

พฤติกรรมการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก ขานอ้อย

Adsorption Behavior of Reactive Black 5 Dye on Activated Carbon

Prepared from Sugarcane Bagasse

จักรกฤษณ์ อัมพูช^{*1,2} บุญส่ง จุฑารัตน์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

²ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Chakkrit Umpuch^{*1,2} Boonsong Jutarat¹

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University,

Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

²National Center of Excellence for Environmental and Hazardous Waste Management, Ubonratchathani

University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4535-3343 E-mail: enchakum@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และอุณหภูมิ ส่วนแรก การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการสัมผัส พบว่า อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก แล้วเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 10 ชั่วโมง ข้อมูลการดูดซับสอดคล้องกับโมเดลจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ส่วนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชเริ่มต้น ส่วนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ และมีปริมาณการดูดซับแบบขั้นเดียวสูงสุดบนตัวดูดซับ เท่ากับ 69.44 มิลลิกรัมต่อกรัม และส่วนสุดท้าย การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากขานอ้อยเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 คำหลัก สีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 การดูดซับ ขานอ้อย ถ่านกัมมันต์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

Abstract

This work studied adsorption of reactive black 5 dye on an activated carbon prepared from sugarcane bagasse which was chemically activated by potassium hydroxide. Experiment was divided into 4 parts according to adsorption affecting factor including contact time, initial solution pH, initial dye concentration and temperature. Firstly, the effect of contact time on the dye uptake was studied. It was found that the adsorption rate was rapid in first 10 minute and then attained equilibrium at 10 hour. Kinetic data follows the pseudo-second-order model. Secondly, the effect of initial solution pH was investigated. It was observed that the dye uptake slightly increased with the pH. Thirdly, the effect of initial dye concentration was performed. The

experimental result was in accordance with Langmuir isotherm and the maximum monolayer adsorption capacity obtained was 69.44 mg/g. Finally, the effect of temperature on the adsorption was investigated. The adsorption capacity increases with temperature indicating endothermic process. From the results above showing that the activated carbon prepared from sugarcane bagasse is effective for adsorption of reactive black 5 dye.

Keywords: Reactive black 5 dye, adsorption, activated carbon, potassium hydroxide

1. บทนำ

สีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 เป็นสีย้อมเคมีสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของประเทศไทย เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมฟอกย้อม และอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น เนื่องจากสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ย้อมง่าย ย้อมติดเร็ว และผลิตภัณฑ์ผ้าที่ได้มีสีสดใสและติดทนนาน [1-2] สีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 มีโครงสร้างที่ซับซ้อนประกอบไปด้วยหมู่ อะโรมาติกที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอะโซ (-N=N-) อย่างไรก็ตาม สีย้อมชนิดนี้เมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณมากจะทำให้แหล่งน้ำนั้นมีทัศนียภาพที่ไม่สวยงาม เกิดการเน่าเสีย เนื่องจากสีย้อมที่ปนเปื้อนจะไปปิดกั้นการส่องผ่านของแสงแดดสู่แหล่งน้ำ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ดังนั้น สีย้อมชนิดนี้จำเป็นต้องถูกกำจัดก่อนปล่อยสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ

เนื่องจากสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 ละลายน้ำได้ดีและมีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนจึงยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เช่น การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และการย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้ออกซิเจน (aerobic biodegradation) [3] วิธีการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมผ้าในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ [4] แม้ว่ากระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพจะสามารถกำจัดสีย้อมได้ดี แต่วิธีการเหล่านี้ต้องใช้อุปกรณ์ต่าง ๆ ค่อนข้างจำเพาะ และต้องใช้พลังงานสูง นอกจากนี้ยังสร้างสารพลอยได้ในปริมาณมากออกมา

ด้วย [4] กระบวนการทางกายภาพ เช่น กระบวนการดูดซับ กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ และการกรองผ่านแผ่นเยื่อบาง เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมที่ย่อยสลายได้น้อยทางชีวภาพในสภาวะธรรมชาติทั่วไป ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากวัสดุธรรมชาติ เช่น ของเสียทางการเกษตร ชานอ้อย ชีวมวล ไม้ ยางพารา กระดาษ เปลือกผลไม้ และกากกาแฟ เป็นต้น [5 -9]

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์จะศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ (1) จลนพลศาสตร์การดูดซับ เพื่อศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล และทำนายกลไกการดูดซับโดยนำข้อมูลผลการทดลองมาพล็อตกับโมเดลเชิงจลนพลศาสตร์ เช่น สมการอัตราอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) สมการอัตราอันดับสองเทียม (pseudo-second order) และสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน (intraparticle diffusion model) [10] ผลการทดลองการดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม เช่น การดูดซับสีรีแอ็คทีฟเรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย เป็นต้น [11] (2) การศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณตัวดูดซับ และอุณหภูมิ เป็นต้น (3) ไอโซเทอมการดูดซับ โดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการไอโซเทอมเพื่อทำนายพฤติกรรมในการดูดซับ ไอโซเทอมที่นิยมนำมาศึกษา ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลง-เมียร์ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เป็นต้น [12]

