้นโลหะไอออนชนิดต่าง ๆ ที่คาร์บอนควอนตัมดอทมีประสิทธิภาพใน

การแยกความแตกต่าง (ก) BCU (ข) BCU/Zn (ค) BCU/Ag  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 แสดงช่วงความเข้มข้นของโลหะที่คาร์บอนควอนตัมดอทสามารถแยกความแตกต่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสูตร BCU สามารถตรวจจับโลหะได้มากชนิดกว่าและมีช่วงความเข้มข้นที่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มข้นโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทั้ง 3 สูตร อย่างไรก็ตาม การตรวจจับโลหะของคาร์บอนควอนตัมดอทบางคู่สามารถพัฒนาโดยการนำไปตรวจจับที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM เพื่อให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงหรือต่ำกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานความเป็นพิษของโลหะนั้น ๆ ได้แก่ BCU/Zn-FeSO<sub>4</sub>, BCU/Zn-FeCl<sub>2</sub>, BCU-HgCl<sub>2</sub>, BCU/Zn-HgCl<sub>2</sub>, BCU/Zn-Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, BCU/Zn-NiCl<sub>2</sub> และ BCU/Zn-CdCl<sub>2</sub> ซึ่งจะเห็นได้ว่า BCU/Zn มีศักยภาพในการนำไปตรวจวัดความเข้มข้นของโลหะหลายชนิดในน้ำได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทเจือด้วยซิงค์และเงินด้วยวิธีไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของโลหะ โดยใช้กรดซิตริกเป็นแหล่งคาร์บอน, ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน, บอแร็กซ์เป็นแหล่งโบรอน และเจือด้วยโลหะต่าง ๆ ได้แก่ สังกะสี และเงิน จากการศึกษาพบว่า เวลาที่ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของสูตร BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag เท่ากับ 3:05, 3:10 และ 3:00 นาที ตามลำดับ เมื่อศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer พบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด 2 พีค คือ พีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 220 นาโนเมตร ของพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนที่บริเวณแกนกลางของคาร์บอนควอนตัมดอท และพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 340 นาโนเมตร ของพันธะที่จับกับหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่พื้นผิวของคาร์บอนควอนตัมดอท โดยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอท ได้แก่ BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ด้วยเครื่อง Attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) พบพีคหลัก ๆ คือ หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่เอมีน (-NH<sub>2</sub>) จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการเรืองแสงโดยนำตัวอย่างคาร์บอนควอนตัมดอทมาวิเคราะห์สมบัติการเรืองแสงด้วยเครื่อง Fluorescence spectrophotometer พบว่าค่าการปลดปล่อยความยาวคลื่นกระตุ้นสูงสุดของ BCU เท่ากับ 330 นาโนเมตร BCU/Zn และ BCU/Ag เท่ากับ 360 นาโนเมตร การทดสอบการตรวจจับโลหะโดยใช้สารละลายโลหะไอออนชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Fe<sup>2+</sup> จาก FeSO<sub>4</sub> และ FeCl<sub>2</sub>, Fe<sup>3+</sup> จาก Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> และ FeCl<sub>3</sub>, Cu<sup>2+</sup> จาก Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Mn<sup>2+</sup> จาก MnCl<sub>2</sub>, Zn<sup>2+</sup> จาก ZnSO<sub>4</sub>, Hg<sup>2+</sup> จาก HgCl<sub>2</sub>, Pb<sup>2+</sup> จาก Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Ni<sup>2+</sup> จาก NiCl<sub>2</sub> และ Cd<sup>2+</sup> จาก CdCl<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้น 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3.125, 6.25, 12.5, 25 และ 50 mM เติมนลงในสารละลายคาร์บอนควอนตัมดอท BCU, BCU/Zn และ BCU/Ag ความเข้มข้น 1%w/v ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร พบว่าสูตร BCU สามารถจับโลหะไอออนได้ดีในช่วงความเข้มข้นที่ใช้ทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับสูตร BCU/Zn และ BCU/Ag โดยพิจารณาจากการตอบสนองการเรืองแสงที่ความเข้มข้นต่ำที่สุดและการแยกความแตกต่างของช่วงความเข้มข้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการลดลงของความเข้มของการเรืองแสงแสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายโลหะส่งผลต่อการเรืองแสงของคาร์บอนควอนตัมดอทตามหลักการของกลไกแบบการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(PET) อย่างไรก็ตาม BCU/Zn สามารถตรวจจับโลหะหลายชนิด ได้แก่  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  ที่ความเข้มข้นต่ำ (0.0625 mM) ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยมีค่า  $F/F_0$  ค่อนข้างต่ำแสดงถึงศักยภาพในการนำมาใช้ตรวจจับโลหะเหล่านี้ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.0625 mM ได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการตรวจวัดปริมาณของโลหะในน้ำดื่มและน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการทดสอบการตรวจจับโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นต่ำกว่างานวิจัยนี้
2. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการเรืองแสงด้วยสารเคมีชนิดอื่น ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Ayse Merve Senol and Yavuz Onganer. 2022. "A novel "turn-off" fluorescent sensor based on cranberry derived carbon dots to detect iron (III) and hypochlorite ions." *Journal of Photochemistry & Photobiology*. 424 : 113655.
- [2] Huimin Shi, Xue Li, Yingying Li and Suling Feng. 2023. "Carbon dots derived from peptone as "off-on" fluorescent probes for the detection of oxalic acid." *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 287 : 122038.
- [3] Durgadevi Nagarajan, D. Gangadharan and Swarnalatha Venkatanarasimhan. 2023. "Chapter 1-Synthetic strategies toward developing carbon dots via top-down approach." *Carbon Dots in Analytical Chemistry*. 1-13.
- [4] Pranjai D. Modi, Vaibhavkumar N. Mehta, Vimalkumar S. Prajapati, Swati Patel and Jigneshkumar V. Rohit. 2023. "Chapter-2 Bottom-up approaches for the preparation of carbon dots." *Carbon Dots in Analytical Chemistry*. 15-29.
- [5] Meng Li Liu, Bin Bin Chen, Tong Yang, Jian Wang, Xi Dong Liu and Cheng Zhi Huang. 2017. "One-pot carbonization synthesis of europium-doped carbon quantum dots for highly selective detection of tetracycline." *Methods Appl Fluoresc*. 1;5 (1) : 015003.
- [6] Pei Yang, Ziqi Zhu, Minzhi Chen, Xiaoyan Zhou and Weimin Chen. 2019. "Microwave-assisted synthesis of polyamine-functionalized carbon dots from xulan and their use for detection of tannic acid." *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. (213) : 313-308.
- [7] Binila K. Korah, Chinnu R. Thara, Neenamol John, Bony K. John, Sneha Mathew and Beena Mathew. 2023. "Microwave abetted synthesis of carbon dots and its triple mode applications in tartrazine detection, manganese ion sensing and fluorescent ink." *Foog Control*. 147 : 109608.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] Mohammad Sabaeian and Ali Khaledi-Nasab. 2012. "Size-dependent intersubband optical properties of dome-shaped InAs/GaAs quantum dots with wetting layer." *Applied Optics*. 51 : 4176-4185.
- [9] Shoujun Zhu, Yubin Song, Xiaohuan Zhao, Jieren Shao, Junhu Zhang and Bai Yang. 2015. "The photoluminescence mechanism in carbon dots (graphene quantum dots, carbon nanodots, and polymer dots): Current state and future perspective." *Nano Research*. 8(2) : 355-381.
- [10] Mehrab Pourmadadi, Erfan Rahmani, Maryam Rajabzadeh-Khosroshahi, Amirhossein Samadi, Razieh Behzadmehr, Abbas Rahdar and Luiz Fernando Romanholo Ferreira. 2023. "Properties and application of carbon quantum dots (CQDs) in biosensors for disease detection: A comprehensive review." *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 80 : 104156.
- [11] Shagun Kainth, Banibrata Maity, Nagaraj P. Shetti, Soumen Basu and Raghava Reddy Kakarla. 2023. "Dual emissive carbon dots: Synthesis strategies, properties and its rationmetric sensing applications." *Nano-Structures & Nano-Objects*. 33 : 100931.
- [12] Bhargav D. Mansuriya and Zeynep Altintas. 2021. "Carbon Dots: Classification, Properties, Synthesis, Characterization, and Applications in Health Care-An Update Review (2018-2021)." *Nanomaterials*. 11 : 2525.
- [13] Mariadoss Asha Jhonsi. 2018. "Carbon Quantum Dots for Bioimaging." *State of the Art in Nano-bioimaging*. 72723.
- [14] Shuai Chen, Yong-Liang Yu and Jian-Hua Wang. 2018. "Inner filter effect-based fluorescent sensing systems: A review." *Analytica Chimica Acta*. 999 : 13-26.
- [15] Haiyan Liu, Chenyu Li, Jing Li, Yuqing Cheng, Junfang Zhao, Jianing Chen and Mengtao Sun. 2023. "Plasmon-enhanced fluorescence resonance energy transfer in different nanostructures and nanomaterials." *Applied Materials Today*. 30 : 101731.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] M. J. Culzoni, A. Munoz de la pena, A. Machuca, H. C. Goicoechea and R. Babiano. 2013. "Rhodamine and BODIPY chemodosimeters and chemosensors for the detection of  $Hg^{2+}$ , based on fluorescence enhancement effects." *Analytical Methods*. 5 : 30-49.
- [17] Guillermo Gallareta-Olivares, Andrea Rivas-Sanchez, Angelica Cruz-Cruz, Syed Makhdoom Hussain, Reyna Berenice Genzalez-Gonzalez, Maria Fernanda Cardenas-Alcaide, Hafiz M.N. Iqbal and Roberto Parra-Saldivar. 2023. "Metal-doped carbon dots as robust nanomaterials for the monitoring and degradation of water pollutants." *Chemosphere*. 312 : 137190.
- [18] Oguz Gencer, Omer Faruk Ceven and Caner Unlu. 2022. "Triggering excitation independent fluorescence in zinc (II) incorporated carbon dots: Surface passivation of carbon dots with zinc (II) ions by microwave assisted synthesis methods." *Diamond & Related Materials*. 123 : 108874.
- [19] Hari Krishna Sadhanala, Saurav Aryal, Kusha Sharma, Ziv Orpaz, Shulamit Michaeli and Aharon Gefanken. 2022. "Nitrogen-doped carbon dots as a highly selective and sensitive fluorescent probe for sensing  $Mg^{2+}$  ions in aqueous solution, and their application in the detection and imaging of intracellular  $Mg^{2+}$ ." *Sensors and Actuators: B. Chemical*. 366 : 131958.
- [20] Thuy S. Ngo, Chantal T. Tracey, Anastasiya G. Navrotskaya, Andrey V. Bukhtiyarov, Pavel V. Krivoshapkin and Elena F. Krivoshapkina. 2023. "Reusable carbon dot/chitin nanocrystal hybrid sorbent for the selective detection and removal of Cr (VI) and Co (II) ions from wastewater." *Carbohydrate Polymers*. 304 : 120471.
- [21] Sobhi Daniel, M.G. Praveena and E.M. Mohammed. 2021. "Exploration of highly photoluminescent first-row transition metals (manganese, iron, cobalt, nickel, copper and zinc) co-doped nano carbon dots as energy storage materials." *Materials Science & Engineering B*. 269 : 115145.

