

มอนต์มอริลโลไนต์-อัลจิเนตเจลสำหรับ
การดูดซับและการคายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51
Montmorillonite-Alginate Gel for
Basic Red 51 Adsorption and Desorption

ดวงดาว พันอัน¹ ปภาวรินทร์ เรืองฤทธิ์¹ ศักดิ์สิทธิ์ ชื่นชมนาจาด² และ ดวงรัตน์ ทองคำ^{1*}
Duongdaw Pun-on¹ Papawarin Ruangrit¹ Sakthi Chuenchomnakjad² and Duangrat Thongkum^{1*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก ประเทศไทย

²สาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา พิษณุโลก
จ.พิษณุโลก ประเทศไทย

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand

²Program of Industrial Education and Technology, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Lanna Phitsanulok, Phitsanulok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 12 ตุลาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 25 กันยายน 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 27 กันยายน 2567

Received: 12 October 2023, Revised: 25 September 2024, Accepted: 27 September 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตเจลที่ผสมด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์จำนวน 6 สูตร เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณของเม็ดเจล เวลาในการดูดซับ ค่าพีเอชเริ่มต้น และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ติดตามความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิคยูวี-วิซิเบิลสเปกโทรสโกปี พบว่าสูตรที่ 6 กำจัดสีย้อมได้ร้อยละ 97.05 จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และไอโซเทอมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมฟรุนดลิช จากนั้นใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีศึกษาหมู่ฟังก์ชันของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์สูตรที่ 6 ก่อนและหลังการดูดซับ นอกจากนี้จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิคเบรนนอร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ พบไอโซเทอมการดูดซับ-คายซับเป็นแบบที่ IV รูพรุนส่วนใหญ่มีขนาดกลาง และจากการศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดเจล พบว่าสูตรที่ 3 คายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ได้ร้อยละ 36.75 โดยใช้สารละลายน้ำกับเอทานอล (70:30) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

คำสำคัญ : การดูดซับ การคายการดูดซับ เบสิคเรด 51 มอนต์มอริลโลไนต์ อัลจิเนต

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: duangratth@nu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.260894>

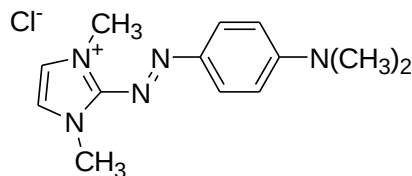
Abstract

This research focused on the synthesis of the 6 formulas of sodium alginate gel bead mixed with montmorillonite clay mineral to be used for Basic red 51 dye adsorption. The influencing factors for the adsorption were studied such as the gel bead dosage, adsorption time, initial pH, and initial concentration of dye. The concentrations of residual dye in solution were followed up by UV-vis spectroscopy. The removal efficiency of formula 6 was 97.05%. The adsorption kinetic was best fitted to pseudo-second-order reaction and the adsorption isotherm confirmed Freundlich. Then Fourier transform infrared spectroscopy technique was used to characterize the functional group of formula 6 of sodium alginate gel bead modified with montmorillonite before and after adsorption. Moreover, the adsorption-desorption isotherms of N₂ gas were studied by Brunauer, Emmett and Teller technique, can be classified to type IV, indicates some degree of mesoporosity. From the desorption studies, it was found that the desorption of Basic red 51 dye from formula 3 gel beads was 36.75% using water and ethanol solution (70:30) and concentrated hydrochloric acid.

Keyword: Adsorption, Desorption, Basic red 51, Montmorillonite, Alginate

1. บทนำ

สีย้อมเบสิคเรด 51 (Basic red 51 หรือ 2-[2-[4-(Dimethylamino)phenyl]diazonyl]-1,3-dimethyl-1H-imidazolium chloride หรือ BR51) จัดเป็นสีย้อมสังเคราะห์ที่มีหมู่เอโซะโรมาติกภายในโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 1 ละลายน้ำได้ดี นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในแชมพู ครีมนวด หรือผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผม มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียดสีม่วงอมน้ำเงิน เมื่อละลายน้ำให้สีแดงสดหรือสีแดงทับทิม [1] และจากข้อมูลการชี้บ่งอันตราย (Hazard identification) ได้มีรายงานเกี่ยวกับความเป็นพิษ โดยเป็นสารที่ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนังและดวงตาอย่างรุนแรง เป็นพิษร้ายแรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และส่งผลกระทบต่อยาวนาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดนี้ก่อนทิ้ง ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการบำบัดน้ำทั้งหลายวิธี ได้แก่ แบบชีวภาพ การสลายตัวด้วยแสง การดูดซับ ฯลฯ โดยการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูง เรียบง่าย ต้นทุนต่ำ มีความรวดเร็ว และสามารถแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายได้ง่าย [2]



รูปที่ 1. โครงสร้างของสีย้อมเบสิคเรด 51

แรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นวัสดุดูดซับชนิดหนึ่งที่เหมาะนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมชนิดประจุบวก เนื่องจากมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี มีพื้นที่ผิวสูง ไม่เป็นพิษ ไม่ก่อภูมิแพ้ มีราคาถูก โดยโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น มีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิว มีไอออนประจุบวกแทรกระหว่างชั้นได้ และมีช่องว่างระหว่างชั้นจากการที่มีแรงกระทำระหว่างชั้นแบบอ่อน ๆ ทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถเข้าไปแทรกได้ ส่งผลให้เกิดการบวมตัว [3]-[4] ตัวดูดซับอีกชนิดที่จะกล่าวถึง คือ อัลจีเนต (Alginate) ซึ่งเป็นโพลิแซ็กคาไรด์ชนิดประจุลบที่ได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล สามารถรวมตัวอยู่ในรูปไฮโดรเจล (Hydrogel) มีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติโดยการเชื่อมขวางแบบไอออนกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} เป็นวัสดุดูดซับที่มีน้ำหนักเบา โครงสร้างมีความยืดหยุ่นสูง ทนความร้อน และสามารถกักเก็บของเหลวได้ดี โดยจากงานวิจัยของ Edathil และคณะ [5] ได้สังเคราะห์วัสดุดูดซับในรูปไฮโดรเจลที่มีแรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ ในปี ค.ศ. 2020 Tao และคณะ [6] ได้มีการสังเคราะห์เม็ด GO-MT/SA ใช้ในการดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีปริมาณการดูดซับ 150.66 mg/g และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 98.2 และในปีเดียวกัน Zhang และคณะ [7] มีการศึกษาเกี่ยวกับ $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{HCO}/\text{SA}$ ที่ใช้ในการดูดซับ Sb(III) มีปริมาณการดูดซับที่ 5-60 mg/g และค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดที่ 80-96 และในปี ค.ศ. 2021 Zhang และคณะ [8] ได้ใช้เม็ด MXene/SA ดูดซับเมทิลีนบลู พบว่ามีปริมาณการดูดซับอยู่ที่ 92.17 mg/g และค่าร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 81.36 แต่ยังไม่พบงานวิจัยที่ใช้วัสดุดูดซับชนิดนี้ดูดซับสีย้อม BR51 หรือสีย้อมในกลุ่มผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสีผม

การนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ซ้ำเป็นการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่า เพราะการใช้ครั้งเดียวทำให้เกิดขยะมากเกินไป และสูญเสียทรัพยากรในการผลิตวัสดุเหล่านี้ซ้ำเพื่อใช้เพิ่มเติมอีกด้วย วิธีการคายการดูดซับจึงเป็นการฟื้นฟูสภาพของสารดูดซับที่หมดสภาพให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย ประหยัดเวลาและลดต้นทุน โดย Fang และคณะ [9] ได้ศึกษาการคายการดูดซับของเมทิลีนบลูบนเซลลูโลสของกากหัวผักกาดฝรั่ง/โซเดียมอัลจีเนต/เหล็กไฮดรอกไซด์คอมโพสิตไฮโดรเจล (C/SA/Fe) และ Bayram และคณะ [10] ได้ศึกษาการนำแรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) กลับมาใช้ใหม่ โดยล้างด้วยเอทานอล พบว่าสามารถนำมาดูดซับเบสิคเรด 13 (Basic red 13) ได้ 3 ครั้ง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสีย้อมเบสิคเรด 51 ที่ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำโดยใช้วิธีการดูดซับและศึกษาวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ โดยผสมผงแรดดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์กับโซเดียมอัลจีเนตแล้วนำมาขึ้นรูปด้วยวิธีการที่ง่ายให้เป็นเม็ดเจล เพื่อความสะดวกในการใช้งานและการเก็บ

กลับมาใช้ซ้ำ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับ พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วัดพื้นที่ผิวจำเพาะ และความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค BET surface area (Surface area and porosity analyzer: BET) และติดตามความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectrophotometer)

2. วิธีการทดลอง

การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนต การพิสูจน์เอกลักษณ์ การศึกษาการดูดซับและการคายการดูดซับ มีวิธีการดังนี้

2.1 สารเคมี

1. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate: SA) MW = 216.12 g/mol จาก Nerdy Gummy
2. มอนต์มอริลโลไนต์ K-10 (Montmorillonite K-10: MT) จาก Sigma-Aldrich
3. สีย้อม Basic Red 51 (BR51) MW = 279.77 g/mol จาก MySkinRecipes/Cosmetic

Ingredient

4. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride: CaCl_2) MW = 147.02 g/mol จาก LOBA CHEMIE PVT. LTD.

5. ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric: HCl) 37% MW = 36.50 g/mol AR grade จาก CARLO ERBA Reagents

6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH) MW = 40.00 g/mol จาก Ajax Finechem Pty. Ltd.

2.2 การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตและแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

เตรียมสารละลาย SA ผสมแร่ดินเหนียว MT โดยชั่ง SA และแร่ดินเหนียว MT ในอัตราส่วนต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 ละลายในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง 50 mL คนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายที่ได้บรรจุในกระบอกฉีดยา (Syringe) ขนาด 1 mL แล้วหยดลงในสารละลาย CaCl_2 (3% wt) โดยคนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรองแบบสุญญากาศ แล้วล้างเม็ดด้วยน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูง ซับให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของเม็ด สูตรที่ 1-6 ด้วยเวอร์เนีย (Vernier caliper) ขนาด 150×0.02 mm

ตารางที่ 1. อัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตและมอนต์มอริลโลไนต์ สูตรที่ 1-6

สูตร	SA (g)	MT (g)
1 (SA-M1)	1.00	0.00
2 (SA-M2)	1.00	0.10
3 (SA-M3)	1.00	0.20
4 (SA-M4)	1.00	0.40
5 (SA-M5)	1.00	1.00
6 (SA-M6)	1.00	2.00

2.3 การศึกษาการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

2.3.1 การศึกษาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดูดซับเบสโครม 51

เตรียมสารละลายสีย้อมเบสโครม 51 ในน้ำบริสุทธิ์คุณภาพสูงให้มีความเข้มข้น 100 ppm แล้วเจือจางให้มีความเข้มข้น 7 ppm หลังจากนั้นปิเปตสารละลายสีย้อม 25 mL ใส่ลงในภาชนะจำนวน 6 ขวด นำเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ สูตร 1-6 สูตรละ 25 เม็ด ใส่ลงในสารละลายสีย้อม เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 rpm ทำซ้ำ 3 ครั้ง วัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ($\lambda_{\max}=524$ nm) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (q_t) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม (Percentage of removal efficiency: %R) ดังสมการที่ (1) และ (2)

$$q_t = \frac{(C_i - C_t)V}{M} \quad (1)$$

$$\%R = \frac{C_i - C_t}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

q_t คือ ปริมาณของสีย้อมที่ดูดซับ ณ เวลา t (mg/g)

C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในสารละลาย (mg/L)

C_t คือ ความเข้มข้น ณ เวลา t ของสีย้อมในสารละลาย (mg/L)

V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (L)

M คือ มวลของตัวดูดซับ (g)

ต่อจากนั้นนำสูตรที่ดีที่สุดมาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ โดยทุกปัจจัยจะใช้เม็ด SA-M6 สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 7 ppm (ยกเว้นปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้น) 25 mL เขย่าที่ 150 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ยกเว้นปัจจัยด้านเวลา) ดังนี้

ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์ ใช้เม็ด SA-M6 จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมที่เวลา 0, 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ปัจจัยของค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ นำสารละลายสีย้อมมาทำการปรับค่า pH ด้วย NaOH 0.1 M และ HCl 0.1 M ให้มีค่า pH เริ่มต้น 1, 3, 6, 9 และ 12 ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมใช้ความเข้มข้น 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm แล้วปรับค่า pH ให้เป็น 12 ทุกปัจจัยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำสารละลายสีย้อมหลังจากทำการดูดซับด้วยเม็ด SA-M6 ทุกครั้งไปวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย

2.3.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

นำผลการทดลองจากการดูดซับสีย้อมที่เวลา 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order) ดังสมการที่ (3) และกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order) ดังสมการที่ (4)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right)t \quad (3)$$

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

เมื่อ

q_e คือ ปริมาณในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาสมดุล (mg/g)

q_t คือ ปริมาณในการดูดซับสีย้อม ณ เวลาใด ๆ (mg/g)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1})

k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (min^{-1})

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม (min)

2.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

นำผลการทดลองจากปัจจัยด้านความเข้มข้นในการดูดซับของเม็ด SA-M6 หลังการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้น 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm มาสร้างกราฟ Nonlinear ของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ตามสมการที่ (5) และกราฟ Nonlinear ของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) ตามสมการที่ (6)

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (5)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

เมื่อ

q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg/g)

q_m คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (L/mg)

K_F คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช ((mg/g)/(mg/L)^{1/n})

C_e คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช

2.4 การศึกษาโครงสร้างก่อนและหลังการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์

2.4.1 ศึกษาโครงสร้างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

เตรียมโซเดียมอัลจิเนต สีย้อมเบสสิคเรด 51 แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ เม็ดเจลก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 และเม็ดเจลก่อนและหลังการคายการดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 อย่างละประมาณ 0.3 g โดยที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดแห้ง นำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$

2.4.2 ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุน

นำเม็ดเจลก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 และเม็ดเจลหลังการคายการดูดซับสีย้อมที่แห้งและมีขนาดไม่เกิน 5 mm น้ำหนักประมาณ 0.3-0.5 g ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนเฉลี่ยด้วยแก๊สไนโตรเจนด้วยเครื่องเซอร์เฟสแอเรียแอนาไลเซอร์ที่อุณหภูมิ 77 K ด้วยวิธี t-plot และวิธี Barrett-Joyner-Halenda (BJH)

2.5 การศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

การศึกษาการคายการดูดซับของเม็ดเจล เริ่มจากนำเม็ดเจลมาดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 โดยเตรียมเม็ดเจลสูตรที่ 1-6 สูตรละ 25 เม็ด ดูดซับสารละลายสีย้อมเบสสิคเรด 51 ความเข้มข้น 7 ppm นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 130 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำเม็ดเจลที่ดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 เรียบร้อยแล้วไปทำการคายการดูดซับ ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการคายการดูดซับ ได้แก่ สูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ ปริมาณที่เหมาะสมของเม็ดเจล และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ดังนี้ นำเม็ดเจลที่ได้ทำการดูดซับสีย้อมเบสสิคเรด 51 ความเข้มข้น 7 ppm จำนวน 25 เม็ด มาศึกษาการคายการดูดซับในสารละลายกรด HCl pH 2 สารละลาย 0.1 M HCl: เอทานอล 80% (1:1) และสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เข้มข้น 5.00 mL เขย่าด้วยความเร็วรอบ 130 rpm เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง นำสภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลองต่อโดยใช้เม็ดเจล จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด โดยใช้เวลาในการคายการดูดซับที่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง และทดลองโดยดูดซับสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้น 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ลักษณะของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

การสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วนต่าง ๆ จำนวน 6 สูตร พบว่าแต่ละสูตรให้เม็ดเจลที่กลม สีและขนาดของเม็ดเมื่อแห้งแล้วแตกต่างกัน ดังนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณของแร่ดินเหนียวในแต่ละสูตรทำให้สีและขนาดของเม็ดใหญ่ขึ้นจาก 1.20 mm ไปจนถึง 1.80 mm และมีสีเหลืองเข้มมากขึ้นตามลำดับ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ลักษณะของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์สูตร 1-6

สูตร	1 (SA)	2 (SA-M2)	3 (SA-M3)	4 (SA-M4)	5 (SA-M5)	6 (SA-M6)
สี	เหลืองใส	เหลือง	เหลืองขุ่น	เหลืองเข้ม	เหลืองเทา	เหลืองเทา
ขนาด (mm)	1.20	1.27	1.36	1.44	1.65	1.80
MT (g)	0.00	0.10	0.20	0.40	1.00	2.00
ลักษณะ						

3.2 การดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51

3.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51

เม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ สูตร 1-6 เมื่อดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ความเข้มข้น 7 ppm ที่เวลา 6 ชั่วโมง เม็ดเจลที่ได้จะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีชมพูไปจนถึงสีแดงที่มีความเข้มสีแตกต่างกัน นอกจากนี้สีของสารละลายจะจางลงและมีความใสเพิ่มมากขึ้นเรียงตามลำดับจากสูตร 1-6 ดังรูปที่ 2 ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงพบว่ามีความเข้มข้นของสีย้อมของแต่ละสูตรเหลืออยู่ที่ 6.61, 4.22, 3.56, 2.79, 1.52 และ 0.75 ppm ตามลำดับ โดยสูตรที่ 6 มีปริมาณการดูดซับ 2.20 mg/g และมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดอยู่ที่ 87.98 ± 0.47 เนื่องจากมีแร่ดินเหนียวเป็นตัวช่วยทำให้การดูดซับเกิดได้มากขึ้น เพราะโครงสร้างของแร่ดินเหนียวมีรูพรุนและพื้นผิวที่มีสภาพขรุขระเป็นประจุลบจึงเกิดอันตรกิริยากับสีย้อมที่มีสภาพขั้วเป็นบวกได้ดี ต่อจากนั้นศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับโดยใช้โซเดียมอัลจิเนตผสมแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์สูตรที่ 6 สารละลายสีย้อมความเข้มข้น 7 ppm (ยกเว้นปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้น) 25 mL เขย่า 150 rpm เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ยกเว้นปัจจัยด้านเวลา)



รูปที่ 2. สีของสารละลายและสีของเม็ดเจล สูตร 1-6 จำนวน 25 เม็ด เมื่อดูดซับสีย้อมความเข้มข้น 7 ppm

1) ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์

จากการศึกษาปริมาณของเม็ดเจลจำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 พบว่าเม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด ทำให้สารละลายใสมากที่สุด เมื่อวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ดังรูปที่ 3(ก) พบว่ามีปริมาณการดูดซับ 1.32 mg/g และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมากที่สุด 94.72 ± 0.06 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณของเม็ดเจลเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนสำหรับการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น

2) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

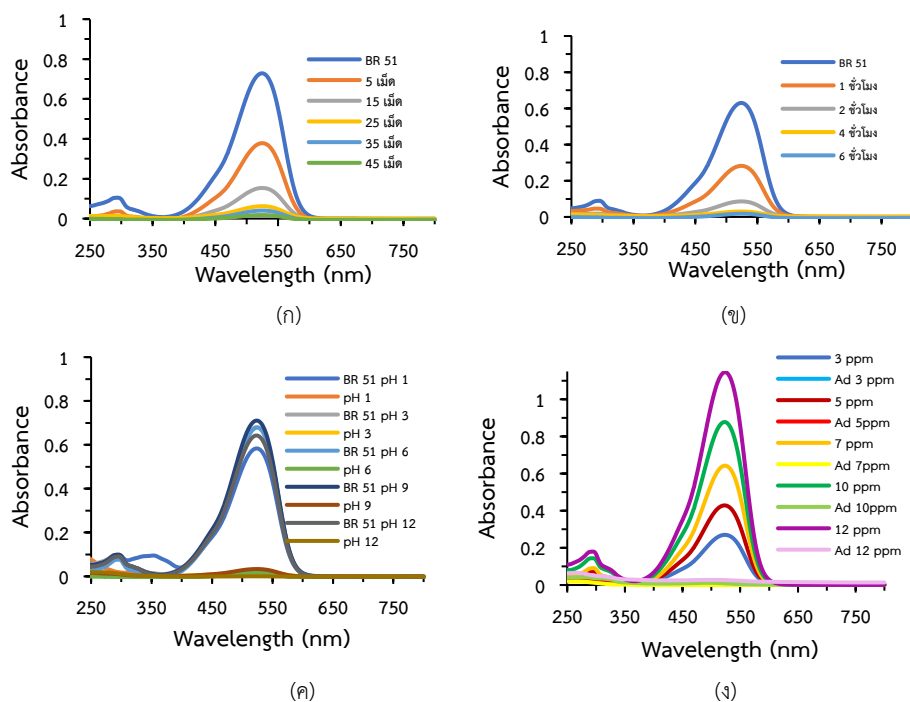
จากการกำหนดเวลาในการดูดซับ 0, 1, 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าที่เวลา 6 ชั่วโมง สารละลายมีความใสมากที่สุด จากนั้นวัดความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ดังรูปที่ 3(ข) มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมที่มีค่ามากที่สุดที่ 1.32 mg/g และ 94.72 ± 0.06 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้เวลาในการดูดซับสีย้อมนานขึ้นจะทำให้เม็ดเจลมีเวลาในการดูดซับสีย้อมในสารละลายให้เข้าไปในรูพรุนได้มากยิ่งขึ้น

3) ปัจจัยของค่า pH เริ่มต้นที่เหมาะสมในการดูดซับ

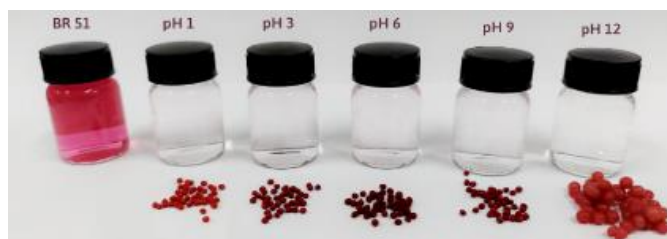
จากการกำหนดค่า pH เริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเป็น 1, 3, 6, 9 และ 12 พบว่าที่ค่า pH 12 มีความเข้มข้นของสีย้อมเหลือน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4 มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดที่ 1.26 mg/g และ 97.06 ± 0.10 ตามลำดับ สีของสารละลายมีความใสใกล้เคียงกัน แต่ที่ pH 12 ขนาดเม็ดเจลมีการบวมตัวจากก่อนดูดซับที่มีขนาดประมาณ 1.72 mm หลังจากดูดซับแล้วเม็ดมีขนาดใหญ่ขึ้นประมาณ 4.46 mm และแตกออกจากกัน ดังรูปที่ 3(ค) อาจเกิดจากไฮดรอกไซด์ไอออนไปดั่งไอออน Ca^{2+} ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของอัลจิเนตเกิดเป็น Ca(OH)_2 ทำให้เม็ดเจลบางส่วนบวมตัวเสียสภาพและแตกออกได้ ในขณะที่ pH 1, 3, 6 และ 9 ไม่พบการบวมตัวของเม็ดเจล โดยพบว่าที่ทุก pH มีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ pH ในช่วง 1-9 ในการดูดซับสีย้อมชนิดนี้ได้

4) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเบสิคเรด 51

จากการกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมที่ 3, 5, 7, 10 และ 12 ppm เมื่อวัดความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลาย พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm เหลือความเข้มข้นน้อยสุด ที่ 0.180 ppm ดังรูปที่ 3(ง) สีของสารละลายมีความใสใกล้เคียงกัน มีปริมาณการดูดซับและร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอยู่ที่ 1.21 mg/g และ 97.06 ± 0.10 ตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นมากกว่า 7 ppm เมื่อมีเม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด จะไม่สามารถดูดซับสีย้อมได้ทั้งหมดจึงเหลือสีย้อมอยู่ในสารละลาย



รูปที่ 3. สเปกตรัมการดูดกลืนแสง (ก) ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดเจล (ข) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (ค) ปัจจัยของค่า pH และ (ง) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม
หมายเหตุ การวัดการดูดกลืนแสงจะทำการวัดสารละลายของสีย้อม BR51 ก่อนการดูดซับทุกครั้ง



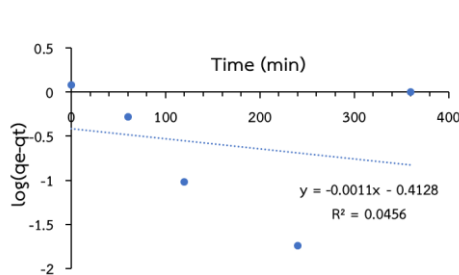
รูปที่ 4. สีของสารละลายและสีของเม็ดเจล สูตร 6 ที่ pH 1, 3, 6, 9 และ 12

