

การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู

โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา

A Study on Adsorption Efficiency of Methylene Blue Dye using Adsorbent Material Prepared from Water Hyacinth

ชาญชัย คหาปนะ^{1,2} และ ณภัทร โพธิ์วัน^{1*}

¹ คณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

114 สุขุมวิท 23 แขวงคลองเตยเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

² ห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

Chanchai Kahapana^{1,2} and Naphat Phowan^{1*}

¹ Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

114 Sukhumvit 23, Khlong Toei Nuea Subdistrict, Wattana District, Bangkok 10110

² Material Biodegradation Testing Laboratory, Material Properties Analysis and Development Centre

Thailand Institute of Scientific and Technological Research

35 Moo 3 Technopolis, Khlong Ha Subdistrict, Khlong Luang District, Pathum Thani 12120

*Corresponding author Email: naphat@gs.swu.ac.th

(Received: March 6, 2020; Accepted: June 1, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการเตรียมวัสดุดูดซับจากผักตบชวาสำหรับดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย โดยผักตบชวาถูกนำไปเตรียมดังนี้ 1) เตรียมเป็นผงขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร 2) ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ 3) เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านชีวภาพสามารถดูดซับปริมาณไอโอดีนได้สูงสุด คือ 636.30 ± 4.16 มิลลิกรัมต่อกรัม สำหรับโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดที่เตรียมขึ้นถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่า สเปกตรัมของวัสดุดูดซับมีลักษณะที่คล้ายกัน โดยแสดงหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของเซลลูโลส นอกจากนี้ยังได้ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณวัสดุดูดซับ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ พบว่า เวลาในการดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 8 ชั่วโมง ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด พบว่า ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยถ่านชีวภาพมีค่าความจุในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 21.88 มิลลิกรัมต่อกรัม

คำสำคัญ: การดูดซับ สีย้อมเมทิลีนบลู ผักตบชวา ถ่านชีวภาพ

ABSTRACT

An adsorbent for methylene blue dye (MB) adsorption in wastewater was prepared from water hyacinth. The adsorbent is prepared from water hyacinth powder with a particle size smaller than 2 mm, water hyacinth pretreated with sodium hydroxide (NaOH) and water hyacinth modified to biochar. Highest Iodine Number (I.N.) is $636.30 \pm 4.16 \text{ mg g}^{-1}$ was obtained when water hyacinth was modified to biochar. The chemical structure of the three adsorbents was characterized by the Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT – IR) also found similar spectra of the adsorbents that showed important functional groups in cellulose. Moreover, the effects of contact time, adsorbents dose on the adsorption capacity, and adsorption isotherm were studied. The results indicated that the optimum conditions were the contact time of eight hours and the adsorbents dose of 20 g L^{-1} . The adsorption isotherm of MB by the adsorbents was best described by the Langmuir isotherm which indicated the monolayer. The adsorption capacity of MB by biochar was the best efficiency, with an adsorption capacity of 21.88 mg g^{-1} .

Key words: adsorption, Methylene blue dye, water hyacinth, Biochar

1. บทนำ

ปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมของประเทศไทยในปัจจุบันนับวันยิ่งทวีความรุนแรงขึ้น อันเนื่องมาจากการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว อาทิ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องใช้น้ำในกระบวนการผลิต เช่น โรงงานฟอกย้อมสีในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ที่มักจะมีสีย้อมตกค้างอยู่ในน้ำทิ้ง เป็นผลกระทบวงกว้างกับชุมชนที่อยู่รอบโรงงาน อย่างไรก็ตามแม้ว่าสีย้อมจะมีความเป็นพิษในระดับต่ำ แต่สีย้อมที่ใช้โดยทั่วไปเป็นสีที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพและเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้น แม้มีปริมาณสีย้อมอยู่ในน้ำเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้น้ำมีสีที่น่ารังเกียจแก่ผู้พบเห็น [1] หากมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยที่ไม่ได้รับการบำบัดที่ดีเพียงพอก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำบริเวณนั้น อีกทั้งยังลดอัตราการถ่ายเทของออกซิเจนที่เข้าสู่ผิวหน้าของแหล่งน้ำ และบดบังปริมาณแสงอาทิตย์ที่ตกลงสู่ผิวน้ำทำให้ให้พืชน้ำไม่สามารถ สังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณ

ออกซิเจนในน้ำลดลง สัตว์น้ำอาจตายได้เนื่องจากขาดออกซิเจนละลายน้ำ [2]

ประเภทของสีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอกทีฟ สีเอซิด สีเบสิก สีไดเรกต์ สีแคว้น สีดิสเพอร์ส [3], [4] เมทิลีนบลูเป็นสีเบสิก (Basic Dyes) ที่ละลายน้ำได้มีโครงสร้างเป็นแคทไอออนในส่วนประกอบที่ให้สี ส่วนใหญ่นำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นสีในกระดาษ สีย้อมผม ฝ้าย-ขนสัตว์ย้อมสี เป็นต้น [5] เมื่อสีมีการปนเปื้อนในน้ำเสียจะก่อให้เกิดมลภาวะในแหล่งน้ำ ดังนั้น จึงควรมีการบำบัดสีในน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงแหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีการบำบัดน้ำเสียมียหลายวิธี อาทิ การใช้กระบวนการทางชีวภาพในการย่อยสลาย (Biodegradation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การใช้กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นต้น แต่ยังคงมีปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นและอาจไม่เหมาะสมกับโรงงานขนาดเล็ก มีการลงทุนสูง และต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษ ดังนั้น วิธีการดูดซับ (Adsorption) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการบำบัด

น้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย เงินลงทุน และใช้สถานที่ในการดำเนินการน้อย

วัสดุชีวภาพหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรสามารถทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนด แต่ยังมีข้อจำกัด คือ ความจุในการดูดซับยังมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับสภาพวัสดุ อาทิ การลดขนาด การใช้สารเคมี การใช้ความร้อนในการปรับปรุงโครงสร้างหรือสมบัติของวัสดุดูดซับ

มีงานวิจัยการใช้ผักตบชวา (*Eichornia crassipes*; Water hyacinth) มาปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย โดยการปรับสภาพผักตบชวากับกรดไนตริก [6] กรดไฮโดรคลอริก [7] รวมถึงการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพโดยเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยกระบวนการไพโรไลซิสและกระตุ้นด้วยเชิงเคมีด้วยกรดซัลฟูริก [8] อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยวิธีดังกล่าวอาจมีต้นทุนสูงในการเตรียมวัสดุ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวาโดยการปรับสภาพด้วยสารละลายเบสซึ่งมีราคาถูก และการเตรียมเป็นถ่านชีวภาพ (Biochar) โดยไม่ผ่านการกระตุ้นเชิงเคมี เพื่อบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูในน้ำเสีย เนื่องจากผักตบชวามีองค์ประกอบที่เป็นเส้นใยโดยเฉพาะอย่างยิ่งเซลลูโลสในปริมาณสูง [9] ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหา น้ำเสียและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุดังกล่าวให้สูงขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

2.1.1 การเตรียมผักตบชวา

นำต้นผักตบชวาที่เก็บจากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก มาล้างให้สะอาดด้วยน้ำประปา แล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ตากให้แห้ง จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร

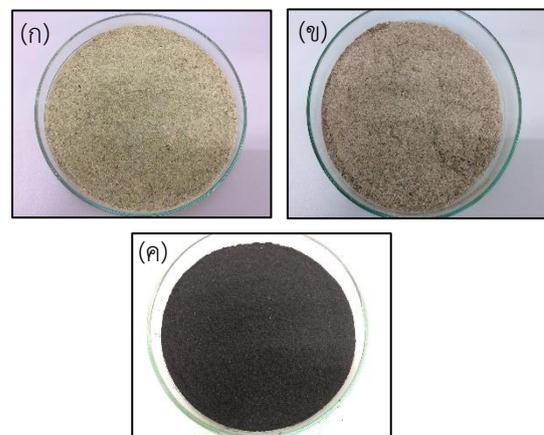
อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท (รูปที่ 1 (ก))

2.1.2 การปรับสภาพผักตบชวากับ NaOH

นำผักตบชวาที่เตรียมได้จากข้อ 2.1.1 มาผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.7 โมลาร์ ที่อัตราส่วน 1:20 นำไปแช่ด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนสารละลายมีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าพีเอชของน้ำปราศจากไอออน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (รูปที่ 1 (ข))

2.1.3 การเตรียมถ่านชีวภาพ

นำผักตบชวามาตากแห้ง เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีด้วยกระบวนการไพโรไลซิส [10] จากนั้นบดให้มีขนาดเล็กด้วยเครื่องบดแบบใบมีด และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 1 (ค))



รูปที่ 1 ภาพถ่ายวัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา (ก) ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M (ค) ผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ

2.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ปริมาณถ่าน ปริมาณสารระเหย [11] ปริมาณคาร์บอนคงตัว [12] และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของเบ็ท (BET,

The Brunauer-Emmett-Teller) ด้วยก๊าซไนโตรเจน นอกจากนี้ นำไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Micro-scope; SEM) โดยฝักตบชาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพส่งวิเคราะห์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ส่วนถ่านชีวภาพส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

2.3 การวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมี ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHNS/O Analyzer) ยี่ห้อ Perkin รวมถึงวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer; FT-IR) ยี่ห้อ Perkin

2.4 การวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีน (Iodine number) ของวัสดุดูดซับ

การทดลองนี้เป็นการหาปริมาณการดูดซับของวัสดุดูดซับจากความสามารถการดูดซับไอโอดีนบนพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ นำวัสดุดูดซับที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 [13]

2.5 การเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูสำหรับการดูดซับ

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการศึกษา คือ สารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเตรียมจากผงเมทิลีนบลู ยี่ห้อ Fluka, AR grade

2.6 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลู

2.6.1 ระยะเวลาในการดูดซับ

ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ที่เติมสารละลายเมทิลีนบลู ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็น

