

การดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีนด้วยไบโอชาร์จากขานอ้อย

The Adsorption of Malachite Green Dye Using Biochar from Bagasse

สุพัตน์ บุตรดี¹ ผการัตน์ โรจน์ดวง^{1*} และปริญญ์ รัตนบุรี¹
Supat Buddee¹, Phakarat Rotduang^{1*} and Parintip Rattanaburi¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและศึกษาคุณลักษณะของไบโอชาร์จากขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในการบำบัดสีย้อมมาลาไคท์กรีน (malachite green: MG) ในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ เตรียมไบโอชาร์จากขานอ้อยโดยการนำขานอ้อยเผาในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พิสูจน์ฐานของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction: XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (fourier transform infrared spectroscopy: FT-IR) ประยุกต์ใช้ไบโอชาร์จากขานอ้อยที่เตรียมได้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมมาลาไคท์กรีนในน้ำเสีย โดยมีปัจจัยที่ศึกษา คือ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นของสีย้อม ระยะเวลาการดูดซับ และสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ผลการวิจัยพบว่าจากเทคนิค SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของไบโอชาร์จากขานอ้อยมีความขรุขระและมีรูพรุนสูงกว่าขานอ้อยปกติ ยืนยันหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญด้วยเทคนิค FT-IR ผลจากการดูดซับสีย้อมมาลาไคท์กรีน พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับและค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมมีผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมลดลง โดยไบโอชาร์จากขานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม (ร้อยละ 97.11) สูงกว่าขานอ้อยปกติ (ร้อยละ 94.96) นอกจากนี้ผลการทดสอบการใช้ซ้ำ พบว่าตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 ครั้ง โดยยังคงประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสูงกว่าร้อยละ 80.00 งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการดัดแปรวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรใช้เป็นวัสดุดูดซับเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียจากสีย้อมได้

คำสำคัญ: ขานอ้อย สีย้อม การดูดซับ มาลาไคท์กรีน ไบโอชาร์

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* Corresponding author e-mail: phakarat.r@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2024.v43i2.259432>

Received: 17 June 2023, Revised: 6 September 2023, Accepted: 12 September 2023

Abstract

The purpose of this research was to prepare and characterize biochar from sugarcane bagasse, a community waste material. The prepared biochar sugarcane bagasse was applied as an absorbent material for Malachite Green dye (MG) treatment in wastewater by adsorption. Biochar from bagasse was prepared by burning bagasse powder in an anaerobic state at 450 °C for 3 h. The morphology of the biochar sorbents from bagasse was determined by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The functional groups were studied by fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Biochar from the prepared bagasse was applied as an adsorbent to remove malachite green dye from wastewater. The effects to be studied are the amount of adsorbent, dye concentration, adsorption period, and acid-base conditions (pH). The results showed that, using the SEM technique, the surface characteristics of biochar from bagasse were rough and higher porosity than normal bagasse. Confirmation of main functional groups by the FT-IR technique. Biochar from the prepared bagasse was applied as an adsorbent to remove malachite green dye from wastewater. As a result of malachite green dye adsorption, it was found that when the amount of adsorbent and the pH value increased, the dye adsorption efficiency increased, while increasing the dye concentration resulted in a decrease in the dye adsorption efficiency. Biochar from bagasse has a dye adsorption efficiency (97.11%) higher than regular bagasse (94.96%). In addition, the results of the reuse test showed that biochar from bagasse could be reused more than five times with a dye adsorption efficiency higher than 80.00%. This research can be used as a guideline for waste material modification. In agriculture, it can be used as an adsorbent material for wastewater treatment.

Keywords: Bagasse, Dye stuff, Adsorption, Malachite green, Biochar

บทนำ

มลพิษทางน้ำถือว่าเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอันดับต้น ๆ ในประเทศไทย แหล่งที่มาของน้ำเสียส่วนใหญ่มาจากทั้งภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และภาคครัวเรือน เช่น ห้องน้ำ การย้อมผ้า การซักผ้า (สุทธิดา และคณะ, 2564) ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียรวมที่เกิดจากบ้านเรือนเฉลี่ย 150 ลิตรต่อคนต่อวัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2565) จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นจังหวัดทางภาคใต้ที่มีขนาดใหญ่เป็นอันดับสองรองจากจังหวัดสุราษฎร์ธานีและจากการลงพื้นที่ศึกษา พบว่าในเขตอำเภอเมืองนครศรีธรรมราชมีลักษณะเป็นชุมชนที่ค่อนข้างแออัด และมีการทำอุตสาหกรรมครัวเรือนอยู่หลายประเภท อาทิ การย้อมผ้า โดยเฉพาะการย้อมสีผ้าฝ้าย ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นิยมนำมาทำการย้อมส่วนใหญ่เป็นพวกเสื้อและกางเกง โดยใช้สีย้อมเคมีซึ่งเป็นสารที่สามารถเกาะติดกับเส้นใยได้โดยตรง (สุภาวดี,

