วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี | Agriculture and Technology Journal

ปีที่ 1 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม 2563 | Vol.1 No.2 May – August 2020

การศึกษากายภาพเชิงแสงของสีย้อมที่เป็นแคตไอออนที่ถูกขังในซีโอไลต์แอลทีแอลเพื่อใช้เป็นเสาอากาศเทียม

Photophysical study of cationic dyes confined zeolite LTL for artificial antenna applications

สุริยา ดวงมณี[1*]และวิไลพร อินสุวรรณ[2]

Suriya Doungmanee[1*] and Wilaiporn Insuwan[2]

[1] สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

[2] คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

[*]Corresponding Author E-mail Address : wi_insuwan@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติกายภาพเชิงแสงและการถ่ายเทพลังงานแสงของโมเลกุลสีย้อมพาราควอท(PQ) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้พลังงานไปยังโมเลกุลสีย้อมอะคริฟราวีนไฮโดรคลอไรด์ (AF) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานซึ่งสีย้อมทั้งสองถูกกักขังในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโพแทสเซียม (K-LTL) และซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโปรตอน (H-LTL) กระบวนการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นจะเกิดผ่านกลไกของ Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET)จากการศึกษาพบว่าในการใส่โมเลกุลสีย้อมทั้งสองเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลสามารถนำไปใช้เป็นเสาอากาศเทียมได้โดยพิจารณาจากค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน Value of critical transfer distance (R_{DA}) และประสิทธิภาพของFRET (%E) ของ PQ-AF_K-LTL คือ 23.4 Å, 74.9% และ PQ-AF_H-LTL คือ 23.8 Å, 78.1% ตามลำดับ

คำสำคัญ: พาราควอท อะคริฟราวีนไฮโดรคลอไรด์ การออกแบบโมเลกุลโดยใช้กระบวนการ Fluorescence Resonance Energy Transfer

Abstract

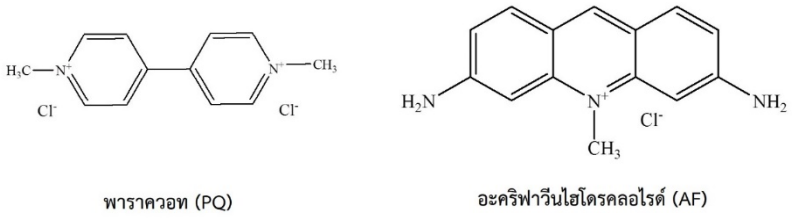
The photophysical properties and energy transfer characteristic of dye molecules between donor (Paraquat, PQ) to an acceptor molecule (Acriflavine hydrochloride, AF) confined in zeolite LTL (K-LTL and H-LTL) have been studied. The energy transfer processes occur via Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET). The results show that Paraquat and Acriflavine hydrochloride confined in zeolite LTL can be utilized as antenna materials. The value of critical transfer distance (R_{DA}) and FRET efficiency (%E) for PQ-AF_K-LTL are 23.4 Å, 74 .9% and PQ-AF_H-LTL are 23 .8 Å, and 78.1%, respectively.

Keywords: Paraquat, Acriflavine hydrochloride, Fluorescence resonance energy transfer

บทนำ

พาราควอท (PQ) มีชื่อทางเคมีคือ 1,1'-Dimethyl-4,4'-bipyridinium dichloride (ดังแสดงในรูปที่ 1) เป็นสารกำจัดวัชพืชที่มีประสิทธิภาพสูงและปลอดภัยเมื่อใช้ตามคำแนะนำที่ติดอยู่บนฉลากแต่การได้รับสารพาราควอทในขนาดที่เป็นพิษโอกาสเสียชีวิตได้สูงแม้จะได้รับการรักษาอย่างเต็มที่ Mojović et al. (2009) ได้รายงานว่าความเข้มข้นสูงสุดที่อนุญาตให้พาราควอทปนเปื้อนในน้ำดื่มและผิวน้ำได้คือ 0.1 ไมโครกรัมต่อลิตรและ 1-3 ไมโครกรัมต่อลิตรตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามถ้าสัมผัสโดนผิวหนังหรือดวงตาก็ส่งผลต่อมนุษย์และสัตว์ได้เช่นกัน ในการกำจัดพาราควอทที่ง่ายและสะดวกก็คือการดูดซับด้วยตัวถูกดูดซับที่เหมาะสม มีการศึกษาการดูดซับพาราควอทบนตัวดูดซับซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปของโพแทสเซียม (K-LTL) และโปรตอน (H-LTL) ซึ่งพบว่าซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปของโพแทสเซียมมีความสามารถดูดซับพาราควอทได้ถึง 161.71 มิลลิกรัมต่อกรัมของปริมาณตัวดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณอะลูมิเนียม (Al) อะตอม จำนวนของอะลูมิเนียมส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมไอออน (K^+) มากขึ้นด้วย ส่งผลให้พาราควอทสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับโพแทสเซียมไอออน (K^+) ที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโพแทสเซียม ได้ดีกว่าไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่อยู่ในซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโปรตอน (Insuwan and Rangsriwatananon, 2014) นอกจากนี้การดูดซับพาราควอทบนตัวดูดซับซีโอไลต์โซเดียมวายก็มีการศึกษาโดย วีนา รองจะโป๊ะ และคณะ (Rongchapo et al., 2013) สำหรับอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ (acriflavine hydrochloride) ชื่อทางเคมีคือ 3,6-Diamino-10-methylacridinium chloride hydrochloride (ดังแสดงในรูปที่ 1) ถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีจอภาพ (organic light emitting diode) เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cell) พีเอชเซนเซอร์ (pH sensor) และเสาอากาศเทียม (Artificial antenna) (Ibrahim and Etaiw, 2002; Megelski and Calzaferri, 2001; Misra et al., 1999; Misra et al., 2002; Insuwan et al., 2015) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการจับคู่ของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ เพื่อใช้เป็นเสาอากาศเทียมมาก่อนจึงเป็นที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาเป็นเสาอากาศเทียมต่อไป หลักการทำงานของเสาอากาศเทียมจะคล้ายกับกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชซึ่งเป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องกันเป็นลำดับในคลอโรพลาสต์ในเซลล์พืชโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์เปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนจากน้ำหรือแหล่งไฮโดรเจนอื่น ๆ ให้กลายเป็นสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตและมีแก๊สออกซิเจนเกิดขึ้น ในการศึกษาครั้งนี้เสาอากาศเทียมจะประกอบไปด้วยซีโอไลต์แอลทีแอลทำหน้าที่เป็นที่อยู่ (Host) ของโมเลกุลสีย้อมซึ่งซีโอไลต์แอลทีแอลมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนและสามารถทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันไม่ให้โมเลกุลสีย้อมเกิดการรวมกลุ่มกัน (Aggregate) ซึ่งจะส่งผลเสียต่อกระบวนการทางแสงของโมเลกุลสีย้อมทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เราจึงแก้ไขปัญหาโดยใช้ซีโอไลต์แอลทีแอลทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของแข็ง (Solid solvent) แทนตัวทำละลายทั่วไป

ภายในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลจะเป็นที่อยู่ของโมเลกุลสีย้อมที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้พลังงาน (Donor) บริเวณตรงกลางของซีโอไลต์แอลทีแอล ในขณะที่โมเลกุลสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงาน (Acceptor) จะอยู่ตรงบริเวณปลายทั้งสองด้านของซีโอไลต์แอลทีแอล ระบบนี้ถูกออกแบบให้เป็นเสาอากาศเทียมเพื่อเก็บกักพลังงานแสง การทำงานของระบบเสาอากาศเทียมเริ่มต้นจากโมเลกุลสีย้อมที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้พลังงานถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสง เนื่องจากระยะห่างที่สั้นและอยู่ใกล้ชิดกันของโมเลกุลสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงานและโมเลกุลสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานและการวางตัวของไดโพลโมเมนต์ (Dipole moments) ของโมเลกุลสีย้อมทั้งสองเกิดการถ่ายโอนพลังงานผ่านกระบวนการ Fluorescence resonance energy transfer (Gfeller et al., 1999) พลังงานที่ส่งมาถึงโมเลกุลที่เป็นตัวรับพลังงานบริเวณปลายทั้งสองข้างของซีโอไลต์แอลทีแอลจะถูกส่งต่อไปยังโมเลกุลเป้าหมาย (External material) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) (Bossart et al., 2004)



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของพาราควอท (PQ) และ อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ (AF)

ได้มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาการวางตัวและลักษณะกายภาพเชิงแสงของโมเลกุลสีย้อมไทโอนีนที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอลจากการศึกษาพบว่าโมเลกุลไทโอนีนสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโพรงเปิดของซีโอไลต์แอลทีแอลที่มีขนาด 7.1 Å และวางตัวในแนวขนานของแกน c (c-axis) ของคอลัมน์ของซีโอไลต์แอลโดยไม่มีการเกาะกลุ่มกันของโมเลกุลสีย้อมไทโอนีน จากการที่ถูกกักขังด้วยซีโอไลต์แอลทีแอลส่งผลให้โมเลกุลสีย้อมไทโอนีนไม่มีการหมุนและมีค่าชั่วชีวิตที่ยาว (Gigli et al., 2015) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาทั้งการทดลองและทางทฤษฎีเมื่อทำการใส่โมเลกุล boron-dipyrromethene (BODIPY) เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลจากการศึกษาพบว่าโมเลกุลสีย้อมจะเกิดอันตรกิริยากับโปรตอนที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีน้ำเงินซึ่งแตกต่างจากในสารละลายที่เกิดการดูดกลืนแสงที่ช่วงแสงสีเขียว-เหลือง นอกจากนี้การกำจัดฟลูออรีนออกจาก BODIPY ยังส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่สั้นลง จากการศึกษาสรุปได้ว่าการใส่ BODIPY เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลสามารถให้ช่วงการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันถึงสองความยาวคลื่นพร้อมทั้งให้สเปกตรัมการคายแสงที่กว้างขึ้นซึ่งสามารถพัฒนาไปใช้เป็นตัวเก็บกักพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี (Manzano et al., 2013)

การออกแบบโมเลกุลโดยใช้กระบวนการ Fluorescence resonance energy transfer (FRET) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลที่อยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอล โดยเป็นการถ่ายโอนพลังงานของโมเลกุลสีที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้พลังงาน (Donor) ไปยังโมเลกุลสีที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงาน (Acceptor) เมื่อตัวรับพลังงานได้รับพลังงานจากตัวให้พลังงานจะส่งผลทำให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมาสู่ระบบภายนอกในรูปของแสงซึ่งสามารถตรวจวัดได้และถูกส่งต่อไปยังโมเลกุลเป้าหมายต่อไป (External material) สิ่งสำคัญในกระบวนการนี้คือจะต้องประกอบไปด้วยสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงานและสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องอยู่ใกล้กัน โดยทั่วไปคือ 10–100 Å สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Absorption spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการคายแสง (Fluorescence emission spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงานและการวางตัวของ Transition dipole moment ของสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงานและสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องวางตัวในแนวขนานกัน ในการศึกษากระบวนการถ่ายโอนพลังงานระหว่างตัวให้และรับพลังงานของโมเลกุลสีย้อมมีความสำคัญอย่างมากในทางปฏิบัติและทฤษฎีโมเลกุลสีย้อมได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน เช่น

ทางด้านชีวภาพ และอุตสาหกรรม ในหลาย ๆ งานวิจัยได้ทำการศึกษา การถ่ายโอนพลังงานของโมเลกุลสีย้อมระหว่างตัวให้และรับพลังงาน เช่น โมเลกุลของ rhodamine 6G และ cresyl violet ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ทางด้าน เลเซอร์ (Laser) ซึ่งการถ่ายโอนพลังงานในสีย้อมนี้ได้ถูกศึกษาโดย Lin and Dienes (1973) นอกจากนี้นักวิจัยบางคนยังได้ทำการศึกษาการถ่ายโอนพลังงานจากอนุพันธ์ของแนฟทาลีน (Naphthalene derivatives) ไปยังอะคริฟราวีน โดยทำการวัดค่า Critical transfer distances (R_0) ของคู่ตัวให้-รับ พลังงานซึ่งค่าที่วัดได้อยู่ในช่วง 25 ถึง 28 อังสตรอม (Å) ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ทางทฤษฎี (Ellis and Solomon, 1967) FRET ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ ด้าน ยกตัวอย่างเช่น ใช้เป็น pH sensor โดยมีการศึกษาการเกิด FRET ของโมเลกุลสีย้อมอะคริฟราวีน (Acriflavine, donor) ไปยังโมเลกุลสีย้อมโรดามีน 6จี (rhodamine 6G, acceptor) (Misra et al., 1999) โดยพบว่าการถ่ายโอนพลังงานของสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ของโมเลกุลสีย้อมอะคริฟาวีนเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติกายภาพเชิงแสงและพฤติกรรมของพลังงานในสภาวะการกระตุ้นของโมเลกุลสีย้อมพาราควอทและอะคริฟราวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อยู่ในสารละลายและที่ถูกกักขังในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวเสาอากาศเทียมที่สามารถเก็บกักพลังงานแสงได้ในช่วงของการดูดกลืนแสงที่กว้างขึ้น