[22] Aline C.C. Pena, Lucas Manique Raymundo, Luciane F. Trierweiler and Mariliz Gutterres. 2023. “Green carbon dots synthesized from *Chlorella Sorokiniana* microalgae biochar for chrome detection.” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 177 : 130-139.

[23] Xiaohua Hu, Xueqin An, Lielie Li. 2015. “Easy synthesis of highly fluorescent carbon dots from albumin and their photoluminescent mechanism and biological imaging applications.” *Materials Science and Engineering C*. 58 : 730-736.

[24] Ting Jiao, Haoxiang Wen, Wenxia Dong, Wen Wen and Zhongping Li. 2022. “Metal ion ( $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$ ) catalyzed synthesis of high quantum yield carbon dots.” *Materials Letters* Volume. 324 : 132575.

[25] Kunfeng Liu, Chongshu Xia, Yahui Guo, Hang Yu, Yunfei Xie and Weirong Yao. 2023. “Polyethylenimine-functionalized nitrogen and sulfur co-doped carbon dots as effective fluorescent probes for detection of  $\text{Hg}^{2+}$  ions.” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 292 : 122395.

[26] Dejian Dai, Chengyu Zhang, Nguyen Thi Dieu Thuy, Guo Zhao, Wei Lu and Jiyang Fan. 2022. “Strong fluorescence quenching of carbon dots by mercury (II) ions: Ground-state electron transfer and diminished oscillator strength.” *Diamond & Related Materials*. 126 : 109076.

[27] Chechia Hu, Ke-Hsuan Wang, Yu-Yu Chen, Motoki Maniwa, Kun-Yi Andrew Lin, Takeshi Kawai and Wei Chen. 2022. “Detection of  $\text{Fe}^{3+}$  and  $\text{Hg}^{2+}$  ions through photoluminescence quenching of carbon dots derived from urea and bitter tea oil residue.” *Spectrochimica Acta Part A : Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 272 : 120963.

[28] รุติพันธ์ พัฒนพงษ์, พิมพ์สิริกานต์ มิกขุนทด และไหมแพรว เย็นแย้ม. 2564. “การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทที่เจือด้วยโลหะเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับเหล็กไอออน.” *โครงการพิเศษสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*.

[29] ญานิกา ศักติบริบูรณ์ (Unpubic). 2563. “การพัฒนาไฮโดรเจลเรืองแสงจากคาร์บอนควอนตัมดอท/ คาร์บอกซีเอทิลไคโตซาน/ ออกซิโดสโเซเดียมอัลจินต เพื่อใช้สำหรับงานทางการแพทย์.”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[30] Hui Nie, Minjie Li, Quanshun Li, Shajun Liang, Ying Tan, Lan Sheng, Wei Shi and Sean Xiao-An Zhang. 2014. "Carbon Dots with Continuously Tunable Full-Color Emission and Their Application in Ratiometric pH Sensing." American Chemical Society. 26 : 3104-3112.

[31] S. Gokul Eswarn, D. Thirupathi and N. Vasimalai. 2022. "Synthesis of highly fluorescent carbon dots from bread waste and their nanomolar lead ions sensor application." Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management. 18 : 100748.

[32] ดร.พรพิมล เชื้อดวงผุย และผศ.ดร.เสาวคนธ์ วัฒนจันทร์. 2555. "ปริมาณโลหะหนัก (ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และสังกะสี) ในสัตว์ทะเลเศรษฐกิจบางชนิด บริเวณแหล่งทำการประมง อำเภอละงู จังหวัดสตูล." โครงการวิจัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[33] แววดา ทองระอา, ฉลวย มุสิกะ วันชัย วงสุตาวรรณ และอาวูธ หมั่นหาผล. 2557. "การประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในการได้รับโลหะหนักจากการบริโภคอาหารทะเลบริเวณชายฝั่งนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง." วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. ปีที่ 19 (ฉบับที่ 2).

[34] Hongzhi Lu, Shoufang Xu and Jingquan Lui. 2019. "One pot Generation of Blue and Red Carbon Dots in One Binary Solvent System for Dual Channel Detection of  $\text{Cr}^{3+}$  and  $\text{Pd}^{2+}$  Based on Ion Imprinted Fluorescence Polymers." American Chemical Society Sensors 4. 1917-1924.

[35] Neeraj Sohal, Soumen Basu and Banibrata Maity. 2023. "Deciphering the mechanism of undoped and heteroatom doped-carbon dots for detection of lead ions at nanomolar level." Microchemical. 185 : 108287.

[36] รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรณ์. 2548. "การแข่งขันกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีการดูดซับด้วยเซรามิกส์." โครงการวิจัยสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องค์กรักษ์ นครนายก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[37] Ting-Yi Wang, Chong-You Chen, Chang-Ming Wang, Ying Zi Tan and Wei-Ssu Liao. 2017. "Multicolor Functional Carbon Dots via One-Step Refluxing Synthesis." *American Chemical Society Sensors* 2. 354-363.

[38] Sadegh Kaviani, Siyamak Shahab, Masoome Sheikhi and Mahin Ahmadianarog. 2019. "DFT study on the selective complexation of meso-2,3-dimercaptosuccinic acid with toxic metal ions ( $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$  and  $Pd^{2+}$ ) for pharmaceutical and biological applications." *Journal of Molecular Structure*. 901-907.

[39] Jia Zhang and Shu-Hong Yu. 2015. "Carbon dots: large-scale synthesis, sensing and bioimaging." *Materials Today*. 19 : 328-393.