เนื่องจากประเทศไทยมีผลผลิตอ้อยเป็นจำนวนมาก ทำให้มีชานอ้อยเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ชานอ้อยเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปเป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูง นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับชานอ้อยที่มีปริมาณมากในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการดูดซับสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 จากน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ รวมทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทอมการดูดซับด้วย

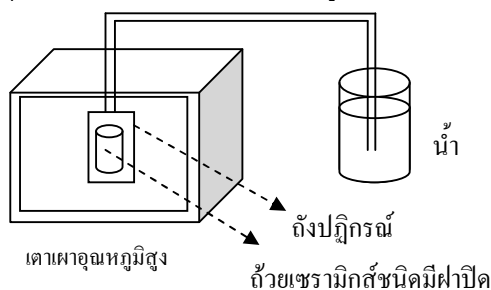
2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ ชานอ้อย จากอำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งจะถูกนำมาล้างทำความสะอาดแล้วอบไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หลังจากนั้น ชานอ้อยจะถูกนำมาเผาให้เป็นถ่าน ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ภายในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้น ปล่องทิ้งไว้ให้เย็นภายในถังปฏิกรณ์

ถ่านจากชานอ้อยที่ได้จะถูกนำมากระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activation) โดยนำถ่านที่ได้ไปผสมกับสาร KOH (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ในอัตราส่วน ถ่านต่อสาร KOH เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผาภายใต้สภาวะไร้อากาศภายในถังปฏิกรณ์อีกครั้งที่อุณหภูมิ 780 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วปล่องทิ้งไว้ให้เย็นภายในถังปฏิกรณ์ หลังจากนั้น นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยสารละลาย HCl เข้มข้น 20% โดยปริมาตรเพื่อกำจัดสาร KOH ที่ตกค้างอยู่บนถ่านกัมมันต์ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบดให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh บรรจุถ่านกัมมันต์ที่ได้ไว้ในถุงพลาสติกและเก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้น



รูปที่ 1 ถังปฏิกรณ์ในการเตรียมถ่านกัมมันต์

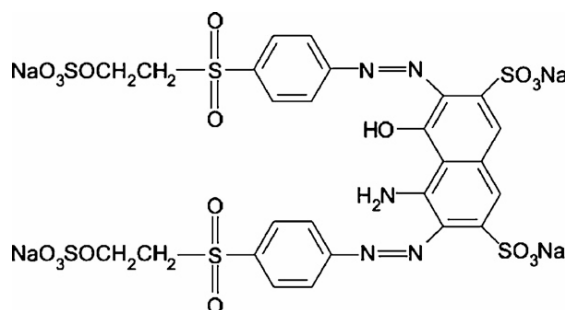
2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยมาวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยใช้เครื่อง Micromeritics ASAP2010 apparatus เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ พื้นที่ผิว

ภายนอก พื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรวมของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm) ปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 – 50 nm) และวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย คุณสมบัติทางเคมีที่พื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR-spectroscopy ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาศึกษาลักษณะพื้นฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) นอกจากนี้ การหาค่า pH_{pzc} หรือค่าพีเอชที่ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุเป็นกลางทางไฟฟ้า ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลาย NaCl 0.01 M ปริมาตร 100 mL ในขวดรูปชมพูนขนาด 250 mL แล้วทำการปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยสาร 0.1N NaOH และ/หรือ 0.1N HCl ให้อยู่ในช่วง 2.0 – 10.0 ปิดปากขวดด้วยฟอยด์แล้วเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการวัดค่าพีเอชของสารละลาย

2.3 การเตรียมสารละลายสีย้อม

สีรีแอคทีฟแบล็ค 5 ยี่ห้อ Asia Pacific Specialty มีสูตรโมเลกุลเป็น C₂₆H₂₁N₅Na₄O₁₉S₆ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 991.82 g/mol [13] ความยาวคลื่นที่ดูดซึมแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 588 nm โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 แสดงไว้ในรูปที่ 2 สารละลายสต็อก (stock solution) เข้มข้น 1000 mg/L จะถูกเตรียมโดยทำการละลายสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 จำนวน 1 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามต้องการ โดยวิธีการเจือจาง



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟแบล็ค 5 [13]

2.4 การทดลองการดูดซับแบบกะ

การดูดซับแบบกะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การศึกษาอิทธิพลของเวลาในการสัมผัส นำสารละลายสีย้อมเข้มข้น 200 mg/L ปริมาตร 100 มิลลิลิตร มาเติมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนเต็มไปจำนวน 0.1 กรัม ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอยล์ เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบ ต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างมากรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน หลังจากนั้นนำสารละลายส่วนที่ใสไปวิเคราะห์ปริมาณสีย้อม โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-vis-Spectrophotometer

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนแรก แต่ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมในช่วง 2 – 10 แล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนแรก แต่ทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในช่วง 50 – 300 mg/L แล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดลองส่วนสุดท้าย การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนแรกแต่ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 30 – 60 °C ทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e : mg/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และเปอร์เซ็นต์การกำจัด (%removal) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