2560) และมีการปล่อยน้ำจากกระบวนการย้อมผ้านั้นลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ผ่านการบำบัดแต่อย่างใด ทำให้มีโลหะหนักตกค้าง เช่น เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) โครเมียม (Cr) รวมทั้งสารอินทรีย์ที่แสดงสีตกค้าง เช่น กลุ่มสีย้อมเร็กต์ สีเอโซ เป็นต้น (ชนิษฐา, 2550)

วิธีการในการกำจัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้ามีหลายวิธี เช่น วิธีการดูดซับด้วยตะกอนจุลินทรีย์ (วีระพงษ์, 2545) วิธีการดูดซับต่อเนื่องด้วยการย่อยสลายด้วยวิธีทางชีวภาพ (สุดสายชล และคณะ, 2554) วิธีการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว (เทพฤทธิ์, 2544) ซึ่งวิธีการเหล่านี้มีข้อเสีย คือ ต้องการสภาวะที่จำเพาะในการกำจัดสีย้อมและตัวดูดซับมีความคงทนต่ำ นักวิจัยทั้งหลายจึงพยายามพัฒนาตัวดูดซับที่สามารถกำจัดสีย้อมได้ในทุกสภาวะ และมีความคงทนสูงสามารถใช้ซ้ำได้อย่างต่อเนื่องหลายครั้ง ตัวดูดซับที่ประยุกต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชี้เลื่อย และเปลือกข้าวโพด สามารถนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมได้ (กิตติโรจน์ และคณะ, 2550) และเป็นตัวดูดซับที่มีราคาต่ำ เนื่องจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้สามารถหาได้ง่าย มีตลอดทั้งปี และมีคุณสมบัติในการดูดซับสูงเหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (พรสวรรค์, 2555)

อ้อย นอกจากเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตน้ำตาลแล้ว ยังนิยมนำมารับประทานในรูปแบบน้ำอ้อยสดอีกด้วย โดยในจังหวัดนครศรีธรรมราชมีการจำหน่ายน้ำอ้อยสดอย่างแพร่หลาย กากอ้อยที่เหลือจากการสกัดน้ำออกจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถนำไปแปรรูปและใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น แปรรูปเป็นอาหารสัตว์ ใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ด และใช้เป็นส่วนผสมในแผ่นใยซีเมนต์อัด (ปณิธ และคณะ, 2559; ครุภรณ์, 2564; นิรมล และคณะ, 2563) นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมได้ (Mohamad *et al.*, 2019) จากการศึกษาพบว่าชานอ้อยมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมที่มีความเข้มข้นต่ำในช่วง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้น (Mohamad *et al.*, 2019; Sharma and Nandi, 2013) จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรให้ตัวดูดซับมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น วิธีการหนึ่งที่นักวิจัยสนใจ คือ การดัดแปรตัวดูดซับเป็นไบโอชาร์ เป็นกระบวนการที่นำชานอ้อยมาเผาด้วยอุณหภูมิสูงจนเป็นไบโอชาร์ มีผลให้คุณสมบัติของชานอ้อยหลังจากการดัดแปร มีปริมาณค่าคาร์บอนคงตัวสูง มีรูพรุนบนพื้นผิวเพิ่มขึ้น และมีความแข็งแรง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวดูดซับ (นัฐวุฒิ และคณะ, 2566) เนื่องจากวิธีการนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและขั้นตอนการดัดแปรเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้งานวิจัยที่ใช้ชานอ้อยเป็นตัวดูดซับสีย้อมที่มีความเข้มข้นสูงยังมีอยู่น้อย

ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับของชานอ้อยที่ดัดแปรด้วยการเผาเป็นไบโอชาร์ โดยการดูดซับน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้า โดยใช้มาลาโคท์กรีนเป็นตัวแทนสีย้อม เพราะหากสีย้อมมาลาโคท์กรีนปนเปื้อนในแหล่งน้ำในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดอันตรายเนื่องจากสีย้อมมาลาโคท์กรีนมีความเป็นพิษต่อสารทางพันธุกรรม เป็นสารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ มีผลกระทบที่ทำให้ทารกพิการแต่กำเนิดและเป็นสารก่อมะเร็ง (Sharma and Nandi, 2013) โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ และศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ระยะเวลาในการดูดซับ สภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของสารละลาย และความสามารถในการใช้ซ้ำของวัสดุดูดซับ เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสำหรับเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมีและเครื่องมือวิเคราะห์

