

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา

Adsorption of Reactive Black 5 dye on

Activated Carbon Prepared from Water Hyacinth

จักรกฤษณ์ อัมพฤษ์¹ ฐิตาพร คำภู¹ นันทกานต์ ทองเฟื่อง¹ สุจิตรา แก้วศิริ¹

อิทธิศักดิ์ เกาโพธิ์¹ ไท แสงเทียน² และพุทธพร แสงเทียน¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*Email: chakkrit.u@ubu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาศักยภาพของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา โดยการกระตุ้นทางเคมีเพื่อใช้ดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 คุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ IR-spectra BET-method และภาพ SEM การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับแบบกะ พบว่า การดูดซับเพิ่มขึ้นกับเวลาและเข้าสู่สมดุลที่ 150 นาที ค่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการดูดซับ ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม การคายซับเกิดขึ้นได้โดยใช้ตัวทำละลายอะซิโตนไนไตรท์ นอกจากนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ส่วนที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับในเบดนิ่ง พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบดนิ่งและอัตราการไหลเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณการดูดซับลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5

คำหลัก: สีรีแอคทีฟแบล็ค 5 การดูดซับ ผักตบชวา ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นทางเคมี

Abstract

This research was focused on a potential of using activated carbon prepared from water hyacinth by means of chemical activation for adsorbing reactive black 5 dye. The physical properties of the adsorbent were analyzed by IR-spectra, BET-method and SEM image. Experiments were divided into two parts: batch experiments and a fixed-bed column. In batch experiments, it was found that adsorption was dependent on the solution pH. However, the adsorption capacity increased with increasing in the initial concentration of the dye, and the contact time, therefore, the equilibrium was obtained at 150 minute. Meanwhile, the desorption occurred when using acetonitrile as eluent. Furthermore, the results were in accordance with pseudo-second order kinetic model and Freundlich isotherm. In the fixed-bed column, the adsorption capacity increased with increasing in bed height as well as flow rates while decreased with increasing in initial dye concentration. From the results above showed that the activated carbon prepared from water hyacinth was effective for adsorption of reactive black 5.

Keywords: Reactive black 5; Adsorption; Water hyacinth; Activated carbon; Chemical activation

บทนำ

ปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในเขตพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง กำลังทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการขยายตัวของอุตสาหกรรมสิ่งทอในครัวเรือนอย่างรวดเร็ว และมีการใช้สีย้อมเคมีสังเคราะห์ที่ย่อยสลายเองตามธรรมชาติได้น้อย สีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 เป็นสีย้อมเคมีสังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้มากเนื่องจากมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ย้อมติดง่ายรวดเร็วมีสีสดใสและติดทนนาน [1], [2] แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการปนเปื้อนของสีย้อมชนิดนี้ลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติในปริมาณมากจะทำให้แหล่งน้ำนั้นมีทัศนียภาพที่ไม่สวยงามเกิดการเน่าเสีย ส่งผลต่อการเจริญของสิ่งมีชีวิตในน้ำ เนื่องจากสีย้อมมีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงทนทานต่อความร้อนและแสงแดด และย่อยสลายเองตามธรรมชาติได้น้อย ดังนั้นจำเป็นต้องทำการกำจัดสีย้อมชนิดนี้ก่อนปล่อยสู่แหล่งรองรับทางธรรมชาติ

สีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 ประกอบไปด้วยหมู่อะโรมาติกที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอะโซ (-N=N-) จึงยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม เช่น กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (advanced oxidation) กระบวนการไฟฟ้าเคมี (electrochemical degradation) กระบวนการโอโซนเนชัน (ozonation) และการย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้ออกซิเจน (aerobic biodegradation) [3], [4] แม้ว่ากระบวนการทางเคมีและทางชีวภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมสูง แต่วิธีการเหล่านี้ต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆ ค่อนข้างจำเพาะ ต้องใช้พลังงานสูง และต้องควบคุมสภาวะการดำเนินระบบให้คงที่ นอกจากนี้ กระบวนการเหล่านี้อาจสร้างของเสียทุติยภูมิ (secondary pollutant) ออกมาด้วย [4] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษากระบวนการทางกายภาพ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนต่ำ ไม่ซับซ้อน และรวดเร็ว ซึ่งเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมาก ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อม ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถเตรียมได้จากวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ เช่น ของเสียทางการเกษตรชานอ้อย ผักตบชวา ชีวมวล ไม้ ยางพารา กระดาษ เปลือกผลไม้ และกากกาแฟ เป็นต้น [5 -9]

ผักตบชวา (water hyacinth) เป็นวัชพืชที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง ทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว พบอยู่เป็นจำนวนมากในพื้นที่รับน้ำรอบๆ แม่น้ำมูล และก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ เช่น กีดขวางทางจราจรทางน้ำ เกิดทัศนียภาพไม่สวยงาม เป็นอุปสรรคต่อการเจริญเติบโตของปลา ชาวบ้านที่อาศัยอยู่ใกล้แหล่งน้ำต้องประสบกับปัญหาการใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำผักตบชวาเหล่านี้มาดัดแปรเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีรูพรุนและที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมให้ชาวบ้านเก็บเกี่ยวผักตบชวาจากแหล่งน้ำ เพื่อนำมาดัดแปรเป็นวัสดุที่มีมูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการดูดซับสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 จากน้ำสีสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ เวลาสัมผัส ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เป็นต้น นอกจากนี้ยังทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับและไอโซเทอมการดูดซับด้วย และศึกษาการดูดซับในคอลัมน์เบดนิ่ง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในชุมชน

