

จลนศาสตร์และรูปแบบการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี บนคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยที่ถูกปรับปรุง
 Kinetic and Isotherms of Adsorption of Rhodamine B on Modified-Bagasse
 Activated Carbon

อาอึเชาะส์ เบ็ญหวาน¹ ฟารีดา หะย็เยะ² และ เมมูน ซัตตาร์^{3*}
 Aeesoh Benhawan¹, Fareeda Hayeeye² and Memoon Sattar^{3*}

¹คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี 94000

³คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา 95000

¹ Faculty of Science Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala 95000, Thailand

² Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani 94000, Thailand

³ Faculty of Sports and Health Science, Thailand National Sports University, Muang, Yala 95000, Thailand

*Corresponding author, e-mail: memoonsattar@gmail.com

(Received: Jan 18, 2021; Revised: Apr 3, 2021; Accepted: Apr 23, 2021)

บทคัดย่อ

สีย้อมเป็นหนึ่งในปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดขึ้นจากการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศใต้น้ำ การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมสามารถกระทำได้หลายวิธีแต่ทั้งนี้การกำจัดสีย้อมโดยวิธีการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนจำนวนมากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์ให้มีรูพรุนสูงโดยการกระตุ้นคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมศึกษาและเปรียบเทียบจลนศาสตร์และรูปแบบการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บนคาร์บอนกัมมันต์ที่ไม่ปรับปรุง (BAC) และ คาร์บอนกัมมันต์ที่ปรับปรุง (BAC-KOH) ผลการศึกษาพบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH สอดคล้องกับสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม รูปแบบการดูดซับเข้ากันได้ดีกับแบบจำลองของแลงเมียร์ ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_m) สำหรับ BAC และ BAC-KOH ที่อุณหภูมิ 30 °C พีเอช 4.0 เท่ากับ 384.62 และ 555.56 mg g^{-1} ตามลำดับ การปรับปรุงคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและยังสามารถเป็นอีกทางเลือกของตัวดูดซับสำหรับการดูดซับสารละลายสีย้อมจากแหล่งน้ำเสีย

คำสำคัญ : คาร์บอนกัมมันต์, การดูดซับ, จลนศาสตร์

Abstract

Dye is one of the pollution caused by the discharge of wastewater into water sources which effect to the aquatic ecosystem. The dye wastewater treatment process could be many methods, but the removal dye by the adsorption process on the high porous activated carbon was the simple and highly effective method. Thus, this research was aimed to improve surface of activated carbon to be highly porous. The modification of bagasse activated carbon (BAC) was performed using potassium hydroxide at optimized conditions. Kinetics and adsorption isotherm of Rhodamine B solution on BAC and BAC-KOH were compared. The results showed that kinetics of adsorption of Rhodamine B solution corresponded with the pseudo-second order reaction equation for BAC and BAC-KOH. The adsorption isotherm was fitted with Langmuir model. The maximum adsorption capacities (q_m) for BAC and BAC-KOH at 30°C and pH 4.0 were 384.62 and 555.56 mg g^{-1} , respectively. Conclusion, modification of bagasse activated carbon could increases adsorption efficiency and could the alternative adsorbent for the removal of dye solution from wastewater.

Keywords: Activated carbon, Adsorption, Kinetic

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอ อาหาร กระดาษ และเครื่องสำอางจำเป็นต้องใช้สีย้อมในกระบวนการผลิต สีย้อมเป็นสารสังเคราะห์ประเภทสารประกอบอโรมาติก มีทั้งชนิดที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ สีย้อมอาจก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำโดยเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจะทำให้สภาพน้ำเปลี่ยนไป อนุภาคสีขัดขวางการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำทำให้ขัดขวางการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำปริมาณก๊าซออกซิเจนในน้ำจึงลดลงสุดท้ายเกิดเป็นน้ำเสียซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำเป็นการรบกวนสมดุลธรรมชาติและทำลายระบบนิเวศในน้ำ สีย้อมโรดามีน บี ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากสีย้อมโรดามีน บี ถูกจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่งซึ่งส่งผลเสียต่อระบบร่างกายทำให้มีผื่นแดงหากได้รับในปริมาณที่มากจนเกินไป ผลผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของสีย้อมโรดามีน บี จะต้องมีความปลอดภัย (Hayeeye, *et al.*, 2017, p. 260; Santhi, *et al.*, 2014, p. 495) ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยน้ำเสียจากสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติจึงจำเป็นอย่างยิ่ง

เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียมีหลายวิธีการเช่นกระบวนการทางเคมี ทางชีววิทยา ทางกายภาพและทางเคมีกายภาพ (Mohammad *et al.*, 2019, pp. 166-174; Yarlagadda *et al.*, 2019, pp. 57-65; Stefanos *et al.*, 2018, pp. 270 - 282) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการทางเคมีกายภาพ (Physical-chemical process) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและได้รับความนิยมโดยเฉพาะกระบวนการดูดซับ (Adsorption process) ที่มีข้อดีคือง่าย ใช้เวลาไม่นาน และมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด (Hayeeye *et al.*, 2017, pp. 259-266; Sattar *et al.*, 2017, pp. 3780-3791) โดยในกระบวนการดูดซับมีการใช้ตัวดูดซับที่แตกต่างกันไป เช่น ซีโอไลต์ (Tharcila, *et al.*, 2013, pp. 179-191), ไคโตซาน (Calderóna, *et al.*, 2018, pp. 6749-6760) และ คาร์บอนกัมมันต์ (Belhachemi & Addoun, 2012, pp.122-129) พบว่าคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวมากทำให้สามารถดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี อีกทั้งคาร์บอนกัมมันต์ยังสามารถเตรียมได้จากวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ เช่น เปลือกกล้วย (Hayeeye *et al.*, 2014, pp. 177-187) รวมทั้งขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งในชุมชนเป็นจำนวนมากจากข้อมูลของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายในปี พ.ศ. 2563 การส่งออกน้ำตาลทรายจะมีปริมาณ 9.55 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจาก 8.67 ล้านตันในปี พ.ศ. 2562 คิดเป็นร้อยละ 10.15 ส่งผลให้ปริมาณขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายจากอ้อยมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วยอีกทั้งเมื่อศึกษาข้อมูลสัดส่วนการเกิดชีวมวลต่อปริมาณผลิตพบว่าสัดส่วนการเกิดชีวมวลต่อปริมาณผลผลิตของขานอ้อยเป็น 0.28 ดังนั้นการนำขานอ้อยที่เหลือทิ้งมาเตรียมให้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ และปรับสภาพพื้นที่ผิวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียทางการเกษตรและสามารถนำไปใช้เพื่อช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากสารละลายสีย้อมได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาจลนศาสตร์และรูปแบบของการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี บนคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยที่ถูกปรับปรุงพื้นที่ผิวโดยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (modified bagasse activated carbon; BAC-KOH) เปรียบเทียบกับคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยที่ไม่ปรับปรุงพื้นที่ผิว (bagasse activated carbon; BAC)

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุและสารเคมี

ถ่านกัมมันต์จากขานอ้อย (BAC), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Sigma-Aldrich), สีย้อมโรดามีน บี (MW = 479.02 g mol⁻¹) (Fluka), โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ กรดไฮโดรคลอริก (Labscan Ireland), น้ำกลั่นแบบสองครั้ง

วิธีการวิจัย

1. เตรียมสารละลายสีย้อมโรดามีน บี

เตรียมสารละลายสีย้อมเริ่มต้นความเข้มข้น 1000 mg L⁻¹ และทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นแบบสองครั้งให้ได้ความเข้มข้นในช่วง 50 – 600 mg L⁻¹

2. การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อย (BAC)

นำขานอ้อยที่เหลือทิ้งในชุมชนในจังหวัดปัตตานีมาเตรียมเป็นคาร์บอนกัมมันต์ ตามวิธีของ Hayeeye & Sattar, 2020, pp. 420-434 โดยมีขั้นตอนสรุปดังนี้ นำขานอ้อยมาล้างให้สะอาดและตากแดดให้แห้งจากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นบดและนำไปคัดขนาดให้ได้ 140-170 mesh แล้วนำไปกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ในอัตราส่วน 1:2 ที่ อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้างคาร์บอนกัมมันต์และนำไปอบให้แห้งและเก็บไว้ในภาชนะที่แห้งและมีฝาปิดมิดชิด

3. การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยที่ปรับปรุง (BAC-KOH)

นำคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยที่ไม่ปรับปรุง (BAC) อบที่อุณหภูมิ 110 °C แล้วแช่ในสารละลาย KOH ในอัตราส่วน 1:1.5 โดยปริมาตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปกรอง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 °C นาน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น วัดค่า pH ของน้ำที่ได้จากการล้างจนได้เท่ากับ pH ของน้ำกลั่น ต่อจากนั้นนำคาร์บอนกัมมันต์ไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเก็บใส่ภาชนะที่แห้งและมีฝาปิดมิดชิด

4. การหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) และการกระจายตัวของรูพรุน

วิเคราะห์พื้นที่ผิวของ BAC และ BAC-KOH โดยใช้ Surface Area and Porosity Analyzer รุ่น ASAP2060 ยี่ห้อ Micromeritics ณ ศูนย์เครื่องวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสามารถหาได้จากไอโซเทอมของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K ตามรูปแบบสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) (Brunauer *et al.*, 1969, pp. 546-552) คำนวณการกระจายตัวของรูพรุนตามรูปแบบสมการของ Barrett, Joyner และ Halenda (BJH) (Barrett *et al.*, 1951, pp. 373-380) และหาค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) เพื่อหาสภาพความเป็นกรดต่างของพื้นที่ผิวของ BAC และ BAC-KOH ด้วยวิธีการ pH drift (Jia *et al.*, 2002, pp. 470-478 cited in Hayeeye & Sattar, 2020, p. 425)

5. การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH

เตรียมสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ความเข้มข้น 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ pH = 4.0 จากนั้นเติมคาร์บอนกัมมันต์ (BAC หรือ BAC-KOH) 0.05 กรัม (Hayeeye & Sattar, 2020, p. 422) ลงในสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ปริมาตร 50 mL เขย่าที่อุณหภูมิห้อง ดูดสารละลายประมาณ 1 mL ทุกๆ 30 นาที และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 554 nm จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่ 300 นาที และ 180 นาที สำหรับ BAC และ BAC-KOH ตามลำดับ โดยที่จุดที่เข้าสู่สมดุลเป็นจุดที่ความเข้มข้นของสารละลายโรดามีน บี ไม่เปลี่ยนแปลงแล้ว คำนวณหาค่าความเข้มข้นของโรดามีน บี ด้วยกราฟมาตรฐาน จากนั้นคำนวณปริมาณการดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (q_t) ดังสมการ (1) (Hayeeye & Sattar, 2020, pp. 420-434) ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลอง และหาค่าเฉลี่ย

$$q_t = \frac{V(C_0 - C_t)}{w} \quad (1)$$

เมื่อ C_0 และ C_t คือความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ เวลาใดๆของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี (mg L⁻¹) ตามลำดับ V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L) และ w คือน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ (g)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้สร้างรูปแบบจลนศาสตร์การดูดซับว่าสอดคล้องตามรูปแบบใดโดยรูปแบบจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับที่เลือกใช้คือ ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม (Lagergren, 1898, p. 20) และ ปฏิกริยาอันดับสองเทียม (Ho&McKay, 1999, p. 455) ดังสมการ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2)$$

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

โดยที่ k_1 , k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียม (min⁻¹) และ ปฏิกริยาเทียมอันดับสอง (mg⁻¹ min⁻¹) ตามลำดับ q_t คือ ค่าการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ ณ เวลาใดๆ (mg g⁻¹) q_e คือ ค่าการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ ณ สมดุล (mg g⁻¹)

6. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH

ไอโซเทอมของการดูดซับศึกษาโดยใช้วิธีการแบบ batch (Fadzil, *et al.*, 2016, pp. 1-8) มีขั้นตอนดังนี้ สารละลายโรดามีน บี ที่ความเข้มข้นต่างๆ ($50 - 600 \text{ mg L}^{-1}$) 50 mL เติม BAC หรือ BAC-KOH 0.05 g จากนั้นเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าที่ควบคุมอุณหภูมิที่ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $\text{pH} = 4.0$ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เพียงพอที่จะทำให้เกิดสมดุลของการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ของ BAC และ BAC-KOH เนื่องจากหลังจาก 8 ชั่วโมงไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโรดามีน บี จากนั้นนำสารละลายก่อนและหลังการดูดซับไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer (UV 2600, Shimadzu) ที่ความยาวคลื่น 554 nm เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี โดยความเข้มข้นก่อนและหลังการดูดซับสามารถคำนวณได้จากกราฟมาตรฐานที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสีย้อมโรดามีน บี ที่มีค่าความเป็นเส้นตรง 0.9986

จากค่าความเข้มข้นก่อนและหลังการดูดซับสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณการดูดซับ (q_e) และเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ของ BAC และ BAC-KOH ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ จากนั้นทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งเพื่อยืนยันผลการทดลองและหาค่าเฉลี่ย

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{w} \quad (4)$$

$$\% \text{ adsorbed} = \frac{C_0 - C_e}{C_e} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ C_0 และ C_e คือความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้น ณ จุดสมดุลของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี (mg L^{-1}) ตามลำดับ สร้างรูปแบบการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir, 1991, p. 2230) และสมการของฟรุนดิช (Freundlich, 1907, p. 325) ดังสมการ (6) และ (7) ตามลำดับ

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (6)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณการดูดซับที่สมดุล (mg g^{-1}) q_m คือ ปริมาณตัวที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg g^{-1}) ที่ถูกดูดซับในชั้นเดียว (monolayer) b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับหรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L mg^{-1}) K_F คือ ค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg g^{-1}) n คือ ค่าคงที่ที่ฟรุนดิชสัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลาย

ผลการวิจัย

1. สมบัติทางกายภาพของ BAC และ BAC-KOH

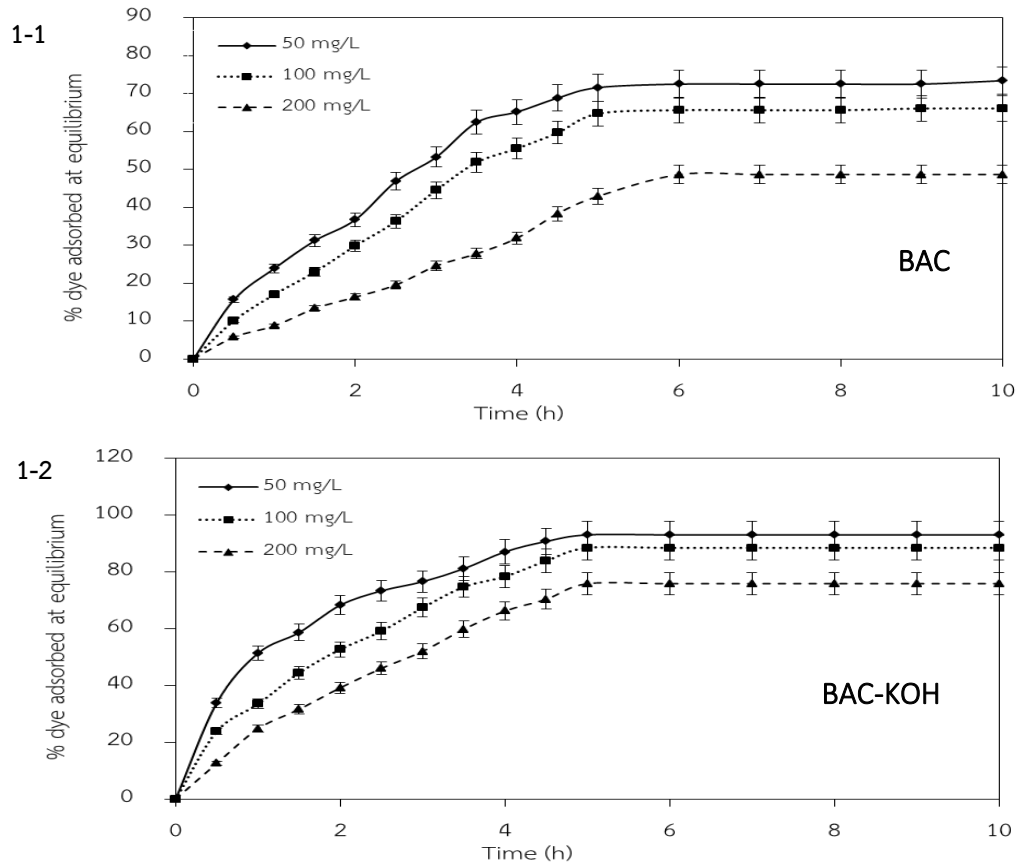
จากผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพของ BAC และ BAC-KOH (ตารางที่ 1) พบว่าค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ BAC-KOH สูงกว่าของ BAC ($851.96 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ และ $780.21 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ตามลำดับ) ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ BAC-KOH ใหญ่กว่าของ BAC เล็กน้อย (4.16 และ 3.92 nm ตามลำดับ) ค่าประจุศูนย์ (pH_{pzc}) ของ BAC-KOH มากกว่าของ BAC (5.5 และ 4.5 ตามลำดับ)