ขานอ้อย (สายพันธุ์สุพรรณบุรี 50) ได้จากร้านขายน้ำอ้อยสดบริเวณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช สีย้อมผ้ามาลาโคท์กรีน (malachite green: MG; $C_{23}H_{25}N_2$) ใช้เป็นสีย้อมตัวอย่างในการศึกษา ใช้กรดไนตริก (HNO_3) 0.1 โมลาร์ (M) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 โมลาร์ เป็นสารปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ใช้เตาเผาความร้อนสูง (Furnace, Shysc, MF-05) ในการเตรียมไบโอชาร์จากขานอ้อย เทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction: XRD, Panalytical, Empyrean) ศึกษาลักษณะสัณฐานของสารตัวอย่าง ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM, Merlin compact, Zeiss) ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (fourier transform infrared spectroscopy: FT-IR, Nicolet-6700) และใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี (UV-vis, Spectroquant Prove 300) ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อมผ้ามาลาโคท์กรีน

2. การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ คือ ขานอ้อย ซึ่งเตรียมได้จากการนำอ้อยที่สกัดน้ำออกจนหมดมาล้างด้วยน้ำจนสะอาด อบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส บดและร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้อนุภาคมีขนาด 37 ไมโครเมตร สำหรับไบโอชาร์จากขานอ้อย สามารถเตรียมได้โดยการนำผงขานอ้อยมาเผาในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ได้สารตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวดูดซับ คือ ตัวดูดซับขานอ้อย และตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย

3. การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย

โดยนำตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่เตรียมได้ หาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารละลายสีย้อมมาลาโคท์กรีนด้วยกระบวนการดูดซับ โดยปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมาลาโคท์กรีน เวลาในการดูดซับ สภาวะกรด-ด่าง และความสามารถในการใช้ซ้ำ ติดตามประสิทธิภาพของตัวดูดซับโดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร ดำเนินการทดลองด้วยวิธีการแบบแบตช์ (Batch experiment) จำนวน 3 ซ้ำการทดลอง แบ่งเป็นขั้นตอน ดังนี้

3.1 ศึกษาปริมาณตัวดูดซับ

โดยชั่งตัวดูดซับทั้งสองชนิด น้ำหนัก 0.5 1.0 และ 2.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายสีย้อมผ้ามาลาโคท์กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในที่มืด เป็นเวลา 240 นาที เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมผ้ามาลาโคท์กรีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ทุก ๆ 60 นาที และนำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

3.2 ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมาลาโคท์กรีน

โดยชั่งตัวดูดซับทั้งสองชนิด น้ำหนัก 1.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายสีย้อมผ้ามาลาโคท์กรีน ความเข้มข้น 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในที่มืด เป็นเวลา 240 นาที

เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ทุก ๆ 60 นาที และนำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

3.3 ศึกษาเวลาในการดูดซับ

โดยชั่งตัวดูดซับทั้งสองชนิด น้ำหนัก 1.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในที่มืด เป็นเวลา 120 นาที เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ทุก ๆ 15 นาที และนำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

3.4 ศึกษาสภาวะกรด-ด่าง

โดยชั่งตัวดูดซับทั้งสองชนิด น้ำหนัก 1.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3 7 และ 10 คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในที่มืด เป็นเวลา 15 นาที เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

3.5 ศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำ

ศึกษาความสามารถในการใช้ซ้ำของตัวดูดซับ จำนวน 6 ครั้ง โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Surendra and Sharanappa (2000) โดยนำตัวดูดซับที่เหลือจากการดูดซับในแต่ละครั้งมาแช่น้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร กรองและอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ชั่งตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่นำกลับมาใช้ซ้ำ น้ำหนัก 1.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 คนสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ในที่มืดเป็นเวลา 15 นาที เก็บสารละลายตัวอย่างสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน ปริมาตร 4 มิลลิลิตร และนำสารละลายตัวอย่างสีย้อมวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับ จากสมการ (1) (Buddee *et al.*, 2011)

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับ (ร้อยละ)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (1)$$

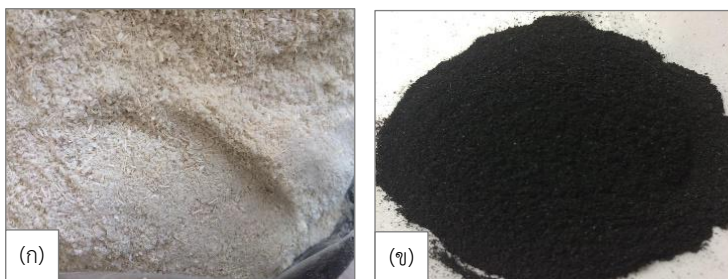
เมื่อ A_0 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$

