

การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท SBA-15 เพื่อดูดซับสีย้อม

A Facile One-Pot Hydrothermal Technique of SBA-15 for Their Excellent Dye Adsorption

สุภกร บุญยีน¹ Paramasivam Shanmugam¹ ปณต ลักขณาวรรณ²

ณัฐภัทร แก้วทอง² และสุชานันท์ พวงนาค²

Supakorn Boonyuen¹, Paramasivam Shanmugam¹, Panod Lukkanavaraporn²,

Nattapat Kaewthong² and Suchanun Phuangnak²

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

²โครงการ วมว. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

²SCIUS TU, Faculty of Science and Technology, Thammasat University

Received: February 21, 2023

Revised: April 22, 2023

Accepted: April 27, 2023

บทคัดย่อ

เมโซพอร์สซิลิกาชนิด SBA-15 ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ Pluronic P123 และเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตเตรียมโดยใช้วิธีการไฮโดรเทอร์มอลอย่างง่ายที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามด้วยการเผาที่ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซิลิกาเมโซพอร์ชนิด SBA-15 ที่สังเคราะห์มาเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของโครงสร้างด้วยเทคนิคการหาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopic-FT-IR) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope--TEM) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 sorption surface area and porosity analysis-BET) สำหรับการดูดซับพร้อมอัตราการดูดซับสีย้อมภายในเวลา 40 ชั่วโมง พบว่า เมทิลีนบลู Methylene Blue (0.0067 s^{-1}) เมทิลไวโอเลต Methyl Violet (0.0036 s^{-1}) คองโกเรด Congo Red (0.0035 s^{-1}) และ โรดามีนบี Rhodamine B (0.0018 s^{-1}) ซึ่งสีย้อมเหล่านี้มีความเป็นพิษสูงที่อุณหภูมิห้อง โดยตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 5.0431 นาโนเมตร เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 ปริมาณ 5 มิลลิกรัม จะสามารถดูดซับสีย้อมที่เข้มข้น 500 ppm ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดย ให้ค่า 73.80 82.20 และ 100 % สำหรับ คองโกเรด เมทิลไวโอเลต และเมทิลีนบลูได้ ตามลำดับ โดยตัวเร่งปฏิกิริยา TUSB มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเหล่านี้สูงและรวดเร็ว มีศักยภาพในการพัฒนาใช้ในอุตสาหกรรมได้

คำสำคัญ: เมโซพอร์สซิลิกา SBA-15 การดูดซับสีย้อม

Abstract

Mesoporous silica SBA-15 containing Pluronic P123 triblock copolymer as a surfactant framework and tetraethyl orthosilicate--TEOS as an organosilica precursor was prepared by a facile one-step hydrothermal technique at 100 °C for 24 hours, followed by calcination at 500 °C for 12 hours. The neat SBA-15 was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy--FT-IR, Transmission Electron Microscopy --TEM, and N₂ sorption surface area and porosity analysis (BET). Furthermore, the SBA-15 indicated high adsorption capacity within 40 hours. The dyes and their adsorption rates include Methylene Blue (0.0067 s⁻¹), Methyl Violet (0.0036 s⁻¹), Congo Red (0.0035 s⁻¹), and Rhodamine B (0.0018 s⁻¹). The pore diameter of the material is about 5.0431 nm. The SBA-15 catalyst 5 mg can adsorb 500 ppm dye solutions at 73.80, 82.20, and 100% for Congo Red, Methyl Violet, and Methylene Blue, respectively. The catalysts have a high and fast absorption capacity for these dyes. It has the potential to develop industrial applications.

Keywords: Mesoporous silica, SBA-15, dye adsorption



บทนำ

ปัญหามลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมในประเทศไทยยังคงเป็นปัญหาหลักทั้งนี้ เนื่องจากภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ยังคงผลิตสารพิษและปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง รวมถึงสารอินทรีย์ที่ได้จาก สีย้อมจากอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ได้มีการปนเปื้อนให้แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ รวมถึงสะสมกลายเป็นมลพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในอนาคต (Boonyayut, Sangsirimongkolying & Sakong, 2019) ทั้งนี้อุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยปัจจุบัน มีจำนวน เพิ่มขึ้น และพบว่า มักก่อปัญหาปล่อยสีย้อม ลงสู่แหล่งน้ำ อันนำมาซึ่งปัญหาน้ำเน่าเสียและส่งผลกระทบต่อชุมชน สีย้อมอินทรีย์ที่มีประจุและให้สีที่แตกต่างกัน เช่น เมทิลีนบลู Methylene Blue (สีน้ำเงิน) เมทิลไวโอเลต Methyl Violet (สีม่วง) คองโกเรด Congo Red (สีแดงส้ม) และโรดามีนบี Rhodamine B (สีชมพู) ในกระบวนการย้อมจะล้างสีย้อมที่เหลือจากการย้อม โดยใช้สารเคมี เหล่านี้เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ แม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทั้งพืชและสัตว์ รวมทั้งจะเกิดการสะสมส่งผลในระยะยาวเช่นลดความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืช รวมถึงส่งผลกระทบต่อดิน และทำให้สัตว์บางชนิดตายได้ (Abazari,