[40] Raji Atchudan, Thomas Nesakumar Jebakumar Immanuel Edison, Suguna Perumal, Nallal Muthuchamy and Yong Rok Lee. 2020. "Hydrophilic nitrogen-doped carbon dots from biowaste using dwarf banana peel for environmental and biological applications." *Fuel*. 275 : 117821.

[41] Yan Zhou, Guoqing Chen, Chaoqun Ma, Jiao Gu, Taiqun Yang, Lei Li, Hui Gao, Yi Xiong, Yamin Wu, Chun Zhu, Hui Wu, Wenzhi Yin, Anqi Hu, Xiaoqian Qiu, Weinan Guan and Wei Zhang. 2023. "Nitrogen-doped carbon dots with bright fluorescence for highly sensitive detection of  $Fe^{3+}$  in environmental waters." *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 293 : 122414.

[42] Masoud Farshbaf, Soodabeh Davaran, Fariborz Rahimi, Nasim Annabi, Roya Salehi and AbolfazlmAkbarzaded. 2018. "Carbon quantum dots: recent progresses on synthesis, surface modification and applications." *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*. 46 : 1331-1348.

[43] Nithya Selvaraju, Jaganathan Murugan, Senthilnathan Selvaraj, Neeraj Singhal and Gunasekaran Venugopal. 2023. "Electrocatalytic performance of green synthesized nitrogen-doped carbon dots toward clean energy  $H_2$  generation." *Materials Letters*. 341 : 134255.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[44] Hailong Shen, Xiaochun Wei, Zhenqi Cen, Dan Lu, Man Cai, Haifu Huang, Zhiqiang Lan, Xianqing Liang and Wenzheng Zhou. 2022. "Synthesis of nitrogen-doped graphene driven from photothermal decomposition of ammonium bicarbonate and its application in supercapacitors." *Journal of Energy Storage*. 56 : 105934.

[45] Lawen Abdulsatar Esmail and Hijran Sanaan Jabbar. 2023. "Violuric acid carbon dots as a highly fluorescence probe for ultrasensitive determination of Zn (II) in tomato paste." *Food Chemistry*. 413 : 135638.

[46] Yongnan Zhang, Yunyi Liang, Suiyi Li, Yan Yuan, Daihui Zhang, Yingji Wu, Huan Xie, Kathirvel Brindhadevi, Arivalagan Pugazhendhi and Changlei Xia. 2023. "A review of biomass pyrolysis gas : Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades." *Fuel*. 347 : 128461.

[47] Dinesh Kamireddi, Avinash Terapalli, Veluru Sridevi, M.Tukaram Bai, Dadi Venkata Surya, Chinta Sankar Rao and Lakshmana Rao Jeeru. 2023. "Microwave-assisted *In-situ* catalytic co-pyrolysis of polypropylene and polystyrene mixtures: Response surface methodology analysis using machine learning." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 172 : 105984

[48] Haigang Zhang, Zhongjie Shen, Zizheng Dong, Yiru Yang, Jianliang Xu, Qinfeng Liang and Haifeng Liu. 2023. "Experimental study on the effect of temperature and oxygen on pyrolysis-gasification decoupling characteristics of Yili coal." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 172 : 106007.

[49] Mehrdad Seifali Abbas-Abadi, Marvin Kusenberg, Azd Zayoud, Martijn Roosen, Florence Vermeire, Sepehr Madanikashani, Maja Kuzmanović, Behzad Parvizi, Uros Kresovic, Steven De Meester and Kevin M. Van Geem. 2023. "Thermal pyrolysis of waste versus virgin polyolefin feedstocks: The role of pressure, temperature and waste composition." *Waste Management*. 165 : 108-118.

[50] Sathishkumar Munusamy, Triveni Rajashekhar Mandlimath, Puchakayala Swetha, Abdullah G. Al-Sehemi, Mehboobali Pannipara, Sivasankar Koppala, Paramasivam Shanmugam, Supakon Boonyuen, Paramassivam Shanmugam, Supakorn Boonyuen,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ramyakrishna Pothu and Rajender Boddula. 2023. "Nitrogen-doped carbon dots: Recent developments in its fluorescent sensor applications." *Environmental Research*. 231 : 116046

[51] A.Z. Simoes, F. Moura, T.B. Onofre, M.A. Ramirez, J.A. Varela and E. Longo. 2010. "Microwave-hydrothermal synthesis of barium strontium titanate nanoparticles." *Journal of Alloys and Compounds*. 508 (2) : 620-624.

[52] Orlette Mkhari, Themba D. Ntuli, Neil J. Coville, Edward N. Nxumalo and Manoko S. Maubane-Nkadimeng. 2023. "Supported carbon-dots : A review." *Journal of Luminescence*. 255 : 119552.

[53] Timothy J. Pillar-Little, Namal Wanninayake, Leona Nease, David K. Heidary, Edith C. Glazer and Doo Young Kim. 2018. "Superior photodynamic effect of carbon quantum dots through both type I and type II pathways: Detailed comparison study of top-down-synthesized and bottom-up-synthesized carbon quantum dots." *Carbon*. 140 : 616-623.

[54] Sujatha D., Pardhasaradhi Nandigana, P. Sriram and Subhendu K. Panda. 2023. "4 - Characterization and physical properties of carbon quantum dots." *Carbon Quantum Dots for Sustainable Energy and Optoelectronics*. 55-90.

[55] L. Cui, X. Ren, J. Wang and M. Sun. 2020. "Synthesis of homogeneous carbon quantum dots by ultrafast dual-beam pulsed laser ablation for bioimaging." *Materials Today Nano*. 12 : 100091.

[56] Neetu Shorgar, Indu Bhati and Priyanka Jhalora. 2023. "Chapter 4 - Laser ablation synthesis of quantum dots." *Quantum Dots Fundamentals, Synthesis and Applications*. 53-75.

[57] Xuehua Li, Fuxiang Ge, Xiaobing Li, Xiaotong Zhou, Jiansheng Qian, Guangqin Fu, Liwei Shi and Yumei Xu. 2019. "Rapid and large-scale production of carbon dots by salt-assisted electrochemical exfoliation of graphite rods." *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 851 : 113390.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[58] Fuwei Qin, Qiqi Li, Tingting Tang, Jiayao Zhu, Xuemeng Gan, Yaoyao Chen, Yizhao Li, Su Zhang, Xueli Huang and Dianzeng Jia. 2022. "Functional carbon dots from a mild oxidation of coal liquefaction residue." *fuel science*. 322 : 124216.

[59] Gwajeong Jeong, Chan Ho Park, Dongchan Yi and Hyunseung Yang. 2023. "Green synthesis of carbon dots from spent coffee grounds via ball-milling: Application in fluorescent chemosensors." *Journal of Cleaner Production*. 392 : 136250.

[60] Gayathry Ganesh, Izan Izwan Misnon and Rajan Jose. 2023. "Solvothermal synthesis of green fluorescent carbon dots from palm kernel shells." *Materials Today: Proceedings*. 81,1.

[61] กระทรวงอุตสาหกรรม. 2521. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคฉบับที่ 332.

[62] กรมควบคุมมลพิษ. 2559. กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม เล่ม 133 ตอนพิเศษ 129.

