



เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้จากอนุพันธ์คาร์บาโซลที่จำเพาะต่อการ
ตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ คาร์บอนเนต และฟอสเฟตในน้ำ



ปรีชยา คร้ามวอน

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้จากอนุพันธ์คาร์บาโซลที่จำเพาะต่อการ
ตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟตในน้ำ



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้จากอนุพันธ์คาร์บาโซลที่จำเพาะต่อ
การตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟตในน้ำ"
ของ ปรีชยา คร้ามวอน
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญธนา วรรณเลิศ)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี สิริกุลขจร)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภารัตน์ เชื้อชวด ชัยสิทธิ์)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้จากอนุพันธ์คาร์บาโซลที่จำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟตในน้ำ
ผู้วิจัย	ปรีชยา คร้ามวอน
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัญชลี สิริกุลขจร

ประเภทสารนิพนธ์ วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาเคมี, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563

คำสำคัญ เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้, เซนเซอร์ที่เรืองแสงได้, อนุพันธ์คาร์บาโซล, เม็ดไฮโดรเจล, การตรวจวัดไซยาไนด์, การตรวจวัดคาร์บอเนต, การตรวจวัดฟอสเฟต

บทคัดย่อ

เซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีจาก 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) และเซนเซอร์ที่เรืองแสงจาก 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ เซนเซอร์จะนำไปผสมกับสารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนบวก (CTAB) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) โดยเตรียมขึ้นในรูปแบบสารละลายและไฮโดรเจลชนิดเม็ด การศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบโดยใช้เซนเซอร์ทั้งสองพบว่าสารละลาย NBC และ DCC มีความเลือกจำเพาะในการตรวจวัด CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ในน้ำ โดยสารละลาย NBC เกิดการเปลี่ยนสีจากใสไม่มีสีเป็นสีส้ม ส่วนสารละลาย DCC เกิดการเรืองแสงสีฟ้า การเปลี่ยนสีและการเรืองแสงเกิดจากขบวนการหลุดโปรตอนของ NH-carbazole โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และผลการรบกวนของไอออนอื่นๆ ต่อการตรวจวัด CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ถูกศึกษาภายใต้สภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าและเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตรีสำหรับ NBC และเทคนิคการสังเกตการเรืองแสงภายใต้ black light และเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สำหรับ DCC ผลการศึกษาพบว่าเซนเซอร์ทั้งสองมีประสิทธิภาพในการตรวจวัด PO₄³⁻ ในน้ำได้ดีที่สุด โดยให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ดีที่สุด นอกจากนี้ไอออนที่รบกวนการตรวจวัด PO₄³⁻ คือ H₂PO₄⁻ และ S₂O₄²⁻ เซนเซอร์ NBC และ DCC บนตัวดูดซับไฮโดรเจลชนิดเม็ดให้ความจำเพาะต่อการตรวจวัด PO₄³⁻ ในน้ำเท่านั้น แต่มีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ PO₄³⁻ ในน้ำที่สูงกว่าระบบสารละลาย

Title COLORIMETRIC AND FLUOROGENIC SENSORS FROM CARBAZOLE DERIVATIVES FOR A SELECTIVE DETECTION OF CYANIDE, CARBONATE AND PHOSPHATE ANIONS IN WATER

Author PREECHAYA KRAMWON

Advisor Assistant Professor Anchalee Sirikulkajorn, Ph.D.

Academic Paper Thesis M.S. in Chemistry (Type A 2), Naresuan University, 2020

Keywords Colorimetric sensor, Fluorogenic sensor, Carbazole derivatives, Hydrogel bead, Cyanide detection, Carbonate detection, Phosphate detection

ABSTRACT

Colorimetric sensor from 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) and fluorogenic sensor from 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) were developed for selective detection of anions in water. Sensors were incorporated into a micellar system of a cationic surfactant, CTAB in MeCN:H₂O (1:4). Both sensors were prepared in two forms of solution and hydrogel beads. The studies of anion detection in water revealed that the solutions of NBC and DCC showed a selectivity for CN⁻, CO₃²⁻ and PO₄³⁻ detection. The NBC solution changed its color from colorless to orange while the solution of DCC turned on blue fluorescent. These changes happen from a deprotonation process at NH-carbazole by strong basic anions. LOD and anion competition toward CN⁻, CO₃²⁻ and PO₄³⁻ was evaluated under the optimal condition using naked-eye observation and UV-vis spectrophotometry technique for NBC, under black light and fluorescent technique for DCC. The experimental results found that both sensors showed the highest potential for detecting PO₄³⁻ in water with the lowest limit of detection. The interfering anions of PO₄³⁻ detection were H₂PO₄⁻ and S₂O₄²⁻. NBC and DCC on hydrogel bead adsorbents were specific for detection of PO₄³⁻ in water but they provided a higher detection limit for PO₄³⁻ than that of the solution based sensor.

ประกาศคุณูปการ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี สิริกุลขจร ประธานที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

กราบขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรและเจ้าหน้าที่ประจำ ห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ได้สนับสนุนในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และเครื่องอำนวยความสะดวกในการ ปฏิบัติงานวิทยานิพนธ์ด้วยดีเสมอมา

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา สำหรับความรัก ความอบอุ่น ความปรารถนา ดี ให้การอบรมสั่งสอนและสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้สามารถผ่าน พ้นอุปสรรคต่างๆ ไปได้ด้วยดี รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่านที่อาจจะไม่ได้เอ่ยนาม

สำหรับคุณค่าและประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดี ทั้งหมด ให้แด่ผู้มีพระคุณ ตลอดจนคณาจารย์จากมหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาท ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า และข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการ วิเคราะห์หาปริมาณไอออนลบในน้ำต่อผู้ที่สนใจบ้าง ไม่น่าก็น้อย

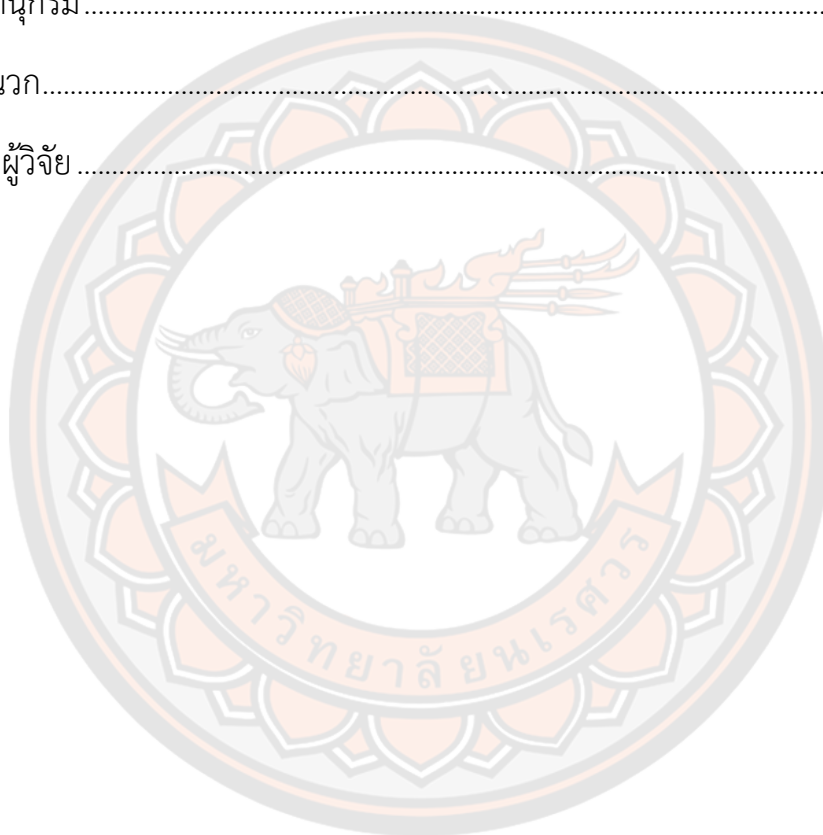
ปรีชยา คร้ามวอน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง	
ประกาศคุุณูปการ.....จ	
สารบัญ.....ฉ	
สารบัญตาราง.....ณ	
สารบัญภาพ.....ฐ	
บทที่ 1 บทนำ.....1	
ความเป็นมาของปัญหา.....1	
จุดมุ่งหมายของการศึกษา.....3	
ขอบเขตของงานวิจัย.....4	
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4	
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....5	
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....5	
1. ไอออนลบ.....5	
2. เซนเซอร์ทางเคมี.....6	
3. สารลดแรงตึงผิว.....7	
4. ไฮโดรเจล.....10	
5. เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....13	
6. เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์.....16	

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
1. อนุพันธ์คาร์บาโซลที่นำมาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอออนลบและไอออนบวก.....	19
2. งานวิจัยที่มีการใช้สารลดแรงตึงผิวกับระบบเซนเซอร์.....	24
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	31
วัสดุอุปกรณ์.....	31
เครื่องมือที่ใช้	32
สารเคมีที่ใช้.....	32
วิธีการทดลอง	35
1. การสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC ที่มีการเติมหมู่ดิงอิลิเกตรอนที่ตำแหน่ง 3, 6-carbazole.....	35
2. ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC).....	37
3. ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	68
ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC)	68
1. เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปสารละลาย	68
2. เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปไฮโดรเจล	79
ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)	89
1. เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปสารละลาย.....	89

2. เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปไฮโดรเจลชนิดพอลิอะคริเลต	
เจลหรือเม็ดเจลสำเร็จรูป	105
บทที่ 5 บทสรุป.....	111
สรุปผลการวิจัย.....	111
ข้อเสนอแนะ	118
บรรณานุกรม	119
ภาคผนวก.....	125
ประวัติผู้วิจัย	131



สารบัญตาราง

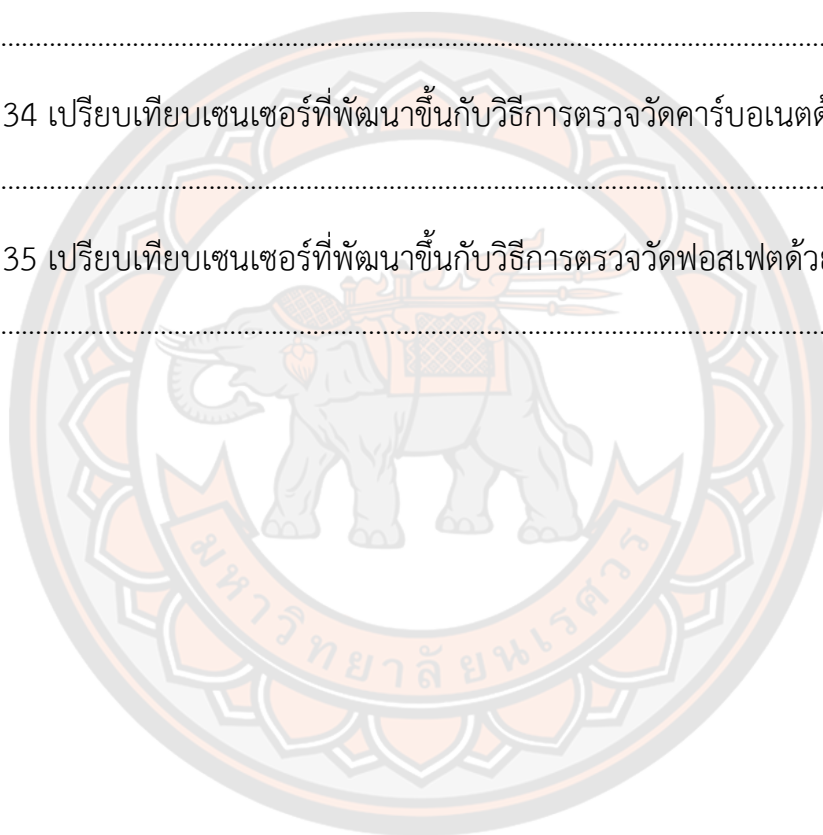
หน้า

ตาราง 1 ค่าคงที่การแตกตัว pK_a ของสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นคู่อกรของไอออนลบชนิดต่างๆ 5	
ตาราง 2 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ NBC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า.....	37
ตาราง 3 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า	39
ตาราง 4 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า	40
ตาราง 5 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า	40
ตาราง 6 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ NBC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....	41
ตาราง 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CN^- ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....	43
ตาราง 8 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....	44
ตาราง 9 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....	44
ตาราง 10 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC จากไอออนลบอื่นด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี.....	46

ตาราง 11 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้.....	47
ตาราง 12 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัด ไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล.....	48
ตาราง 13 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้.....	50
ตาราง 14 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้	51
ตาราง 15 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้	51
ตาราง 16 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัด ไอออนลบ CN^- ของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล.....	53
ตาราง 17 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของไอออนลบที่เหมาะสม ในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light	54
ตาราง 18 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light	55
ตาราง 19 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้ แสง black light	56
ตาราง 20 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light	56

ตาราง 21 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ DCC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์	58
ตาราง 22 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CN^- ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์.....	60
ตาราง 23 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์.....	61
ตาราง 24 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์.....	61
ตาราง 25 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ DCC จากไอออนลบอื่นด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์.....	63
ตาราง 26 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้	65
ตาราง 27 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้.....	65
ตาราง 28 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้.....	66
ตาราง 29 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล	67
ตาราง 30 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ โดย NBC ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)	77

ตาราง 31 สเปกตรัมการคายแสงใหม่ของ DCC ที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมไอออนลบจำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC	101
ตาราง 32 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ โดย DCC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)	103
ตาราง 33 เปรียบเทียบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดไซยาไนด์ด้วยเทคนิคต่างๆ	112
ตาราง 34 เปรียบเทียบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดคาร์บอนेटด้วยเทคนิคต่างๆ	114
ตาราง 35 เปรียบเทียบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดฟอสเฟตด้วยเทคนิคต่างๆ	116



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 โครงสร้างโมเลกุลคาร์บาไซล.....	3
ภาพ 2 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC.....	4
ภาพ 3 การทำงานของเซนเซอร์ทางเคมี.....	6
ภาพ 4 ตัวอย่างหมู่โครโมฟอร์.....	7
ภาพ 5 ตัวอย่างหมู่ฟลูออโรฟอร์.....	7
ภาพ 6 โครงสร้างสารลดแรงตึงผิว.....	8
ภาพ 7 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว.....	9
ภาพ 8 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว.....	10
ภาพ 9 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์.....	11
ภาพ 10 โครงสร้างของอัลจินเตชนิดต่างๆ.....	12
ภาพ 11 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (egg-box model).....	12
ภาพ 12 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic transitions).....	14
ภาพ 13 แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงเดี่ยว.....	15
ภาพ 14 แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงคู่.....	15
ภาพ 15 การเกิดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์.....	18
ภาพ 16 แผนภาพเครื่องฟลูออเรสเซนซ์.....	19
ภาพ 17 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 1-5.....	20
ภาพ 18 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 6 และ 7.....	21
ภาพ 19 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 8.....	22

ภาพ 20 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 9.....	23
ภาพ 21 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 10 และ 11	24
ภาพ 22 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 12-14.....	25
ภาพ 23 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 15	26
ภาพ 24 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 16	27
ภาพ 25 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 17-19.....	28
ภาพ 26 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 20-23.....	30
ภาพ 27 การสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC	35
ภาพ 28 การสังเคราะห์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC).....	35
ภาพ 29 การสังเคราะห์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)	36
ภาพ 30 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CN ⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC).....	68
ภาพ 31 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC).....	69
ภาพ 32 กลไกการหลุดโปรตอน NH-carbazole ของ NBC โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง	70
ภาพ 33 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CN ⁻ ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	70
ภาพ 34 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO ₃ ²⁻ ที่ความเข้มข้นต่างกัน	71

ภาพ 35 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	71
ภาพ 36 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	72
ภาพ 37 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC).....	73
ภาพ 38 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) และตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ	73
ภาพ 39 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC).....	74
ภาพ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	75
ภาพ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	76
ภาพ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	76

ภาพ 43 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบอื่นๆ จำนวน (ก) 1 eq. และ (ข) 2 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}	79
ภาพ 44 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ที่เวลาต่างๆ	80
ภาพ 45 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 15 นาที	81
ภาพ 46 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 15 นาที	82
ภาพ 47 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลภายหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที.....	82
ภาพ 48 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล	83
ภาพ 49 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ที่เวลาต่างๆ	84
ภาพ 50 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 10 นาที	84
ภาพ 51 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 10 นาที.....	85

ภาพ 52 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลภายหลังการ แช่ลงในสารละลาย CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที	86
ภาพ 53 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลภายหลังการ แช่ลงในสารละลาย CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที	86
ภาพ 54 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลภายหลังการ แช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที	87
ภาพ 55 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล จำนวน 1 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}	88
ภาพ 56 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออน ลบ PO_4^{3-} (1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC)	90
ภาพ 57 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออน ลบ PO_4^{3-} (1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC) ภายใต้แสง black light	90
ภาพ 58 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังเติมไอออนลบชนิด ต่างๆ (10 eq. ของจำนวนโมล DCC) ภายใต้แสง black light	91
ภาพ 59 กลไกการหลุดโปรตอนที่ NH-carbazole ของ DCC โดยไอออนลบที่มีความเป็น เบสสูง	91
ภาพ 60 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออน ลบ CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light	92

ภาพ 61 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO ₃ ²⁻ ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light.....	92
ภาพ 62 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO ₄ ³⁻ ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light.....	93
ภาพ 63 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	94
ภาพ 64 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC).....	94
ภาพ 65 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 5.0×10^{-6} M, (ข) 1.0×10^{-5} M, (ค) 5.0×10^{-5} M และ (ง) 1.0×10^{-4} M ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO ₄ ³⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm.....	96
ภาพ 66 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 5.0×10^{-6} M, (ข) 1.0×10^{-5} M, (ค) 5.0×10^{-5} M และ (ง) 1.0×10^{-4} M ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO ₄ ³⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 315 nm.....	97
ภาพ 67 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 5.0×10^{-6} M, (ข) 1.0×10^{-5} M, (ค) 5.0×10^{-5} M และ (ง) 1.0×10^{-4} M ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO ₄ ³⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 350 nm.....	98

ภาพ 68 การเปรียบเทียบค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ ภายหลังการเติม PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC).....	99
ภาพ 69 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (10 eq. ของจำนวนโมล DCC) โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm	100
ภาพ 70 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm	100
ภาพ 71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 392 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	102
ภาพ 72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 387 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ CO_3^{2-} ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	102
ภาพ 73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M).....	103
ภาพ 74 ผลของไอออนลบรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}).....	105
ภาพ 75 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับฟอโตอะครีเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ที่เวลาต่างๆ ภายใต้แสง black light.....	106

ภาพ 76 การเรืองแสงของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC) เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light	107
ภาพ 77 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light.....	108
ภาพ 78 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังจากแช่ลงในสารละลาย CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light	108
ภาพ 79 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังจากแช่ลงในสารละลาย CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light	109
ภาพ 80 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังจากแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light	109
ภาพ 81 ผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล	110
ภาพ 82 ผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-}) ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)	126
ภาพ 83 ผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CN^-)	126

ภาพ 84 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล CN^-)	127
ภาพ 85 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CO_3^{2-})	127
ภาพ 86 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล CO_3^{2-})	128
ภาพ 87 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-})	128
ภาพ 88 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-})	129
ภาพ 89 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- (1 eq. ของจำนวนโมล CN^-) ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light	129
ภาพ 90 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} (1 eq. ของจำนวนโมล CO_3^{2-}) ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light	130
ภาพ 91 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-}) 1 ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H ₂ O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light	130

บทที่ 1

บทนำ

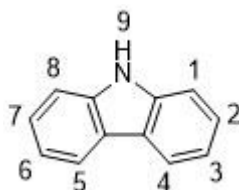
ความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันไอออนลบมีบทบาทและหน้าที่ที่สำคัญหลายด้านต่อมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ไอออนลบเข้าไปเกี่ยวข้องกับระบบต่างๆ เช่น ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต ในยารักษาโรค และในสิ่งแวดล้อม (Gale, Garcia-Garrido, & Garric, 2008; Rezaeian & Khanmohammadi, 2014; Tavallali, Deilamy Rad, Parhami, & Abbasiyan, 2012) คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) มักพบอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการสะสมของกระดูกสัตว์ เปลือกหอย สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก หรือนำมาบริโภคเป็นอาหาร เพื่อเสริมสร้างกระดูกและป้องกันโรคกระดูกพรุน และนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของดิน และน้ำ รวมถึงการปรับความเป็นกรดต่างและการฆ่าเชื้อโรคในทางการเกษตร (Carr & Frederick, 2014) ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตร เป็นส่วนประกอบสำคัญในการทำปุ๋ย และยังนิยมนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ การผลิตนม อาหารแช่แข็ง และเบเกอรี่ แต่ถ้ามีปริมาณการปนเปื้อนของฟอสเฟตในแหล่งน้ำมาก จะส่งผลทำให้น้ำเกิดการเน่าเสีย (Iheagwara, Ing, Kjellstrand, & Lew, 2013; Schluepmann, Berke, & Sanchez-Perez, 2012) โซยาไนต์ไอออน (CN^-) นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การชุบโลหะ การทำเหมืองแร่ทองคำ การผลิตสารอินทรีย์และพอลิเมอร์ (Lambert, 2016; Ma & Dasgupta, 2010) โซยาไนต์มีความเป็นพิษที่รุนแรงต่อสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเซลล์โดยยับยั้ง cytochrome-oxidase ซึ่งเป็นเอนไซม์ในการขนส่งอิเล็กตรอน การหายใจบกพร่องทำให้หายใจไม่ออกและเซลล์ตาย นอกจากนี้การได้รับโซยาไนต์อาจส่งผลเสียต่อระบบประสาท หลอดเลือดและระบบต่อมไร้ท่อของมนุษย์ (Correia et al., 2012; Lambert, 2016; Nunn, Lyddiard, & Christopher Perera, 2011; Simeonova & Fishbein, 2004) โซยาไนต์มักพบในผัก ผลไม้ และน้ำ ซึ่งสิ่งมีชีวิตสามารถรับโซยาไนต์ผ่านทาง การสัมผัส สูดดมหรือรับประทาน องค์การอนามัยโลกจึงได้กำหนดค่าปริมาณโซยาไนต์ในน้ำที่สามารถยอมรับได้ที่ความเข้มข้น $1.9 \mu\text{M}$ (Organization, 2004) จะเห็นได้ว่าไอออนลบต่างๆ ที่ถูกปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม

จากตัวอย่างที่ได้กล่าวไปจะเห็นว่าไอออนลบมีทั้งประโยชน์และโทษ การตรวจวัดหาปริมาณไอออนลบในสิ่งแวดล้อมจึงมีความจำเป็น เพื่อควบคุมปริมาณการปนเปื้อน งานวิจัยนี้จึงสนใจการนำเอาโมเลกุลเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเรืองแสงได้มาใช้เป็นตัวตรวจวัดไอออนลบ เทคนิคนี้มีข้อดี คือ

ง่าย สะดวก รวดเร็ว ใช้สารตัวอย่างเพียงเล็กน้อย มีสภาพไวสูง ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือราคาแพงในการวิเคราะห์ และสังเกตได้ง่ายจากการเปลี่ยนแปลงสีและการเรืองแสง (Bissell et al., 1992) ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา กลุ่มวิจัยต่างๆ นิยมนำสารอินทรีย์ที่เป็นสารกลุ่มสีย้อมมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเรืองแสงได้ ตัวอย่างของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้ที่นิยมนำมาใช้ เช่น แอนทราซีน อิมิดาโซล (Goswami & Chakrabarty, 2011; Gross, Mikkilineni, Lynch, & Sessler, 2010) ส่วนเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้ที่นิยมนำมาใช้ เช่น แนนพทาซีน และไพรีน (Bhosale, Bhosale, Kalyankar, & Langford, 2009; Zhou et al., 2011) นอกจากนี้ หนึ่งในสีย้อมที่น่าสนใจคือคาร์บาโซล (Christopher Leslee, Karuppannan, Vengaiyan, Gandhi, & Subramanian, 2017; Konidena & Thomas, 2014; Vetrichelvan, Nagarajan, & Valiyaveetil, 2006; Vintu, Unnikrishnan, Shiju, & Chandrasekharan, 2019; Wang et al., 2016) (ภาพ 1) กลุ่มวิจัยหลายกลุ่มได้ทำการออกแบบอนุพันธ์ของคาร์บาโซลและนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอออนลบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของคาร์บาโซลคือ มีโครงสร้างที่แข็งแรง มีเสถียรภาพทางความร้อน ง่ายต่อการแทนที่ที่ตำแหน่ง 1, 3, 6, 8 และ NH และมีคุณสมบัติทางแสงที่น่าสนใจ (Adhikari, Neckers, & Shah, 2009; Vetrichelvan et al., 2006; Zhang et al., 2018) แต่ข้อด้อยที่พบคือ อนุพันธ์ของคาร์บาโซลไม่ละลายน้ำ ในการแก้ไขปัญหาเรื่องการละลาย นักวิจัยหลายกลุ่มได้มีการนำสารลดแรงตึงผิวเข้าไปใช้ผสมกับสารละลายของเซนเซอร์ เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของเซนเซอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ทำให้สามารถใช้ตรวจวัดไอออนลบในน้ำได้ (Jamkratoke et al., 2011; Kumari, Jha, & Bhattacharya, 2014; Nicoletti et al., 2015; Promchat, Rashatasakhon, & Sukwattanasinitt, 2017; Schramm et al., 2017)

งานวิจัยนี้มีความสนใจในการนำเอาอนุพันธ์คาร์บาโซลมาใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอออนลบโดยศึกษาในระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว อนุพันธ์คาร์บาโซลที่นำมาใช้สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย เตรียมได้จากปฏิกิริยาการแทนที่เข้าไปบนวงเบนซีนของคาร์บาโซลที่ตำแหน่ง 3 และ 6 หมู่แทนที่ทั้งสองเลือกใช้เป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน ซึ่งจะช่วยให้ตำแหน่ง NH บนวงห้าเหลี่ยมของคาร์บาโซลมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นและสามารถถูกไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูงดึงหลุดออกได้ง่าย กลไกการเปลี่ยนแปลงสีและการเรืองแสงของอนุพันธ์คาร์บาโซลจะเกิดจากการที่อนุพันธ์ของคาร์บาโซลเปลี่ยนรูปไปเป็นโครงสร้างที่หลุดโปรตอน (deprotonated form) ดังนั้นจึงสามารถนำอนุพันธ์เหล่านี้มาใช้เป็นโมเลกุลเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้และเรืองแสงได้สำหรับตรวจวัดไอออนลบที่เป็นเบสสูง เช่น ไฮยาไนด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟต



ภาพ 1 โครงสร้างโมเลกุลคาร์บาโซล

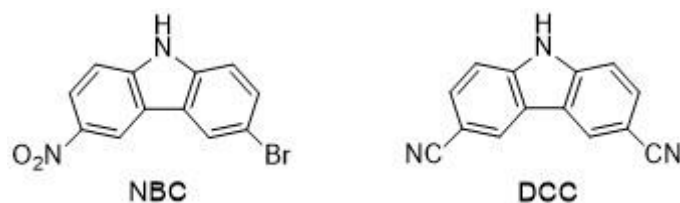
งานวิจัยก่อนหน้านี้ในกลุ่มวิจัย มีการศึกษาสารละลายของอนุพันธ์ของคาร์บาโซล 2 ชนิดคือ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) และ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) โครงสร้างแสดงดังภาพ 2 ในระบบตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น Dimethyl sulfoxide (DMSO), Acetone, Acetonitrile (MeCN) และ Methanol (MeOH) พบว่าสารละลาย NBC สามารถตรวจวัดไอออนลบ CN^- , F^- และ AcO^- ได้ ซึ่งเกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีแดง ส่วนการตรวจวัดไอออนลบ H_2PO_4^- และ BzO^- พบการเปลี่ยนสีสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีส้ม ส่วนสารละลาย DCC ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าเมื่อตรวจวัดไอออนลบ แต่สามารถเกิดการเรืองแสงสีฟ้าภายใต้แสง black light เมื่อตรวจวัดไอออนลบ CN^- , AcO^- , F^- , H_2PO_4^- , BzO^- และ Cl^- และเนื่องจากในระบบตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดเดียวยังไม่สามารถให้ความจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ จึงทำการศึกษาในระบบตัวทำละลายผสมที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ เช่น DMSO:H₂O (90:10, 80:20, 70:30) และ MeCN:H₂O (95:5, 90:10, 80:20) ผลการศึกษาพบว่า NBC และ DCC มีความสามารถในการเลือกจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- เพียงชนิดเดียว โดย NBC เกิดการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นสีแดง และ DCC เกิดการเรืองแสงสีฟ้าภายใต้แสง black light ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ NBC และ DCC ในการนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดไอออนลบในระบบน้ำได้ แต่พบปัญหาว่า หากมีการใช้ตัวทำละลายที่มีสัดส่วนปริมาณน้ำที่สูง จะทำให้กลไกการเปลี่ยนแปลงสีของเซนเซอร์ถูกระงับและอนุพันธ์จากคาร์บาโซลทั้งสองที่ใช้เป็นเซนเซอร์ไม่ละลายน้ำ

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

เพื่อศึกษาการนำอนุพันธ์คาร์บาโซลมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเรืองแสงได้ทั้งที่อยู่ในรูปสารละลายและเตรียมบนตัวดูดซับไฮโดรเจลสำหรับนำไปใช้ตรวจวัดไอออนลบในน้ำได้อย่างจำเพาะเจาะจง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์อนุพันธ์ของคาร์บาโซล 2 ชนิดคือ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) สำหรับใช้เป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้ และ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) สำหรับใช้เป็นเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้ โครงสร้างแสดงดังภาพ 2



ภาพ 2 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC

2. ตัวทำละลายที่ใช้คือ MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M
3. ไอออนลบที่ใช้ในการทำวิจัยอยู่ในรูปเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมประกอบไปด้วย CN⁻, AcO⁻, F⁻, H₂PO₄⁻, BzO⁻, NO₃⁻, Cl⁻, I⁻, SCN⁻, NO₂⁻, CO₃²⁻, SO₃²⁻, SO₄²⁻, S₂O₄²⁻, HPO₄²⁻ และ PO₄³⁻
4. เทคนิคที่ใช้ในการทำวิจัยประกอบไปด้วย เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่า การสังเกตการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ภายใต้แสง black light เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี และเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์
5. รูปแบบของระบบเซนเซอร์จะทำการศึกษา 2 รูปแบบคือ ระบบสารละลาย และการดูดซับบนตัวดูดซับไฮโดรเจล โดยเลือกใช้ไฮโดรเจล 2 ชนิดคือ พอลิอะคริเลตเจลหรือเจลสำเร็จรูปและอัลจินเตตเจล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอนุพันธ์คาร์บาโซลในการใช้เป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีและเรืองแสงได้ทั้งในรูปแบบสารละลายและตัวดูดซับไฮโดรเจลสำหรับตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ คาร์บอเนต และฟอสเฟตในน้ำได้อย่างจำเพาะเจาะจง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. ไอออนลบ

ไอออนลบ คือ อะตอมที่มีประจุทางไฟฟ้าเป็นลบภายหลังทำหน้าที่ในการรับอิเล็กตรอน เช่น CN^- , F^- , AcO^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-} เป็นต้น ไอออนลบมีคุณสมบัติความเป็นเบสเนื่องจากสามารถรับโปรตอนจากสารอื่นได้ ไอออนลบแต่ละชนิดจะมีความเป็นเบสที่ไม่เท่ากัน

ตาราง 1 ค่าคงที่การแตกตัว pK_a ของสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นคู่กรดของไอออนลบชนิดต่างๆ

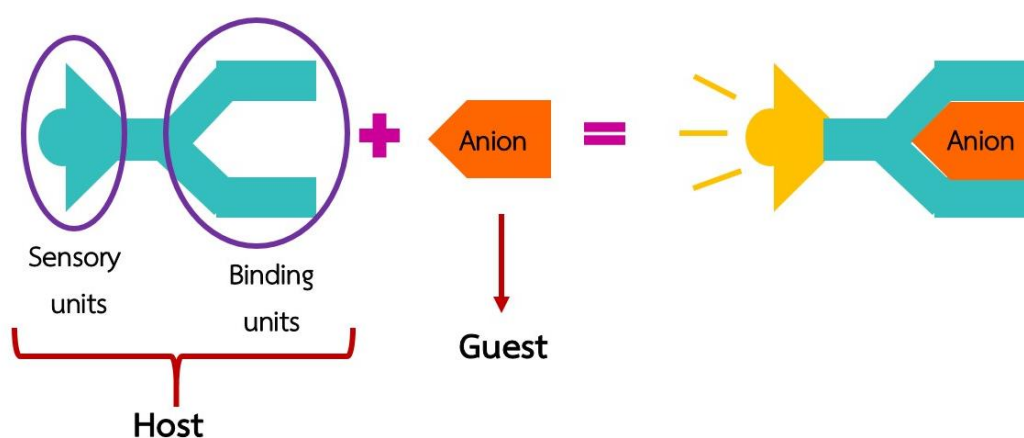
Substrate	pK_a		Substrate	pK_a	
	H_2O	(DMSO)		H_2O	(DMSO)
H_2O	15.7	(32)	H_2SO_3	1.9, 7.21	
H_3O^+	-1.7		H_2SO_4	-3.0, 1.99	
H_2S	7.00		HNO_3	-1.3	
HBr	-9.00	(0.9)	HNO_2	3.29	
HCl	-8.0	(1.8)	HOOH	11.6	
HF	3.17	(15)	H_2CrO_4	-0.98, 6.50	
HOCl	7.5		$\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$	-2.6	(1.6)
HClO_4	-10		$\text{CF}_3\text{SO}_3\text{H}$	-14	(0.3)
HCN	9.4	(12.9)	NH_4Cl	9.24	
H_3PO_4	2.12		HSCN	4.00	
H_2PO_4^-	7.21		H_2CO_3	6.37	
HPO_4^{2-}	12.32		HCO_3^-	10.32	

ที่มา : (Compiled from Appendix 5 Chem 1A; Ripin & Evans, 2005)

ค่า pK_a ของสารอนินทรีย์ในตาราง 1 สามารถสรุปลำดับความเป็นเบสของไอออนลบในน้ำซึ่งเป็นคู่เบสกับสารในตารางได้ดังนี้ $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^-$