Salehi & Mahjoub, 2018) มลพิษที่สำคัญที่สุด คือ สีย้อม เพราะสีย้อมอินทรีย์ที่มีประจุสามารถละลายได้ในน้ำและหากมีสารซักฟอก เมื่อเข้าสู่แหล่งน้ำแล้ว บางครั้งอาจบำบัดได้ยากเนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน (Abukhadra, Adlii & Bakry, 2019) และการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ดังนั้นเทคโนโลยีที่ใช้กันทั่วไปและใช้ได้มากที่สุดในการกำจัดมลพิษอันตรายเหล่านี้จากน้ำเสีย คือ การดูดซับ (Sharma et al., 2019; Boukoussa et al., 2021) จากเทคนิคนี้และผลกระทบที่เป็นอันตรายเหล่านี้ นักวิทยาศาสตร์มักจะพยายามรวมวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันเพื่อมุ่งสร้างตัวดูดซับที่มีต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเช่นนิยมใช้วัสดุรูพรุนสูง มีพื้นที่ผิวมาก เช่น ถ่านแกลบ หรือโดโลไมต์ dolomite ซึ่งเป็นสารกลุ่มแคลเซียม แมกนีเซียมคาร์บอเนต (Garmia, Zaghoulane-Boudiaf, & Ibborra, 2018; Aichour, Zaghoulane-Boudiaf, Ibborra & Polo, 2018)

วัสดุสังเคราะห์ที่มีรูพรุน ได้รับความสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากพื้นผิวเฉพาะขนาดใหญ่และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ปรับขนาดได้ตามสารเติมแต่ง นอกจากนี้ยังสามารถปรับสภาพผิวของวัสดุให้มีประจุที่เหมาะสมต่อการใช้งานได้ เมโซ-พอร์ซิลิกา SBA-15 ได้ถูกนำมาใช้งานที่หลากหลาย

ด้วยคุณสมบัติของการมีรูพรุน และพื้นที่ผิวสูง ส่วนใหญ่ในการเร่งปฏิกิริยา (Liu, Yang, Zhang & Huang, 2015; Nasrullah, Bhat, Naeem, Isa & Danish, 2018) วัสดุนี้มีรูพรุนมากและมีขนาดที่เท่ากันอย่างเป็นระเบียบ รวมทั้งยังมีความเสถียรทางความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ (Tan and Ting, 2014); Oussalah, Boukerroui, Aichour and Djellouli, 2019)

ในอดีตได้มีการพยายามพัฒนาสังเคราะห์ เมโซ-พอร์สซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกต พบว่า ขนาดรูพรุนที่มีความแตกต่างกัน และต้องใช้กระบวนการที่ซับซ้อน แต่หากมีการเติมสารลดแรงตึงผิว surfactant จะช่วยในการควบคุมขนาดของรูพรุนได้ดี โครงสร้างที่ได้จะมีความเป็นระเบียบเหมาะแก่การนำไปใช้งาน (Stucky & Kim, 2000) อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์วัสดุรูพรุนนี้มักใช้กระบวนการที่ซับซ้อนเช่น sol-gel ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษากระบวนการสังเคราะห์ที่ง่ายใช้สารเคมีน้อยให้ผลผลิตมาก เพื่อใช้กับวัสดุที่มีรูพรุน เมโซ-พอร์สซิลิกา SBA-15 และติดตามความสามารถในการดูดซับสีย้อม 4 ชนิด ได้แก่ โรดามีนบี (Rhodamine B) คองโกเรด (Congo Red) เมทิลไวโอเลต (Methyl Violet) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15
2. เพื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 ที่สังเคราะห์ในการดูดซับสีย้อม ได้แก่ โรดามีนบี (Rhodamine B) คองโกเรด (Congo Red) เมทิลไวโอเลต (Methyl Violet) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

