

## การกำจัดสีย้อมบริลเลียนต์กรีนจากสารละลายด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

### Removal of Brilliant Green Dye from Aqueous Solution onto Fly Ash Based Geopolymer

มาลี ประจวบสุข<sup>1\*</sup> ดรุณี สุขชิต<sup>1</sup> สายสมร ล้าลอง<sup>1</sup> ปาจารย์ ถาวรนิติ<sup>2</sup> และ พรพรรณ พังโพธิ์<sup>1</sup>

Malee Prajuabsuk<sup>1\*</sup> Darunee Sukchit<sup>1</sup> Saisamorn Lumlong<sup>1</sup> Parjaree Thavorniti<sup>2</sup> and Pornpan Pungpo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190 ประเทศไทย

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120 ประเทศไทย

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani 34190, Thailand

<sup>2</sup>National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani 12120, Thailand

\*E-mail: malee.p@ubu.ac.th

Received: May 18, 2024

Revised: Sep 08, 2024

Accepted: Sep 11, 2024

#### บทคัดย่อ

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุอนินทรีย์พรุนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมในการบำบัดน้ำเสียได้ เกิดขึ้นจากการละลายของอะลูมิโนซิลิเกตเมื่อมีการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสเข้มข้นสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ และพิสูจน์เอกลักษณ์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และเพื่อทดสอบการใช้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ในการดูดซับสีย้อมบริลเลียนต์กรีนจากสารละลายในน้ำ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของจีโอพอลิเมอร์ใช้เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรเมทรี (FTIR) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ปริมาณที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยคือ 2 กรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ เท่ากับ 15 นาที โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ 97.35 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมบริลเลียนต์กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบริลเลียนต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน นอกจากนี้การที่เอนทัลปีมีค่าเป็นบวก และพลังงานอิสระกิบส์มีค่าเป็นลบชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และกระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ ตามลำดับ ผลที่ได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุต้นหุนที่มีความเป็นไปได้ในการใช้งานสำหรับการบำบัดน้ำและการฟื้นฟูสารมลพิษจากสีย้อมที่เป็นอันตราย

**คำสำคัญ:** จีโอพอลิเมอร์ เถ้าลอย ตัวดูดซับ สีย้อมบริลเลียนต์กรีน

#### Abstract

A geopolymer is an eco-friendly porous inorganic material that can be used as dye adsorbents in wastewater treatment. It is formed upon dissolution of aluminosilicate in the presence of a high basic activating solution. This research aimed to synthesize and characterize fly ash based geopolymer and to examine the use of the synthesized geopolymer to adsorb brilliant green dye from aqueous solution. The geopolymer was characterized by X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR). The results demonstrated that the suitable dosage of fly ash based geopolymer was 2 g/L, the contact time was 15 minutes with the adsorption efficiency of 97.35 percent for the initial brilliant green dye concentration of 100 ppm. The isotherm of brilliant green dye adsorption by fly ash based geopolymer was consistent with the Langmuir isotherm. The kinetic adsorption corresponded well to the

pseudo- second order model. Furthermore, the positive enthalpy value and the negative Gibbs's free energy indicated that the adsorption process was an endothermic and spontaneous reaction, respectively. The results from this study demonstrated that the geopolymer material synthesized from low-cost materials had potential applications for water treatment and remediation of hazardous dye based pollutants.

**Keywords:** Geopolymer, Fly ash, Adsorbent, Brilliant green dye

## 1. บทนำ

มลพิษทางน้ำเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม มักมีการเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำเสีย ทำให้แหล่งน้ำสะอาดมีการปนเปื้อน และกลายเป็นปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสียไปในที่สุด น้ำเสียจากสีย้อมถือเป็นปัญหาสำคัญในน้ำเสียทางอุตสาหกรรม โดยพบได้ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมสิ่งทอ กระดาษ โรงพิมพ์ และโรงย้อม พลาสติก เครื่องสำอาง อาหาร เป็นต้น [1] ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้สีย้อมสังเคราะห์ เนื่องจากมีราคาถูก มีความเสถียร และยังให้สเปกตรัมของสีที่สดใส และโทนสีที่กว้างกว่าสีย้อมธรรมชาติ สีย้อมสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ และส่งผลให้การลอดผ่านของแสงในแหล่งน้ำลดลง กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำจืดทำให้สภาพของแหล่งน้ำไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ เกิดปัญหาทางผิวหนัง เช่น ภูมิแพ้ การระคายเคืองและอาการแพ้ทางผิวหนัง รวมทั้งเป็นสารก่อมะเร็ง และนำไปสู่ปัญหาการกลายพันธุ์ [1] สีย้อมบริลเลียนต์กรีน (Brilliant green) เป็นสีย้อมประจุบวกพื้นฐาน มีสูตรโมเลกุลเป็น  $C_{27}H_{33}N_2O_4S$  และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 482.64 กรัมต่อโมล ใช้กันอย่างแพร่หลายในการย้อมสิ่งทอและการพิมพ์กระดาษ ในมนุษย์สีย้อมบริลเลียนต์กรีนทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหาร คลื่นไส้ อาเจียน และท้องเสีย ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ส่งผลให้มีอาการไอและหายใจลำบาก การสัมผัสทางผิวหนังทำให้เกิดอาการระคายเคือง มีรอยแดง และปวด [2]