เวลา 1, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับมาวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

2.6.2 ปริมาณวัสดุดูดซับ

ชั่งวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1, 0.2, 0.4, 0.8 และ 1.0 กรัม เติมน้ำอย่างช้าๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยใช้ระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 2.6.1 ทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วนำน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับมาวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

2.6.3 การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลู

ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูในน้ำเสีย โดยนำไปตรวจวัดที่ความยาวคลื่น 663 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี – วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ SECOMAM คำนวณค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลู ตามสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละการดูดซับ} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของเมทิลีนบลู (mg L^{-1})

C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของเมทิลีนบลู (mg L^{-1})

2.7 การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มเพื่อใช้อธิบายรูปแบบของการดูดซับเมทิลีนบลู ประกอบด้วยสมการแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และสมการของฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

q_m คือ ปริมาณตัวถูกดูดซับที่อิ่มตัวบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg L^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่ง (L mg^{-1})

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับ 1 กรัม (mg g^{-1})

n คือ ค่าคงที่แสดงถึงความแข็งแรงในการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิชที่แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ (L mg^{-1})

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

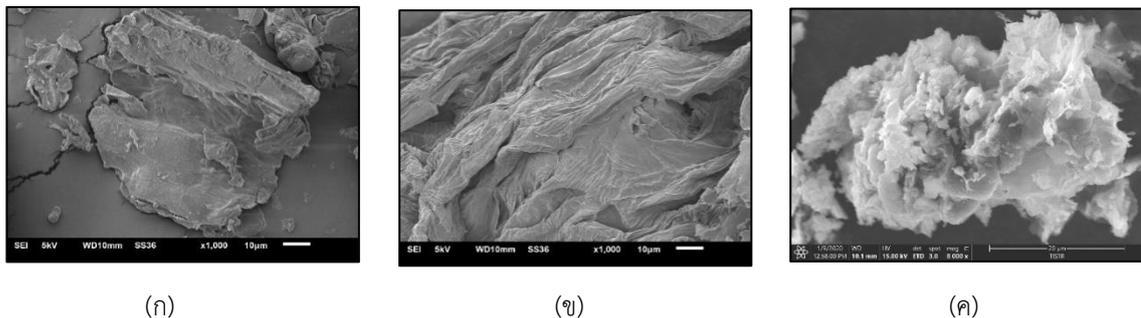
จากตารางที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบค่าต่างๆ พบว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพจะมีค่าปริมาณสารระเหยสูงที่สุด รองลงมาคือผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและถ่านชีวภาพ แสดงให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่สลายตัวได้ง่ายส่วนใหญ่จะระเหยได้ที่อุณหภูมิสูง โดยอาจเกิดจากการสลายตัวของส่วนประกอบจำพวกเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส [14] ในขณะที่ปริมาณเถ้าจะสัมพันธ์แบบผกผันกับปริมาณคาร์บอนคงตัว กล่าวคือ ถ้า

มีปริมาณเถ้าต่ำ จะมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ในที่นี้พบว่า ถ่านชีวภาพจะมีปริมาณเถ้าต่ำและปริมาณคาร์บอนคงตัวสูง ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านชีวภาพที่เตรียมได้สูงตามไปด้วย สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของผักตบชวาไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพและถ่านชีวภาพมีค่า 16.16, 19.62 และ 66.17 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านชีวภาพ

เมื่อนำวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ไปศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (สำหรับผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ) และที่กำลังขยาย 8,000 เท่า (สำหรับถ่านชีวภาพ) พบว่า ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพแตกต่างจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเป็นแผ่นเรียบและซ้อนกันเป็นชั้นๆ ส่วนผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีพื้นผิวขรุขระมากขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความสามารถของ NaOH ในการย่อยสลายองค์ประกอบจำพวกลิกนิน อีกทั้งยังสามารถทำลายความเป็นโครงสร้างแบบผลึกของเซลลูโลส (Cellulose crystalline) ส่งผลให้ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพอาจมีความเป็นรูพรุนมากกว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านปรับสภาพ ส่วนพื้นผิวของถ่านชีวภาพจะมีพื้นผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับ

ชนิดวัสดุดูดซับ	สมบัติของวัสดุดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ปริมาณสารระเหย	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	73.94±1.11	7.75±0.18	18.31±1.14
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	68.87±1.06	11.18±0.37	19.95±1.43
ถ่านชีวภาพ	22.81±0.50	19.48±0.23	57.70±0.30