2. เซนเซอร์ทางเคมี

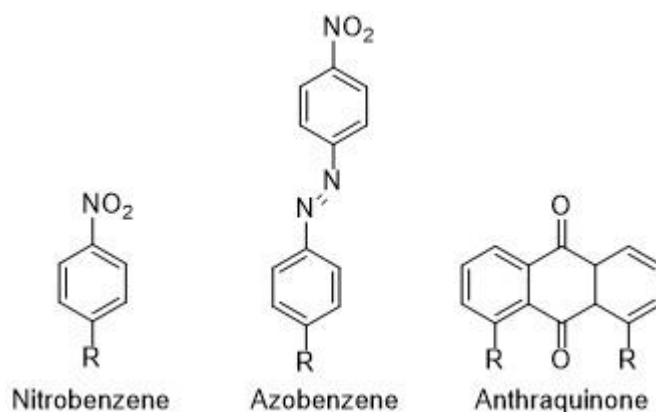
เซนเซอร์ทางเคมี (chemical sensor) (Banica, 2012; จอมใจ สุกใส, 2552) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดที่แปลงข้อมูลทางเคมีเป็นสัญญาณที่วัดได้ เซนเซอร์ทางเคมีประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับ (binding units) เป็นตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของเกสต์ และต้องมีความจำเพาะเจาะจงกับโมเลกุลของเกสต์ และอีกส่วนทำหน้าที่เป็นตัวให้สัญญาณ (sensory unit) เมื่อโมเลกุลของเกสต์เกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของโฮสต์ ทำให้หน่วยให้สัญญาณแปลงเป็นสัญญาณที่สังเกตเห็นได้ง่าย (ภาพ 3) เช่น การเปลี่ยนแปลงสีหรือการเรืองแสง ปัจจุบันเซนเซอร์ทางเคมีได้ถูกนำมาศึกษาและพัฒนาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เซนเซอร์ทางเคมีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามชนิดของหน่วยให้สัญญาณ คือ โครโมจีนิคเซนเซอร์ (chromogenic sensor) ฟลูออโรจีนิคเซนเซอร์ (fluorogenic sensor) และเซนเซอร์ทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical sensor) ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาโมเลกุลเซนเซอร์ชนิดโครโมจีนิคเซนเซอร์และฟลูออโรจีนิคเซนเซอร์ ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่ได้รับความนิยมสูงสำหรับการตรวจวัดประจวบเนื่องจากใช้งานง่ายและมีความไวในการตรวจวัดสูง



ภาพ 3 การทำงานของเซนเซอร์ทางเคมี

2.1 โครโมจีนิคเซนเซอร์ (chromogenic sensor/colorimetric sensor)

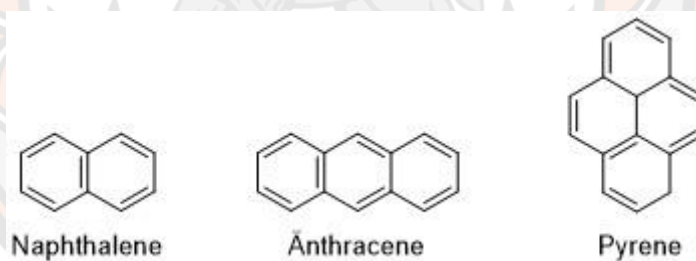
โครโมจีนิคเซนเซอร์ คือ โมเลกุลเซนเซอร์ที่มีหมู่โครโมฟอร์เป็นหน่วยให้สัญญาณ (ภาพ 4) จึงสามารถติดตามอันตรกิริยาระหว่างเซนเซอร์และเกสต์ได้จากการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยตาเปล่า (naked-eye sensor) ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตรวจวัดที่มีราคาแพง



ภาพ 4 ตัวอย่างหมู่โครโมฟอร์

2.2 ฟลูออโรจีนิกเซนเซอร์ (Fluorogenic sensor)

ฟลูออโรจีนิกเซนเซอร์ คือ โมเลกุลเซนเซอร์ที่มีหมู่ฟลูออโรฟอร์เป็นหน่วยให้สัญญาณ (ภาพ 5) จึงสามารถติดตามอันตรกิริยาระหว่างเซนเซอร์และเกสต์ได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณฟลูออเรสเซนส์



ภาพ 5 ตัวอย่างหมู่ฟลูออโรฟอร์

3. สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surface active agent, Surfactant) (Nakama, 2017; Rosen, 2004; Scamehorn, Schechter, & Wade, 1982) เป็นสารที่เมื่อละลายน้ำแล้วจะช่วยลดแรงตึงผิวของน้ำ มีโครงสร้างทางเคมีแบบ amphiphilic คือมีหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันสองกลุ่มภายในโมเลกุลเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Hydrophilic และ Hydrophobic (ภาพ 6) ทำให้สารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าไปเชื่อมระหว่างสองเฟสที่แตกต่างกันให้เข้ากันได้

Hydrophilic เป็นส่วนที่มีขั้ว มีคุณสมบัติชอบน้ำ สามารถละลายได้ดีในน้ำ อาจมีประจุหรือไม่มีประจุก็ได้ เช่น กรดคาร์บอกซิลิก ฟอสเฟต หรือแอลกอฮอล์

Hydrophobic เป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือ มีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก



ภาพ 6 โครงสร้างสารลดแรงตึงผิว

3.1 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

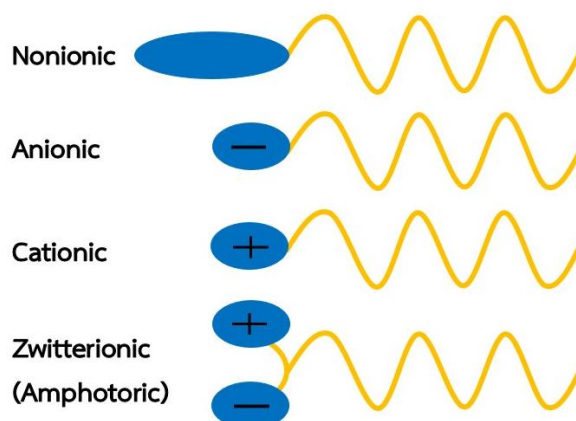
สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วน Hydrophilic ได้ 4 ประเภท (ภาพ 7) ได้แก่

3.1.1 Nonionic surfactant คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนของ Hydrophilic เป็นส่วนที่ไม่มีประจุ โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้อาจมีสารประกอบชนิดซิมิโพลาร์ (Semi-polar) รวมอยู่ด้วย ข้อดีคือสามารถเข้ากันได้กับสารอื่นๆ ประเภทของการลดแรงตึงผิว

3.1.2 Anionic surfactant คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนของ Hydrophilic แสดงประจุเป็นลบ โดยส่วนมากมักอยู่ในรูปคาร์บอกซิเลต ซัลเฟต หรือฟอสเฟต

3.1.3 Cationic surfactant คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนของ Hydrophilic แสดงประจุเป็นบวก ส่วนมากมักจะเป็นพวก Quaternary ammonium

3.1.4 Zwitterionic /Amphoteric surfactant คือ สารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนของ Hydrophilic แสดงประจุทั้งบวกและลบ โดยจะแสดงคุณสมบัติประเภทใดขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดต่างของสภาวะแวดล้อม ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นด่างประจุบน Hydrophilic จะแสดงประจุลบ แต่ถ้าสภาวะแวดล้อมเป็นกรดประจุบน Hydrophilic จะแสดงประจุบวก และในสภาวะที่เป็นกลางจะไม่เกิดการให้ประจุไฟฟ้า



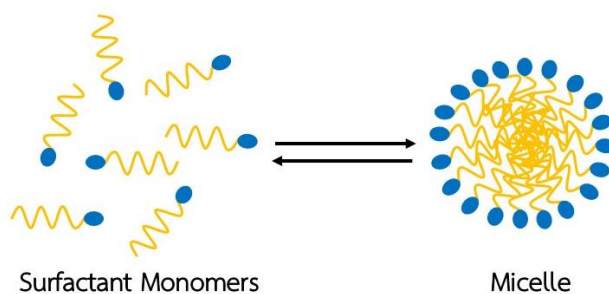
ภาพ 7 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

3.2 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว

ณ จุดที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวต่ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวบนพื้นผิวน้ำ โดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วทอดขนานกับผิวน้ำ เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นโมเลกุลจะเรียงตัวตั้งตรงโดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาอากาศทำให้เปลี่ยนจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวน้ำ-อากาศ เป็นแรงกระทำระหว่างพื้นผิวไฮโดรคาร์บอน-อากาศ ทำให้แรงตึงผิวของน้ำลดลงเนื่องจากแรงตึงผิวของไฮโดรคาร์บอนจะต่ำกว่าแรงตึงผิวของน้ำ ส่วนพื้นผิวของน้ำและน้ำมัน โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวโดยหันส่วนที่มีขั้วเข้าหาน้ำและหันส่วนที่ไม่มีขั้วเข้าหาน้ำมัน

เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตหรือ critical micelle concentration (CMC) โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดการเกาะเกี่ยวกันและรวมตัวกันเป็นกลุ่มเรียกว่า ไมเซลล์ (micelle) ซึ่งมีรูปร่างหลายลักษณะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น โครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว ชนิดของสารละลายที่สารลดแรงตึงผิวกระจายตัวอยู่ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น การเกิดไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวแสดงดังภาพ 8

ความเข้มข้นวิกฤต หรือ critical micelle concentration (CMC) คือ ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่สารลดแรงตึงผิวสามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ได้



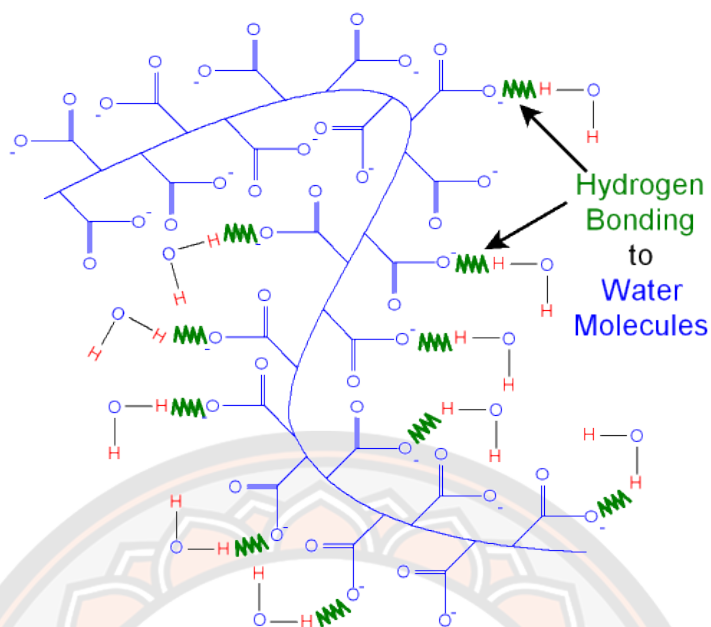
ภาพ 8 การจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิว

4. ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (Anisha, Pramod, Vipin, & Garima, 2010; วารุณี ตานันต์ & สายันต์ แสงสุวรรณ, 2557) เป็นพอลิเมอร์ชนิดที่ชอบน้ำ โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ $-OH$, $-COOH$, $-CONH-$, NH_2 และ $-SOH$ เป็นต้น โดยระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์จะมีการเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในสายโซ่ และเมื่อโมเลกุลมีการรวมตัวกัน และหดตัวอยู่จะทำให้โครงสร้างโดยรวมเกิดเป็นรูพรุนและร่องขนาดเล็กจำนวนมาก จึงทำให้ไฮโดรเจลมีคุณสมบัติที่ดีในการดูดซับน้ำ

4.1 เม็ดเจลสำเร็จรูป (Polyacrylate gel)

Polyacrylate gel (ธัญญภรณ์ ศรีสุบิน, 2557) คือ sodium polyacrylate เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O และ Na เมื่อนำเม็ดเจลไปแช่ลงในน้ำ Na จะแตกตัวละลายในน้ำกลายเป็น Na^+ และจะเหลือ carboxyl ion ($-COO^-$) ซึ่งมีประจุเป็นลบ เนื่องจาก carboxyl ion มีประจุลบทั้งพอลิเมอร์จึงเกิดแรงผลักระหว่างสายโซ่และดันให้สายโซ่ที่เกี่ยวข้องพันกันอยู่แยกออกจากกัน จากนั้นอะตอมไฮโดรเจนในโมเลกุลของน้ำซึ่งมีความเป็นประจุบวกอ่อนๆ จะสร้างพันธะไฮโดรเจนกับอะตอมที่มีประจุลบในสายโซ่พอลิเมอร์ (ภาพ 9) ทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำเข้าสู่เม็ดเจล เม็ดเจลจึงพองตัวและยืดหยุ่นขึ้น แต่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่าย จึงทำให้เม็ดเจลมีความแข็งแรง เมื่อเม็ดเจลมีการสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัวกลับคืนสู่สภาพเดิมและสามารถดูดซับน้ำได้อีก แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำจะลดลง

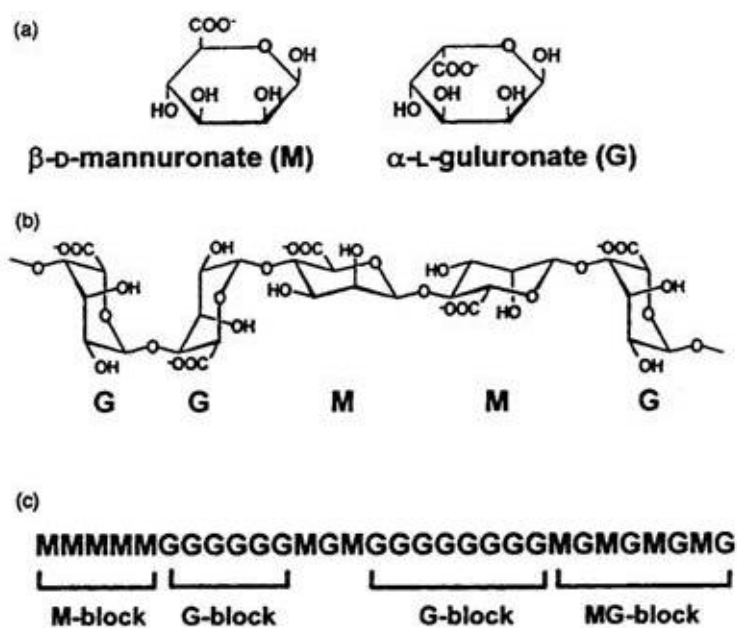


ภาพ 9 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์

ที่มา: (Norman)

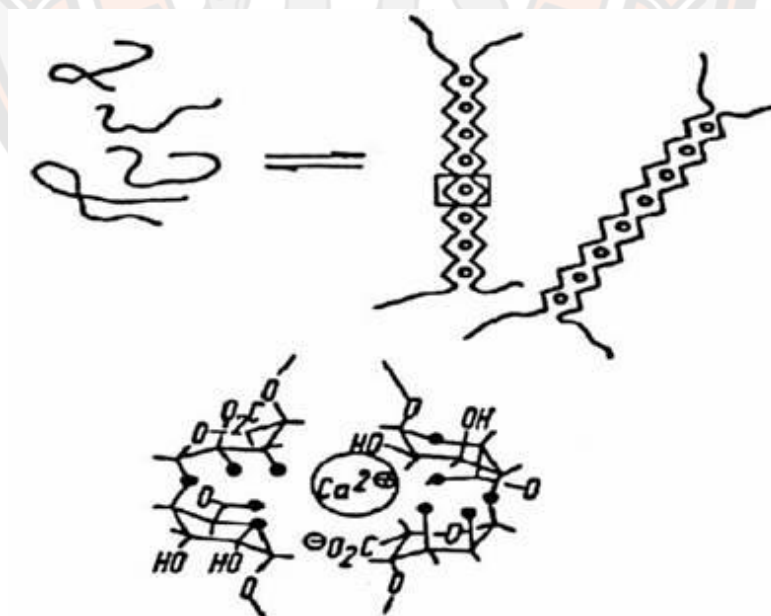
4.2 อัลจิเนตเจล (Alginate gel)

อัลจิเนต (alginate) (พิชญภา ราชธรรมมา & อังศุรา พูลเกษม) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ที่เป็นเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของอนุพันธ์ของน้ำตาล อัลจิเนตสกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปสารประกอบของเกลือโซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียม ของกรดอัลจินิก (alginic acid) ซึ่งละลายน้ำได้และสามารถทำให้เกิดเจลหรือเป็นสารก่อเจล (gelling agent) เจลที่ได้จะทนต่อความร้อนหรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับความร้อน อัลจิเนตเป็น unbranched binary copolymer ของ 1,4-b-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks อัลจิเนตบางชนิดเท่านั้นที่มีคุณสมบัติเป็นเจลและจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายพอลิเมอร์ คุณสมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือทำให้เกิดเจลชนิดที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible gel) ในน้ำเย็นเมื่อมี Ca^{2+} รวมอยู่ด้วย ซึ่งคุณสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้อัลจิเนตแตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง



ภาพ 10 โครงสร้างของอัลจิเนตชนิดต่างๆ

ที่มา: (พิชญภา ราชธรรมมา & อังค์วรา พูลเกษม)



ภาพ 11 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (egg-box model)

ที่มา: (พิชญภา ราชธรรมมา & อังค์วรา พูลเกษม)

4.2.1 การขึ้นรูปอัลจินเตเจล

การนำโซเดียมอัลจินเตผสมโดยตรงกับของเหลวที่จะนำมาขึ้นรูป แล้วค่อยๆ นำของเหลวผสมหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เมื่อโซเดียมอัลจินเตสัมผัสกับแคลเซียมจะกลายเป็นเม็ดเจล

5. เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Settle, 1997; Skoog, Holler, & Crouch, 2007; เย็นหทัย แนนหนา, 2549; แม้น อมรสิทธิ์, 2552) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สารโดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วง Ultra violet (UV) และ Visible (VIS) ความยาวคลื่นประมาณ 200-800 nm ของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนหรือสารอนินทรีย์ทั้งที่มีสีและไม่มีสี สารแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนแสงก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารนั้น สมบัติดังกล่าวได้นำมาใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ทั้งในเชิงปริมาณ และเชิงคุณภาพ ซึ่งเทคนิคนี้ให้ความเที่ยงและแม่นยำ และมีสภาพไวสูง ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะออกมาในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่น (wavelength) ซึ่งเรียกว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสง

5.1 หลักการ

เมื่อแสงในช่วง UV-Vis เข้าสู่โมเลกุลของสาร ส่วนหนึ่งของแสงจะถูกดูดกลืนไว้ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic transitions) ซึ่งจะขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงกว่าเดิม อิเล็กตรอนเหล่านี้อาจเป็นอิเล็กตรอนวงนอกหรืออิเล็กตรอนที่เกิดพันธะหรืออิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ ซึ่งแต่ละชนิดจะใช้พลังงานแตกต่างกัน

อิเล็กตรอนในออร์บิทัลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state orbitals) มี 3 รูปแบบ คือ

1. อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะซิกมา (σ) เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 1e ต่อ 1e
2. อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะไพ (π) เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2e ต่อ 2e
3. อิเล็กตรอนที่ไม่ได้สร้างพันธะ หรืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (n)

สำหรับ antibonding orbitals ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรือเกิดแทรนซิชันมี 2 ชนิด คือ σ^* และ π^*

5.2 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่สำคัญสามารถเกิดได้ 4 ชนิด (ภาพ 12)

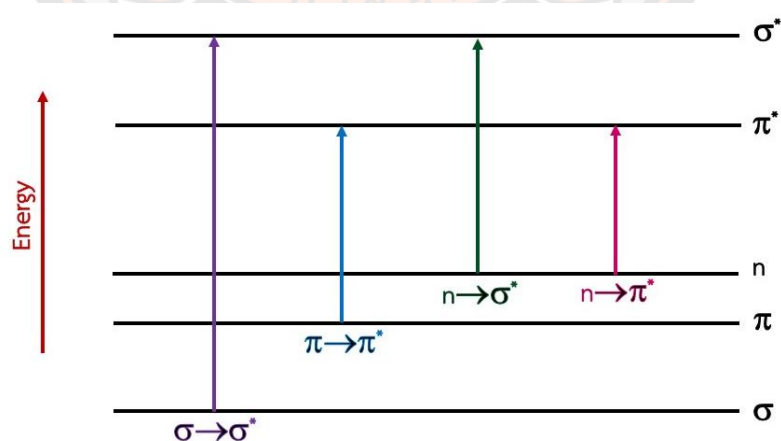
5.2.1 การเปลี่ยนระดับพลังงาน $\sigma \rightarrow \sigma^*$ เกิดจากอิเล็กตรอนใน σ ออร์บิทัลได้รับพลังงานแล้วขึ้นไปอยู่ในออร์บิทัลที่เป็น σ^* ใช้พลังงานมากที่สุดใน 4 ชนิด เนื่องจากออร์บิทัลของพันธะ σ มีการซ้อนกันมาก จึงมีความแข็งแรงมาก พลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจึงมากตามไปด้วย

5.2.2 การเปลี่ยนระดับพลังงาน $n \rightarrow \sigma^*$ เกิดจากอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของ O, N และ S เป็นต้น ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ชนิดอิมตัว เมื่อได้รับพลังงานแล้วจะเคลื่อนที่ไปยังออร์บิทัล σ^*

5.2.3 การเปลี่ยนระดับพลังงาน $n \rightarrow \pi^*$ เกิดจากอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวได้รับพลังงานแล้วขึ้นไปอยู่ที่ π^* ออร์บิทัล พบในสารประกอบที่มีพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับอะตอมอื่น เช่น C=S, C=N และ C=O

5.2.4 การเปลี่ยนระดับพลังงาน $\pi \rightarrow \pi^*$ พบในสารประกอบที่มีพันธะคู่ พันธะสาม หรืออะโรมาติกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ใน π ออร์บิทัล เมื่อสารได้รับพลังงานจากแสง UV อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนไปอยู่ที่ π^* ออร์บิทัล

การเปลี่ยนระดับพลังงานแบบ $\sigma \rightarrow \sigma^*$ และ $\pi \rightarrow \pi^*$ ของพันธะคู่ที่ไม่มี conjugation มีประโยชน์น้อย และเนื่องจากเกิดในช่วง near UV (ความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm) ซึ่งเป็นช่วงที่ N_2 , O_2 และ CO_2 ในบรรยากาศสามารถดูดกลืนแสงได้ การวัดสเปกตรัมจึงต้องทำในสถานะสุญญากาศ ซึ่งมีความยุ่งยากและไม่สะดวก



ภาพ 12 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic transitions)

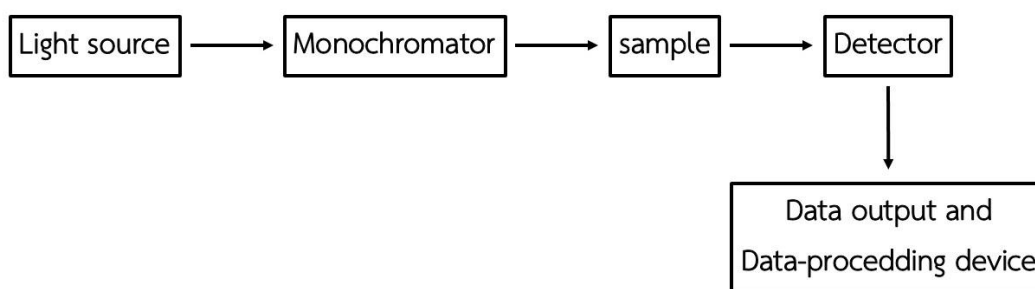
5.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

5.3.1 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงเดี่ยว (Single-Beam spectrophotometer)

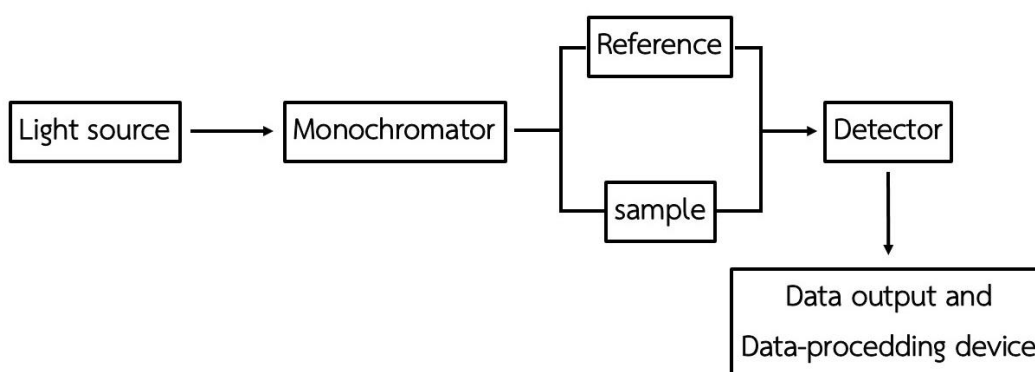
(ภาพ 13) เมื่อลำแสงออกจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านสารตัวอย่าง การวัดจะถูกนำมาเป็นความเข้มของแสงก่อนและหลังแสงผ่านตัวอย่าง แล้วจึงเข้าสู่อุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ ซึ่งเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงเดี่ยว มีขนาดกะทัดรัดและเรียบง่ายกว่าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงคู่

5.3.2 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงคู่ (Double-Beam Spectrophotometer)

(ภาพ 14) ลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผ่านไปยังสารอ้างอิงและอีกส่วนผ่านไปยังสารตัวอย่าง และลำแสงทั้งสองนี้จะไปตกกระทบอุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณ ความแตกต่างของความเข้มจะกลายเป็นสัญญาณส่งต่อไปยังอุปกรณ์บันทึกสัญญาณต่อไป



ภาพ 13 แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงเดี่ยว



ภาพ 14 แผนภาพของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมลำแสงคู่

6. เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

การเปล่งแสง (Settle, 1997; Skoog et al., 2007; แม้น อมรสิทธิ์, 2552) มีด้วยกันหลายชนิดขึ้นอยู่กับพลังงานที่ทำให้โมเลกุลไปอยู่ที่สภาวะกระตุ้น (excited state) โมเลกุลที่เกิดอันตรกิริยากับโฟตอนของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิด luminescent molecules เรียกว่า photoluminescence ซึ่งแยกออกเป็น การวาวแสง (fluorescence) และการเรืองแสง (phosphorescence) ทั้งสองปรากฏการณ์นี้แตกต่างกันที่กระบวนการกลับมาสู่สภาวะพื้นใหม่ ถ้าโมเลกุลของสารได้รับพลังงานจากปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า chemical luminescence หรือ chemiluminescence ถ้าโมเลกุลได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มีพลังงานสูงไปเป็นโมเลกุลที่สภาวะกระตุ้น เรียกว่า radioluminescence นอกจากนี้ยังมี bioluminescence หรือ thermoluminescence เป็นต้น ซึ่ง photoluminescence ได้รับความนิยมในการใช้งานวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค photoluminescence เป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีสภาพไวสูงและให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ต่ำกว่า 1-3 เท่าตัว เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสง อีกทั้งยังมีความจำเพาะ เทคนิคนี้มีการใช้งานน้อยกว่าเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี เนื่องจากสารที่สามารถเกิดฟลูออเรสเซนซ์มีจำนวนจำกัดและน้อย

6.1 หลักการ

Photoluminescence สามารถเกิดขึ้นได้กับสารที่เป็นของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส เมื่อสารถูกกระตุ้นไปสู่สภาวะกระตุ้นซึ่งไม่เสถียร และลดพลังงานโดยการกลับสู่สภาวะพื้นโดยการคายแสงออกมา ซึ่งการคายแสงแบบ fluorescence จะไม่มีการเปลี่ยนสปินของอิเล็กตรอน ดังนั้นการคายแสงที่เกิดจากการ fluorescence จึงเกิดในระยะเวลาที่สั้นและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การคายแสงแบบ phosphorescence จะมีการเปลี่ยนสปินของอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ทำให้การคายแสงเกิดขึ้นช้าและนานกว่าแบบ fluorescence โดยทั่วไปปรากฏการณ์ photoluminescence ทั้ง fluorescence และ phosphorescence จะให้ความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นแสงที่ใช้ในการกระตุ้น

ระดับชั้นพลังงานของโมเลกุลที่เกิด photoluminescence แสดงดังภาพ 15 ซึ่งระดับชั้นพลังงานต่ำสุดเส้นทึบเป็นระดับพลังงานในสภาวะพื้น แสดงเป็น S_0

ระดับพลังงานชั้นบนสุดเส้นทึบเป็นระดับพลังงานในสภาวะกระตุ้นแบบ singlet แสดงเป็น S_1 และ S_2 ส่วนระดับชั้นพลังงานด้านขวามือเป็น excited triplet state แสดงเป็น T_1 โดยทั่วไประดับพลังงานของ T_1 ในสภาวะกระตุ้นจะต่ำกว่า singlet state ในสภาวะกระตุ้นด้วยกัน

ระดับพลังงานที่เกิดจากการสั่น (vibrational energy levels) ของ S_0 , S_1 , S_2 และ T_1 แสดงโดยเส้นบางซึ่งมีหลายระดับพลังงานต่างกัน

โมเลกุลดูดกลืนแสงได้สองช่วงความยาวคลื่น ช่วงแรกที่มีความยาวคลื่น λ_1 เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $S_0 \rightarrow S_1$ ช่วงสองที่มีความยาวคลื่น λ_2 เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจาก $S_0 \rightarrow S_2$ กระบวนการนี้เรียกว่า การกระตุ้น โมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นจะกลับสู่สถานะพื้นโดยกระบวนการต่างๆ ได้หลายแบบ การคายโฟตอนสามารถเกิดแบบ fluorescence และ phosphorescence นอกจากนี้ยังสามารถลดระดับพลังงานโดยผ่านขั้นตอนที่ไม่มีการให้โฟตอนออกมาได้

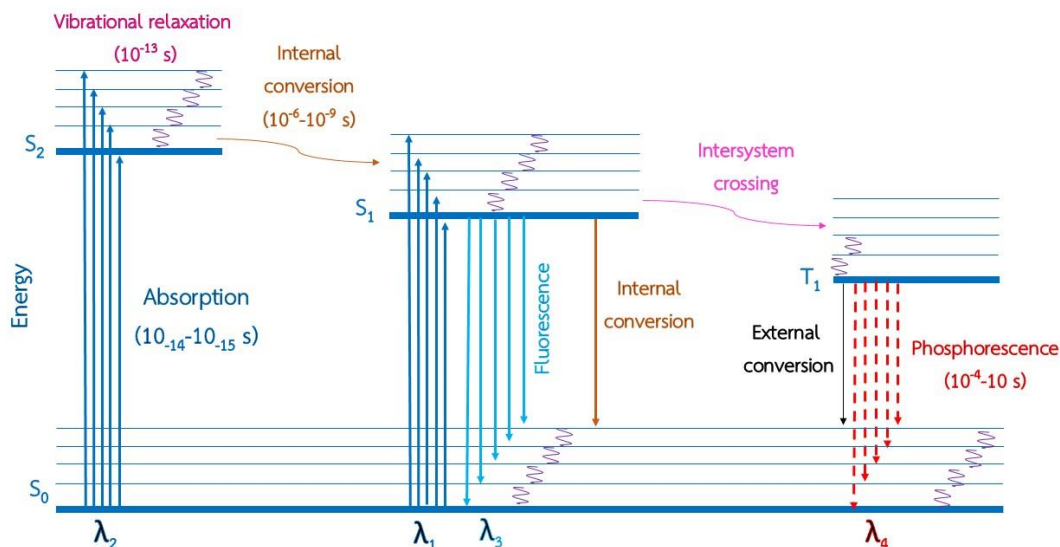
การลดระดับพลังงานของสารโดยไม่มีการให้โฟตอนเกิดได้หลายทาง ดังนี้

1. Vibrational Relaxation (VR) โมเลกุลที่อยู่ในรูปของสารละลาย ถูกกระตุ้นไปยังสถานะกระตุ้น โมเลกุลจะเสียพลังงานโดยการชนกับตัวทำละลาย ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงาน ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาเพียง 10^{-12} วินาที หรือน้อยกว่า

2. Internal Conversion (IC) โมเลกุลลดระดับพลังงานมาอยู่ในชั้นที่ต่ำลง โดยไม่มีการคายแสง ซึ่งเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก $S_2 \rightarrow S_1$ โดย λ_2 มักให้การคายแสง fluorescence ที่มีความยาวคลื่น λ_3

3. External Conversion โมเลกุลในสถานะกระตุ้นลดระดับพลังงานโดยการเกิดอันตรกิริยาหรือการถ่ายเทพลังงานระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในสถานะกระตุ้นกับตัวทำละลายหรือตัวถูกละลายอื่นๆ ซึ่งมีผลต่อความเข้มของ fluorescence การเปลี่ยนระดับพลังงานจากระดับ excited singlet state หรือ excited triplet state ที่พลังงานต่ำสุดไปสู่สถานะพื้นที่มีระดับพลังงานการสั่นสูง โดยไม่มีการให้โฟตอนออกมา

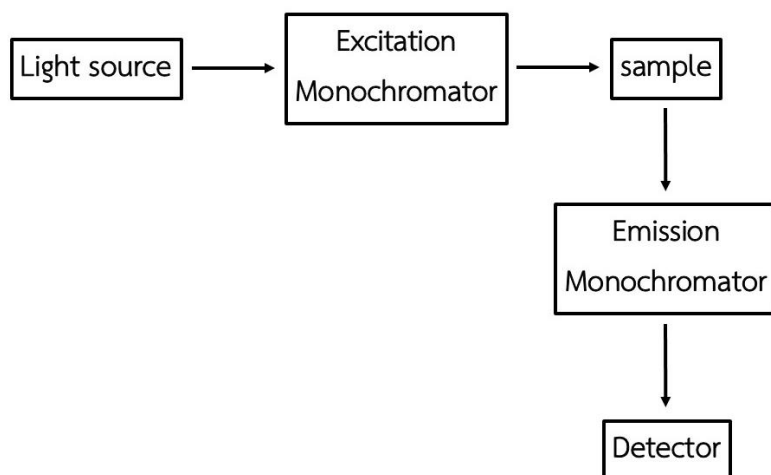
4. Intersystem Crossing (ISC) เกิดจากการสปีนของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นเกิดการกลับทิศทาง ซึ่งการเปลี่ยนระดับพลังงานนี้มีการเปลี่ยนสถานะการสปีนจากการเข้าคู่เป็นสปีนไม่เข้าคู่ หรือจาก excited singlet state เป็น excited triplet state



ภาพ 15 การเกิดสัญญาณฟลูออเรสเซนซ์

6.2 องค์ประกอบของเครื่องฟลูออเรสเซนซ์

เครื่องฟลูออเรสเซนซ์ (ภาพ 16) มีลักษณะคล้ายกับเครื่อง UV-Vis โดยทั่วไปเครื่องฟลูออเรสเซนซ์มีลักษณะเป็นแบบลำแสงคู่เพื่อแก้ปัญหาความไม่สม่ำเสมอของความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิดแสง แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านฟิลเตอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นหรือ monochromator เพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ใช้ในการกระตุ้นสาร เมื่อสารเกิดการกระตุ้นจะให้ fluorescence ออกมาทุกทิศทาง แต่ในการวัดความเข้มของแสงที่ให้ออกมานั้นจะวัดในแนวตั้งฉากกับลำแสงที่ใช้ในการกระตุ้นสาร เนื่องจากในมุมอื่นๆ นั้น จะเกิดการกระเจิงแสงจากสารละลายและจากเซลล์ใส่สาร ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ในการวัดความเข้มแสง จากนั้นจะทำการวัดความเข้มแสง fluorescence โดยใช้ตัวตรวจวัดแบบ photoelectric โดยจะผ่าน monochromator ตัวที่ 2 ซึ่งใช้สำหรับเลือกวัดความเข้มของแสงที่ให้ออกมาที่ความยาวคลื่นเฉพาะ ก่อนเข้าสู่ตัวตรวจวัด