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายสำหรับการกำจัดสีย้อม เช่น การกรองด้วยเมมเบรน การแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป [3] การดูดซับบนพื้นผิวแข็งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการบำบัดสีย้อมจากน้ำเสียอุตสาหกรรม เนื่องจากราคาไม่แพง ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้เวลาน้อย ไม่ซับซ้อน มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง และยังสามารถกำจัดมลพิษอินทรีย์ที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำได้ด้วย [4] ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) เป็นตัวดูดซับที่

ถูกใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ มีโครงสร้างพรุนขนาดเล็กและความสามารถในการดูดซับสูง แต่เป็นต้นทุนที่สูงสำหรับการใช้งานในทางอุตสาหกรรม [5] ดังนั้นตัวดูดซับที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ วัสดุเหลือใช้ หรือวัสดุที่เป็นของเสียที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงเป็นตัวดูดซับที่น่าสนใจ [6], [7]

โรงงานไฟฟ้าแม่เมาะ เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนที่มีการใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะเป็นเชื้อเพลิง การเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์จะได้เถ้าลิกไนต์ออกมาประมาณวันละ 10,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะเป็นเถ้าลอยประมาณ 6,000 ตัน เถ้าลอยที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากถือเป็นขยะอันตรายที่มักส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ เถ้าลอยลิกไนต์มีคุณสมบัติเป็นสารพอซโซลาน (Pozzolan) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้นำเถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะไปเป็นวัสดุถมสำหรับงานก่อสร้าง และงานซ่อมแซมต่าง ๆ แทนวัสดุงานดินหลายประเภท เช่น งานก่อสร้างฐานราก งานซ่อมแซมฐานรากสถานีไฟฟ้าแรงสูงแม่เมาะ งานก่อสร้างชั้นพื้นถนน เป็นต้น [8] ปัจจุบันเถ้าลอยได้ถูกนำมาใช้เป็นสารผสมในคอนกรีตผสมเสร็จสำหรับงานก่อสร้าง และเป็นวัตถุดิบเสริมปูนซีเมนต์ในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น กระเบื้องมุงหลังคา เสาเข็ม ท่อ พื้นสำเร็จรูป นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมหลักในการก่อสร้างเขื่อน คอนกรีตบดอัด [9], [10]

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่มีองค์ประกอบหลักเป็น  $SiO_2$  และ  $Al_2O_3$  เกิดขึ้นจากการละลายของอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เมื่อมีการกระตุ้นหรือทำให้แตกตัวด้วยสารละลายเบสเข้มข้น เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้าง 3 มิติ [11] จีโอพอลิเมอร์จัดว่าเป็นวัสดุอสัณฐาน มีความแข็งแรงและรับกำลังอัดได้ ทำให้มีสมบัติเทียบเท่าปูนซีเมนต์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานคอนกรีต ทำอิฐทนไฟ วัสดุตกแต่งเพื่อความสวยงาม เป็นต้น [12] มีนักวิจัยหลายกลุ่มได้นำเอาเถ้าลอยมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อเพิ่มมูลค่า Jha and Budhamagar [13] ศึกษาการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยถ่านหินและใช้ NaOH และ  $Na_2SiO_3$  เป็นตัวกระตุ้น

พบว่าสภาวะที่ให้ค่าแรงกอดัดที่สูงที่สุด คือ 6M NaOH อัตราส่วนของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ต่อแก้วลอยเท่ากับ 1.25 และการเพิ่มเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีค่าแรงกอดัดที่สูงขึ้น นอกจากนี้มีนักวิจัยนำจีโอพอลิเมอร์จากวัสดุเหลือทิ้ง เช่น แก้วฉนวนหิน แก้วกลบ และแก้วชานอ้อย หรือจีโอพอลิเมอร์ที่มีการปรับปรุงผิวหน้า (Surface modification) มาเป็นตัวดูดซับ [14]-[16] เนื่องจากเป็นแก้วที่มีซิลิกาหรืออลูมินาสูง เหมาะสำหรับการเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ในองค์ประกอบของจีโอพอลิเมอร์ที่จะทำให้ได้วัสดุที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาเป็นตัวดูดซับในการบำบัดสีย้อมบิลิเลียดกรีน โดยศึกษาปริมาณตัวดูดซับและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ รวมถึงศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ และอุณหพลศาสตร์การดูดซับ เพื่อจะได้นำไปเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับแก้วลอย เป็นการช่วยลดปริมาณแก้วลอยอันเป็นขยะจากโรงไฟฟ้า และใช้ในการบำบัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในสารละลาย

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1. การเตรียมแก้วลอยและสารละลาย

#### 2.1.1. การเตรียมแก้วลอย

นำแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใส่ในถ้วยกระเบื้อง นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นบดและร่อนด้วยตะแกรง 250 mesh เพื่อให้แก้วลอยมีความละเอียดและพร้อมใช้งาน เก็บไว้ในภาชนะที่แห้งและปิดสนิทเพื่อใช้ทำการทดลองต่อไป

#### 2.1.2. การเตรียมสารละลายสต็อก

การเตรียมสารละลายสต็อก (Stock solution) ของสีย้อมบิลิเลียดกรีน ทำโดยนำสีย้อมบิลิเลียดกรีนเกรดเชิงพาณิชย์ (MERCK ความบริสุทธิ์  $\geq 90\%$ ) มาใช้โดยไม่มีการทำให้บริสุทธิ์ใด ๆ เพิ่มเติม โดยชั่ง 1 กรัม เติมน้ำกลั่น 1 ลิตร เพื่อให้ได้สารละลายสต็อกที่มีความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 2.1.3. การเตรียมสารละลายน้ำแก้ว

การเตรียมสารละลายน้ำแก้ว (Water glass solution, NaOH :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  อัตราส่วน 2 : 3) ทำโดยนำ

สารละลาย 10 โมลาร์ NaOH 4 มิลลิลิตร ผสมกับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  6 มิลลิลิตร และนำไปกวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

### 2.2. การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

ชั่งแก้วลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่อบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จำนวน 10 กรัม ผสมกับสารละลายน้ำแก้ว 10 มิลลิลิตร กวนผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมแล้วเทใส่แม่พิมพ์สี่เหลี่ยมขนาดเล็ก คลุมแม่พิมพ์ด้วยฟิล์มใส บ่มจีโอพอลิเมอร์โดยนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บไว้ในภาชนะที่แห้งและปิดสนิทเพื่อใช้ทำการทดลองต่อไป

### 2.3. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแก้วลอยและจีโอพอลิเมอร์

นำแก้วลอยและจีโอพอลิเมอร์มาพิสูจน์เอกลักษณ์ดังนี้ วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของสาร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) (Rigaku, ZSX PrimusII) วิเคราะห์เฟสและโครงสร้างผลึกของตัวอย่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD) (PANalytical X'Pert Pro X-ray) รังสี Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) ที่ 40 kV และ 30 mA วิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวและสัณฐานวิทยาของตัวอย่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (Shimadzu SSX-550) และ วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่องเอทีอาร์ฟูเรียร์ทรานซฟอร์มันอินฟราเรด สเปกโตรสโคปี (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy, ATR-FTIR) (HYPERION 3000) สเปกตรัมอยู่ในระดับ  $4000\text{-}450 \text{ cm}^{-1}$

### 2.4. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับและพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของจีโอพอลิเมอร์ในการดูดซับสีย้อมบิลิเลียดกรีน

ชั่งตัวดูดซับจีโอพอลิเมอร์ที่บดละเอียดใส่ปิเกอร์ในการศึกษานี้ใช้ปริมาณตัวดูดซับจีโอพอลิเมอร์ เท่ากับ 0.01, 0.025, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50 กรัม จากนั้นเปิดสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลียดกรีน ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิลิตร ใส่ลงในปิเกอร์ ทำการกวนที่เวลาเริ่มต้นและกวนสาร 30 วินาที ทุก ๆ 30 นาที โดยตั้งทิ้งไว้ 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที เมื่อครบเวลา นำมากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ในระหว่างการศึกษานี้ จะหาปริมาณสีย้อมบิลิเลียดกรีนที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วย

เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ UV/Vis (UV-Vis Spectrophotometer, Shimadzu UV-2006) ที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร [3] โดยคำนวณค่าการดูดกลืนแสงในการดูดซับสีย้อมที่ถูกดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จะทำการทดลองสามครั้งพร้อมหาค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อน ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ ) และประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (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)

$V$  = ปริมาตรของตัวดูดซับ (ลิตร)

$m$  = ปริมาณของตัวดูดซับ (กรัม)

$q_e$  = ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับที่สมดุล

## 2.5. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลิเลียนต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลิเลียนต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ พฤติกรรมพื้นฐานและกลไกของกระบวนการดูดซับ เมื่อการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลก็จะสามารถเข้าใจการกระจายตัวของตัวดูดซับระหว่างเฟสของแข็งและของเหลวได้ โดยศึกษาแบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม (Freundlich isotherm) และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm) ที่ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 200, 250, 300, 350, 400, 450 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

แบบจำลองฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม [17] มีสมมติฐานว่า โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับหลาย ๆ ชั้น บนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีพลังงานในการดูดซับที่แตกต่างกัน