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) และรูปโปรตอน (H-LTL)
2. พาราควอท (1,1'-Dimethyl-4,4'-bipyridinium dichloride)
3. อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ (3,6-Diamino-10-methylacridinium chloride hydrochloride)
4. เอ็น-บิวทานอล (n-Butanol)
5. โทลูอีน (Toluene)
6. อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide)
7. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide)
8. LUDOX ® HS-40 colloidal silica
9. อะลูมิเนียมไนเตรท (Ammonium Nitrate)
10. เอทานอล (Ethanol)

เครื่องมือที่ต้องใช้ในงานวิจัย

1. Powder X-ray diffractometer (Model D5005, Bruker, Karlsruhe, Germany)
2. Scanning Electron Microscope (JSM 6400, Jeol, Japan)
3. Cary-1/1E UV/VIS spectrophotometer (Varian, Germany)
4. Luminescence spectrometer LS 50 B (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA)
5. UV-Vis spectrophotometer (UV-2550, Shimadzu, Japan)

การสังเคราะห์ซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโพแทสเซียม (K-LTL)

1. ทำการชั่ง 0.59 กรัมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มาละลายในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อน 1.28 กรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำกลั่น 2.51 กรัม จนสารละลายใส

2. ค่อย ๆ เติมสารละลายในข้อ 1 ลงใน 5.52 กรัม LUDOX® HS-40 colloidal silica และ 4.82 กรัมของน้ำกลั่น จากนั้นกวนสารอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 5 นาทีจนกระทั่งได้ของได้ของผสมที่หนืดและขุ่นคล้ายเจล

3. เทสารประกอบเจลที่ได้ลงในถ้วยเทฟลอนแล้วนำเข้าเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลโดยให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการสังเคราะห์ 48 ชั่วโมง

4. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH ≈ 7 แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

การสังเคราะห์ซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (H-LTL) ซึ่งเตรียมได้จากซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) 4 ขั้นตอน

1. ซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (H-LTL) เตรียมได้จากการเปลี่ยนซีโอไลต์แอลทีแอล (K-LTL) ไปอยู่ในรูป NH_4LTL

2. NH_4LTL เตรียมได้โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) ระหว่างซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโพแทสเซียมด้วยสารละลาย 1 โมลาร์แอมโมเนียมไนเตรทที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ (NH_4LTL) มากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์จากข้อ 3 ไปเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อกำจัด NH_3 เพื่อให้ได้ซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (H-LTL)

การใส่โมเลกุลของสีย้อมลงไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมและในรูปโปรตอน

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับพาราควอททำได้โดยชั่ง 100 มิลลิกรัมของซีโอไลต์แอลทีแอลมาเติมลงในสารละลาย 25 มิลลิลิตรของ 1×10^{-5} โมลาร์ของพาราควอทหลังจากนั้นนำไปโซนิเคทเป็นเวลา 10 นาทีและกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสหลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนนำตัวอย่างไปทำการล้างด้วย n-Butanol จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมงสำหรับกรณีอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ก็ทำเหมือนกับกรณีของพาราควอท

การใส่โมเลกุลพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ลงไปในซีโอไลต์แอลทีแอล ที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมและในรูปโปรตอน

1. ชั่ง 100 มิลลิกรัมของซีโอไลต์แอลทีแอลมาเติมลงในสารละลาย 25 มิลลิลิตรของสารละลายพาราควอทที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (คำนวณจากสมการที่ 1) หลังจากนั้นนำไปโซนิเคทเป็นเวลา 10 นาทีและกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนนำตัวอย่างไปทำการล้างด้วย n-Butanol จนกระทั่งปราศจากพาราควอท

2. จากนั้นนำสารละลาย 25 มิลลิลิตรของสารละลายอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (คำนวณจากสมการที่ 1) มาเติมลงในสารละลายในข้อ 1 จากนั้นนำไปโซนิเคทเป็นเวลา 10 นาทีและกวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หลังจากการแลกเปลี่ยนไอออนนำตัวอย่างไปทำการล้างด้วย n-Butanol จนกระทั่งปราศจากอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มากรองแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

$$c(\rho) = \frac{\rho_Z \rho}{M_r S} \quad (1)$$

เมื่อ $C_{(\rho)}$ คือความเข้มข้นของโมเลกุลของสีย้อม (โมลาร์), ρ คือความน่าจะเป็นในการใส่โมเลกุลสีย้อม, ρ_z คือความหนาแน่นของผลึกซีโอไลต์ (2.17 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร), M_r คือ น้ำหนักโมเลกุลของหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์ (2883 กรัม/โมล) และ S คือจำนวนของหน่วยเซลล์ที่โมเลกุลสีย้อมเข้ามาครอบครอง (พาราครอท เท่ากับ 1.0 และอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ เท่ากับ 1.5) (Cao et al, 2016)

วิเคราะห์หาค่า Excitation และ Emission

สารละลายของสีย้อมถูกเจือจางให้อยู่ในช่วง 1 x 10^{-6} โมลาร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกาะกลุ่มกันของสีย้อม สำหรับกรณีสีย้อมที่ใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แล้วนั้นจะทำการชั่งตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิกรัมมาละลายใน Toluene ซึ่งค่าการวัดค่าดัชนีหักเห (Refractive index) ที่ใกล้เคียงกับซีโอไลต์แอลทีแอล ซึ่งสามารถลดผลของการกระเจิงของแสงได้อย่างดี ตัวอย่างที่กล่าวมาจากข้างต้นนี้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Luminescence spectrometer LS 50B (Perkin-Elmer)

