

**การใช้ประโยชน์ของซีโอไลต์ เอ จากเถ้าลอยเป็นตัวดูดซับประสิทธิภาพสูง
สำหรับการกำจัดสีย้อมประจุบวกจากสารละลายน้ำ**

**Utilization of Fly Ash-Based Zeolite A as an Efficient Adsorbent
for the Removal of Cationic Dyes from Aqueous Solutions**

ดร.ณิ สุขจิต¹ บงกชวรรณ พาคำวงศ์¹ สายสมร ลำลอง¹ มาลี ประจวบสุข¹ ชาญ อินทร์แถม¹
อรดี พันธุ์กว้าง² บรรเจิด จงสมจิตร์³ กนิษฐา วงศ์ใหญ่⁴ นิรมล จันทราช⁵ ศศิจุชา วัฒนาราช⁶
ปจรรย์ ถาวรนิติ⁶ และ พรพรรณ พิงโพธิ์^{1*}

Darunee Sukchit¹ Bongkochawan Pakamwong¹ Saisamorn Lumlong¹ Malee Prajuabsuk¹
Chan Inntam¹ Auradee Punkvang² Bunjerd Jongsomjit³ Kanitta Wongyai⁴ Niramol Juntarachat⁵
Sasijuta Wattanarach⁶ Parjaree Thavorniti⁶ and Pornpan Pungpo^{1*}

¹ภาควิชาเคมีและศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม นครพนม 48000 ประเทศไทย

³ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคатаไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10210 ประเทศไทย

⁴กองสิ่งแวดล้อมเหมืองแม่เมาะ ฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
ลำปาง 52220 ประเทศไทย

⁵ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210 ประเทศไทย

⁶ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

¹Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand

²Division of Chemistry, Faculty of Science, Nakhon Phanom University, Nakhon Phanom 48000, Thailand

³Center of Excellence on Catalysis and Catalytic Reaction Engineering,
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10210, Thailand

⁴Laboratory Section, Geology Department, Mae Moh Mine, Electricity Generating Authority of Thailand,
Lampang 52220, Thailand

⁵Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung 93210, Thailand

⁶National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency,
Pathum Thani 12120, Thailand

*E-mail: pompan.p@ubu.ac.th

Received: Feb 11, 2025

Revised: Mar 27, 2025

Accepted: Apr 09, 2025

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ โดยใช้ซิลิกาจากการสกัดเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง และมีการพิสูจน์เอกลักษณ์ซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF, XRD, SEM และ BET จากนั้นนำซีโอไลต์ เอ ไปใช้ในการกำจัดสีย้อมประจุบวก คือ สีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลิเลี่ยนต์ กรีน ในสารละลายน้ำ ศึกษาปริมาณตัวดูดซับและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ รวมถึงศึกษาไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ จากการศึกษาพบว่าปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการ

ดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน คือ 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน คือ 60 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคือ 96.00% และ 95.91% ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่จำเพาะ และการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ (ΔH°) มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) มีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับส่งผลให้โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) มีค่าเป็นลบ แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นได้เอง และซีโอไลต์ เอ มีประสิทธิภาพในการดูดซับซ้ำได้สูง 8 ครั้ง จากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน จากสารละลายน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง มีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: ซีโอไลต์ เอ เถ้าลอย มาลาไคต์ กรีน บริลเลียนต์ กรีน การดูดซับ

Abstract

In this study, zeolite A was synthesized using silica extracted from fly ash obtained from the Mae Moh power plant in Lampang Province. The synthesized zeolite A was characterized using XRF, XRD, SEM, and BET techniques. The zeolite A was then utilized as an adsorbent for the removal of cationic dyes, namely malachite green and brilliant green, from aqueous solutions. The optimal adsorbent dosage and contact time for dye adsorption were investigated. The adsorption isotherms, kinetics, and thermodynamics were also investigated. The results indicated that the optimal dosages of the adsorbent for malachite green and brilliant green removal were 10 g/L and 20 g/L, respectively, with an optimal contact time of 60 minutes. The adsorption efficiencies were 96.00% and 95.91% at an initial dye concentration of 100 mg/L, respectively. The obtained adsorption isotherms corresponded to the Langmuir isotherm model. The kinetic studies indicated that the adsorption followed a pseudo-second-order kinetic model, suggesting monolayer adsorption on specific surface sites. The thermodynamic analysis showed that the enthalpy change (ΔH°) was positive, indicating an endothermic adsorption process. The entropy change (ΔS°) was positive, implying that the adsorption process increased the disorder of both the adsorbent and adsorbate molecules at the adsorbent surface interface. The Gibbs free energy change (ΔG°) was negative, confirming that the adsorption process occurred spontaneously. Zeolite A exhibited high reusability, maintaining effective adsorption performance for up to 8 cycles. These findings demonstrate that this fly ash based-zeolite A is a highly efficient, cost-effective, and environmentally friendly adsorbent for removing malachite green and brilliant green from aqueous solutions.