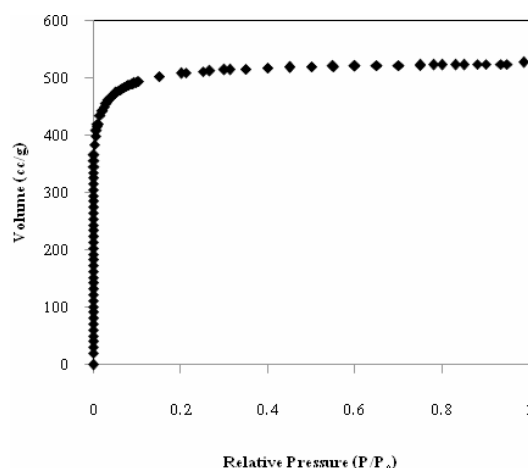
$$\%removal = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย C_0 คือความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L) C_e คือความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาใดๆ C_0 คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล (mg/L) m คือปริมาณของตัวดูดซับ (g) และ V คือปริมาตรของสารละลาย (L)

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวดูดซับ

รูปที่ 3 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่อุณหภูมิ 77 K พบว่า เส้นกราฟไอโซเทอมมีลักษณะเป็นแบบ Type I โดยจำแนกตามระบบของ IUPAC [14] อธิบายได้ว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว



รูปที่ 3 ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับก๊าซไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
พื้นที่ผิวจำเพาะ ^a (m ² /g)	1675
พื้นที่ผิวภายนอก ^b (m ² /g)	300
พื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก ^c (m ² /g)	1375
ปริมาตรรวมของรูพรุน ^d (cm ³ /g)	0.82
ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก ^e (cm ³ /g)	0.65
ปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง ^f (cm ³ /g)	0.13
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย ^g (nm)	2.7

หมายเหตุ

a คำนวณจากสมการของ BET [15]

b,c คำนวณจาก t-plot [15]

d คำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ $P/P_0 = 0.95$ [16]

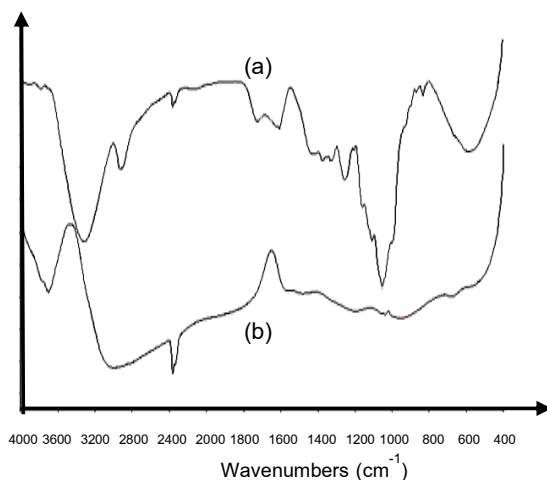
e คำนวณตามวิธีของ Dubinin-Radushkevich [17]

f คำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ P/P_0 ระหว่าง 0.40-0.95 โดยสมมติให้ปริมาตรเชิงโมลของไนโตรเจนเหลวเป็น 35 cm³/mol [18]

g คำนวณตามวิธีของ Barrett-Joyner-Halenda (BJH) [15]

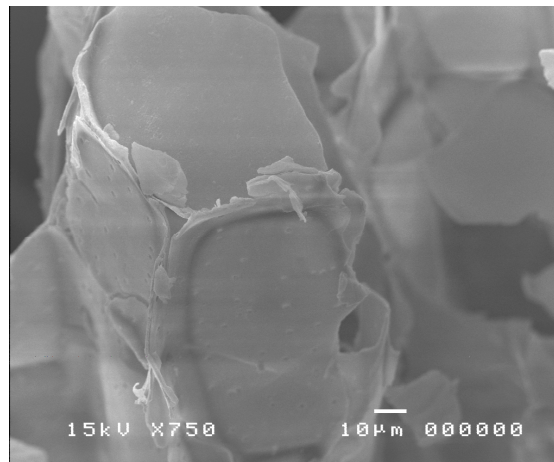
คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ($1675 \text{ m}^2/\text{g}$) เป็นวัสดุที่มีรูพรุนโดยพิจารณาจากปริมาตรรวมของรูพรุนเท่ากับ $0.82 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก เท่ากับ $0.79 \text{ cm}^3/\text{g}$ และปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง เท่ากับ $0.13 \text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบหลัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 2.74 nm

%Transmittance

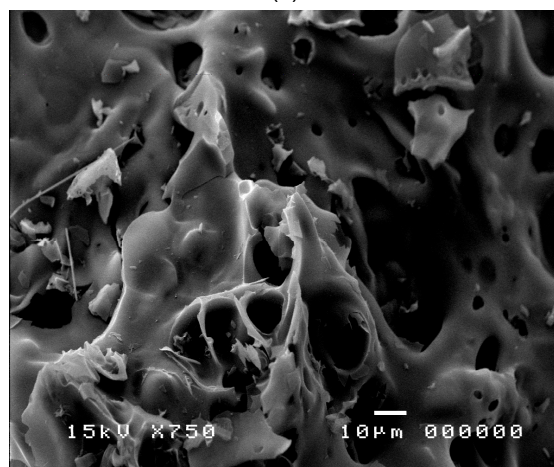


รูปที่ 4 Fourier Transforms infrared spectra (a) ชานอ้อย (b) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