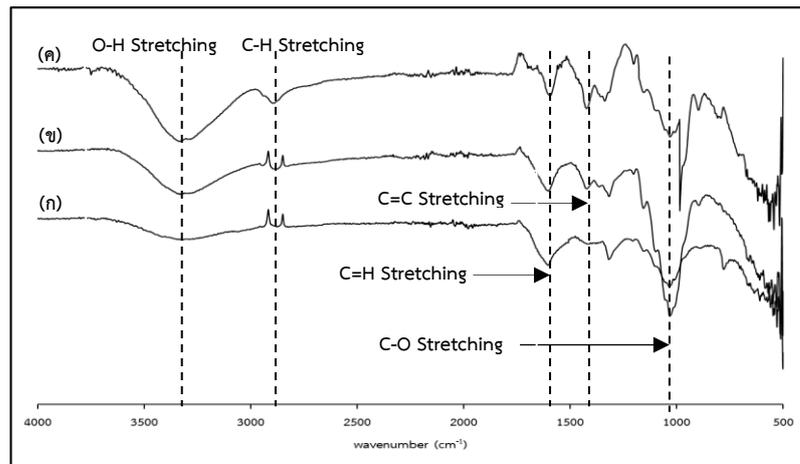
รูปที่ 2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ (ก) ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M และ (ค) ถ่านชีวภาพ

3.2 *ศึกษาสมบัติและโครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับ*
 จากตารางที่ 2 พบว่า เมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดซึ่งประกอบด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) พบว่า ถ่านชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนสูงกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด สำหรับปริมาณออกซิเจน พบว่า ถ่านชีวภาพมีปริมาณที่ต่ำกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิด ทั้งนี้อาจมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการใช้อุณหภูมิสูงทำให้องค์ประกอบของถ่านชีวภาพมีการเปลี่ยนแปลงไปในขณะที่ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และผักตบชวาที่ปรับสภาพทางเคมี มีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ค่าดัชนีความมีขั้ว (Polarity index) ที่คำนวณจากอัตราส่วน $(O+N)/C$ มีค่าลดลงเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งบ่งบอกถึงการลดลงของกลุ่มฟังก์ชันที่อยู่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ [15]

สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดด้วย FT-IR (รูปที่ 3) ปรากฏพีก O-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $3300-3400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอล (Phenolic compounds) แต่ลักษณะพีกของถ่านชีวภาพจะแตกต่างจากวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลน้ำ [16] พีก C-H Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $2800-3000\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลเคนหรือแอลคีน (Alkane or Alkene) พีก C=O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1600-1700\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทคาร์บอนิล (Carbonyl compounds) พีก C-O Stretching ที่เลขคลื่นประมาณ $1100-1200\text{ cm}^{-1}$ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทเอสเทอร์ (Ester compounds) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดูดซับ

ชนิดวัสดุดูดซับ	ปริมาณธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนักแห้ง)				(O+N)/C ratio
	C	H	N	O	
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	35.39±0.64	3.39±0.07	2.08±0.03	63.98±0.75	1.87±0.05
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	35.08±0.42	3.46±0.03	2.01±0.03	63.40±0.16	1.92±0.03
ถ่านชีวภาพ	47.91±0.26	3.75±0.07	2.18±0.03	45.93±0.71	1.00±0.02



รูปที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของ (ก) ฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ
(ข) ฝักตบขวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.7 M และ (ค) ถ่านชีวภาพ

3.3 การดูดซับค่าไอโอดีนของวัสดุดูดซับ

การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ฝักตบขวาที่การปรับสภาพด้วย NaOH และ ถ่านชีวภาพ ด้วยการหาค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน (Iodine Number, I.N.) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 โดยฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 282.04 ± 4.15 มิลลิกรัมต่อกรัม ในขณะที่ฝักตบขวาที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเท่ากับ 546.80 ± 7.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านชีวภาพมีค่าเท่ากับ 636.30 ± 4.16 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่าฝักตบขวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH จะมีค่า I.N. มากกว่าฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ NaOH มีผลต่อพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นเยื่อใย ดังนั้นการใช้ NaOH จะทำให้องค์ประกอบจำพวกเซลลูโลสเกิดการบวมตัวมากขึ้น อีกทั้งยังเพิ่มการย่อยสลายลิกนินบนพื้นผิวของวัสดุ ดังงานวิจัยของ Polpasert [17] ที่พบว่า การปรับสภาพวัสดุดูดซับจะมีผลให้พื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับไอโอดีนได้มากกว่าวัสดุดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ สำหรับถ่านชีวภาพมีค่า I.N. สูงสุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีรูพรุนขนาดเล็กจึงสามารถดูดซับ

โมเลกุลของไอโอดีนที่มีขนาดเล็กได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ประเทศไทย (มอก.900-2547) [18] สำหรับถ่านชนิดผง จัดได้ว่าถ่านชีวภาพที่ผ่านการไพโรไลซิสเป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดสำหรับค่าไอโอดีน คือ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

ตารางที่ 3 ค่าการดูดซับไอโอดีนของวัสดุดูดซับ

วัสดุดูดซับ	ค่า I.N. (mg g^{-1})
ฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	282.05 ± 4.15
ฝักตบขวาที่ผ่านการปรับสภาพ	546.80 ± 7.21
ถ่านชีวภาพ	636.30 ± 4.16

3.4 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับเมทิลีนบลู

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ คือ ฝักตบขวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ฝักตบขวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และถ่านชีวภาพ ด้วยการเติมวัสดุดูดซับ 0.1 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณเมทิลีนบลู 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.32 ± 0.09 นำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลาต่างๆ และทำการวิเคราะห์

ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

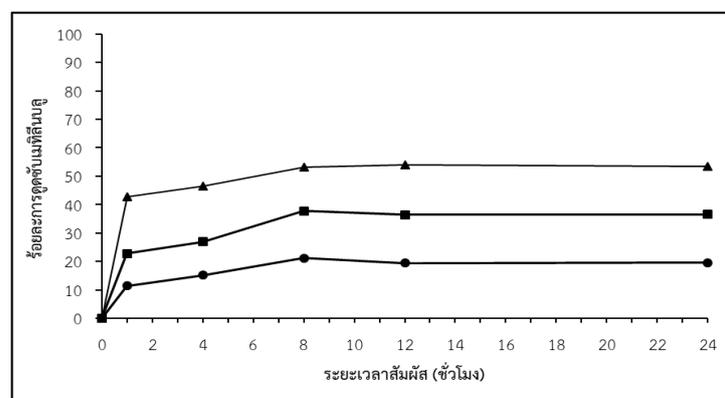
ปริมาณเมทิลีนบลูหลังการดูดซับที่เวลาต่างๆเพื่อนำมาคำนวณร้อยละการดูดซับของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด ซึ่งพบว่า ถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลูสูงกว่า ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะพื้นผิวของถ่านชีวภาพสามารถดูดซับโมเลกุลของเมทิลีนบลูได้มากกว่า โดยค่าร้อยละการดูดซับเมทิลีนบลูจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรก หลังจากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 8 ชั่วโมง และมีค่าคงที่จนถึง 24 ชั่วโมง เมื่อคำนวณร้อยละประสิทธิภาพการดูดซับพบว่ามีความเท่ากับร้อยละ 53.31 (รูปที่ 4) ดังนั้นจึงเลือกใช้ระยะเวลาของการดูดซับที่ 8 ชั่วโมง ทำการศึกษาปริมาณของวัสดุดูดซับในหัวข้อต่อไป

3.5 ผลของปริมาณวัสดุและไอโซเทอร์มการดูดซับ

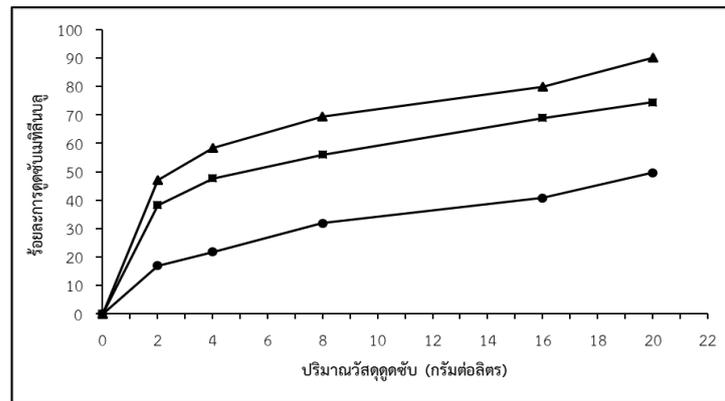
การใช้งานวัสดุดูดซับในทางอุตสาหกรรมต้องพิจารณาถึงจุดคุ้มทุนร่วมกับประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อให้สอดคล้องกับเป้าหมายการลดต้นทุน จึงต้องศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorbent dose) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการลดปริมาณเมทิลีนบลูในน้ำเสีย การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเติมวัสดุดูดซับปริมาณ 0.1-1.0 กรัม ในตัวอย่างน้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร มีค่าพีเอชเริ่มต้น 4.83 ± 0.11 นำเข้าเครื่องเขย่าเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลีนบลูหลังการดูดซับ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุ

ดูดซับจาก 2 กรัมต่อลิตร เป็น 20 กรัมต่อลิตร ร้อยละการดูดซับของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 17.00 เป็น 49.66 ในขณะที่ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 38.27 เป็น 74.48 ส่วนถ่านชีวภาพมีค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด โดยเพิ่มขึ้นจาก 46.91 เป็น 90.01 (รูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมีมากขึ้นและบริเวณที่เกิดการดูดซับมีสูงขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณวัสดุดูดซับ [19] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับจึงมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับอาจมีปริมาณมากกว่า 20 กรัมต่อลิตร เนื่องจากค่าร้อยละการดูดซับยังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับสีของวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ประจุของสีและประจุบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ [20] ค่าพีเอชของเมทิลีนบลูในการทดลองนี้มีค่าอยู่ในช่วง 4.32-4.83 มีผลทำให้วัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sukadjasakul (2012) ที่รายงานว่า การดูดซับสีของผสมด้วยผักตบชวาที่ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 มีร้อยละเฉลี่ยการดูดซับดีที่สุดในสภาวะที่เป็นกรดทำให้โครงสร้างของสีมีประจุบวก สามารถยึดเหนี่ยวกับเซลล์โลสซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลโควาเลนต์ได้ดี [21]