Keywords: Zeolite A, Fly ash, Malachite green, Brilliant green, Adsorption

1. บทนำ

อุตสาหกรรมฟอกย้อม และอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นอุตสาหกรรมประเภทที่มีการใช้น้ำและสารเคมีจำนวนมาก ปัญหาใหญ่ที่พบและนับว่ามีผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อมคือ การปล่อยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมลงสู่สิ่งแวดล้อม น้ำเสียที่ปล่อยออกมาประกอบด้วย สี ค่าบีโอดี (BOD) ค่าซีโอดี (COD) กรด-ด่าง สารแขวนลอย ความร้อน

และอื่น ๆ ซึ่งมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ทำให้เกิดการทำลายทัศนียภาพและเป็นที่น่ารังเกียจ มลสารส่วนใหญ่ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของโรงงานนั้นมาจากการย้อมสี (dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (finishing) โดยส่วนมากแล้วมลสารเหล่านี้และสีบางประเภทสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีทั่ว ๆ ไป แต่มีสีบางประเภทที่ไม่สามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการดังกล่าว ซึ่งสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมถูกจำแนก

เป็นประจุบวก (cationic), ประจุลบ (anionic) หรือไม่มีประจุ (nonionic) ขึ้นอยู่กับประจุของอนุภาคที่ละลายในสารละลายน้ำ ในงานวิจัยนี้สนใจสีย้อมประจุบวก เนื่องจากเป็นมลพิษที่พบได้ทั่วไปในน้ำเสียจากอุตสาหกรรม เช่น สิ่งทอ กระดาษ และเครื่องหนัง ซึ่งมีความเสถียรสูงและสามารถก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ได้ ตัวอย่างสีย้อมประจุบวก ได้แก่ สีย้อมมาลาโคด์ กรีน (malachite green) และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน (brilliant green) เป็นสีย้อมประจุบวกที่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการย้อมผ้า และเป็นสารต้านเชื้อราในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ อย่างไรก็ตาม สารเหล่านี้เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ยากต่อการย่อยสลาย และอาจก่อให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพหากปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้น การกำจัดสีย้อมเหล่านี้ออกจากน้ำเสียจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [1], [2]

สีย้อมประจุบวกมาลาโคด์ กรีน มีสูตรทางเคมี คือ $C_{23}H_{25}ClN_2$ โครงสร้างของสีย้อม แสดงดัง Figure 1 เป็นสีย้อมประจุบวกที่พบได้ทั่วไป โดยมีการใช้อย่างแพร่หลายเป็นสีผสมอาหาร สีย้อมทางจุลกายวิภาค และตัวบ่งชี้ค่าพีเอช (pH) นอกจากนี้ สีย้อมมาลาโคด์ กรีน ยังถูกนำมาใช้รักษาโรคเชื้อราในอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำและการประมง [3], [4] อย่างไรก็ตาม สีย้อมมาลาโคด์ กรีน สามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายของปลาได้ง่าย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ที่บริโภคปลาที่ปนเปื้อนสีย้อมมาลาโคด์ กรีน

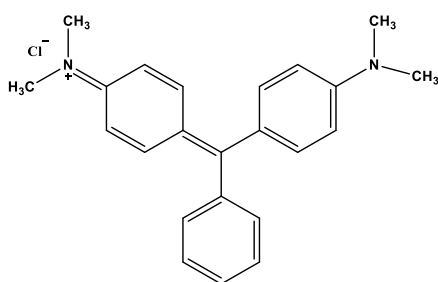


Figure 1 Structure of malachite green

สีย้อมประจุบวกบิลเลียนด์ กรีน มีสูตรทางเคมี คือ $C_{27}H_{34}N_2O_4S$ โครงสร้างของสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน แสดงดัง Figure 2 เป็นสีสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับย้อมวัสดุต่าง ๆ เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ผ้าฝ้าย และกระดาษ สีย้อมบิลเลียนด์ กรีน เป็นสีสังเคราะห์ที่มีสารประกอบยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ ส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ ถ้ามีการปนเปื้อนเข้าสู่ร่างกายอาจกลายเป็นสารก่อ

มะเร็ง (carcinogen) จึงควรมีการบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [5]

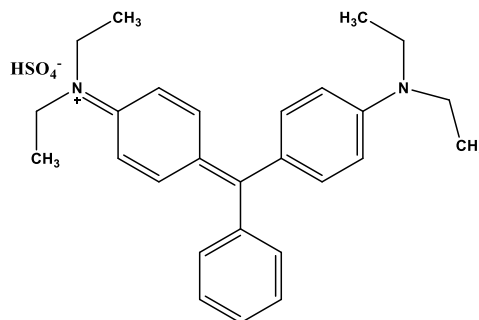


Figure 2 Structure of brilliant green

ปัจจุบันมีการพัฒนาวิธีการกำจัดสีย้อมประจุบวกหลากหลายวิธี เช่น โอโซนเนชัน การใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมย่อยโมเลกุลสีหรือการใช้คลื่นความถี่สูง สลายโมเลกุล ตกตะกอน การย่อยสลายด้วยสารเคมีเฟนตัน (Fenton's reagent) การกรองผ่านเมมเบรน (membrane filtration) การแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น [6]