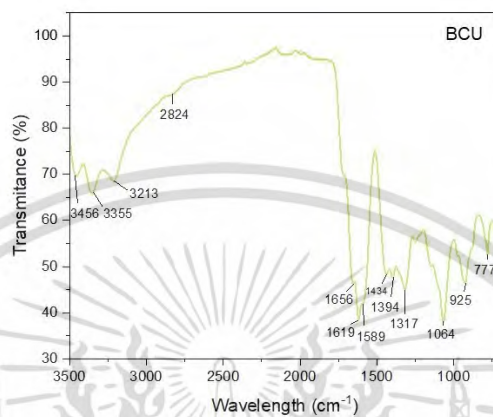
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



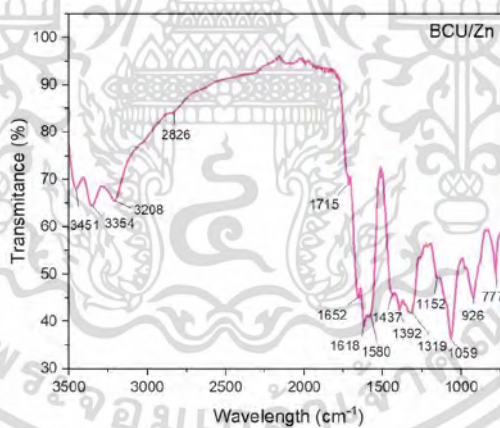
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ATR-FTIR

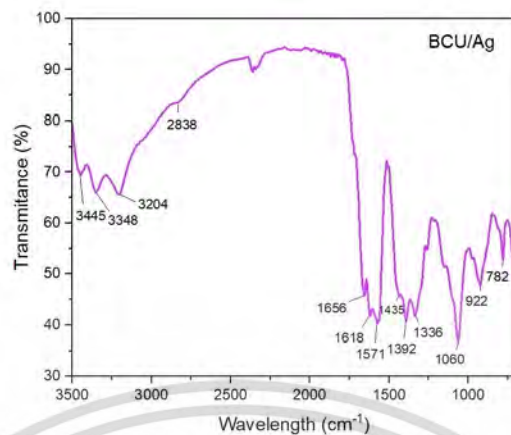


รูปที่ ก.1 สเปกตรัมของ BCU ด้วยเทคนิค ATR-FTIR



รูปที่ ก.2 สเปกตรัมของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค ATR-FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



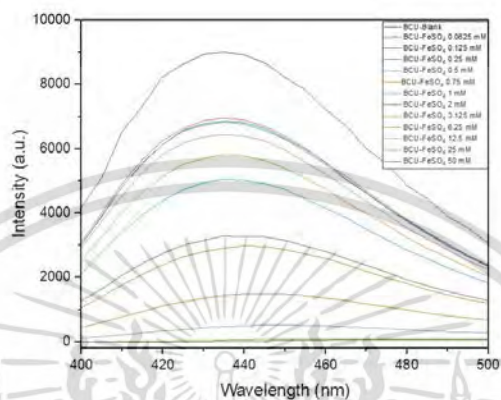
รูปที่ ก.3 สเปกตรัมของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค ATR-FTIR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

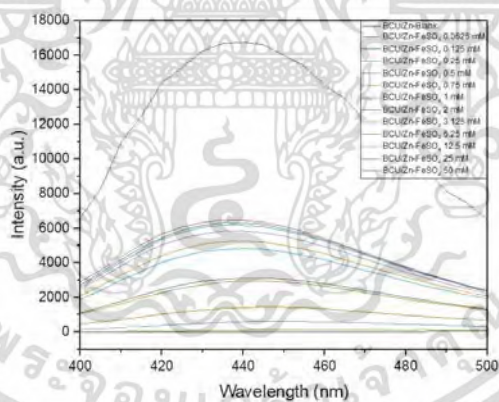
## ภาคผนวก ข

### Fluorescence



รูปที่ ข.1 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeSO_4$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

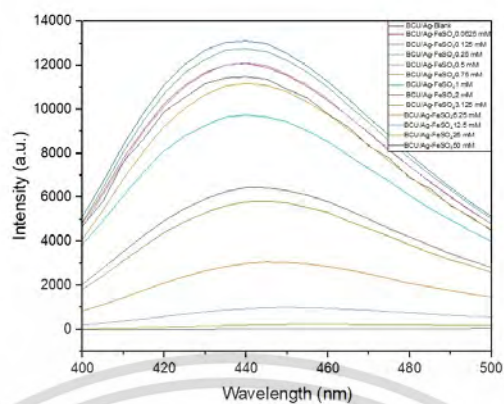
### Fluorescence



รูปที่ ข.2 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeSO_4$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

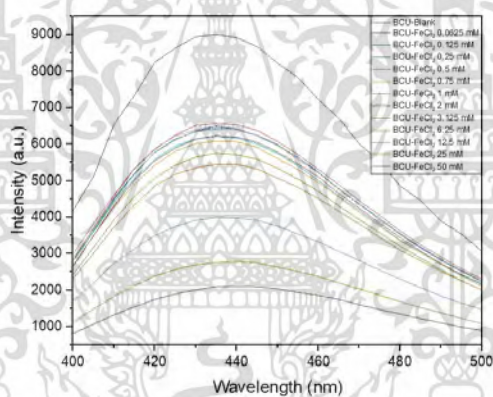
### Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeSO_4$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

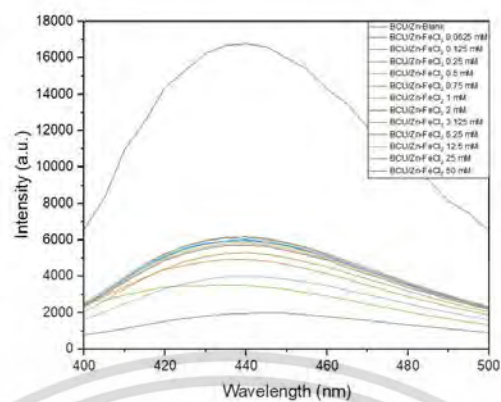
Fluorescence



รูปที่ ข.4 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeCl_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

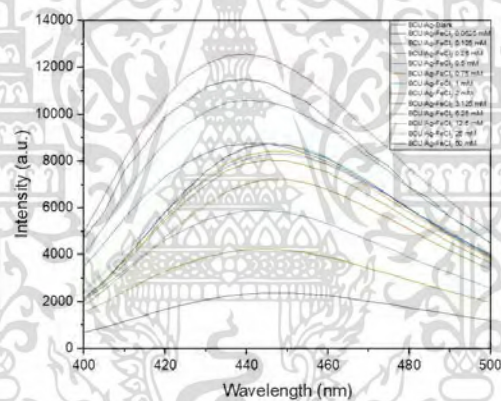
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.5 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeCl_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

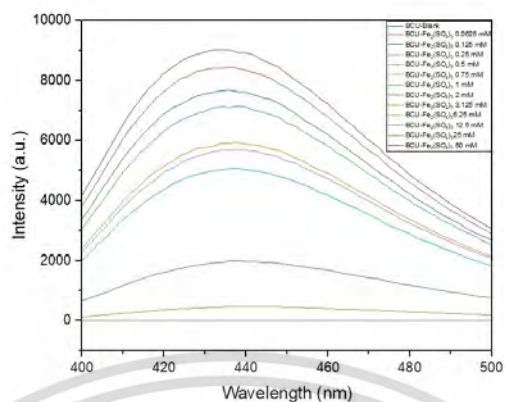
Fluorescence



รูปที่ ข.6 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{2+}$  จาก  $FeCl_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

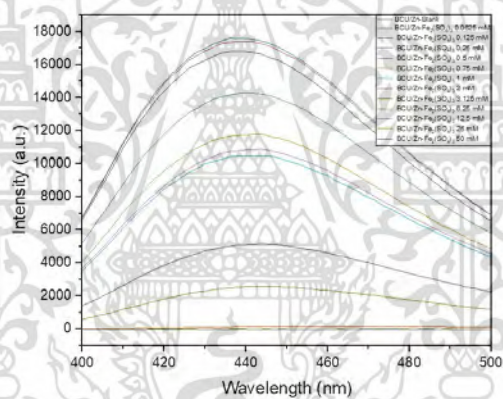
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

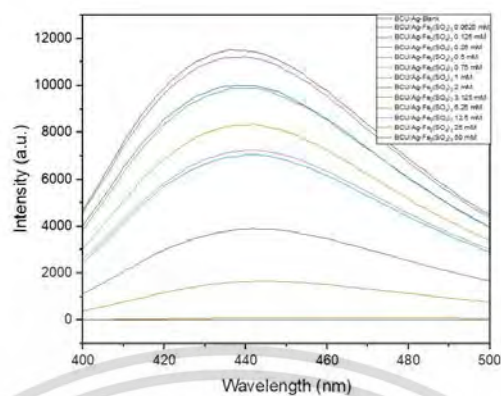
Fluorescence



รูปที่ ข.8 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ของ BCU/Zn ด้วย

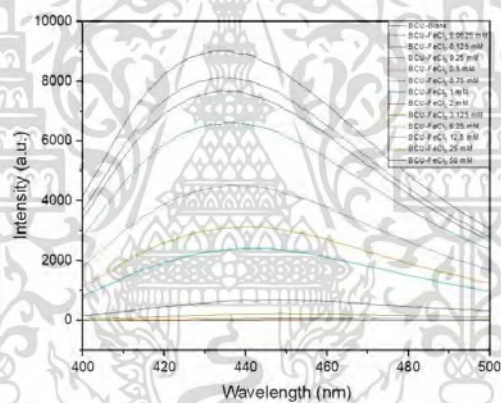
เทคนิค Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.9 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $Fe_2(SO_4)_3$  ของ BCU/Ag ด้วย