A_t คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมที่เวลาใด ๆ

ผลการวิจัย

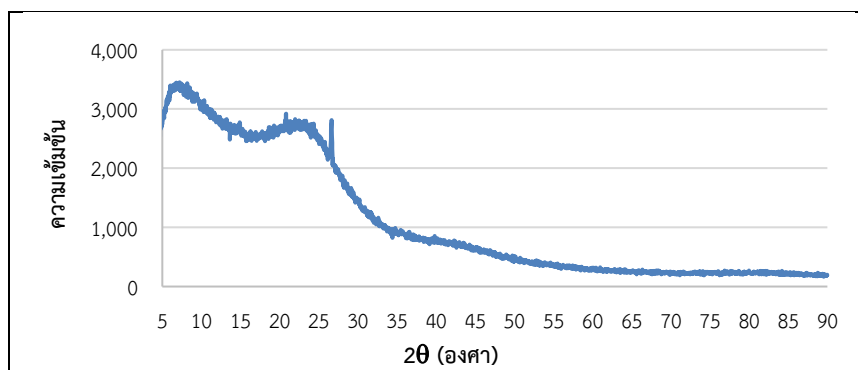
1. ผลการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ

ลักษณะของตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยหลังผ่านการเผาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าลักษณะของตัวดูดซับขานอ้อยที่ได้เป็นผงละเอียดสีขาว ดังภาพที่ 1 (ก) ในขณะที่ลักษณะของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยเป็นสีดำสนิทและมีความละเอียดมากขึ้น ดังภาพที่ 1 (ข)



ภาพที่ 1 ลักษณะของตัวดูดซับขานอ้อย (ก) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย (ข)

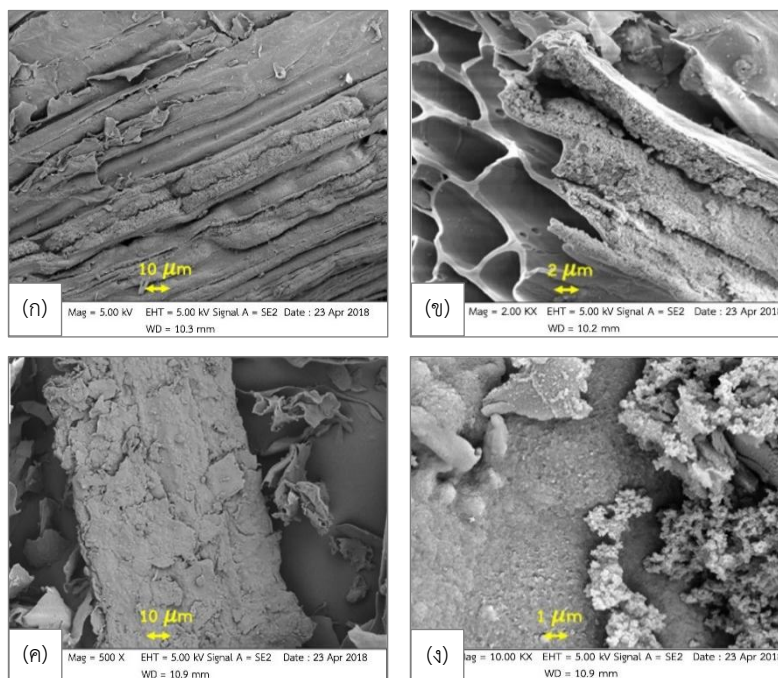
การศึกษาสมบัติความเป็นผลึกของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่เผาในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ในช่วง 5-90 องศา ($\lambda = 0.15406$ นาโนเมตร) แสดงผลดังภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยมีลักษณะโดยส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน และมีสัญญาณการเลี้ยวเบนขนาดเล็กที่ $2\theta = 22.0$ และ 26.5 องศา ซึ่งเป็นสัญญาณของเซลลูโลส และ hexagonal quartz ตามลำดับ (Mandal and Chakrabarty, 2011; Adeniyi *et al.*, 2017) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Mali and Nanthagopalan (2021) ซึ่งระบุว่าลักษณะผลึกของขานอ้อยจะเริ่มปรากฏเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จึงไม่ทำให้สารตัวอย่างเกิดความเป็นผลึกได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2 สัณฐานของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่ผ่านการเผาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับที่เตรียมได้ ก่อนและหลังการดูดซับสีย้อมผ้า มาลาไคท์กรีน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยก่อนผ่านการดูดซับ (ภาพที่ 3 (ก)) พื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าตัวดูดซับขานอ้อย (ภาพที่ 3 (ก)) ซึ่งลักษณะพื้นผิวเช่นนี้จะเอื้ออำนวยต่อการดูดซับโมเลกุลของสารอื่น ๆ ให้ยึดเกาะกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น หลังการดูดซับสีย้อมพื้นผิวของตัวดูดซับมีอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ดังจะเห็นได้จากภาพที่ 3 (ข) ซึ่งแสดงพื้นผิวของตัว