วิธีการต่าง ๆ ข้างต้นมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมประจุบวกสูง แต่ยังมีข้อจำกัดบางประการเช่น สารเคมีที่ต้องใช้มีราคาสูง จำเป็นต้องควบคุมสภาวะการย่อยสลายอย่างเคร่งครัด และการเกิดสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิ (secondary metabolize) เป็นต้น การดูดซับเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นกระบวนการที่รวดเร็ว มีต้นทุนต่ำ และไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงและนิยมใช้กันมาก คือ ซีโอไลต์ (zeolite) [7]

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญที่อำนวยความสะดวกสบายแก่ชีวิตประจำวันของทุกคน การที่จะได้พลังงานไฟฟ้ามาต้องอาศัยเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ มาเป็นต้นกำลังในการผลิต นับว่าเป็นโชคของประเทศไทย ที่นอกจากจะมีก๊าซธรรมชาติแล้ว ยังมีถ่านหินลิกไนต์ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งเป็นแหล่งทรัพยากรเชื้อเพลิงที่สำคัญของประเทศและใหญ่ที่สุดในภาคพื้นเอเชียอาคเนย์ ทดแทนการส่งเขื่อนน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศได้จำนวนมหาศาล โรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง โดยมีวิธีการเปลี่ยนพลังงานที่สะสมในถ่านหินลิกไนต์เป็นพลังงานความร้อนด้วยกระบวนการทางเคมี เริ่มต้นจากการเผาไหม้หรือสันดาปกับออกซิเจนในอากาศ จากนั้นพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปจะถูกส่งต่อไปให้น้ำ จนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำดังกล่าวจะ

ไปหมุนกังหันไอน้ำ ซึ่งได้ต่อแกนไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่า พลังงานที่สะสมอยู่ในถ่านหินลิกไนต์ได้ถูกแปรสภาพให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ในการผลิตไฟฟ้าจะมีเถ้าลอย (fly ash) จากการเผาไหม้ถ่านหิน ซึ่งจัดเป็นของเสียอุตสาหกรรม รหัสของเสีย 10 01 02 HM ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จากการที่เถ้าลอยถ่านหินจัดเป็นของเสียอันตรายที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และมีปริมาณเกิดขึ้นจำนวนมากทำให้เป็นภาระกับสิ่งแวดล้อมในการนำไปกำจัด โดยเฉพาะในการนำไปฝังกลบ ซึ่งในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีในการนำเถ้าลอยถ่านหินกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น ในงานก่อสร้างเป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้างต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัด เนื่องจากองค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าลอยคือซิลิกา (silica) ทำให้ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ให้มีมูลค่าที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้เถ้าลอยในการก่อสร้างเพียงอย่างเดียว [8]

ซีโอไลต์ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสารพิษ สีย้อมและการบำบัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่ายและมีต้นทุนในการผลิตไม่สูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์ที่มีต้นทุนในการผลิตสูงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ [9]

กลุ่มวิจัยของเราได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าลอยแม่เมาะโดยผ่านขั้นตอนการสกัดซิลิกา สำหรับประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการดูดซับโลหะหนักตะกั่วและแคดเมียม ผลการศึกษาพบว่าซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงมากกว่าร้อยละ 90 [10] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำเอาซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ จากเถ้าลอยแม่เมาะโดยผ่านขั้นตอนการสกัดซิลิกามาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมประจุบวกจากสารละลายน้ำ ซึ่งถือเป็นการนำวัสดุทางธรรมชาติมาเพิ่มมูลค่า [11], [12] โดยจะทำการศึกษารวามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับ ได้แก่ ปริมาณและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherms) จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption thermodynamics) เพื่อนำไปประยุกต์ในการกำจัดสีย้อมประจุบวกที่ปนเปื้อนในสารละลายตามแหล่งน้ำธรรมชาติและอุตสาหกรรม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1. วัสดุ

เถ้าลอยที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ ในการศึกษานี้ได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) ประมาณร้อยละ 25-60 และอลูมินา (Al_2O_3) ประมาณร้อยละ 10-30 เพอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ประมาณร้อยละ 5-25 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ประมาณร้อยละ 1-30 เป็นองค์ประกอบหลัก และมีองค์ประกอบรองคือ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และอัลคาไลน์ในรูปโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และมีความชื้นเป็นองค์ประกอบในเถ้าลอยด้วย sodium aluminate (NaAlO_2) commercial grade บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด

2.2. การเตรียมสารละลายสีย้อมประจุบวก

สีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน เกรดเชิงพาณิชย์ (MERCK ความบริสุทธิ์ $\geq 90\%$) ถูกใช้โดยไม่มีการทำให้บริสุทธิ์ใด ๆ เพิ่มเติม โดยชั่ง 0.1 กรัม เจือจางในน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ (deionized water) 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายสต็อกที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ

กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ ในงานวิจัยนี้ดำเนินการตามวิธีการที่พัฒนาไว้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [10] โดยใช้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นแหล่งวัตถุดิบหลักของซิลิกา (SiO_2 -source) และใช้โซเดียมอะลูมิเนตเป็นแหล่งของอะลูมินา (Al_2O_3 -source) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ชั่งเถ้าลอย 40.0 กรัม จากนั้นเติม 3.0 โมลาร์ ของ NaOH ในอัตราส่วน 1:10 กวนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมารองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และนำไปตกตะกอนด้วย 3.0 โมลาร์ ของ HCl บ่มเป็นเวลา 18 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนที่สมบูรณ์ เมื่อครบเวลานำซิลิกาไปล้างให้เป็นกลาง แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอย

การเตรียม SiO_2 -Source ทำโดยชั่งซิลิกา 5.3 กรัม โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10.1 กรัม และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ 71.7 กรัม ผสมให้เข้ากันในขวดพลาสติก จากนั้นนำไปกวนในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที และปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

การเตรียม Al_2O_3 -Source ทำโดยซิงโครเนียมไฮดรอกไซด์ 0.3 กรัม โซเดียมอะลูมินา 5.3 กรัม และน้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ 76.6 กรัม ลงในขวดพลาสติก จากนั้นกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

เมื่อ SiO_2 -Source เย็นตัวลง นำสารละลาย Al_2O_3 -Source หยดลงไปในสารละลาย SiO_2 -Source อย่างช้า ๆ พร้อมกวนตลอดเวลา หลังจากหยดสารละลาย Al_2O_3 -Source จนหมด ให้กวนต่อไปอีก 10 นาที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกจากตู้อบและปล่อยให้เย็น แล้วนำมาปั่นเหวี่ยงเพื่อล้างซีโอไลต์ เอ จนค่า pH ของสารละลายเป็นกลาง สุดท้ายนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก

ลักษณะของซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้ถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy (ATR FTIR) และ Brunauer, Emmett and Teller (BET) analysis เพื่อยืนยันโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ตามที่ได้นำเสนอไว้ในงานก่อนหน้า [10]

2.4. พารามิเตอร์ที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคด์ กรีน และสีย้อมบิลิเลนนต์ กรีน

ซึ่งปริมาณตัวดูดซับซีโอไลต์ เอ ที่บดละเอียด (4-40 กรัมต่อลิตร) ใส่ปิกเกอร์ ปีเปตสารละลายมาตรฐานสีย้อมมาลาโคด์ กรีน หรือสีย้อมบิลิเลนนต์ กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิตร ลงในปิกเกอร์ ทำการกวนที่เวลาเริ่มต้นและกวนสาร 30 วินาที โดยตั้งทิ้งไว้ 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที เมื่อครบเวลา นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 พร้อมทั้งศึกษาที่อุณหภูมิ 20, 30, 40, และ 50 องศาเซลเซียส ในระหว่างการศึกษาจะหาปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV/Vis (UV-Vis Spectrophotometer, Shimadzu UV-2006) ที่ความยาวคลื่น 617 นาโนเมตร สำหรับสีย้อมมาลาโคด์ กรีน และ 625 นาโนเมตร สำหรับสีย้อมบิลิเลนนต์ กรีน [13] โดยคำนวณค่าการดูดกลืนแสงในการดูดซับสีย้อมที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จะทำการทดลองสามครั้งพร้อมหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อน ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล (q_e) และประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม คำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (1) และ (2)

$$\text{ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (2)$$

C_0 = ความเข้มข้นตัวดูดซับเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e = ความเข้มข้นตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของตัวถูกดูดซับ (ลิตร)

m = ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)

q_e = ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล

2.5. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคด์ กรีน และสีย้อมบิลิเลนนต์ กรีน

ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมมาลาโคด์ กรีน และสีย้อมบิลิเลนนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พฤติกรรมพื้นฐานและกลไกของกระบวนการดูดซับ เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลก็สามารถเข้าใจการกระจายตัวของตัวดูดซับระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวได้ โดยศึกษาแบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม (Freundlich isotherm) และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm)

แบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม [14] มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับหลาย ๆ ชั้น บนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีพลังงานในการดูดซับที่แตกต่างกัน แบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์มคำนวณได้ดังสมการที่ 3

$$\log\left(\frac{x_m}{m}\right) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (3)$$

x_m = จำนวนโมลตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบน m กรัมตัวดูดซับ

K_F = ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ)

$1/n$ = ค่าความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับ

แบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม [14] มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอน เป็นชั้นเดียวรอบ ๆ พื้นผิวตัวดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยแต่ละพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน มีพลังงานในการดูดซับเหมือนกัน และโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวได้ สภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งการดูดซับทั้งหมดถูกครอบครองโดยตัวดูดซับ แบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม คำนวณได้ดังสมการที่ 4

$$\left(\frac{C_e}{x_m/m}\right) = \left(\frac{1}{N_m}\right)C_e + \frac{1}{K_L N_m} \quad (4)$$

x_m/m = ปริมาณของตัวดูดซับ

N_m = ปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

K_L = ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ)