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

$x_m$  = จำนวนโมลตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบน  $m$  กรัมตัวดูดซับ

$K_F$  = ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ)

$1/n$  = ไอโซเทอร์มการดูดซับ

แบบจำลองแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm) [17] มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับ

บนพื้นผิวตัวดูดซับในตำแหน่งที่แน่นอน เป็นชั้นเดียวรอบ ๆ พื้นผิวตัวดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยแต่ละพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน มีพลังงานในการดูดซับเหมือน ๆ กัน และโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถเกิดข้ามพื้นผิวได้ สภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งการดูดซับทั้งหมดถูกครอบครองโดยตัวดูดซับ

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

$x_m/m$  = ปริมาณของตัวดูดซับ

$N_m$  = ปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

$K_L$  = ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ)

แลงเมียร์ไอโซเทอร์มสามารถแสดงได้ด้วยค่าคงที่การแยก (Separation factor of Langmuir,  $R_L$ ) ซึ่งบ่งชี้ว่ากระบวนการดูดซับไม่เหมาะสม ( $R_L > 1$ ) กระบวนการดูดซับเชิงเส้น ( $R_L = 1$ ) กระบวนการดูดซับเหมาะสม ( $0 < R_L < 1$ ) หรือกระบวนการดูดซับไม่สามารถผันกลับได้ ( $R_L = 0$ )

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

$R_L$  = ค่าคงที่การแยกของแลงเมียร์

## 2.6. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมบิลิเลียนต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์เคมี เป็นการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของปฏิกิริยาเคมี ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและการศึกษาการเปลี่ยนแปลง ในระดับโมเลกุลของสารที่เกิดขึ้นระหว่างที่ปฏิกิริยาเคมีดำเนินไป โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาผลของอุณหภูมิ โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 293, 303, 313, 323 และ 333 K

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first order model) [17] อธิบายภายใต้สมมติฐานที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ และเป็นการดูดซับทางเคมี ดังสมการ (6)

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

$q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับที่เวลาสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$k_1$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาที)

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

ปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (Pseudo-second order model) อธิบายภายใต้สมมติฐานที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) ดังสมการ (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 (ต่อนาที)

### 2.7. การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมบริเวณลิ้นดกรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับใด ๆ ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และแสดงให้เห็นว่ากระบวนการนั้นเกิดขึ้นเองหรือไม่ ที่อุณหภูมิต่างกัน 5 ค่า ( $T$ ) คือ 293, 303, 313, 323 และ 333 K ปัจจัยทางอุณหพลศาสตร์ เช่น การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (Enthalpy,  $\Delta H^\circ$ ) และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (Entropy,  $\Delta S^\circ$ ) โดยใช้สมการของ Van't Hoff ดังแสดงในสมการ (8) [17]

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

$K_C$  คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

$\Delta H^\circ$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี

$\Delta S^\circ$  คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี

$R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊สมีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$

$T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

## 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 3.1. การพิสูจน์เอกลักษณ์แก้วลอมและจีโอพอลิเมอร์

จากเทคนิค XRF ได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 1 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของแก้วลอมและจีโอพอลิเมอร์ในรูปแบบของออกไซด์ พบว่าแก้วลอมมี  $\text{SiO}_2$  35.6 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ  $\text{CaO}$  19.0 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  18.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบหลักที่จำเป็นของ

การสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ และยังยืนยันการไม่มีโลหะหนักที่เป็นพิษในแก้วลอม นอกจากนี้ ปริมาณ  $\text{CaO}$  ในแก้วลอมที่ค่อนข้างสูง ทำให้สร้างตัวกลางอัลคาไลน์ที่แข็งแกร่งสำหรับจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน [11] ซึ่งในระหว่างการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์อัตราส่วน  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  เพิ่มขึ้นจาก 1.91 เป็น 4.10 ดังนั้นแก้วลอมจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จึงมีองค์ประกอบของธาตุและแร่ธาตุที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์

เมื่อนำแก้วลอมไปสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์พบว่าจะได้  $\text{SiO}_2$  43.5 เปอร์เซ็นต์  $\text{CaO}$  14.60 เปอร์เซ็นต์ และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  10.60 เปอร์เซ็นต์ และนอกจากนี้ยังมีพบธาตุองค์ประกอบอื่นปะปนอยู่เล็กน้อย