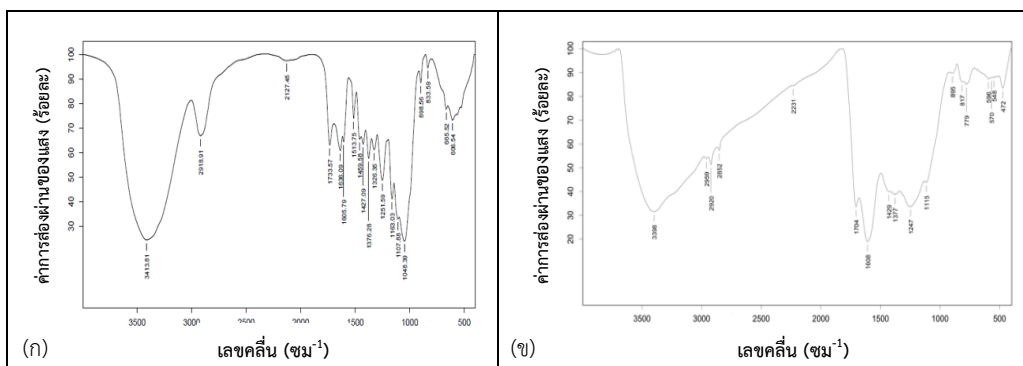
ดูดซับชานอ้อยหลังการดูดซับสีย้อม และภาพที่ 3 (ง) แสดงพื้นผิวของตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อยหลังการดูดซับสีย้อม



ภาพที่ 3 ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับชานอ้อยก่อนการดูดซับ (ก) ตัวดูดซับชานอ้อยหลังการดูดซับ (ข) ตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อยก่อนการดูดซับ (ค) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อยหลังการดูดซับ (ง)

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับทั้งสองชนิดด้วยเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่น 4,000-400 cm^{-1} ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าทั้งตัวดูดซับชานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อยแสดงสัญญาณของหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประเภทเซลลูโลส โดยพบสัญญาณเป็นแถบกว้างที่เลขคลื่น 3,413-3,398 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของการสั่นในพันธะไฮดรอกซี (O-H) ของโมเลกุลเซลลูโลส (Mandal and Chakrabarty, 2011) ซึ่งสามารถใช้เกิดพันธะกับโมเลกุลของสีย้อมมาลาไคท์กรีนในกระบวนการดูดซับได้ สัญญาณในช่วง 2,959-2,852 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของพันธะระหว่างคาร์บอนและไฮโดรเจน (C-H) ในโมเลกุลเซลลูโลส (Azaritorbat and Nasernejad, 2023) สัญญาณที่เลขคลื่น 1,733-1,704 cm^{-1} เป็นสัญญาณการสั่นของพันธะคาร์บอนิล (C=O) ของเอมิเซลลูโลสในโมเลกุลสารตัวอย่าง สัญญาณที่เลขคลื่น 1,251-1,247 cm^{-1} เป็นสัญญาณของพันธะเมทิลีน (CH_2) ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิแซ็กคาไรด์ประเภทเซลลูโลส (กิตติยา และคณะ, 2563) และสัญญาณที่เลขคลื่น 898-895 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic) ที่ตำแหน่ง β -1,4 เป็นลักษณะของเซลลูโลสและพบได้จากทั้ง 2 ตัวอย่าง จึงสามารถยืนยันได้ว่าโครงสร้างหลักของสารตัวอย่างชานอ้อยในงานวิจัยนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส โดยตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อยมีหมู่แอลคีน ($\text{C}=\text{C}$)

ที่เลขคลื่น $1,605\text{ cm}^{-1}$ ชัดเจน ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะใช้ในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับโมเลกุลของสีย้อมมาลาไคท์กรีน (Saygili and Güzel, 2018) ซึ่งสัญญาณอื่น ๆ สรุปไว้ในตารางที่ 1



ภาพที่ 4 FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับขานอ้อย (ก) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย (ข)