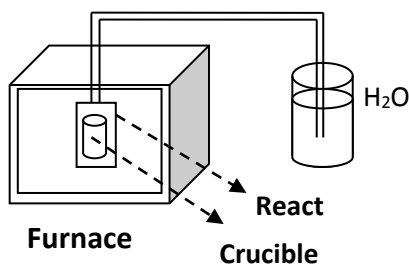
วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเตรียมถ่านกัมมันต์

ผักตบชวาที่ใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ เก็บเกี่ยวจากพื้นที่รับน้ำแหล่งหนึ่งรอบๆ แม่น้ำมูล ในเขตอำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งจะถูกนำมาล้างทำความสะอาดแล้วนำไปตากแดดจนแห้งอบไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C จนกระทั่งน้ำหนักของผักตบชวาคงที่ หลังจากนั้นนำผักตบชวาไปเผาให้เป็นถ่านชาร์ (char) ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิ 450 °C นาน 1 ชั่วโมง ภายในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 1 หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นภายในถังปฏิกรณ์

ถ่านชาร์จากผักตบชวาที่ได้จะถูกนำมามากระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี (chemical activation) โดยนำถ่านชาร์ไปผสมกับสาร KOH ในอัตราส่วนถ่านชาร์ต่อสาร KOH เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเผาภายใต้สภาวะไร้อากาศภายในถังปฏิกรณ์อีกครั้งที่อุณหภูมิ 780 °C นาน 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นภายใน

ถึงปฏิกิริยา หลังจากนั้น นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยสารละลาย HCl เข้มข้น 20% โดยปริมาตรเพื่อกำจัดสาร KOH ที่ตกค้างอยู่บนถ่านกัมมันต์แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าพีเอชของน้ำล้างเท่ากับค่าพีเอชของน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นบดให้เป็นผง แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 mesh ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะถูกบรรจุไว้ในถุงพลาสติกแล้วเก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้น



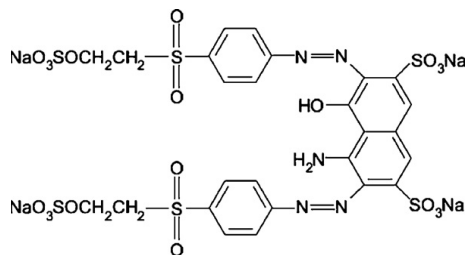
รูปที่ 1 ถึงปฏิกิริยาในการเตรียมถ่านกัมมันต์ [10]

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับและคายซับด้วยก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K โดยใช้เครื่อง Micromeritics ASAP2010 apparatus เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ พื้นที่ผิวภายนอก พื้นที่ผิวของรูพรุนขนาดเล็ก ปริมาตรรวมของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 nm) ปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 2 – 50 nm) และวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย โดยส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาจะถูกนำมาวิเคราะห์ IR-spectra ด้วยเครื่อง ATR (Attenuated total reflectance spectroscopy) และศึกษาลักษณะสัณฐานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

3. การเตรียมสารละลายสีย้อม

สีรีแอคทีฟแบบลิต 5 ยี่ห้อ Asia Pacific Specialty มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$ มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 991.82 g/mol [11] ความยาวคลื่นที่ดูดซึมแสงสูงสุด (λ_{max}) เท่ากับ 598 nm โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟแบบลิต 5 แสดงไว้ในรูปที่ 2 สารละลายสต็อก (Stock solution) เข้มข้น 1,000 mg/L จะถูกเตรียมโดยทำการละลายสีรีแอคทีฟแบบลิต 5 จำนวน 1.0 g ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 L หลังจากนั้นทำการเตรียมสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามที่ต้องการ โดยวิธีการเจือจาง วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมด้วยการสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard curve) ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับความเข้มข้นของสีย้อม วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis-Spectrophotometer



รูปที่ 2 โครงสร้างโมเลกุลของสีรีแอคทีฟแบบลิต 5 [12]

4. การดูดซับแบบกะ

การทดลองการดูดซับแบบกะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส นำสารละลายสีย้อมเข้มข้น 450 mg/L ปริมาตร 100 ml มาเติมลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมถ่านกัมมันต์ลงไป 0.1 g ปิดปากขวดรูปชมพู่ด้วยกระดาษฟอยล์ เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm ที่อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่างทุก ๆ 10 นาที ใน 1 ชั่วโมงแรก จากนั้นเก็บตัวอย่างทุก ๆ 30 นาที จนกว่าความเข้มข้นของสีย้อมจะคงที่ จากนั้นนำตัวอย่างกรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำสารละลายส่วนที่ใสไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ทำการทดลองเหมือนกับการทดลอง