แลงเมียร์ไอโซเทอร์มสามารถแสดงได้ด้วยค่าคงที่การแยก (Separation Factor of Langmuir, R_L) ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับไม่เหมาะสม ($R_L > 1$) เชิงเส้น ($R_L = 1$) เหมาะสม ($0 < R_L < 1$) หรือไม่สามารถผันกลับได้ ($R_L = 0$) ค่าคงที่การแยก คำนวณได้ดังสมการที่ 5

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (5)$$

R_L = ค่าคงที่การแยกของแลงเมียร์

2.6. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลิเลียนต์ กรีน

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของปฏิกิริยาเคมี ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการศึกษาการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลของสารที่เกิดขึ้นระหว่างที่ปฏิกิริยาเคมีดำเนินไป [14]

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first order model) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยซีโอไลต์ เอ โดยจะนำผลที่ได้จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับของซีโอไลต์ เอ โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับกราฟพล็อตระหว่างแกน x คือ เวลา (นาทิจ) และแกน y คือ $\ln(q_e - q_t)$ จากสมการเส้นตรงที่ได้ดังสมการ (6)

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (6)$$

q_t = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_e = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาทิจ)

t = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาทิจ)

ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo-second order model) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถใน

การดูดซับสีย้อมด้วยซีโอไลต์ เอ โดยจะนำผลที่ได้จากการศึกษาเวลาในการดูดซับสีย้อมที่มีผลต่อการดูดซับของซีโอไลต์ เอ โดยใช้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด กราฟพล็อตระหว่างแกน x คือ เวลา (นาทิจ) และแกน y คือ t/q_t จากสมการเส้นตรงที่ได้ดังสมการ (7)

$$\left(\frac{t}{q_t}\right) = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2}\right) + \frac{t}{q_e} \quad (7)$$

k_2 = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (ต่อโมลาร์ต่อนาทิจ)

2.7. การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลิเลียนต์ กรีน

การศึกษาดูผลของกระบวนการดูดซับใด ๆ ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองหรือไม่ ที่อุณหภูมิต่างกัน 4 ค่า (T) คือ 293, 303, 313 และ 323 เคลวิน ปัจจัยทางอุณหพลศาสตร์ เช่น การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (ΔS°) โดยใช้สมการของ Van't Hoff ดังแสดงในสมการ (8) [14]

$$\ln K_C = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (8)$$

K_C คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

ΔH° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy)

ΔS° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (Entropy)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ 8.314 (จูลต่อโมลต่อเคลวิน)

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นล่อยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และซีโอไลต์ เอ

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ของเส้นล่อยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ และซีโอไลต์ เอ ถูกตรวจสอบด้วยเทคนิค XRF, XRD, SEM, และ BET เพื่อยืนยันโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี ได้นำเสนอไว้ในงานก่อนหน้าของกลุ่มวิจัย [10] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของซีโอไลต์ เอ ด้วยเทคนิค XRF พบว่า อัตราส่วนโมลของ Si/Al มีค่าเท่ากับ

1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [15] ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าลอยแม่เมาะมีตำแหน่ง 2 Theta คล้ายกับงานวิจัยที่ผ่านมา [16] จึงสามารถยืนยันได้ว่าเป็นซีโอไลต์ เอ และผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม เกิดผลึกซีโอไลต์ เอ ขึ้นอย่างสมบูรณ์ และมีการกระจายตัวของรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรวมของรูพรุนของซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเท่ากับ 37.10 ตารางเมตรต่อกรัม และ 0.06 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ [10]

3.2. การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน

ผลการศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ แสดงดัง Figure 3

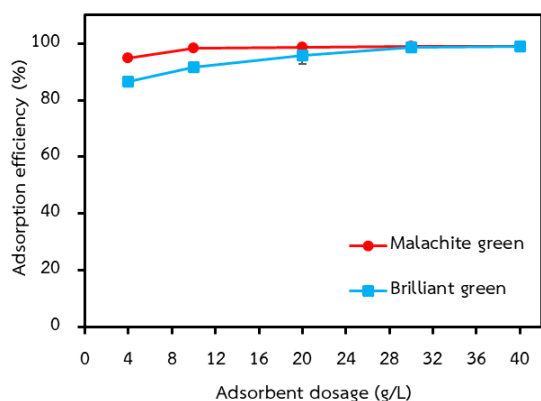


Figure 3 Effect of adsorbent dosage on adsorption of malachite green and brilliant green by zeolite A

การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร เวลาในการดูดซับ 60 นาที ด้วยปริมาณซีโอไลต์ เอ 4.00, 10.00, 20.00, 30.00 และ 40.00 กรัมต่อลิตร แสดงผลการทดลองดัง Figure 3 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณของซีโอไลต์ เอ เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ เอ เป็นการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับ การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ เอ จาก 10.00 ถึง 40.00 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย พบว่า

ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมมาลาไคต์ กรีน ถูกดูดซับจนหมด ดังนั้น เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ เอ มากกว่า 10.00 กรัมต่อลิตร จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ และสำหรับสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน เมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ เอ จาก 20.00 เป็น 30.00 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 95.90 เปอร์เซ็นต์ เป็น 98.80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน เริ่มเข้าสู่สมดุล และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่ใช้ พบว่าต้องใช้น้ำหนักเพิ่มมากขึ้นถึง 1.5 เท่า จาก 20 เป็น 30 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ เพื่อความคุ้มค่าในการนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ดังนั้น ปริมาณของซีโอไลต์ เอ ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน คือ 10.00 และ 20.00 กรัมต่อลิตร หรือ 0.25 และ 0.50 กรัมต่อ 25.00 มิลลิลิตร โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 98.27 และ 95.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ [17]

3.3. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน

ผลการศึกษาเวลาของตัวดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ แสดงดัง Figure 4

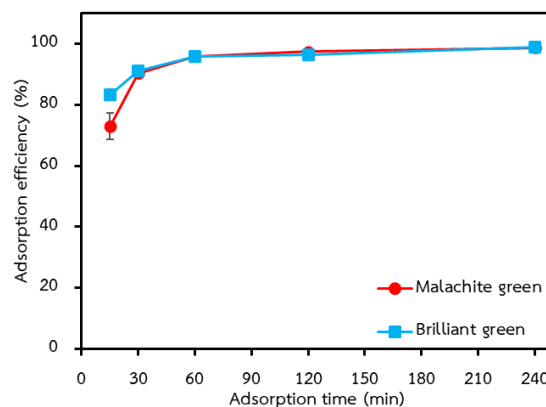


Figure 4 Effect of adsorption time on adsorption of malachite green and brilliant green by zeolite A

การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ด้วยปริมาณซีโอไลต์ เอ ที่เลือกจาก

การศึกษาปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ คือ 0.25 กรัม (10.00 กรัมต่อลิตร) และ 0.50 กรัม (20.00 กรัมต่อลิตร) สำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ตามลำดับ โดยเวลาที่ใช้ในการดูดซับ คือ 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที ได้แสดงผลการทดลองดัง Figure 4 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน เพิ่มขึ้น เมื่อใช้เวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาเพิ่มขึ้นสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวของซีโอไลต์ เอ มากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจาก 60 ถึง 240 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มจาก 96.00 ถึง 98.76 เปอร์เซ็นต์ และ 95.91 ถึง 99.01 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเวลาในการดูดซับจาก 60 ถึง 120 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ที่เหมาะสมสำหรับซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากถั่วลอยแม่เกาะ คือ 60 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 96.00 และ 95.91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เนื่องจากเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับทำให้ประสิทธิภาพดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย [18]

3.4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ

ในการศึกษาการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ไอโซเทอร์มการดูดซับที่ใช้ศึกษามี 2 ไอโซเทอร์ม คือ ฟรอยลิชไอโซเทอร์ม และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองว่า

สอดคล้องกับฟรอยลิชไอโซเทอร์ม หรือแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า correlation coefficient (R^2) ของฟรอยลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ พบว่าสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ดังแสดงใน Table 1

จากการศึกษาฟรอยลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ พบว่า ฟรอยลิช ไอโซเทอร์มให้ค่าความจุในการดูดซับ (K_F) มีค่าเป็น 533.45 และ 60.55 ค่าความแข็งแรงในการดูดซับ ($1/n$) มีค่าเป็น 0.36 และ 0.75 ผลจากการศึกษาแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมีค่าความจุในการดูดซับ (K_L) มีค่าเป็น 0.25 และ 0.00001 จำนวนสูงสุดของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของซีโอไลต์ เอ ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (N_m) มีค่าเป็น 2000 และ 1428.57 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า correlation coefficient (R^2) ของฟรอยลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่าฟรอยลิชไอโซเทอร์มมีค่า R^2 คือ 0.95 และ 0.99 แลงเมียร์ไอโซเทอร์มมีค่า R^2 คือ 0.99 และ 1.00 ซึ่งค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงนำค่าคงที่ของแลงเมียร์ หรือที่เรียกว่า ค่าคงที่การแยก (separation factor of Langmuir, R_L) มาช่วยในการอธิบาย โดยค่า R_L มีค่า 0.01 และ 0.99 ซึ่ง $0 < R_L < 1$ เป็นการดูดซับที่เหมาะสม (favorable adsorption) แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมมาลาโคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนด์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ สอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม กระบวนการดูดซับเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) [7]

Table 1 Adsorption isotherm parameters

Malachite green				
Freundlich isotherm	R^2	$1/n$	K_F	
$y=0.3649x+2.7271$	0.95	0.36	533.45	
Langmuir isotherm	R^2	N_m	K_L	R_L
$y=0.0005x-0.002$	0.99	2000	0.25	0.01
Brilliant green				
Freundlich isotherm	R^2	$1/n$	K_F	
$y=0.7487x+1.7821$	0.99	0.75	60.55	
Langmuir isotherm	R^2	N_m	K_L	R_L
$y=0.0007x+0.0213$	1.00	1428.57	0.00001	0.99