3.2.2 จลนศาสตร์การดูดซับ

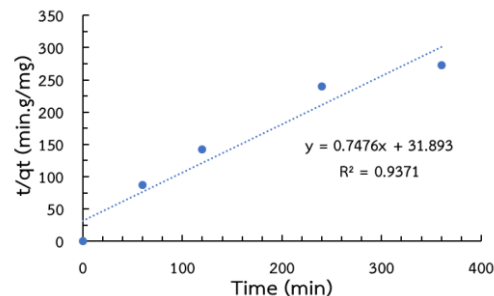
เมื่อนำข้อมูลจากการศึกษาปัจจัยด้านเวลาในการดูดซับมาสร้างกราฟเส้นตรงตามสมการปฏิกิริยาการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมและสมการปฏิกิริยาการดูดซับอันดับสองเทียมตามสมการที่ (3) และ (4) พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) และ q_e แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 5

ตารางที่ 3. ค่าตัวแปรของสมการปฏิกิริยาดังหนึ่งเทียมและสองเทียม

ตัวแปร	ปฏิกิริยาดังหนึ่งเทียม	ปฏิกิริยาดังสองเทียม
R^2	0.0456	0.9371
k_1, k_2 (min ⁻¹)	2.3030	0.0561
q_e experiment (mg/g)	1.3170	1.3170
q_e calculate (mg/g)	0.3860	1.3380



(ก)



(ข)

รูปที่ 5. จลนศาสตร์การดูดซับของ (ก) สมการปฏิกิริยาดังหนึ่งเทียม และ (ข) สมการปฏิกิริยาดังสองเทียม

จากผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าสมการปฏิกิริยาดังสองเทียมมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการปฏิกิริยาดังหนึ่งเทียม ดังนั้นเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปจนเริ่มเข้าสู่สมดุล การดูดซับสีย้อมเบสเครต 51 ของเม็ดเจลสูตรที่ 6 เป็นการดูดซับด้วยแรงทางเคมี โดยโมเลกุลของสีย้อมใช้ตำแหน่ง N^+ ในวง Imidazole เกิดอันตรกิริยากับตำแหน่ง $-COO^-$ ของโซเดียมอัลจิเนต และประจุบวกของสีย้อมนี้ยังสามารถเกิดแรงดึงดูดกับพื้นผิวที่เป็นลบของแรตินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

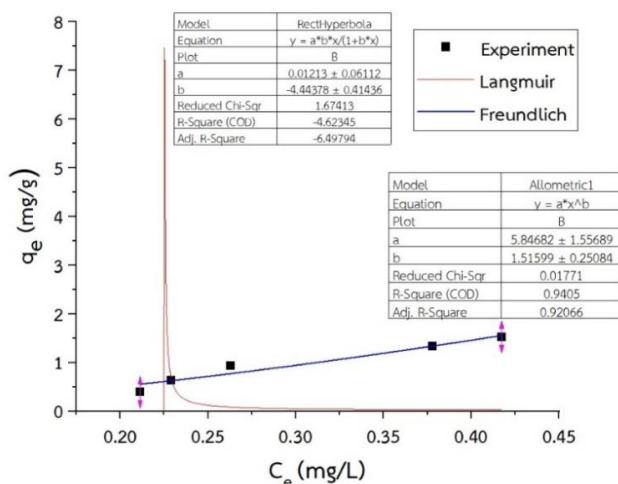
3.2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ใช้กับการดูดซับแบบชั้นเดียวบนผิวตัวดูดซับ และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชเหมาะสำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น สามารถใช้ได้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เมื่อนำปัจจัยความเข้มข้นในการดูดซับมาสร้างกราฟ Nonlinear ตามสมการที่ (5) และ (6) โดยใช้โปรแกรม OriginLab Origin 2024 ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6

ดังนั้นในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิชมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มากกว่าแลงเมียร์ แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ตารางที่ 4. ค่าตัวแปรไอโซเทอมของแลงเมียร์และไอโซเทอมของฟรุนดลิช

ตัวแปร	ไอโซเทอมของแลงเมียร์	ไอโซเทอมของฟรุนดลิช
R^2	-4.6234	0.9405
K_L, K_F	-4.4438	5.8470
q_m, n	0.0121	0.6596



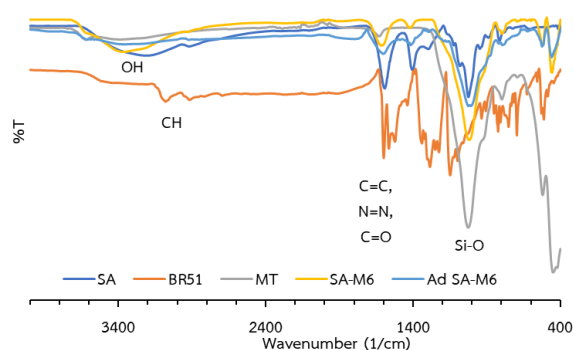
รูปที่ 6. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

3.3 โครงสร้างของเม็ทโซเดียมอัลจินเตผสมมอนตมอริลโลไนต์ก่อนและหลังการดูดซับ

3.3.1 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของ SA, BR51, MT และ SA-M6 ในช่วงเลขคลื่น $4000-400 \text{ cm}^{-1}$ ดังรูปที่ 7 พบว่า MT เกิดการสั่นแบบยืดหดของหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำ (Hydroxyl group: -OH) หมู่ซิลิโคนออกไซด์ (Silicon oxide: Si-O) ที่เลขคลื่นประมาณ 3624 และ 1028 cm^{-1} และเกิดการสั่นแบบงอหมู่ Si-O-Al และ Si-O-Si ที่เลขคลื่นประมาณ 521 และ 450 cm^{-1} ส่วนสเปกตรัมของ SA พบการสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH ของน้ำ หมู่ C-H และหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group: -COO⁻) แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตรที่เลขคลื่น $3240, 2919, 1591$ และ 1403 cm^{-1} ตามลำดับ สำหรับสเปกตรัม BR51 พบแถบการสั่นแบบยืดจากวงอะโรมาติก C-H ที่เลขคลื่น 3081 cm^{-1} , C=C ที่เลขคลื่น 1599 cm^{-1} หมู่อะโซ (azo group: N=N) ที่เลขคลื่น 1564 cm^{-1} และ C-N ที่เลขคลื่น 1268 cm^{-1} เมื่อทำการผสมแร่ดินเหนียวมอนตมอริลโลไนต์ด้วย SA สูตรที่ 6 หรือ SA-M6 จะปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่มาจาก MT และ SA ดังนี้ การสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH ที่มีการเลื่อนตำแหน่งไปที่ 3331 และ 3367 cm^{-1} เนื่องจากการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ -COO⁻ ของ SA กับหมู่ -OH บนผิวของ MT หมู่ C-H ที่เลขคลื่น 2924 และ 2919 cm^{-1} และ -COO⁻ แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตรที่เลขคลื่น $1594, 1418 \text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบการเลื่อนตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน Si-O ไปยังเลขคลื่น 1019 cm^{-1} เนื่องจากถูกรบกวนพื้นผิวจากการผสมด้วย SA