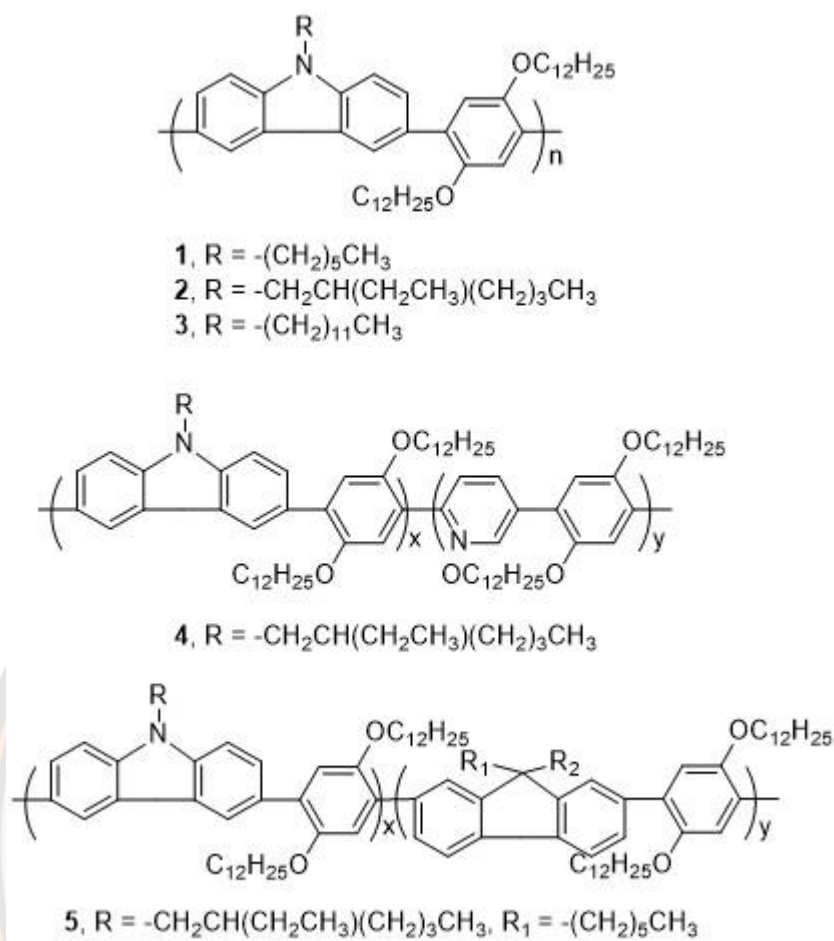


ภาพ 16 แผนภาพเครื่องฟลูออเรสเซนซ์

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. อนุพันธ์คาร์บาโซลที่นำมาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดไอออนลบและไอออนบวก

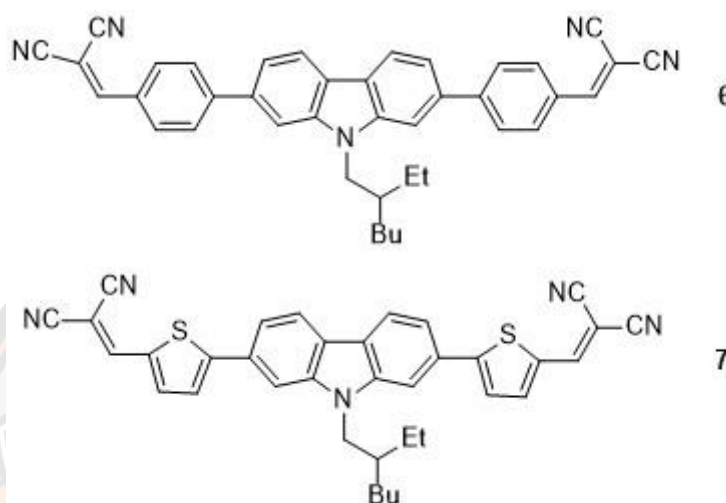
Vetrichelvan M. และคณะ (Vetrichelvan et al., 2006) ทำการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ 1-5 (ภาพ 17) จากอนุพันธ์ของคาร์บาโซลในรูปพอลิเมอร์ สำหรับตรวจวัดไอโอไดต์ในสารละลาย THF งานวิจัยนี้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ก่อนและหลังการเติมไอโอไดต์ที่อยู่ในรูปเกลือ tetrabutylammonium ผลการศึกษาพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ 1-5 จากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองภายหลังการเติมไอโอไดต์ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น สีของสารละลายมีลักษณะเข้มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงที่เปลี่ยนแปลงไป โดยไม่มีผลการรบกวนของไอออนลิเทียม โซเดียมหรือโพแทสเซียม จากนั้นศึกษาผลการไทเทรตด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์พบว่า การเพิ่มปริมาณไอโอไดต์ทำให้สเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 420-450 nm ลดลง ซึ่งโมเลกุลเซนเซอร์ 5 มีความสามารถในการตรวจวัดไอโอไดต์ได้ดีที่สุด การศึกษาความจำเพาะของโมเลกุลเซนเซอร์ในการตรวจวัดไอออนลบ ผลที่ได้พบว่าโมเลกุลเซนเซอร์มีความเลือกจำเพาะกับไอโอไดต์เพียงชนิดเดียว อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดจากกลไกการถ่ายโอนประจุ (Intermolecular charge-transfer) ระหว่างคาร์บาโซลของพอลิเมอร์กับไอออนลบ



ภาพ 17 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 1-5

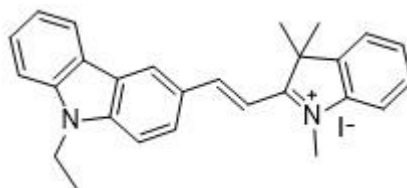
Konidena K. R. และ Thomas K. R. J. (Konidena & Thomas, 2014) ทำการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ 6 และ 7 (ภาพ 18) สำหรับตรวจวัดไอออนลบ (F^- , Br^- , I^- , AcO^- , CN^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , SCN^- , S_2^{2-} , $S_2O_3^{2-}$ และ $H_2PO_4^-$) โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ และเทคนิค ^1H-NMR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ ผลการศึกษาพบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ 6 และ 7 มีความเลือกจำเพาะในการตรวจวัดไซยาไนด์เพียงชนิดเดียว โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ 6 และ 7 จาก 405 nm และ 466 nm เป็น 327 nm และ 360 nm ตามลำดับ การศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไซยาไนด์พบว่า ไอออนลบชนิดต่างๆ ไม่มีผลรบกวนการตรวจวัดไซยาไนด์ของเซนเซอร์ และการศึกษาอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์ 6 และ 7 กับไอออนลบด้วยเทคนิค ^1H-NMR พบว่าการเพิ่มปริมาณไซยาไนด์ลงในเซนเซอร์ 6 และ 7 จะทำให้สัญญาณโปรตอนของไวเนลเกิดการเลื่อนไปทาง upfield เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเติมไซยาไนด์เข้าไปที่หมู่ไวเนลและเกิดประจุลบที่

tricyanoethyl อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ของเซนเซอร์ **6** และ **7** ในการตรวจวัดไอออนลบไซยาไนด์ เท่ากับ 0.126 μM และ 0.140 μM ตามลำดับ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าปริมาณการปนเปื้อนในน้ำดื่มที่องค์การอนามัยโลกยอมรับได้



ภาพ 18 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ **6** และ **7**

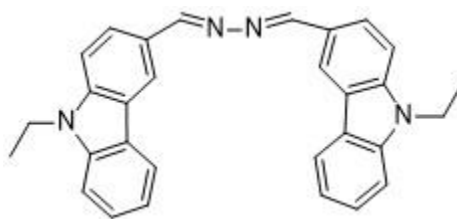
Wang S. และคณะ (Wang et al., 2016) ทำการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ **8** (ภาพ 19) สำหรับตรวจวัดไซยาไนด์โดยใช้เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ และเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ก่อนและหลังการเติมไซยาไนด์ ผลการศึกษาพบว่าสารละลายเซนเซอร์ **8** เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีส้มเป็นใสไม่มีสี และเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจาก 485 nm เป็น 288 nm และการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการคายแสงจาก 595 nm เป็น 381 nm ภายหลังการเติมไซยาไนด์ ส่วนไอออนลบชนิดอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสง และผลการศึกษาด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ พบว่าสัญญาณโปรตอนของหมู่ N-methyl ของโมเลกุลเซนเซอร์เกิดการ upfield ภายหลังการเติมไซยาไนด์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการเติมไซยาไนด์บนพันธะคู่ของ N-methyl อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี โมเลกุลเซนเซอร์ **8** สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นชุดทดสอบในรูปของกระดาษเพื่อตรวจวัดไอออนลบในน้ำ ผลการศึกษาพบว่ามีเพียงไซยาไนด์เท่านั้นที่ทำให้กระดาษทดสอบเกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีส้มเป็นไม่มีสี



ภาพ 19 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 8

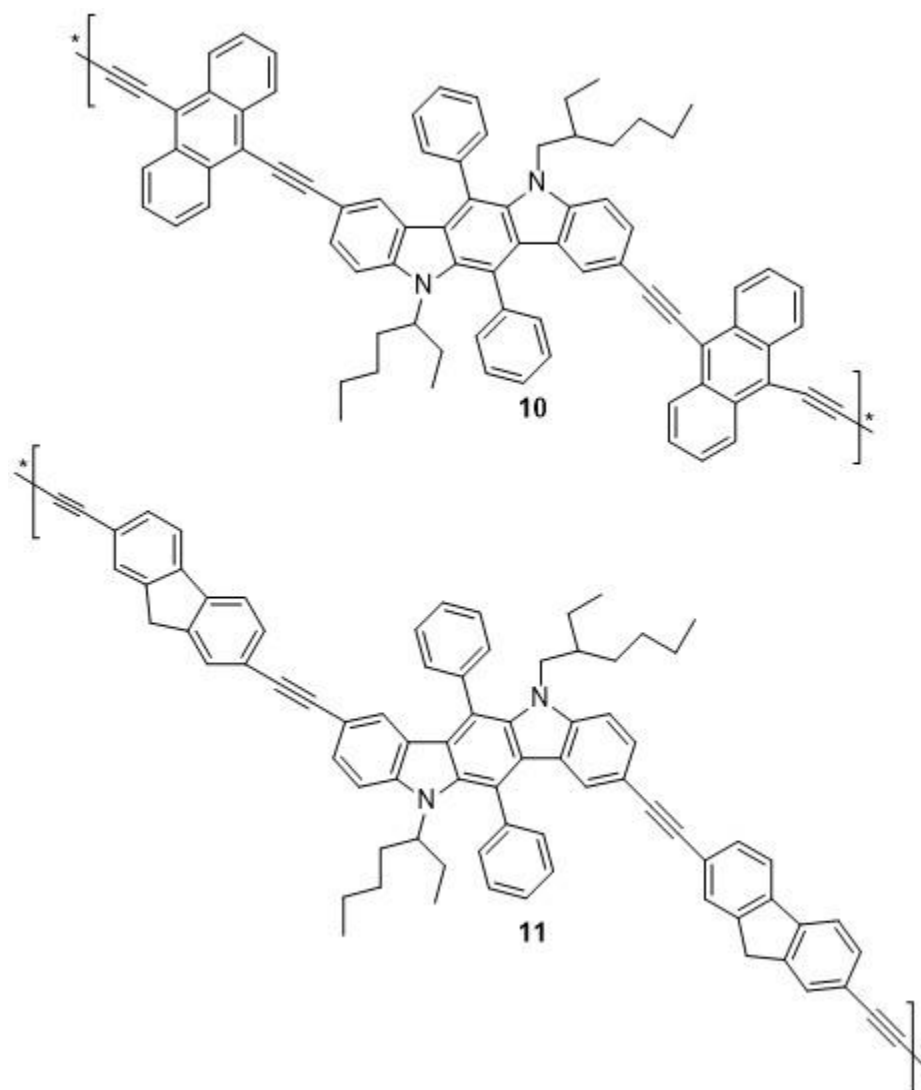
Christopher Leslee, D. B. และคณะ (Christopher Leslee et al., 2017) ทำการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ 9 (ภาพ 20) สำหรับใช้ตรวจวัดไอออนบวกและศึกษาความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ผลการศึกษาเกี่ยวกับไอออนบวก (Na^+ , K^+ , Ag^+ , Mn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+}) พบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ 9 มีความเลือกจำเพาะในการตรวจวัด Cu^{2+} ส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ที่ 240, 298, 352 และ 372 nm เพิ่มขึ้น และเกิดสเปกตรัมการคายแสงขึ้นที่ 556 nm ส่วนไอออนบวกอื่นๆ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงของเซนเซอร์ ผลจากการไทเทรตด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์สามารถหาค่าอัตราส่วนการจับกันของโมเลกุลเซนเซอร์กับไอออนบวกมีค่าเท่ากับ 2:1 และสามารถยืนยันการเกิดสารเชิงซ้อนด้วยเทคนิค ESI-MS โดยพบค่ามวลโมเลกุลของ [เซนเซอร์ 9] $_2$ - Cu^{2+} ขึ้นที่ 946.2936 และให้ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ Cu^{2+} ที่ความเข้มข้น 3.5×10^{-8} M และผลการศึกษาไอออนบวกพบว่ามีไอออนบวกชนิดอื่นๆ ไม่มีผลรบกวนการตรวจวัด Cu^{2+} ของโมเลกุลเซนเซอร์ 9 นอกจากนี้มีการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าในสภาวะที่ระบบตัวทำละลายมีความเป็นกรดสูงจะส่งผลให้สเปกตรัมการคายแสงมีสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น และโมเลกุลเซนเซอร์ที่เกิดอันตรกิริยากับ Cu^{2+} แล้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เมื่อเติม EDTA ส่งผลให้ไม่เกิดการคายแสงฟลูออเรสเซนซ์

การศึกษาความเป็นพิษของเซนเซอร์ 9 ต่อเซลล์ HeLa ในระบบตัวทำละลาย DMSO เมื่อมีปริมาณและเวลาที่แตกต่างกัน ผลการศึกษพบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ 9 มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตน้อยและไม่มีผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของเซลล์ แต่ในทางตรงกันข้าม สารประกอบเซนเซอร์ 9 กับ Cu^{2+} ส่งผลให้เกิดการลดลงของเซลล์ HeLa ที่ระดับความเข้มข้นมากกว่า $20 \mu\text{M}$ นอกจากนี้มีการศึกษาความสามารถของเซนเซอร์ 9 ในการตรวจวัด Cu^{2+} ภายในเซลล์โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพเซลล์ ผลการศึกษพบว่าเกิดการเรืองแสงสีเขียวในเซลล์ HeLa ดังนั้นสรุปได้ว่าโมเลกุลเซนเซอร์ 9 ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์และสามารถตรวจวัด Cu^{2+} ในเซลล์สิ่งมีชีวิตได้



ภาพ 20 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 9

Vintu M. และคณะ (Vintu et al., 2019) ได้ออกแบบโมเลกุลเซนเซอร์ **10** และ **11** (ภาพ 21) สำหรับตรวจวัดไอออนบวก (Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} และ Ni^{2+}) ผลการศึกษาพบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ทั้งสองมีความจำเพาะในการตรวจวัด Hg^{2+} ส่งผลให้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ **10** ที่ความยาวคลื่น 209 nm เปลี่ยนเป็น 233 nm สำหรับเซนเซอร์ **11** ภายหลังการเติม Hg^{2+} เกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกับเซนเซอร์ **10** แต่จะให้ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 233 nm เพิ่มสูงขึ้น และยังพบจุด isosbestic ที่ 255 nm ของเซนเซอร์ **11** ซึ่งแสดงถึงการมีสารใหม่เกิดขึ้น ส่วนไอออนบวกอื่นๆ ไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ **10** และ **11** โมเลกุลเซนเซอร์จะทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนแก่ Hg^{2+} และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถของเซนเซอร์ในการตรวจวัด Hg^{2+} พบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ **11** มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดที่ดีกว่าโมเลกุลเซนเซอร์ **10**

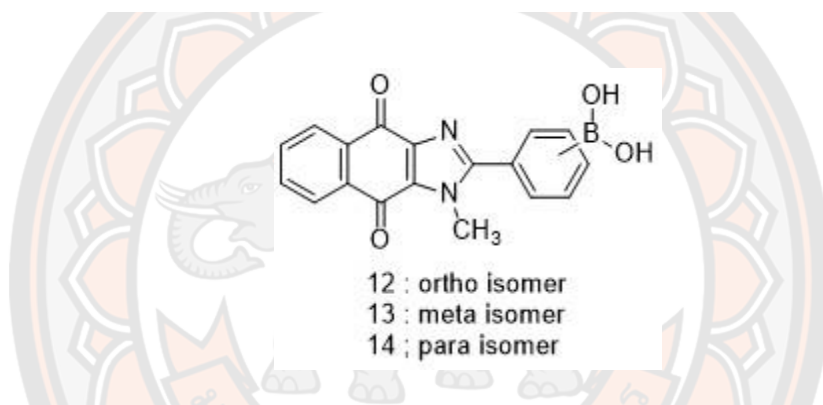


ภาพ 21 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 10 และ 11

2. งานวิจัยที่มีการใช้สารลดแรงตึงผิวกับระบบเซนเซอร์

Jamkratoke M. และคณะ (Jamkratoke et al., 2011) ได้พัฒนาโมเลกุลเซนเซอร์ **12**, **13** และ **14** (ภาพ 22) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้เทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ ผลการศึกษาพบว่า การเติมสารลดแรงตึงผิว Cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) ลงในสารละลายเซนเซอร์ทั้งสามสามารถตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำได้ ในขณะที่การเติมสารลดแรงตึงผิว Sodium dodecyl sulfate (SDS) และ Triton X-100 (TX-100) ไม่เกิดการตอบสนองต่อการตรวจวัดไซยาไนด์ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเซนเซอร์ทั้งสามและสารลดแรงตึงผิว CTAB ในการตรวจวัดไซยาไนด์ในระบบน้ำคือ 50 μM และ 5 mM ตามลำดับ จากนั้นศึกษาสเปกตรัมการคายแสง

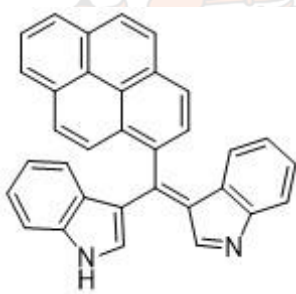
พบว่าเซนเซอร์ **13** และ **14** ปรากฏค่าการคายแสงที่ 460 nm ภายหลังการเติมไซยาไนด์ ในขณะที่ไอออนลบอื่นไม่เกิดการตอบสนองต่อการตรวจวัด ส่วนเซนเซอร์ **12** ไม่ตอบสนองต่อการตรวจวัดไอออนลบ ซึ่งระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวมีความเลือกจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบมากกว่าในระบบ DMSO:H₂O (1:1) และผลจากการไทเทรตด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์พบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ **13** และ **14** มีช่วงความเป็นเส้นตรงของสเปกตรัมการคายแสงที่ 460 nm ที่ 2.5 - 15 และ 20 - 40 μ M ตามลำดับ และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ของเซนเซอร์ทั้งสองคือ 1.4 μ M ทั้งยังนำโมเลกุลเซนเซอร์มาใช้ตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำดื่ม พบว่าเซนเซอร์ **13** และ **14** สามารถตรวจวัดไซยาไนด์โดยมีค่าร้อยละการกลับคืนเท่ากับ 103 และ 102 ตามลำดับ ดังนั้นโมเลกุลเซนเซอร์ **13** และ **14** ในระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวสามารถวิเคราะห์ไซยาไนด์ในน้ำได้ดี อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดจากการแทนที่ไอออนลบที่ตำแหน่งโบรอนบนโมเลกุลเซนเซอร์



ภาพ 22 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 12-14

Kumari N. และคณะ (Kumari et al., 2014) ได้ทำการสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ **15** (ภาพ 23) เพื่อตรวจวัดไซยาไนด์โดยใช้เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี และเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ **15** ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ ในรูปของเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียม ผลการศึกษาในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายพบว่าสารละลายเซนเซอร์ **15** เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงเป็นสีเหลือง ภายหลังการเติมไซยาไนด์ ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์จาก 510 nm เป็น 430 nm ภายหลังการเติมไซยาไนด์ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงที่ 430 nm ถูกนำมาศึกษาอัตราส่วนการจับกันระหว่างโมเลกุลเซนเซอร์กับไซยาไนด์พบว่าจับกันแบบ 1:1 และค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ไซยาไนด์เท่ากับ 0.33 ppm นอกจากนี้ยังศึกษาในระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว Polyethylene glycol hexadecyl ether (Brij-58) ผลการศึกษาพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์เช่นเดียวกับใน

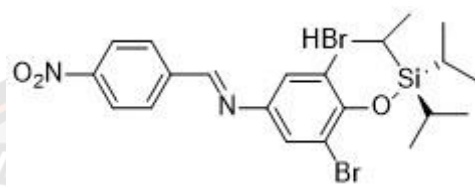
ระบบที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว และยังพบว่าสามารถเกิดการคายแสงฟลูออเรสเซนส์ได้ โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการคายแสงจาก 580 nm เป็น 510 nm ภายหลังการเติมโซยาไนต์ และมีค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์โซยาไนต์เท่ากับ 8 ppb ซึ่งมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดดีกว่าในระบบที่ไม่เติมสารลดแรงตึงผิว โมเลกุลเซนเซอร์ในระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในการตรวจหาปริมาณโซยาไนต์ในมันสำปะหลัง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าสารละลายเซนเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากสีแดงเป็นสีเหลือง ภายหลังการเติมสารสกัดมันสำปะหลัง รวมทั้งศึกษาการตรวจวัดโซยาไนต์ในมันสำปะหลังสดทั้งที่มีการนำโซยาไนต์ออกและไม่ได้นำโซยาไนต์ออกพบว่า ภายหลังการหยดสารละลายเซนเซอร์ลงบนมันสำปะหลังที่ไม่มีการนำโซยาไนต์ออก สีของสารละลายเซนเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสีแดงเป็นสีเหลือง ส่วนมันสำปะหลังที่มีการนำโซยาไนต์ออกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ อันตรกิริยาที่เกิดระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยใช้ปฏิกิริยาการเติมของไอออนลบโซยาไนต์เข้าที่หมู่ไวนิล



ภาพ 23 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 15

Nicoletti C. R. และคณะ (Nicoletti et al., 2015) ได้ออกแบบโมเลกุลเซนเซอร์ 16 (ภาพ 24) เพื่อตรวจวัดโซยาไนต์ในน้ำและเลือดมนุษย์โดยใช้เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี และเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ ในรูปของเกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมในระบบสารละลายที่เป็นน้ำที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่ pH 8.0 ผลการศึกษาพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ 16 จากใสไม่มีสีเป็นสีส้ม ภายหลังการเติมโซยาไนต์ ส่วนไอออนลบชนิดอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ ผลจากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ 16 พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมจาก 368 nm เป็น 474 nm ผลจากการศึกษาการไทเทรตด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี สามารถคำนวณค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณโซยาไนต์มีค่าเท่ากับ 1.48×10^{-5} และ 4.93×10^{-5} M ตามลำดับ เมื่อนำโมเลกุลเซนเซอร์ 16

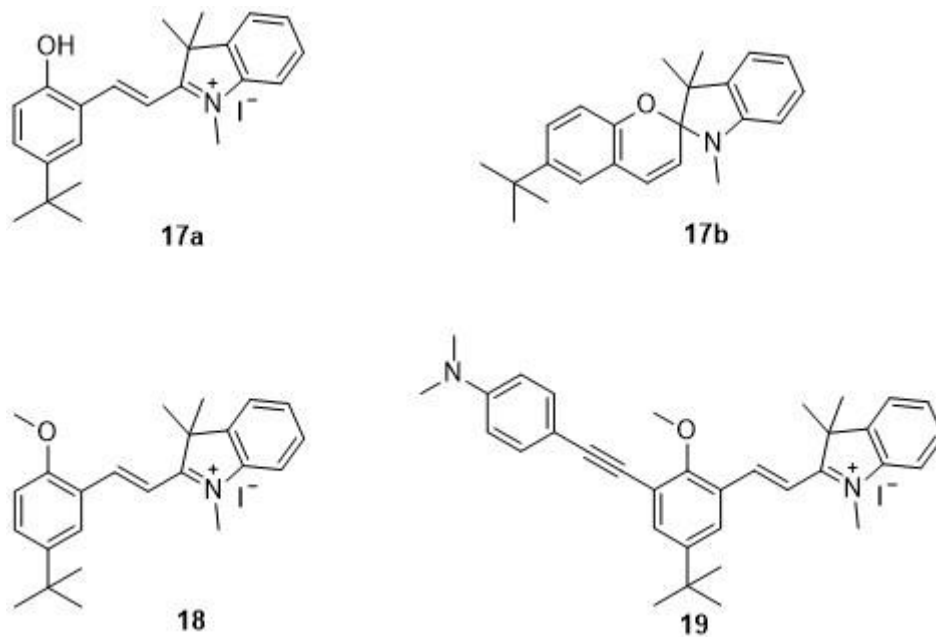
มาทดลองตรวจวัดไซยาไนด์ในเลือดมนุษย์ โดยการเติมไซยาไนด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงในเลือดมนุษย์ จากนั้นนำมาตรวจวัดหาไซยาไนด์ด้วยสารละลายเซนเซอร์โดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมของเซนเซอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับการตรวจวัดหาไซยาไนด์ในน้ำ ดังนั้นสารละลายเซนเซอร์ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวจึงสามารถนำมาใช้ตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำและเลือดมนุษย์ได้อย่างจำเพาะเจาะจง อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาการแตกพันธะที่ตำแหน่งซิลิกอนโดยไอออนลบ



ภาพ 24 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 16

Promchat A. และคณะ (Promchat et al., 2017) ทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ของ indolium เป็นโมเลกุลเซนเซอร์จำนวนสี่ชนิดคือ โมเลกุล 17-19 (ภาพ 25) เพื่อนำมาทดสอบการตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสี เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี และเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ ในรูปของเกลือโซเดียมในระบบตัวทำละลายเมทานอล ผลการศึกษาพบว่าโมเลกุลเซนเซอร์ 18 และ 19 เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากสีเหลืองเป็นใสไม่มีสี และเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ส่วนเซนเซอร์ 17 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเติมไซยาไนด์ และเมื่อศึกษาการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ภายใต้แสง black light พบว่าสารละลายเซนเซอร์ 19 สามารถเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์สีฟ้าได้ภายหลังการเติมไซยาไนด์ เมื่อนำโมเลกุลเซนเซอร์ 19 มาใช้เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีและการเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าเซนเซอร์ 19 ละลายน้ำได้น้อย จึงมีการเติมสารลดแรงตึงผิว TX-100 ลงไปในระบบ ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมของ TX-100 คือ 220 μM ในบัฟเฟอร์ HEPES pH 6.0 จากนั้นนำระบบที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิวมาศึกษาผลของไอออนลบของอนุกรม ผลการทดลองพบว่าไอออนลบชนิดต่างๆ ไม่รบกวนการตรวจวัดไซยาไนด์ของเซนเซอร์ 19 และเมื่อศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์โดยการไทเทรตด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี และฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ไซยาไนด์คือ 1.9 μM และ 49 μM ตามลำดับ นอกจากนี้โมเลกุลเซนเซอร์ 19 ถูกนำมาเตรียมให้อยู่ในรูปของกระดาษทดสอบและเม็ดอัลจินเตเจล ผลการศึกษาพบว่ากระดาษทดสอบและ

เมื่อดอัลจินเตเจลเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและให้การเรืองแสงฟลูออเรสเซนซ์กับไอออนลบไซยาไนด์เท่านั้น อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยเกิดปฏิกิริยาการเติม CN^- เข้าที่พันธะคู่ของ N-methyl



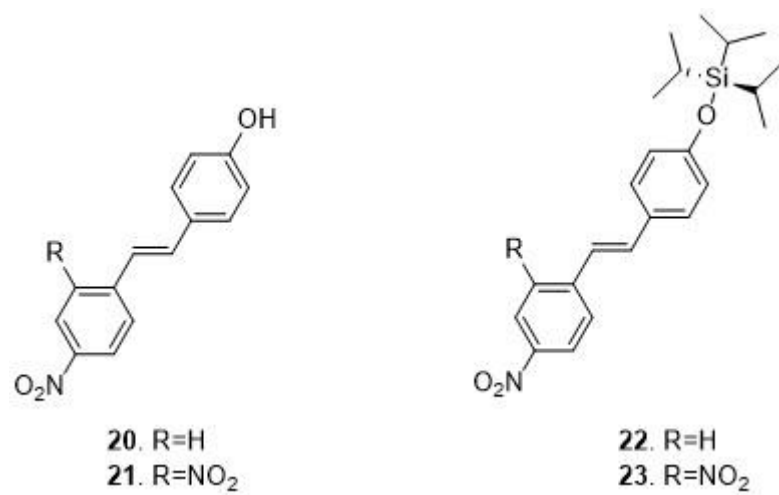
ภาพ 25 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 17-19

Schramm D.S. A. และคณะ (Schramm et al., 2017) ได้นำโมเลกุลเซนเซอร์กลุ่ม 4-(nitrostyryl)phenols จำนวน 4 โมเลกุลคือเซนเซอร์ 20-23 (ภาพ 26) มาศึกษาการตรวจวัดฟลูออไรด์ในอะซิโตนไตรลและไซยาไนด์ในน้ำโดยใช้เทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีและเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

การศึกษาโมเลกุลเซนเซอร์ 20 และ 21 กรณิใช้ระบบตัวทำละลายอะซิโตนไตรล พบว่าสารละลายเซนเซอร์ 20 เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากใสไม่มีสีเป็นสีม่วงอย่างชัดเจน ภายหลังการเติมฟลูออไรด์ ในขณะที่ไซยาไนด์เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ชัดเจน ส่วนไอออนลบชนิดอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ 20 เมื่อศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซนเซอร์ภายหลังการเติมฟลูออไรด์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากความยาวคลื่น 374 nm เป็น 554 nm สำหรับเซนเซอร์ 21 ที่โครงสร้างมีความเป็นกรดมากกว่าเซนเซอร์ 20 พบว่าภายหลังการเติมฟลูออไรด์และไซยาไนด์เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากใสไม่มีสีเป็นสีน้ำเงินอย่างชัดเจนทั้งสองไอออน และการดูดกลืนแสงสูงสุดของเซนเซอร์ 21 เปลี่ยนจากค่าความยาวคลื่น 392 nm เป็น 650

nm เมื่อเปลี่ยนมาใช้ตัวทำละลายอะซิโตนไตรล์ที่มีการผสมน้ำ 3.0% ผลการศึกษาพบว่าภายหลังการเติมไอออนลบ มีเพียงไซยาไนด์เท่านั้น ที่ทำให้สารละลายเซนเซอร์ **20** และ **21** เกิดการเปลี่ยนแปลงสีแต่ไม่ชัดเจนนัก จึงทำการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ลงในระบบ ผลการศึกษาพบว่าภายหลังการเติมไอออนลบ มีเพียงไซยาไนด์เท่านั้น ที่ทำให้สารละลายเซนเซอร์ **20** และ **21** เกิดการเปลี่ยนแปลงสีจากใสไม่มีสีเป็นสีส้มและสีแดงอย่างเห็นได้ชัด และเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจาก 386 nm เป็น 456 nm และ จาก 406 nm เป็น 512 nm ตามลำดับ เมื่อติดตามสเปกตรัมการดูดกลืนแสงใหม่ที่เกิดขึ้นโดยการไทเทรตด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี เพื่อหาอัตราส่วนการจับกันระหว่างเซนเซอร์กับไซยาไนด์ ซึ่งพบว่าจับกันแบบ 1:2 โมเลกุลเซนเซอร์ **20** ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดไซยาไนด์ในน้ำประปา ผลการศึกษาพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมา นอกจากนี้เซนเซอร์ **20** และ **21** ถูกนำมาเตรียมเป็นชุดทดสอบในรูปของกระดาษทดสอบ ผลการศึกษาพบว่ากระดาษทดสอบของเซนเซอร์ **20** และ **21** จะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นสีส้ม และสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลเข้ม ตามลำดับ ภายหลังการเติมไซยาไนด์

การศึกษาโมเลกุลเซนเซอร์ **22** และ **23** ในระบบตัวทำละลายอะซิโตนไตรล์ ผลการศึกษาพบว่าสารละลายเซนเซอร์ **22** และ **23** เกิดการเปลี่ยนแปลงสีทันทีภายหลังการเติมฟลูออไรด์ จากสารละลายใสไม่มีสีเป็นสีม่วงและสีน้ำเงิน ตามลำดับ และเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจาก 372 nm เป็น 550 nm และจาก 388 nm เป็น 650 nm ตามลำดับ ส่วนการทดสอบกับไซยาไนด์พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเซนเซอร์ ภายหลังการเติม 30 นาที อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเซนเซอร์ **20** และ **21** กับไอออนลบเกิดผ่านกลไกการเกิดหลุดโปรตอนตำแหน่ง OH ของเซนเซอร์ ส่วนเซนเซอร์ **22** และ **23** เกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยเกิดปฏิกิริยาการแตกพันธะที่ตำแหน่งซิลิกอนโดยไอออนลบ



ภาพ 26 โครงสร้างโมเลกุลเซนเซอร์ 20-23



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

วัสดุอุปกรณ์

1. กระจกนาฬิกา
2. กระดาษกรองเบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 และ 150 mm (Whatman, UK)
3. กระบอกฉีดยา
4. กระบอกตวง ขนาด 10.0, 50.0 และ 100.0 mL
5. กรวยกรองแก้ว
6. กรวยแยก
7. ขวดกัณกลม ขนาด 250 mL
8. ขวดกัณกลม 2 คอ ขนาด 100 mL
9. ขวดปรับปริมาตร ขนาด 10.00, 25.00 50.00 และ 100.00 mL
10. ขวดรูปชมพู่ ขนาด 100 และ 250 mL
11. ขวดไวแอล (Vial)
12. เข็มฉีดยา ขนาด 18G×1 (1.2×38 mm)
13. คอลัมน์
14. โครมาโตกราฟีแบบแผ่นบาง (Thin Layer Chromatography or TLC, Merck, Germany)
15. ชุดกรองสุญญากาศ
16. ชุดรีฟลักซ์
17. ช้อนตักสาร
18. เซลล์ใส่สารตัวอย่าง
19. ซิลิกา
20. แท่งแก้วคนสาร
21. แท่งแม่เหล็กคนสาร
22. ปีกเกอร์ ขนาด 50, 100 และ 250 mL
23. ปิเปต ขนาด 1.00, 2.00 และ 10.00 mL
24. แผ่นพาราฟิล์ม
25. หลอดหยดสาร

เครื่องมือที่ใช้

1. กล้อง black light ที่ความยาวคลื่น 365 nm
2. เครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator) รุ่น Heizbad Hei-VAP 011102040, Heidolph Instruments Grmbh & Co.KG
3. เครื่องคนสาร (Magnetic Stirrer Hot plate), Fisher Scientific, USA
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง, BSA2245-CW, Sartorius and Germany
5. เครื่องฟลูออเรสเซนซ์ (Spectrofluorometer FluoroMax-4)
6. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV Double Beam) รุ่น Specord 200 plus, ANALYTICAL LAB SCIENCE CO.,Ltd
7. เครื่องอัลตราโซนิก
8. โทรศัพท์มือถือ, I-phone 8 plus, Apple, Apple Computer Inc.