รูปที่ 4a แสดง IR-spectra ของชานอ้อย พบว่า IR-spectra ของชานอ้อยมีพีดเป็นจำนวนมาก บ่งบอกว่า พื้นผิวของชานอ้อยมีหมู่ฟังก์ชันนอลอยู่เป็นจำนวนมาก ได้แก่ หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำที่อยู่บนชานอ้อย ที่ vibration band ในช่วง $3700\text{--}3300 \text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching vibration) หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-H ที่ 2932 cm^{-1} (C-H stretching vibration) หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ $\text{C}\equiv\text{C}$ หรือ $\text{C}\equiv\text{N}$ ที่ 2363 cm^{-1} หมู่คาร์บอกซิลิก ที่ 1727 cm^{-1} และ 1606 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ stretching vibrations) หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-H ที่ 1327 cm^{-1} (C-H rocking) และ หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-O ที่ $1000\text{--}1257 \text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}$ stretching vibrations) ขณะที่รูปที่ 4b แสดง IR-spectra ของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ซึ่งมีจำนวนพีดน้อยกว่า IR-spectra ของชานอ้อย เนื่องจากขั้นตอนการเตรียม



(a)

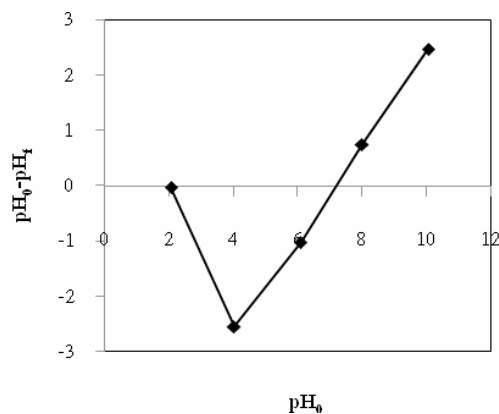


(b)

รูปที่ 5 ภาพถ่าย SEM ของ (a) ชานอ้อย และ (b) ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

ถ่านใช้ความร้อนสูงและสารเคมี จึงทำให้หมู่ฟังก์ชันนอลบางหมู่หายไป ได้แก่ การหายไปของช่วง vibration band $3700\text{--}3300 \text{ cm}^{-1}$ (O-H stretching vibration) และ 1727 cm^{-1} และ 1606 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ stretching vibrations) แสดงให้เห็นว่าการเผาที่อุณหภูมิสูงสามารถกำจัดน้ำและหมู่คาร์บอนิลได้ เป็นต้น หมู่ฟังก์ชันที่เหลือบนถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย ได้แก่ หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-H ที่ 2998 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ $\text{C}\equiv\text{C}$ หรือ $\text{C}\equiv\text{N}$ ที่ 2361 cm^{-1} หมู่ฟังก์ชันที่มีพันธะ C-C ที่ 955 และ 673 cm^{-1} ตามลำดับ นอกจากนี้ ได้ปรากฏ vibration band ใหม่ในถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่ 3703 cm^{-1} ซึ่งเป็น vibration band ของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีการเกิดหมู่ไฮดรอกซิลใหม่ ที่เป็นผลมาจากการกระตุ้นด้วยสาร KOH ขึ้น ซึ่งหมู่ไฮ-

-ดรอกลินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ และอาจส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ รูปที่ 5 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของชานอ้อย (รูปที่ 5a) และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย (รูปที่ 5b) พบว่า พื้นผิวของชานอ้อยมีลักษณะเรียบและไม่มีรูพรุนปรากฏอยู่ ขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยมีรูพรุนที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันอยู่บนพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนเฉลี่ยโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธี BET



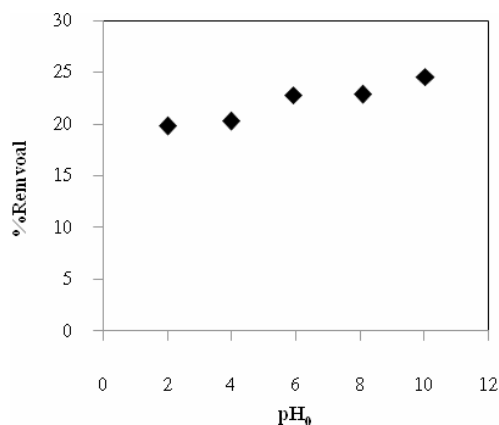
รูปที่ 6 ค่า pH_{pzc} ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

รูปที่ 6 แสดงความค่า pH_{pzc} ของถ่านกัมมันต์จากชานอ้อยที่ค่า pH_{pzc} เท่ากับ 7.0 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอำนาจเป็นประจุบวก เมื่อค่า pH_{pzc} ต่ำกว่า 7.0 และพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอำนาจเป็นประจุลบ เมื่อค่า pH_{pzc} สูงกว่า 7.0