เมื่อเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันก่อนดูดซับ (SA-M6) และหลังดูดซับสีย้อม (Ad SA-M6) พบว่าหลังการดูดซับมีหมู่ฟังก์ชันจากโมเลกุลสีย้อมเพิ่มเข้ามา ดังนี้ หมู่ C-H ที่เลขคลื่น 2920 cm^{-1} หมู่ N=N ที่เลขคลื่น 1418 cm^{-1} และหมู่ C-N ที่เลขคลื่น 1293 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบแถบการสั่นแบบยืดหดของหมู่ -OH (มีความเข้มลดลง) หมู่ -COO^- แบบไม่สมมาตรกับแบบสมมาตร และหมู่ Si-O ที่มีการเลื่อนตำแหน่งอย่างชัดเจนจากการเกิดอันตรกิริยากับ N^+ ของสีย้อมกับพื้นผิวที่เป็นลบของแร่ดินเหนียวที่เลขคลื่น 3379, 1601 และ 1007 cm^{-1} ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าในโครงสร้างของเมดโซเดียมอัลจินตผสมมอนต์มอริลโลไนต์หลังดูดซับมีการแทรกตัวของโมเลกุลสีย้อม BR51 เข้าไปในรูพรุนจริง ส่วนผลจากการคายการดูดซับ BR51 ของ SA-M3 3 พบว่ายังคงปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันจากโมเลกุลสีย้อมแสดงให้เห็นว่ายังไม่สามารถขจัดสีย้อมออกจาก ตัวดูดซับได้ทั้งหมด

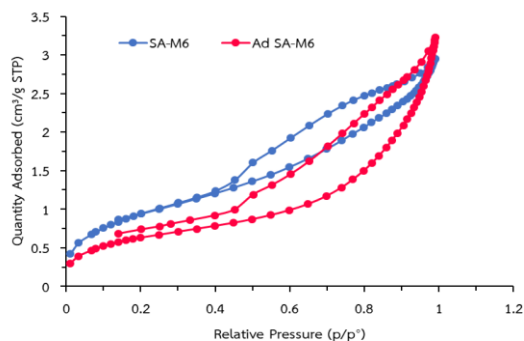


รูปที่ 7. สเปกตรัม FT-IR ของ SA, BR51, MT, SA-M6 และ Ad SA-M6

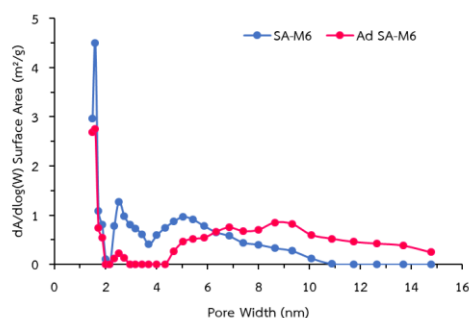
3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับและการคายการดูดซับแก๊ส N_2 (N_2 Adsorption-Desorption Isotherm)

การวิเคราะห์ไอโซเทอมของเมดเจลสูตรที่ 6 ก่อนการดูดซับ (SA-M6) และหลังการดูดซับสีย้อม (Ad-SA-M6) พบว่ามีลักษณะคล้ายกัน คือ มีลูบฮิสเตอร์เรซิส (Hysteresis loop) แสดงถึงการดูดซับทางกายภาพประเภท IV ตามระบบ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) เป็นวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลของแก๊ส N_2 ที่ถูกดูดซับมาก เป็นการดูดซับแบบสองชั้น ในช่วงแรกกราฟมีจุดเปลี่ยนโค้งแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกเสร็จสมบูรณ์ โดยความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 8(ก) โดย SA-M6 มีพื้นที่ผิว (Surface area) $3.9501\text{--}3.5245\text{ m}^2/\text{g}$ และ Ad-SA-M6 มีค่าเท่ากับ $2.3902\text{--}2.3484\text{ m}^2/\text{g}$ การมีพื้นที่ผิวลดลง เนื่องจากแก๊ส N_2 ถูกดูดซับได้น้อยลงจากการมีโมเลกุลสีย้อมดูดซับอยู่ก่อนแล้ว จากการวิเคราะห์รูพรุนด้วยวิธี t-plot แสดงให้เห็นว่า SA-M6 และ Ad-SA-M6 มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore size) ในช่วง $1\text{--}15\text{ nm}$ มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) ขนาด 0.7405 และ 0.7883 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 8(ข) เมื่อวิเคราะห์รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) และขนาดใหญ่ (Macropore) ด้วยวิธี BJH แสดงให้เห็นว่า SA-

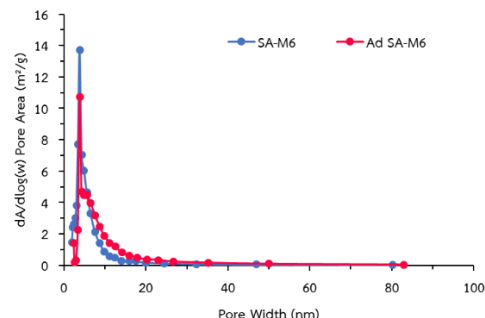
M6 และ Ad-SA-M6 ส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาด Mesopores โดยมีขนาด 6.1882 และ 10.8273 nm ตามลำดับ ดังรูปที่ 8(ค) และตารางที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8. การศึกษา (ก) ไอโซเทอมการดูดซับ-การคายการดูดซับของ SA-M6 และ Ad SA-M6 (ข) การวิเคราะห์ขนาดกัปซนิตของรูพรุน micropore-mesopore ด้วยวิธี t-plot (ค) การวิเคราะห์ขนาดกัปซนิตของรูพรุน mesopore ด้วยวิธี BJH