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของ BAC และ BAC-KOH

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)	ปริมาณรูพรุนขนาดเล็ก ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)	pH_{pzc}
BAC	780.21	0.23	3.92	4.5
BAC-KOH	851.96	0.17	4.16	5.5

2. จลนศาสตร์การดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH

จากผลการทดลองของอิทธิพลของเวลาและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่แตกต่างกันพบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ เปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุดจะลดลง ดังแสดงในภาพที่ 1 และพบว่าเวลาที่เข้าสู่สมดุลที่เปอร์เซ็นต์การดูดซับคงที่ของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บนตัวดูดซับ BAC และ BAC-KOH คือ 8 ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 30 °C และสารละลายสีย้อมโรดามีน บี มี pH = 4 โดยใช้ปริมาณของ BAC และ BAC-KOH 0.05 g



ภาพที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับบน BAC (รูป 1-1) และ BAC-KOH (รูป 1-2) ของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ เทียบกับเวลาที่อุณหภูมิ 30°C และ pH 4

จากอิทธิพลของเวลาสามารถศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ และคำนวณค่าปัจจัยทางจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าความเป็นเส้นตรงของสมการอันดับสองเทียมเข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียมและสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2) ได้คือ 7.34, 1.89 และ 1.48 g mg⁻¹ min⁻¹ สำหรับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี เข้มข้น 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าปัจจัยทางจลนศาสตร์การดูดซับของสมการปฏิริยาเทียมอันดับหนึ่งและอันดับสองของการดูดซับสารละลาย
สีย้อมโรดามีน บี (50, 100 และ 200 mg L⁻¹) บน BAC และ BAC-KOH ที่อุณหภูมิ 30°C และ pH = 4

BAC							
C ₀ (mg L ⁻¹)	q _e (exp) (mg g ⁻¹)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		q _e (mg g ⁻¹)	k ₁ (×10 ⁻³) (min ⁻¹)	R ²	q _e (mg g ⁻¹)	k ₂ (×10 ⁻⁵) (g mg ⁻¹) (min ⁻¹)	R ²
50	72.47	9.51	6.01	0.888	107.52	6.12	0.953
100	164.44	12.53	5.41	0.821	178.57	3.21	0.931
200	243.79	15.56	2.90	0.877	303.03	1.08	0.923

BAC-KOH							
C ₀ (mg L ⁻¹)	q _e (exp) (mg g ⁻¹)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		q _e (mg g ⁻¹)	k ₁ (×10 ⁻³) (min ⁻¹)	R ²	q _e (mg g ⁻¹)	k ₂ (×10 ⁻⁵) (g mg ⁻¹) (min ⁻¹)	R ²
50	93.12	10.23	5.21	0.921	120.48	1.14	0.995
100	221.94	13.48	4.52	0.945	232.56	3.32	0.982
200	380.64	16.07	4.23	0.938	384.62	1.39	0.954

3. แบบจำลองการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH

ค่าคงที่ของการดูดซับของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH ตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดิช แสดงดังตารางที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับภายใต้เงื่อนไขเวลาที่เข้าสู่สมดุล 8 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 30 °C, pH 4.0 และปริมาณคาร์บอนกัมมันต์ 0.05 g ผลพบว่า ค่า R² ของแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดิช และจากการคำนวณปริมาณการดูดซับสูงสุดพบว่าตัวดูดซับ BAC และ BAC-KOH มีปริมาณการดูดซับสูงสุด (q_m) คือ 384.62 และ 555.56 mg g⁻¹ ตามลำดับ และพบว่า การปรับสภาพด้วย KOH ให้ปริมาณการดูดซับดีกว่าชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดิชของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH ที่ความเข้มข้น 25 – 600 mg L⁻¹, pH = 4

Adsorbents	Langmuir			Freundlich		
	q _m (mg g ⁻¹)	b (L mg ⁻¹)	R ²	K _F (mg g ⁻¹)	n	R ²
BAC	384.62	0.02	0.996	2.46	0.53	0.932
BAC-KOH	555.56	0.07	0.998	2.76	0.68	0.952

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี กับตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ

Adsorbent	Activation	q_m (mg g ⁻¹)	Ref.
White sugar	H ₂ SO ₄	123.46	Wei, <i>et al.</i> , 2020
Bagasse pith	H ₂ PO ₄	263.85	Hamdi, <i>et al.</i> , 2010
BAC	ZnCl ₂	384.62	งานวิจัยนี้
BAC-KOH	KOH	555.56	งานวิจัยนี้

อภิปรายผลการวิจัย

สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับชนิด BAC และ BAC-KOH ที่นำมาศึกษาคือค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าการกระจายตัวของรูพรุน และค่าประจุศูนย์โดยพบว่า BAC-KOH มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า BAC แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์จากขานอ้อยให้ผลที่ดีขึ้น สำหรับค่าการกระจายตัวของรูพรุนพบว่าขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ BAC และ BAC-KOH คือ 3.92 และ 4.16 nm ตามลำดับซึ่งจัดว่าเป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) โดยที่รูพรุนขนาดกลางจะอยู่ในช่วง 2 – 50 nm (Kuila *et al.*, 2013, p. 355) นอกจากนี้พบว่าค่า pH_{pzc} ของ BAC-KOH มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากสารกระตุ้น KOH มีสมบัติความเป็นเบส จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า BAC และ BAC-KOH มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ได้และการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของ BAC ส่งผลให้มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมมากยิ่งขึ้นและน่าจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ดีขึ้น

จากผลการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่แตกต่างกัน คือ 50, 100 และ 200 mg L⁻¹ กับการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรก BAC และ BAC-KOH มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำนวนมากสำหรับการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี จึงทำให้ปริมาณการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งเริ่มจะคงที่ในช่วง 6 ชั่วโมงสำหรับ BAC และชั่วโมงที่ 5 สำหรับ BAC-KOH หลังจากนั้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยโดยไม่มีนัยสำคัญ และหลังจากชั่วโมงที่ 8 ตัวดูดซับ BAC และ BAC-KOH ไม่ดูดซับโมเลกุลของสีย้อมโรดามีน บี ได้อีกซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH ได้เข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บน BAC และ BAC-KOH ที่เหมาะสมก็คือ 8 ชั่วโมงภายใต้อุณหภูมิ 30 °C, สารละลายสีย้อมโรดามีน บี pH 4 และปริมาณของ BAC และ BAC-KOH ที่ใช้คือ 0.05 กรัม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี แปรผกผันกับเปอร์เซ็นต์การดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี เนื่องจากโมเลกุลของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี เพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ผิวของการดูดซับของตัวดูดซับเท่าเดิม แต่ทั้งนี้หากพิจารณาปริมาณการดูดซับจะพบว่าความเข้มข้นจะแปรผกผันตรงกับปริมาณการดูดซับ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นมากขึ้นมีโอกาที่จะเกิดอันตรกิริยาระหว่างสารละลายสีย้อมโรดามีน บี และตัวดูดซับ (Hayeeye & Sattar, 2020, pp. 420-434)