ส่วนแรก แต่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายซีอีเอ็ม ในช่วง 2 – 10 โดยปรับค่าพีเอชด้วยสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M และ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 M แล้วเขย่า เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของ ความเข้มข้นเริ่มต้น ทำการทดลองเหมือนกับการ ทดลองส่วนแรก แต่เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้น ของซีอีเอ็มในช่วง 50 – 450 mg/L และปรับค่า pH เท่ากับ 6.0 ± 0.5 แล้วเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การ ทดลองส่วนสุดท้าย ศึกษาการคายซับ นำตัวดูดซับที่ ผ่านการดูดซับซีอีเอ็มที่พีแบล็ค 5 จำนวน 0.1 กรัม มาทำการผสมกับตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.1 M ตัว ละลายอะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile) เข้มข้น 20 – 80 % โดยปริมาตร

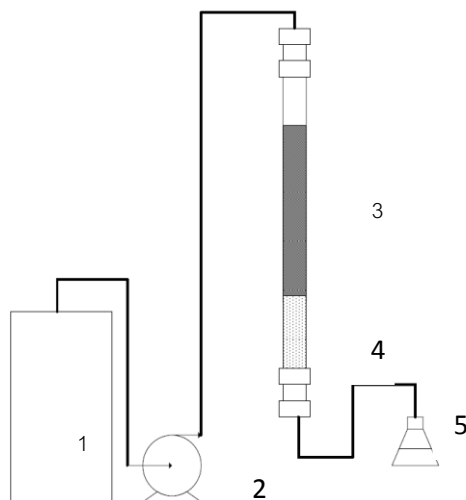
5. การดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่ง

หน่วยปฏิบัติการคอลัมน์เบตนิ่ง แสดงไว้ในรูป ที่ 3 ประกอบด้วยคอลัมน์แก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางด้าน ใน 1.5 cm สูง 40 cm ปลายด้านหนึ่งจะบรรจุด้วยใย แก้ว (glass wool) สูง 10 cm และปลายอีกด้านหนึ่ง บรรจุของผสมระหว่างทรายละเอียดที่ร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 300 mesh กับถ่านกัมมันต์ให้มีสัดส่วน 1.5 เปอร์เซ็นต์ตัวดูดซับต่อน้ำหนักทรายที่ความสูงค่าหนึ่ง จากนั้นต่อท่อสายยางเชื่อมปลายคอลัมน์ทั้งสองด้าน โดยปลายด้านหนึ่งเชื่อมกับขวดเก็บตัวอย่าง และ ปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อกับ Peristaltic pump เพื่อ ป้อนสารละลายซีอีเอ็มจากถังเก็บสารละลายตั้งต้น

การดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น เริ่มต้นทำการบรรจุของผสมถ่านกัมมันต์กับทราย ละเอียดในคอลัมน์ให้มีความสูง 6 cm ป้อนสารละลายซี อีเอ็มเข้มข้นในช่วง 100 - 450 mg/L ด้วยอัตรา การไหล 5 mL/min ณ อุณหภูมิห้อง เก็บตัวอย่าง ทุกๆ 10 นาที บันทึกปริมาตรของตัวอย่าง นำไปกรอง ผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน หลังจากนั้น นำสารละลายส่วนที่ใส่ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของซี

อีเอ็ม เก็บตัวอย่างไปจนกระทั่งตัวอย่างมีความเข้มข้น ของซีอีเอ็มเท่ากับ 95% ของความเข้มข้นเริ่มต้น

ส่วนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของความสูงของเบ ตนิ่งทำการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนแรก แต่ ให้สารละลายซีอีเอ็มเข้มข้นเริ่มต้น 200 mg/L ทำการ เปลี่ยนแปลงความสูงของเบตนิ่งในช่วง 4 – 8 cm การ ทดลองส่วนสุดท้ายการศึกษาอิทธิพลของอัตราการ ไหล ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองส่วนที่ 2 แต่ กำหนดความสูงของของผสมเท่ากับ 6 cm และ เปลี่ยนแปลงอัตราการไหลในช่วง 1 – 5 mL/min



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของคอลัมน์เบตนิ่ง (หมายเลข 1 ถึงเก็บสารละลายซีอีเอ็มเริ่มต้น หมายเลข 2 Peristaltic pump หมายเลข 3 ของผสมตัวดูดซับกับทรายละเอียด หมายเลข 4 ใยแก้ว และ หมายเลข 5 ขวดเก็บตัวอย่าง) [13]

6. การคำนวณ

ปริมาณการดูดซับที่เวลาใดๆ (q_t : mg/g) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และเปอร์เซ็นต์การ กำจัด (%removal) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2

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

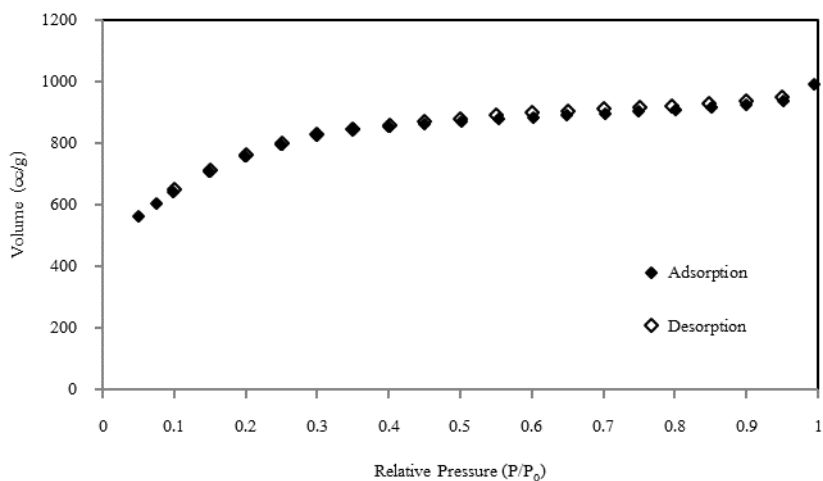
$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