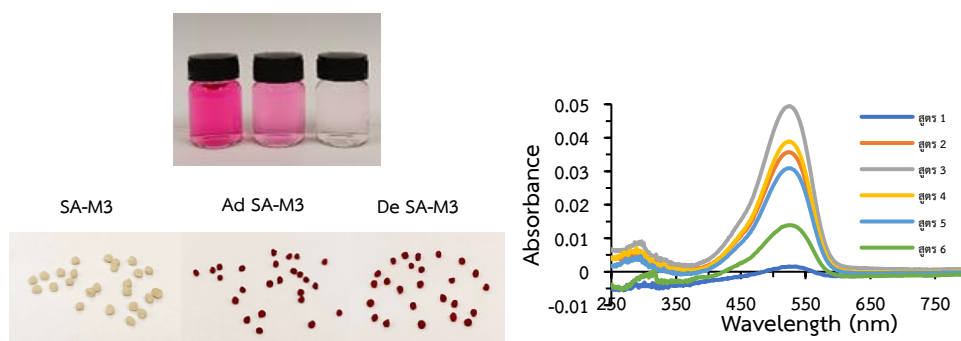
ตารางที่ 5. ผลจากการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง BET ด้วยวิธี t-plot และวิธี BJH

ตัวอย่าง	t-plot		BJH	
	พื้นที่ผิว (m²/g)	ขนาดรูพรุน (nm)	พื้นที่ผิว (m²/g)	ขนาดรูพรุน (nm)
SA-M6	3.9501	0.7405	3.5245	6.1882
Ad SA-M6	2.3902	0.7883	2.3484	10.8273

3.4 การคายการดูดซับสีย้อมเบสเรด 51

1) ปัจจัยด้านการคายการดูดซับของเม็ดเจลสูตรที่ 1-6

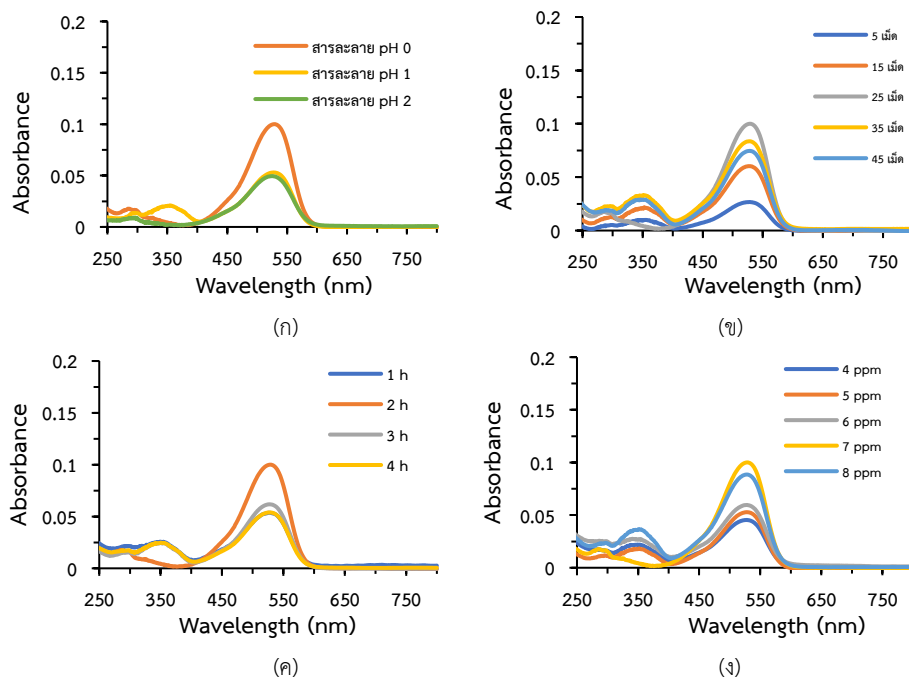
การคายการดูดซับสีย้อมเบสเรด 51 ที่ความเข้มข้น 7 ppm ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) pH 2 พบว่าสีของเม็ดเจลจางลงจากเดิมเล็กน้อย แสดงดังรูปที่ 9 เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการคายการดูดซับไปวัดการดูดกลืนแสง พบว่าเม็ดเจลสูตรที่ 1-6 มีค่าความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับเท่ากับ 0.183, 0.492, 0.615, 0.517, 0.419 และ 0.294 ppm ตามลำดับ โดยโมเลกุลสีย้อมจะหลุดออกจากเม็ดเจลสูตรที่ 4-6 ได้น้อยกว่าสูตรที่ 3 เนื่องจากเป็นสูตรที่มี MT ในปริมาณมากกว่าทำให้โมเลกุลสีย้อมเข้าไปในรูพรุนเป็นจำนวนมาก สีย้อมจึงหลุดออกมาได้น้อย ส่วนเม็ดเจลสูตรที่ 1 และ 2 ที่คายการดูดซับออกมาได้น้อย เพราะมีปริมาณ MT น้อยจึงทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้ในปริมาณที่น้อยเช่นกัน



รูปที่ 9. สีของเม็ดเจลสูตรที่ 3 และสีของสารละลายเบสเรด 51 ก่อนดูดซับ (SA-M3) หลังการดูดซับ (Ad SA-M3) และหลังคายการดูดซับ (De SA-M3) ด้วยสารละลายกรด HCl pH 2 และสเปกตรัมของสารละลายที่คายการดูดซับ

2) ปัจจัยด้านสูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ

จากการศึกษาสูตรของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับเมื่อนำเม็ดเจลที่ดูดซับสีย้อมที่มีความเข้มข้น 7 ppm มาทำการคายการดูดซับด้วยสารละลายทั้ง 3 สูตร ได้แก่ สารละลายกรด HCl pH 2 สารละลาย 0.1 M HCl: เอทานอล 80% (1:1) (สารละลาย pH 1) และสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เข้มข้น (สารละลาย pH 0) พบความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.615, 0.649 และ 1.04 ppm ตามลำดับ ดังรูปที่ 10(ก) แสดงให้เห็นได้ว่าการใช้กรด HCl ปริมาณมากทำให้เม็ดเจลถูกเติมโปรตอน ส่งผลให้สีย้อมที่มีประจุบวกหลุดออกมาได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Fang และคณะ [9] ที่ได้รายงานว่า ภายใต้สภาวะกรด pH < 2.0 หมู่ไฮดรอกซิลและคาร์บอกซิลบนตัวดูดซับจะถูกเติมโปรตอน ทำให้มีแรงทางไฟฟ้าสถิตระหว่างประจุลบของตัวดูดซับกับ H^+ ของสารละลายที่ใช้ในการคายการดูดซับ