วิธีดำเนินงานวิจัย วัสดุและสารเคมี

เครื่องมือและอุปกรณ์เครื่องชั่งละเอียด เครื่องกวนสาร ตู้อบลร้อน เตาเผาอุณหภูมิสูง ยี่ห้อ Muffle Furnace HYS รุ่น MF-SERIES เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) Analytik Jena รุ่น SPECORD 200 PLUS เครื่อง IR-spectrophotometer PERKIN ELMER รุ่น Spectrum One, เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET) Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 (รูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Pseudo-first

order) เครื่อง transmission electron microscope (TEM) JEOL รุ่น JEM-2100 Plus

สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 ประกอบด้วย เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต Pluronic P123 กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมคลอไรด์ และ น้ำปราศจากไอออน

1. การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 สังเคราะห์โดยละลาย Pluronic P123 (สารกำหนดโครงสร้าง) 0.500 กรัม ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 20.000 กรัม และเติมโซเดียมคลอไรด์ปริมาณ 0.175 กรัม กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการหยดสารละลายเตตระเอทิลออร์โทซิลิเกต 1.050 กรัมภายใต้การกวนอย่างรวดเร็ว จากนั้นหยุดกวนและบ่มสารละลายที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายเจลที่ได้มากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่นจนมี pH เป็นกลาง อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการทดลองได้ทำการสังเคราะห์ซ้ำจำนวน 5 ครั้งเพื่อให้ได้สารปริมาณมากพอในการวิเคราะห์ทดสอบ

2. การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

สารที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปยืนยันโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope--TEM) พร้อมทั้งวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 sorption surface area and porosity analysis-BET รูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Pseudo-first order) วิเคราะห์องค์ประกอบของโครงสร้างด้วยเทคนิคการหาองค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของสารโดยใช้ ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectroscopic--FT-IR)

3. การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

การทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 ทำโดยการนำ SBA-15 จำนวน 5 มิลลิกรัม ไปดูดซับสีย้อม โดยสีย้อมที่

นำมาดูดซับ ที่ความเข้มข้นเท่ากัน 500 ppm ในสภาวะหยุดนิ่ง แช่ไว้เป็นเวลา 60 นาที และติดตามสภาวะอิมตัวที่ 40 และ 72 ชั่วโมง โดยการทดลองได้ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งสีย้อมได้แก่ โรดามีนบี (Rhodamine B) คองโกเรด (Congo Red) เมทิลไวโอเลต (Methyl Violet) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue) นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) และการหาปริมาณร้อยละการดูดซับ หาจากสมการ

$$\% = (A_0 - A_t) \times 100 / A_0 \quad (1)$$

ผลการทดลอง

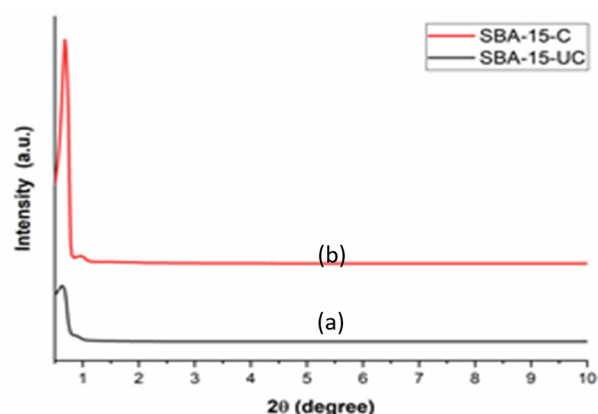
1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

จากกระบวนการสังเคราะห์ SBA-15 ได้พัฒนาจากวิธีการ ของ Wang et al. (2004) ด้วยการผสม Pluronic P123 ที่เป็นสารกำหนดโครงสร้างรูพรุน ในสภาวะที่เป็นกรด และตามด้วยเกลือโซเดียมคลอไรด์ กวนให้เข้ากันอย่างสมบูรณ์ก่อนเติมสารละลาย เติตระเอทิลออร์โทซิลิเกต แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงเพิ่มความร้อนเป็น 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารทั้งหมดเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อให้ความร้อนจนครบตามเวลา ได้นำของผสมที่ได้มากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง เพื่อไล่สารตั้งต้นที่เหลือในการสังเคราะห์ออก หลังจากนั้นนำตะกอนสีขาวที่ได้ มาอบให้แห้งแล้วนำไปเผาเพื่อไล่ Pluronic P123 ออก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว นำ SBA-15 ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ

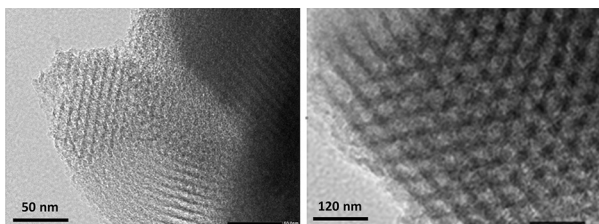
การ small angle XRD ได้ถูกตรวจวัดด้วยเครื่อง Rigaku D/MAX2550/PC diffractometer ใช้ Cu K_{α1} radiation ที่ 40 kV และ 100 mA วัดค่า 2θ ในช่วง 0.2-10.0 ด้วย scan speed 6°/min. เทียบผลที่ได้ กับ database (JCPDS, international centre for diffraction data) จากภาพ 1 ปรากฏฟิสิกเอกลักษณ์ของ SBA-15 ที่ระนาบ 100 โดยจะมีความชัดเจนของโครงสร้างมากขึ้น

เมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วย calcine ผลที่ได้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้าของ Wang และคณะ (Wang et al., 2004) โครงสร้างของ SBA-15 โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่กำลังขยาย x 200 และ x 500 เท่า ได้ผลดังภาพ 2 รูพรุนของวัสดุมีค่าประมาณ 40.2 นาโนเมตร และมีขนาดรูปร่างที่คงที่ และพบว่า มีการจัดเรียงตัวลักษณะเป็นท่อยาว ที่มีขนาดมากกว่า 70 นาโนเมตร สอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้าของ Stucky และ Kim (Stucky & Kim, 2000)

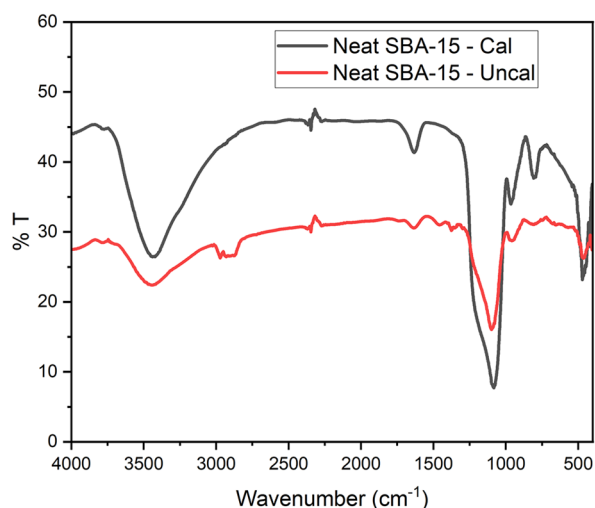
FTIR กราฟของตัวอย่าง ก่อน และ หลัง calcine ถูกตรวจวัดวิเคราะห์ด้วย เครื่อง IR-spectrophotometer PERKIN ELMER รุ่น Spectrum One และวัดในช่วง 450-4000 ซม⁻¹ ด้วยเทคนิค KBr disc ในการเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR สำหรับ SBA-15 ได้เปรียบเทียบผลการทดลอง ก่อนและหลังเผา calcine ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบพีกของ Pluronic P123 ในช่วง 2975-2875 ซม⁻¹ และ 1460 ซม⁻¹ แสดงถึง C-H stretching และ C-H bending ตามลำดับ พบเฉพาะในกราฟของ SBA-15 ที่ยังไม่ผ่านการ calcine และพีกดังกล่าวได้หายไปหลังจากกระบวนการ calcine นอกจากนั้น กลุ่มพีก ที่มีความชัดเจนขึ้นหลังกระบวนการ calcine พบ silica (Si-OH-Si) ที่ 1089 806 470 ซม⁻¹ และ Silanol (Si-OH) พบที่ 970 ซม⁻¹ แสดงดังภาพ 3 สอดคล้องกับรายงานวิจัยก่อนหน้าของ Sun และคณะ (Sun et al., 2010)



ภาพ 1 กราฟแสดง small angle-XRD ของ SBA-15 ที่ ก่อน (a) และหลัง calcine (b) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง



ภาพ 2 ภาพ TEM ของตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 กำลังขยาย (a) 200 เท่า และ (b) 500 เท่า



ภาพ 3 FT-IR ก่อนและหลัง calcine ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง

ลักษณะรูพรุน ของตัวอย่างได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิค nitrogen adsorption/desorption เครื่อง Surface area and porosity analyzer (BET Brunauer Emmett and Teller) Micromeritics รุ่น TriStar II 3020 (รูปแบบการดูดซับเป็นแบบ Pseudo-first order) วิเคราะห์ปริมาณรูพรุนรวมโดยวัดปริมาตรการดูดซับที่ P/P0 และค่า pore size distribution pore volume และ surface area ถูกคำนวณด้วย isotherm of adsorption ด้วยวิธี BJH (Barrett Joyner and Halenda) ได้ผลดังตาราง 1 และภาพ 4

จากรายงานก่อนหน้านี้ที่สังเคราะห์ SBA-15 โดย Wang et al. (2004) ด้วยวิธี sol-gel และ calcine ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 15 ชั่วโมง ได้รายงาน ค่า SBET 769 m²/g ค่า Pore volume 1.04 cm³/g และ pore diameter 7.8 nm ซึ่งกระบวนการดังกล่าว จำเป็นต้องใช้สารเคมีปริมาณมาก และต้องใช้พลังงานในการ

สังเคราะห์มาก เพื่อให้ได้รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ แต่หากในการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ สามารถสังเคราะห์ได้ง่ายและก่อมลพิษน้อยกว่า แต่ให้ค่าใกล้เคียงกัน

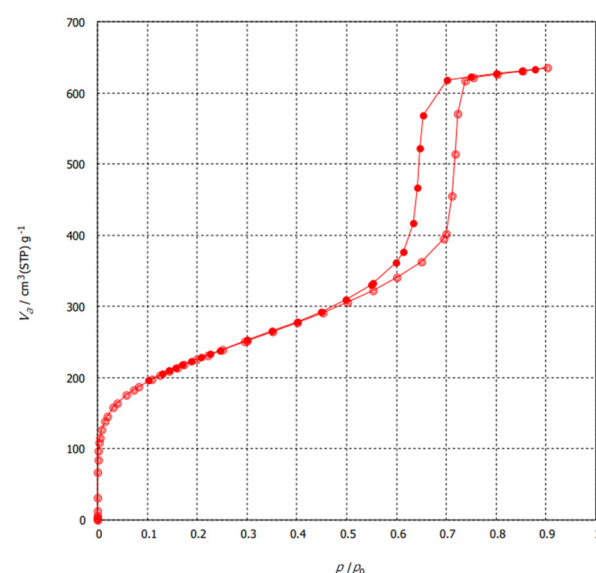
2. ผลการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

การทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 ในการดูดซับสีย้อม ได้แก่ โรดามีนบี (Rhodamine B) คองโกเรด (Congo Red) เมทิลไวโอเลต (Methyl Violet) และเมทิลีนบลู (Methylene Blue) (Oussalah et al., 2019) โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ เป็นเวลา 60 นาที ผลการทดลองในรูปของเปอร์เซ็นต์การดูดซับ และกราฟอัตราการดูดซับสีย้อม แสดงดังภาพ 5 และ 6 ตามลำดับ

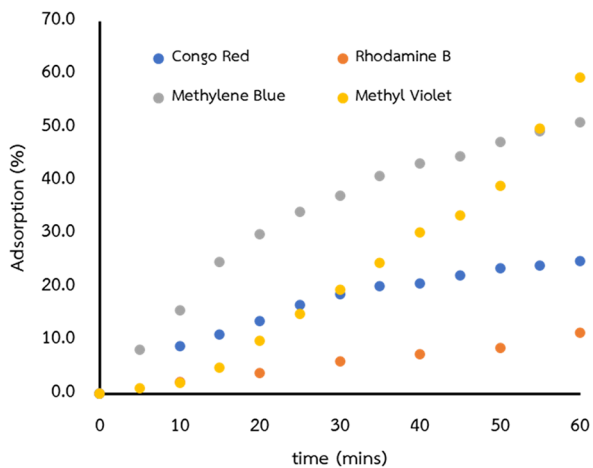
ตาราง 1

แสดงผลขนาดรูพรุนของ SBA-15

sample	S _{BET}	Pore vol.	Pore diameter
SBA-15	(m ² /g)	(cm ³ /g)	(nm)
SBA-15	709.24	0.8942	5.0431



ภาพ 4 N₂ adsorption-desorption isotherms ของ SBA-15



ภาพ 5 ร้อยละการดูดซับสีย้อมโดย SBA-15 เทียบเวลา 60 นาที ของคองโก เรด เมทิลีนบลู เมทิลไวโอเลต และ โรดามีน บี