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

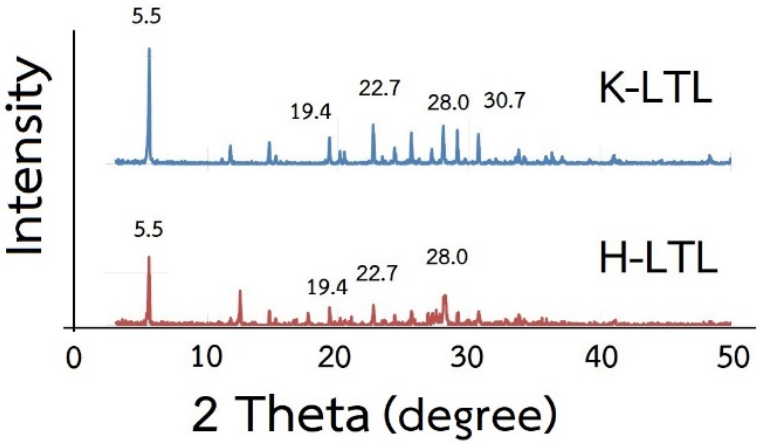
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมถูกเจือจางให้อยู่ในช่วง 1 x 10^{-6} โมลาร์ด้วยเครื่อง Cary-1/1E UV/VIS spectrophotometer สำหรับกรณีสีย้อมที่ใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ จะทำการชั่งตัวอย่างมาประมาณ 5 มิลลิกรัม ละลายใน 5 มิลลิลิตร Ethanol จากนั้นทำการโซนิเคท ระเหยตัวทำละลายแล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer (UV-2550, Shimadzu) ในช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

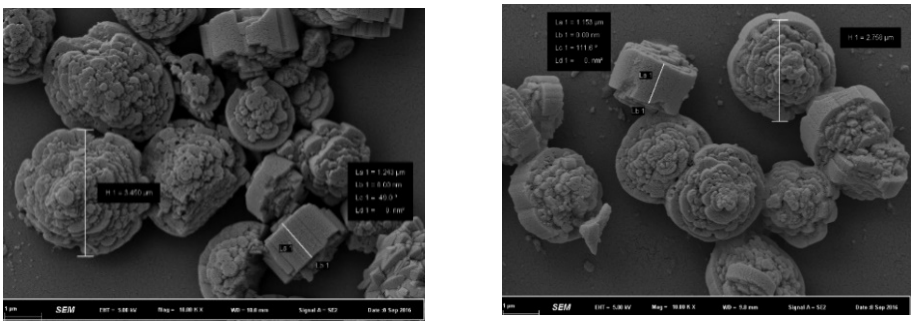
การวิเคราะห์โดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction Analysis (XRD))

ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ชนิดผลึกด้วยเครื่อง Powder X-ray diffractometer (Model D5005, Bruker, Karlsruhe, Germany) ใช้รังสี Cu-K_α เดินเครื่องด้วยกระแสและความต่างศักย์ที่ 30 ไมโครแอมแปร์ และ 40 โวลต์ จากการวิเคราะห์ซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) ที่สังเคราะห์พบว่าสเปกตรัมมุมหักเหของการกระเจิงรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (H-LTL) พบว่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (H-LTL) ลดลง ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากในขั้นตอนการเปลี่ยนรูปซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) เป็นซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโปรตอน (H-LTL) มีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงในขั้นตอนเผาที่อุณหภูมิสูงซึ่งนำไปสู่การทำลายโครงสร้างผลึกได้ แต่อย่างไรก็ตามซีโอไลต์แอลทีแอลทั้งสองรูปแบบปรากฏที่ตำแหน่งองศาในการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (2Theta) ที่ตำแหน่งเดียวกันและเป็นลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์แอลทีแอล คือ 5.5 19.4 22.7 28.0 29.1 และ 30.7 ตามลำดับ



รูปที่ 2 สเปกตรัมมุมหักเหของการกระเจิงรังสีเอกซ์ของ K-LTL and H-LTL

การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)



รูปที่ 3 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ K-LTL (ซ้าย) และ H-LTL (ขวา)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของซีโอไลต์แอลทีแอลที่สังเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM, Jeol รุ่น JSM-6400) พบว่าผลึกมีรูปร่างค่อนข้างกลมทั้งซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) และซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโปรตอน (H-LTL) ผลึกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง x ความยาว เท่ากับ 3.450 x 1.243 ไมโครเมตรและ 2.758 x 1.153 ไมโครเมตรสำหรับซีโอไลต์แอลทีแอลในรูป โพแทสเซียม (K-LTL) เป็นซีโอไลต์แอลทีแอลในรูปโปรตอน (H-LTL) ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3

วิเคราะห์หาค่า Excitation และ Emission

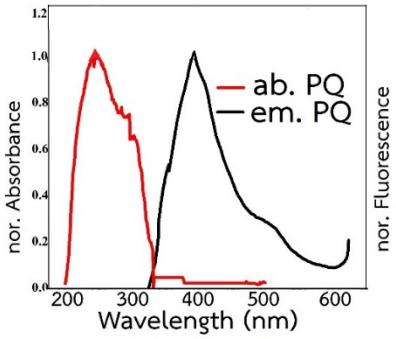
สารละลายของสีย้อมถูกเจือจางให้อยู่ในช่วง 1 x 10^{-6} โมลาร์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกาะกลุ่มกันของสีย้อม สำหรับกรณีสีย้อมที่ใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แล้วนั้นจะทำการชั่งตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิกรัมมาละลายใน Toluene ซึ่งค่าการวัดค่าดัชนีหักเห (Refractive index) เท่ากับ1.4969 ซึ่งใกล้เคียงกับซีโอไลต์แอลทีแอลที่มีค่าเท่ากับ 1.4–1.5 (Calzaferri and Devaux, 2010) ซึ่งสามารถลดผลของการกระเจิงของแสงได้อย่างดี ตัวอย่างที่กล่าวมาจากข้างต้นนี้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Luminescence spectrometer LS 50B (Perkin-Elmer)