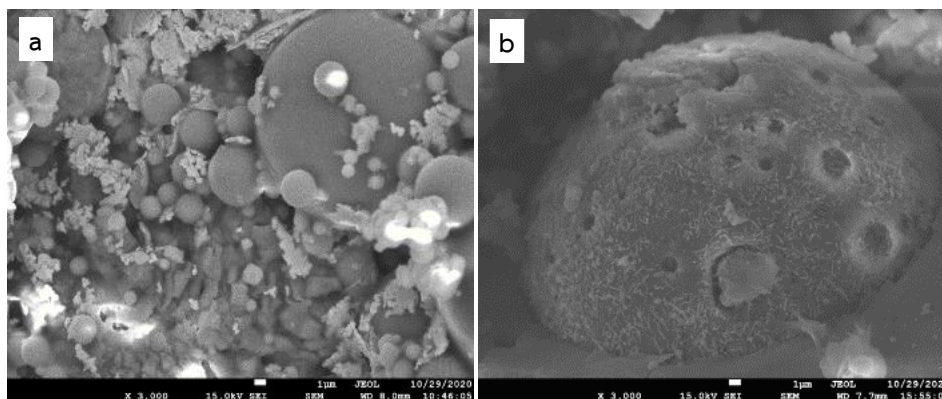
Figure 1 แสดงภาพ SEM ของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอม จาก Figure 1 (a) แก้วลอมมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน มีพื้นผิวที่ขรุขระ มีการกระจายของรูพรุน มีโพรงหลายขนาด และหลังการกระตุ้นหรือทำลายด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ที่ทำให้ทรงกลมอ่อนลงหรือถูกทำลาย [3] จาก Figure 1 (b) พบว่าจีโอพอลิเมอร์มีลักษณะของอนุภาคที่ละเอียด พื้นผิวเรียบขึ้น มีรูพรุนมากขึ้น และมีโพรงขนาดใหญ่ขึ้น

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอม ดัง Figure 2 พบว่า มีรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นพีคกว้างที่ตำแหน่ง  $2\theta = 25-38$  ที่แสดงสมบัติอสัณฐานของจีโอพอลิเมอร์ [18] โดยพบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของควอตซ์ที่  $2\theta = 27$  และ  $30$  องศา ซึ่งความเข้มที่เพิ่มขึ้นของควอตซ์เกิดจากการมี  $\text{SiO}_2$  ขึ้นในระบบ ผลที่ได้บ่งชี้ว่าหลังการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการก่อตัวของเฟสอสัณฐาน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ได้

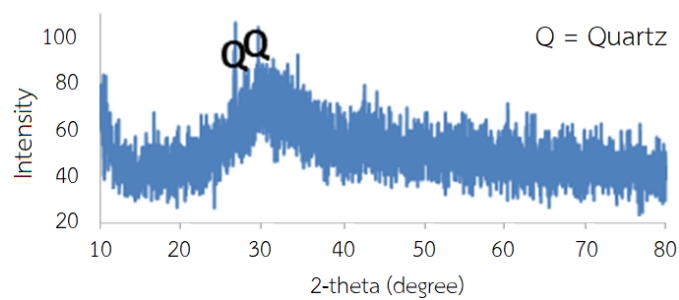
จากเทคนิค FT-IR ของจีโอพอลิเมอร์จากแก้วลอม ได้ผลการทดลอง ดัง Figure 3 พบพีคกว้างในช่วง  $3500 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ O-H stretching และตำแหน่ง  $2900 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ  $-\text{CH}_2$  stretching ของอิมินซิลิเกตที่ยังคงมีอยู่ ส่วนที่ตำแหน่ง  $1600$  และ  $1090 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ Si-O stretching และที่ตำแหน่ง  $770 \text{ cm}^{-1}$  แสดงการสั่นของ  $\text{SiO}_2$  stretching [18]

**Table 1** Chemical composition of fly ash and geopolymer (wt%)

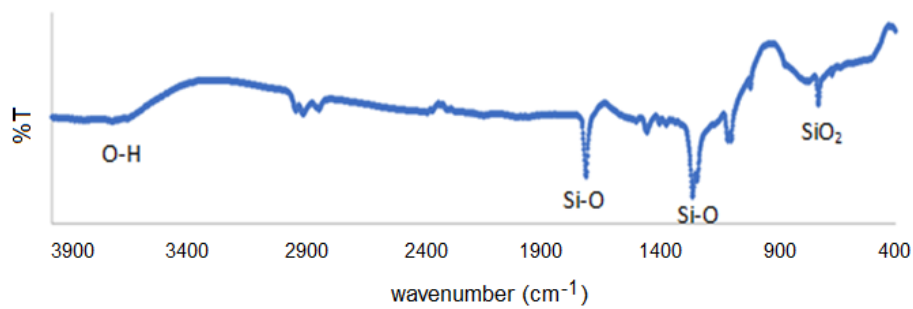
Components	Fly ash (wt%)	Geopolymer (wt%)
SiO <sub>2</sub>	35.60	43.50
CaO	19.00	14.60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.60	10.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.40	11.20
SO <sub>3</sub>	6.61	2.42
Others (K <sub>2</sub> O, ...)	7.76	17.48