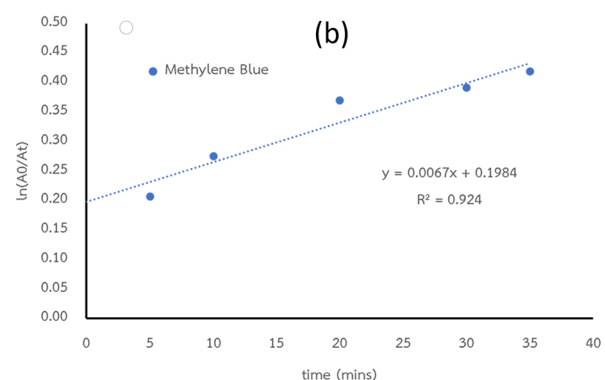
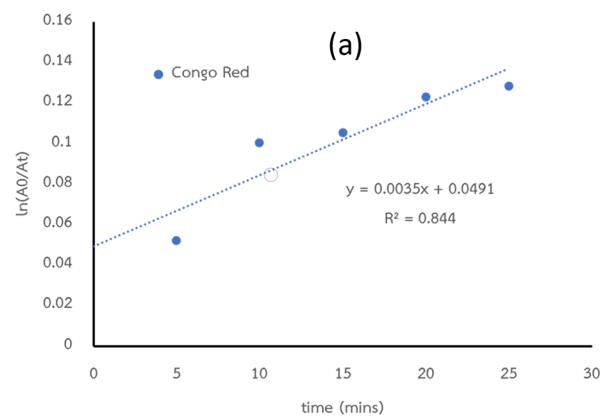
จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม ของ SBA-15 ที่เตรียมได้ โดยนำตัวอย่าง SBA-15 จำนวน 5 มิลลิกรัม มาแช่ในสีย้อมต่าง ๆ ทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงผลใน ภาพ 5 และทำการติดตามการลดลงของสีของสารละลาย ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) Analytik Jena รุ่น SPECORD 200 PLUS ตามช่วงเวลาที่ทำการแช่ 0–60 นาที พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวเรดังกล่าว สามารถดูดซับ ได้ดีที่สุดกรณีสีย้อม เมทิลไวโอเลต และเมทิลีนบลู โดยให้ ค่าประสิทธิภาพการดูดซับได้มากกว่า 40 % และเริ่มมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ทั้งนี้หากเพิ่มปริมาณของ SBA-15 จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับได้มากขึ้น

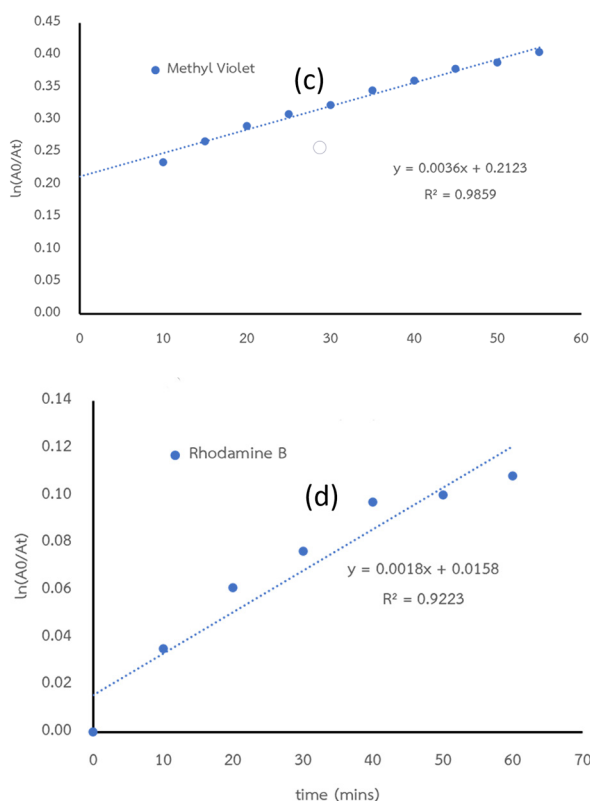
ตาราง 2

แสดง ร้อยละการดูดกลืนของสีย้อมเมื่อเวลาการแช่เพิ่มขึ้น

เวลา	เมทิลีนบลู	เมทิลไวโอเลต	คองโก เรด	โรดามีน บี
0 นาที	0	0	0	0
60 นาที	50.90	59.40	24.90	11.44
48 ชั่วโมง	100.00	82.20	73.80	64.36
72 ชั่วโมง	100.00	100.00	100.00	82.13

