



การดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่เตรียมจากเถ้าขานอ้อย

Adsorption of Brilliant Green Dye by using Zeolite A Prepared from Bagasse Ash

ดร.ณัฏฐ์ สุขชิต¹ ปณัดดา ศรีแก้ว¹ จุฑามาศ นาทองหล่อ¹ สายสมร ลำลอง¹ มาลี ประจวบสุข¹ สมจินตนา ทวีพานิชย์¹ ดวงดาว สัตยากุล¹

จิตรลดา เดชาตึงค์¹ พงษ์ศักดิ์ คำศรี² ปาจารย์ ธารวณิต³ บรรเจิด จงสมจิต⁴ และพรพรรณ พิงไธ^{1*}

Darunee Sukchit¹, Panadda Srikaew¹, Juthamat Natongho¹, Saisamorn Lumlong¹, Malee Prajuabsuk¹,

Somjintana Taveepanich¹, Dangdao Sattayakul¹, Jitlada Deshativong¹, Pharit Kamsri², Pajaree Thavorniti³,

Bunjerd Jongsomjit⁴, and Pornpan Pungpo^{1*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม

³ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

⁴ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านคาตาไลซิสและวิศวกรรมปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹Department of Chemistry, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University

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

³National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency (NSTDA)

⁴Center of Excellence on Catalysis and Catalytic Reaction Engineering,

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

*E-mail: pornpan_ubu@yahoo.com

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงจากเถ้าขานอ้อยโรงงานน้ำตาลเป็นซีโอไลต์ เอ เพื่อประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อมบิลเลียน กรีน ซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค XRD, XRF SEM และ ATR-FTIR ได้รับการยืนยันว่าเป็นซีโอไลต์ เอ จากนั้นซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้นำมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับการกำจัดสีย้อมบิลเลียน กรีน จากสารละลายน้ำ ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยระบบการดูดซับแบบกะ ทำการศึกษารวมตัวที่ที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณการดูดซับ และเวลาในการดูดซับ นอกจากนี้ยังศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ ปริมาณของซีโอไลต์ เอ ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน คือ 8 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน คือ 15 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับสำหรับสีย้อมบิลเลียน กรีน เท่ากับร้อยละ 93.08 ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวดูดซับที่น่าสนใจและเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกในการนำมากำจัดสีย้อมบิลเลียน กรีน จากน้ำเสีย

คำสำคัญ : เถ้าขานอ้อย ซีโอไลต์ เอ สีย้อมบิลเลียน กรีน

Abstract

This research aims to synthesize the high-efficiency adsorbent from bagasse ash to zeolite A and to apply for removal brilliant green dye application. The synthesized zeolite A was identified through X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy (SEM), and ATR-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) to confirm that it is zeolite A. The synthetic zeolite A was then used as an adsorbent for the removal of brilliant green dye. A batch system was applied to study the adsorption



efficiency. The optimum parameters were studied, namely, adsorption dosage and contact time for absorption. Additionally, adsorption isotherms for the removal of brilliant green were also evaluated. The optimal amount of zeolite A for the adsorption of brilliant green was 8 g/L. The optimal contact time for the absorption of brilliant green was 15 minutes. The adsorption efficiency for brilliant green was 93.08%. The adsorbent corresponds to the Langmuir isotherm, indicating monolayer adsorption. These results indicated that synthetic zeolite A is a promising and low-cost adsorbent for removing brilliant green dye from wastewater.

Keywords : Bagasse Ash, Zeolite A, Brilliant Green

บทนำ

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมที่มีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากอุตสาหกรรมมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจำนวนมาก ได้แก่ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมด้านพลาสติก อุตสาหกรรมด้านการเกษตร และอุตสาหกรรมทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเหล่านี้เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้สารเคมีประเภทสีย้อม น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้ จึงเป็นปัจจัยสำคัญทำให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ การตกตะกอน และการแยกด้วยเมมเบรน (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัดในการใช้งานที่ต่างกัน และไม่สามารถใช้งานได้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม การดูดซับเป็นอีกหนึ่งวิธีที่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ต้นทุนต่ำ การดำเนินงานไม่ซับซ้อน ใช้เวลาน้อยในการบำบัด และที่สำคัญ คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างแพง จึงมีการนำเอาวัสดุดูดซับจากธรรมชาติหรือวัสดุที่มีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพสูงมาใช้เป็นตัวดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย

การพัฒนาวัสดุดูดซับจากวัสดุธรรมชาติเพื่อนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากสีย้อม ส่งผลให้วัสดุดูดซับมีราคาถูก ถ่านกัมมันต์เป็นของเสียที่ได้จากการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาล ซึ่งมีปริมาณมาก ดังนั้นจึงนำถ่านกัมมันต์มาเพิ่มมูลค่าโดยนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ และจากการศึกษาทางวิจัยอื่น ๆ พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เกิดจากการเผาไหม้มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง เนื่องจากมีรูพรุนสูง และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ (Elboughdiri, 2020) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะนำถ่านกัมมันต์จากโรงงานน้ำตาลที่เกิดจากการเผาไหม้มาสังเคราะห์เป็น ซีโอไลต์ เอ เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับถ่านกัมมันต์ เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบสูง (Mahima and Hrudananda, 2022) ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จึงสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้

ซีโอไลต์ถูกนำมาใช้เป็นเป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย และมีต้นทุนในการผลิตไม่สูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์ที่มีต้นทุนในการผลิตสูงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ (Wang et al., 2009) ดังนั้น จึงมีการนำเอาวัสดุดูดซับธรรมชาติหรือวัสดุที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูงมาใช้เป็นตัวดูดซับในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพและถือเป็นการนำวัสดุทางธรรมชาติมาเพิ่มมูลค่า ในงานวิจัยนี้นำถ่านกัมมันต์จากโรงงานน้ำตาลมาใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ และนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อม โดยจะทำการศึกษากับสีย้อมบิลเลียน กรีน หาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมบิลเลียน กรีน ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมบิลเลียน กรีน



วิธีการวิจัย

1. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาล และพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, SEM, และ ATR-FTIR

1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ

การเตรียม Si-Source ชั่งเถ้าขานอ้อย 5 กรัม ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ มา 6 กรัม บดรวมกันให้ละเอียด เทใส่ถ้วย กระเบื้อง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 90 นาที การเตรียม Al-Source ชั่ง Sodium aluminate 7.39 กรัม และ น้ำ DI 82.76 กรัม (Wenxin et al., 2020) ลงในขวดพลาสติกแล้วนำไปกวนเพื่อให้สารละลายเข้ากัน จากนั้นผสม Si-Source และ Al-Source เมื่อ Si-Source เย็นตัวลงให้นำ Al-Source หยดลงไป ใน Si-Source พร้อมกวนสารละลายให้เข้ากัน เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปเข้าตูบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 14-16 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดให้นำออกจากตูบ แล้วทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงเพื่อล้าง ซีโอไลต์ เอ ให้เป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 14-16 ชั่วโมง ได้ซีโอไลต์ เอ

1.2 พิสูจน์เอกลักษณ์ของเถ้าขานอ้อย และซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย และซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อย พิสูจน์เอกลักษณ์โดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) (Rigaku, ZSX PrimusII) นำตัวอย่างไปวางบน sample holder และใช้ PP ฟิล์ม ปิด ส่วนบน-ล่าง ของ Sample Holder แล้วนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ธาตุแบบเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เฟสและโครงสร้างผลึกของ ตัวอย่างพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ด้วยรังสี Cu K α (λ = 1.5406 Å) ที่ 40 kV และ 30 mA สันฐานวิทยาของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (SSX-550, Shimadzu, Japan) นำตัวอย่างเตรียมบนแท่นติดชิ้นงาน (Specimen Stub) แล้วนำไปเคลือบด้วยแพลทินัม วัดด้วยเครื่อง SEM วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (ATR-FTIR)

2. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ

ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ชั่งซีโอไลต์ เอ มา 0.20 กรัม ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิตร กวนสาร 30 วินาที โดยใช้เวลาดูดซับ 60 นาที เมื่อครบ 60 นาที นำไปกรองด้วยกระดาษเบอร์ 1 นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร และนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นจากสมการเส้นตรง (ทำการทดลอง 3 ซ้ำ)

3. การศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้ซีโอไลต์ เอ ดูดซับสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน

3.1 ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาล ในการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน

ชั่งซีโอไลต์ เอ มา 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.50 และ 2.00 กรัม ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิตร กวนสาร 30 วินาที โดยใช้เวลาในการดูดซับ 60 นาที เมื่อครบ 60 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร และนำไปคำนวณหาค่าความเข้มข้นจากสมการเส้นตรง (ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ)