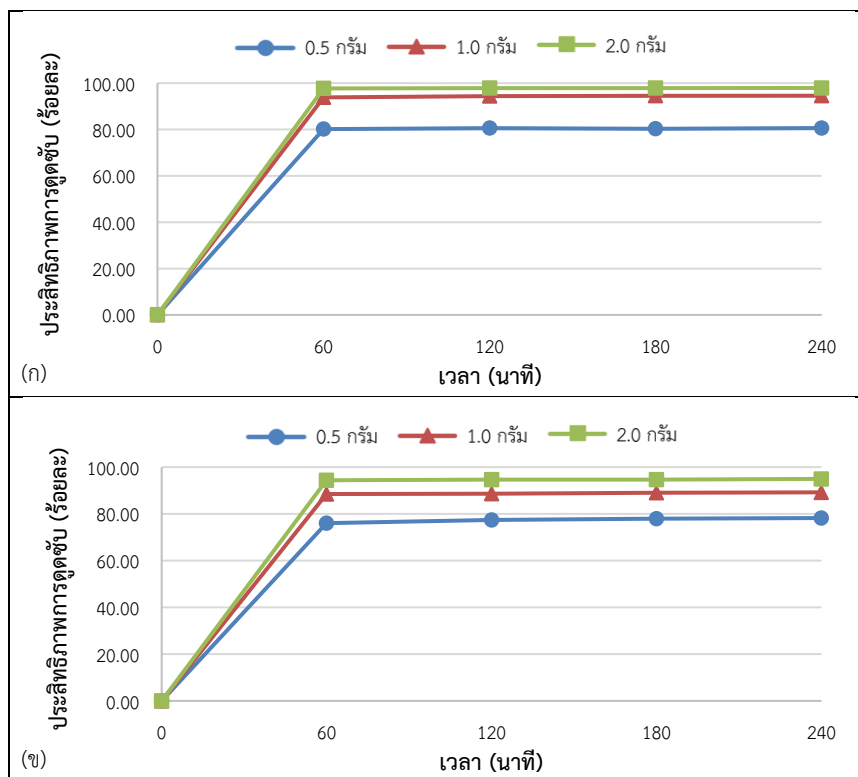
ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันจากเทคนิค FT-IR ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด

หมู่ฟังก์ชัน	เลขคลื่น (cm^{-1})	
	ขานอ้อย	ไบโอชาร์จากขานอ้อย
b-1,4 glycosidic	898	895
aromatic C-C	1,163	1,115
-CH ₂ twisting	1,251	1,247
C-H deformation	1,377	1,367
aromatic C=C	1,608	1,605
C=O from hemicelluloses	1,733	1,704
C-H stretching	2,918	2,920
O-H stretching	3,413	3,398

2. ผลของปริมาณตัวดูดซับ

นอกจากประเภทของวัสดุดูดซับแล้ว ปริมาณตัวดูดซับเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสีย งานวิจัยนี้ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยจำนวน 3 ปริมาณ ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 กรัม โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมมาลาไคท์กรีน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการวิจัยในภาพที่ 5 (ก) แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับขานอ้อยตามปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น คือ 78.22 89.21 และ 94.96 ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้ว่าการดูดซับเริ่มเข้าสู่สมดุลตั้งแต่ในช่วง 60 นาทีแรก เนื่องจากประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมหลัง 60 นาทีมีค่าคงที่ เช่นเดียวกับภาพที่ 5 (ข) แสดงค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย ที่มีค่าร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ คือ 80.62 94.56 และ 97.11 ตามลำดับ ซึ่งแสดงจุดสมดุลการดูดซับที่เวลา 60 นาทีเช่นกัน

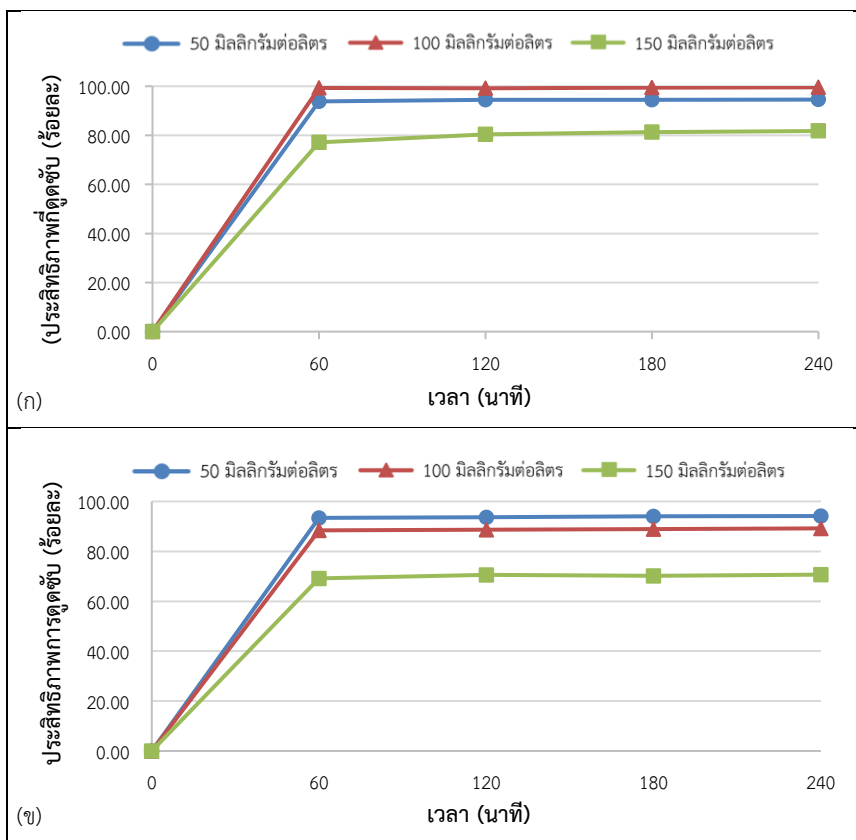
จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนออกจากสารละลายเพิ่มขึ้น ทั้งตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย



ภาพที่ 5 ผลของปริมาณตัวดูดซับขานอ้อย (ก) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย (ข) ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีน

3. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมมาลาไคท์กรีน

น้ำเสียในธรรมชาติมีความเข้มข้นขององค์ประกอบที่หลากหลาย จึงจำเป็นต้องศึกษาตัวแปรด้านความเข้มข้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าตัวดูดซับจะสามารถดูดซับปริมาณของสารมลพิษได้ทั้งหมด ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ 50 100 และ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่างานวิจัยโดยทั่วไป ใช้ปริมาณตัวดูดซับทั้งสองชนิด ชนิดละ 1.0 กรัม เป็นเวลา 240 นาที จากผลการวิจัย ภาพที่ 6 (ก) แสดงค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับขานอ้อยลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม คือ 94.16 89.21 และ 70.67 ตามลำดับ ภาพที่ 6 (ข) แสดงค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย มีค่าร้อยละการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม คือ 99.56 94.56 และ 81.76 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิจัยเป็นไปในทำนองเดียวกับภาพที่ 5 คือ การดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลตั้งแต่ช่วงเวลา 60 นาทีแรก และแสดงค่าการดูดซับคงที่ตลอดระยะเวลาในการทดลอง จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนออกจากสารละลายลดลง ทั้งตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย



ภาพที่ 6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมฟ้ามอลาโคทกรีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมฟ้ามอลาโคทกรีนของตัวดูดซับขานอ้อย (ก) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย (ข)

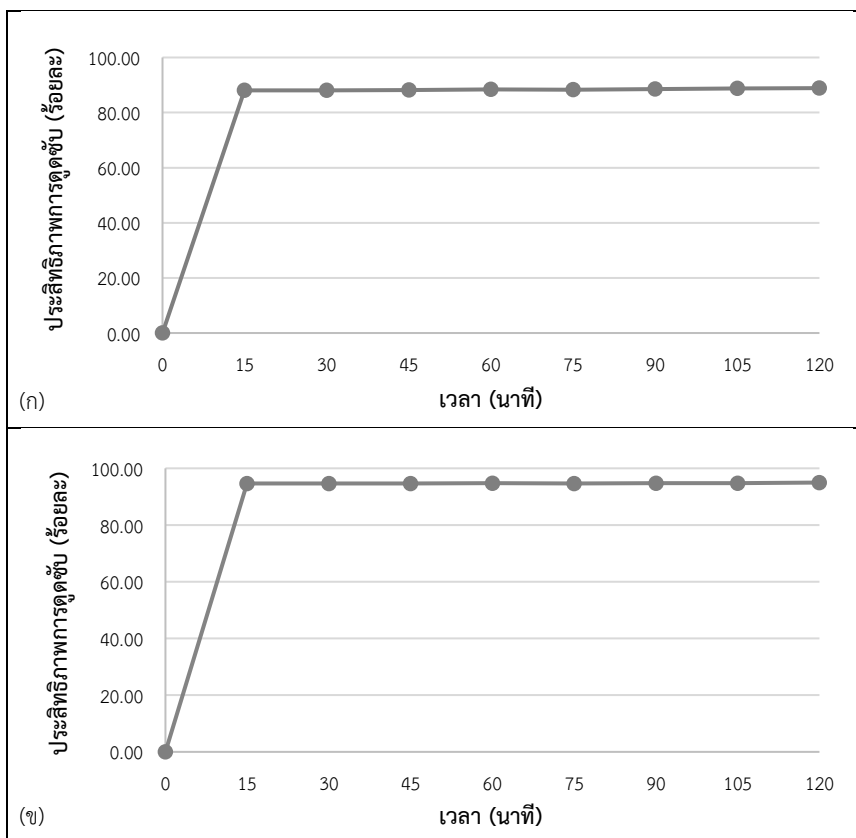
4. ผลของระยะเวลาในการดูดซับ

ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแสดงความสามารถในการเข้าสู่สมดุลการดูดซับแบบไดนามิกของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่มีจุดสมดุลการดูดซับเร็วจะมีความคุ้มค่าด้านเวลามากกว่า ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพื่อหาจุดสมดุลการดูดซับของตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย โดยศึกษาในช่วงเวลาที่ละเอียดขึ้น คือ เก็บตัวอย่างสารละลายทุก ๆ 15 นาที จนครบ 120 นาที ดังภาพที่ 7 (ก) แสดงค่าร้อยละการดูดซับของขานอ้อยเพิ่มขึ้นในช่วง 0 ถึง 15 นาทีแรก จากค่าร้อยละการดูดซับ 0.00 ถึง 88.00 และภาพที่ 7 (ข) แสดงค่าร้อยละการดูดซับของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยในช่วง 0 ถึง 15 นาที จากค่าร้อยละการดูดซับ 0.00 ถึง 94.60 และตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าร้อยละการดูดซับค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับภายในเวลา 15 นาที