โดย C_0 คือความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (mg/L) C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาใดๆ m คือปริมาณของตัวดูดซับ (g) และ V คือปริมาตรของสารละลาย (L) นอกจากนี้คำนวณปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e , mg/g) ได้โดยเปลี่ยนตัวแปร C_t ในสมการที่ 1 เป็น C_e ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล (mg/L)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติตัวดูดซับ

รูปที่ 4 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาที่อุณหภูมิ 77 K พบว่า เส้นกราฟไอโซเทอมมีลักษณะ



รูปที่ 4 ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับของก๊าซไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา

รูปที่ 5 แสดง IR-Spectra ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา พบว่า IR-Spectra ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวามีพีคปรากฏขึ้นที่ $2,720\text{ cm}^{-1}$, $1,572\text{ cm}^{-1}$, $1,063\text{ cm}^{-1}$ และ 598 cm^{-1} ซึ่งให้เห็นถึงการปรากฏอยู่ของหมู่ฟังก์ชัน C-H (aldehydes) หมู่ฟังก์ชัน C=C

เป็นแบบ Type I โดยจำแนกตามระบบของ IUPAC [14] อธิบายได้ว่า ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มีประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็ก และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แสดงไว้ในตารางที่ 1 พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ($2,594\text{ m}^2/\text{g}$) เป็นวัสดุที่มีรูพรุนโดยพิจารณาจากปริมาตรรวมของรูพรุนเท่ากับ $1.54\text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กเท่ากับ $1.41\text{ cm}^3/\text{g}$ และปริมาตรของรูพรุนขนาดกลางเท่ากับ $0.13\text{ cm}^3/\text{g}$ ซึ่งให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นองค์ประกอบหลัก และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 2.37 nm

(Stretching band) และ หมู่ฟังก์ชัน C-O (Carboxylic acids, alcohols, phenols and esters) และ C-C Stretching ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยที่พบก่อนหน้านี้ [16] – [18]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
พื้นที่ผิวจำเพาะ ^a (m ² /g)	2,594
พื้นที่ผิวภายนอก ^b (m ² /g)	1,116
พื้นที่ผิวภายในรูพรุนขนาดเล็ก ^c (m ² /g)	1,479
ปริมาตรรวมของรูพรุน ^d (cm ³ /g)	1.54
ปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็ก ^e (cm ³ /g)	1.41
ปริมาตรของรูพรุนขนาดกลาง ^f (cm ³ /g)	0.13
เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย ^g (nm)	2.37

หมายเหตุ

^aคำนวณจากสมการของ BET isotherm[15]

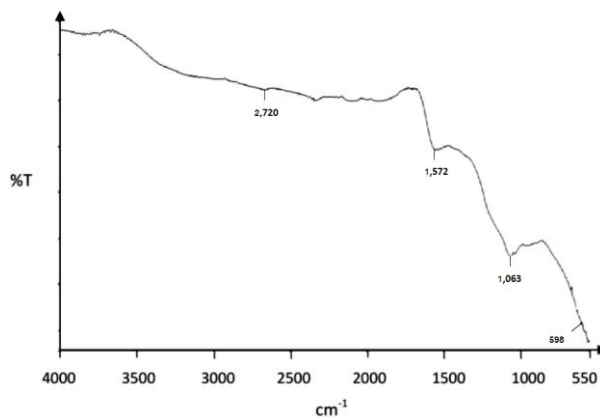
^{b,c}คำนวณจาก t-plot [15]

^dคำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ P/P₀ = 0.95 [16]

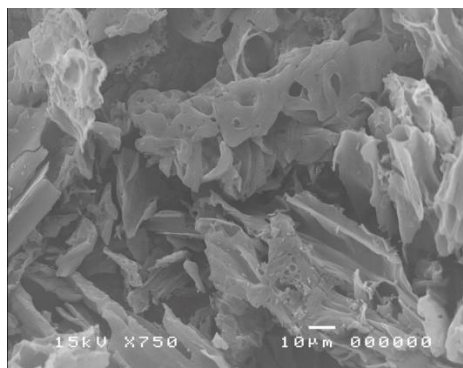
^eคำนวณตามวิธีของ Dubinin-Radushkevich [17]

^fคำนวณจากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ P/P₀ระหว่าง 0.40-0.95 โดยสมมติให้ปริมาตรเชิงโมลของไนโตรเจนเหลวเป็น 35 cm³/mol [18]

^gคำนวณตามวิธีของ Barrett-Joyner-Hanlenda (BJH) [15]



รูปที่ 5 IR-Spectra ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา



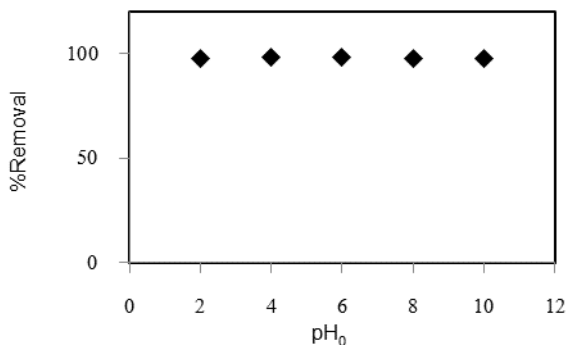
รูปที่ 6 ภาพถ่าย SEM ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา

นอกจากนี้ รูปที่ 6 แสดงภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา พบว่า พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวามีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 1

2. อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้น

รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับ พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมไม่ขึ้นกับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายโดยทั่วไป สิริแอ็คทีฟแบบลิต 5 เป็นสีย้อมที่มีประจุลบจะถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวซึ่งจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่ 1 แรงยึดเหนี่ยวที่อ่อนได้แก่ แรง van der Waals และประเภทที่ 2 แรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงประกอบไปด้วย 1) แร

ดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุลบของสีย้อม (ประจุลบของหมู่ SO_3^-) และประจุบวกบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (เช่น ประจุบวกของหมู่เอมีน [3]) 2) พันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมของออกซิเจนและไนโตรเจนที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชันนอลของสีย้อมและถ่านกัมมันต์ 3) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic-Hydrophobic interaction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำของสีย้อมและส่วนที่ไม่ชอบน้ำของถ่านกัมมันต์หรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอน [3] และ 4) แรงยึดเหนี่ยว π - π stacking นั่นคือ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกของสีริแอ็คทีฟแบบลิต 5 ยึดเหนี่ยวกับ π อิเล็กตรอนของวงแหวนอะโรมาติกบนพื้นผิวของถ่านคาร์บอน [19]



รูปที่ 7 อิทธิพลของค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายต่อการดูดซับสีริแอ็คทีฟแบบลิต 5 บนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (C₀: 450mg/L, 200 rpm และเขย่า 24 hr)

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ส่งผลกระทบบต่อปริมาณการดูดซับค่อนข้างน้อย นั่นคือ การเพิ่มหรือลดปริมาณของประจุบวกและประจุลบในสารละลายไม่ส่งผลกระทบบต่อปริมาณการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงประจุในสารละลายไม่สามารถส่งผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยว hydrophobic-hydrophobic interaction และแรงยึดเหนี่ยว π - π stacking [A] ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวทั้ง 2 ชนิดนี้จึงเป็นแรงยึดเหนี่ยวหลักที่มีความสำคัญมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวชนิดอื่นๆ

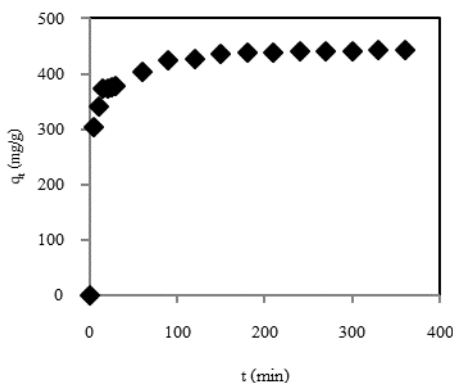
3. อิทธิพลของเวลาสัมผัส

รูปที่ 8 แสดงอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อปริมาณการดูดซับสีริแอ็คทีฟแบบลิต 5 ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก หลังจากนั้นการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับจะเริ่มช้าลง และเข้าสู่สภาวะสมดุลที่เวลา 150 นาที การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณการดูดซับในช่วงแรก เนื่องมาจากพื้นผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ก่อนเกิดการดูดซับไม่

มีสีย้อมยึดติดผิวอยู่ จึงสามารถดูดซับสีย้อมไว้บนพื้นผิวภายนอกได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พื้นที่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ถูกปกคลุมไปด้วยสีย้อมจนหมดแล้ว โมเลกุลของสีย้อมจึงแพร่เข้าไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนของตัวดูดซับซึ่งเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอนแรกข้างต้น ทำให้อัตราการดูดซับลดลง [20]

4. จลนพลศาสตร์การดูดซับ

เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีรีแอ็คทีฟแบบลิก 5 บนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา ผลการทดลองจะถูกนำมาพล็อตกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) และสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Intraparticle diffusion model)



รูปที่ 8 อิทธิพลของเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับสีรีแอ็คทีฟแบบลิก 5 บนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (C_0 : 450mg/L, 200 rpm และ pH 6.0 ± 0.5)

แบบจำลองการดูดซับเชิงพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองอย่างง่าย [21] โดยมีสมมติฐานว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของตัวดูดซับที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ

จำนวนของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ว่างจากตัวถูกดูดซับ ถ้าข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมแสดงว่าขั้นตอนการซึมของสีย้อมผ่านชั้น Boundary layer ที่ห่อหุ้มตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตรา (Rate of limiting step) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 3

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

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

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

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

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

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

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

เมื่อสารละลายที่ผสมตัวดูดซับมีการผสมกันอย่างรวดเร็ว มีความเป็นไปได้ที่ตัวถูกดูดซับจะถ่ายโอนเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ เมื่อนำผลการทดลองมาพล็อตกับสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน[22] และถ้าผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองนี้แสดงว่า 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

เมื่อนำข้อมูลการดูดซับเชิงจลนพลศาสตร์มาพล็อตกราฟตามสมการอันดับหนึ่งเทียบกับสมการอันดับสองเทียบกับและสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน พบว่า ข้อมูลผลการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียบกับมากกว่าสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียบกับและสมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน โดยพิจารณาจากค่า R^2 ในตารางที่ 2