3.2 อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้น

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับ พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมไม่ขึ้นกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย โดยทั่วไปสีย้อมที่พีเอชเริ่มต้นของสารละลายจะถูกยึดติดผิวบนถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทั้งที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวชนิดอ่อน (weak interaction) และแรงยึดเหนี่ยวชนิดที่แข็งแรง (strong interaction) แรงยึดเหนี่ยวที่อ่อน ได้แก่ แรง van der Waals ขณะที่แรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรง ประกอบไปด้วย 1) แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุของสีย้อม (ประจุลบของหมู่ SO_3^-) และประจุบวกบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (เช่น ประจุบวกของหมู่เอมีน [3]) 2)

พันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชันนอลของสีย้อมและถ่านกัมมันต์ (3) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic-Hydrophobic interaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสีย้อมและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของถ่านกัมมันต์หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอน [3]



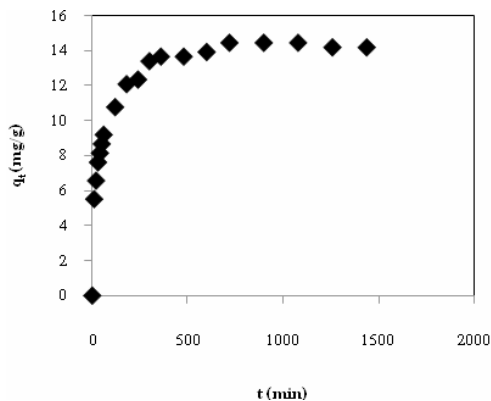
รูปที่ 7 อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับสีย้อมแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย (C_0 : 200 mg/L, 200 rpm และเขย่า 24 hr)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ได้แก่ 2.02 3.99 5.92 8.09 และ 10.03 ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลหลังการดูดซับ 2.03 4.00 5.99 8.02 และ 9.98 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชระหว่างการดูดซับเกิดขึ้นน้อยมาก เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (จาก 19.79% ไปเป็น 24.58%) เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 2.0 ถึง 10.0 (<5%) การเพิ่มหรือลดปริมาณของประจุบวกและประจุลบในสารละลายจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยน้อยมาก จึงกล่าวได้ว่า “แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำกับโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic- hydrophobic interaction)” เป็นแรงยึดเหนี่ยวหลักที่มีความสำคัญมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่น ๆ

3.3 อิทธิพลของเวลาสัมผัส

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับสีย้อมแอ็คทีฟแบล็ค 5 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มอย่างรวดเร็ว

ในช่วง 10 นาทีแรก หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับจะเริ่มช้าลง และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 10 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณการดูดซับในช่วง 10 นาทีแรก เนื่องจากพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์เริ่มต้นไม่มีสีย้อมยึดเกาะอยู่ จึงสามารถยึดจับกับสีย้อมที่พื้นผิวภายนอกของสีย้อมได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ถูกปกคลุมไปด้วยสีย้อมจนเต็มแล้ว โมเลกุลของสีย้อมจึงแพร่เข้าไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดขึ้นช้ากว่า 2 ขั้นตอนแรกข้างต้น ทำให้อัตราการดูดซับลดลง [19]



รูปที่ 8 อิทธิพลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย (C_0 : 200 mg/L, 200 rpm และ pH 6.0±1)

3.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองจะถูกนำมาพหุคูณกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (pseudo-second order model) และสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน (intra-particle diffusion model)

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย [20] โดยมีสมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพื้นผิวของตัวดูดซับที่ว่างจากตัวถูกดูดซับ ถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม

แสดงว่าขั้นตอนการซึมผ่านชั้น Boundary layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับของสีย้อมเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1 (q_e - q_i) \quad (3)$$

ที่ซึ่ง k_1 (min^{-1}) คือ ค่าคงที่อัตราอันดับหนึ่งของ Lagergren เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะได้

$$\ln(q_e - q_i) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (4)$$

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับสองเทียม [21] มีสมมติฐานว่า อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ว่างจากตัวถูกดูดซับ ถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเทียมแสดงว่าขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate of limiting step) ซึ่งมีสมการเป็นไปตามสมการที่ 5

$$\frac{dq_e}{dt} = k_1 (q_e - q_i)^2 \quad (5)$$

ที่ซึ่ง k_2 ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$) คือ ค่าคงที่อัตราอันดับสอง เมื่อจัดรูปของสมการให้เป็นเส้นตรง จะเป็นไปตามสมการที่ 6

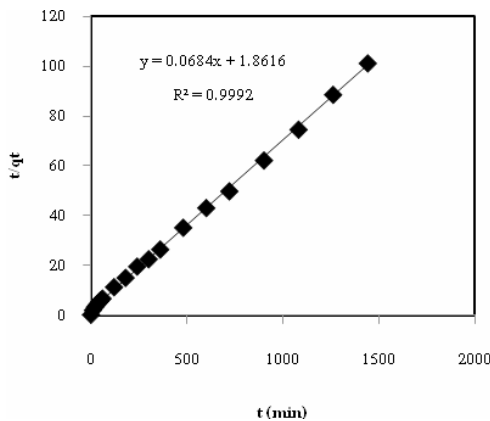
$$\frac{t}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