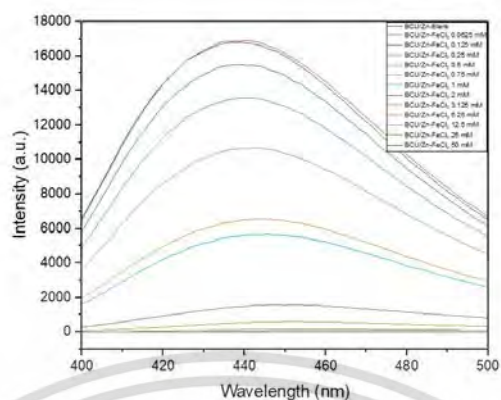
เทคนิค Fluorescence



รูปที่ ข.10 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $FeCl_3$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

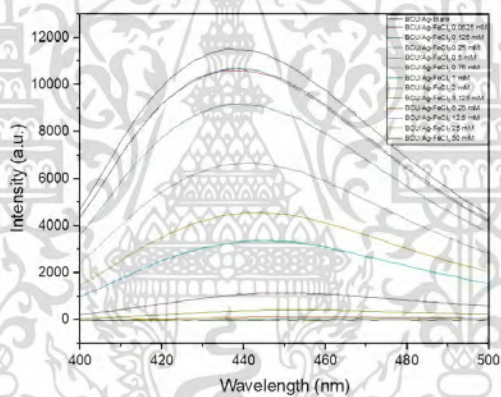
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.11 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $FeCl_3$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

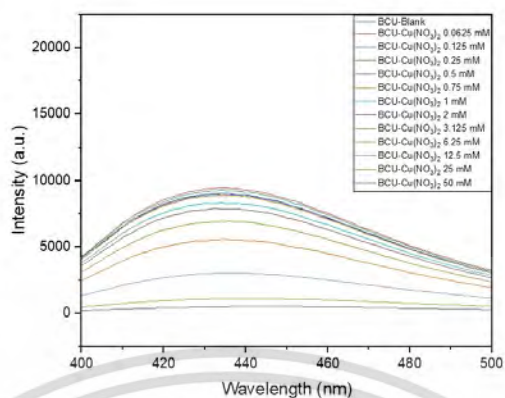
Fluorescence



รูปที่ ข.12 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Fe^{3+}$  จาก  $FeCl_3$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

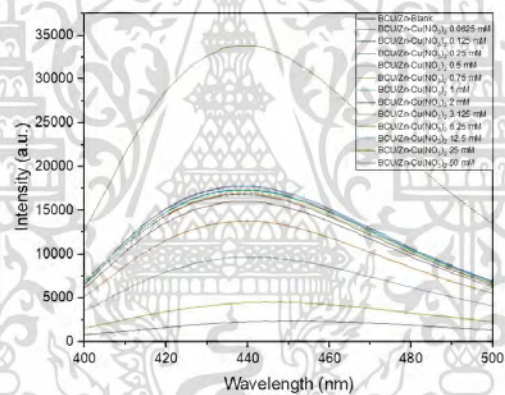
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.13 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

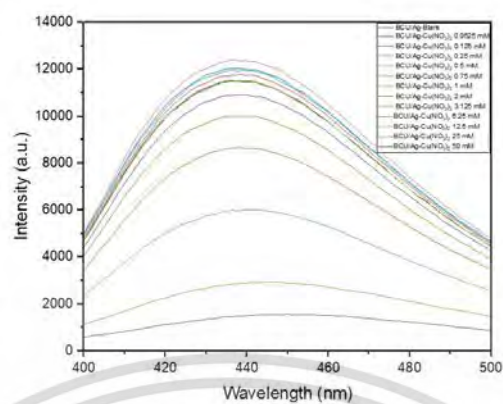
Fluorescence



รูปที่ ข.14 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

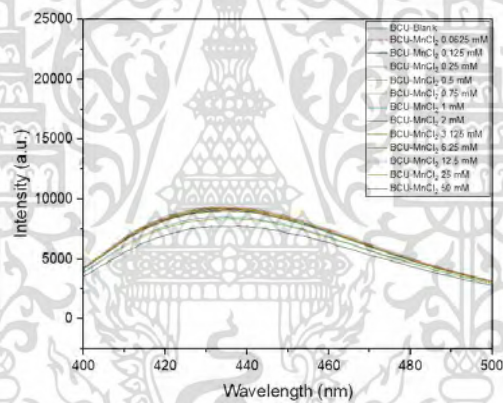
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

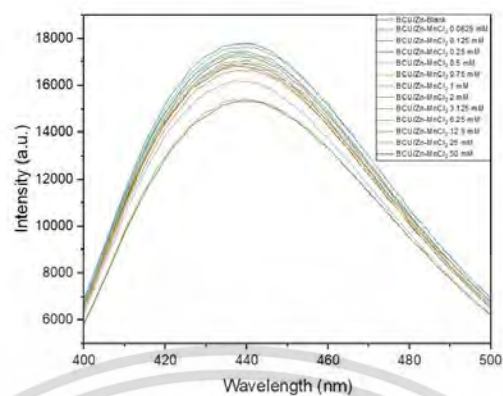
Fluorescence



รูปที่ ข.16 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Mn}^{2+}$  จาก  $\text{MnCl}_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

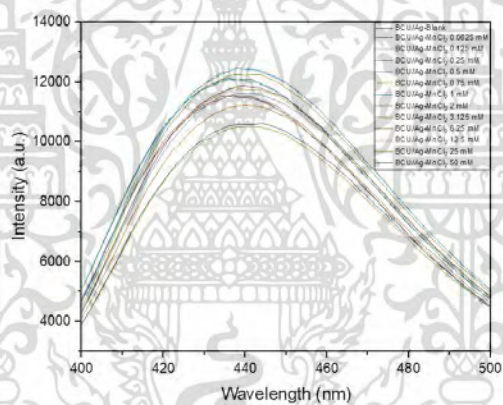
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.17 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Mn^{2+}$  จาก  $MnCl_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

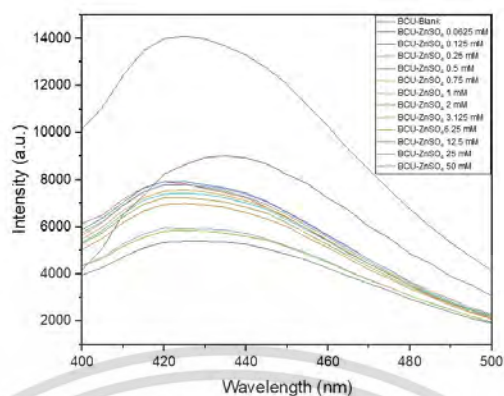
Fluorescence



รูปที่ ข.18 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Mn^{2+}$  จาก  $MnCl_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

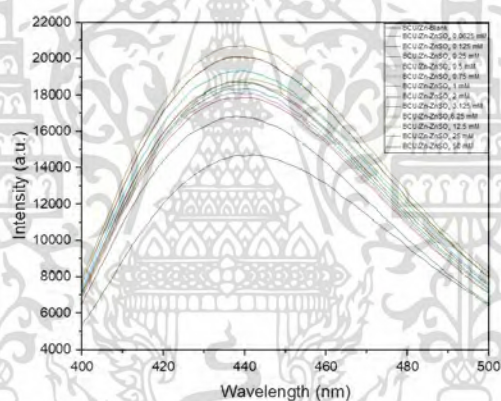
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  จาก  $ZnSO_4$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

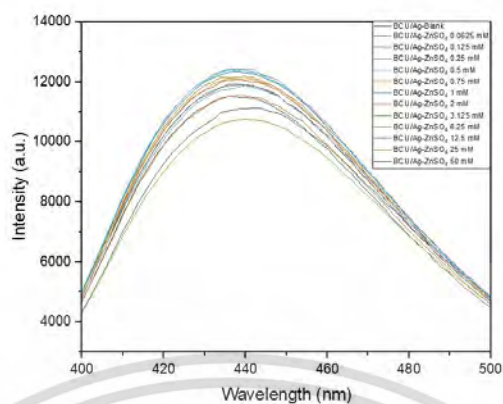
Fluorescence



รูปที่ ข.20 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  จาก  $ZnSO_4$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