สารเคมีที่ใช้

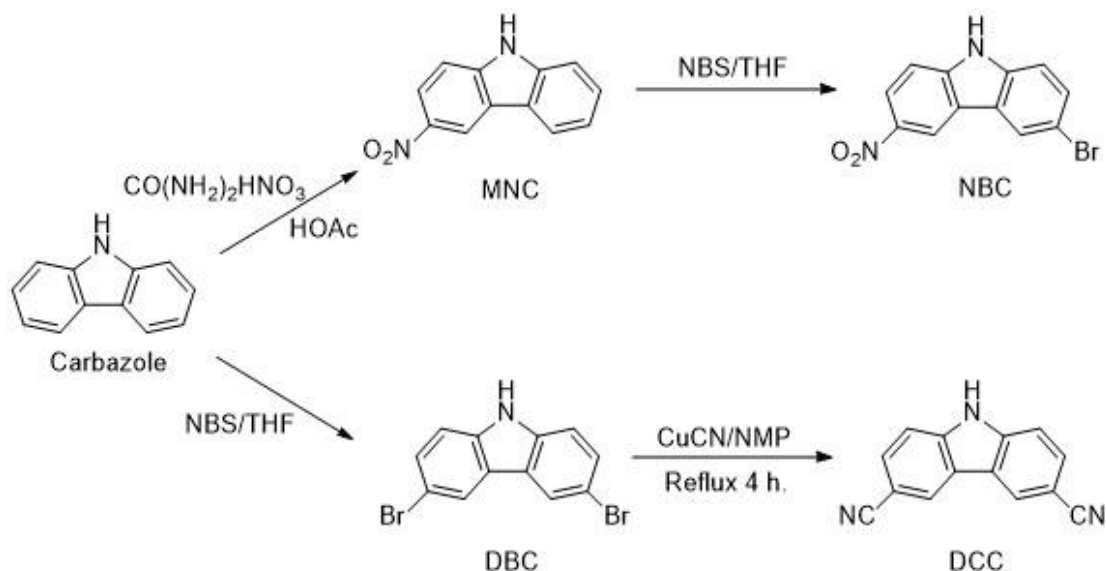
1. 3, 6-Dicyanocarbazole (**DCC**) มวลโมเลกุล 217.21 g/mol
2. 3-Nitro-6-bromocarbazole (**NBC**) มวลโมเลกุล 291.21 g/mol
3. 3, 6-Dibromocarbazole (**DBC**) มวลโมเลกุล 225.21 g/mol
4. 3-Nitrocarbazole (**MNC**) มวลโมเลกุล 212.21 g/mol
5. Acetic acid (CH_3COOH) มวลโมเลกุล 60.05 g/mol, AR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
6. Acetone ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) มวลโมเลกุล 58.08 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., India
7. Acetonitrile, MeCN ($\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$) มวลโมเลกุล 41.05 g/mol, AR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
8. Calcium chloride (CaCl_2) มวลโมเลกุล 110.98 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., China
9. Carbazole มวลโมเลกุล 167.21 g/mol, GC grade, SIGMA-ALDRICH CO., China
10. Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) มวลโมเลกุล 364.45 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., China
11. Copper (I) cyanide (CuCN) มวลโมเลกุล 89.56 g/mol, LR grade, Tokyo Chemical Industry Co., Ltd, Japan

12. Dichloromethane (CH_2Cl_2) มวลโมเลกุล 84.93 g/mol, AR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
13. Ethyl acetate, EtOAc ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$) มวลโมเลกุล 88.11 g/mol, GPR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
14. Ferric chloride anhydrous (FeCl_3) มวลโมเลกุล 270.12 g/mol, AR grade, Loba Chemie Pvt.Ltd., India
15. Hexane (C_6H_{14}) มวลโมเลกุล 86.18 g/mol, GPR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
16. Hydrochloric acid 37% มวลโมเลกุล 36.46 g/mol, AR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
17. N-Bromosuccinimide (NBS) มวลโมเลกุล 177.98 g/mol, Extra Pure grade, Loba Chemie Pvt.Ltd., India
18. N-methyl-2-pyrrolidinone (NMP) มวลโมเลกุล 99.13 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., USA
19. Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4) มวลโมเลกุล 136.09 g/mol, AR grade, RFCL Ltd, India
20. Potassium cyanide (KCN) มวลโมเลกุล 65.12 g/mol, AR grade, Ajax Finechem, Australia
21. Potassium phosphate dibasic (K_2HPO_4) มวลโมเลกุล 174.18 g/mol, AR grade, Loba Chemie Pvt.Ltd., India
22. Sodium acetate (NaOAc) มวลโมเลกุล 82.03 g/mol, ACS reagent grade, SIGMA-ALDRICH CO., Germany
23. Sodium alginate ($\text{C}_6\text{H}_9\text{NaO}_7$) มวลโมเลกุล 216.121 g/mol, Bioreagent, SIGMA-ALDRICH CO., Norway
24. Sodium benzoate (NaOBz) มวลโมเลกุล 144.10 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., Netherlands
25. Sodium carbonate (Na_2CO_3) มวลโมเลกุล 105.99 g/mol, Reagent grade, SIGMA-ALDRICH CO., USA
26. Sodium chloride (NaCl) มวลโมเลกุล 58.44 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., Origin Germany

27. Sodium dithionite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) มวลโมเลกุล 174.11 g/mol, Extra Pure grade, Loba Chemie Pvt.Ltd., India
28. Sodium fluoride (NaF) มวลโมเลกุล 41.99 g/mol, LR grade, Ajax Finechem, Australia
29. Sodium iodide (NaI) มวลโมเลกุล 149.89 g/mol, Reagent grade, SIGMA-ALDRICH CO., France
30. Sodium nitrate (NaNO_3) มวลโมเลกุล 84.99 g/mol, AR grade, BDH Chemicals Ltd, England
31. Sodium nitrite (NaNO_2) มวลโมเลกุล 68.99 g/mol, AR grade, RFCL Ltd, India
32. Sodium phosphate tribasic dodecahydrate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) มวลโมเลกุล 380.12 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., Germany
33. Sodium sulfate (Na_2SO_4) มวลโมเลกุล 142.04 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., Germany
34. Sodium sulfate anhydrous (Na_2SO_4) มวลโมเลกุล 142.04 g/mol, GR grade, Loba Chemie Pvt.Ltd., India
35. Sodium sulfite (Na_2SO_3) มวลโมเลกุล 126.04 g/mol, AR grade, SIGMA-ALDRICH CO., Japan
36. Sodium thiocyanate (NaSCN) มวลโมเลกุล 81.07 g/mol, ACS reagent grade, SIGMA-ALDRICH CO., India
37. Tetrahydrofuran, THF ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$) มวลโมเลกุล 72.11 g/mol, AR grade, RCI Labscan Ltd., Thailand
38. น้ำปราศจากไอออน (H_2O) มวลโมเลกุล 18.02 g/mol

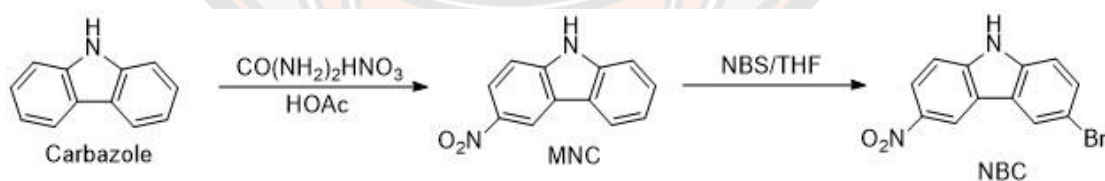
วิธีการทดลอง

1. การสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC ที่มีการเติมหมู่ดิงอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง 3, 6-carbazole



ภาพ 27 การสังเคราะห์โมเลกุลเซนเซอร์ NBC และ DCC

1.1 การสังเคราะห์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC)



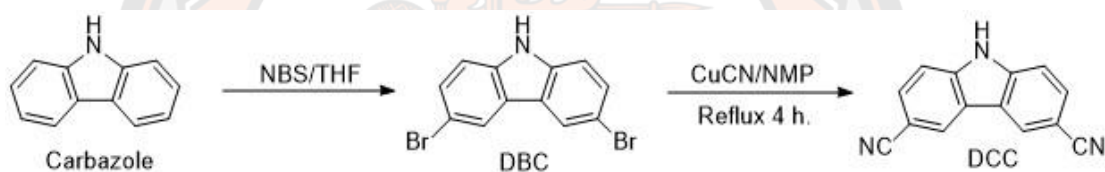
ภาพ 28 การสังเคราะห์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC)

ละลาย carbazole 0.88 g (5.28 mmol) ในกรดอะซิติกเข้มข้น ปริมาตร 60 mL ใส่ลงในขวดกั่นกลมขนาด 250 mL ปรับอุณหภูมิไปที่ 60-70°C พร้อมคนจนได้สารละลายสีเหลือง จากนั้นเติม urea nitrate 0.65 g (5.28 mmol) สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีดำเมื่อตั้งปฏิกิริยา 60-70°C ทั้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นปรับอุณหภูมิไปที่อุณหภูมิห้องและเติมน้ำกลั่นเพื่อหยุดปฏิกิริยาจะเกิดตะกอนสีเหลือง ของ 3-Nitrocarbazole, MNC ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น และนำของแข็งสีเหลืองไป

ทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีโดยใช้ระบบตัวทำละลายผสม hexane:ethyl acetate อัตราส่วน 3:1

ละลาย **MNC** 0.95 g (4.38 mmol) ใน tetrahydrofuran ปริมาตร 50 mL คนสารละลายที่อุณหภูมิ 0°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน หลังจากนั้นเติม N-Bromosuccinimide 0.78 g (4.38 mmol) จากนั้นปรับอุณหภูมิห้องและคนสารละลายเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการหยุดปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำ จากนั้นนำไปสกัดด้วย dichloromethane จำนวน 3 ครั้ง นำชั้นสารละลาย dichloromethane ไประเหยตัวทำละลายออกจะได้ของแข็งสีเหลืองของ 3-Nitro-6-bromocarbazole, **NBC** และนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีโดยใช้ระบบตัวทำละลายผสม hexane:ethyl acetate อัตราส่วน 1:1

1.2 การสังเคราะห์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)



ภาพ 29 การสังเคราะห์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)

ละลาย carbazole 1.00 g (5.98 mmol) ใน tetrahydrofuran ปริมาตร 10 mL ในขวดก้นกลมขนาด 50 mL จะได้สารละลายสีเหลือง เติม N-Bromosuccinimide 2.230 g (12.49 mmol) คนสารละลายที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการหยุดปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำ และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายมาสกัดด้วย dichloromethane จำนวน 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำชั้น dichloromethane ที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกจะได้ของแข็งสีขาวขุ่นของ 3, 6-Dibromocarbazole, **DBC** และนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีคอลัมน์โครมาโตกราฟีโดยใช้ระบบตัวทำละลายผสม hexane:ethyl acetate อัตราส่วน 4:1

ละลาย **DBC** 0.50 g (1.54 mmol) และ Copper(I)cyanide 0.83 g (9.24 mmol) ใน N-methyl-2-pyrrolidinone (NMP) ปริมาตร 10 mL ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 50 mL และรีฟลักซ์ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อปฏิกิริยาเสร็จสมบูรณ์ ลดอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง เทสารในขวดก้นกลมลงในสารละลายผสมระหว่าง ferric chloride (FeCl_3) 1.6 g กรดไฮโดรคลอริก 8 mL ในน้ำปราศจากไอออน 50 mL คนสารละลายผสมที่อุณหภูมิ 60-80°C เป็น

เวลา 1 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้จนอุณหภูมิกลับมาที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดตะกอนขึ้น จากนั้นทำการกรองตะกอน และล้างตะกอนด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นของแข็งสีน้ำตาลของ 3, 6-Dicyanocarbazole, DCC

2. ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC)

2.1 เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปสารละลาย

2.1.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

2.1.1.1 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M และ 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 10 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL และเตรียมสารละลาย CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M และ 0.5 M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 2 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของ CN^- เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

ตาราง 2 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ NBC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

ความเข้มข้น สุดท้ายของ NBC (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)					
	NBC (M)		MeCN	CTAB	CN^- (M)	
	2.5×10^{-3}	5.0×10^{-4}			0.5	5.0×10^{-2}
3.0×10^{-4}	1.2	-	0.8	2.0	0.6	-
2.0×10^{-4}	0.8	-	1.2	2.0	0.4	-
1.0×10^{-4}	-	2.0	-	2.0	-	2.0
9.0×10^{-5}	-	1.8	0.2	2.0	-	1.8
8.0×10^{-5}	-	1.6	0.4	2.0	-	1.6

ตาราง 2 (ต่อ)

ความเข้มข้น สุดท้ายของ NBC (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)					
	NBC (M)		MeCN	CTAB	CN ⁻ (M)	
	2.5×10 ⁻³	5.0×10 ⁻⁴			0.5	5.0×10 ⁻²
7.0×10 ⁻⁵	-	1.4	0.6	2.0	-	1.4
6.0×10 ⁻⁵	-	1.2	0.8	2.0	-	1.2
5.0×10 ⁻⁵	-	1.0	1.0	2.0	-	1.0

2.1.1.2 ศึกษาความจำเพาะของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย NBC 0.8 mL, MeCN 1.2 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL และสารละลายไอออนลบ 0.4 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ NBC เท่ากับ 2.0×10^{-4} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบเท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

2.1.1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN⁻ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 3 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย

การศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻ แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN⁻

เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ปริมาตร 25 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ปริมาตร 10 mL จากนั้นเปิดสารละลายดังตาราง 4 และ 5 ตามลำดับ

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ **NBC** เท่ากับ $2.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ และ **CTAB** เท่ากับ $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

ตาราง 3 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ **NBC** สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	NBC ($2.5 \times 10^{-3} \text{ M}$)	MeCN	CTAB	CN^- ($5.0 \times 10^{-2} \text{ M}$)
0.0	0.8	1.2	2.0	-
1.0×10^{-2}	0.8	1.2	2.0	2.0
9.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	1.8
8.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	1.6
7.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	1.4
6.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	1.2
5.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	1.0
4.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	0.8
3.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	0.6
2.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	0.4
1.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	0.2

ตาราง 4 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	NBC (2.5×10^{-3} M)	MeCN	CTAB	CO_3^{2-} (5.0×10^{-3} M)
0.0	0.8	1.2	2.0	-
3.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	6.0
2.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	4.0
1.0×10^{-3}	0.8	1.2	2.0	2.0
9.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	1.8
8.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	1.6
7.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	1.4
6.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	1.2
5.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	1.0

ตาราง 5 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	NBC (2.5×10^{-3} M)	MeCN	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-4} M)
0.0	0.8	1.2	2.0	-
1.0×10^{-4}	0.8	1.2	2.0	2.0
9.0×10^{-5}	0.8	1.2	2.0	1.8
8.0×10^{-5}	0.8	1.2	2.0	1.6
7.0×10^{-5}	0.8	1.2	2.0	1.4
6.0×10^{-5}	0.8	1.2	2.0	1.2
5.0×10^{-5}	0.8	1.2	2.0	1.0

2.1.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

2.1.2.2 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL และความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 6 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วง 300-600 nm

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

ตาราง 6 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ NBC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

ความเข้มข้น สุดท้ายของ NBC (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	NBC (M)		MeCN	CTAB
	2.5×10^{-3}	5.0×10^{-4}		
3.0×10^{-4}	1.2	-	0.8	2.0
2.0×10^{-4}	0.8	-	1.2	2.0
1.0×10^{-4}	-	2.0	-	2.0
9.0×10^{-5}	-	1.8	0.2	2.0
8.0×10^{-5}	-	1.6	0.4	2.0
7.0×10^{-5}	-	1.4	0.6	2.0
6.0×10^{-5}	-	1.2	0.8	2.0
5.0×10^{-5}	-	1.0	1.0	2.0

2.1.2.2 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบของ NBC

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL เตรียม

สารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 0.5 M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย **NBC** 0.8 mL, MeCN 1.2 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL และสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} 0.4 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL สารผสมนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ทุก 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ **NBC** เท่ากับ 2.0×10^{-4} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนลบ CO_3^{2-} เป็น 100 eq. ของจำนวนโมล **NBC** และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

2.1.2.3 ศึกษาความจำเพาะของ **NBC** ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย **NBC** ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย **NBC** 2.0 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL สารละลายไอออนลบ 2.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 5 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วง 300-600 nm ทั้งก่อนและหลังการเติมไอออนลบ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลเซนเซอร์ **NBC**

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ **NBC** เท่ากับ 1.0×10^{-4} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบเท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล **NBC** และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

2.1.2.4 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ **NBC** สามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลาย **NBC** ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 7 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้ 5 นาที ติดตามค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงที่มีแกน x คือความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- (M) และแกน y คือค่าการดูดกลืนแสงที่ความ

ยาวคลื่น 464 nm แล้วคำนวณค่า LOD จากสูตร $LOD = 3SD_{blank}/slope$ และค่า LOQ จากสูตร $LOQ = 10SD_{blank}/slope$

การศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยเตรียมสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 10 mL และ 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 25 mL และปิเปตสารละลายดังตาราง 8 และ 9 ตามลำดับ

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ NBC เท่ากับ 1.0×10^{-4} M และ CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

ตาราง 7 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CN^- ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	NBC (5.0×10^{-4} M)	CTAB	CN^- (5.0×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
1.0×10^{-2}	2.0	2.0	2.0
8.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.6
6.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.2
4.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.8
2.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.4
1.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.2

ตาราง 8 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	NBC (5.0×10^{-4} M)	CTAB	CO_3^{2-}	
			5.0×10^{-4} M	5.0×10^{-3} M
0.0	2.0	2.0	-	-
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	-	0.6
2.5×10^{-4}	2.0	2.0	-	0.5
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	-	0.4
1.5×10^{-4}	2.0	2.0	-	0.3
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	2.0	-
8.0×10^{-5}	2.0	2.0	1.6	-
6.0×10^{-5}	2.0	2.0	1.2	-
4.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.8	-
2.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.4	-
1.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.2	-

ตาราง 9 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	NBC (5.0×10^{-4} M)	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-4} M)
0.0	2.0	2.0	-
5.0×10^{-5}	2.0	2.0	1.0
4.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.8
3.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.6
2.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.4

ตาราง 9 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	NBC (5.0×10^{-4} M)	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-4} M)
1.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.2

หมายเหตุ: สารละลาย NBC ที่ไม่มีการเติมสารละลายไอออนลบ จะนำมาใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm จำนวน 20 ครั้ง วัดแบบต่อเนื่องเพื่อนำไปหาค่า SD_{blank} ส่วนค่า slope หาจากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ (เมื่อ m คือ slope) ที่ได้จากกราฟมาตรฐาน

2.1.2.5 ศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC จากไอออนลบอื่น

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 100 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 100 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL และเตรียมสารละลายไอออนลบอื่นๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M และ 0.1 M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 10 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้ 5 นาที ติดตามค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ค่าการดูดกลืนแสง (A) ที่วัดได้นำมาคำนวณโดยใช้สูตร $(A/A_0) \times 100$ เมื่อ A คือค่า Abs_{464} ของ NBC ที่เติม CN^- และไอออนลบอื่น ส่วน A_0 คือค่า Abs_{464} ของ NBC ที่เติม CN^- เพียงอย่างเดียว โดยถ้าค่าที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลง $\pm 20\%$ แสดงว่าไอออนลบชนิดนั้นรบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC

ศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC จากไอออนลบอื่นทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} และปิเปตสารละลายดังตาราง 10

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ NBC เท่ากับ 1.0×10^{-4} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M, ไอออนลบ CN^- เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC และความเข้มข้นของไอออนลบอื่นๆ เท่ากับ 1 eq. และ 2 eq. ของจำนวนโมล CN^- และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

ตาราง 10 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนลบกว่นต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC จากไอออนลบอื่นด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปคโตรโฟโตเมตรี

ชนิด	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)				
	NBC	CTAB	CN^-	ไอออนลบ	
				$5.0 \times 10^{-2} \text{ M}$	0.1 M
				1 eq.	2 eq.
Blank	2.0	2.0	2.0	-	-
CN^- + ไอออนลบอื่นๆ	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

2.2 เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปไฮโดรเจล

2.2.1 NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลหรือเม็ดเจลสำเร็จรูป

2.2.1.1 วิธีการเตรียม NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น $2.5 \times 10^{-2} \text{ M}$ ปริมาตร 25 mL จากนั้นเปิดสารละลาย NBC ปริมาตร 20.0 mL, CTAB ปริมาตร 20.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 100 mL นำเม็ดพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลซึ่งมี NBC ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ และ CTAB ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$

2.2.1.2 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบ

เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น $1.0 \times 10^{-2} \text{ M}$ ปริมาตร 10 mL นำ NBC ($1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลาที่แตกต่างกันคือ 5, 10, 15 และ 20 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

2.2.1.3 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ที่ใช้เตรียม NBC บนตัว

ดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

เตรียม NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ NBC (1.0×10^{-4} M และ 2.0×10^{-4} M) เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC ปริมาตร 2 mL นำเม็ดพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

2.2.1.4 ศึกษาความจำเพาะของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลต

เจลในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

เตรียมสารละลายไอออนลบในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} M ปริมาตร 2 mL นำ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบต่างๆ เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

2.2.1.5 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูด

ซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 50 mL จากนั้นเจือจางสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} โดยปิเปตสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ดังตาราง 11 พร้อมปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL และนำ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

ตาราง 11 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลาย PO_4^{3-} ที่ใช้ (mL)
4.0×10^{-3}	8.0
3.0×10^{-3}	6.0
2.0×10^{-3}	4.0
1.0×10^{-3}	2.0
9.0×10^{-4}	1.8

ตาราง 11 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลาย PO_4^{3-} ที่ใช้ (mL)
8.0×10^{-4}	1.6
7.0×10^{-4}	1.4
6.0×10^{-4}	1.2
5.0×10^{-4}	1.0

2.2.1.6 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลายไอออนลบอื่นๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 12 โดยความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนลบ PO_4^{3-} เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC และความเข้มข้นของไอออนลบอื่นๆ เท่ากับ 1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-} และนำ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายผสมเป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

ตาราง 12 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

ขวด	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)	
	PO_4^{3-} (2.0×10^{-2} M)	ไอออนลบอื่น (2.0×10^{-2} M)
Blank	1	-
PO_4^{3-} + ไอออนลบอื่นๆ	1	1

หมายเหตุ: สารละลายที่ทำการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ไม่มีการเติมไอออนลบอื่นๆ ให้ปิเปตน้ำปราศจากไอออนแทนการเติมไอออนลบ

2.2.2 NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

2.2.2.1 วิธีการเตรียม NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

เตรียมสารละลาย sodium alginate 0.5 g ในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 15 mL เตรียมสารละลาย NBC ใน MeCN ความเข้มข้น 3.125×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 3.125×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL ปิเปตสารละลาย NBC 2.0 mL, CTAB 4.0 mL พร้อมปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL นำสารละลายผสมเทลงในสารละลาย sodium alginate นำไป sonicate ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อไล่ฟองอากาศจนหมด จากนั้นเตรียมสารละลาย CaCl_2 5% w/v ปริมาตร 100 mL นำกระบอกฉีดยาที่มีเข็มขนาด 180×1 (1.2×38 mm) ดูดสารละลายผสม NBC กับอัลจิเนตเจลหยดลงในสารละลาย CaCl_2 พร้อมทั้งคนสารละลายตลอดเวลา จากนั้นเม็ดอัลจิเนตเจล NBC ที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน และแช่เก็บไว้ในน้ำปราศจากไอออน โดย NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลมีความเข้มข้นของ NBC เท่ากับ 2.5×10^{-4} M และ CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M

2.2.2.2 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลในสารละลายไอออนลบ

เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL นำ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} โดยทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการแช่ ดังนี้ 5, 10, 15 และ 20 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่เวลาต่างๆ

2.2.2.3 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ที่ใช้เตรียม NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

เตรียม NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่มีความเข้มข้นของ NBC เท่ากับ 1.5×10^{-4} M, 2.0×10^{-4} M และ 2.5×10^{-4} M เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล ปริมาตร 2 mL นำเม็ดอัลจิเนตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลา 10 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

2.2.2.4 ศึกษาความจำเพาะของ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

เตรียมสารละลายไอออนลบในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 2 mL นำ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบต่างๆ เป็นเวลา 10 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดเจล

2.2.2.5 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลสามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL จากนั้นเจือจางสารละลายไอออนลบ CN^- โดยปิเปตสารละลายไอออนลบ CN^- ดังตาราง 13 พร้อมปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL และนำ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ CN^- ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 10 นาที

การศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลสามารถตรวจวัดได้ ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL จากนั้นเจือจางสารละลายโดยปิเปตสารละลายดังตาราง 14 และ 15 ตามลำดับ สารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะถูกนำไปทดสอบกับ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลเช่นเดียวกับกรณีของไอออนลบ CN^-

ตาราง 13 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลาย CN^- ที่ใช้ (mL)
1.0×10^{-2}	2.0
9.0×10^{-3}	1.8
8.0×10^{-3}	1.6
7.0×10^{-3}	1.4
6.0×10^{-3}	1.2
5.0×10^{-3}	1.0

ตาราง 13 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้ายของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลาย CN^- ที่ใช้ (mL)
4.0×10^{-3}	0.8
3.0×10^{-3}	0.6
2.0×10^{-3}	0.4
1.0×10^{-3}	0.2

ตาราง 14 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลาย CO_3^{2-} ที่ใช้ (mL)
1.0×10^{-2}	2.0
9.0×10^{-3}	1.8
8.0×10^{-3}	1.6
7.0×10^{-3}	1.4
6.0×10^{-3}	1.2
5.0×10^{-3}	1.0
4.0×10^{-3}	0.8
3.0×10^{-3}	0.6
2.0×10^{-3}	0.4
1.0×10^{-3}	0.2

ตาราง 15 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลาย PO_4^{3-} ที่ใช้ (mL)
5.0×10^{-3}	5.0
4.0×10^{-3}	4.0
3.0×10^{-3}	3.0

ตาราง 15 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลาย PO_4^{3-} ที่ใช้ (mL)
2.0×10^{-3}	2.0
1.0×10^{-3}	1.0
9.0×10^{-4}	0.9
8.0×10^{-4}	0.8
7.0×10^{-4}	0.7
6.0×10^{-4}	0.6
5.0×10^{-4}	0.5

2.2.2.6 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลายไอออนลบอื่นๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 16 จะได้สารผสมที่มีความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนลบ CN^- เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC และความเข้มข้นของไอออนลบอื่นๆ เท่ากับ 1 eq. ของจำนวนโมล CN^- และนำ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลแช่ลงในสารละลายผสมเป็นเวลา 10 นาที

ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลจากไอออนลบอื่น ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้นเดียวกันกับไอออนลบ CN^-

ตาราง 16 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

ขวด	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)	
	CN^- (5.0×10^{-2} M)	ไอออนลบอื่น ๆ
Blank	1	-
CN^- + ไอออนลบอื่นๆ	1	1

หมายเหตุ: สารละลายที่ทำการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ที่ไม่มีการเติมไอออนลบอื่นๆ ให้ปิเปตน้ำปราศจากไอออนแทนการเติมไอออนลบ

3. ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)

3.1 เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปสารละลาย

3.1.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

3.1.1.1 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไอออนลบในการตรวจวัดด้วย DCC

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL และเตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 17 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเรืองแสงของสารละลายภายใต้แสง black light

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 5.0×10^{-5} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} เท่ากับ 1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

ตาราง 17 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของไอออนลบที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (eq. ของจำนวนโมลของ DCC)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC	CTAB	PO_4^{3-}
0	2.0	2.0	-
1	2.0	2.0	0.1
5	2.0	2.0	0.5
10	2.0	2.0	1.0
15	2.0	2.0	1.5
20	2.0	2.0	2.0

3.1.1.2 ศึกษาความจำเพาะของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย DCC 2.0 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL และสารละลายไอออนลบ 1.0 mL ลงในขวดปรับปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเรืองแสงของสารละลายภายใต้แสง black light

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 5.0×10^{-5} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบเท่ากับ 10 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

3.1.1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL

จากนั้นเจือจางสารละลายไอออนลบ CN^- โดยปิเปตสารละลายดังตาราง 18 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเรืองแสงของสารละลายภายใต้แสง black light

การศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ปริมาตร 25 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ ปริมาตร 50 mL จากนั้นเจือจางสารละลายโดยปิเปตสารละลายดังตาราง 19 และ 20 ตามลำดับ

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ $5.0 \times 10^{-5} \text{ M}$ และ CTAB เท่ากับ $5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$ และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

ตาราง 18 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC ($2.5 \times 10^{-4} \text{ M}$)	CTAB	CN^- ($5.0 \times 10^{-2} \text{ M}$)
0.0	2.0	2.0	-
1.0×10^{-2}	2.0	2.0	2.0
9.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.8
8.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.6
7.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.4
6.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.2
5.0×10^{-3}	2.0	2.0	1.0
4.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.8
3.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.6
2.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.4
1.0×10^{-3}	2.0	2.0	0.2

ตาราง 19 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-4} M)	CTAB	CO_3^{2-} (5.0×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
1.0×10^{-3}	2.0	2.0	2.0
9.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.8
8.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.6
7.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.4
6.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.2
5.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.0
4.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.8
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.6
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.4
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.2

ตาราง 20 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-4} M)	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
5.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.0
4.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.9
4.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.8
3.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.7
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.6

ตาราง 20 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-4} M)	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-3} M)
2.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.5
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.4
1.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.3
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.2

3.1.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

3.1.2.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC ก่อนและหลังการตรวจวัดไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย DCC 2.0 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL สารละลายไอออนลบ 2.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงช่วง 300-600 nm ทั้งก่อนและหลังการเติมไอออนลบ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโมเลกุลเซนเซอร์ DCC

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 1.0×10^{-4} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบเท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

3.1.3 การตรวจวัดด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

3.1.3.1 ศึกษาหาความเข้มข้นและการกระตุ้นที่เหมาะสมของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL และเตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จาก

นั้นปีเตสสารละลายดังตาราง 21 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 15 นาที นำไปวัดค่าการคายแสงในช่วง 300-650 nm โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm, 315 nm และ 350 nm

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

ตาราง 21 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของ DCC ที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

ความเข้มข้น สุดท้ายของ DCC (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			
	DCC (5.0×10^{-4} M)	MeCN	CTAB	PO_4^{3-} (5.0×10^{-2} M)
1.0×10^{-4}	2.0	-	2.0	-
5.0×10^{-5}	1.0	1.0	2.0	-
1.0×10^{-5}	0.2	1.8	2.0	-
5.0×10^{-6}	0.1	1.9	2.0	-
1.0×10^{-4}	2.0	-	2.0	2.0
5.0×10^{-5}	1.0	1.0	2.0	1.0
1.0×10^{-5}	0.2	1.8	2.0	0.2
5.0×10^{-6}	0.1	1.9	2.0	0.1

3.1.3.2 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบของ DCC

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL และเตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปีเตสสารละลาย DCC 1.0 mL, MeCN 1.0 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} 1.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL นำไป

วัดสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm ทุก 5 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 5.0×10^{-5} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

3.1.3.3 ศึกษาความจำเพาะของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลาย DCC 2.0 mL สารละลาย CTAB 2.0 mL สารละลายไอออนลบ 1.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 5 นาที นำไปวัดสเปกตรัมการคายแสงโดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm ทั้งก่อนและหลังการเติมไอออนลบ เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการคายแสงของโมเลกุลเซนเซอร์ DCC

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 5.0×10^{-5} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M และความเข้มข้นของไอออนลบเท่ากับ 10 eq. ของจำนวนโมล DCC และได้ระบบตัวทำละลายเป็น $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4)

3.1.3.4 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 22 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 5 นาที ติดตามค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 392 nm นำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟเส้นตรงที่มีแกน x คือความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- (M) และแกน y คือค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 392 nm แล้วคำนวณค่า LOD จากสูตร $\text{LOD} = 3\text{SD}_{\text{blank}}/\text{slope}$ และค่า LOQ จากสูตร $\text{LOQ} = 10\text{SD}_{\text{blank}}/\text{slope}$

การศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยเตรียมสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 25 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น 2.5×10^{-3} M ปริมาตร 50 mL และปิเปตสารละลายดังตาราง 23 และ 24 ตามลำดับ โดยการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} ติดตามค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 387 nm ส่วนการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ติดตามค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm

ตาราง 22 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CN^- ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-4} M)	CTAB	CN^- (5.0×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
1.0×10^{-3}	2.0	2.0	2.0
9.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.8
8.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.6
7.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.4
6.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.2
5.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.0
4.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.8
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.6
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.4
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.2

ตาราง 23 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-4} M)	CTAB	CO_3^{2-} (2.5×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
5.0×10^{-4}	2.0	2.0	2.0
4.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.8
4.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.6
3.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.4
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.2
2.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.0
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.8
1.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.6
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.4
5.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.2

ตาราง 24 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-3} M)	CTAB	PO_4^{3-} (2.5×10^{-3} M)
0.0	2.0	2.0	-
5.0×10^{-4}	2.0	2.0	2.0
4.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.8
4.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.6
3.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.4
3.0×10^{-4}	2.0	2.0	1.2
2.5×10^{-4}	2.0	2.0	1.0
2.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.8

ตาราง 24 (ต่อ)

ความเข้มข้นสุดท้าย ของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)		
	DCC (2.5×10^{-3} M)	CTAB	PO_4^{3-} (2.5×10^{-3} M)
1.5×10^{-4}	2.0	2.0	0.6
1.0×10^{-4}	2.0	2.0	0.4
5.0×10^{-5}	2.0	2.0	0.2

หมายเหตุ: สารละลาย DCC ที่ไม่มีการเติมสารละลายไอออนลบจะถูกนำมาใช้วัดค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดจำนวน 20 ครั้ง วัดแบบต่อเนื่องเพื่อนำไปหาค่า SD_{blank} ส่วนค่า slope หาจากสมการเส้นตรง $y = mx + c$ (เมื่อ m คือ slope) ที่ได้จากกราฟมาตรฐาน

3.1.3.5 ศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ DCC จากไอออนลบอื่น

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL และเตรียมสารละลายไอออนลบอื่นๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 25 และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL ตั้งสารผสมไว้เป็นเวลา 5 นาที ติดตามค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 nm ค่าการคายแสง (I) ที่วัดได้นำมาคำนวณโดยใช้สูตร $(\Delta I / I_0) \times 100$ เมื่อ ΔI คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- และไอออนลบอื่น ส่วน I_0 คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- เพียงอย่างเดียว โดยถ้าค่าที่คำนวณได้เปลี่ยนแปลง $\pm 20\%$ แสดงว่าไอออนลบชนิดนั้นรบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ DCC

การศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ DCC จากไอออนลบอื่น ทำการเตรียมสารละลายเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DCC เท่ากับ 5.0×10^{-5} M, CTAB เท่ากับ 5.0×10^{-3} M, CN^- เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC และความเข้มข้นของไอออนลบอื่นๆ เท่ากับ 1 eq. ของจำนวนโมล CN^- และได้ระบบตัวทำละลายเป็น MeCN:H₂O (1:4)

ตาราง 25 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนลบต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ DCC จากไอออนลบอื่นด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

ชนิด	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)			ไอออนลบ
	DCC	CTAB	CN^- (2.5×10^{-2} M)	
Blank	2.0	2.0	2.0	-
CN^- + ไอออนลบอื่นๆ	2.0	2.0	2.0	2.0

3.2 เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปไฮโดรเจลชนิดพอลิอะคริเลตเจลหรือเมตเจลสำเร็จรูป

3.2.1 วิธีการเตรียม DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลหรือเมตเจลสำเร็จรูป

เตรียมสารละลาย DCC ใน MeCN ความเข้มข้น 1.25×10^{-3} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลาย CTAB ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL จากนั้นเปิดสารละลาย DCC ปริมาตร 20.0 mL, CTAB ปริมาตร 20.0 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 100 mL นำเมตพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลซึ่งมี DCC ความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M และ CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M