เมื่อสารละลายเกิดการผสมกับตัวดูดซับอย่างรวดเร็ว มีความเป็นไปได้ที่ตัวถูกดูดซับจะถ่ายโอนเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อนำผลการทดลองมาพหุคูณกับสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน [12] และหากผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองนี้ แสดงว่า ขั้นตอนการแพร่เข้าสู่รูพรุนเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการที่ 7

$$q_t = k_p t^{1/2} + C \quad (7)$$

ที่ซึ่ง k_p คือ ค่าคงที่ของการเข้าสู่รูพรุน ($\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{min}^{1/2})$) และ C คือค่าคงที่ (mg/g) ซึ่งจะให้รายละเอียดเกี่ยวกับความหนาของชั้น Boundary layer

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับเชิงจลนพลศาสตร์มาพล็อตกราฟตามสมการอันดับหนึ่งเทียม สมการอันดับสองเทียม และสมการการแพร่เข้าสู่พอร์ พบว่า ข้อมูลผลการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม มากกว่าสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และสมการการแพร่เข้าสู่พอร์ โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 2



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแบบจำลองเชิงจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมของการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย (C_0 : 200 mg/L, 200 rpm และ pH 6.0±1)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม อันดับสองเทียม และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่พอร์ของการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

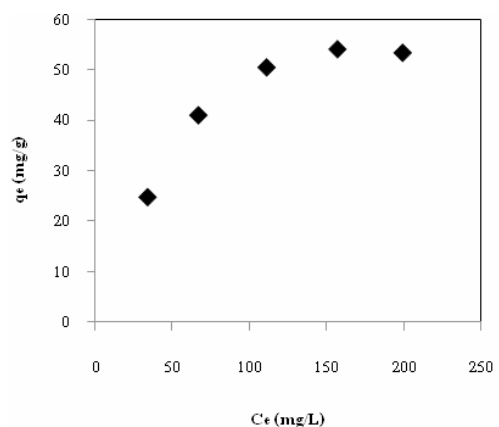
ตัวแปร	ค่าตัวแปร
q_e ทดลอง (mg/g)	14.47
สมการอันดับหนึ่งเทียม	
k_1 (min^{-1})	5.27×10^{-3}
q_e คำนวณ (mg/g)	7.99
R^2	0.9230
สมการอันดับสองเทียม	
k_2 ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$)	2.51×10^{-3}
q_e คำนวณ (mg/g)	14.62
R^2	0.9992
สมการการแพร่เข้าสู่พอร์	
k_p ($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})^{1/2}$)	0.290
C (mg/g)	6.05
R^2	0.7297

รูปที่ 9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการพล็อตผลการทดลองกับสมการอันดับสองเทียมซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ

0.9992 นอกจากนี้ค่าคงที่ของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (4) สมการที่ (6) และสมการที่ (7) จะถูกคำนวณและแสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งให้เห็นว่า ขั้นตอนการเกิดการยึดเหนี่ยวของสรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุดหรือเป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate of limiting step)

3.4 ไอโซเทอมการดูดซับ

อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับ (ไม่ได้แสดงรูป) เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จนกระทั่งที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 211 mg/L ปริมาณการดูดซับจะเริ่มคงที่ ซึ่งให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่มีมวล 0.1 g จะเริ่มอิ่มตัวไปด้วยสรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 211 mg/L



รูปที่ 10 ไอโซเทอมการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย (C_0 : 50-200 mg/L, 200 rpm และ 24 hr)

เพื่อทำนายพฤติกรรมการดูดซับของสีย้อมบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ไอโซเทอมการดูดซับซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_e) จะถูกพล็อต ดังแสดงในรูปที่ 10 นอกจากนี้ข้อมูลการดูดซับที่สมดุลจะถูกนำไปพล็อตกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมแบบฟรอนด์ิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมแลงเมียร์ [22] มีสมมติฐานว่าตัวถูกดูดซับจะเข้าไปปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 8

$$q_e = \frac{k_L q_{\max} C_e}{1 + k_L C_e} \quad (8)$$

โดย $q_{\max}$ คือ ปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (mg/g) และ k_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์

สำหรับการหาค่าคงที่ในสมการที่ 3 สามารถทำได้ โดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e โดยจัดรูปสมการที่ 8 ให้อยู่ในรูปเส้นตรงใช้สมการที่ 9 ได้แก่

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{k_L q_{\max}} + \frac{C_e}{q_{\max}} \quad (9)$$

เมื่อหาค่า 1/ความชัน จะได้ค่า $q_{\max}$ และทำการหาค่า k_L จาก 1/จุดตัดแกน C_e/q_e แล้วแทนค่า $q_{\max}$ ที่ได้

นอกจากนี้ ยังมีตัวแปรที่มีความสำคัญของไอโซเทอมแลงเมียร์ ได้แก่ ค่าปัจจัยการแยก (separation factor) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ R_L ซึ่งนิยามในสมการที่ 10

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (10)$$

ค่า R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (favorable) ขณะที่ค่า $R_L \geq 1$ หรือ $R_L = 0$ จะชี้ให้เห็นว่า การดูดซับสีย้อมเกิดขึ้นได้ไม่ดีหรือเป็นไอโซเทอมที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible adsorption isotherms) ค่า R_L ในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่า R_L ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (favorable)