3.5. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสารละลายสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน ดังแสดงใน Table 2

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน จากสารละลายด้วยซีโอไลต์ เอ ใน Table 2 พบว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือนได้สมการเส้นตรง $y = -0.0325x + 8.1065$ และ $y = 0.0083x + 3.2488$ มีค่า $R^2 = 0.96$ และ 0.86 และค่า $k_1 = 0.03$ และ 2.12×10^{-5} ตามลำดับ ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนได้สมการเส้นตรง $y = 0.00008x + 0.000001$ และ $y = 0.1921x +$

0.5902 มีค่า $R^2 = 1$ และค่า $k_2 = 0.01$ และ 0.06 ตามลำดับ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ สอดคล้องกับสมการอันดับสองเสมือน [7]

3.6. การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ

อุณหภูมิของการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบิลเลียนต์ กรีน ต่อการดูดซับของซีโอไลต์ เอ ดังแสดงใน Table 3

Table 2 Pseudo-first and pseudo-second order kinetic model parameters

Malachite green				
Pseudo first order	R^2	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_1
$y = 0.0325x + 8.1065$	0.96	12.24	3.32	0.03
Pseudo second order	R^2	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_2
$Y = 0.00008x + 0.000001$	1.00	12.24	12.50	0.01
Brilliant green				
Pseudo first order	R^2	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_1
$y = 0.0083x + 3.2488$	0.86	5.15	1.17	2.1×10^{-5}
Pseudo second order	R^2	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	K_2
$y = 0.1921x + 0.5902$	1.00	5.15	5.20	0.06

Table 3 Thermodynamic parameters of malachite green and brilliant green dye

Temperature (K)	ΔG° (kJ/mol)	ΔH° (kJ/mol)	ΔS° (J/molK)
Malachite green			
293	-8.66	75.68	289.70
303	-12.83		
313	-15.24		
323	-17.43		
Brilliant green			
293	-5.83	54.78	206.54
303	-7.50		
313	-10.18		
323	-11.83		

จากการศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน ที่มีผลต่อการดูดซับของ ซีโอไลต์ เอ ค่า ΔH° (enthalpy change) เป็นบวกแสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และเมื่อนำมา หาค่า ΔS° (entropy change) ค่า ΔS° เป็นบวกแสดงให้เห็นว่า กระบวนการดูดซับมีผลทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูก ดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมี ความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้น และจากการคำนวณหา ΔG° (Gibbs free energy change) ที่มีผลต่อการดูดซับพบว่า อุณหภูมิแปรผันตรงกับ ΔG° กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่า ΔG° ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้ง ΔG° มีค่าเป็นลบ แสดงว่า กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเองได้

3.7. การศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมา ใช้ซ้ำ สำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อม บริลเลียนต์ กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ

จากการศึกษาประสิทธิภาพการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ ใหม่สำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาไคต์ กรีน และสีย้อม บริลเลียนต์ กรีน ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาในการดูดซับเลือกตามเงื่อนไขที่ เหมาะสม และก่อนใช้งานในแต่ละครั้งซีโอไลต์ เอ ที่ใช้แล้วถูก นำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสีย้อมที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ เอ จากผล การศึกษาจะเห็นได้ว่าเมื่อนำตัวดูดซับนำกลับมาใช้ใหม่หลาย ครั้งจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลงเพียง เล็กน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ มี ประสิทธิภาพในการดูดซับซ้ำได้สูง 8 ครั้ง ซึ่งมีประสิทธิภาพ การดูดซับมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังใน Figure 5