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่ระยะเวลาต่างกัน เมื่อ (●) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (■) คือ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (▲) คือ ถ่านชีวภาพ



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของวัสดุดูดซับที่ปริมาณต่างกัน เมื่อ (●) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ (■) คือ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ และ (▲) คือ ถ่านชีวภาพ

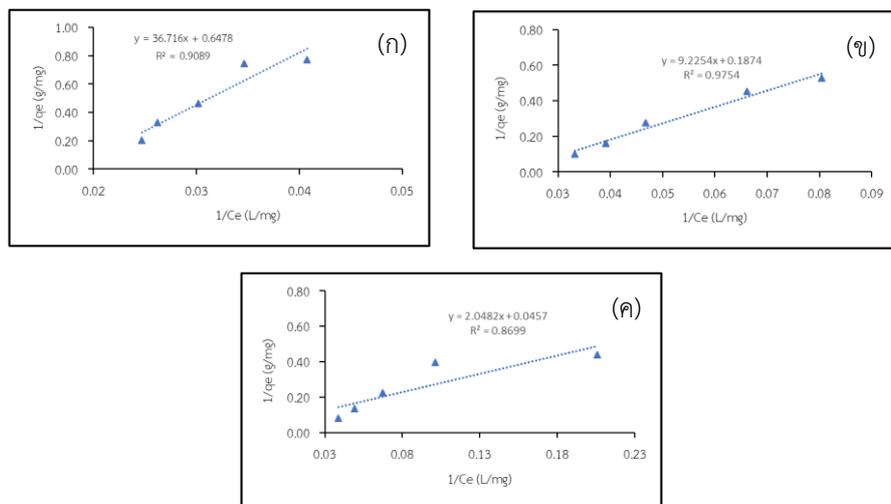
สำหรับการศึกษาแบบจำลองการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพและถ่านชีวภาพ เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมทิลีนบลูที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่เหลืออยู่ ณ สภาวะสมดุล โดยการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณความจุในการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ (q_e) และความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่สภาวะสมดุล (C_e) อาศัยรูปแบบสมการของไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และรูปแบบสมการของไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) ผลการศึกษารูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช พบว่าแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายรูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด มากกว่าแบบจำลองการดูดซับของฟรุนดลิช โดยเปรียบเทียบจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R^2) ของสมการเข้าใกล้ 1 มากกว่า [22] ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ที่มีความสม่ำเสมอ (Homogenous) ที่อยู่บนพื้นที่ของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด อีกทั้งตำแหน่งในการดูดซับมีปริมาตรที่แน่นอน [23] โดยรูปแบบสมการแบบแลงเมียร์จะเป็นการ

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/q_e$ กับ $1/C_e$ สามารถคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูสูงสุดของวัสดุดูดซับ (q_m) และค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นสัดส่วนระหว่างอัตราการดูดซับต่ออัตราการคายการดูดซับได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการแบบแลงเมียร์ได้ดังรูปที่ 6 ในขณะที่รูปแบบสมการแบบฟรุนดลิชจะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ สามารถหาค่าคงที่ของสมการแบบฟรุนดลิชที่แสดงปริมาณการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับ (K_F) และค่า Adsorption Intensity ($1/n$) ได้จากค่าจุดตัดแกน y และค่าความชันของกราฟ จากผลการทดลองสามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ตามรูปแบบสมการแบบฟรุนดลิชได้ดังรูปที่ 7 โดยผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงสภาพ และถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดในการดูดซับ (q_m) เท่ากับ 1.54, 5.34 และ 21.88 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และมีค่าคงที่ของแลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.018, 0.02 และ 0.022 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพมีความจุการดูดซับเมทิลีนบลูมากกว่าวัสดุดูดซับทั้ง 2 ชนิดอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 4 และ 5 เมื่อพิจารณาการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านชีวภาพ อธิบายได้ว่า ถ่านชีวภาพมีความจุการดูดซับสูง

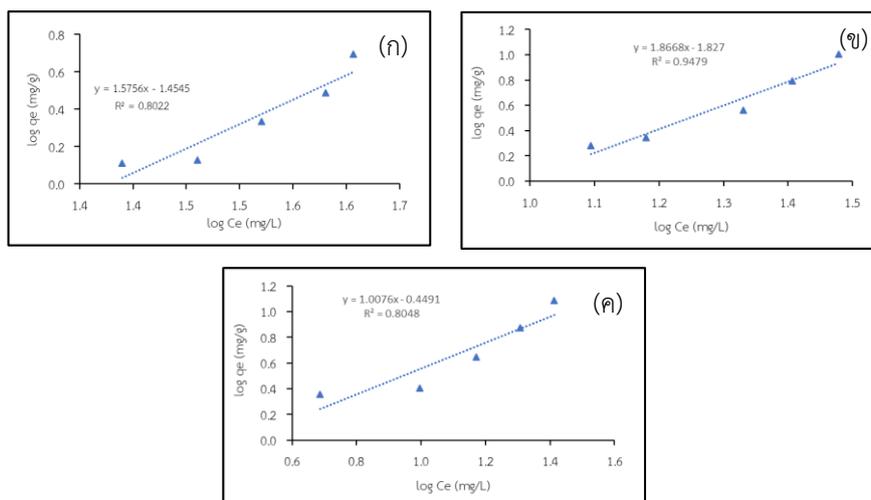
ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 เดือน พฤษภาคม – สิงหาคม พ.ศ. 2563

โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 66.17 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่ค่อนข้างสูงและค่าความสามารถในการดูดซับไอโอดีน 636.30 มิลลิกรัมต่อกรัม เมทิลีนบลูที่มีขนาดโมเลกุลขนาดเล็กถึงปานกลาง (ประมาณ 1 นาโนเมตร) [24] จึงถูกดูดซับด้วยกลไกทางกายภาพ คือ การดูดติดผิวโดยถ่านชีวภาพด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์เป็นกลไกหลัก [25] ทั้งนี้ โมเลกุลของเมทิลีนบลูบางส่วนอาจเกิดจากการ

ดูดซับทางเคมีเนื่องจากการทำปฏิกิริยากับหมู่กรดที่ผิวของถ่านชีวภาพด้วย [26] เมื่อเปรียบเทียบวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิดในงานวิจัยนี้กับวัสดุดูดซับจากผักตบชวาจากงานวิจัยอื่นๆ พบว่า ยังมีค่าความจุสูงสุดการดูดซับเมทิลีนบลูที่ค่อนข้างต่ำ แต่ถ่านชีวภาพมีค่าความจุสูงสุดการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์ ดังตารางที่ 6



รูปที่ 6 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อ (ก) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (ค) ถ่านชีวภาพ



รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับเมทิลีนบลู เมื่อ (ก) คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ และ (ค) ถ่านชีวภาพ

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์			
	สมการเส้นตรง	K_L (L mg ⁻¹)	q_m (mg g ⁻¹)	R^2
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 36.716x + 0.6478$	0.018	1.54	0.9089
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 9.2254x + 0.1874$	0.020	5.34	0.9754
ถ่านชีวภาพ	$y = 2.0482x + 0.0457$	0.022	21.88	0.8699

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิชของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับ	ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดลิช			
	สมการเส้นตรง	K_F (L mg ⁻¹)	1/n	R^2
ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 2.6197x - 3.6093$	2.459	2.6197	0.8909
ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพ	$y = 1.8668x - 1.827$	0.015	1.8668	0.9479
ถ่านชีวภาพ	$y = 1.0076x - 0.4491$	0.356	1.0076	0.8048

ตารางที่ 6 ค่าความจุสูงสุด (q_m) ของการดูดซับเมทิลีนบลู

ชนิดวัสดุดูดซับเตรียมจากผักตบชวา	q_m (mg g ⁻¹)	เอกสารอ้างอิง
ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก	63.30	[7]
ถ่านชีวภาพที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก	395.00	[8]
ถ่านกัมมันต์	2.90	[27]
ถ่านชีวภาพ	21.88	งานวิจัยนี้
ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์	5.34	งานวิจัยนี้
ไม่ผ่านการปรับสภาพ	1.54	งานวิจัยนี้

4. สรุป

จากการศึกษาสมบัติของวัสดุดูดซับ คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายเบส และผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพ เมื่อมีการปรับสภาพวัสดุดูดซับทำให้ลักษณะสัณฐานวิทยาเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งสมบัติของวัสดุดูดซับมีความเหมาะสมในการดูดซับและเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับเมทิลีนบลูได้ สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์ของผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย

เบส และถ่านชีวภาพ คือ ระยะเวลาสัมผัสที่ 8 ชั่วโมง และที่ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 กรัม มีประสิทธิภาพการดูดซับถึงร้อยละ 46.66, 74.48 และ 90.01 ตามลำดับ โดยถ่านชีวภาพมีประสิทธิภาพการดูดซับเมทิลีนบลูอย่างเห็นได้ชัด อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่เป็นไปตามเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก.900-2547 นอกจากนี้ รูปแบบการดูดซับเมทิลีนบลูของวัสดุดูดซับทั้ง 3 ชนิด สอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ซึ่งอธิบายได้ว่าการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวและพื้นที่ผิวของการดูดซับเป็น

ปัจจัยการดูดซับที่สำคัญ จากผลการศึกษาข้างต้น กล่าวได้ว่าผักตบชวาที่เตรียมเป็นถ่านชีวภาพสามารถดูดซับเมทิลีนบลูได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดสีย้อมผ้าที่ปนเปื้อนในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่สำหรับการเตรียมถ่านชีวภาพ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการทดสอบการสลายตัวของชีวภาพของวัสดุ ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ritthichai and S. Muncharoen, “Dye Removal of Textile Wastewaters using Crab Shell Activated Carbon,” *Burapha Science Journal*, vol. 19, pp. 131-140, 2014. (in Thai).
- [2] P. Daengbutdee, et al., “Adsorption of Methylene Blue Dye by Rice-husk in Fixed-bed Column,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 24(2), pp. 398-408, 2014. (in Thai).
- [3] V.K. Gupta and Suhas, “Application of low-cost adsorption for dye-removal: A review,” *Journal of Environmental Management*, vol. 90(8), pp. 2313-2342, 2009.
- [4] I.D. Mall, et al, “Removal of orange-G and methyl violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash-kinetic study and equilibrium

isotherm analyses,” *Dyes and Pigments*, vol. 69, pp. 210-223, 2006.