3.2.2 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบ

เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL นำ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ที่เวลาแตกต่างกันคือ 5, 10, 15 และ 20 นาที สังเกตการเรืองแสงของเมตเจลภายใต้แสง black light

3.2.3 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ DCC ที่ใช้เตรียม DCC บนตัวดูดซับ พอลิอะคริเลตเจล

เตรียม DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ของ DCC (5.0×10^{-5} M, 1.0×10^{-4} M, 2.0×10^{-4} M, 2.5×10^{-4} M และ 5.0×10^{-4} M) เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ปริมาตร 2 mL นำเม็ดพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเรืองแสงของเม็ดเจลภายใต้แสง black light

3.2.4 ศึกษาความจำเพาะของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในการ ตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

เตรียมสารละลายไอออนลบในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 2.5×10^{-2} M ปริมาตร 2 mL นำ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบต่างๆ เป็นเวลา 15 นาที สังเกตการเรืองแสงของเม็ดเจลภายใต้แสง black light

3.2.5 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

เตรียมสารละลายไอออนลบ CN^- ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 50 mL จากนั้นเจือจางสารละลายไอออนลบ CN^- โดยปิเปตสารละลายไอออนลบ CN^- ดังตาราง 26 พร้อมปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จนปริมาตรเป็น 10 mL และนำ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบ CN^- ที่ความเข้มข้นต่างๆ เป็นเวลา 15 นาที

การศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้ ทำการทดลองเช่นเดียวกับการตรวจวัดไอออนลบ CN^- แต่เปลี่ยนสารละลายไอออนลบ CN^- เป็นสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL และสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ความเข้มข้น 1.0×10^{-2} M ปริมาตร 50 mL จากนั้นเจือจางสารละลายโดยปิเปตสารละลายดังตาราง 27 และ 28 ตามลำดับ

ตาราง 26 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ CN^- (M)	ปริมาตรสารละลาย CN^- ที่ใช้ (mL)
9.0×10^{-2}	9.0
8.0×10^{-2}	8.0
7.0×10^{-2}	7.0
6.0×10^{-2}	6.0
5.0×10^{-2}	5.0
4.0×10^{-2}	4.0
3.0×10^{-2}	3.0
2.0×10^{-2}	2.0
1.0×10^{-2}	1.0

ตาราง 27 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ CO_3^{2-} (M)	ปริมาตรสารละลาย CO_3^{2-} ที่ใช้ (mL)
4.0×10^{-2}	8.0
3.0×10^{-2}	6.0
2.0×10^{-2}	4.0
1.0×10^{-2}	2.0
9.0×10^{-3}	1.8
8.0×10^{-3}	1.6
7.0×10^{-3}	1.4
6.0×10^{-3}	1.2
5.0×10^{-3}	1.0

ตาราง 28 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

ความเข้มข้นสุดท้ายของ PO_4^{3-} (M)	ปริมาตรสารละลาย PO_4^{3-} ที่ใช้ (mL)
9.0×10^{-3}	9.0
8.0×10^{-3}	8.0
7.0×10^{-3}	7.0
6.0×10^{-3}	6.0
5.0×10^{-3}	5.0
4.0×10^{-3}	4.0
3.0×10^{-3}	3.0
2.0×10^{-3}	2.0
1.0×10^{-3}	1.0

3.2.6 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

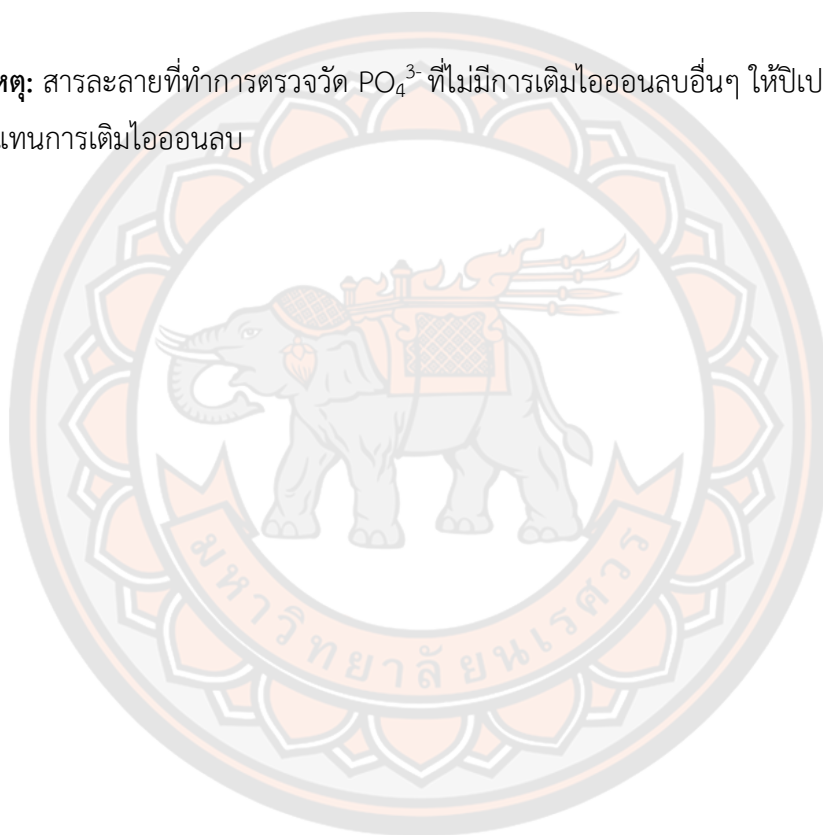
เตรียมสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 25 mL เตรียมสารละลายไอออนลบอื่นๆ ในน้ำปราศจากไอออน ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M ปริมาตร 10 mL จากนั้นปิเปตสารละลายดังตาราง 29 และนำ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลายผสมเป็นเวลา 15 นาที

หมายเหตุ: สารละลายผสมจะมีความเข้มข้นสุดท้ายของไอออนลบ PO_4^{3-} เท่ากับ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC และความเข้มข้นของไอออนลบอื่นๆ เท่ากับ 1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-}

ตาราง 29 ปริมาตรสารละลายที่ใช้ในการศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

ขวด	ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (mL)	
	PO_4^{3-}	ไอออนลบอื่น
Blank	1	-
PO_4^{3-} + ไอออนลบอื่นๆ	1	1

หมายเหตุ: สารละลายที่ทำการตรวจวัด PO_4^{3-} ที่ไม่มีการเติมไอออนลบอื่นๆ ให้ปีเปตน้ำปราศจากไอออนแทนการเติมไอออนลบ



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC)

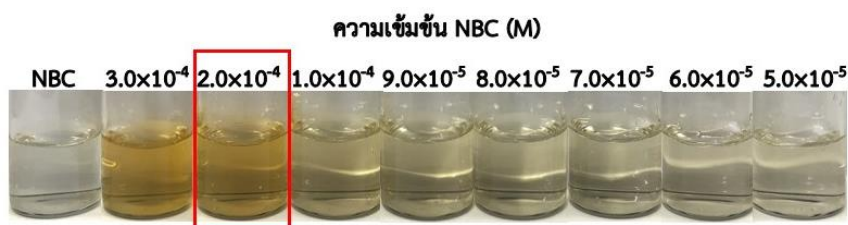
1. เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปสารละลาย

โมเลกุลเซนเซอร์ NBC เป็นอนุพันธ์ของคาร์บาโซลที่มีการเติมหมู่ดิงอิเล็กตรอน 2 ชนิด คือ หมู่ไนโตร ($-\text{NO}_2$) และหมู่โบรม ($-\text{Br}$) ที่ตำแหน่ง 3, 6-carbazole โมเลกุล NBC ถูกนำมาใช้ศึกษาความสามารถในการเป็นเซนเซอร์ที่เปลี่ยนสีได้สำหรับใช้ตรวจวัดไอออนลบในน้ำ แต่เนื่องจาก NBC เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ดีใน MeCN ดังนั้นระบบตัวทำละลายที่เลือกใช้ในงานวิจัย คือ MeCN:H₂O (1:4) และมีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M

1.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

1.1.1 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

สารละลาย NBC ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ถูกนำมาตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า เมื่อทำการเติมสารละลายไอออนลบ CN⁻ ที่ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC ผลการทดลองพบว่าสารละลาย NBC เกิดการเปลี่ยนสีที่สังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} M แต่จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างชัดเจนที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-4} M (ภาพ 30) ดังนั้น NBC ที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-4} M จะถูกนำมาใช้ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า

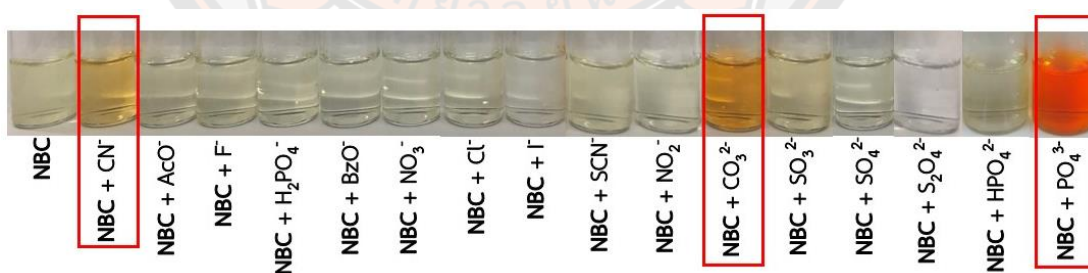


ภาพ 30 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CN⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC)

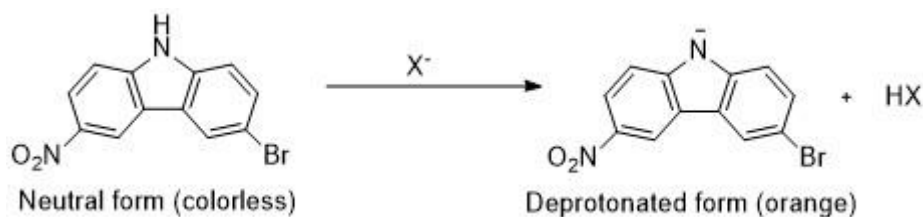
1.1.2 ศึกษาความจำเพาะของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

โมเลกุลเซนเซอร์ **NBC** ที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-4} M ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ถูกนำมาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบจำนวน 16 ชนิดที่มีประจุ -1, -2 และ -3 ดังนี้ CN^- , AcO^- , F^- , H_2PO_4^- , BzO^- , NO_3^- , Cl^- , I^- , SCN^- , NO_2^- , CO_3^{2-} , SO_3^{2-} , SO_4^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$, HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-}

ผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายโมเลกุลเซนเซอร์เมื่อมีการเติมไอออนลบจำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล **NBC** พบว่าสารละลาย **NBC** เกิดการเปลี่ยนสีจากใสไม่มีสีเป็นสีส้มกับไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูงคือ PO_4^{3-} ส่วนการเติมไอออนลบ CN^- และ CO_3^{2-} จะพบการเปลี่ยนสีของสารละลายจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลือง ส่วนไอออนลบอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนสี (ภาพ 31) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่ากลไกการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายเกิดจากการหลุดโปรตอนของ NH-carbazole โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง ทำให้เกิดสปีชีส์ใหม่ คือ **NBC** ที่อยู่ในโครงสร้างที่หลุดโปรตอนและทำให้เกิดการเปลี่ยนสีขึ้น (ภาพ 32) เนื่องจากโมเลกุล **NBC** เป็นอนุพันธ์ของคาร์บาโซลที่มีหมู่ดิงอิลิเกตรอน ที่ตำแหน่ง 3 และ 6 จึงส่งผลทำให้ที่ตำแหน่ง NH ของวงห้าเหลี่ยมมีความเป็นกรด (acidic proton) ทำให้สามารถถูกสารที่มีสมบัติเป็นเบสเข้ามาดึงโปรตอนที่ NH ให้หลุดออกไปได้ ซึ่งกลไกดังกล่าวได้รับการยืนยันจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ทำการศึกษด้วยเทคนิค $^1\text{H-NMR}$ หากพิจารณาถึงความเป็นเบสของไอออนลบทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย สามารถเรียงลำดับความเป็นเบสได้ดังนี้ $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^- > \text{HPO}_4^{2-} > \text{AcO}^- > \text{BzO}^- > \text{SCN}^- > \text{NO}_2^- > \text{F}^- > \text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{SO}_3^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{I}^-$



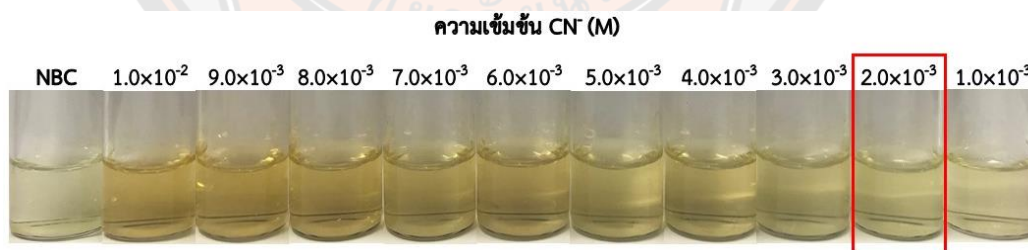
ภาพ 31 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย **NBC** (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล **NBC**)



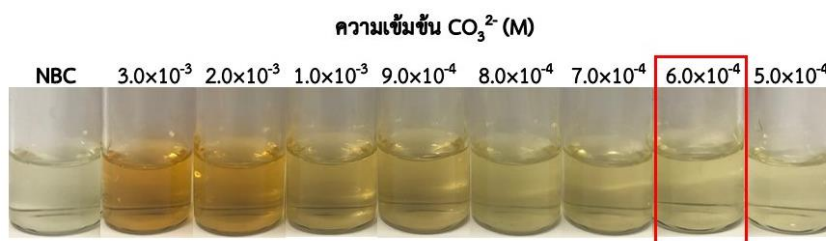
ภาพ 32 กลไกการหลุดโปรตอนที่ NH-carbazole ของ NBC โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง

1.1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้

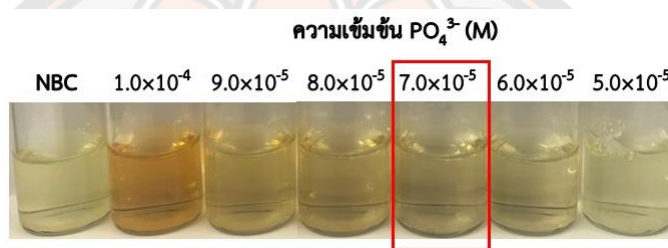
NBC ให้ความสำคัญต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ดังนั้นการทดลองนี้จึงสนใจหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตสีด้วยตาเปล่า ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบเพิ่มมากขึ้นจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายจากใสไม่มีสีเป็นสีเหลืองเข้มมากขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ต่ำที่สุดที่ยังสามารถมองเห็นการเปลี่ยนสีของสารละลายได้คือที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-3} M (ภาพ 33), 6.0×10^{-4} M (ภาพ 34) และ 7.0×10^{-5} M (ภาพ 35) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า NBC มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอออนลบ $PO_4^{3-} > CO_3^{2-} > CN^-$ เนื่องจาก PO_4^{3-} มีค่าความเป็นเบสที่แรงกว่า CO_3^{2-} และ CN^- ทำให้สามารถดึงโปรตอนที่ NH-carbazole ได้ดีกว่า



ภาพ 33 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกัน



ภาพ 34 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกัน

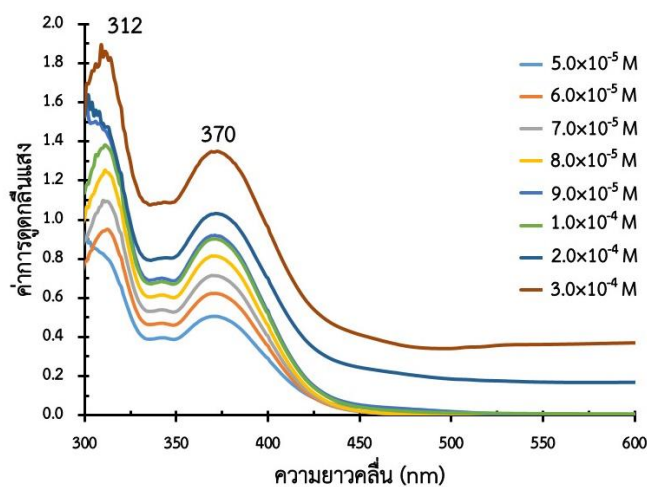


ภาพ 35 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกัน

1.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

1.2.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

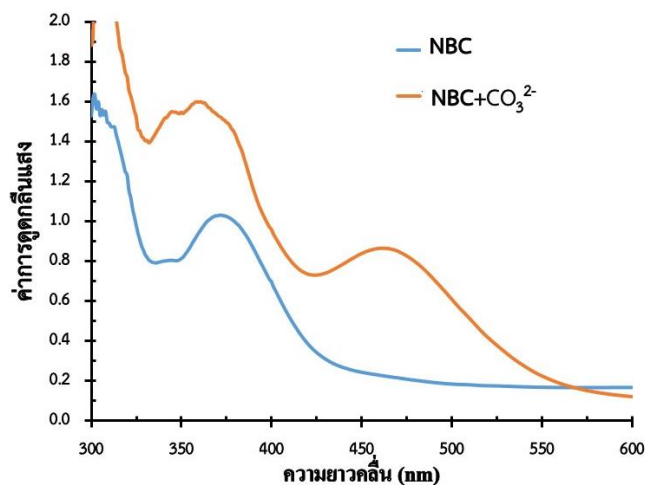
สารละลาย NBC ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ถูกนำมาตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-600 nm ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC (ภาพ 36) ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 312 nm และ 370 nm ซึ่งที่ความยาวคลื่น 370 nm เป็นการดูดกลืนแสงชนิด $n-\pi^*$ และความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 0.5-1.0 คือ ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} M



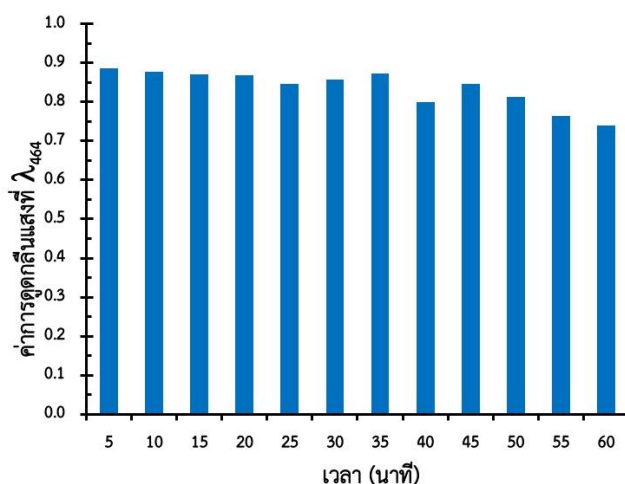
ภาพ 36 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)

1.2.2 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบของ NBC

สารละลาย NBC (2.0×10^{-4} M) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ภายหลังการเติมสารละลาย CO_3^{2-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบการปรากฏค่าการดูดกลืนแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 464 nm (ภาพ 37) ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดสีเหลืองของสารละลาย ในการทดลองเมื่อผสมสารทุกชนิดเข้าด้วยกันจะต้องตั้งสารผสมทิ้งไว้เพื่อให้ขบวนการเกิดสีเหลืองของสารละลายเกิดได้สมบูรณ์ที่สุด ดังนั้นการทดลองในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการตั้งสารผสมทิ้งไว้ก่อนจะนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ผลการศึกษาพบว่าที่เวลา 5 นาที จะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด (ภาพ 38) และพบการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าที่เวลา 35 นาที จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่สูงขึ้นอีกครั้ง แต่มีค่าการดูดกลืนแสงที่ไม่แตกต่างกันกับที่เวลา 5 นาที ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมหลังการผสมสารละลายคือ 5 นาที



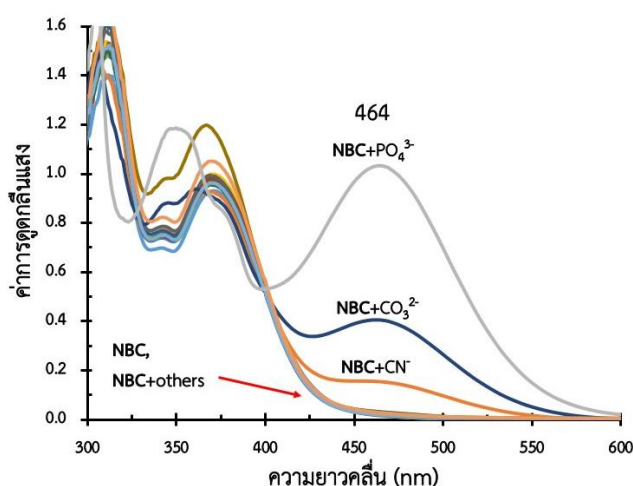
ภาพ 37 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ CO₃²⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC)



ภาพ 38 เปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (2.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO₃²⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) และตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ

1.2.3 ศึกษาความจำเพาะของ NBC ในการตรวจวัดไอออนลบ

สารละลาย NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ถูกนำมาศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล NBC ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ความยาวคลื่น 370 nm จะลดลง และมีการปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใหม่ที่ 464 nm (ภาพ 39) ค่าการดูดกลืนแสงใหม่สอดคล้องกับผลการเปลี่ยนสีของสารละลาย NBC จากใสไม่มีสีเป็นสีส้ม โดยเกิดจากขบวนการ Intramolecular charge transfer (ICT) การเติมไอออนลบ PO_4^{3-} จะสังเกตเห็นค่าการดูดกลืนแสงใหม่ได้อย่างชัดเจนที่สุด ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า NBC มีความจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} , CO_3^{2-} และ CN^-



ภาพ 39 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC)

1.2.4 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC สามารถตรวจวัดได้

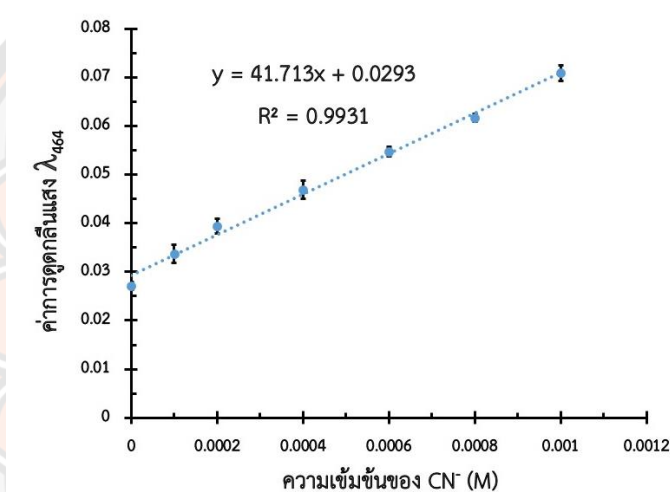
ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยใช้ NBC (1.0×10^{-4} M) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) สามารถคำนวณจากการติดตามค่าการดูดกลืนแสงของ λ_{max} ใหม่ที่ปรากฏภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- ,

CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างๆ และนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- (ภาพ 40), CO_3^{2-} (ภาพ 41) และ PO_4^{3-} (ภาพ 42) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า LOD และ LOQ ดังสมการ (1) และ (2)

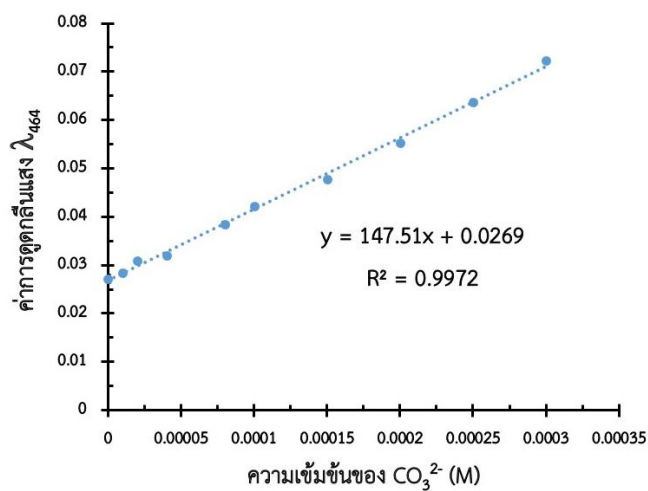
$$\text{LOD} = 3\text{SD}_{\text{blank}}/\text{slope} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{LOQ} = 10\text{SD}_{\text{blank}}/\text{slope} \quad \dots\dots\dots (2)$$

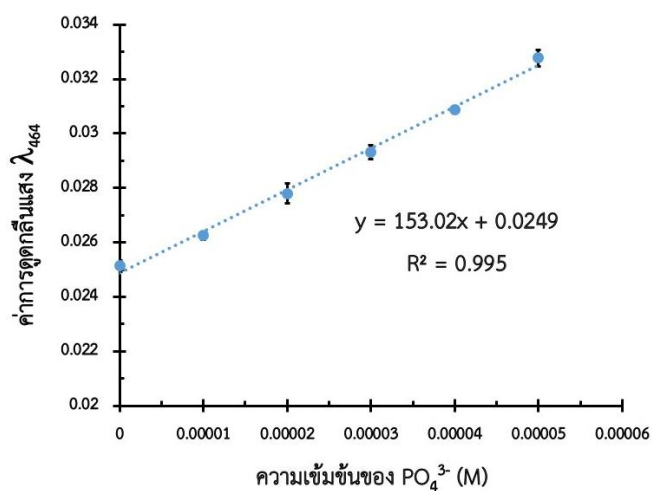
ผลการคำนวณค่า LOD และ LOQ ของ **NBC** ในการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} แสดงดังตาราง 30 ซึ่งจะเห็นว่า **NBC** มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอออนลบตามลำดับดังนี้ $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^-$



ภาพ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



ภาพ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



ภาพ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ความยาวคลื่น 464 nm ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)

ตาราง 30 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ โดย NBC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)

ไอออนลบ	ช่วงความเป็นเส้นตรง	LOD (M)	LOQ (M)
CN ⁻	4.6×10^{-5} - 1.0×10^{-3}	4.64×10^{-5}	1.55×10^{-4}
CO ₃ ²⁻	1.3×10^{-5} - 3.0×10^{-4}	1.31×10^{-5}	4.37×10^{-5}
PO ₄ ³⁻	1.2×10^{-5} - 5.0×10^{-5}	1.26×10^{-5}	4.21×10^{-5}

หมายเหตุ: SD_{blank} มีค่าเท่ากับ 6.45×10^{-4}

1.2.5 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ของ NBC จากไอออนลบอื่น

การศึกษาค่าการเลือกจำเพาะของ NBC (1.0×10^{-4} M) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) สำหรับตรวจวัดไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ในขณะที่มีการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (AcO⁻, F⁻, H₂PO₄⁻, BzO⁻, NO₃⁻, Cl⁻, SCN⁻, NO₂⁻, SO₃²⁻, SO₄²⁻, S₂O₄²⁻ และ HPO₄²⁻) จำนวน 1 eq. และ 2 eq. ของจำนวนโมล CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ไอออนลบที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 464 nm เปลี่ยนแปลง $\pm 20\%$ จะถือว่าเป็นไอออนที่รบกวนการตรวจวัด CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นของระบบ NBC+CN⁻, NBC+CO₃²⁻ และ NBC+PO₄³⁻ จะกำหนดให้เป็น 100% และ % การรบกวนจากไอออนลบอื่น คำนวณจากสูตร (3)

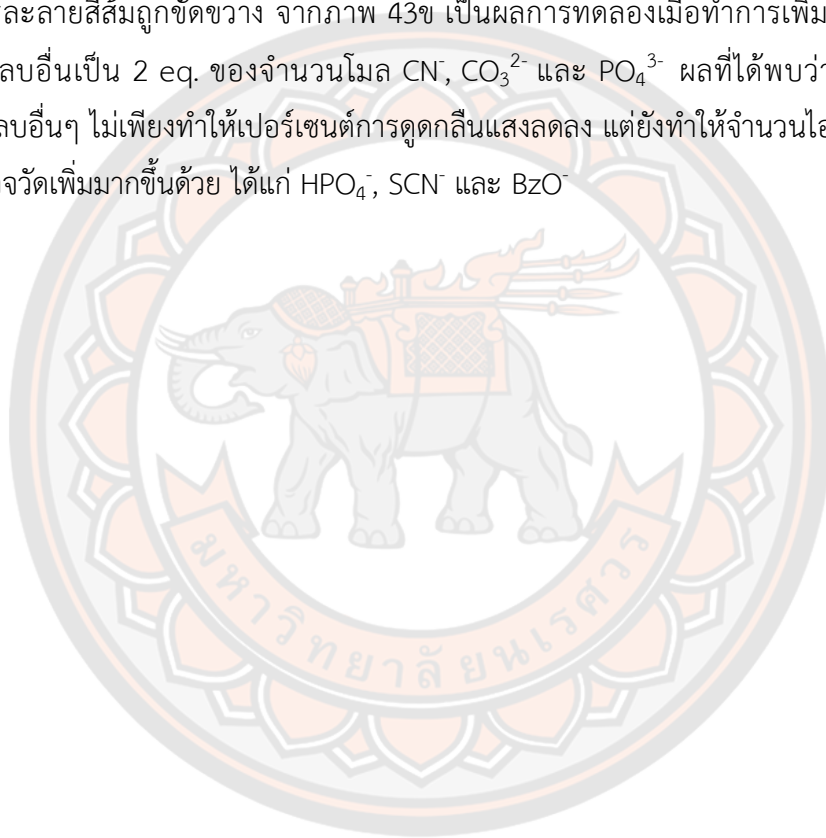
$$\frac{A}{A_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3)$$

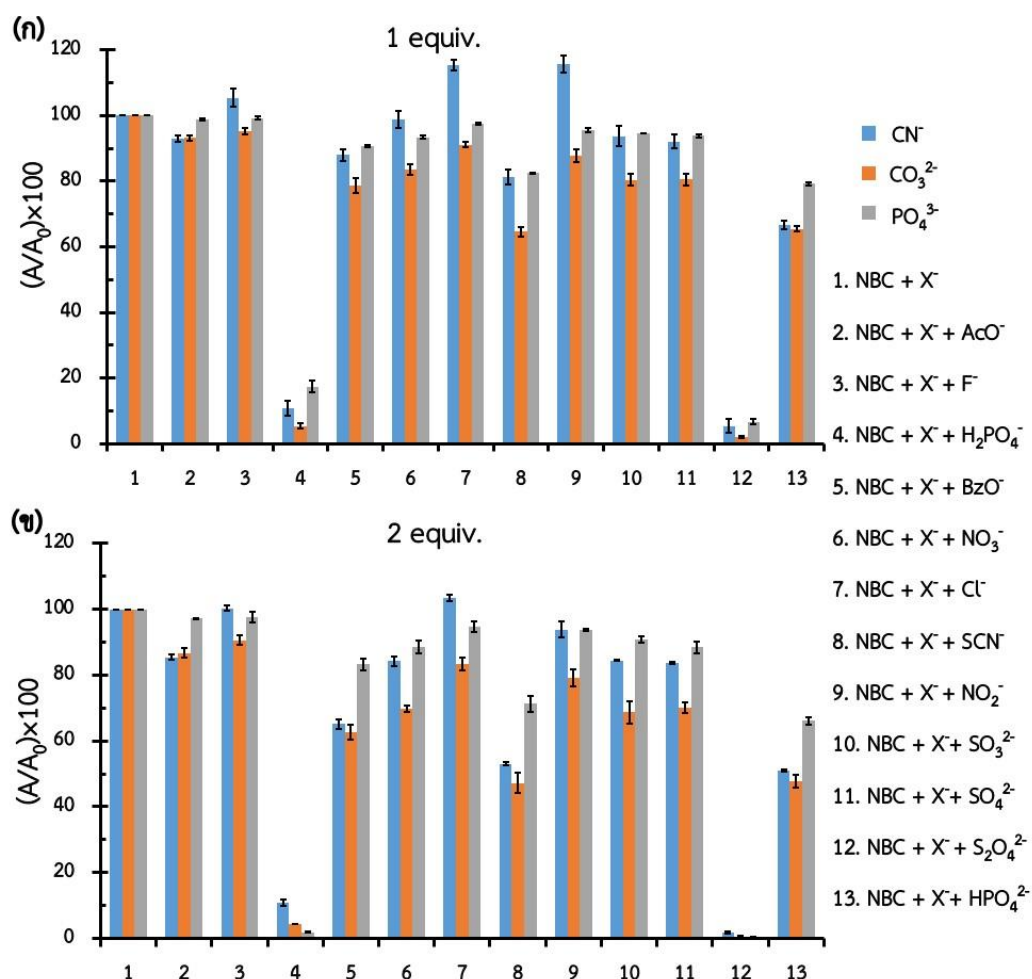
เมื่อ A คือค่า Abs₄₆₄ ของ NBC ที่เติม CN⁻ และไอออนลบอื่น

A₀ คือค่า Abs₄₆₄ ของ NBC ที่เติม CN⁻ เพียงอย่างเดียว

ผลการศึกษาจากภาพ 43ก พบว่า H₂PO₄⁻ (กลุ่ม 4) และ S₂O₄²⁻ (กลุ่ม 12) ส่งผลรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻ (แถบสีฟ้า), CO₃²⁻ (แถบสีส้ม) และ PO₄³⁻ (แถบสีเทา) ทำให้เกิดการลดลงของค่าการดูดกลืนแสง (มากกว่า 85%) นอกจากนี้ยังมีการรบกวนจาก BzO⁻ (กลุ่ม 5), SCN⁻ (กลุ่ม 8) และ HPO₄²⁻ (กลุ่ม 13) ต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻ และ CO₃²⁻ เนื่องจากการดูดกลืนแสง

ลดลงเล็กน้อย (20-30%) แต่ไอออนลบเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} จากผลการทดลองพบว่าค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 464 nm ลดลงอย่างมาก ในกรณีไอออนลบ H_2PO_4^- และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ดังนั้นไอออนลบทั้งสองนี้จะรบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} การรบกวนการตรวจวัดอธิบายได้จาก H_2PO_4^- เป็นไอออนลบที่ให้ H^+ ในขณะที่ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น HSO_3^+ (Lister & Garvie, 1959) ซึ่งเป็นไอออนลบที่ให้ H^+ ได้เช่นกัน เมื่อมีไอออนลบที่ให้ H^+ ได้อยู่ในระบบจะทำให้ไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ซึ่งเป็นเบส จะรับ H^+ จาก H_2PO_4^- และ HSO_3^+ แทนที่จะเข้าไปดิงโปรตอนที NH ของ **NBC** จึงทำให้กระบวนการเกิดสารละลายสีส้มถูกขัดขวาง จากภาพ 43ข เป็นผลการทดลองเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของ ไอออนลบอื่นเป็น 2 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ผลที่ได้พบว่าการเพิ่มปริมาณ ไอออนลบอื่นๆ ไม่เพียงทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงลดลง แต่ยังทำให้จำนวนไอออนลบที่รบกวน การตรวจวัดเพิ่มมากขึ้นด้วย ได้แก่ HPO_4^- , SCN^- และ BZO^-





ภาพ 43 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบอื่นๆ จำนวน (ก) 1 eq. และ (ข) 2 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}

หมายเหตุ: เมื่อ A คือค่า Abs_{464} ของ NBC ที่เติม CN^- และไอออนลบอื่น A_0 คือค่า Abs_{464} ของ NBC ที่เติม CN^- เพียงอย่างเดียว

2. เซนเซอร์ 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) ในรูปไฮโดรเจล

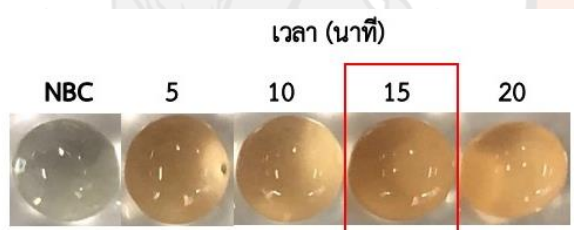
2.1 NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลหรือเม็ดเจลสำเร็จรูป

NBC ถูกนำมาดูดซับบนวัสดุรองรับไฮโดรเจลชนิดเม็ด 2 ชนิด คือพอลิอะคริเลตเจลและอัลจินेटเจล การเตรียม NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลทำได้โดยนำพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงใน

สารละลาย NBC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่มี NBC ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} M และ CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M

2.1.1 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบ

NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลถูกนำมาใช้ทดสอบการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} โดยทำการแช่เม็ดเจลลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ในน้ำปราศจากไอออน ที่ระยะเวลาต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแช่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลเป็นเวลา 5 นาที สีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงสีจากใสไม่มีสีเป็นสีส้ม และเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที สีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลเปลี่ยนเป็นสีส้มเข้มมากขึ้น และสีเข้มไม่แตกต่างจากการแช่ที่ระยะเวลานานขึ้น (20 นาที) (ภาพ 44) ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบแล้วทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจน คือเวลา 15 นาที

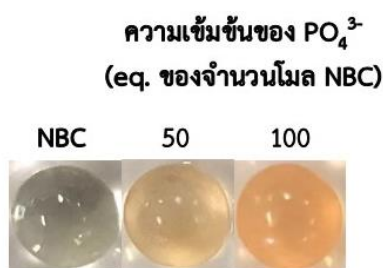


ภาพ 44 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ที่เวลาต่างๆ

2.1.2 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ที่ใช้เตรียม NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

สารละลาย NBC ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} M และ 2.0×10^{-4} M ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ถูกเตรียมขึ้นเพื่อแช่เม็ดพอลิอะคริเลตเจล ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล คือ 1.0×10^{-4} M เนื่องจากสารละลาย NBC ที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-4} M เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดตะกอน จนทำให้สารละลายขุ่นจึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้เตรียม NBC ที่ดูดซับบนเม็ดพอลิอะคริเลตเจล เพราะอาจจะทำให้ความเข้มข้นของ NBC บน

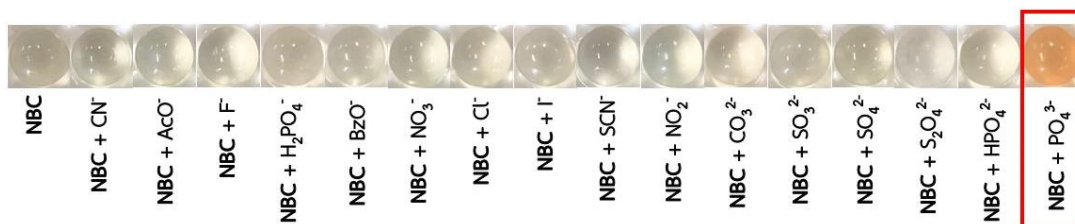
ตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลไม่แน่นอน และนอกจากนี้เมื่อนำ NBC ที่ความเข้มข้น 1.0×10^{-4} M บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลมาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC พบว่าสีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีส้มหลังจากแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลา 15 นาที (ภาพ 45) โดยสีที่เกิดขึ้นจากการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ 50 eq. จะได้สีส้มที่อ่อนกว่าการตรวจวัด PO_4^{3-} ที่ 100 eq.