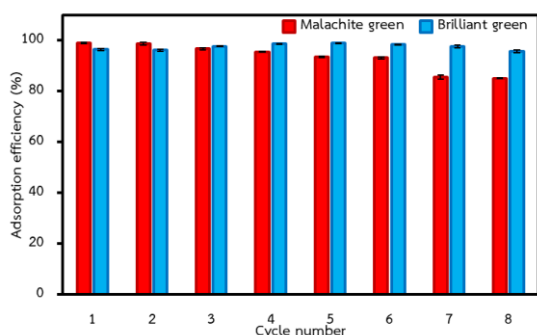


Figure 5 Reusability of zeolite A

4. บทสรุป

การศึกษาการดูดซับสีย้อมประจวบว ได้แก่ สีย้อม มาลาไคต์ กรีน และสีย้อมบริลเลียนต์ กรีน โดยใช้ตัวดูดซับ เป็นซีโอไลต์ เอ จากซิลิกาที่สกัดจากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับของ ซีโอไลต์ เอ จากการศึกษพบว่าปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม คือ 10.00 และ 20.00 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมคือ 60 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับคือ 96.00 และ 95.91 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ ไอโซเทอร์ม การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ ปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน แสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับที่ เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่จำเพาะ และการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของ การดูดซับ พบว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) มีค่าเป็นลบ แสดงว่าการดูดซับนี้เกิดขึ้นได้เอง และ ซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับซ้ำได้สูง 8 ครั้ง ดังนั้น งานวิจัยนี้เป็นการยกระดับการเตรียมซีโอไลต์ เอ ที่ราคาถูกจากวัสดุต้นทุนต่ำ โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถ นำไปประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ และสามารถนำไปใช้งานในการ ดูดซับน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมในอนาคตได้ นำไปสู่วิธีที่มี ประสิทธิภาพในการรีไซเคิลขยะของโรงไฟฟ้าซึ่งสอดคล้องกับ หลักเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนทุน วิจัยสำหรับทำงานวิจัย และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ขอขอบคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) (SCA-CO-2565-17147-TH) สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้สนับสนุน ทุนการศึกษาแก่ นางสาวดรุณี สุขจิต และส่งเสริมให้เกิด ความร่วมมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการสนับสนุน ในด้านห้องปฏิบัติการเคมี เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ สารเคมี และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยี โลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการ พิสูจน์เอกลักษณ์ และอำนวยความสะดวกในการทำปฏิบัติการ และขอขอบคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อำเภอมะเมาะ จังหวัด ลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยในงานวิจัยนี้

6. References

- [1] Lellis, B. and et al. 2019. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**. 3(2): 275-290.
- [2] Sartape, A.S. and et al. 2017. Removal of malachite green dye from aqueous solution with adsorption technique using Limonia acidissima (wood apple) shell as low cost adsorbent. **Arabian Journal of Chemistry**. 10(Suppl. 2): S3229-S3238.
- [3] Olah, J. and Farkas, J. 1978. Effect of temperature, pH, antibiotics, formalin and malachite green on the growth and survival of *Saprolegnia* and *Achlya* parasitic on fish. **Aquaculture**. 13(3): 273-288.
- [4] Srivastava, G.C. and Srivastava, R.C. 1978. A note on the potential applicability of malachite green oxalate in combating fish-mycoses. **Mycopathologia**. 64(3): 169-171.
- [5] Muinde, V.M. and et al. 2020. Adsorption of malachite green dye from aqueous solutions using mesoporous chitosan-zinc oxide composite material. **Environmental Chemistry and Ecotoxicology**. 2: 115-125.
- [6] Katheresan, V., Kansedo, J. and Lau, S.Y. 2018. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. 6(4): 4676-4697.
- [7] Abdelrahman, E.A. 2018. Synthesis of zeolite nanostructures from waste aluminum cans for efficient removal of malachite green dye from aqueous media. **Journal of Molecular Liquids**. 253: 72-82.
- [8] Ngamcharussrivichai, C. and et al. 2008. Adsorptive removal of thiophene and benzothiophene over zeolites from Mae Moh coal fly ash. **Fuel**. 87(10-11): 2347-2351.
- [9] Fan, Y. and et al. 2023. Synthesis of zeolite A from fly ash and its application in the slow release of urea. **Waste Management**. 158: 47-55.
- [10] Sukchit, D. and et al. 2025. Synthesis and characterization of zeolite A from industrial fly ash as a green, cost-effective, Cd²⁺ and Pb²⁺ adsorbent for wastewater applications. **ACS Omega**. 10: 5981-5992.
- [11] Lv, Y. and et al. 2022. Adsorption behavior and mechanism of mixed heavy metal ions by zeolite adsorbent prepared from lithium leach residue. **Microporous and Mesoporous Materials**. 329: 111553.
- [12] He, X. and et al. 2020. Coal fly ash derived zeolite for highly efficient removal of Ni²⁺ in waste water. **Powder Technology**. 367: 40-46.
- [13] Haroon, M. and et al. 2021. Efficient adsorption of malachite green from water by activated carbon of date trunk fiber. **Journal of Applied and Emerging Sciences**. 11(1): 57-62.
- [14] Diehl, M. and et al. 2023. Cassava bagasse as an alternative biosorbent to uptake methylene blue environmental pollutant from water. **Environmental Science and Pollution Research**. 30: 51920-51931.
- [15] Al-dahri, T., Abdulrazak, A.A. and Rohani, S. 2020. Preparation and characterization of Linde-type A zeolite (LTA) from coal fly ash by microwave-assisted synthesis method: Its application as adsorbent for removal of anionic dyes. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**. 42(7): 2064-2077.
- [16] Liu, Z. and et al. 2019. One-step high efficiency crystallization of zeolite A from ultra-fine circulating fluidized bed fly ash by hydrothermal synthesis method. **Fuel**. 257: 116043.
- [17] Mittal, A. 2006. Adsorption kinetics of removal of a toxic dye, Malachite Green, from wastewater by using hen feathers. **Journal of Hazardous Materials**. 133(1-3): 196-202.

- [18] Suhaimi, A. and et al. 2025. Design of composite chitosan/algae/zeolite by freeze- or air-drying: A comparative adsorbent analysis for optimized removal of brilliant green dye. **International Journal of Biological Macromolecules**. 288: 138650.