ไอโซเทอมฟรุนดลิช [22] มีสมมติฐานว่า ตัวถูกดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้น ๆ (multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) ดังสมการที่ 11

$$q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (11)$$

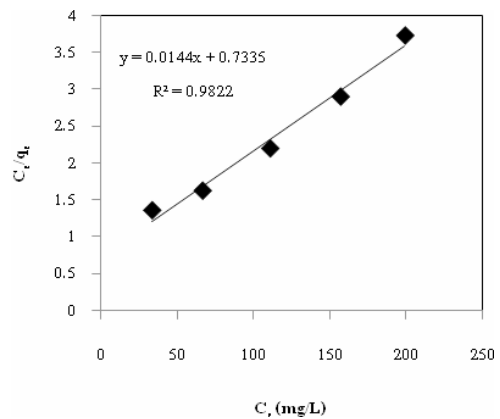
ค่าคงที่ k_f คือค่าคงที่ของการดูดซับ ((mg^{1-1/n} · L^{1/n})/g) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานพันธะ และ n เป็นค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ถ้า $n > 1$ แสดงว่า มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ถ้า n เข้าใกล้ 0 แสดงว่าพื้นผิว

ของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง

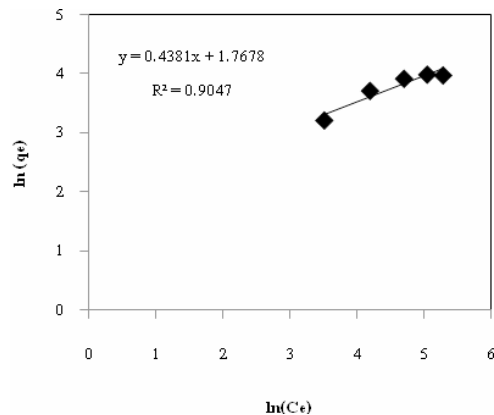
ค่าคงที่ของไอโซเทอมฟรุนดลิช สามารถหาได้ โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e)$ กับ $\ln(C_e)$ โดยใช้สมการที่ 12 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการที่ 11 ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง

$$\ln(q_e) = \ln(k_f) + \frac{1}{n} \ln(C_e) \quad (12)$$

เมื่อหาค่า 1/ความชัน จะได้ค่า n และค่าคงที่ k_f หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของค่าจุดตัดแกน $\ln(q_e)$



รูปที่ 11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

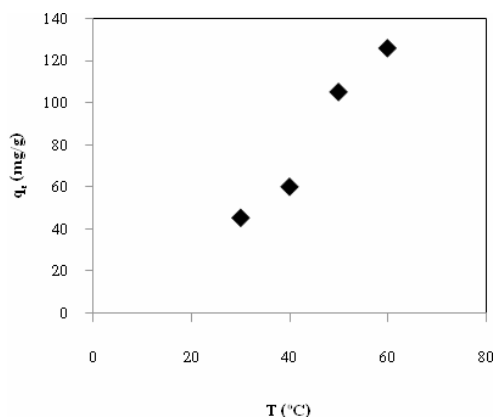


รูปที่ 12 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์จากชานอ้อย

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิซของการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์	
k_L (L/g)	1.96×10^{-2}
q_m (mg/g)	69.44
R_L	2.90×10^{-3} ถึง 1.24×10^{-2}
R^2	0.9822
ไอโซเทอมแบบฟรุนดิซ	
$k_f ((\text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{L}^{1/n})/\text{g})$	5.86
n	2.28
R^2	0.9047

รูปที่ 11 และ 12 แสดงการพล็อตข้อมูลผลการทดลองเชิงสมดุลกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดิซ ตามลำดับ พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิซ โดยพิจารณาจากค่า R^2 แสดงว่า สีย้อมเข้าไปยึดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในลักษณะเป็นชั้นเดียว (monolayer) และมีปริมาณการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด เท่ากับ 69.44 mg/g



รูปที่ 13 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย (C_0 : 50-200 mg/L, 200 rpm และ 24 hr)

3.5 อิทธิพลของอุณหภูมิ

รูปที่ 13 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อย พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 45.26 mg/g ไปเป็น 125.79 mg/g เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 °C ไป

เป็น 60 °C แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการดูดความร้อน (endothermic process)

การเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถซึมผ่านหรือแพร่เข้าสู่พรมภายในถ่านกัมมันต์มากขึ้น หรือเนื่องจากการเกิด Active site ใหม่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ก่อนหน้านี้ [23 - 25]

4. สรุป

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร KOH เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1675 m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 2.74 nm ซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็ก

ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (<5%) เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แสดงว่า สีย้อมถูกยึดเหนี่ยวบนถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวชนิดที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic-hydrophobic interaction) เป็นแรงยึดเหนี่ยวหลัก

ผลการทดลองเชิงจลนพลศาสตร์มีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเทียม แสดงว่า ขั้นตอนในการสร้างแรงยึดเหนี่ยวบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุด หรือเป็นขั้นกำหนดอัตรา ผลการทดลองเชิงสมดุลมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ แสดงว่า สีย้อมถูกยึดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ในลักษณะเป็นชั้นเดียว และมีการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด เท่ากับ 69.44 mg/g