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

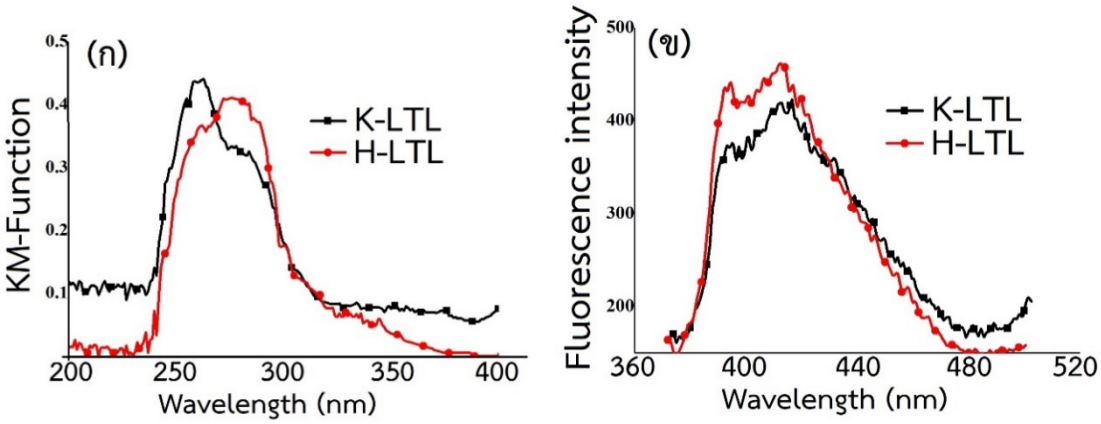
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมถูกเจือจางให้อยู่ในช่วง 1 × 10^{-6} โมลาร์ด้วยเครื่อง Varian cary1E UV-Vis spectrophotometer สำหรับกรณีสีย้อมที่ใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ จะทำการชั่งตัวอย่างมาประมาณ 5 มิลลิกรัม ละลายใน 5 มิลลิลิตรเอทานอล จากนั้นทำการโซนิเคท ระเหยตัวทำละลายแล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์แล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Shimadzu UV-2550 UV–visible spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น 200–800 นาโนเมตร

สมบัติทางกายภาพเชิงแสงของพาราควอท (PQ) ที่อยู่ในสารละลายและถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอล

พิจารณารูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงของสารละลายพาราควอท (1 x 10^{-6} โมลาร์) ผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการคายแสงของพาราควอทปรากฏที่ตำแหน่ง 250 และ 400 นาโนเมตรตามลำดับ ในขณะที่สเปกตรัมของการดูดกลืนแสง/การคายแสงของพาราควอทที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมและซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอนปรากฏสเปกตรัมที่มีลักษณะค่อนข้างกว้างที่ 267/420 และ 275/420 นาโนเมตรตามลำดับ (รูปที่ 5) เป็นที่น่าสังเกตว่าสเปกตรัมการของการดูดกลืนแสงของพาราควอทที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมมีบ่าเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 285 นาโนเมตรและสเปกตรัมการคายแสงที่ประมาณความยาวคลื่นที่ 420 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับการทรานซิชันจาก **π-π*** (García-Sosa and Ramírez, 2010)

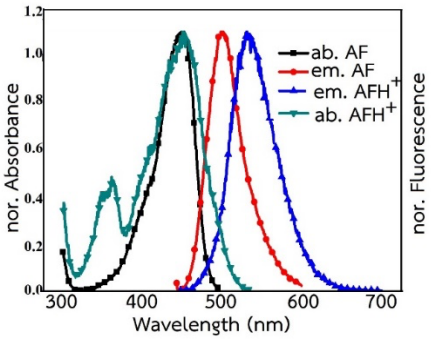


รูปที่ 4 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงของสารละลายพาราควอท (1 x 10^{-6} โมลาร์)



รูปที่ 5 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ก) และการคายแสง (ข) ของพาราควอทที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอล

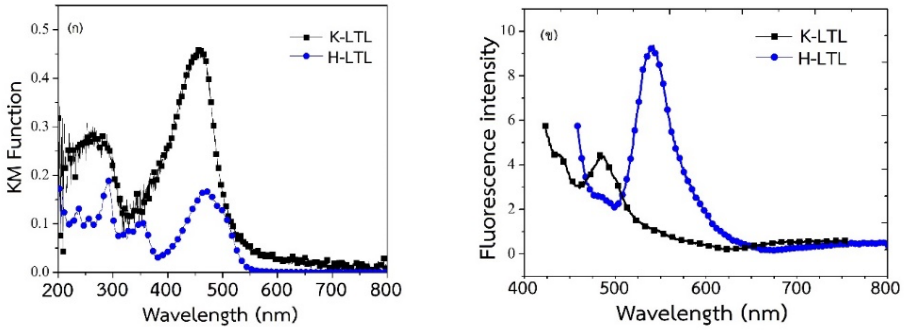
สมบัติทางกายภาพเชิงแสงของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ (AF) ที่อยู่ในสารละลายและถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอล



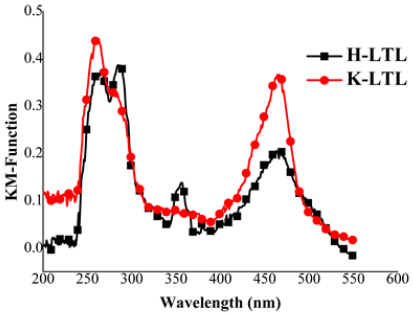
รูปที่ 6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงของสารละลายอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์(1 x 10^{-6} โมลาร์) และอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ละลายใน 0.2 โมลาร์กรดไฮโดรคลอริก

รูปที่ 6 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการคายแสงของสารละลายเข้มข้น 1 x 10^{-6} โมลาร์ อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์และอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ละลายในสารละลาย 0.2 โมลาร์กรดไฮโดรคลอริก ผลการทดลองพบว่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการคายแสงของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ปรากฏที่ 446/500 นาโนเมตรและ 446/538 นาโนเมตรสำหรับสารละลายอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ (1 x 10^{-6} โมลาร์) และอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ละลายใน 0.2 โมลาร์กรดไฮโดรคลอริกตามลำดับ และนอกจากนี้ยังพบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 350 นาโนเมตรของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ละลายใน 0.2 โมลาร์กรดไฮโดรคลอริกซึ่งมีการรายงานว่าเป็นลักษณะเฉพาะของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อยู่ในรูปโปรโตรเนท (AFH^{2+}) (Insuwan and Rangsriwatananon, 2015)