ภาพ 45 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 15 นาที

2.1.3 ศึกษาความจำเพาะของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

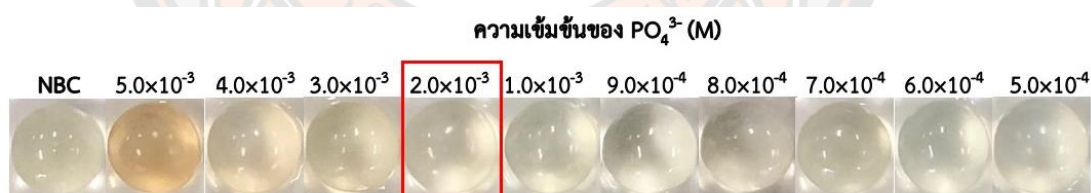
NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลถูกนำมาทดสอบการเปลี่ยนสีกับไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ในน้ำปราศจากไอออน ผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจล พบว่าจะเกิดการเปลี่ยนสีจากใสไม่มีสีเป็นสีส้มภายหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ส่วนเม็ดพอลิอะคริเลตเจลที่แช่ลงในสารละลายไอออนลบอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนสี (ภาพ 46) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดไอออนลบในสารละลายน้ำได้เช่นเดียวกับการใช้ NBC ในรูปของสารละลาย แต่จะมีความเลือกจำเพาะในการตรวจวัดไอออนลบที่มีความเป็นเบสที่สูงเท่านั้น คือ PO_4^{3-} เนื่องจากเม็ดพอลิอะคริเลตเจลมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบโครงสร้างตาข่าย ดังนั้นโมเลกุลเซนเซอร์ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลจึงมีความสามารถที่ลดลงในการเกิดอันตรกิริยากับไอออนลบในสารละลาย จึงทำให้มีเฉพาะไอออนลบที่เป็นเบสสูงมากๆ เท่านั้น จึงจะเข้าไปเกิดอันตรกิริยากับ NBC ในเม็ดเจลได้ ซึ่งในไอออนลบทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ PO_4^{3-} มีความเป็นเบสสูงที่สุด



ภาพ 46 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 15 นาที

2.1.4 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลถูกนำมาศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้ด้วยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เพิ่มขึ้น จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลจากใสไม่มีสีเป็นสีส้มมากขึ้น (ภาพ 47) ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ยังสามารถทำให้มองเห็นการเปลี่ยนสีของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลได้คือที่ความเข้มข้น 2.0×10^{-3} M

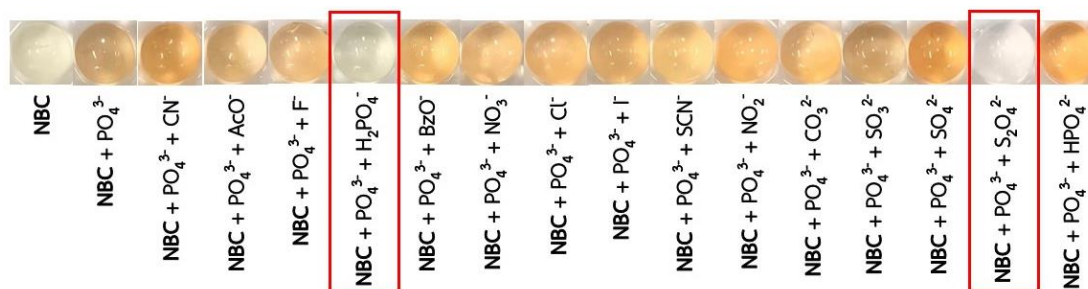


ภาพ 47 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที

2.1.5 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ถูกนำมาศึกษาผลการรบกวนจากไอออนลบชนิดอื่นต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) โดยทำการผสมไอออนลบชนิดต่างๆ จำนวน 1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-} ลงไป จะนำเม็ดเจลมาตรวจวัด ผลการศึกษา

พบว่าไอออนลบ H_2PO_4^- และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ยังคงเป็นไอออนลบที่รบกวนการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} นั่นคือทำให้เม็ดพอลิอะคริเลตเจลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีส้ม (ภาพ 48) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาการรบกวนการตรวจวัดไอออนลบของ NBC ในรูปของสารละลาย

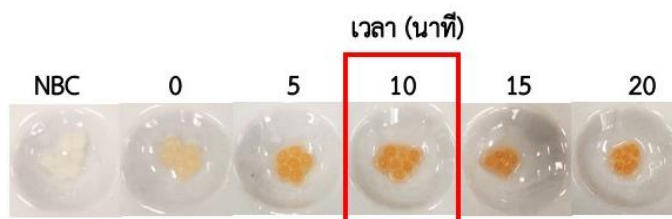


ภาพ 48 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

2.2 NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจล

2.2.1 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลในสารละลายไอออนลบ

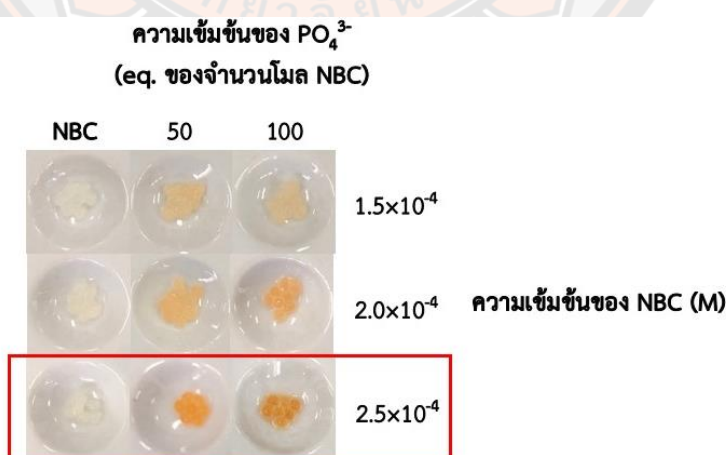
NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลถูกนำมาศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่เม็ดเจลลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ในน้ำปราศจากไอออน ผลการศึกษาที่เวลาต่างๆ พบว่า NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลเมื่อแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} และดักขึ้นมาทันที จะเห็นสีของเม็ดอัลจินเตเจลมีการเปลี่ยนแปลงสีจากสีขาวเป็นสีส้มอ่อน เมื่อเวลาผ่านไป สีของเม็ดอัลจินเตเจลเริ่มเข้มมากขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที (ภาพ 49) ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการแช่ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลในสารละลายไอออนลบแล้วทำให้สังเกตเห็นการเปลี่ยนสีได้อย่างชัดเจน คือ เวลา 10 นาที



ภาพ 49 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ที่เวลาต่างๆ

2.2.2 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ NBC ที่ใช้เตรียม NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล

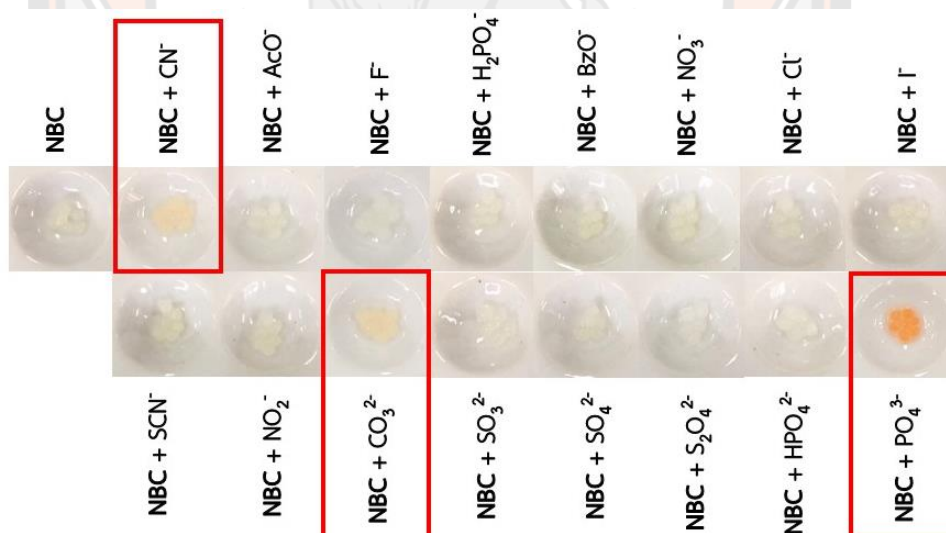
NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่มีความเข้มข้นต่างๆ (1.5×10^{-4} M, 2.0×10^{-4} M และ 2.5×10^{-4} M) ถูกนำมาศึกษาการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC ผลการศึกษาพบว่า NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่มีความเข้มข้น 1.5×10^{-4} M เกิดการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีส้มอ่อนภายหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} เป็นเวลา 10 นาที และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล สีของเม็ดอัลจิเนตเจลจะเปลี่ยนเป็นสีส้มเข้มมากขึ้น (ภาพ 50) ซึ่งความเข้มข้นของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงสีได้อย่างชัดเจน คือ 2.5×10^{-4} M ดังนั้นจะใช้ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่มีความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ในการศึกษาหาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบ



ภาพ 50 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลที่มีความเข้มข้นต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 10 นาที

2.2.3 ศึกษาความจำเพาะของ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลถูกนำมาศึกษาความจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ โดยการนำเม็ดเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) ในน้ำปราศจากไอออน ผลการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดอัลจินเตเจล พบว่าเม็ดเจลเกิดการเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีส้มกับไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูงคือ PO_4^{3-} และไอออนลบ CN^- และ CO_3^{2-} จะพบการเปลี่ยนสีของเม็ดเจลจากสีขาวเป็นสีส้มอ่อน ส่วนไอออนลบอื่นๆ ไม่เกิดการเปลี่ยนสี (ภาพ 51) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษา NBC ในรูปแบบของสารละลาย นอกจากนี้ยังพบว่า NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลที่แช่ลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} และ CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นสูง (100 eq. ของจำนวนโมลของ NBC) จะทำให้เม็ดอัลจินเตเจลที่เตรียมขึ้นเกิดการละลายเมื่อแช่เป็นเวลานาน เนื่องจากในระบบที่มีปริมาณไอออนลบ PO_4^{3-} และ CO_3^{2-} จำนวนมาก ไอออนลบสามารถเข้าไปดึง Ca^{2+} ที่อยู่ในโครงสร้างของเม็ดอัลจินเตเจลออกมา ทำให้โครงสร้างตาข่ายถูกทำลาย เม็ดอัลจินเตเจลเกิดการละลายและสูญเสียรูปร่างของเม็ดเจล สังเกตได้จากขนาดของเม็ดอัลจินเตเจลเล็กลงเมื่อเทียบกับเม็ดอัลจินเตเจลก่อนการแช่ลงในสารละลายไอออนลบ



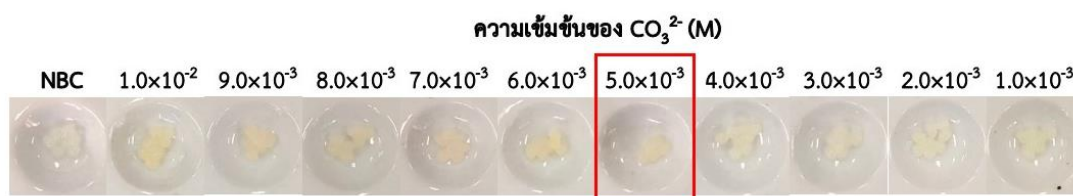
ภาพ 51 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) เป็นเวลา 10 นาที

2.2.4 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลสามารถตรวจวัดได้

NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจล ถูกนำมาศึกษาหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่า ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบเพิ่มมากขึ้นจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงสีของเม็ดอัลจิเนตเจลจากสีขาวเป็นสีส้มเข้มมากขึ้น ความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ยังสามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนสีของเม็ดอัลจิเนตเจลได้คือที่ความเข้มข้น 4.0×10^{-3} M (ภาพ 52), 5.0×10^{-3} M (ภาพ 53) และ 1.0×10^{-3} M (ภาพ 54) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองในระบบอื่นๆ ที่ผ่านมา NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลควรมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} ดีกว่า CN^- แต่ในกรณี NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลกลับมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ดีกว่า CO_3^{2-} ผลดังกล่าวอธิบายได้ว่า เนื่องจากในโครงสร้างของเม็ดอัลจิเนตเจลจะมี Ca^{2+} อยู่ ทำให้ Ca^{2+} เกิดปฏิกิริยากับไอออนลบ CO_3^{2-} ทำให้ปริมาณของ CO_3^{2-} ที่จะเกิดอันตรกิริยากับ NBC บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลด้อยลง การเปลี่ยนสีของเม็ดเจลจึงลดลง



ภาพ 52 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลภายหลังการแช่ลงในสารละลาย CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที



ภาพ 53 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจิเนตเจลภายหลังการแช่ลงในสารละลาย CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที



ภาพ 54 การเปลี่ยนแปลงสีของ NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจลภายหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 10 นาที

2.2.5 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ NBC บนตัวดูดซับอัลจินเตเจล

NBC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับอัลจินเตเจล ถูกนำมาศึกษาผลของไอออนลบชนิดอื่น ที่รบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล NBC) โดยการทดลองจะนำเม็ดเจลแช่ลงในสารละลายไอออนลบที่มีการผสมไอออนลบชนิดอื่น จำนวน 1 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ผลการศึกษาพบว่าไอออนลบ H_2PO_4^- และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ เป็นไอออนลบที่รบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} เนื่องจากทำให้เม็ดอัลจินเตเจลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีเป็นสีส้ม (ภาพ 55) นอกจากนี้ยังพบการรบกวนจากไอออนลบ BzO^- , I^- , SCN^- และ HPO_4^{2-} ต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- และ CO_3^{2-} แต่ไอออนลบเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อ การตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาการรบกวนการตรวจวัดไอออนลบของ NBC ในรูปของสารละลาย

ศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบของโมเลกุลเซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC)

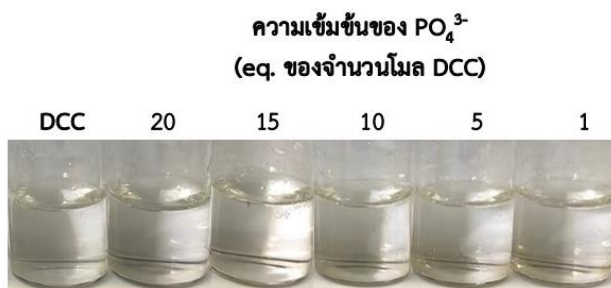
1. เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปสารละลาย

โมเลกุลเซนเซอร์ DCC เป็นอนุพันธ์ของคาร์บาโซลที่มีการเติมหมู่ดิงอิเล็กตรอน คือ หมู่ไซยาโน (-CN) ที่ตำแหน่ง 3 และ 6 บนวงเบนซีนของคาร์บาโซล ซึ่งการมีหมู่ดิงอิเล็กตรอนจะช่วยให้ที่ตำแหน่ง NH ของคาร์บาโซลมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นช่วยในการเกิดอันตรกิริยากับไอออนลบ นอกจากนี้อนุพันธ์ของคาร์บาโซลที่มีหมู่ไซยาโน พบว่าจะสามารถให้สัญญาณฟลูออเรสเซนส์ได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับไอออนลบ ดังนั้น DCC จะถูกนำมาใช้เป็นเซนเซอร์ที่เรืองแสงได้สำหรับตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

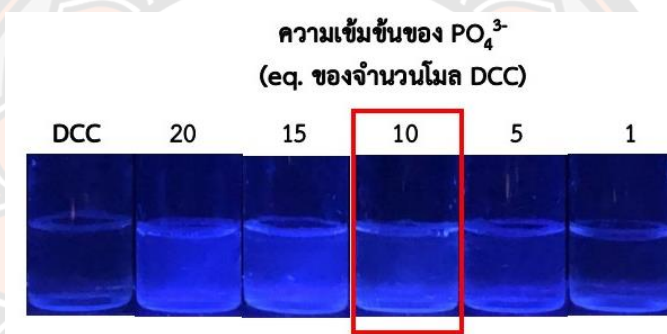
1.1 การตรวจวัดด้วยเทคนิคการสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light

1.1.1 ศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของไอออนลบในการตรวจวัดด้วย DCC

สารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ถูกนำมาตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า โดยทำการเติมสารละลายไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC ผลการศึกษาพบว่าภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย (ภาพ 56) แต่เมื่อสังเกตการเรืองแสงภายใต้แสง black light พบว่าสารละลาย DCC เกิดการเรืองแสงสีฟ้าภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ ซึ่งสามารถเริ่มสังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าของสารละลายภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 5 eq. แต่จะสังเกตเห็นการเรืองแสงได้อย่างชัดเจนภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 10 eq. (ภาพ 57) ดังนั้นความเข้มข้นของไอออนลบที่เหมาะสมคือจำนวน 10 eq.



ภาพ 56 การเปลี่ยนแปลงสีของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} (1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC)



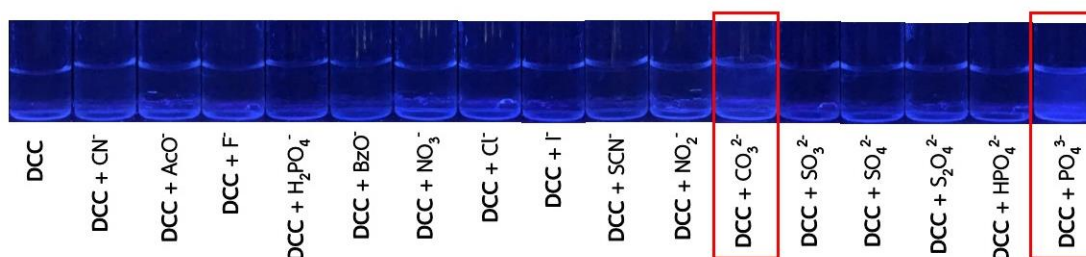
ภาพ 57 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} (1, 5, 10, 15 และ 20 eq. ของจำนวนโมล DCC) ภายใต้แสง black light

1.1.2 ศึกษาความจำเพาะของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ

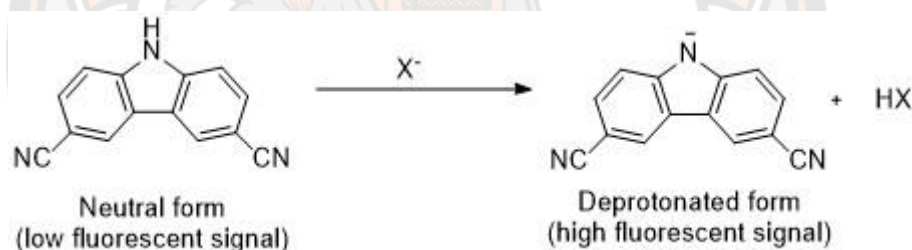
โมเลกุลเซนเซอร์ DCC ความเข้มข้น 5.0×10^{-5} M ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M ถูกนำมาศึกษาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบจำนวน 16 ชนิดที่มีประจุ -1, -2 และ -3 ดังนี้ CN^- , AcO^- , F^- , H_2PO_4^- , BzO^- , NO_3^- , Cl^- , I^- , SCN^- , NO_2^- , CO_3^{2-} , SO_3^{2-} , SO_4^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$, HPO_4^{2-} และ PO_4^{3-}

ผลการสังเกตการเรืองแสงสีฟ้าของสารละลาย DCC เมื่อมีการเติมไอออนลบจำนวน 10 eq. ของจำนวนโมล DCC พบว่าสารละลาย DCC เกิดการเรืองแสงสีฟ้ากับไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง 2 ชนิดคือไอออนลบ PO_4^{3-} และ CO_3^{2-} ส่วนไอออนลบอื่นๆ ไม่เกิดการเรืองแสงสีฟ้า (ภาพ 58) กลไกการเรืองแสงสีฟ้าของสารละลายเกิดจากการหลุดโปรตอนของ NH-carbazole โดยไอออนลบที่มีความ

เป็นเบสสูง (ภาพ 59) ทำให้เกิดสปีชีส์ใหม่ คือ DCC ที่อยู่ในโครงสร้างที่หลุดโปรตอน ประจุลบที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดขบวนการ Intramolecular charge transfer (ICT) และทำให้เกิดการเรืองแสงสีฟ้าขึ้น



ภาพ 58 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (10 eq. ของจำนวนโมล DCC) ภายใต้แสง black light

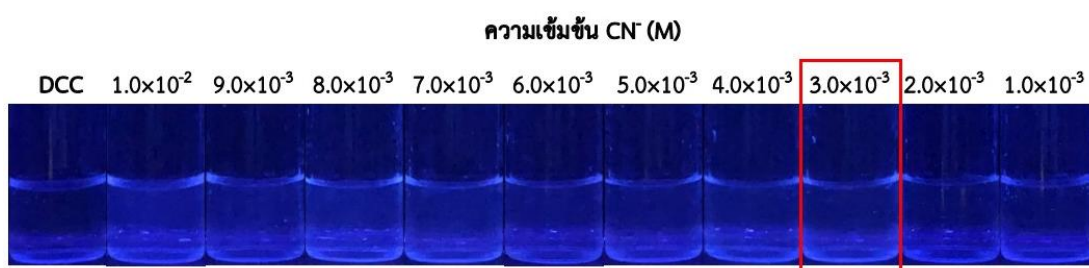


ภาพ 59 กลไกการหลุดโปรตอนที่ NH-carbazole ของ DCC โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง

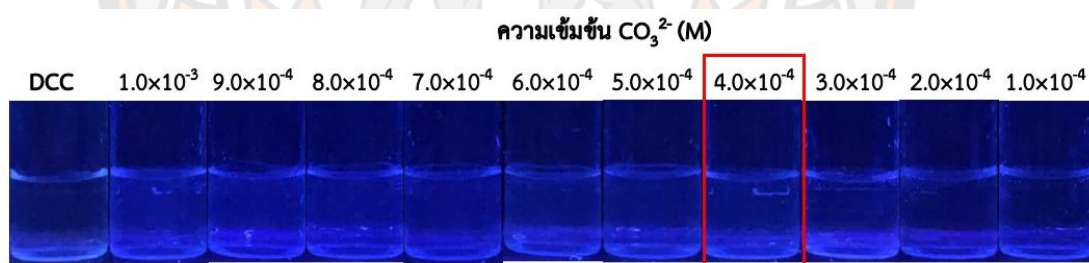
1.1.3 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้

แม้ว่า DCC (5.0×10^{-5} M) ให้ความจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่จำนวน 10 eq. ของจำนวนโมล DCC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ความเข้มข้น 5.0×10^{-3} M แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนลบมากขึ้นพบว่า DCC สามารถเกิดการเรืองแสงสีฟ้าได้เมื่อใช้ตรวจวัดไอออนลบ CN^- ดังนั้นการทดลองนี้จึงสนใจหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการสังเกตการเรืองแสงด้วยตาเปล่าภายใต้แสง black light ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบเพิ่มมากขึ้นจะสังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าเข้มมากขึ้น ซึ่งความเข้มข้นต่ำที่สุด

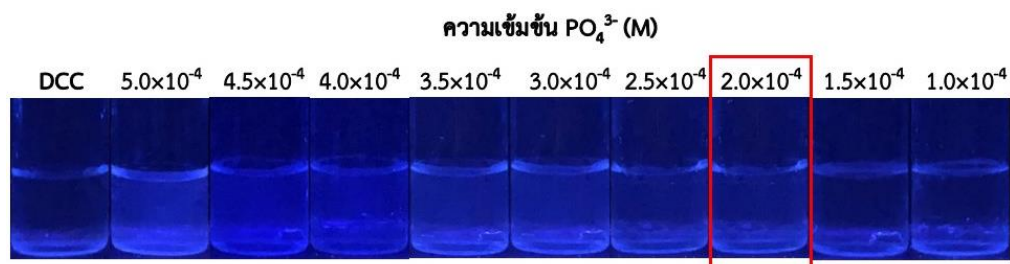
ของสารละลายไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ยังสามารถมองเห็นการเรืองแสงของสารละลายได้ คือที่ความเข้มข้น 3.0×10^{-3} M (ภาพ 60), 4.0×10^{-4} M (ภาพ 61) และ 2.0×10^{-4} M (ภาพ 62) ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า DCC มีประสิทธิภาพในการตรวจวัด $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^-$ เนื่องจาก PO_4^{3-} มีค่าความเป็นเบสที่แรงกว่า CO_3^{2-} และ CN^- ทำให้สามารถดึงโปรตอนจาก NH-carbazole ได้ดีกว่า



ภาพ 60 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light



ภาพ 61 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light

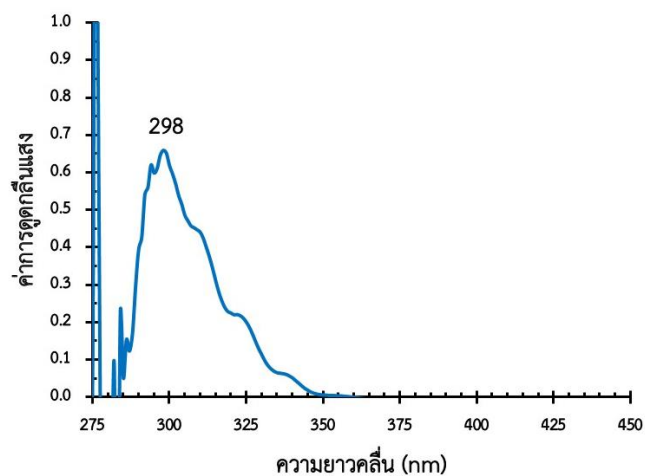


ภาพ 62 การเรืองแสงของสารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกัน ภายใต้แสง black light

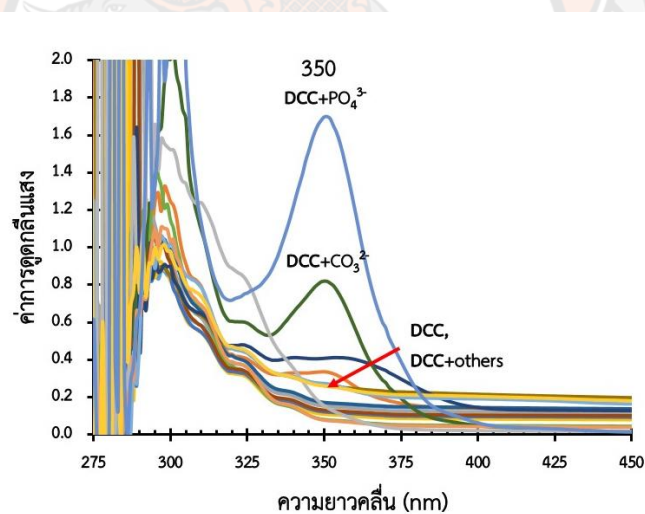
1.2 การตรวจวัดด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตรี

1.2.1 ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC ก่อนและหลังการตรวจวัดไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง

สารละลาย DCC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ถูกนำมาตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 275-450 nm ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC (ภาพ 63) ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 298 nm และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC ภายหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดกับไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยมีการปรากฏค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นใหม่ที่ 350 nm (ภาพ 64) ซึ่งเกิดจากขบวนการ Intramolecular charge transfer (ICT)



ภาพ 63 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



ภาพ 64 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ DCC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC)

1.3 การตรวจวัดด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์

1.3.1 ศึกษาหาความเข้มข้นและการกระตุ้นที่เหมาะสมของ DCC ในการตรวจวัด

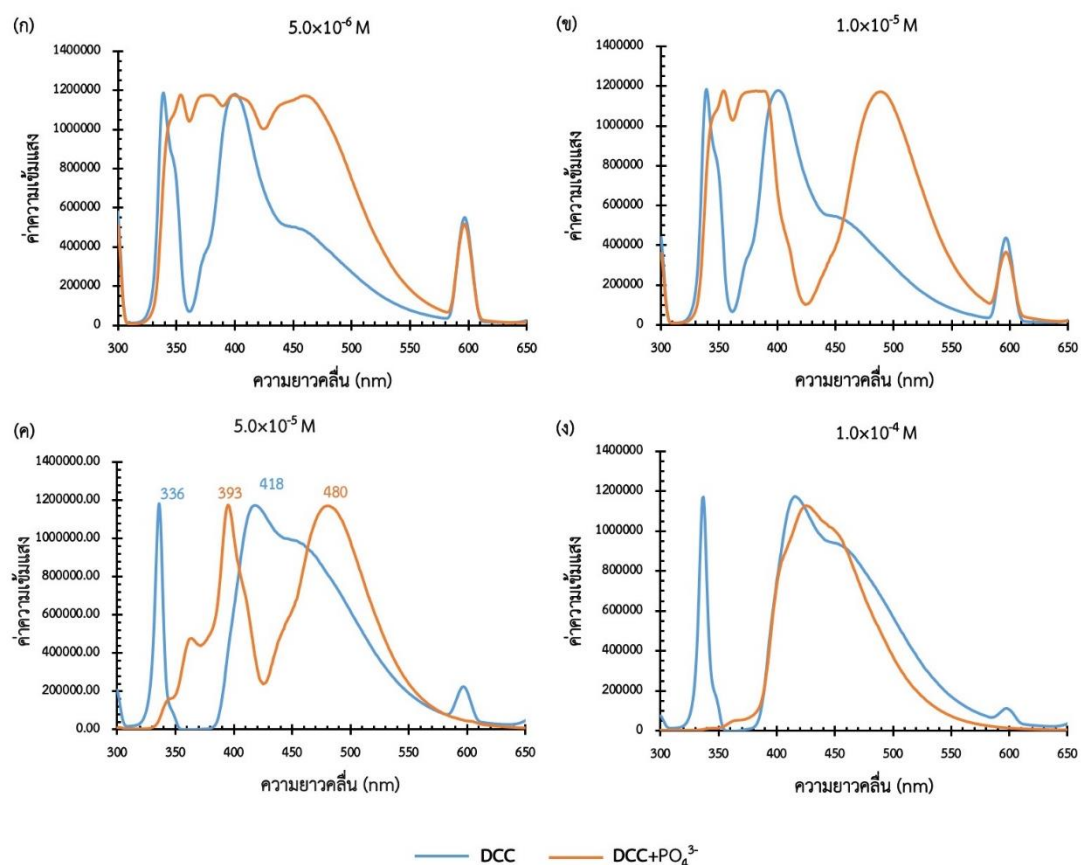
ไอออนลบ

สารละลาย DCC ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) จะนำมาศึกษาสเปกตรัมการคายแสงก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC เพื่อหาความเข้มข้นและความยาวคลื่นที่ใช้กระตุ้น (λ_{ex}) ที่เหมาะสมของ DCC โดยศึกษาที่ความยาวคลื่นดังนี้ ความยาวคลื่น 298 nm เป็น λ_{max} เริ่มต้นของ DCC ความยาวคลื่น 315 nm เป็นตำแหน่ง isosbestic point ของสเปกตรัมการดูดกลืนแสง DCC ก่อนและหลังเติมไอออนลบ ส่วนความยาวคลื่น 350 nm เป็น λ_{max} ใหม่ที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมไอออนลบ ผลการศึกษาพบว่า DCC ที่กระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm (ภาพ 65) มีความเหมาะสมในการศึกษาสเปกตรัมการคายแสงของ DCC เมื่อใช้ในการตรวจวัดไอออนลบ เนื่องจากเห็นการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการคายแสงก่อนและหลังการเติมไอออนลบได้อย่างชัดเจน โดยสเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-5} M (ภาพ 65ค) ให้ค่าการคายแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 418 nm ภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ พบว่าสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 418 nm ลดลง และปรากฏค่าการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 393 nm และ 480 nm การทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย DCC ผลที่ได้พบว่าที่ความเข้มข้นต่างกันจะให้สเปกตรัมการคายแสงที่แตกต่างกันดังภาพ 65ก-ง ซึ่งความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดคือ 5.0×10^{-5} M เนื่องจากมีความแตกต่างของค่า λ_{em} ก่อนและหลังการเติมไอออนลบอย่างชัดเจน