**Figure 1** SEM images of (a) fly ash and (b) synthesized geopolymer



**Figure 2** X-ray diffraction patterns of geopolymer



**Figure 3** ATR-FTIR spectra of geopolymer

### 3.2. การศึกษาปริมาณของจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีน

ผลการศึกษาปริมาณของจีโอพอลิเมอร์จากถ้ำลอยที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีน ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการดูดซับ แสดงใน Figure 4 พบว่าการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเติมจีโอพอลิเมอร์ลงไป และเข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว เพราะการเพิ่มปริมาณของจีโอพอลิเมอร์เป็นการเพิ่มปริมาณพื้นที่ผิวในการดูดซับ โดยจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุลบบนพื้นผิวของจีโอพอลิเมอร์ กับสีย้อมบิลิเลนต์กรีนที่มีประจุเป็นบวก อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณจีโอพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่ค่อยสำคัญ เนื่องจากโมเลกุลของตัวดูดซับมีจำกัด ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของจีโอพอลิเมอร์มากกว่า 2 กรัมต่อลิตร จึงไม่มีผลต่อการดูดซับมากนัก เมื่อเพิ่มปริมาณของจีโอพอลิเมอร์มากขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่ ดังนั้นปริมาณของจีโอพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิกรัม คือ 2 กรัมต่อลิตร โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ เท่ากับ 97.26 เปอร์เซ็นต์

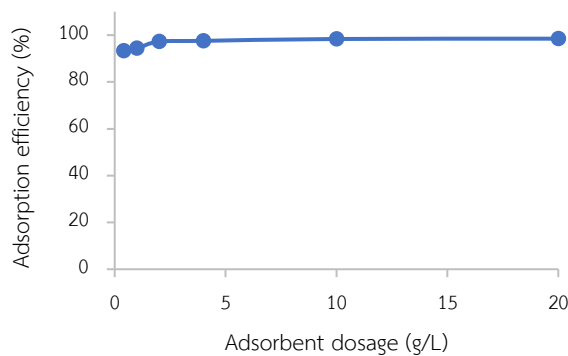


Figure 4 Effect of adsorbent dosage on adsorption efficiency of geopolymer

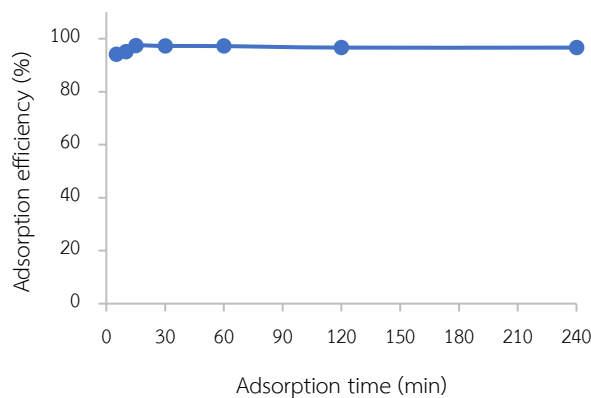


Figure 5 Effect of adsorption time on adsorption efficiency of geopolymer

### 3.3. การศึกษาเวลาที่ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลการศึกษาเวลาที่ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีน ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยจีโอพอลิเมอร์ 2 กรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการดูดซับ แสดงใน Figure 5 พบว่าในช่วงแรก อัตราการดูดซับสีย้อมบิลิเลนต์กรีน จะเร็วเมื่อใช้เวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลามากขึ้น พื้นผิวด้านนอกของจีโอพอลิเมอร์มีตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้จำนวนมาก เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับจาก 5 ถึง 10 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มจาก 94.12 เป็น 95.03 เปอร์เซ็นต์ โมเลกุลของสีย้อมจะค่อย ๆ แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนด้านในของตัวดูดซับ และอัตราการดูดซับค่อย ๆ ลดลง ซึ่งเวลาในการดูดซับจาก 15 ถึง 60 นาที เปอร์เซ็นต์การดูดซับลดลงอย่างไม่ค่อยสำคัญจาก 97.35 เป็น 97.21 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเป็นช่วงที่กระบวนการในการดูดซับเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับจีโอพอลิเมอร์ปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร คือ 15 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับ เท่ากับ 97.35 เปอร์เซ็นต์

### 3.4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 2-5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการศึกษาด้วยฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม โดยเปรียบเทียบสมการเชิงเส้นและค่าคงที่ของไอโซเทอร์ม ได้ผลการทดลองแสดงดัง Table 2

จากฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม ให้ค่าความจุในการดูดซับ ( $K_F$ ) มีค่าเป็น 1090.5929  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}(\text{mgL}^{-1})^{-1/n}$  และไอโซเทอร์มการดูดซับ ( $1/n$ ) มีค่าเป็น 0.4446 แสดงถึงพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมาก

จากแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ค่าความจุในการดูดซับ ( $K_L$ ) ของจีโอพอลิเมอร์ มีค่าเป็น 0.04 (L/g) จำนวนสูงสุดของสีย้อมต่อน้ำหนักของจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ ( $N_m$ ) ของจีโอพอลิเมอร์ มีค่าเป็น 12500