ในขณะที่อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ถูกดูดซับในซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมในรูปที่ 7 จะปรากฏสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ 460 นาโนเมตรและสเปกตรัมของการคายแสงที่ 496 นาโนเมตรซึ่งเป็นการทรานซิชันจาก π-π^* ในขณะที่อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ถูกดูดซับในซีโอไลต์แอลทีแอลจะปรากฏสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ 350 และ 460 นาโนเมตรและสเปกตรัมของการคายแสงที่ 538 นาโนเมตรซึ่งเป็นลักษณะคล้ายกับอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อยู่ในสารละลาย 0.2 โมลาร์กรดไฮโดรคลอริกที่ถูกโปรโตเนท (AFH^{2+}) จากการศึกษาพบว่าอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ จะอยู่ในรูปของแคทไอออน (AF^{+}) และโปรโตเนท (AFH^{2+}) เมื่ออยู่ในสถาพแวดล้อมของซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียม และซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอนตามลำดับและเป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อโมเลกุลอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์อยู่ในสภาพแวดล้อมของซีโอไลต์แอลทีแอล สเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะเกิดการเคลื่อนที่ไปยังความยาวคลื่นที่ยาวขึ้น (446 ไปยัง 460 นาโนเมตร) ทั้งนี้เนื่องมาจากความเป็นขั้วของซีโอไลต์แอลทีแอลมีความเป็นขั้วที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่ออยู่ในสารละลาย



รูปที่ 7 สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ก) และการคายแสง (ข) ของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอล

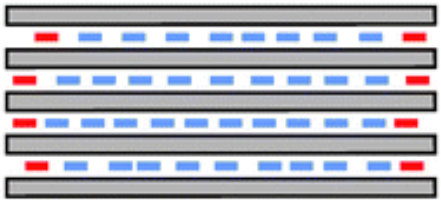


รูปที่ 8 UV-Visible diffuse reflectance spectra ของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ดูดซับในซีโอไลต์. แอลทีแอล

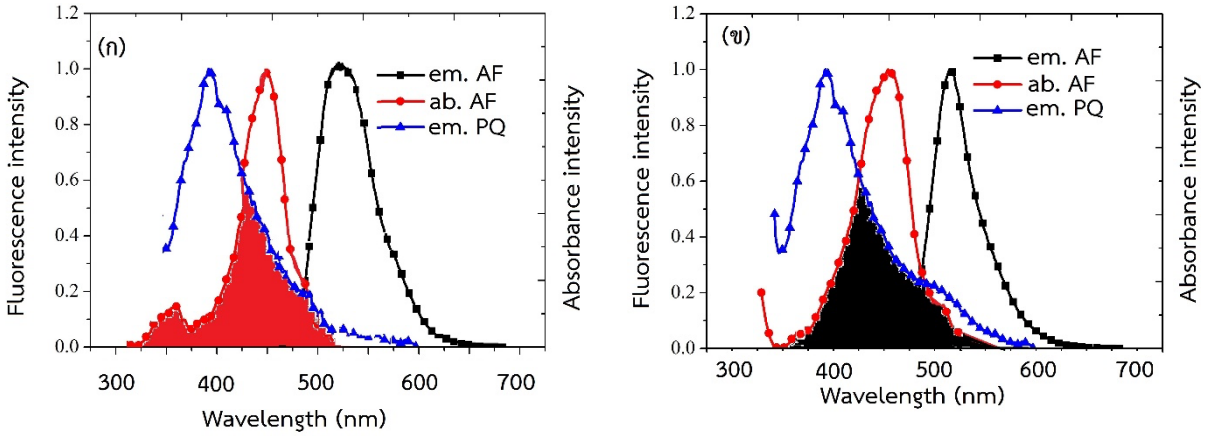
รูปที่ 8 แสดง UV-Visible diffuse reflectance spectra ของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่ดูดซับในซีโอไลต์แอลทีแอลซึ่งพบว่ามีสเปกตราของการดูดกลืนแสงปรากฏที่ความยาวคลื่นช่วง 260-270นาโนเมตรซึ่งเป็นลักษณะการดูดกลืนแสงของพาราควอทและการดูดกลืนแสงของโมเลกุลอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ปรากฏที่ความยาวคลื่น 350 และ 460 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในรูปโปรโตเนต (AFH^{2+}) เมื่อถูกดูดซับในซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอนในขณะที่การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 460 นาโนเมตร แสดงถึงโมเลกุลอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์อยู่ในรูปแคตไอออน (AF^{+}) เมื่อถูกดูดซับในซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโพแทสเซียมจากผลการทดลองสามารถยืนยันผลว่าโมเลกุลของสีย้อมทั้งสองสามารถใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลได้สมบูรณ์

การถ่ายโอนพลังงานจากตัวให้ (พาราควอท) ไปยังตัวรับพลังงาน (อะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์)

ในงานวิจัยชิ้นนี้จะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบเสาอากาศเทียมที่สามารถเก็บกักพลังงานแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งหมายถึงจะต้องประกอบด้วยโมเลกุลสีย้อมจะต้องสามารถใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอลได้โดยไม่เกิดการรวมกลุ่ม (aggregation) และสามารถดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงที่กว้าง ๆ ภายใต้การกระตุ้นตัวให้พลังงานและถ่ายโอนพลังงานไปยังตัวรับพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงลำดับการใส่พาราคอวทในบริเวณตรงกลาง (สีฟ้า) และโมเลกุลอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ตรงปลายทั้งสองข้างของผลึก (สีแดง) (Insuwan et al., 2017)



รูปที่ 10 การซ้อนทับกันระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของพาราควอทและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อยู่ในซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโปรตอน (ก) และซีโอไลต์แอลทีแอลรูปโพแทสเซียม (ข)