- [5] O. Hamdaoui, “Dynamic sorption of methylene blue by cedar sawdust and crushed brick in fixed bed column,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 138, pp. 293-303, 2006.
- [6] M. I. El-Khaiary, “Kinetics and mechanism of adsorption of methylene blue from aqueous solution by nitric-acid treated water-hyacinth,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 147 (1-2), pp. 28-36, 2007.
- [7] M.N. Uddin, “A Novel Biosorbent, Water-Hyacinth, Uptaking Methylene Blue from Aqueous Solution: Kinetics and Equilibrium Studies,” *International Journal of Chemical Engineering* vol. 2014, pp. 1-13, 2014.
- [8] X. Yan, et al., “Enhanced adsorption of methylene blue by citric acid modification of biochar derived from water hyacinth (*Eichornia crassipes*),” *Environ Sci Pollut Res*, vol. 23, pp. 23606–23618, 2016.
- [9] P. Prasannam, “Removal of heavy metal ions from solution using ion exchangers based on hydroxyethyl cellulose,” M.S. thesis, Dept. Eng., Silpakorn Univ. , Nakhon Pathom, Thailand, 2004. (in Thai)
- [10] R.E. Masto, et al., “Biochar from water hyacinth (*Eichornia crassipes*) and its impact on soil biological activity,” *Catena*, vol.111, pp.64-71, 2013.
- [11] ASTM for Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal, ASTM Standards D1762-84, 2007.

- [12] ASTM for Standard Test Method for Analysis of Wood Fuels, ASTM Standards E870-82, 2019.
- [13] ASTM for Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbons, ASTM Standard D4607-94, 1998.
- [14] J. Guo and A.C. Lua, “Kinetic Study on Pyrolysis Process of Oil-Palm Stone Using Two-Step Consecutive Reaction Model,” *Biomass and Bioenergy*, vol.20, pp.223-233, 2001.
- [15] F. Li, et al., “Preparation and Characterization of Biochars from *Eichornia crassipes* for Cadmium Removal in Aqueous Solutions,” *PLoS ONE*, vol. 11(2), pp. 1-13, 2016.
- [16] T. Mimmo, et al., “Effect of Pyrolysis Temperature on Miscanthus (*Miscanthus x Giganteus*) Biochar Physical, Chemical and Functional Properties,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 6(March), pp. 149-157, 2014.
- [17] S. Polpasert, “Pretreatment of lignocellulose materials for ethanol production,” *Journal of Science and Technology*, vol. 5, pp. 641-649, 2014. (in Thai)
- [18] TISI for Thai Industrial Standard: Activated Carbon, TISI Standard 900-2547, 2547. (in Thai)
- [19] D. Özer, et al., “Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull,” *Journal of Hazardous Materials*, vol.144, pp.171-179, 2007.
- [20] R. Srimoon. “Dyes treatment in wastewater using adsorption processes,” *KKU Sci. J.*, vol. 44(3), pp. 419-434, 2016. (in Thai).
- [21] A. Sukadjasakul. “Dyes removal from Doi Tung development project textile wastewater utilizing adsorbent from water hyacinth and *Cyperus corymbosus* Rottb.,” M.S. thesis, Env. Sci., Kasetsart Univ., Bangkok, Thailand, 2012. (in Thai).
- [22] S. Waiyasuri. “Phosphate removal in wastewater by adsorption on calcium carbonate and calcium oxide from eggshell,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 26(3), pp. 475-486, 2016. (in Thai).
- [23] F. Nady, et al., “Effectiveness of alkali-acid treatment in enhancement the adsorption capacity for rice straw: The removal of methylene blue dye,” *Physical chemistry*, vol. 2013, pp. 1-15, (2013).
- [24] J. d. S. Macedo, et al., “Kinetic and calorimetric study of the adsorption of dyes on mesoporous activated carbon prepared from coconut coir dust,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, pp. 515-522, 2006
- [25] J. Zhang, and Q. Wang, “Sustainable mechanisms of biochar derived from brewer’s spent grain and sewage for ammonia-nitrogen capture,” *J. Cleaner. Prod.*, vol. 112, pp. 3927-3934, 2016.
- [26] X.L. Long, et al., “Adsorption of ammonia on activated carbon from aqueous solutions,” *Environ. Prog.*, vol. 27(2), pp. 225-233, 2008.
- [27] G. Nibret, et al., “Removal of Methylene Blue Dye from Textile Wastewater using Water Hyacinth Activated Carbon as Adsorbent: Synthesis, Characterization and Kinetic studies,” *International Conference on Sustainable Computing in Science, Technology & Management*, Jaipur, India, 2019, pp. 1959-1969.