จากภาพ 5 และตาราง 2 เมื่อพิจารณาถึงร้อยละ การดูดซับสีย้อมต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที ตัวเร่ง ปฏิกิริยา SBA-15 สามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้ดีที่สุด คือ 50.90 % เมทิลไวโอเลต 59.40 % เมื่อพิจารณาเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง สามารถดูดซับคองโก เรด เมทิลไวโอเลต, และเมทิลีนบลู ได้ 73.80 82.20 และ 100 % ตามลำดับ ถึงแม้เมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง สามารถดูดซับโรดามีน บี ได้ 82.13 % จะพบว่าถึงแม้ SBA-15 เพียง 5 มิลลิกรัม จะสามารถดูดซับสีย้อมต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจะสามารถดูดซับได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมต่าง ๆ ที่แสดงพบว่าเป็น การดูดซับแบบไม่ต้องการกระบวนการกวน แต่เป็น ลักษณะการแพร่ของสีย้อมเข้ามายึดเกาะติดบริเวณผิว ของ วัสดุ SBA-15 ที่เตรียมได้ ขนาดรูพรุนที่ได้ ที่มีขนาด ประมาณ 40 นาโนเมตร





ภาพ 6 อัตราการดูดซับสีย้อมโดย SBA-15 เทียบเวลา ของ คองโก เรด (a) เมทิลินบลู (b) เมทิลไวโอเลต (c) และโรดามีน บี (d)

จากภาพ 6 เมื่อนำค่าการดูดกลืนแสงมาหาค่า $\ln(A_0/A_t)$ และนำมาพล็อตกราฟเทียบกับเวลา พบว่า ได้กราฟเป็นเส้นตรง จะสามารถหาค่าคงที่อัตราได้จากความชันของกราฟ เมื่อพิจารณาจากเป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีอันดับที่หนึ่ง $r=k[A]^1$ ได้ค่าคงที่อัตราดังตาราง 2

จากตาราง 2 พบว่า ค่าคงที่อัตราของการดูดซับเมทิลินบลูมากที่สุด รองลงมา คือ เมทิลไวโอเลต คองโกเรด และโรดามีน บี มีค่าคงที่อัตรา เท่ากับ 0.0067 0.0036 0.0035 และ 0.0018 s^{-1} ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ Zhao et al. (2022) จากการทดลองที่ได้ ผู้วิจัยได้ทดสอบการปลดปล่อยของสีย้อมในสภาวะอุณหภูมิปกติ pH 7 โดยการนำตัวอย่างวัสดุที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาปั่นกวนในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และติดตามสีของสารละลายก่อนและหลังการทดลอง พบว่า ไม่มีการปลดปล่อยสีย้อมออกมาในสารละลาย โดยค่าการดูดกลืนสีของสารละลาย ก่อนและหลังมีค่าเท่ากัน

ตาราง 3

แสดงค่าคงที่อัตราการดูดซับสีย้อมชนิดต่าง ๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15

ชนิดของสีย้อม	ค่าคงที่อัตรา (s^{-1})	R^2
โรดามีน บี	0.0018	0.9223
คองโกเรด	0.0035	0.8447
เมทิลไวโอเลต	0.0036	0.9859
เมทิลินบลู	0.0067	0.9240

สรุปผลการทดลอง

ตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 สามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้เตตระเอทิลออร์โทซิลิเกตเป็นแหล่งซิลิกาและใช้ Pluronic P123 เป็นสารกำหนดโครงสร้าง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 เป็นตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา SBA-15 มาดูดซับสีย้อม สามารถดูดซับเมทิลินบลูได้ดีและเร็วที่สุดโดยมีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 100 ภายใน 48 ชั่วโมง มีค่าคงที่อัตราเท่ากับ 0.0067 s^{-1} ด้วยประสิทธิภาพการดูดซับ สารดังกล่าวจึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับเพื่อใช้ในการบำบัดสีย้อมในอุตสาหกรรมได้

ข้อเสนอแนะ

วัสดุรูพรุนที่เตรียมได้ SBA-15 มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีย้อม ทั้งชนิดที่เป็นประจุบวกและลบ จึงน่าจะสามารพัฒนาเพื่อใช้ในเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสีย้อมโดยนำไปบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากโรงงานก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม และจะช่วยลดมลพิษทางน้ำได้ดี

Acknowledgements

This study was supported by Thammasat University Research Fund, contract No. TUFT013/2563 and TUFF07/2565 and Thammasat University Postdoctoral Fellowship (B.E.2564). This work was supported by the Thailand Science Research and Innovation Fundamental Fund. TUFT 013/2563.