อันดับแรกจะทำการใส่พาราคอวทซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้พลังงานไปอยู่ในบริเวณตรงกลางของผลึกซีโอไลต์แอลทีแอลก่อนแล้วค่อยใส่โมเลกุลอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับพลังงานไปอยู่ตรงปลายทั้งสองข้างของผลึก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่าสามารถส่งผ่านพลังงานถึงกันหรือไม่ โดยทั่วไปแล้วระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงานจะต้องอยู่ในช่วง 1-10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นระยะห่างที่สามารถถ่ายโอนพลังงานถึงกันได้และนอกจากนี้สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการคายแสงของพาราคอวทที่เป็นตัวให้พลังงานดังแสดงในรูปที่ 10 และตารางที่ 1 ซึ่งเราพบว่าสีย้อมที่ใส่ลงไปในซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียมและรูปโปรตอน สามารถถ่ายโอนพลังงานถึงกันได้ ตารางที่ 1 แสดงผลของการคำนวนพื้นที่ซ้อนทับระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของตัวให้และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวรับพลังงาน (Ω_{DA}) 10^{-15} cm^3M^{-1} ค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน (R_{DA}) และประสิทธิภาพของ FRET (%E) ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 2 และ 4 ตามลำดับ (Gartzia-Rivero et al., 2015) โดยทั่วไปแล้วค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงานจะอยู่ในช่วง 20-90 (Å) มีรายงานกล่าวถึงประสิทธิภาพของการถ่ายโอนพลังงานว่าถ้าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงานมีค่าน้อย ๆ จะส่งผลให้กระบวนการถ่ายโอนพลังงานมีประสิทธิภาพสูง (Gartzia-Rivero et al., 2015). จากการศึกษาพบว่าค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน และประสิทธิภาพของ FRET ของ สีย้อมที่ใส่เข้าไปในซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียม K-LTL และ H-LTL มีค่าเท่ากับ 23.4 Å, 74.9% และ 23.8 Å, 78.1% ตามลำดับ

$$R_{DA}^6 = \frac{9000 \times (\ln 10) k_p^2 \Omega_{DA} \phi_D}{128 N_A \pi^5 n^4} \qquad (2)$$

เมื่อ Ω_{DA} คือ บริเวณที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (Absorption spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการคายแสง (Fluorescence emission spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงาน Φ_D คือ Quantum yield ของตัวให้พลังงาน n คือ ดัชนีหักเห (refractive index) ของตัวทำละลาย N_A คือ เลขอาโวกาโด k_p^2 คือ แฟกเตอร์ที่ใช้อธิบายการวางตัวไดโพลโมเมนต์ของตัวให้และรับพลังงานและ Ω_{DA} ก็สามารถคำนวณจากสมการ (3) (Gartzia-Rivero et al., 2015; Insuwan et al., 2015)

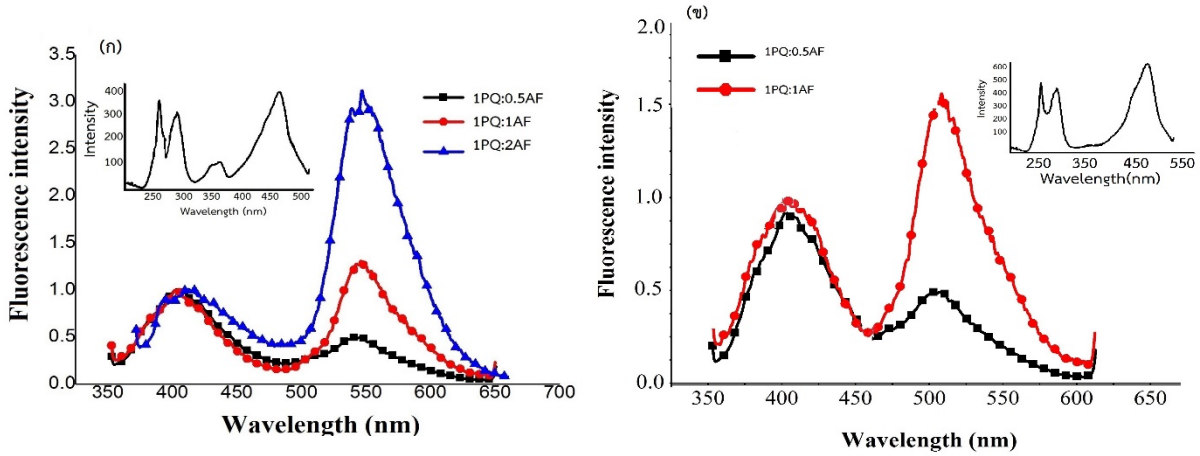
$$\Omega_{DA} = \frac{\int_0^\infty f_d(\lambda)\varepsilon_a(\lambda)\lambda^4 d\lambda}{\int_0^\infty f_d(\lambda)d\lambda} \quad (3)$$

เมื่อ $\int_0^\infty f_d(\lambda)\varepsilon(\lambda)\lambda^4 d\lambda$ คือ บริเวณที่สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวรับพลังงานจะต้องซ้อนทับกับสเปกตรัมการคายแสง (fluorescence emission spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงานและ $\int_0^\infty f_d(\lambda)d\lambda$ คือ บริเวณสเปกตรัมการคายแสง (fluorescence emission spectrum) ของสีย้อมที่เป็นตัวให้พลังงาน

$$\%E = (1 - \frac{F_{DA}}{F_D}) \text{ x } 100\% \quad (4)$$

เมื่อ F_{DA} คือ สเปกตรัมการคายแสงของตัวให้พลังงานในกรณีที่มีตัวรับพลังงานอยู่ด้วยและ F_D คือ สเปกตรัมการคายแสงของตัวให้พลังงานในกรณีที่ไม่มีตัวรับพลังงาน

พิจารณารูปที่ 11 แสดงสเปกตราการคายแสงของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในซีโอไลต์แอลทีแอล (H-LTL) และ (K-LTL) ผลการทดลองพบว่าความเข้มของการเรืองแสง (Fluorescence intensity) ของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโมเลกุลของสีย้อมอยู่ใกล้กันมากขึ้นส่งผลให้การถ่ายโอนพลังงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยทั้งในระบบซีโอไลต์แอลทีแอล (H-LTL) และ (K-LTL) จากสเปกตราการคายแสงของสีย้อมในระบบซีโอไลต์แอลทีแอลที่อยู่ในรูปโพแทสเซียม (K-LTL) ปรากฏที่ 400 และ 500 นาโนเมตรเป็นลักษณะของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ในรูปแคทไอออนตามลำดับในขณะที่สเปกตราการคายแสงของสีย้อมในระบบซีโอไลต์แอลทีแอล (H-LTL) ปรากฏที่ 400 และ 550 นาโนเมตรเป็นลักษณะของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ในรูปโปรโตเนทตามลำดับจะเห็นได้ว่าการคายแสงมีอยู่สองช่วงความยาวคลื่นซึ่งเป็นผลดีที่จะนำมาใช้เป็นเสาอากาศเทียม



รูปที่ 11 สเปกตราการคายแสงของพาราควอทและอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ในซีโอไลต์แอลทีแอล (H-LTL, ก) และ (K-LTL, ข) ภายใต้การกระตุ้นที่ความยาวคลื่น 330 นาโนเมตร; ภาพแทรกคือ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอะคริฟาวีนไฮโดรคลอไรด์และพาราควอท