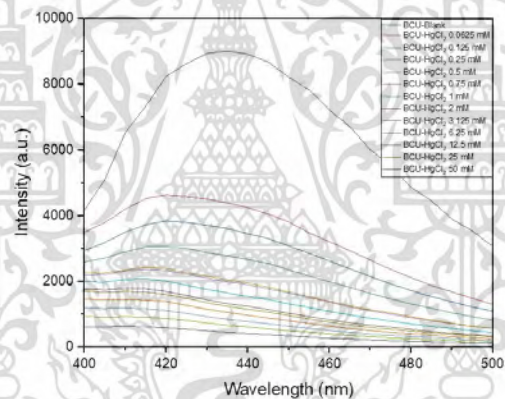
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.21 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Zn^{2+}$  จาก  $ZnSO_4$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

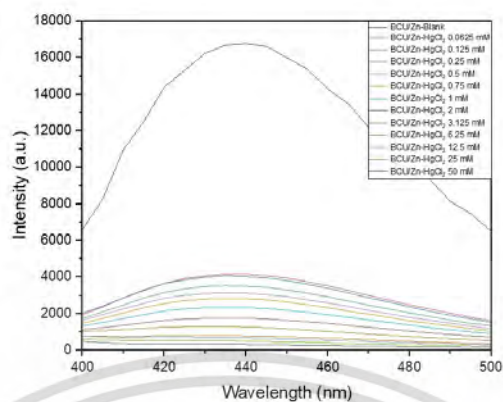
Fluorescence



รูปที่ ข.22 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

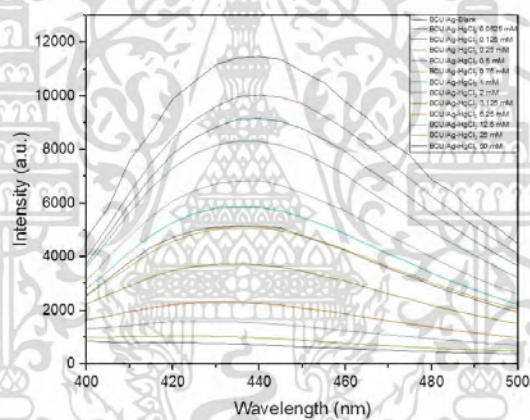
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.23 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$  ของ BCu/Zn ด้วยเทคนิค

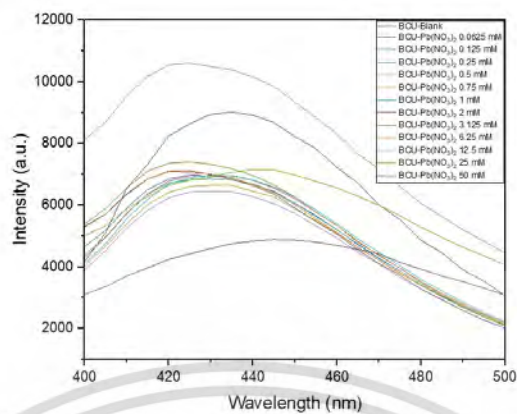
Fluorescence



รูปที่ ข.24 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$  ของ BCu/Ag ด้วยเทคนิค

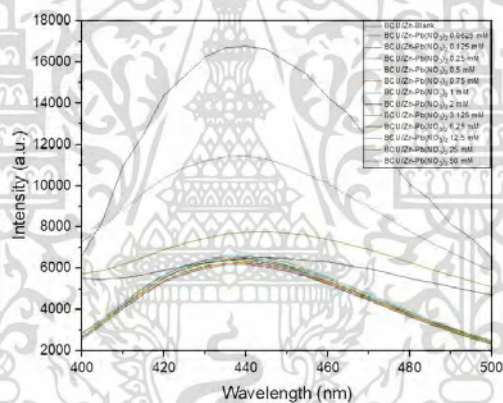
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.25 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Pb^{2+}$  จาก  $Pb(NO_3)_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

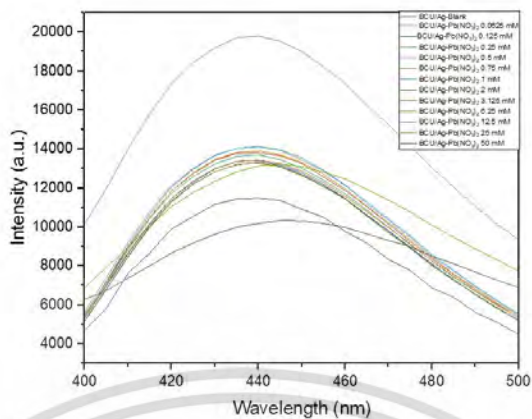
Fluorescence



รูปที่ ข.26 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Pb^{2+}$  จาก  $Pb(NO_3)_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

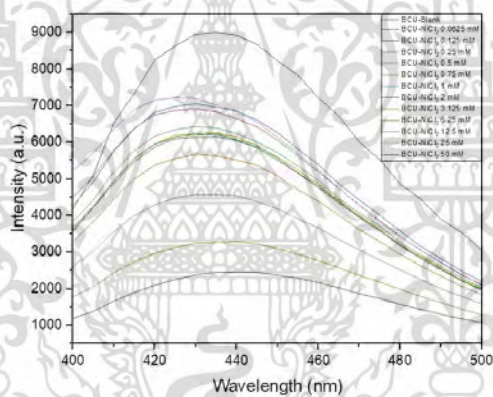
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.27 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Pb^{2+}$  จาก  $Pb(NO_3)_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

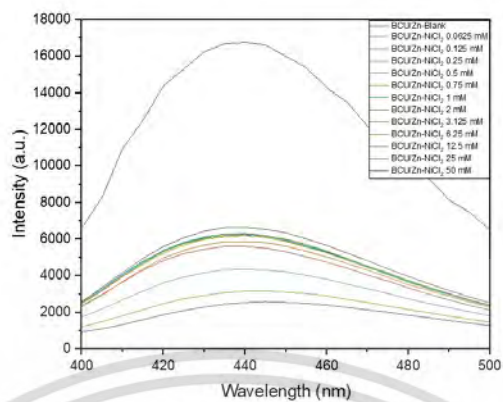
Fluorescence



รูปที่ ข.28 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

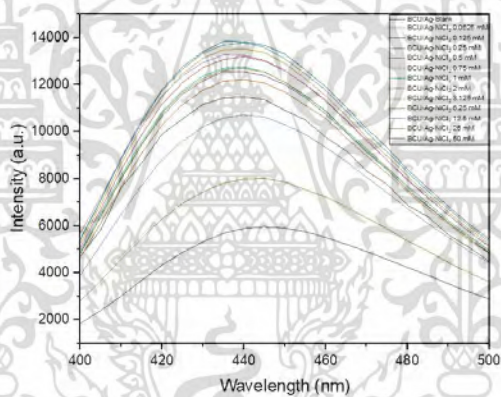
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.29 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

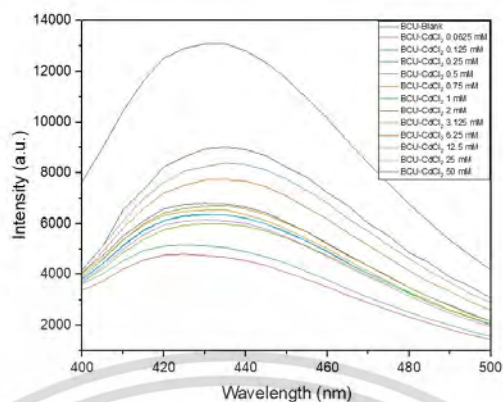
Fluorescence



รูปที่ ข.30 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค

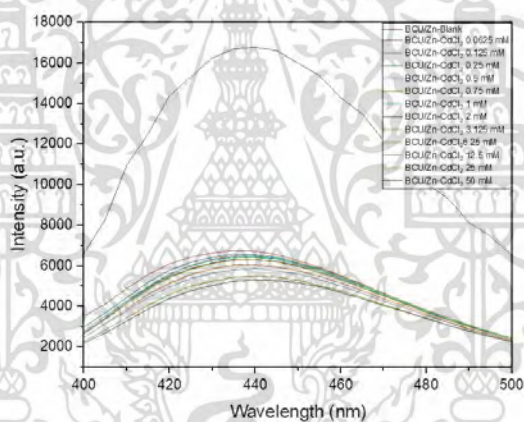
Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.31 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  จาก  $CdCl_2$  ของ BCU ด้วยเทคนิค