3.2 การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับของซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงน้ำตาล ในการดูดซับสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน

ชั่งซีโอไลต์ เอ มา 0.20 กรัม ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลิเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิตร กวนสาร 30 วินาที โดยใช้เวลาในการดูดซับ 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำไป



กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร และนำไปคำนวณหาความเข้มข้นจากสมการเส้นตรง (ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ)

3.3 การศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ในการดูดซับของซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ

ซีโอไลต์ เอ มา 0.20 กรัม ปิเปตสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มา 25 มิลลิตร กวนสาร 30 วินาที โดยใช้เวลาในการดูดซับ 15 นาที เมื่อครบเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 624 นาโนเมตร นำไปคำนวณหาความเข้มข้นจากสมการเส้นตรง (ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ)

4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายมาตรฐานสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน

ตอนที่ 1 การศึกษาแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม (Langmuir isotherm)

- นำค่าที่ได้จากการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน มาแทนค่าตัวแปรในสมการของแลงเมียร์

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

โดยที่ C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

X/m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ

N_m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล

K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ) แบบแลงเมียร์

- นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐานโดยให้แกน x คือ C_e แกน y คือ (X_m/m)
- จากสมการเส้นตรงที่ได้ คำนวณค่าคงที่ของ Langmuir Isotherm คือ K_L และ N_m
- เปรียบเทียบค่าคงที่ ที่คำนวณได้กับผลการทดลองว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่

ตอนที่ 2 การศึกษาฟรอนด์ลิชไอโซเทอม (Freundlich isotherm)

- นำค่าที่ได้จากการศึกษาความเข้มข้นของสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับของสีย้อม บิลเลี่ยน กรีน จากสารละลายมาแทนค่าตัวแปรในสมการของฟรอนด์ลิช

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

โดยที่ X_m คือ จำนวนโมลของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบน m กรัมของตัวดูดซับ

m คือ ปริมาณของตัวดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

K_F คือ ค่าคงที่การดูดซับ (ค่าความจุในการดูดซับ) แบบฟรอนด์ลิช

$1/n$ คือ ค่าความแข็งแรงของพันธะในการดูดซับ

- นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟโดยให้แกน x คือ $\log C_e$ แกน y คือ $\log(X_m/m)$
- จากสมการเส้นตรงที่ได้ คำนวณค่าคงที่ของ Freundlich isotherm คือ K_F และ $1/n$
- เปรียบเทียบค่าคงที่ ที่คำนวณได้กับผลการทดลองว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่

ผลการวิจัย

1.การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเถ้าขานอ้อย และซีโอโลต์ เอ

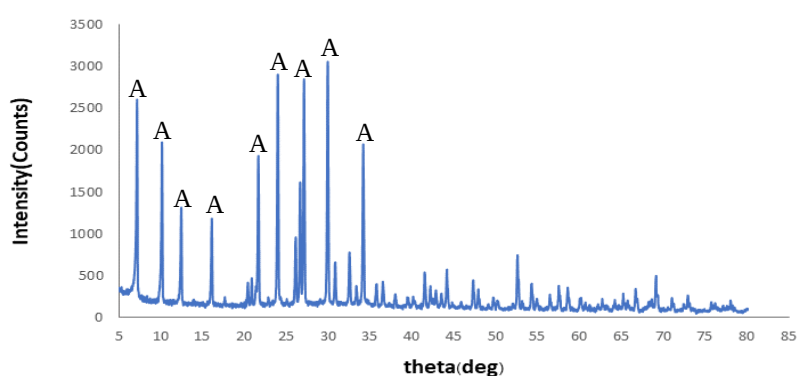
เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของเถ้าขานอ้อย และซีโอโลต์ เอ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วย XRF แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ X-ray fluorescence ของเถ้าขานอ้อย และซีโอโลต์ เอ

องค์ประกอบทางเคมี	เถ้าขานอ้อย (%)	ซีโอโลต์ เอ (%)
SiO ₂	74.90	43.70
Al ₂ O ₃	5.02	35.70
Fe ₂ O ₃	1.85	0.68
Na ₂ O	-	15.00
MgO	2.53	1.33
K ₂ O	5.88	1.00
TiO ₂	0.64	0.22
P ₂ O ₅	2.76	0.07