รูปที่ 10. สเปกตรัมการคายการดูดซับ (ก) สูตรของสารละลายที่ใช้ล้าง (ข) ปริมาณของเม็ดเจล (ค) เวลาที่ใช้ในการคายการดูดซับ และ (ง) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

3) ปัจจัยด้านปริมาณของเม็ดเจล

เมื่อนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 จำนวน 5, 15, 25, 35 และ 45 เม็ด ทำการดูดซับสีย้อมที่มีความเข้มข้น 7 ppm แล้วคายการดูดซับด้วยสารละลาย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เมื่อนำสารละลายที่ได้จากการคายการดูดซับไปวัดการดูดกลืนแสง พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมมีค่าเท่ากับ 0.408, 0.725, 1.04, 0.917 และ 0.848 ppm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเม็ดเจลจำนวน 25 เม็ด สามารถคายการดูดซับสีย้อมได้มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 10(ข)

4) ปัจจัยด้านเวลาที่ใช้ในการคายการดูดซับ

เมื่อนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 จำนวน 25 เม็ด ดูดซับสารละลายสีย้อมแล้วทำการคายการดูดซับด้วย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 h พบว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.655, 1.036, 0.724 และ 0.653 ppm เวลาในการคายการดูดซับ 2 h เป็นเวลาเหมาะสมต่อการคายการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 10(ค)

5) ปัจจัยด้านความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม โดยนำเม็ดเจลสูตรที่ 3 มาดูดซับด้วยสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 4, 5, 6, 7 และ 8 ppm แล้วทำการคายการดูดซับด้วย น้ำ:เอทานอล (70:30) + HCl เป็นเวลา 2 h พบความเข้มข้นของสีย้อมที่คายการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.588, 0.648, 0.698,

1.036 และ 0.959 ppm โดยความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm มีปริมาณการคายการดูดซับออกมามากที่สุด แสดงดังรูปที่ 10(ง)

4. สรุปผลการทดลอง

สามารถสังเคราะห์เม็ดโซเดียมอัลจิเนตผสมมอนต์มอริลโลไนต์ได้ทั้งหมด 6 สูตร พบว่าสูตรที่ 6 มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากที่สุด และมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ 97.05 เมื่อใช้เม็ดเจลจำนวน 45 เม็ด เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง สารละลายสีย้อมเบสิคเรด 51 มีความเข้มข้นเริ่มต้น 7 ppm และค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง pH 1-9 จะให้เม็ดเจลที่เสถียรและมีร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่า 90 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับพบว่าปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช การวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนของเม็ดโซเดียมอัลจิเนตทั้งก่อนและหลังการดูดซับ พบว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 nm อยู่เล็กน้อย โดยส่วนใหญ่มีรูพรุนขนาดกลางเป็นหลัก และจากการศึกษาการคายการดูดซับสีย้อมของสูตรที่ 3 พบว่าคายการดูดซับได้ร้อยละ 36.75 โดยสารละลายน้ำกับเอทานอลอัตราส่วน 70:30 ขณะมีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เป็นสูตรที่เหมาะสมที่สุดในการทำให้เกิดการคายการดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 นอกจากนี้หากนำเม็ดเจลไปดูดซับสีย้อมเบสิคเรด 51 ควรหลีกเลี่ยงตัวกลางที่เป็นเบสแก่ (pH 12) เพราะจะทำให้เม็ดเจลแตกเสียสภาพไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนค่าวิเคราะห์และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Myskinrecipes. 2566. Basic red 51 (Basic dyes), แหล่งข้อมูล: <https://www.myskinrecipes.com/shop/th/basic-dyes/8112-basic-red-51.html> ค้นเมื่อวันที่ 5 ตุลาคม 2566.
- [2] Corrêa, G.T., Carlos de Souza, J., Silva, J.P., Pividori, M.I. and Zanoni, M.V.B. 2020. Determination of temporary dye basic red 51 in commercial hair dye, river water and wastewater from hairdressing salon using graphite-epoxy composite electrode modified with magnetic nanoparticles. *Microchemical Journal*, 159, 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105485>.
- [3] Peng, S. et al. 2019. Polyhydroxyl gemini surfactant-modified montmorillonite for efficient removal of methyl orange. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 578, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123602>.
- [4] Minisy, I.M., Salahuddin, N.A. and Ayad, M.M. 2021. Adsorption of methylene blue onto chitosan-montmorillonite/polyaniline nanocomposite. *Applied Clay Science*, 203, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.105993>.

- [5] Edathil, A.A., Pal, P. and Banat, F. 2018. Alginate clay hybrid composite adsorbents for the reclamation of industrial lean methyldiethanolamine solutions. *Applied Clay Science*, 156, 213-223, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.02.015>.
- [6] Tao, E., Ma, D., Yang, S. and Hao, X. 2020. Graphene oxide-montmorillonite/sodium alginate aerogel beads for selective adsorption of methylene blue in wastewater. *Journal of Alloys and Compounds*, 832, 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154833>.
- [7] Zhang, J., Deng, R., Ren, B., Yaseen, M. and Hursthouse, A. 2020. Enhancing the removal of Sb (III) from water: A $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{HCO}$ composite adsorbent caged in sodium alginate microbeads. *Processes*, 44(8), 1-12, <https://doi.org/10.3390/pr8010044>.
- [8] Zhang, Z., Xu, J. and Yang, X. 2021. MXene/sodium alginate gel beads for adsorption of methylene blue. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124123>.
- [9] Fang, Y., Liu, Q. and Zhu, S. 2021. Selective biosorption mechanism of methylene blue by a novel and reusable sugar beet pulp cellulose/sodium alginate/iron hydroxide composite hydrogel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 188, 993-1002, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.192>.
- [10] Bayram, T., Bucak, S. and Ozturk, D. 2020. BR13 dye removal using sodium dodecyl sulfate modified montmorillonite: Equilibrium, thermodynamic, kinetic and reusability studies. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 158, 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108186>.