จากผลการทดลองข้างต้น ชี้ให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากชานอ้อยเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสรีแอคทีฟแบล็ค 5 จากน้ำสีสังเคราะห์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาชีพวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในการสนับสนุนสถานที่และเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ip, A.W.M., Barford, J.D. and McKay, G. 2010. A comparative study on the kinetics and mechanism of removal of Reactive Black 5 by adsorption onto activated carbons and bonechar. *Chemical Engineering Journal*, 157(2-3): 434-442.
- [2] Chatterjee, S., Chatterjee, T. and Woo, S.H. 2011. Influence of the polyethyleneimine grafting on the adsorption capacity of chitosan beads for Reactive black 5 from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*, 166: 168-175.
- [3] El-Barghouthi, M.I., El-Sheikh, A.H. and Al-Degs, Y.S. and Walker, G.M. 2007. Adsorption behavior of anionic reactive dyes on H-type activated carbon: Competitive adsorption and desorption studies. *Chemical Engineering Journal*, 42: 2195-2220.
- [4] Vandevivere, P., Bianchi, R. and Verstraete, W. 1998. Review: Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies. *J. Chemical Technology and Biotechnology*, 72: 289-302.
- [5] Chuah, T.G., Jumasiah, I., Azni, S. and Katayon, S.Y. 2005. Rich husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: an overview. *Desalination*, 175: 305-316.
- [6] Wu, F.-C., Tseng, R.-L. and Hu, C.-C. 2005. Comparisons of pore properties and adsorption performance of KOH-activated and steam-activated carbons. *Microporous and Mesoporous Materials*, 80: 95-106.
- [7] Kalderis, D., Bethanis, S., Paraskeva, P. and Diamadopoulos, E. 2008. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. *Bioresource Technology*, 99: 6809-6816.
- [8] Chen, Y., Huang, B., Huang, M. and Cai, B. 2011. On the preparation and characterization of activated carbon from mangosteen shell. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42: 837-842.
- [9] Matos, J., Nahas, C., Rojas, L. and Rosales, M. 2011. Synthesis and characterization of activated carbon from sawdust of Algarroba wood. 1. Physical activation and pyrolysis. *Journal of Hazardous Materials*, 196: 360-369.
- [10] Figaro, S., Avril, J.P., Brouers, F., Ouensanga, A. and Gaspard, S. Adsorption studies of molasse's wastewater on activated carbon: Modeling with a new fractal kinetic equation and evaluation of kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*, 161: 649-656.
- [11] Amin, N. K. 2008. Removal of reactive dye from aqueous solutions by adsorption onto activated carbons prepared from sugarcane bagasse pith. *Desalination*, 223: 152-161.
- [12] Noonpui, S., Thiravetyan, P., Nakbanpote, W. and Netpradit S., Color removal from water-based ink wastewater by bagasse fly ash, sawdust fly ash and activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 162: 503-508.
- [13] Hameed, B.H. and Ahmad, A.A. 2010. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175: 298-303.
- [14] Seader, J.D. and Henley, E.J. 1998. Separation process principles, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- [15] Gregg, S. and Sing, K. 1982. Adsorption, surface and porosity, 2nd Ed.; Academic Press.
- [16] Haghseresht, H. and Lu, G. 1998. Adsorption characteristics of phenolic compounds onto coal-rejected-derived adsorbents. *Energy and Fuels*, 12: 1100-1107.
- [17] Guzel, f. and Tez, Z. 1993. The characterization

of the micropore structure of some activated carbon of plant origin by N₂ and CO₂ adsorption. Separation and Science and Technology, 28: 1609-1627.

- [18] Newcombe, G. and Drikas, M. 1997. Adsorption of NOM activated carbon: electrostatic and NON-electrostatic effects. Carbon, 35: 1239-1250.
- [19] Almeida, C.A.P., Debacher, N.A., Downs, A.J., Cottet, L. and Mello, C.A.D. 2009. Removal of methylene blue from colored effluents by adsorption on montmorillonite clay, Journal of Colloid Interface Science, 332: 46-53.
- [20] Lagegren, S. and Svenska, B.K. 1898. Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe. Vaternskapsakad Handlingar, 24(4): 1-39.
- [21] Ho, Y.S. and McKay, G. 1998. Sorption of dye from aqueous solution by peat, Chemical Engineering Journal, 70: 115-124.
- [22] R. Wibulswas. 2004. Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite. Separation and Purification Technology, 39. 3-12.
- [23] Wang, L. 2012. Application of activated carbon derived from 'waste' bamboo culms for the adsorption of azo disperse dye: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Journal of Environmental Management, 102: 79-87.
- [24] Deniz, F. and Karaman, S. 2011. Removal of an azo-metal complex textile dye from colored aqueous solutions using an agro-residue. Microchemical Journal, 99(2): 296-302.
- [25] Saeed, A., Sharif, M. and Iqbal, M. 2010. Application potential of grapefruit peel as dye sorbent: kinetics, equilibrium, and mechanism of crystal violet adsorption. Journal of Hazardous Materials, 179, 564-572.