นอกจากนี้การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (50, 100 และ 200 mg L⁻¹) โดยอาศัยการสร้างแบบจำลองและคำนวณค่าปัจจัยทางจลนศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่าค่าความเส้นตรง (R^2) จลนศาสตร์ของการดูดซับสารละลาย สีย้อมโรดามีน บี สอดคล้องตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มากกว่าสมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และจากสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมพบว่าค่าปริมาณการดูดซับจากการทดลอง (q_e (exp)) และค่าปริมาณการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ (q_e) มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นการยืนยันว่าจลนศาสตร์การดูดซับของสารละลายสีย้อมโรดามีน บี สอดคล้องตามสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียม อีกทั้งเมื่อนำมาสร้างแบบจำลองของการดูดซับโดยใช้สมการของแลงเมียร์ และสมการของฟรุนดลิช พบว่าไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี บนตัวดูดซับ BAC และ BAC-KOH ภายใต้เงื่อนไขเวลาที่เข้าสู่สมดุล 8 ชั่วโมง, อุณหภูมิ 30 °C, pH = 4.0 และปริมาณตัวดูดซับ 0.05 g สอดคล้องตามแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์โดยมีลักษณะรูปแบบเป็น L-shape isotherms (Sattar *et al.*, 2019, pp. 227 – 235) เนื่องจากมีค่าความเป็นเส้นตรง (R^2) มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช ทำให้สามารถคำนวณปริมาณการดูดซับสูงสุดได้โดยพบว่า BAC และ BAC-KOH มีปริมาณการดูดซับสูงสุดคือ 384.62 และ 555.56 mg g⁻¹ ตามลำดับ เป็นการยืนยันว่า BAC และ BAC-KOH มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมโรดามีน บี ได้อีกทั้งจากผลการศึกษาการดูดซับแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วย KOH สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับ BAC ได้ดีสามารถเป็นอีกหนทางเลือกเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากสารละลายสีย้อม

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

คาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุชีวมวลธรรมชาติที่เหลือทิ้งในชุมชน การนำคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้มาปรับปรุงพื้นที่ผิวทำให้มีสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายโรดามีน บี ดีขึ้นด้วย โดยพบว่าค่าปริมาณการดูดซับสูงสุดของคาร์บอนกัมมันต์เพิ่มขึ้นจาก 384.62 เป็น 555.56 mg g⁻¹ คิดเป็น 44% ดังนั้นการปรับปรุงพื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์จึงเป็นการพัฒนาคาร์บอนกัมมันต์เพื่อสามารถนำมาใช้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมได้