พบว่าปริมาณ SiO₂ สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 74.90 โดยน้ำหนักรองลงมา คือ Al₂O₃ ร้อยละ 5.02 CaO ร้อยละ 4.20 SO₃ ร้อยละ 1.19 นอกจากนั้นยังพบธาตุองค์ประกอบอื่น ๆ ปะปนเล็กน้อย และจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของซีโอโลต์ เอ พบว่ามีปริมาณ SiO₂ สูงที่สุดคิดเป็นร้อยละ 43.70 โดยน้ำหนักรองลงมา คือ Al₂O₃ ร้อยละ 35.70 Na₂O ร้อยละ 15.00 นอกจากนั้นยังพบธาตุองค์ประกอบอื่น ๆ ปะปนเล็กน้อย อาทิเช่น SO₃, MgO, K₂O, Fe₂O₃ แสดงดังตารางที่ 1 จากองค์ประกอบของ Si : Al พบว่าซีโอโลต์ เอ มีอัตราส่วนของ SiO₂ : Al₂O₃ เท่ากับ 1.22 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เป็นซีโอโลต์ เอ (Lee, Soe and Zhang, 2017) จึงยืนยันได้ว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้เป็นซีโอโลต์ เอ

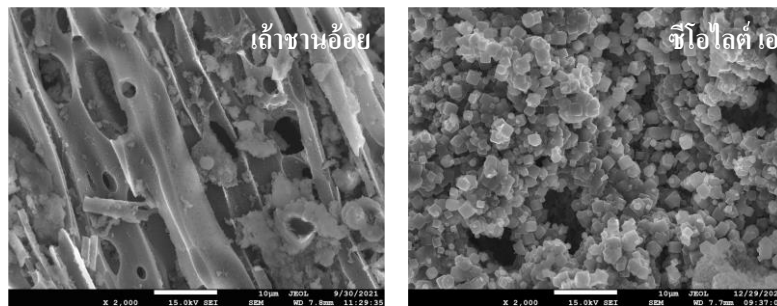
เทคนิค X-ray Powder Diffraction (XRD) จากการศึกษาพบว่าซีโอโลต์ เอ มี สเปกตรัม XRD แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 รูปแสดงการณั้เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอโลต์ เอ

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าโครงสร้างของซีโอโลต์ เอ มีความเป็นผลึก เนื่องจากซีโอโลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยโดยไม่ผ่านการสกัดซิลิกาที่ได้จากเถ้าโรงน้ำตาลสามารถมองเห็นพีคของผลึกได้อย่างชัดเจน พบพีคซีโอโลต์ เอ ที่ตำแหน่ง 2 Theta 7.5, 10.2, 12.5, 16.2, 22, 24, 26.5, 30 และ 35 ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Ahmed et al. (2018) เมื่อเทียบกับซีโอโลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยโดยไม่ผ่านการสกัดซิลิกาจึงสามารถยืนยันได้ว่าเป็นซีโอโลต์ เอ

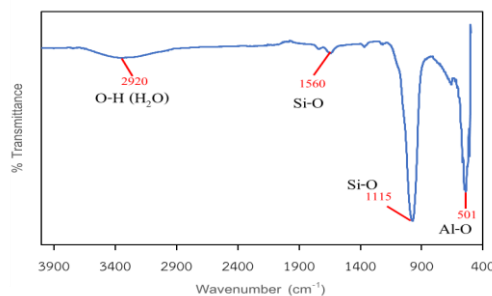
เทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) การศึกษาสัณฐานวิทยาและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของ
 ถ้ำขานอ้อยและซีโอไลต์ เอ ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ภาพ SEM ของถ้ำขานอ้อย และซีโอไลต์ เอ

ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM พบว่าถ้ำขานอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยมีรูปร่างไม่แน่นอนและมีผิวหน้า
 ที่ขรุขระ เมื่อสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ เอ พบว่ามีลักษณะเปลี่ยนแปลงมีรูปร่างแน่นอน เป็นทรงสี่เหลี่ยมที่เห็นได้อย่างชัดเจน
 เกิดผลึกซีโอไลต์ เอ ขึ้นอย่างสมบูรณ์ มีรูพรุนมากขึ้น และมีการกระจายตัวของรูพรุนอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ
 Xinping et al. (2020)