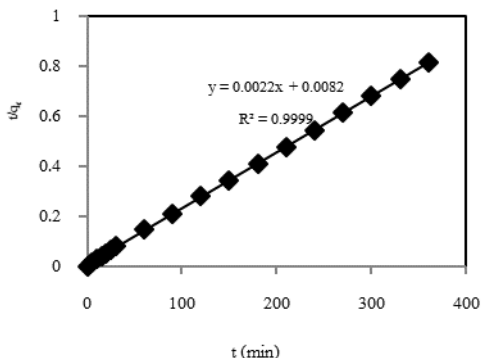
รูปที่ 9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของการพล็อตผลการทดลองกับสมการอันดับสองเทียบกับซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9992 นอกจากนี้ค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ ในสมการที่ (4) สมการที่ (6) และสมการที่ (7) จะถูกคำนวณและแสดงไว้ในตารางที่ 2 ซึ่งให้เห็นว่า ขั้นตอนการสร้างแรงยึดเหนี่ยวของสรีรีแอคทีฟแบบลิค 5 กับพื้นผิวของของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาเป็นขั้นตอนที่เกิดขั้นช้าที่สุดหรือเป็นขั้นกำหนดอัตรา (rate of limiting step)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่งเทียบกับ อันดับสองเทียบกับ และแบบจำลองการแพร่เข้าสู่รูพรุนของการดูดซับสรีรีแอคทีฟแบบลิค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
q_0 ทดลอง (mg/g)	442.20
สมการอันดับหนึ่งเทียบกับ	
k_1 (min^{-1})	1.84×10^{-2}
q_0 คำนวณ (mg/g)	126.47
R^2	0.9553
สมการอันดับสองเทียบกับ	
k_2 ($\text{g}/(\text{mg}\cdot\text{min})$)	2.51×10^{-3}
q_0 คำนวณ (mg/g)	454.55
R^2	0.9999
สมการการแพร่เข้าสู่รูพรุน	
k_p ($\text{g}/\text{mg}\cdot\text{min}^{1/2}$)	11.90
C (mg/g)	266.36
R^2	0.4862

5. อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้น

อิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับ (ไม่ได้แสดงรูป) เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้นปริมาณการดูดซับจะเพิ่มสูงขึ้นในลักษณะเส้นตรง ซึ่งให้เห็นว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสูงกว่า 450 mg/L ถ่านกัมมันต์ที่มีมวล 0.1 g มีแนวโน้มว่าจะสามารถดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบบลิค 5 ได้สูงขึ้นอีก



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของแบบจำลองเชิงจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียมของการดูดซับสีรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บน ถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา

6. ไอโซเทอมการดูดซับ

เพื่อทำนายพฤติกรรมของการดูดซับของสีย้อมบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา ไอโซเทอมการดูดซับซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ (q_e) กับความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (C_e) จะถูกพล็อต ดังแสดงในรูปที่ 8 นอกจากนี้ข้อมูลการดูดซับที่สมดุลจะถูกนำไปพล็อตกับสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมแลงเมียร์ [23] มีสมมติฐานว่าตัวดูดซับจะเข้าไปปกคลุมพื้นผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับเกิดขึ้นซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 8

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

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

สำหรับการหาค่าคงที่ในสมการที่ 8 สามารถทำได้โดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง 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 $1/\text{ความชัน}$ จะได้ค่า q_{\max} และทำการหาค่า k_L จาก $1/\text{จุดตัดแกน } C_e/q_e$ แล้วแทนค่า q_{\max} ที่ได้

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

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

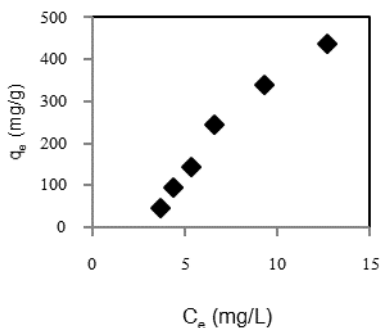
ค่า R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 แสดงว่า การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (Favorable) ขณะที่ค่า $R_L \geq 1$ หรือ $R_L = 0$ จะชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดีหรือเป็นไอโซเทอมที่ไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible adsorption isotherms) ค่า R_L ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่า R_L มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี (favorable)

ไอโซเทอมฟรุนดิช [22] มีสมมติฐานว่า ตัวดูดซับจะเข้าไปยึดจับกันเป็นชั้น ๆ (multilayer) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) ดังสมการที่ 11 ได้แก่

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

ค่าคงที่ k_f คือค่าคงที่ของการดูดซับ ((mg^{1-1/n}.L^{1/n})/g) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานพันธะและ n เป็นค่าคงที่ ซึ่ง

แสดงให้เห็นถึงแรงที่กระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า $n > 1$ แสดงว่า มีแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับด้วยตัวเอง ถ้า n เข้าใกล้ 0 แสดงว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันสูง



รูปที่ 10 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 บนถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา (C_0 : 50-200 mg/L, 200 rpm, 24 hr)