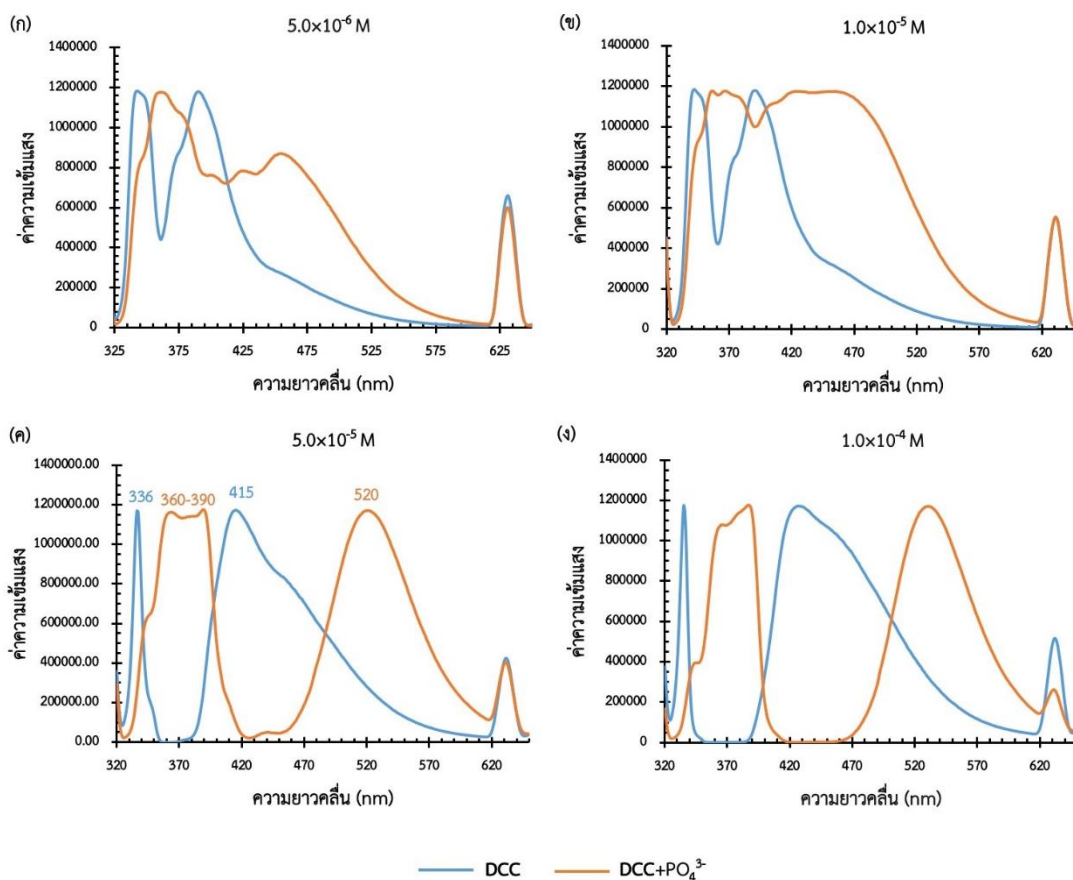
สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ที่กระตุ้นที่ความยาวคลื่น 315 nm (ภาพ 66) พบสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 415 nm ภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC พบว่าสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 415 nm ลดลง และเกิดการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่นในช่วง 360-390 nm และ 520 nm แต่เนื่องจากค่าการคายแสงสูงสุดใหม่ที่เกิดขึ้นเป็นช่วงกว้าง ซึ่งยากต่อการนำข้อมูลไปใช้งาน

สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ที่กระตุ้นที่ความยาวคลื่น 350 nm (ภาพ 67) พบสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 382 nm และ 463 nm ซึ่งมีลักษณะกราฟเป็นช่วงกว้าง ภายหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC สเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 382 nm เพิ่มขึ้นและมีลักษณะกราฟที่แคบ ส่วนที่ความยาวคลื่น 463 nm ลดลง แต่เกิดการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่นในช่วง 526 nm ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าสเปกตรัมการคายแสงของ DCC ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ มีการคาบเกี่ยวกัน

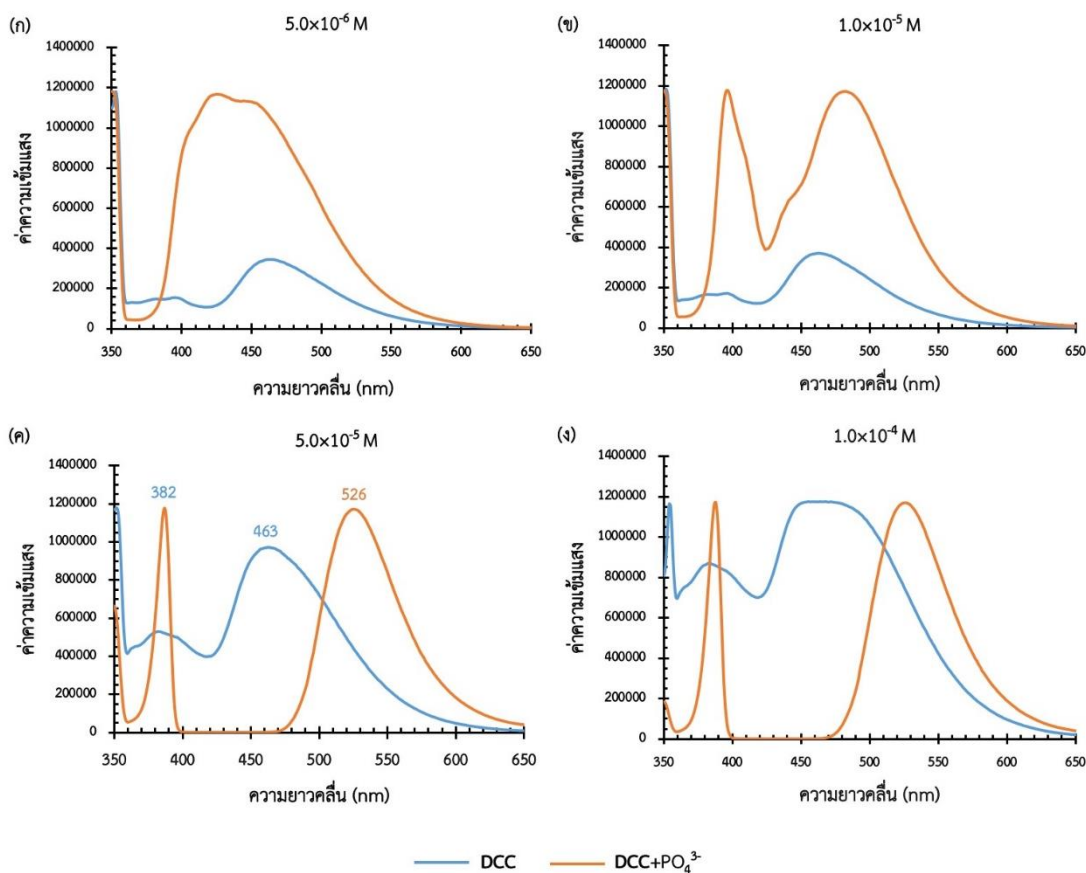
(overlap) จึงไม่เหมาะแก่การนำมาศึกษาสเปกตรัมการคายแสงก่อนและหลังตรวจวัดไอออนลบของ DCC



ภาพ 65 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 5.0×10^{-6} M, (ข) 1.0×10^{-5} M, (ค) 5.0×10^{-5} M และ (ง) 1.0×10^{-4} M ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO₄³⁻ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm



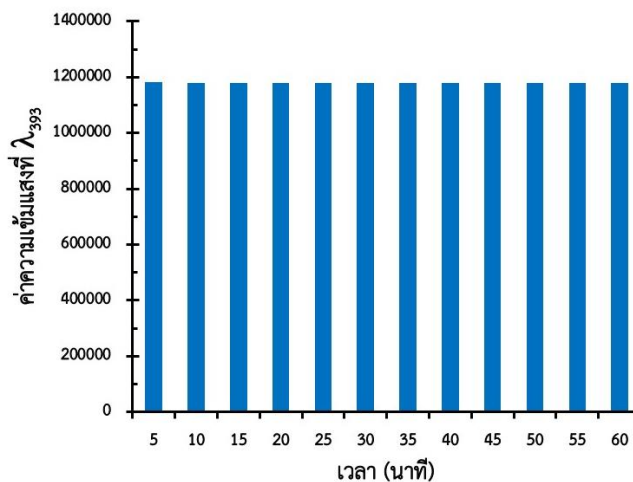
ภาพ 66 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) 5.0×10^{-6} M, (ข) 1.0×10^{-5} M, (ค) 5.0×10^{-5} M และ (ง) 1.0×10^{-4} M ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 315 nm



ภาพ 67 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) $5.0 \times 10^{-6} \text{ M}$, (ข) $1.0 \times 10^{-5} \text{ M}$, (ค) $5.0 \times 10^{-5} \text{ M}$ และ (ง) $1.0 \times 10^{-4} \text{ M}$ ก่อนและหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ($5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$) โดยการกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 350 nm

1.3.2 ศึกษาหาเวลาที่เหมาะสมในการตรวจวัดไอออนลบของ DCC

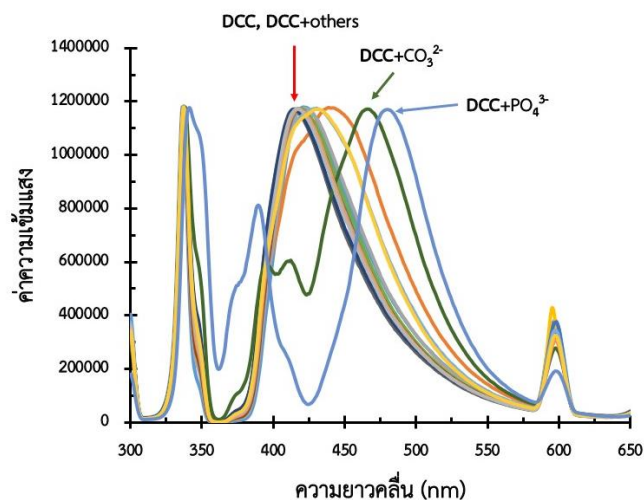
การศึกษหาเวลาที่เหมาะสมในการทำให้ไอออนลบและ DCC เกิดปฏิกิริยากันอย่างสมบูรณ์ทำได้โดยนำสารละลาย DCC ($5.0 \times 10^{-5} \text{ M}$) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB ($5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$) ในระบบตัวทำละลาย $\text{MeCN}:\text{H}_2\text{O}$ (1:4) มาผสมกับสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) และทำการตั้งสารผสมทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ จากนั้นนำสารผสมไปวัดสเปกตรัมการคายแสงโดยจะติดตามค่าการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 393 nm ซึ่งเกิดขึ้นภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} ผลการศึกษาพบว่าสารผสมที่ทิ้งไว้ที่เวลาต่างกัน ไม่ส่งผลต่อค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm (ภาพ 68) แสดงว่าการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง DCC กับ PO_4^{3-} เกิดได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเวลาที่เลือกใช้ในการตรวจวัดไอออนลบคือ 5 นาที



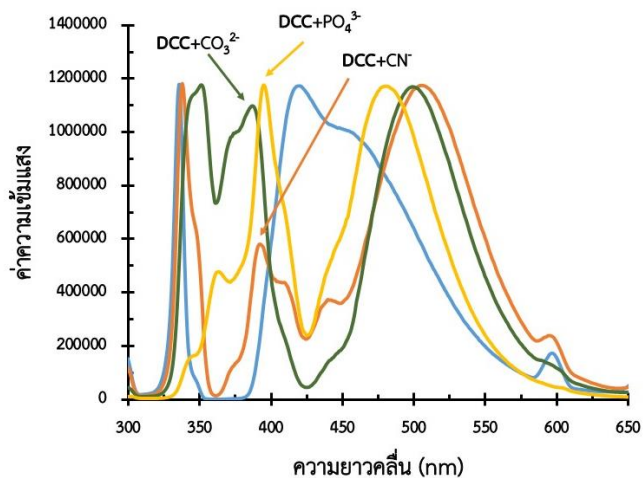
ภาพ 68 การเปรียบเทียบค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) โดยตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ ภายหลังการเติม PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC)

1.3.3 ศึกษาความจำเพาะของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ

สารละลาย DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ได้นำมาศึกษาสเปกตรัมการคายแสงที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ จำนวน 10 eq. ของจำนวนโมล DCC และกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมการคายแสงของ DCC จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} (ภาพ 69) โดยสเปกตรัมการคายแสงของ DCC ให้ค่าการคายแสงสูงสุดเริ่มต้นที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 418 nm ภายหลังการเติมไอออนลบ CO_3^{2-} พบว่าสเปกตรัมการคายแสงที่ความยาวคลื่น 336 nm และ 418 nm ลดลง และปรากฏค่าการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 396 nm และ 466 nm ส่วนภายหลังการเติมไอออนลบ PO_4^{3-} พบการปรากฏค่าการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 389 nm และ 480 nm และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนลบเป็น 100 eq. ของจำนวนโมล DCC พบว่านอกจากไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ยังมีการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมการคายแสงภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- (ภาพ 70) จากผลการทดลองสามารถสรุปค่า λ_{max} ของการคายแสงใหม่ภายหลังการเติมไอออนลบได้ดังตาราง 31



ภาพ 69 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (10 eq. ของจำนวนโมล DCC) โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm



ภาพ 70 สเปกตรัมการคายแสงของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) โดยกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 298 nm

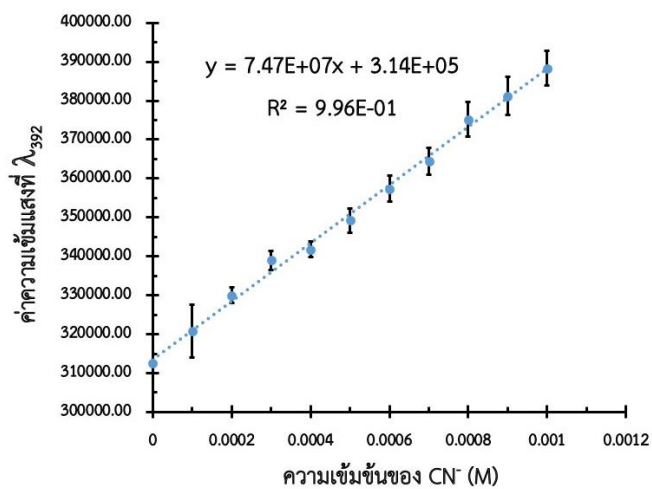
ตาราง 31 สเปกตรัมการคายแสงใหม่ของ DCC ที่เกิดขึ้นภายหลังการเติมไอออนลบจำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC

ไอออนลบ	สเปกตรัมการคายแสงใหม่ (nm)
CN^-	392, 506
CO_3^{2-}	387, 499
PO_4^{3-}	393, 480

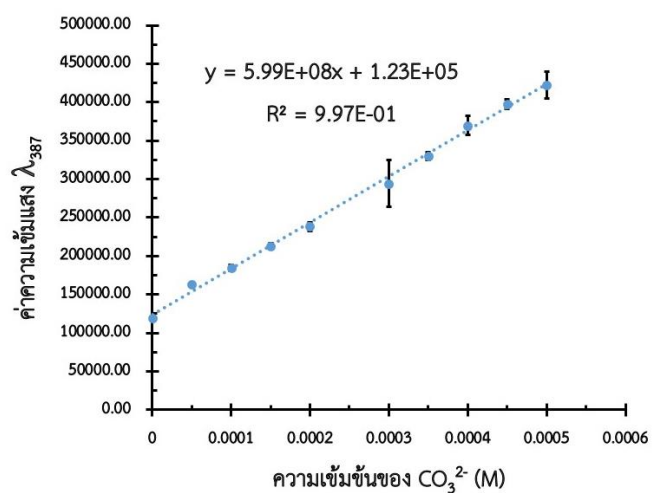
1.3.4 ศึกษาขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC สามารถตรวจวัดได้

ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์และขีดจำกัดในการหาปริมาณไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยใช้ DCC (5.0×10^{-5} M) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) สามารถคำนวณจากการติดตามค่าการคายแสงของความยาวคลื่นใหม่ที่ปรากฏภายหลังการเติมไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างๆ และนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- (ภาพ 71), CO_3^{2-} (ภาพ 72) และ PO_4^{3-} (ภาพ 73) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่า LOD และ LOQ ดังสมการ (1) และ (2)

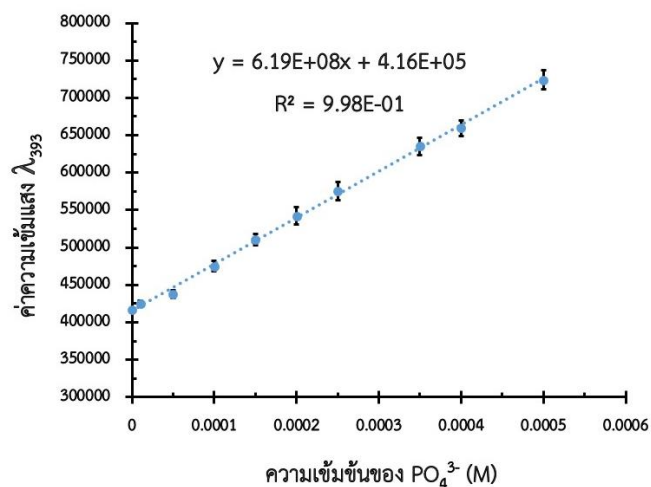
ผลการคำนวณค่า LOD และ LOQ ของ DCC ในการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} แสดงดังตาราง 32 ซึ่งจะเห็นว่า DCC มีประสิทธิภาพในการตรวจวัด $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^-$



ภาพ 71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 392 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ CN^- ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



ภาพ 72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 387 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ CO_3^{2-} ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



ภาพ 73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น 393 nm ของ DCC (5.0×10^{-5} M) กับความเข้มข้นของไอออนลบ PO_4^{3-} ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)

ตาราง 32 ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ (LOD) และขีดจำกัดในการหาปริมาณ (LOQ) ไอออนลบ โดย DCC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)

ไอออนลบ	ช่วงความเป็นเส้นตรง	LOD (M)	LOQ (M)
CN^-	7.1×10^{-5} – 1.0×10^{-3}	7.19×10^{-5}	2.40×10^{-4}
CO_3^{2-}	8.9×10^{-6} – 5.0×10^{-4}	8.97×10^{-6}	2.99×10^{-5}
PO_4^{3-}	8.6×10^{-6} – 5.0×10^{-4}	8.68×10^{-6}	2.89×10^{-5}

หมายเหตุ: SD_{blank} มีค่าเท่ากับ 1791

1.3.5 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ DCC จากไอออนลบอื่น

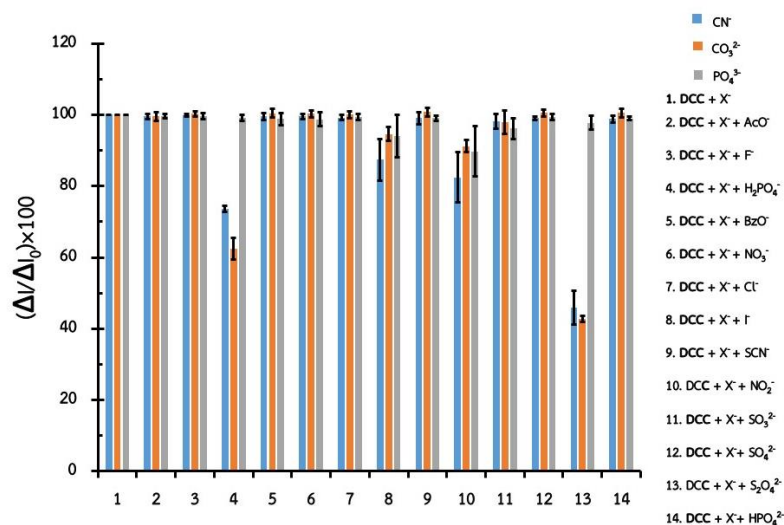
การศึกษาความเลือกจำเพาะของ DCC (5.0×10^{-5} M) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) สำหรับตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในขณะที่มีการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (AcO^- , F^- , H_2PO_4^- , BzO^- , NO_3^- , Cl^- , I^- , SCN^- , NO_2^- , SO_3^{2-} ,

SO_4^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ และ HPO_4^{2-}) จำนวน 1 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ไอออนลบที่ทำให้ค่าการคายแสงที่ประมาณ 500 nm เปลี่ยนแปลง $\pm 20\%$ จะถือว่าเป็นไอออนที่รบกวนการตรวจวัด CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ซึ่งค่าการคายแสงเริ่มต้นของระบบ $\text{DCC}+\text{CN}^-$, $\text{DCC}+\text{CO}_3^{2-}$ และ $\text{DCC}+\text{PO}_4^{3-}$ จะกำหนดให้เป็น 100% และ % การรบกวนจากไอออนลบอื่น คำนวณจากสูตร (4)

$$\frac{\Delta I}{\Delta I_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ ΔI คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- และไอออนลบอื่น
 ΔI_0 คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- เพียงอย่างเดียว

ผลการศึกษพบว่า (ภาพ 74) ไอออนลบ H_2PO_4^- (กลุ่ม 4) และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ (กลุ่ม 13) แสดงให้เห็นถึงการรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- (แถบสีฟ้า) และ CO_3^{2-} (แถบสีส้ม) ทำให้เกิดการลดลงของค่าการคายแสง (30-50%) แต่ไอออนลบเหล่านี้ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} จากผลการทดลองพบค่าการคายแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 nm ลดลงอย่างมาก ในกรณีไอออนลบ H_2PO_4^- และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ดังนั้นไอออนลบทั้งสองนี้จะรบกวนการตรวจวัดไอออนลบ CN^- และ CO_3^{2-} การรบกวนการตรวจวัดอธิบายได้จาก H_2PO_4^- เป็นไอออนลบที่ให้ H^+ ในขณะที่ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ สามารถเกิดปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น HSO_3^+ (Lister & Garvie, 1959) ซึ่งเป็นไอออนลบที่ให้ H^+ ได้เช่นกัน เมื่อมีไอออนลบที่ให้ H^+ ได้อยู่ในระบบจะทำให้ไอออนลบ CN^- และ CO_3^{2-} ซึ่งเป็นเบสจะรับ H^+ จาก H_2PO_4^- และ HSO_3^+ แทนที่จะเข้าไปดั่งโปรตอนกับ NH ของ DCC จึงทำให้กระบวนการเรืองแสงสีฟ้าถูกขัดขวาง



ภาพ 74 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-})

หมายเหตุ: เมื่อ ΔI คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- และไอออนลบอื่น, ΔI_0 คือผลต่างระหว่างค่า I_{500} ของ DCC กับ DCC ที่เติม CN^- เพียงอย่างเดียว

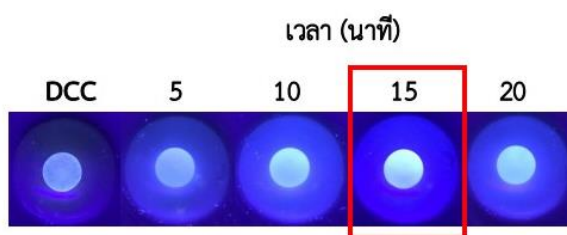
2. เซนเซอร์ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในรูปไฮโดรเจลชนิดพอลิอะคริเลต เจลหรือเม็ดเจลสำเร็จรูป

DCC ถูกนำมาดูดซับบนวัสดุรองรับไฮโดรเจลคือ พอลิอะคริเลตเจล การเตรียม DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลทำได้โดยนำพอลิอะคริเลตเจลแช่ลงในสารละลาย DCC ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

2.1 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการแช่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบ

DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลถูกนำมาใช้ทดสอบการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} โดยทำการแช่เม็ดเจลลงในสารละลายไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในน้ำปราศจากไอออน ที่ระยะเวลาต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อแช่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

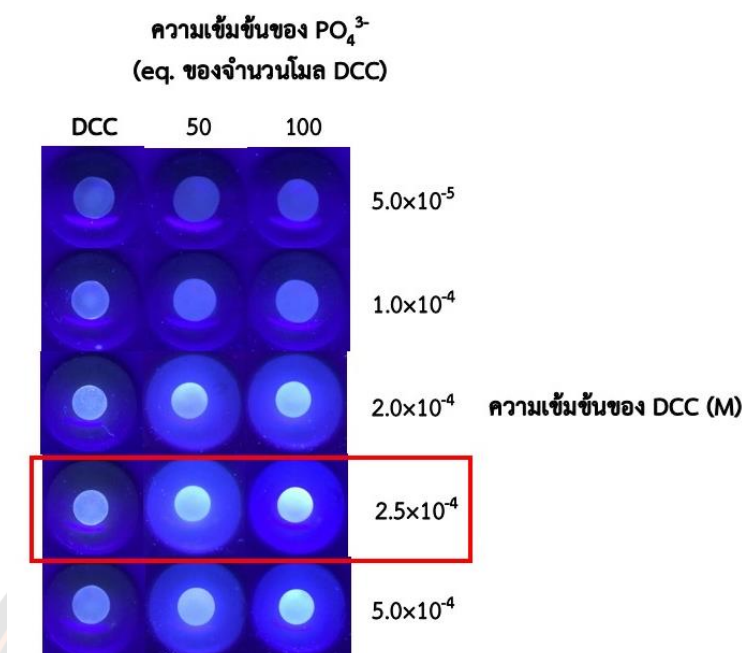
เป็นเวลา 5 นาที เริ่มสังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าของเม็ดพอลิอะคริเลตเจล และเมื่อเวลาผ่านไป 15 นาที เม็ดพอลิอะคริเลตเจลจะเริ่มเกิดการเรืองแสงสีฟ้ามากขึ้น และการเรืองแสงสีฟ้าไม่แตกต่างจากการแช่ที่ระยะเวลานานขึ้น (20 นาที) (ภาพ 75) ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการแช่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในสารละลายไอออนลบแล้วทำให้สังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าได้อย่างชัดเจน คือ เวลา 15 นาที



ภาพ 75 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ที่เวลาต่างๆ ภายใต้แสง black light

2.2 ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของ DCC ที่ใช้เตรียม DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

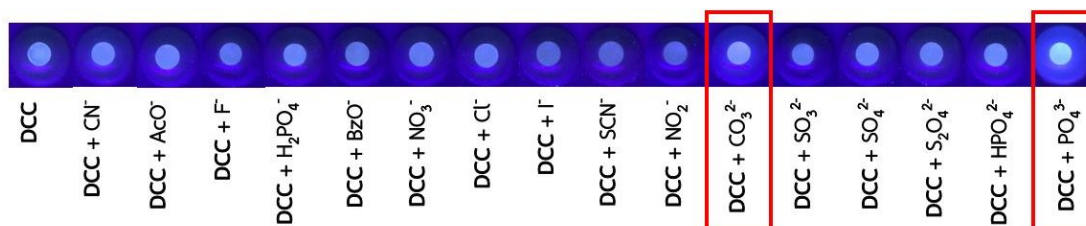
DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่มีความเข้มข้นต่างๆ (5.0×10^{-5} M, 1.0×10^{-4} M, 2.0×10^{-4} M, 2.5×10^{-4} M และ 5.0×10^{-4} M) ถูกนำมาศึกษาการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ที่ 50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC ผลการศึกษาพบว่า DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่มีความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M และ 5.0×10^{-4} M สังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าอย่างชัดเจนภายหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบ (ภาพ 76) แต่เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมเม็ดพอลิอะคริเลตเจลพบว่า สารละลาย DCC ที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-4} M เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเกิดตะกอน จนทำให้สารละลายขุ่น จึงไม่เหมาะแก่การนำไปใช้เตรียม DCC ที่ดูดซับบนเม็ดพอลิอะคริเลตเจล เพราะอาจจะทำให้ความเข้มข้นของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลไม่แน่นอน ดังนั้นจะใช้ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่มีความเข้มข้น 2.5×10^{-4} M ในการศึกษาหาความสามารถในการตรวจวัดไอออนลบ



ภาพ 76 การเรืองแสงของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลที่ความเข้มข้นต่างๆ ก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} (50 eq. และ 100 eq. ของจำนวนโมล DCC) เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light

2.3 ศึกษาความจำเพาะของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลในการตรวจวัดไอออนลบในน้ำ

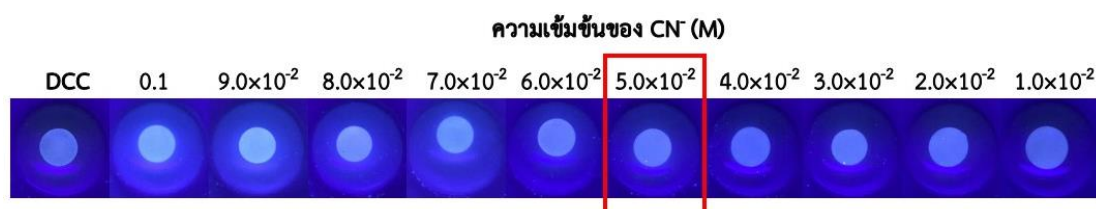
DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลถูกนำมาทดสอบการเรืองแสงกับไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) ในน้ำปราศจากไอออน ผลการศึกษาพบว่าเม็ดพอลิอะคริเลตเจลจะเกิดการเรืองแสงสีฟ้าภายหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} โดยการแช่ในสารละลาย PO_4^{3-} จะเรืองแสงชัดเจนมากกว่าการแช่ในสารละลาย CO_3^{2-} ส่วนเม็ดพอลิอะคริเลตเจลที่แช่ลงในสารละลายไอออนลบอื่นๆ ไม่เกิดการเรืองแสง (ภาพ 77) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดไอออนลบในสารละลายน้ำได้ เช่นเดียวกับการใช้ DCC ในรูปของสารละลาย แต่จะมีความเลือกจำเพาะในการตรวจวัดไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง คือ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-}



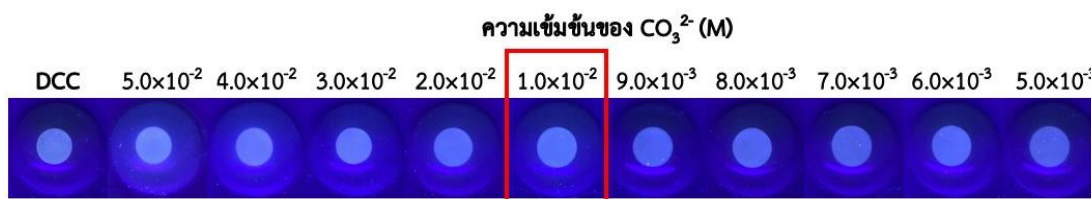
ภาพ 77 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลก่อนและหลังการแช่ลงในสารละลายไอออนลบชนิดต่างๆ (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) เป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light

2.4 ศึกษาหาความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้

แม้ว่า DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลจะให้ความจำเพาะต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่จำนวน 100 eq. ของจำนวนโมล DCC แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอออนลบมากขึ้นพบว่า DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถเกิดการเรืองแสงสีฟ้าได้เมื่อใช้ตรวจวัดไอออนลบ CN^- ดังนั้นการทดลองนี้จึงสนใจหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลสามารถตรวจวัดได้ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอออนลบเพิ่มมากขึ้น จะสังเกตเห็นการเรืองแสงสีฟ้าของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลเข้มข้นมากขึ้น ความเข้มข้นต่ำสุดของสารละลายไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ที่ยังสามารถมองเห็นการเรืองแสงสีฟ้าของเม็ดพอลิอะคริเลตเจลได้คือที่ความเข้มข้น 5.0×10^{-2} M (ภาพ 78), 1.0×10^{-2} M (ภาพ 79) และ 6.0×10^{-3} M (ภาพ 80) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า DCC มีประสิทธิภาพในการตรวจวัดไอออนลบ $\text{PO}_4^{3-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{CN}^-$ เนื่องจาก PO_4^{3-} มีค่าความเป็นเบสที่แรงกว่า CO_3^{2-} และ CN^- ทำให้สามารถดึงโปรตอนจาก NH-carbazole ได้ดีกว่า



ภาพ 78 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังจากแช่ลงในสารละลาย CN^- ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light



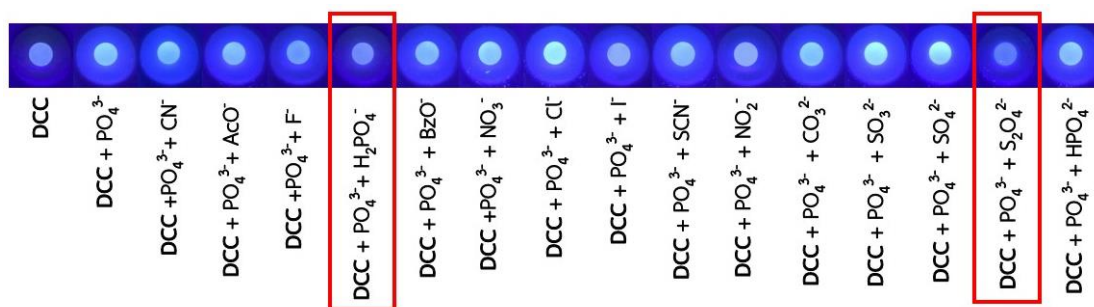
ภาพ 79 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังการแช่ลงในสารละลาย CO_3^{2-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light



ภาพ 80 การเรืองแสงของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ภายหลังการแช่ลงในสารละลาย PO_4^{3-} ที่ความเข้มข้นต่างกันเป็นเวลา 15 นาที ภายใต้แสง black light

2.5 ศึกษาผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล

DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจล ถูกนำมาศึกษาผลของไอออนลบอื่นๆ ที่รบกวนการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (100 eq. ของจำนวนโมล DCC) โดยทำการผสมไอออนลบชนิดต่างๆ จำนวน 1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-} ลงไป จะนำเม็ดเจลมาตรวจวัด ผลการศึกษาพบว่า ไอออนลบ H_2PO_4^- และ $\text{S}_2\text{O}_4^{2-}$ ยังคงเป็นไอออนลบที่รบกวนการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} นั่นคือทำให้เม็ดพอลิอะคริเลตเจลไม่เกิดการเรืองแสงสีฟ้า (ภาพ 81)



ภาพ 81 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ DCC (2.5×10^{-4} M) บนตัว
ดูดซับพอลิอะครีเลตเจล



บทที่ 5

บทสรุป

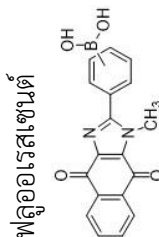
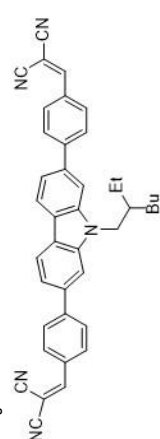
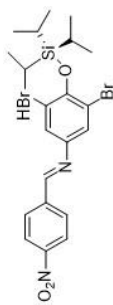
สรุปผลการวิจัย

อนุพันธ์คาร์บาโซล 3-Nitro-6-bromocarbazole (NBC) และ 3, 6-Dicyanocarbazole (DCC) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติม CTAB ได้รับการพัฒนาและใช้เป็นเซนเซอร์เปลี่ยนสีและเซนเซอร์เรืองแสง สำหรับตรวจวัดไอออนลบในน้ำ โดยระบบเซนเซอร์ถูกเตรียม 2 รูปแบบ คือ ระบบสารละลาย และระบบไฮโดรเจลชนิดเม็ด ซึ่งใช้ไฮโดรเจล 2 ชนิด คือ พอลิอะครีเลตเจล และอัลจินเตตเจล