เทคนิค ATR-Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) ผลการศึกษา FT-IR spectra ของซีโอไลต์
 เอ แสดงดังภาพที่ 3 พบพิกัดการสั่นของ O-H stretching ประมาณ 2920 cm^{-1} พิกัดที่ 1560 cm^{-1} เป็นพิกัดของ Si-O
 stretching พิกัดที่ 1115 cm^{-1} เป็นพิกัดของ Si-O bending และพิกัดที่ 501 cm^{-1} เป็นพิกัดของ Al-O bending ซึ่งเป็นพิกัดหลัก
 ของซีโอไลต์ เอ จะเห็นว่าซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากถ้ำขานอ้อยมีพิกัดที่สอดคล้องกับงานวิจัยอ้างอิง (Xiaoyu et al., 2020)



ภาพที่ 3 อินฟราเรดสเปกตรัมของซีโอไลต์ เอ

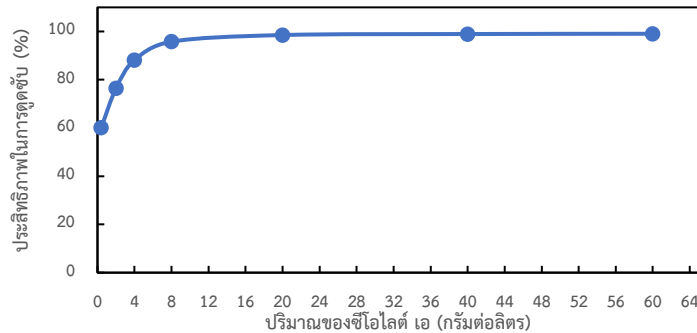
2. การศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากถ้ำขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ ใน
 การดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน

2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากถ้ำขานอ้อยจาก
 โรงงานน้ำตาล

การทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับปริมาณ 8 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น
 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน มีประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 95.82 ± 0.21

2.2 การศึกษาปริมาณการดูดซับที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ ในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลาย

การศึกษาปริมาณของซีโอไลต์ เอ ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน โดยปริมาณซีโอไลต์ เอ ที่ศึกษา คือ 0.4, 2, 4, 8, 20, 40 และ 60 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ที่ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการดูดซับดังภาพที่ 4

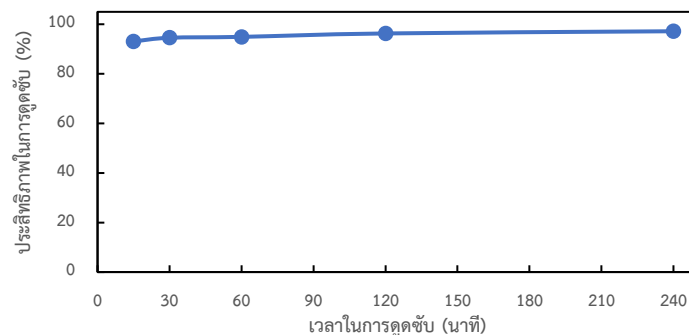


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวดูดซับกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลาย

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ จากภาพที่ 4 พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักตัวดูดซับ เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้นจาก 0.40 เป็น 8.00 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากร้อยละ 60.14 เป็น 95.77 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 8.00 ถึง 60.00 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 95.77 เป็น 99.05 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากโมเลกุลของสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ที่ถูกดูดซับลดน้อยลง ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณของซีโอไลต์ เอ มากกว่า 8 กรัมต่อลิตร จึงไม่มีผลต่อการดูดซับ ดังนั้นปริมาณที่เหมาะสม คือ 8.00 กรัมต่อลิตร หรือ 0.20 กรัม โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 95.77 เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลาย เริ่มเข้าสู่สมดุล

3. การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับของซีโอไลต์ เอ ที่สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ ในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลาย

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ปริมาณ 8 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน ความเข้มข้น 100.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25.00 มิลลิตร เวลาที่ใช้ในการดูดซับคือ 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการดูดซับกับประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบิลเลี่ยน กรีน จากสารละลาย



ผลการศึกษาเวลาที่เหมาะสมของซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากเถ้าโรงน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ ในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน จากสารละลาย โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.20 กรัม ซึ่งผลการทดลองดังภาพที่ 5 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาที่มากขึ้นสีย้อมบิลเลียน กรีน สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวของซีโอไลต์ได้มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลา 15 นาที เป็น 240 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากร้อยละ 93.08 เป็น 97.17 ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจากการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับปริมาณซีโอไลต์ เอ 8 กรัมต่อลิตร คือ 15 นาที มีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 93.08

4. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ สังเคราะห์จากเถ้าขานอ้อยจากเถ้าโรงน้ำตาล จังหวัดอำนาจเจริญ

ในการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ด้วยซีโอไลต์ เอ ไอโซเทอร์มการดูดซับที่ใช้ศึกษามี 2 ไอโซเทอร์ม คือ ฟรอลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับ ฟรอลิชไอโซเทอร์ม หรือแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แต่เมื่อเปรียบเทียบค่า Correlation Coefficient (R^2) ของฟรอลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน พบว่าสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์มดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าคงที่จากสมการการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ของฟรอลิชไอโซเทอร์ม และแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม

ฟรอลิชไอโซเทอร์ม				
สมการเส้นตรง	R ²	1/n	K _F	
0.0757x + 2.7121	0.7698	0.0757	515.347	
แลงเมียร์ไอโซเทอร์ม				
สมการเส้นตรง	R ²	N _m	K _L	R _L
0.0012x + 0.0092	0.9869	833.333	0.1304	0.0240

จากการศึกษาฟรอลิชไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน พบว่า ฟรอลิช ไอโซเทอร์มให้ค่าความจุในการดูดซับ (K_F) มีค่าเป็น 515.347 ค่าความแข็งแรงในการดูดซับ ($1/n$) มีค่าเป็น 0.0757 ผลจากการศึกษาแลงเมียร์ไอโซเทอร์มค่าความจุในการดูดซับ (K_L) มีค่าเป็น 0.1304 จำนวนสูงสุดของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของซีโอไลต์ เอ ที่ใช้เป็นตัวดูดซับ (N_m) มีค่าเป็น 833.33 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบค่า Correlation Coefficient (R^2) ของฟรอลิช ไอโซเทอร์มและแลงเมียร์ไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่า ฟรอลิชไอโซเทอร์มมีค่า R^2 คือ 0.7698 และแลงเมียร์ไอโซเทอร์มมีค่า R^2 คือ 0.9869 ซึ่งค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ยังสรุปไม่ได้ ดังนั้นจึงนำค่าคงที่ของแลงเมียร์ หรือที่เรียกว่า ค่าคงที่การแยก (Separation Factor of Langmuir, R_L) มาช่วยในการอธิบาย โดยค่า R_L มีค่า 0.0240 ซึ่ง $0 < R_L < 1$ เป็นการดูดซับที่เหมาะสม (Favorable Adsorption) นั้นแสดงว่าการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน สอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม กระบวนการดูดซับเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer Adsorption) (Kamal and Upendra, 2021) ความจุในการดูดซับสูงสุดของซีโอไลต์ เอ ในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน คือ 20.20 มิลลิกรัม/กรัม

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน กับงานวิจัยอื่นๆ

เมื่อเปรียบเทียบความจุสูงสุดในการดูดซับงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 3 ตัวดูดซับซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อยที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถแข่งขันกับตัวดูดซับได้หลายชนิด เช่น Areca nut husk, Luffa cylindrical sponge และ Tannin gel การใช้ตัวดูดซับที่แตกต่างกัน พบว่าความจุในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน มีค่าต่ำกว่างานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถใช้ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อยเพื่อดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน กับงานวิจัยอื่นๆ

ตัวดูดซับ	ความจุในการดูดซับสูงสุด (mg/g)	อ้างอิง
Areca nut husk	18.21	(Kamal and Upendra, 2021)
Luffa cylindrical sponge	18.20	(Segun et al., 2014)
Tannin gel	8.55	(Akter et al., 2016)
ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อย	20.20	งานวิจัยนี้