ค่าคงที่ของไอโซเทอมฟรุนดิช สามารถหาได้โดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e)$ 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/ความชันจะได้ค่า n และค่าคงที่ k_F หาได้จากค่าเอกซ์โพเนนเชียลของค่าจุดตัดแกน $\ln(q_e)$

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์และฟรุนดิชของการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา

ตัวแปร	ค่าตัวแปร
ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์	
k_L (L/g)	-
q_m (mg/g)	-
R_L	-
R^2	0.4411
ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช	
$k_f((\text{mg}^{-1/n} \cdot \text{L}^{1/n})/\text{g})$	6.89
n	0.58
R^2	0.9179

ตารางที่ 3 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการพล็อตผลการทดลองเชิงสมดุลกับสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์และสมการไอโซเทอมของฟรุนดิชตามลำดับ พบว่า ผลการทดลองมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดิช โดยพิจารณาจากค่า R^2 แสดงว่า สีย้อมเข้าไปยึดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในลักษณะหลายชั้น (multilayer) ผลการทดลองไม่มีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอ็คทีฟแบล็ค 5 กับถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัตถุดิบอื่นๆ พบว่า มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์ผลได้ของถ่านกัมมันต์จากผักตบชวา พบว่า ผักตบชวาแห้ง 100 กรัม เมื่อผ่านกระบวนการบอไนเซชัน (Carbonization) จะได้ถ่านชาร์ 36.2 กรัม เมื่อผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) จะได้ถ่านกัมมันต์ 6.52 กรัม ผลได้คิดเป็นร้อยละ 6.52 กรัม ถ่านกัมมันต์ต่อกรัมผักตบชวาแห้ง ถึงแม้ว่าถ่านกัมมันต์จากผักตบชวามีพื้นที่ผิวจำเพาะค่าสูง แต่มีร้อยละผลได้ต่ำ ดังนั้นถ่านกัมมันต์จากตบชวาในงานวิจัยนี้ยังไม่มีความเหมาะสมพอต่อการนำไปผลิตเชิงการค้า ยังต้องทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผลได้ต่อไป

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติต่าง ๆ

วัตถุดิบ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาณการดูดซับสูงสุด (mg/g)	อ้างอิง
Walnut wood	387	19.34	[24]
Fungi residue	684	19.60	[25]
Bamboo x2	2,123	281.2	[26]
Bamboo x6	1,400	441.7	[26]
Commercial Activated carbon felt	1,112	19.54	[27]
Palm shell	759.78	25.1	[28]
ผักตบชวา	2,594	442.20	งานวิจัยนี้

7. การคายซับ

พฤติกรรมการคายซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 จากถ่านกัมมันต์จากผักตบชวากับตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5 พบว่า น้ำ สารละลาย 0.1 M KOH และสารละลาย 0.1 M HCl ไม่สามารถทำให้เกิดการคายซับของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ได้ แต่เมื่อใช้สารละลายอะซิโตนไนไตรล์เป็นตัวทำละลาย จะทำให้เกิดการคายซับได้ โดยการคายซับจะเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 68.5% เมื่อความเข้มข้นของอะซิโตนไนไตรล์เท่ากับ 60 %v/v จากผลการทดลองข้างต้น ชี้ให้เห็นว่าการดูดซับเป็นกระบวนการไม่ย้อนกลับ (irreversible process) เมื่อใช้น้ำ เบส และกรด เป็นตัวทำละลาย เพราะตัวทำละลายเหล่านี้ไม่สามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับได้ กระบวนการดูดซับที่ไม่ย้อนกลับส่วนใหญ่จะเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี

ในอีกแง่มุมหนึ่ง สารละลายอะซิโตนไนไตรล์เป็นตัวทำละลายที่สามารถทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับได้ เนื่องจากอะซิโตนไนไตรล์ (CH₃CN) เป็นตัวทำละลายมีขั้วสูง และสามารถเข้าไป

ดูดซับบนพื้นผิวคาร์บอนด้วย π - π stacking เหมือนกันกับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ดังนั้น การเติมอะซิโตนไนไตรล์เข้าไปในระบบจึงเข้าไปรบกวนทำให้ความแข็งแรงของ π - π interaction ระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 กับพื้นผิวถ่านกัมมันต์น้อยลง และอะซิโตนไนไตรล์ยังทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงด้วย [19] ดังนั้น อะซิโตนไนไตรล์จึงสามารถชะละลายสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์บางส่วนให้หลุดออกมาได้

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวา

ชนิดของตัวทำละลาย	%การคายซับ
น้ำกลั่น	0
0.1 M KOH	0
0.1 M HCl	0
20%v/v Acetonitrile	54.6
40%v/v Acetonitrile	67.6
60%v/v Acetonitrile	68.5
80%v/v Acetonitrile	58.5

8. การดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่ง

ปริมาณการดูดซับทั้งหมด (q_{total}) ในคอลัมน์เบตนิ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 13 โดย Q คือ อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ (mL/min) และ C_{ad} คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่ถูกดูดซับในเบตนิ่ง (mg/L) [29]

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_{ad} dt \quad (13)$$

นอกจากนี้ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e , mg/g) ในคอลัมน์เบตนิ่งสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างค่า q_{total} กับปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในเบตนิ่ง จากตารางที่ 5 แสดงปริมาณการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์จากผักตบชวาในคอลัมน์เบตนิ่งที่สภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน

พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของเบตนิ่งและอัตราการไหลเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ปริมาณการดูดซับ ณ สภาวะสมดุล เท่ากับ 16.44 mg/g เกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 mg/L และความสูงของเบตนิ่ง 6 cm และอัตราการไหลผ่านคอลัมน์ 5 mL/min

ตารางที่ 6 ปริมาณการดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่งของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาที่สภาวะต่างๆ

C ₀ (mg/L)	H (cm)	Q(mL/min)	q _{total} (mg)	q _e (mg/g)
200	6	5	194.37	16.44
250	6	5	159.80	13.51
450	6	5	80.98	6.85
200	4	5	83.29	11.07
200	8	5	197.55	13.79
200	6	1	105.23	8.9
200	6	3	129.85	10.98

หมายเหตุ H คือ ความสูงของเบตนิ่ง (cm) และ Q คือ อัตราการไหลผ่านคอลัมน์ (mL/min)

สรุปและข้อเสนอแนะ

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากผักตบชวาโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยสาร KOH เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,594m²/g มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 2.37nm ซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่เป็นรูพรุนขนาดเล็กปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย แสดงว่า สีย้อมถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวชนิดที่ไม่ชอบน้ำเป็นแรงยึดเหนี่ยวหลัก

นอกจากนี้ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับอันดับสองเทียม และไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชปริมาณการดูดซับแบบเบตนิ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของเบตนิ่งและอัตราการไหล ขณะที่ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นเริ่มต้น จากผลการทดลองข้างต้น ชี้ให้เห็นว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียม

จากผักตบชวาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5 จากน้ำสีสังเคราะห์

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือวิเคราะห์ เพื่อใช้ในการวิจัย

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., Jumariah, 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 Diamadopoulou, 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] Umpuch, C. and Jutarat, B. 2012. "Adsorption behavior of reactive black 5 on activated carbon prepared from sugarcane bagasse". **UBU Engineering Journal**. 5(2): 10-21.
- [10] Umpuch C. 2015. "Removal of green 40 from aqueous solutions by adsorption using organo-corn straw". **KKU Engineering Journal**. 42(3): 250-257.
- [11] Amin, M. T., Alazba, A. A., and Shafiq, M. 2015. "Adsorptive removal of reactive black 5 from wastewater using bentonite clay: Isotherms, kinetics and thermodynamics". **Sustainability**. 7: 15302-15318.
- [12] Umpuch C., Sakaew, S. 2012. "Removal of methyl orange from synthetic wastewater onto chitosan-coated-montmorillonite clay in fixed-beds". **GMSARN International Journal**. 6: 175-180.
- [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. London: Academic Press.
- [16] Umpuch, C. and Sakaew, S. 2015. "Adsorption characteristics of reactive black 5 on chitosan intercalated montmorillonite". **Desalination and water treatment**. 53: 2962-2969.
- [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] Umpuch, C. 2015. "Batch adsorption of organic dyes by Organo-bagasse: Carbon content, pH influence, kinetics and isotherms". **IJE Transactions A: Basics**. 28(4): 507-515.
- [19] Kyzas, G.Z., Deliyanni, E.A. and Lazaridis, N.K. 2014. "Magnetic modification of microporous carbon for dye adsorption". **Journal of Colloid and Interface Science**. 430: 166-173.
- [20] 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.
- [21] Lagegren, S. and Svenska, B.K. 1898. "Zurtheorie der sogenannten adsorption geloesterstoffe". **VaternskapsakadHandlingar.** 24(4): 1-39.
- [22] Ho, Y.S. and McKay, G. 1998. "Sorption of dye from aqueous solution by peat". **Chemical Engineering Journal.** 70: 115-124.
- [23] R. Wibulswas. 2004. "Batch and fixed bed sorption of methylene blue on precursor and QACs modified montmorillonite". **Separation and Purification Technology.** 39: 3-12.
- [24] Heibati, B., Rodriguez-Couto, S., Amrane, A., Rafatullah, M., Hawari, A. and Al-Ghouti, A. M. 2014. "Uptake of reactive black 5 by pumice and walnut activated carbon: Chemistry and adsorption mechanisms". **Journal of Industrial and Engineering Chemistry.** 20: 2939-2947.
- [25] Xiao, H., Peng, H., Deng, S., Yang, X., Zhang, Y., and Li Y. 2014. "Preparation of activate3d carbon from edible fungi residue by microwave assisted K₂CO₃ activation-Application in reactive black 5 adsorption from aqueous solution". **Bioresouce Technology.** 111: 121-133.
- [26] Ip A.W.M., Bardford, J.P. and Mckay, G. 2010. "A comparative study on the kinetics and mechanisms of removal of reactive black 5 by adsorption onto activated carbons and bone char". **Chemical Engineering Journal.** 157: 434-442.
- [27] Donnaperna, L., Duclaux, L., Gadiou, R., Hirn, M.-P., Merli, C., Pietrelli, L. 2009. "Comparison of adsorption of remazol black B and acidol red on microporous activated carbon felt". **Journal of Colloid and Interface Science.** 339: 275-284.
- [28] Mook, W.T., Aroua, M.K. and Szlachta, M. 2016. "Palm shell-based activated carbon for removing reactive black 5 dye: equilibrium and kinetic studies". **Bioresources.** 11(1): 1432-1447.
- [29] 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