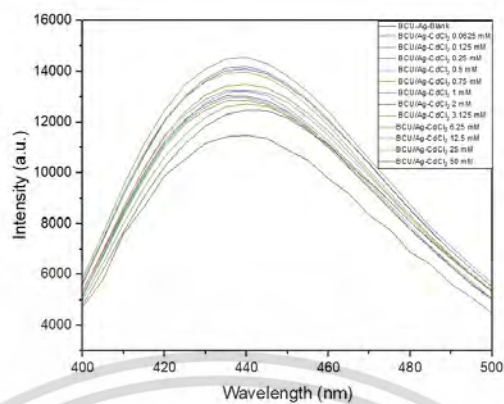
Fluorescence



รูปที่ ข.32 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $Cd^{2+}$  จาก  $CdCl_2$  ของ BCU/Zn ด้วยเทคนิค

Fluorescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



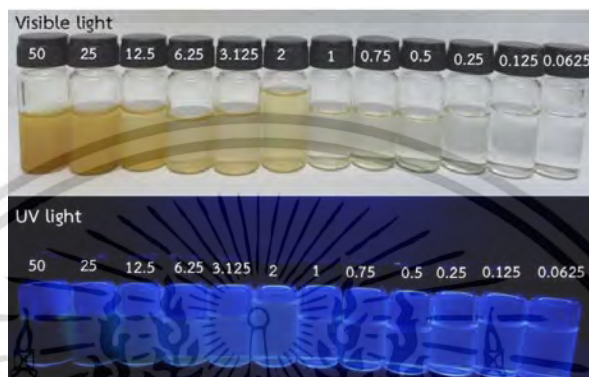
รูปที่ ข.33 สเปกตรากการตรวจจับโลหะไอออน  $\text{Cd}^{2+}$  จาก  $\text{CdCl}_2$  ของ BCU/Ag ด้วยเทคนิค



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ภาพถ่าย UV-Visible light และ UV light



รูปที่ ค.1 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

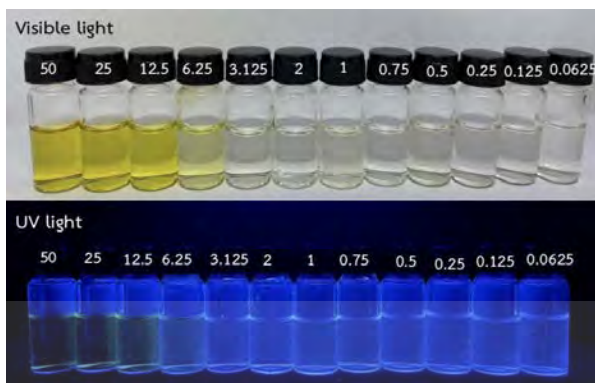
$\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeSO}_4$



รูปที่ ค.2 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

$\text{Fe}^{2+}$  จาก  $\text{FeCl}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



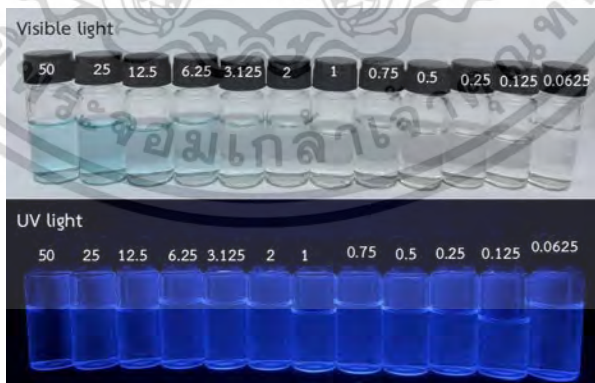
รูปที่ ค.3 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

$\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$



รูปที่ ค.4 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

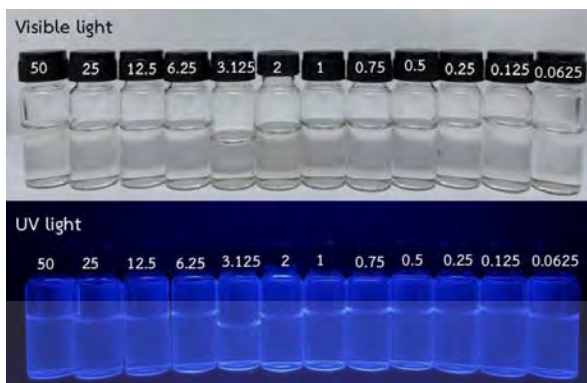
$\text{Fe}^{3+}$  จาก  $\text{FeCl}_3$



รูปที่ ค.5 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

$\text{Cu}^{2+}$  จาก  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



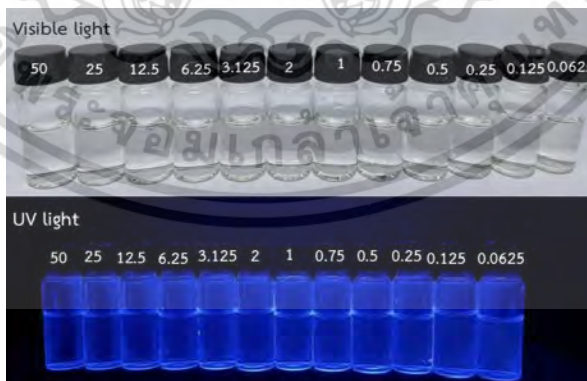
รูปที่ ค.6 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

$Mn^{2+}$  จาก  $MnCl_2$



รูปที่ ค.7 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

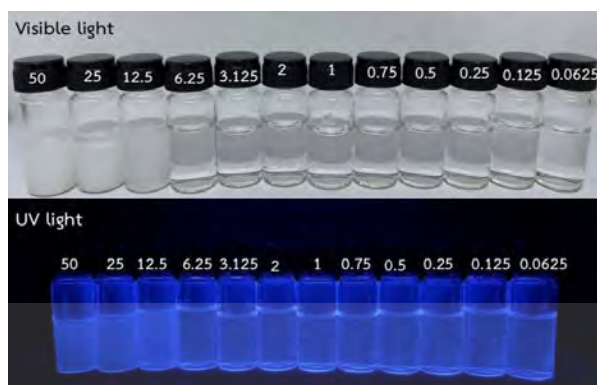
$Zn^{2+}$  จาก  $ZnSO_4$



รูปที่ ค.8 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

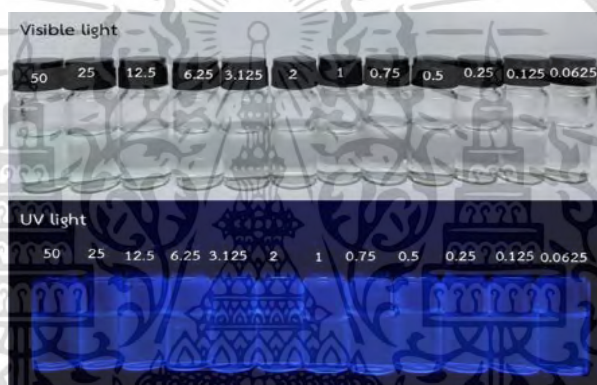
$Hg^{2+}$  จาก  $HgCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.9 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะไอออน

$Pb^{2+}$  จาก  $Pb(NO_3)_2$



รูปที่ ค.10 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะ

ไอออน  $Ni^{2+}$  จาก  $NiCl_2$



รูปที่ ค.11 ภาพถ่ายตัวอย่าง CDs ภายใต้ UV-Visible light และ UV light ของการตรวจจับโลหะ

ไอออน  $Cd^{2+}$  จาก  $CdCl_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ๖