เมื่อเปรียบเทียบค่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) ของฟรอนด์ลิชไอโซเทอร์ม และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม มีค่าเป็น 0.9746 และ 0.9843 ตามลำดับ ซึ่งค่า  $R^2$  มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงนำค่าคงที่การแยกของแลงเมียร์มาช่วยในการพิจารณาตัดสิน โดยค่า  $R_L$  มีค่า 0.107 ซึ่ง  $0 < R_L < 1$  เป็นการดูดซับที่เหมาะสม (Favorable adsorption) แสดงว่าการ

ดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีน สอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม กระบวนการดูดซับเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption)

### 3.5. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์

จากจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยศึกษาปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนของการดูดซับ และหาค่าจลนศาสตร์ของอัตราจากจุดตัดและความชันของกราฟ ได้ค่าคงที่ดังแสดงใน Table 3 พบว่า Correlation coefficient ( $R^2$ ) ของการศึกษาปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเหมือนและอันดับสองเหมือนของการดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์ มีค่าเป็น 0.2525 และ 1 ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีน ด้วยจีโอพอลิเมอร์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่า  $q_{e(\text{exp})}$  และ  $q_{e(\text{cal})}$  พบว่าปฏิกิริยาอันดับสองเหมือนมีค่าใกล้เคียงกัน จึงยืนยันได้ว่า การดูดซับสีย้อมบิลิเลินต์กรีนด้วยจีโอพอลิเมอร์ สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราอันดับสองเหมือน  $k_2$  จะเพิ่มขึ้น เป็นการยืนยันได้ว่าเป็นกระบวนการดูดความร้อน [19]

Table 2 Adsorption isotherm parameters

Freundlich isotherm				
Linear equation	$R^2$	$1/n$	$K_F$	
$y = 0.4446x + 3.1432$	0.9746	0.4446	1090.5929	
Langmuir isotherm				
Linear equation	$R^2$	$N_m$	$K_L$	$R_L$
$y = 0.00008x + 0.002$	0.9843	12500	0.04	0.107

Table 3 Pseudo-first and pseudo-second order kinetic model parameters

Pseudo-first order				
Linear equation	$R^2$	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	$K_1$
$y = -0.0032x + -0.0416$	0.2525	48.56	200.00	0.005
Pseudo-second order				
Linear equation	$R^2$	$q_{e(\text{exp})}$ (mg/g)	$q_{e(\text{cal})}$ (mg/g)	$K_2$
$y = 0.00002x$	0.0728	48.56	50.00	100

### 3.6. การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับสีเขียว Brillant green ด้วยจีโอพอลิเมอร์

ผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับสีเขียว Brillant green ต่อการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์ แสดงดัง Table 4

เมื่อนำผลการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับสีเขียว Brillant green ต่อการดูดซับของจีโอพอลิเมอร์พล็อตกราฟ สมการเส้นตรง ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $1/T$  ดังแสดงใน Figure 6 จากค่าความชันของกราฟ จะได้  $\Delta H^0$  (Enthalpy) มีค่า  $+36.18 \text{ kJ mol}^{-1}$  ค่า  $\Delta H^0$  เป็นบวกแสดงว่ากระบวนการ

ดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และจากจุดตัดแกน จะได้  $\Delta S^0$  (Entropy) มีค่าเป็น  $143.70 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  ค่า  $\Delta S^0$  เป็นบวก แสดงว่าให้ เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีผลทำให้โมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้น และจากการคำนวณหา  $\Delta G^0$  (Gibbs free energy) ที่มีผลต่อการดูดซับพบว่าอุณหภูมิต่ำแปรผันตรงกับ  $\Delta G^0$  กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่า  $\Delta G^0$  ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย อีกทั้ง  $\Delta G^0$  มีค่าเป็นลบ แสดงว่ากระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเองได้

Table 4 Thermodynamic parameters for adsorption of brilliant green on geopolymer

Temperature (K)	$\ln K_c$	$\Delta G^0$ (kJ mol <sup>-1</sup> )
293	2.51	-6.11
303	2.75	-6.93
313	3.51	-9.14
323	3.76	-10.11
333	4.23	-11.72

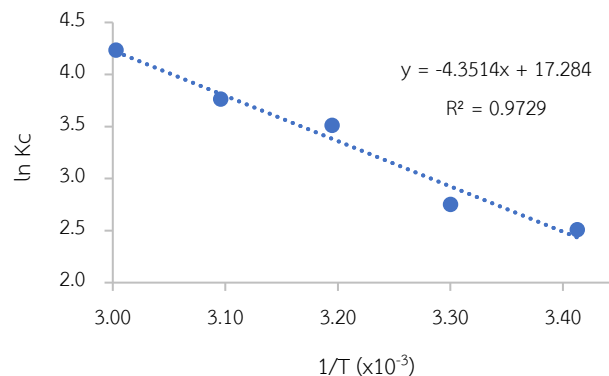


Figure 6 Thermodynamic parameters for adsorption of brilliant green on geopolymer