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เอ จากเถ้าขานอ้อยโรงงานน้ำตาลในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับของซีโอไลต์ เอ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 8 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลาในการดูดซับ คือ 60 นาที พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การดูดซับร้อยละ 95.82 ปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน คือ 8 กรัมต่อลิตร เวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน คือ 15 นาที ไอโซเทอร์มสอดคล้องกับแลงเมียร์ไอโซเทอร์ม แสดงว่าการดูดซับนี้เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และจากการเปรียบเทียบความจุสูงสุดในการดูดซับสีย้อมบิลเลียน กรีน งานวิจัยนี้มีความจุในการดูดซับที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการยกระดับการเตรียมซีโอไลต์ เอ ที่ราคาถูกจากวัสดุต้นทุนต่ำ โดยวิธีที่มีประสิทธิภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่สำคัญ และนำไปสู่วิธีที่มีประสิทธิภาพในการรีไซเคิลขยะของโรงงานน้ำตาลซึ่งสอดคล้องกับหลักเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการสนับสนุนในด้านเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยและสร้างนวัตกรรมมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 ขอขอบคุณโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) แก่นางสาวดุริณี สุขจิต ตามสัญญาทุนเลขที่ SCA-CO-2563-12097-TH ที่สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับทำงานวิจัยและทุนในการนำเสนอผลงานและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการพิสูจน์เอกลักษณ์ และอำนวยความสะดวกในการทำปฏิบัติการ และขอขอบคุณโรงงานน้ำตาลมิตรผล จังหวัดอำนาจเจริญ ที่ให้ความอนุเคราะห์เถ้าขานอ้อยในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2560). *เกร็ดความรู้มลพิษทางทะเล*. Pcd. http://pcd.go.th/info_serv/water_wt.html
- Ahmed, S., Sanni, K., Azeez, O., Abdulkareem, A. and Oluwafemi, S. (2018). Production Of 100 Kg/Day of Zeolite a as a Builder for Powdered Detergent from Nigerian Ahoko Kaolin Using Locally Fabricated Mini Zeolite Plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 413, 1-11. <http://doi.10.1088/1757-899x/413/1/012064>.
- Akter, N., Hossain, M.A., Hassan, M.J., Amin, M.K., Elias, M., Rahman, M.M. and Hasnat, M.A. (2016) Amine modified tannin gel for adsorptive removal of Brilliant Green dye. *Journal of Environmental Sciences. Eng.* 4, 1231–1241. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.01.013>.



- Elboughdiri, N. (2020). The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater. *Cogent Engineering*, 7(1), 1782623. <http://doi.10.1080/23311916.2020.1782623>.
- Kamal, S.B. and Upendra, K. (2021). Adsorption of brilliant green dye from aqueous solution onto chemically modified areca nut husk. *South African Journal of Chemical Engineering*, 35, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.11.001>.
- Lee, Y., Soe, J. and Zhang, S. (2017). Synthesis of nanoporous materials via recycling coal fly ash and other solid wastes: a mini review. *Chemical Engineering Journal*, 317, 821–843. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.124>.
- Mahima, K.M. and Hrudananda. J. (2022). Synthesis of nano-crystalline zeolite-A and zeolite-X from Indian coal fly ash, its characterization and performance evaluation for the removal of Cs⁺ and Sr²⁺ from simulated nuclear waste. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127085. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127085>.
- Segun, E.O., Nurudeen, A.O., Owoyomi, O., Olumuyiwa, A.C. and Olubunmi, O.M. (2014). Adsorption of Brilliant Green onto Luffa Cylindrical Sponge: equilibrium, Kinetics, and Thermodynamic Studies. *ISRN Physical Chemistry*, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/743532>.
- Wang, C., Li, J., Sun, X., Wang, L. and Sun, X. (2009). Evaluation of zeolites synthesized from fly ash as potential adsorbents for wastewater containing heavy metals. *Journal of Environmental Sciences*, 21(1), 127-136. [http://doi.10.1016/S1001-0742\(09\)60022-X](http://doi.10.1016/S1001-0742(09)60022-X).
- Wenxin, J., Ning, F., Pengde, Z., Shiyue, Z., Shasha, Z., Liping, L., Honglan, H., Kangning, L., Yonggang, S., Yuanyuan, L. and Yulong, M. (2020). Synthesis of Single-Phase Zeolite A by Coal Gasification Fine Slag from Ningdong and Its Application as a High-Efficiency Adsorbent for Cu²⁺ and Pb²⁺ in Simulated Wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 4, 65. <http://doi.org/10.3390/chemengineering4040065>.
- Xiaoyu, R., Shaojun, L., Ruiyang, Q., Lifeng, X., Pin, H., Hao, S., Weihong, W., Chenghang, Z., Xuecheng, W. and Xiang, G. (2020). Synthesis and characterization of single-phase submicron zeolite Y from coal fly ash and its potential application for acetone adsorption. *Microporous Mesoporous Mater*, 295, 109940. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109940>.
- Xinping, H., Bing, Y., Yang, X., Hui, H., Yongping, G. and Wenkui, Z. (2020). Coal fly ash derived zeolite for highly efficient removal of Ni²⁺ in wastewater. *Powder technology*, 367, 40–46. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.11.037>.