ตารางที่ 1 ผลของการคำนวณพื้นที่ซ้อนทับระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของตัวให้และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวรับพลังงาน ผลได้เชิงควอนตัม ค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน ประสิทธิภาพของ FRET

ตัวให้-ตัวรับพลังงาน	พื้นที่ซ้อนทับระหว่างสเปกตรัมการคายแสงของตัวให้และสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวรับพลังงาน (Ω_{DA}) 10^{-15} cm^3M^{-1}	ผลได้เชิงควอนตัม (Φ_D)	ค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน R_{DA} (Å)	ประสิทธิภาพของ FRET (%E)
Ac-AF_K-LTL (Insuwan and Rangsriwatananon, 2015)	0.98	0.66	22.2	90.0
Ac-AF_H-LTL (Insuwan and Rangsriwatananon, 2015)	0.51	0.66	19.9	72.5
PIC-AF_K-LTL (Insuwan et al, 2017)	0.60	0.33	17.9	62.0
PIC-AF_H-LTL (Insuwan et al, 2017)	0.70	0.33	18.4	75.5
PQ-AF_K-LTL	4.33	0.20	23.4	74.9
PQ-AF_H-LTL	4.84	0.20	23.8	78.1

Ac คือ Acridine hydrochloride และ PIC คือ 1,1′-Diethyl-2,2′-cyanine iodide

บทสรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการศึกษากระบวนการ FRET ระหว่างโมเลกุลสีย้อมที่ใส่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์แอลทีแอล PQ-AF_K-LTL และ PQ-AF_H-LTL โดยที่ PQ ทำหน้าที่เป็นตัวให้และ AF เป็นตัวรับพลังงาน ผลวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าระยะห่างระหว่างตัวให้และรับพลังงาน (Value of critical transfer distance, R_{DA}) ของ PQ-AF_K-LTL และ PQ-AF_H-LTL ไม่มีความแตกต่างกัน ในขณะที่ประสิทธิภาพของ FRET (%E) ของ PQ-AF_H-LTL จะสูงกว่า PQ-AF_K-LTL จากการศึกษาพบว่าในการใส่โมเลกุลสีย้อมพาราควอท (PQ) และ อะคริฟราวีนไฮโดรคลอไรด์ (AF) ที่ถูกกักขังในซีโอไลต์แอลทีแอลสามารถนำไปใช้เป็นเสาอากาศเทียมได้เพื่อเก็บกักพลังงานแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิลได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสาขาวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีและสถานที่ในการทำวิจัยจนกระทั่งสามารถดำเนินการทำวิจัยจนบรรลุตามวัตถุประสงค์ และบุคคลที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ สำหรับมิตรภาพและความช่วยเหลือที่มีให้กันเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

Calzaferri G. and Devaux A. (2010). Supramolecular effects in photochemical and photophysical processes. John Wiley and Sons, Inc. New Jersey.

Ellis D.W. and Solomon B.S. (1967). Resonance energy transfer: Influence of heteroatoms on the donor's properties. Journal of Chemical Physics. 46: 3497-3501.

García–Sosa I. and Ramírez F.M. (2010). Synthesis, solid and solution studies of paraquat dichloride calixarene complexes. Molecular modelling. Journal of the Mexican Chemical Society. 54(3): 143-152.

Gartzia-Rivero L., Bañuelos J. and López-Arbeloa I. (2015). Excitation energy transfer in artificial antennas from photoactive materials to molecular assemblies. International Reviews in Physical Chemistry. 34(4): 515–556.

Gfeller N., Megelski S. and Calzaferri G. (1999). Fast energy migration in pyronine-loaded zeolite L microcrystals. Journal of Physical Chemistry B. 103: 1250-1257.

Gigli L., Arletti R., Vitillo J.G., Alberto G., Martra G., Devaux A. and Vezzalini G. (2015). Thionine dye confined in zeolite L: Synthesis location and optical properties. The Journal of Physical Chemistry C. 119: 16156–16165.

Ibrahim M.S. and Etaiw S. El-din H. (2002). Supramolecular host–guest systems as frameworks for excitation energy transfer. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 58: 373-378.

Insuwan W. and Rangsriwatananon K. (2014). Evaluation of adsorption of cationic dyes on H-LTL and K-LTL zeolite. Journal of Porous Material. 21: 345-354.

Insuwan W., Jungsuttiwong S. and Rangsriwatananon K. (2015). Host-guest composite materials of dyes loaded zeolite LTL for antenna applications. Journal of Luminescence. 161: 31-36.

Insuwan W., Rangsriwatananon K., Meeprasert J., Namuangruk S., Surakhot Y., Kungwan N. and Jungsuttiwong S. (2017). Combined experimental and theoretical investigation on Fluorescence Resonance Energy Transfer of dye loaded on LTL zeolite. Microporous and Mesoporous Materials. 214: 372-382.

Lin C. and Dienes A. (1973). Study of excitation transfer in laser dye mixtures by direct measurement of fluorescence lifetime. Journal of Applied Physics. 44: 5050-5052.

Manzano H., Gartzia-Rivero L., Bañuelos J. and Lopez-Arbeloa I. (2013). Ultraviolet-Visible dual absorption by a single BODIPY dye confined in LTL zeolite nanochannels. The Journal of Physical Chemistry C. 117: 13331–13336.

Megelski S. and Calzaferri G. (2001). Tuning the size and shape of zeolite L-based inorganicorganic host-guest composites for optical antenna systems. Advanced Functional Materials. 11(4): 277-286.

Misra V., Misra H., Joshi H.C. and Pant T.C. (1999). Excitation energy transfer between acriflavine and rhodamine 6G as a pH sensor. Sensors and Actuators B. 63: 18-23.

Misra, V., Misra H., Joshi H.C. and Pant T.C. (2002). An optical pH sensor based on excitation energy transfer in Nafion® film. Sensors and Actuators B. 82: 133-141.

Mojović Z., Banković P., Milutinović-Nikolić A., Dostanić J., Jović-Jovicić N. and Jovanović D. (2009). Al, Cu pillared clays as catalysts in environmental protection. Chemical Engineering Journal. 154: 149-155.

Rongchapo W., Sophiphun O., Rintramee K., Prayoonpokarach S. and Wittayakun J. (2013). Paraquat adsorption on porous materials synthesized from rice husk silica. Water Science and Technology. 68: 863-869.