### 4. บทสรุป

ผลการศึกษาการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ในการดูดซับสีเขียว Brillant green พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยมีทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่จำเป็นของการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ และมี  $\text{CaO}$  เป็นตัวกลางอัลคาไลน์สำหรับจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ดังนั้นเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจึงมีองค์ประกอบของธาตุและแร่ธาตุที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ การดูดซับสีเขียว Brillant green ของจีโอ

พอลิเมอร์มีประสิทธิภาพการดูดซับ 97.35 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสีเขียว Brillant green คือ 2 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีเขียว Brillant green คือ 15 นาที นอกจากนี้ ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการดูดซับ ( $\Delta H^0$ ) มีค่าเป็นบวก แสดงว่าการดูดซับนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ ( $\Delta S^0$ ) มีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับมีผลทำให้โมเลกุลของ

ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่บริเวณรอยต่อของพื้นผิวตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มสูงขึ้น และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^0$ ) มีค่าเป็นลบ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการดูดซับนี้เกิดขึ้นเองได้ ดังนั้นการนำเถ้าลอยที่เป็นวัสดุของเสียจากโรงไฟฟ้ามาสังเคราะห์เป็นจีโอพอลิเมอร์ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าลอย ให้เป็นตัวดูดซับสี้อมอุตสาหกรรมที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีมากและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุตสาหกรรมสิ่งทอได้ โดยใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยน้ำลงสู่สิ่งแวดล้อม

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับทำงานวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการสนับสนุนในด้านห้องปฏิบัติการเคมี เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ สารเคมี และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ และอำนวยความสะดวกในการทำปฏิบัติการ และขอขอบคุณโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยในงานวิจัยนี้

## 6. References

- [1] Al-Tohamy, R. and et al. 2022. A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 231: 113160.
- [2] Mittal, A., Kaur, D. and Mittal, J. 2008. Applicability of waste materials-bottom ash and deoiled soya-as adsorbents for the removal and recovery of a hazardous dye, brilliant green. **Journal of Colloid and Interface Science**. 326(1): 8-17.
- [3] Baidya, K.S. and Kumar, U. 2021. Adsorption of brilliant green dye from aqueous solution onto chemically modified areca nut husk. **South African Journal of Chemical Engineering**. 35: 33-43.
- [4] Ali, I., Asim, M. and Khan, T.A. 2012. Review: Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management**. 113: 170-183.
- [5] Ali, I. and et al. 2019. High-speed and high-capacity removal of methyl orange and malachite green in water using newly developed mesoporous carbon: Kinetic and isotherm studies. **ACS Omega**. 4: 19293-19306.
- [6] Mansour, R.A. and et al. 2020. Brilliant green dye biosorption using activated carbon derived from guava tree wood. **International Journal of Chemical Engineering**. 2020: 8053828.
- [7] Mansour, R., Simeda, M.G. and Zaatout, A.A. 2021. Removal of brilliant green dye from synthetic wastewater under batch mode using chemically activated date pit carbon. **Royal Society of Chemistry Advances**. 11(14): 7851-7861.
- [8] Tangtermsirikul, S. 2005. Development of fly ash usage in Thailand. In: **Proceedings of the International Workshop on Project Management**, 9-11 March 2005. Kochi, Japan.
- [9] Pradhan, P. and et al. 2022. Factors affecting production and properties of self-compacting geopolymer concrete - A review. **Construction and Building Materials**. 344: 128174.
- [10] Singh, N.B. 2018. Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. **Minerals**. 8: 299.
- [11] Mousa, A. 2023. Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice. **Journal of Building Engineering**. 74: 106885.
- [12] Zhao, J. and et al. 2021. Eco-friendly geopolymer materials: A review of performance improvement, potential application and sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**. 307: 127085.

- [13] Jha, V.K. and Budhamagar, G.P. 2012. Synthesis of geopolymer from coal fly ash. **Journal of Nepal Chemical Society**. 30: 24-28.
- [14] Aouan, B. and et al. 2023. Development and optimization of geopolymer adsorbent for water treatment: Application of mixture design approach. **Journal of Environmental Management**. 338: 117853.
- [15] Ettahiri, Y. and et al. 2023. A state-of-the-art review of recent advances in porous geopolymer: Applications in adsorption of inorganic and organic contaminants in water. **Construction and Building Materials**. 395: 132269.
- [16] Maleki, A. and et al. 2020. Adsorbent materials based on a geopolymer paste for dye removal from aqueous solutions. **Arabian Journal of Chemistry**. 13: 3017-3025.
- [17] 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.
- [18] Phoo-ngernkhama, T. and et al. 2014. The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature *Materials and Design*. **Materials and Design**. 55: 58-65.
- [19] Burakov, A.E. and et al. 2018. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 148: 702-712.