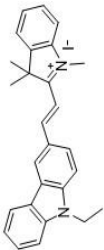
ผลการศึกษาด้วยการสังเกตการเปลี่ยนสีด้วยตาเปล่าพบว่า NBC มีความจำเพาะในการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ โดยเกิดการเปลี่ยนสีสารละลาย NBC จากใสไม่มีสีเป็นสีส้ม ส่วนเม็ดไฮโดรเจลทั้งสองชนิดของ NBC จะเปลี่ยนสีเป็นสีส้มอย่างชัดเจนในการตรวจวัดไอออนลบ PO₄³⁻ เท่านั้น ผลการศึกษาด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมตริพบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ NBC เกิดการเปลี่ยนแปลงภายหลังการเติมไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ โดยค่าการดูดกลืนแสงเริ่มต้นที่ความยาวคลื่น 370 nm จะลดลง และมีการปรากฏค่าการกลืนดูดกลืนแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 464 nm ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ของ NBC มีค่าเท่ากับ 4.64×10^{-5} M, 1.31×10^{-5} M และ 1.26×10^{-5} M ตามลำดับ ผลการศึกษากับ DCC พบว่า DCC ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายในการตรวจวัดไอออนลบ แต่จะเกิดการเรืองแสงสีฟ้าของสารละลายเมื่อใช้ตรวจวัดไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ส่วน DCC บนตัวดูดซับไฮโดรเจลเกิดการเรืองแสงสีฟ้าอย่างชัดเจนในการตรวจวัดไอออนลบ PO₄³⁻ ผลการศึกษาด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์พบว่าสเปกตรัมการคายแสงของ DCC ภายหลังการเติมไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ พบว่ามีการปรากฏค่าการคายแสงใหม่ที่ความยาวคลื่น 392 nm, 387 nm และ 393 nm ตามลำดับ ค่าขีดจำกัดต่ำสุดในการวิเคราะห์ไอออนลบ CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ของ DCC มีค่าเท่ากับ 7.19×10^{-5} M, 8.97×10^{-6} M และ 8.68×10^{-6} M ตามลำดับ

กลไกการเปลี่ยนแปลงสีและการเรืองแสงของ NBC และ DCC เกิดจากกระบวนการ deprotonation ที่ตำแหน่ง NH-carbazole โดยไอออนลบที่มีความเป็นเบสสูง ซึ่งโมเลกุลเซนเซอร์ทั้งสองมีประสิทธิภาพในการตรวจวัด PO₄³⁻ มากที่สุด ไอออนลบ H₂PO₄⁻ และ S₂O₄²⁻ เป็นไอออนลบที่รบกวนการตรวจวัด CN⁻, CO₃²⁻ และ PO₄³⁻ ของเซนเซอร์ทั้งสอง และเซนเซอร์ในระบบสารละลายมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าในการตรวจวัดไอออนลบมากกว่าเซนเซอร์ในระบบไฮโดรเจลชนิดเม็ด

ตาราง 33 เปรียบเทียบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดไซยาไนด์ด้วยเทคนิคต่างๆ

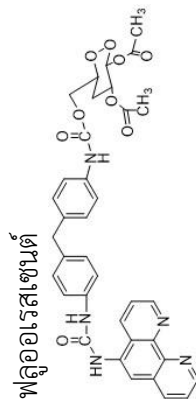
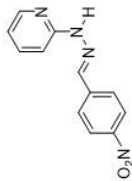
เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
Ion chromatography	-	5.0×10^{-2}	-	(Caliamanis, McCormick, & Carpenter, 2000)
ฟลูออเรสเซนซ์ 	2.5×10^{-6} - 1.5×10^{-5} 2.0×10^{-5} - 4.0×10^{-5}	1.4×10^{-7}	-	(Jamkratoke, Tumcharern, Tuntulani, & Tomapatanaget, 2011)
ฟลูออเรสเซนซ์ 	-	1.26×10^{-7}	-	(Konidena & Thomas, 2014)
สเปกโตรโฟโตเมตรี 	-	1.48×10^{-5}	4.93×10^{-5}	(Nicoletti, Nandi, & Machado, 2015)

ตาราง 33 (ต่อ)

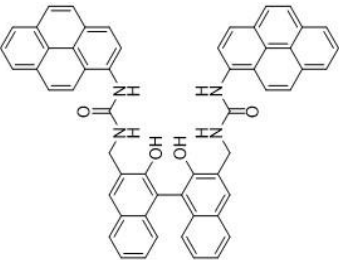
เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
ฟลูออเรสเซนซ์	-	4.08×10^{-7}	-	(Wang et al., 2016)
				
Electrochemiluminescence	5.0×10^{-8} - 1.0×10^{-3}	5.0×10^{-8}	-	(Feng, Shi, Wu, Chen, & Chi, 2018)
Voltammetry	1.8×10^{-6} - 2.5×10^{-5}	6.0×10^{-7}	-	(Mahmoud, Mahnashi, & El-Wakil, 2020)
สเปกโตรโฟโตเมตรี (NBC)	4.6×10^{-5} - 1.0×10^{-3}	4.64×10^{-5}	1.55×10^{-4}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้
ฟลูออเรสเซนซ์ (DCC)	7.2×10^{-5} - 1.0×10^{-3}	7.19×10^{-5}	2.40×10^{-4}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ตาราง 34 เปรียบเทียบเซนเซอร์พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยเทคนิคต่างๆ

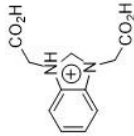
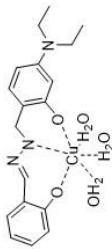
เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
Ion selective electrode	1.25×10^{-8} - 39.7×10^{-8} *(mg/L)	5.0×10^{-8} *(mg/L)	-	(Zhan, Huang, Rao, & Zhao, 2016)
สเปคโตรโฟโตเมตรี	-	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-4}	(Thimaradka, Pangannaya, Mohan, & Trivedi, 2018)
ฟลูออเรสเซนซ์	-	0.86×10^{-9} (nmol)	-	(Nawaz et al., 2020)



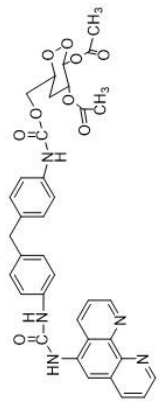
ตาราง 34 (ต่อ)

เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
ฟลูออเรสเซนซ์	-	1.4×10^{-6}	-	(Velmurugan et al., 2020)
				
สเปกโตรโฟโตเมตรี (NBC)	1.3×10^{-5} - 3.0×10^{-4}	1.31×10^{-5}	4.37×10^{-5}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้
ฟลูออเรสเซนซ์ (DCC)	9.0×10^{-6} - 5.0×10^{-4}	8.97×10^{-6}	2.99×10^{-5}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ตาราง 35 เปรียบเทียบเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการตรวจวัดฟอสเฟตด้วยเทคนิคต่างๆ

เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
ฟลูออเรสเซนซ์ และ Cyclic voltammetry 	-	8.2×10^{-8}	-	(Singh, Singh, Singh, & Jang, 2015)
ฟลูออเรสเซนซ์ 	-	1.1×10^{-6}	-	(Tiwari et al., 2018)
Reversed-phase chromatography membrane extraction	15-5000 $\mu\text{g/kg}$	5.0 $\mu\text{g/kg}$	-	(Shishov, Stolarova, Moskvina, & Bulatov, 2019)

ตาราง 35 (ต่อ)

เทคนิค	ช่วงความเป็นเส้นตรง (M)	LOD (M)	LOQ(M)	อ้างอิง
ฟลูออเรสเซนซ์	-	0.69 *(nmol)	-	(Nawaz et al., 2020)
				
Cyclic voltammetry และ Differential pulse voltammetry	1.0×10^{-8} - 8.0×10^{-5}	4.0×10^{-10}		(He & Liu, 2020)
สเปกโตรโฟโตเมตรี (NBC)	1.2×10^{-5} - 5.0×10^{-5}	1.26×10^{-5}	4.21×10^{-5}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้
ฟลูออเรสเซนซ์ (DCC)	8.7×10^{-6} - 5.0×10^{-4}	8.68×10^{-6}	2.89×10^{-5}	เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาโมเลกุลเซนเซอร์ในรูปของตัวดูดซับไฮโดรเจล 2 ชนิด ในการตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} แต่ยังไม่มีการศึกษาลักษณะ ตำแหน่งการแทรกตัวของเซนเซอร์ในตัวดูดซับไฮโดรเจล และความเข้มข้นของเซนเซอร์บนตัวดูดซับพอลิอะคริเลตเจลยังมีความไม่แน่นอน จึงควรทำการศึกษาในเรื่องดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำเซนเซอร์บนตัวดูดซับไฮโดรเจลมาใช้งานในตัวอย่างจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับได้ในอนาคต และควรมีการนำระบบเซนเซอร์ที่ได้พัฒนาในงานวิจัยนี้ไปทดสอบตรวจวัดไอออนลบ CN^- , CO_3^{2-} และ PO_4^{3-} ในตัวอย่างจริง เช่น CN^- ที่ปนเปื้อนในพืช หรือ PO_4^{3-} ในปุ๋ย เป็นต้น



บรรณานุกรม

- Adhikari, R. M., Neckers, D. C., & Shah, B. K. (2009). Photophysical Study of Blue, Green, and Orange-Red Light-Emitting Carbazoles. *J. Org. Chem.*, 74(9), 3341-3349.
- Anisha, S., Pramod, K. S., Vipin, K. G., & Garima, G. (2010). Hydrogels: A review. *Int J Pharm Sci Rev Res*, 4(2), 97-105.
- Banica, F.-G. (2012). *Chemical sensors and biosensors : fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Bhosale, S. V., Bhosale, S. V., Kalyankar, M. B., & Langford, S. J. (2009). A Core-Substituted Naphthalene Diimide Fluoride Sensor. *Org. Lett.*, 11(23), 5418-5421.
- Bissell, R. A., de Silva, A. P., Gunaratne, H. Q. N., Lynch, P. L. M., Maguire, G. E. M., & Sandanayake, K. R. A. S. (1992). Molecular fluorescent signalling with 'fluor-spacer-receptor' systems: approaches to sensing and switching devices via supramolecular photophysics. *Chem. Soc. Rev.*, 21(3), 187-195.
- Caliamanis, A., McCormick, M. J., & Carpenter, P. D. (2000). Enhanced conductometric detection of cyanide in suppressed ion chromatography. *J. Chromatogr. A*, 884(1), 75-80.
- Carr, F. P., & Frederick, D. K. (2014). Calcium Carbonate. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Christopher Leslee, D. B., Karuppanan, S., Vengaian, K. M., Gandhi, S., & Subramanian, S. (2017). Carbazole-azine based fluorescence 'off-on' sensor for selective detection of Cu^{2+} and its live cell imaging. *J. Lumin.*, 32(7), 1354-1360.
- Compiled from Appendix 5 Chem 1A, B., C Lab Manual and Zumdahl 6th Ed. The pKa values for organic acids can be found in Appendix II of Bruice 5th Ed. *Table of Acids with Ka and pKa Values*. Retrieved May 25, 2019, Retrieved from <https://www.sciencegeek.net>
- Correia, S. C., Santos, R. X., Cardoso, S. M., Santos, M. S., Oliveira, C. R., & Moreira, P. I. (2012). Cyanide preconditioning protects brain endothelial and NT2 neuron-like cells against glucotoxicity: role of mitochondrial reactive oxygen species and HIF-1 α . *Neurobiol. Dis.*, 45(1), 206-218.

- Feng, Y., Shi, L., Wu, H., Chen, L., & Chi, Y. (2018). Detection of cyanide by etching-induced electrochemiluminescence recovery. *Electrochim. Acta*, 261, 29-34.
- Gale, P. A., Garcia-Garrido, S. E., & Garric, J. (2008). Anion receptors based on organic frameworks: highlights from 2005 and 2006. *Chem. Soc. Rev.*, 37(1), 151-190.
- Goswami, S., & Chakrabarty, R. (2011). An imidazole based colorimetric sensor for fluoride anion. *Eur. J. Chem.*, 2(3), 410-415.
- Gross, D. E., Mikkilineni, V., Lynch, V. M., & Sessler, J. L. (2010). Bis-amidopyrrolyl receptors based on anthracene and carbazole. *J Supramol Chem*, 22(2), 135-141.
- He, B., & Liu, H. (2020). Electrochemical biosensor based on pyruvate oxidase immobilized AuNRs@Cu₂O-NDs as electroactive probes loaded poly (diallyldimethylammonium chloride) functionalized graphene for the detection of phosphate. *Sens. Actuator B-Chem.*, 304, 127303.
- Iheagwara, O. S., Ing, T. S., Kjellstrand, C. M., & Lew, S. Q. (2013). Phosphorus, phosphorous, and phosphate. *Hemodial Int*, 17(4), 479-482.
- Jamkratoke, M., Tumcharern, G., Tuntulani, T., & Tomapatanaget, B. (2011). A selective spectrofluorometric determination of micromolar level of cyanide in water using naphthoquinone imidazole boronic-based sensors and a surfactant cationic CTAB micellar system. *J. Fluoresc.*, 21(3), 1179-1187.
- Konidena, R. K., & Thomas, K. R. J. (2014). Selective naked-eye cyanide detection in aqueous media using a carbazole-derived fluorescent dye. *RSC Adv.*, 4(44), 22902-22910.
- Kumari, N., Jha, S., & Bhattacharya, S. (2014). An efficient probe for rapid detection of cyanide in water at parts per billion levels and naked-eye detection of endogenous cyanide. *Chem.: Asian J.*, 9(3), 830-837.
- Lambert, R. E. (2016). *A Chemical Sensor for Cyanide*. (Bachelor of Science), Southern Mississippi. Retrieved from https://aquila.usm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1383&context=honors_theses
- Lister, M. W., & Garvie, R. C. (1959). Sodium dithionite decomposition in aqueous solution and in the solid state. *Can. J. Chem.*, 37, 1567-1574.
- Ma, J., & Dasgupta, P. K. (2010). Recent developments in cyanide detection: a review.

Anal. Chim. Acta, 673(2), 117-125.

Mahmoud, A. M., Mahnashi, M. H., & El-Wakil, M. M. (2020). Indirect differential pulse voltammetric analysis of cyanide at porous copper based metal organic framework modified carbon paste electrode: Application to different water samples. *Talanta*, 121562.

Nakama, Y. (2017). Chapter 15 - Surfactants. In K. Sakamoto, et al. (Eds.). *Cosmetic Science and Technology* (pp. 231-244). Amsterdam: Elsevier.

Nawaz, H., Zhang, J., Tian, W., Jin, K., Jia, R., Yang, T., & Zhang, J. (2020). Cellulose-based fluorescent sensor for visual and versatile detection of amines and anions. *J. Hazard. Mater.*, 387, 121719.

Nicoleti, C. R., Nandi, L. G., & Machado, V. G. (2015). Chromogenic chemodosimeter for highly selective detection of cyanide in water and blood plasma based on Si-O cleavage in the micellar system. *Anal. Chem.*, 87(1), 362-366.

Norman, H. *Poly-sorb or Sodium Polyacrylate is an amazing polymer that absorbs 100-500 times its weight in water. A blend of polyester and super water-absorbent polymer fibers*. Retrieved October 11, 2019, Retrieved from <https://sites.google.com/site/sed695b/projects/discrepant-events/osmosis-magic>

Nunn, P. B., Lyddiard, J. R., & Christopher Perera, K. P. (2011). Brain glutathione as a target for aetiological factors in neurolepsy and konzo. *Food Chem. Toxicol.*, 49(3), 662-667.

Organization, W. H. (2004). *Guidelines for Drinking-Water Quality*. SNP Best-set Typesetter Ltd., Hong Kong.

Promchat, A., Rashatasakhon, P., & Sukwattanasinitt, M. (2017). A novel indolium salt as a highly sensitive and selective fluorescent sensor for cyanide detection in water. *J. Hazard. Mater.*, 329, 255-261.

Rezaeian, K., & Khanmohammadi, H. (2014). Naked-eye detection of biologically important anions by a new chromogenic azo-azomethine sensor. *Spectrochim. Acta A*, 133, 31-37.

Ripin, D. H., & Evans, D. A. (2005). *Evans pKa Table*. Retrieved May 25, 2019, Retrieved from <http://www.chem.wisc.edu/areas/reich/pkatable/index.htm>

Rosen, M. J. (2004). *Surfactant and interfacial phenomena* (3 ed.): A JOHN WILEY &

SONS.

- Scamehorn, J. F., Schechter, R. S., & Wade, W. H. (1982). Adsorption of surfactants on mineral oxide surfaces from aqueous solutions: I: Isomerically pure anionic surfactants. *J. Colloid Interface Sci.*, 85(2), 463-478.
- Schluepmann, H., Berke, L., & Sanchez-Perez, G. F. (2012). Metabolism control over growth: a case for trehalose-6-phosphate in plants. *J. Exp. Bot.*, 63(9), 3379-3390.
- Schramm, A. D. S., Nicoleti, C. R., Stock, R. I., Heying, R. S., Bortoluzzi, A. J., & Machado, V. G. (2017). Anionic optical devices based on 4-(nitrostyryl)phenols for the selective detection of fluoride in acetonitrile and cyanide in water. *Sens. Actuator B-Chem.*, 240, 1036-1048.
- Settle, F. A. (1997). *Handbook of instrumental techniques for analytical chemistry*. Prentice Hall.
- Shishov, A., Stolarova, E., Moskvina, L., & Bulatov, A. (2019). Reversed-phase chromatomembrane extraction as a novel approach for automated sample pretreatment: Anions determination in biodiesel by ion chromatography with conductivity detection. *Anal. Chim. Acta*, 1087, 62-68.
- Simeonova, F. P., & Fishbein, L. (2004). *Hydrogen cyanide and cyanides : human health aspects*. World Health Organization & International Programme on Chemical Safety.
- Singh, A., Singh, J., Singh, N., & Jang, D. O. (2015). A benzimidazolium-based mixed organic-inorganic polymer of Cu(II) ions for highly selective sensing of phosphates in water: applications for detection of harmful organophosphates. *Tetrahedron*, 71(36), 6143-6147.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2007). *Principles of instrumental analysis*. Thomson Higher Education.
- Tavallali, H., Deilamy Rad, G., Parhami, A., & Abbasiyan, E. (2012). A new application of bromopyrogallol red as a selective and sensitive competition assay for recognition and determination of acetate anion in DMSO/water media. *Dyes Pigm.*, 94(3), 541-547.
- Thimaradka, V., Pangannaya, S., Mohan, M., & Trivedi, D. R. (2018). Hydrazinylpyridine based highly selective optical sensor for aqueous source of carbonate ions:

- Electrochemical and DFT studies. *Spectrochim. Acta A*, 193, 330-337.
- Tiwari, K., Kumar, S., Kumar, V., Kaur, J., Arora, S., & Mahajan, R. K. (2018). An azine based sensor for selective detection of Cu^{2+} ions and its copper complex for sensing of phosphate ions in physiological conditions and in living cells. *Spectrochim. Acta A*, 191, 16-26.
- Velmurugan, K., Vickram, R., Karthick, R., Jipsa, C. V., Suresh, S., Prabakaran, G., . . . Nandhakumar, R. (2020). Binol diaryl dipyrrene fluorescent probe: Dual detection of silver and carbonate ions and its bioimaging applications. *J. Photochem. Photobiol. A*, 401, 112737.
- Vetrichelvan, M., Nagarajan, R., & Valiyaveetil, S. (2006). Carbazole-Containing Conjugated Copolymers as Colorimetric/Fluorimetric Sensor for Iodide Anion. *Macromolecules*, 39(24), 8303-8310.
- Vintu, M., Unnikrishnan, G., Shiju, E., & Chandrasekharan, K. (2019). Indolo[3,2-b]carbazole-based poly(arylene ethynylene)s through Sonogashira coupling for optoelectronic and sensing applications. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136(2), 46940.
- Wang, S., Fei, X., Guo, J., Yang, Q., Li, Y., & Song, Y. (2016). A novel reaction-based colorimetric and ratiometric fluorescent sensor for cyanide anion with a large emission shift and high selectivity. *Talanta*, 148, 229-236.
- Zhan, N., Huang, Y., Rao, Z., & Zhao, X.-L. (2016). Fast Detection of Carbonate and Bicarbonate in Groundwater and Lake Water by Coupled Ion Selective Electrode. *Chin. J. Anal. Chem.*, 44(3), 355-360.
- Zhang, C., Luo, J., Ou, L., Lun, Y., Cai, S., Hu, B., . . . Pan, C. (2018). Fluorescent Porous Carbazole-Decorated Copolymer Monodisperse Microspheres: Facile synthesis, Selective and Recyclable Detection of Iron (III) in Aqueous Medium. *Chem. Eur. J.*, 24(12), 3030-3037.
- Zhou, Y., Jung, J. Y., Jeon, H. R., Kim, Y., Kim, S.-J., & Yoon, J. (2011). A Novel Supramolecular Tetrameric Vanadate-Selective Colorimetric and “Off-On” Sensor with Pyrene Ligand. *Org. Lett.*, 13(10), 2742-2745.
- เย็นหทัย แนนหนา. (2549). *สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แม่น อมรสิทธิ์. (2552). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ = Principles and*

techniques of indtumental analysis spectroscopy. ชวนพิมพ์.

จอมใจ สุกใส. (2552). เคมีจุปราโมเลกุล:เซ็นเซอร์ทางเคมี. *วิทยาศาสตร์บูรพา*, 109-118.

ธัญญกรณ์ ศรีสุบิน. (2557). *สารน่ารู้: ไฮโดรเจล วัสดุดูดซับน้ำอัจฉริยะ*. สืบค้น 11 ตุลาคม 2562,

จาก <http://www.dss.go.th/images/st-article/ct-10-2557-hydro.pdf>

พิชญภา ราชธรรมมา, และ อังค์วรา พูลเกษม. ศาสตร์อาหารสู่นวัตกรรมลดขยะ. *วารสารกรม*

วิทยาศาสตร์บริการ, 33-35.

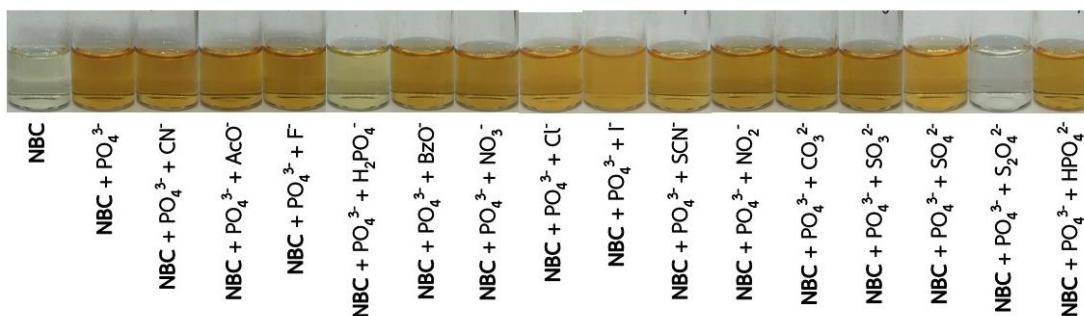
วารุณี ตานันต์, และ สายันต์ แสงสุวรรณ. (2557). พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การ

วิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*,

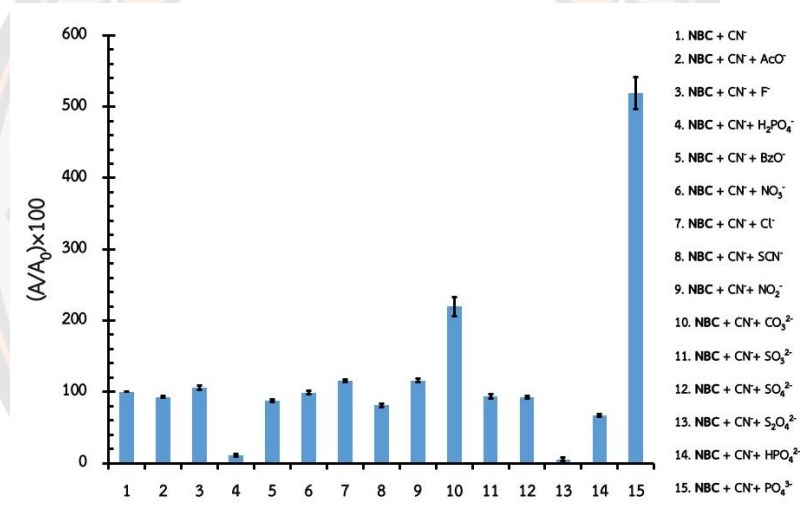
16, 63-81.



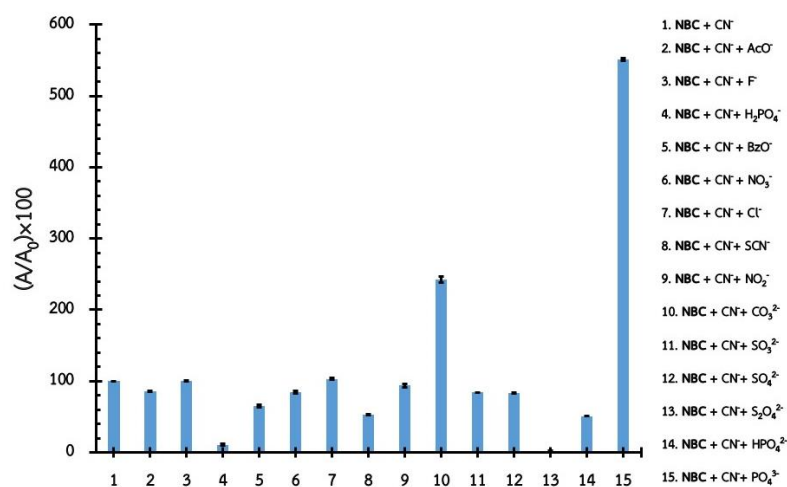




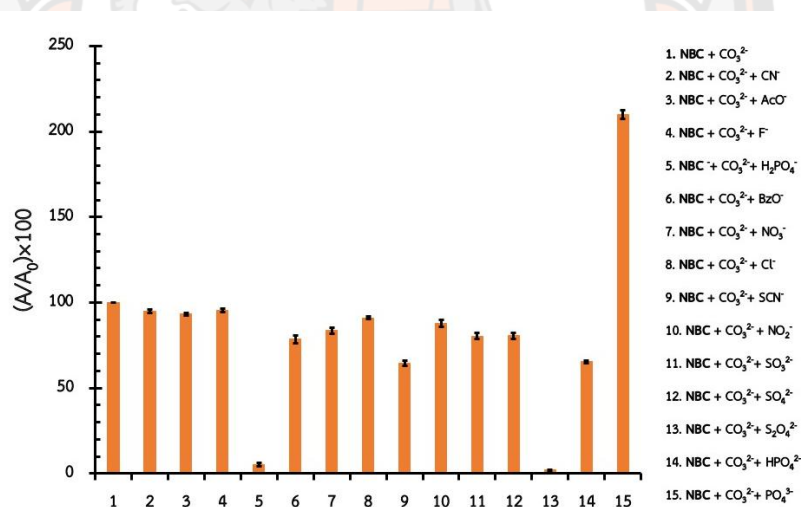
ภาพ 82 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-}) ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M)



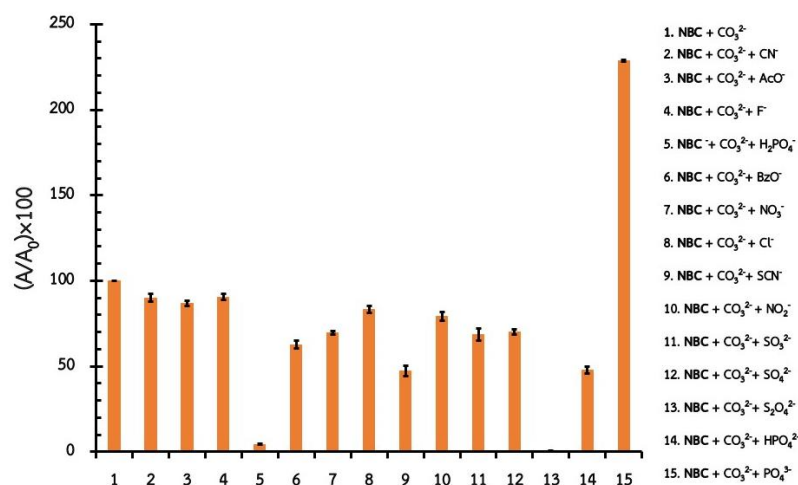
ภาพ 83 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CN^-)



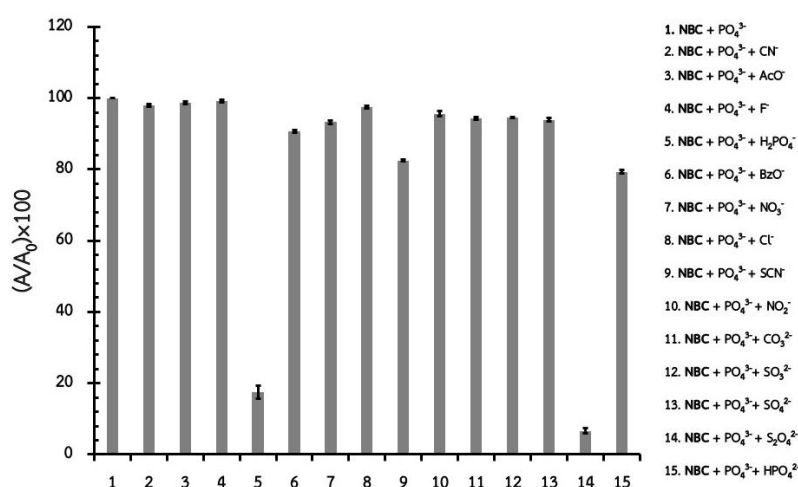
ภาพ 84 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN⁻ ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล CN⁻)



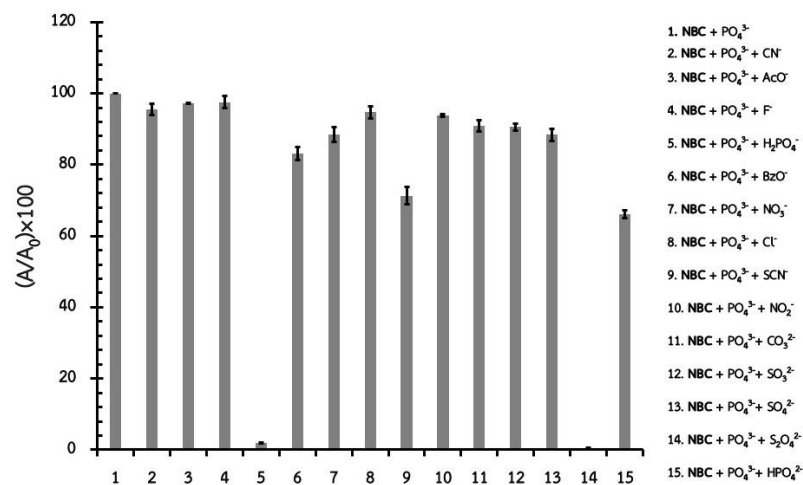
ภาพ 85 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO₃²⁻ ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล CO₃²⁻)



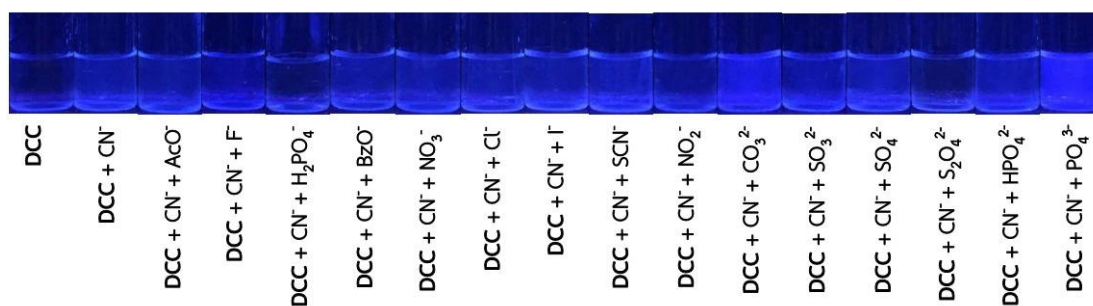
ภาพ 86 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO₃²⁻ ของ NBC (1.0×10⁻⁴ M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10⁻³ M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล CO₃²⁻)



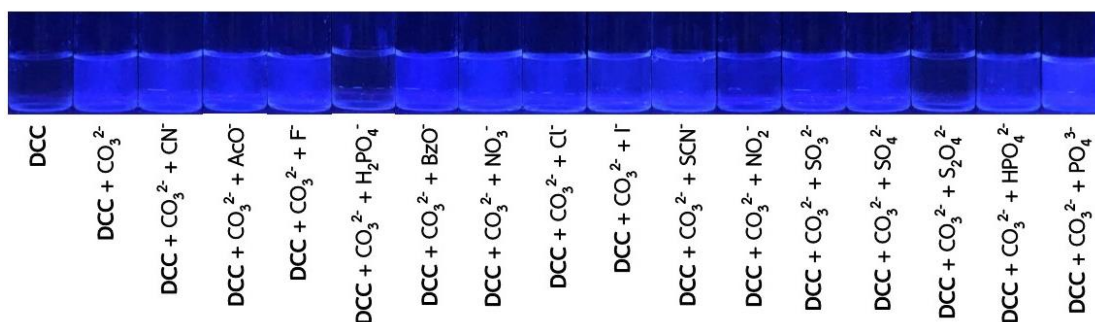
ภาพ 87 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO₄³⁻ ของ NBC (1.0×10⁻⁴ M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10⁻³ M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (1 eq. ของจำนวนโมล PO₄³⁻)



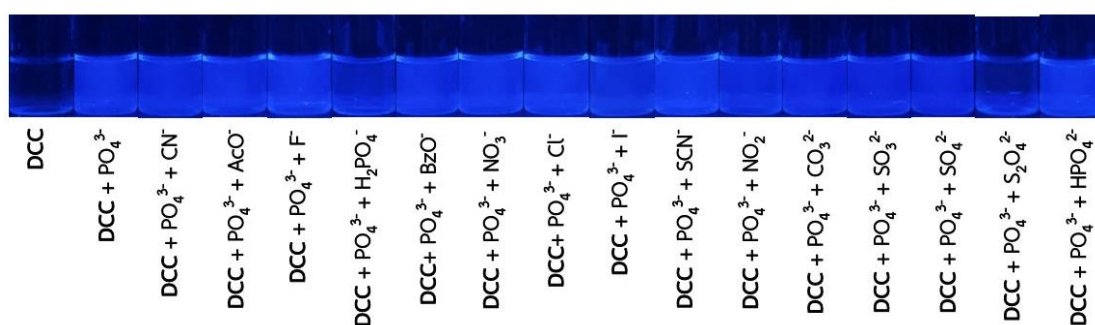
ภาพ 88 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} ของ NBC (1.0×10^{-4} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ก่อนและหลังการเติมไอออนลบชนิดอื่นๆ (2 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-})



ภาพ 89 ผลของไอออนรบกวนต่อการตรวจวัดไอออนลบ CN^- (1 eq. ของจำนวนโมล CN^-) ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light



ภาพ 90 ผลของไอออนลบกว่นต่อการตรวจวัดไอออนลบ CO_3^{2-} (1 eq. ของจำนวนโมล CO_3^{2-}) ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light



ภาพ 91 ผลของไอออนลบกว่นต่อการตรวจวัดไอออนลบ PO_4^{3-} (1 eq. ของจำนวนโมล PO_4^{3-}) 1 ของ DCC (5.0×10^{-5} M) ในระบบตัวทำละลาย MeCN:H₂O (1:4) ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว CTAB (5.0×10^{-3} M) ภายใต้แสง black light