ตาราง ๖.1 ค่า F/F<sub>0</sub>

| จุดที่                                | โลหะหนัก  | ความเข้มข้น (mg/l) |       |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |
|---------------------------------------|---|--------------------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
|                                       |   | 0.0625             | 0.125 | 0.25 | 0.5  | 0.75 | 1    | 2    | 3.125 | 6.25 | 12.5 | 25   | 50   |
| BCU                                   | Fe <sup>2+</sup> (FeSO <sub>4</sub> )                               | 0.77               | 0.76  | 0.75 | 0.71 | 0.64 | 0.55 | 0.35 | 0.31  | 0.15 | 0.05 | 0    | 0    |
|                                       | Fe <sup>2+</sup> (FeCl <sub>2</sub> )                               | 0.73               | 0.71  | 0.71 | 0.71 | 0.67 | 0.69 | 0.69 | 0.63  | 0.6  | 0.44 | 0.3  | 0.22 |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) | 0.93               | 0.85  | 0.78 | 0.62 | 0.65 | 0.55 | 0.21 | 0.05  | 0    | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (FeCl <sub>3</sub> )                               | 0.9                | 0.85  | 0.73 | 0.49 | 0.33 | 0.26 | 0.06 | 0.02  | 0.01 | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Cu <sup>2+</sup> (Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )               | 1.04               | 1     | 1.02 | 0.99 | 0.99 | 0.93 | 0.87 | 0.76  | 0.61 | 0.33 | 0.12 | 0.05 |
|                                       | Mn <sup>2+</sup> (MnCl <sub>2</sub> )                               | 1.02               | 1.02  | 1.02 | 1.04 | 1.03 | 1.01 | 1    | 0.99  | 1.02 | 0.95 | 0.92 | 0.86 |
|                                       | Zn <sup>2+</sup> (ZnSO <sub>4</sub> )                               | 0.85               | 0.87  | 0.86 | 0.86 | 0.84 | 0.82 | N/A  | 0.8   | 0.77 | 0.66 | 0.65 | 0.6  |
|                                       | Hg <sup>2+</sup> (HgCl <sub>2</sub> )                               | 0.5                | 0.41  | 0.32 | 0.23 | 0.24 | 0.20 | 0.16 | 0.15  | 0.13 | 0.1  | 0.08 | 0.06 |
|                                       | Pb <sup>2+</sup> (Pb (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )              | 0.78               | 0.78  | 0.77 | 0.72 | 0.74 | 0.78 | 0.78 | 0.82  | 0.78 | N/A  | 0.77 | 0.51 |
|                                       | Ni <sup>2+</sup> (NiCl <sub>2</sub> )                               | 0.77               | 0.79  | 0.72 | 0.80 | 0.70 | 0.70 | 0.69 | 0.69  | 0.63 | 0.51 | 0.36 | 0.27 |
| Cd <sup>2+</sup> (CdCl <sub>2</sub> ) | 0.53  | 0.71               | 0.57  | 0.69 | 0.73 | 0.71 | 0.76 | 0.75 | 0.86  | 0.92 | 0.67 | 1.46 |      |
| BCU/Zn                                | Fe <sup>2+</sup> (FeSO <sub>4</sub> )                               | 0.38               | 0.38  | 0.37 | 0.35 | 0.31 | 0.29 | 0.19 | 0.18  | 0.09 | 0.04 | 0.01 | 0    |
|                                       | Fe <sup>2+</sup> (FeCl <sub>2</sub> )                               | 0.37               | 0.36  | 0.37 | 0.35 | 0.35 | 0.36 | 0.34 | 0.32  | 0.29 | 0.24 | 0.21 | 0.12 |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) | 1.03               | 1.05  | 0.85 | 0.64 | 0.7  | 0.62 | 0.30 | 0.15  | 0.01 | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (FeCl <sub>3</sub> )                               | 1                  | 0.92  | 0.8  | 0.63 | 0.38 | 0.33 | 0.09 | 0.03  | 0.01 | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Cu <sup>2+</sup> (Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )               | 1.03               | 1.06  | 1.03 | 1.05 | 1.01 | 1.03 | 0.95 | N/A   | 0.82 | 0.57 | 0.26 | 0.13 |
|                                       | Mn <sup>2+</sup> (MnCl <sub>2</sub> )                               | 1.01               | 1.06  | 1.01 | 0.96 | 1    | 1.03 | 1.03 | 1.04  | 0.99 | 1.05 | 0.92 | 0.91 |
|                                       | Zn <sup>2+</sup> (ZnSO <sub>4</sub> )                               | 1.06               | 1.11  | 1.09 | 1.08 | 1.20 | 1.15 | 1.19 | 1.23  | 1.11 | 1.11 | 1.12 | 0.87 |
|                                       | Hg <sup>2+</sup> (HgCl <sub>2</sub> )                               | 0.25               | 0.24  | 0.21 | 0.19 | 0.17 | 0.14 | 0.11 | 0.08  | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
|                                       | Pb <sup>2+</sup> (Pb (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )              | 0.39               | 0.38  | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.37 | 0.38  | 0.37 | 0.68 | 0.46 | 0.39 |
|                                       | Ni <sup>2+</sup> (NiCl <sub>2</sub> )                               | 0.33               | 0.37  | 0.37 | 0.38 | 0.37 | 0.37 | 0.4  | 0.38  | 0.35 | 0.26 | 0.19 | 0.15 |
| Cd <sup>2+</sup> (CdCl <sub>2</sub> ) | 0.40  | 0.39               | 0.38  | 0.38 | 0.39 | 0.38 | 0.37 | 0.38 | 0.36  | 0.35 | 0.33 | 0.32 |      |
| BCU/Ag                                | Fe <sup>2+</sup> (FeSO <sub>4</sub> )                               | 1.05               | 1.14  | 1.11 | 1.05 | 0.97 | 0.84 | 0.55 | 0.49  | 0.25 | 0.08 | 0.01 | 0    |
|                                       | Fe <sup>2+</sup> (FeCl <sub>2</sub> )                               | 1.09               | 0.76  | 0.92 | 0.68 | 0.69 | 0.71 | 0.72 | 0.66  | 0.59 | 0.5  | 0.36 | 0.2  |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ) | 0.99               | 0.98  | 0.87 | 0.85 | 0.72 | 0.6  | 0.33 | 0.14  | 0.01 | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Fe <sup>3+</sup> (FeCl <sub>3</sub> )                               | 0.92               | 0.93  | 0.79 | 0.57 | 0.39 | 0.28 | 0.09 | 0.03  | 0.01 | 0    | 0    | 0    |
|                                       | Cu <sup>2+</sup> (Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )               | 1.02               | 1.05  | 1    | 1.08 | 1    | 1.04 | 0.95 | 0.87  | 0.75 | 0.52 | 0.24 | 0.13 |
|                                       | Mn <sup>2+</sup> (MnCl <sub>2</sub> )                               | 1.01               | 1.05  | 1.05 | 1.08 | 1.03 | 1.08 | 1.03 | 1.07  | 0.98 | 1.01 | 0.91 | 0.92 |
|                                       | Zn <sup>2+</sup> (ZnSO <sub>4</sub> )                               | 1.05               | 1.07  | 1.03 | 1.08 | 1.05 | 1.08 | 1.03 | 1.06  | 1    | 1.03 | 0.93 | 0.96 |
|                                       | Hg <sup>2+</sup> (HgCl <sub>2</sub> )                               | 0.87               | 0.8   | 0.73 | 0.6  | 0.45 | 0.51 | 0.45 | 0.33  | 0.2  | 0.14 | 0.09 | 0.07 |
|                                       | Pb <sup>2+</sup> (Pb (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )              | 1.21               | 1.17  | 1.19 | 1.23 | 1.21 | 1.23 | 1.15 | 1.16  | 1.17 | 1.73 | 1.12 | 0.87 |
|                                       | Ni <sup>2+</sup> (NiCl <sub>2</sub> )                               | 1.14               | 1.21  | 1.20 | 1.16 | 1.18 | 1.11 | 1.10 | 1.11  | 1.06 | 0.93 | 0.68 | 0.5  |
| Cd <sup>2+</sup> (CdCl <sub>2</sub> ) | 1.24  | 1.23               | 1.27  | 1.16 | 1.22 | 1.13 | 1.14 | 1.12 | 1.17  | 1.15 | 1.1  | 1.08 |      |



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่ 23 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ข้าพเจ้า นางสาวบุญญพัฒน์ พิณรัมย์ รหัสประจำตัว 62050308

นางสาวสุพิชญา วันคำ รหัสประจำตัว 62050349

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง ชื่อภาษาไทย การสังเคราะห์คาร์บอนควอนตัมดอทเจือด้วยซิงค์และเงินด้วยวิธีไมโครเวฟเพื่อใช้เป็นตัวตรวจจับไอออนของโลหะ

ชื่อภาษาอังกฤษ Zinc and silver doped carbon quantum dots synthesized by microwave assist for metal ion detection

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.21 %

ลงชื่อ บุญญพัฒน์ พิณรัมย์

( นางสาวบุญญพัฒน์ พิณรัมย์ )

นักศึกษา

ลงชื่อ สุพิชญา วันคำ

( นางสาวสุพิชญา วันคำ )

นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร. ภัทรธาวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษ/ของนักศึกษาข้างต้น แล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ ธวัช

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้