References

- Abazari, R., Salehi, G., & Mahjoub, A. (2018). Ultrasound-assisted preparation of a nanostructured zinc (II) amine pillar metal-organic framework as a potential sorbent for 2, 4-dichlorophenol adsorption from aqueous solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, 46, 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.001>.
- Abukhadra, M. R., Adlii, A., & Bakry, B. M. (2019). Green fabrication of bentonite/chitosan@cobalt oxide composite (BE/CH@Co) of enhanced adsorption and advanced oxidation removal of congo red dye and Cr (VI) from water. *International Journal of Biological Macromolecules*, 126, 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.225>
- Aichour, A., Zaghouane-Boudiaf, H., Iborra, C. V., & Polo, M. S. (2018). Bioadsorbent beads prepared from activated biomass/alginate for enhanced removal of cationic dye from water medium: Kinetics, equilibrium and thermodynamic studies. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.02.073>
- Boonyayut, R., Sangsirimongkolying, R., & Sakong, P. (2019). The study of adding fire retardant property in Natural Indigo Dye Fabric for Indigo Dyeing Community Enterprise. *EAU Heritage Journal Science and Technology*, 13(3), 132-142. (in Thai)
- Boukoussa, B., Mokhtar, A., El Guerdaoui, A., Hachemaoui, M., Ouachtak, H., Abdelkrim, S., Addi, A. A., Babou, S., Boudina, B., Bengueddach, A., & Hamacha, R. (2021). Adsorption behavior of cationic dye on mesoporous silica SBA-15 carried by calcium alginate beads: Experimental and molecular dynamics study. *Journal of Molecular Liquids*, 333, 115976. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115976>
- Garmia, D., Zaghouane-Boudiaf, H., & Ibbora, C. V. (2018). Preparation and characterization of new low cost adsorbent beads based on activated bentonite encapsulated with calcium alginate for removal of 2,4-dichlorophenol from aqueous medium. *International journal of biological macromolecules*, 115, 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.064>
- Hui S., Junxing H., Yuqi D., Wang L., Jinzhao D., Ping C., Hui L., and Xiaoming Z. (2010). One-pot synthesized mesoporous Ca/SBA-15 solid base for transesterification of sunflower oil with methanol. *Applied Catalysis A: General*, 390, 26-34. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2010.09.030>
- Stucky G.D. and J.M. Kim (2000). Synthesis of highly ordered mesoporous silica materials using sodium silicate and amphiphilic block copolymers. *Chemical Communications*, 13, 1159-1160. <http://doi.org/10.1039/B002362K>
- Liu, Q., Yang, B., Zhang, L., & Huang, R. (2015). Adsorption of an anionic azo dye by cross-linked chitosan/bentonite composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1129-1135. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.008>

- Nasrullah, A., Bhat, A. H., Naeem, A., Isa, M. H., & Danish, M. (2018). High surface area mesoporous activated carbon-alginate beads for efficient removal of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107(Pt B), 1792–1799. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.10.045>
- Oussalah, A., Boukerroui, A., Aichour, A., & Djellouli, B. (2019). Cationic and anionic dyes removal by low-cost hybrid alginate/natural bentonite composite beads: Adsorption and reusability studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.197>
- Sharma, A. K., Priya, Kaith, B. S., Sharma, N., Bhatia, J. K., Tanwar, V., Panchal, S., & Bajaj, S. (2019). Selective removal of cationic dyes using response surface methodology optimized gum acacia-sodium alginate blended superadsorbent. *International Journal of Biological Macromolecules*, 124, 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.213>
- Tan, W. S., & Ting, A. S. (2014). Alginate-immobilized bentonite clay: Adsorption efficacy and reusability for Cu(II) removal from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 160, 115–118. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.056>
- Wang, X., Lin, K. S., Chan, J. C., & Cheng, S. (2004). Preparation of ordered large pore SBA-15 silica functionalized with aminopropyl groups through one-pot synthesis. *Chemical communications (Cambridge, England)*, 23, 2762–2763. <https://doi.org/10.1039/b408022j>
- Zhao, Q., Wang, J., Zhou, Y., Huang, J., Cai, H., & Liu, H. (2022). Dual function naphthalimide modified mesoporous silica for organic pollutant sensing and removal from water. *Journal of Molecular Liquids*, 367, 120544. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120544>.