เอกสารอ้างอิง

- Barrett, E.P., Joyner, L.G. & Halenda, P.P. (1951). Pore Size Distribution for Porous Materials. *Journal of the American Chemical Society*, 73, 373–380.
- Belhachemi, M. & Addoun, F. (2012). Adsorption of Congo Red onto Activated Carbons Having Different Surface Properties: Studies of Kinetics and Adsorption Equilibrium. *Desalination and Water Treatment*, 37, 122–129.
- Brunauer, S., Skalny, J. & Bodor, E.E. (1969). Adsorption on Nonporous Solids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 30, 546–552.
- Calderóna, J.P., Santos, M.V. & Zaritzky, N. (2018). Reactive RED 195 Dye Removal Using Chitosan Coacervated Particles as Bio-sorbent: Analysis of Kinetics, Equilibrium and Adsorption Mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 6749-6760.
- Fadzil, F., Ibrahim, S., Megat, A.K. & Megat, H. (2016). Adsorption of Lead (II) onto Organic Acid Modified Rubber Leaf Powder: Batch and Column Studies. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 1-8.
- Freundlich, H. (1907). Ueber Kolloidfällung and Adsorption. *Zeitschrift für Chemie and Industrie der Kolloide*, 1, 321–331.
- Hamdi, M.H. and El-sayed, A.A. (2010). Activated Carbon from Agricultural By-Products for the Removal of Rhodamine-B from Aqueous Solution. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 1070-1081.
- Hayeeye, F. & Sattar, M. (2020). Removal of Crystal Violet in Aqueous Solution by Activated Carbon from the Pericarp of Rubber Fruit and Bagasse: Kinetics, Thermodynamics and Adsorption Studies. *Desalination and Water Treatment*, 202, 420–434.
- Hayeeye, F., Sattar, M., Chinpa, W. & Sirichote, O. (2017). Kinetics and Thermodynamics of Rhodamine B Adsorption by Gelatin/Activated Carbon Composite Beads. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 513, 259–266.
- Hayeeye, F., Sattar, M., Tekasakul, S. & Sirichote, O. (2014). Adsorption of Rhodamine B on Activated Carbon Obtained from Pericarp of Rubber Fruit in Comparison with the Commercial Activated Carbon. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 36 (2), 177-187.
- Ho, Y.S. & McKay, G. (1999). Pseudo-Second-Order Model for Sorption Processes. *Process Biochemistry*, 34, 451–465.
- Jia Y.F., Xiao, B. & Thomas, K.M. (2002). Adsorption of Metal Ions on Nitrogen Surface Functional Groups in Activated Carbons. *Langmuir*, 18, 470–478.
- Kuila, U. & Prasad, M. (2013). Specific Surface Area and Pore-Size Distribution in Clays and Shales. *Geophysical Prospecting*, 62(2), 341-362.
- Lagergren, S. (1898). Zur Theorie Der Sogenannten Adsorption Geloster Stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. *Handlingar*, 24, 1–39.

- Langmuir, I. (1916). The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38, 2221–2295.
- Mohammad, F., Rajesh, G.P., Khorshidi, B., Hayatbakhsh, A. & Sadrzadeh, M. (2019). Efficient Treatment of Oil Sands Produced Water: Process Integration Using Ion Exchange Regeneration Wastewater as A Chemical Coagulant. *Separation and Purification Technology*, 221, 166-174.
- Santhi, T., Prasad, A.L., Manonmani, S. (2014). A Comparative Study of Microwave and Chemically Treated Acacia Nilotica Leaf an Eco-friendly Adsorbent for the Removal of Rhodamine B Dye from Aqueous Solution, *Arabian Journal of Chemistry*, 7, 494–503.
- Sattar, M., Hayeeye, F., Chinpa, W. & Sirichote, O. (2017). Preparation and Characterization of Poly (lactic acid)/ Activated carbon Composite Bead via Phase Inversion Method and Its Use as Adsorbent for Rhodamine B in Aqueous Solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 3780–3791.
- Sattar, M., Hayeeye, F., Chinpa, W. & Sirichote, O. (2019). Poly (lactic acid)/Activated Carbon Composite Beads by Phase Inversion Method for Kinetic and Adsorption Studies of Pb²⁺ Ions in Aqueous Solution. *Desalination and Water Treatment*, 146, 227–235.
- Stefanos, G., Barbara, A., Christos, C. & Cesar, P. (2018). Wastewater and Urine Treatment by UVC-Based Advanced Oxidation Processes: Implications from the Interactions of Bacteria, Viruses and Chemical Contaminants. *Chemical Engineering Journal*, 343, 270-282.
- Tharcila, C.R., Juliana, C.I., Carina, P.M. & Denise, A.F. (2013). Adsorption of Crystal Violet Dye from Aqueous Solution onto Zeolites from Coal Fly and Bottom Ashes. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, 5, 179–191.
- Wei, X., Zaharaddeen, N.G., Shichang, S., Ibrahim, L. Wang, L., Lin. M. and Yuan, Z. (2020). Preparation and evaluation of an effective activated carbon from white sugar for the adsorption of rhodamine B dye. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119989.
- Yarlagadda, V. N. & Manjunath, S. (2019). Aerobic Granular Sludge Process: A Fast Growing Biological Treatment for Sustainable Wastewater Treatment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 57-65.