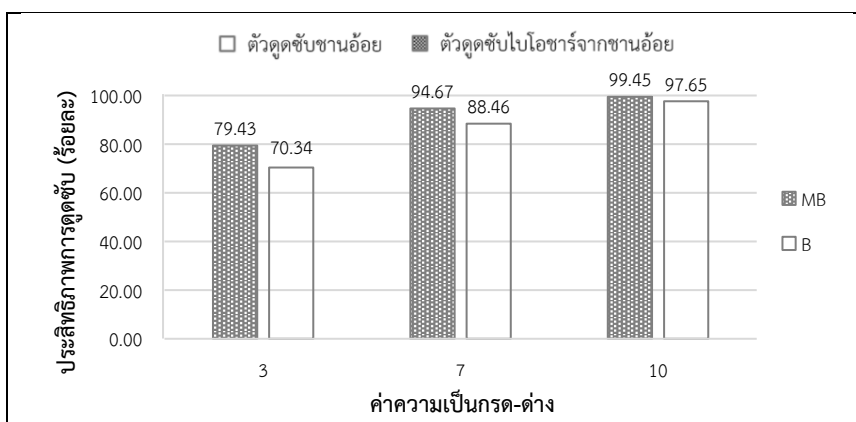
5. ผลของสภาวะกรด-ด่าง

น้ำเสียในธรรมชาตินอกจากจะมีความแปรปรวนเรื่องความเข้มข้นแล้ว ยังมีสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันด้วย เนื่องจากการปนเปื้อนของมลพิษหลายชนิด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปัจจัยของสภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อมฟ้ามอลาโคทกรีนที่บำบัดด้วยตัวดูดซับ

ชานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อย ซึ่งพบว่าตัวดูดซับทั้งสองชนิดจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น ดังภาพที่ 8



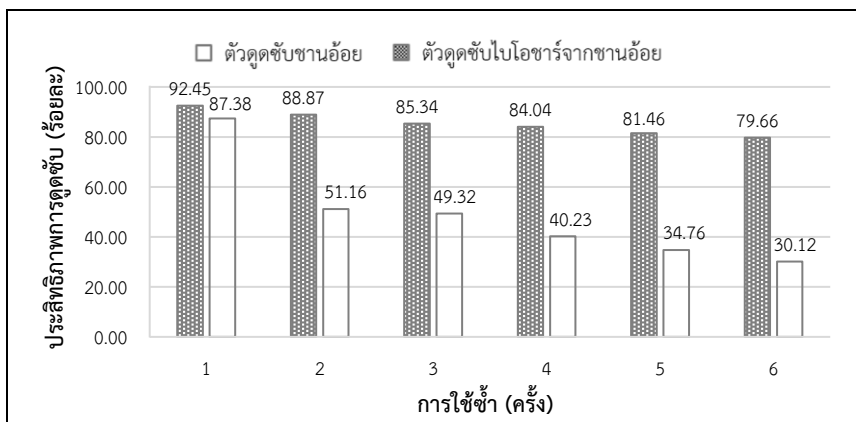
ภาพที่ 7 ผลของเวลาในการดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนของตัวดูดซับชานอ้อย (ก) และตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อย (ข)



ภาพที่ 8 ผลของสภาวะความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนของตัวดูดซับชานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากชานอ้อย

6. ผลของการใช้ซ้ำ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลจากการใช้ซ้ำตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยโดยไม่ผ่านกระบวนการใด ๆ จำนวน 6 ครั้ง ดังแสดงผลในภาพที่ 9 ซึ่งพบว่าตัวดูดซับขานอ้อยมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ตั้งแต่การใช้ซ้ำครั้งที่ 2 ในขณะที่ตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยยังคงแสดงประสิทธิภาพการดูดซับมากกว่าร้อยละ 80 จนถึงการใช้ซ้ำครั้งที่ 5



ภาพที่ 9 ผลของประสิทธิภาพการใช้ซ้ำของตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย

การอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการศึกษาลักษณะของตัวดูดซับขานอ้อยที่ผ่านกระบวนการดัดแปรด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ พบว่าตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยยังคงรูปผลึกอสัณฐาน เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่ำกว่าอุณหภูมิก่อผลึก ซึ่งขานอ้อยจะเริ่มเกิดผลึกได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป (Deepa *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 2 พบการเกิดผลึกที่ $2\theta = 22.0$ และ 26.5 องศา ซึ่งเป็นสัญญาณของเซลลูโลส และซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ตามลำดับ (Mandal and Chakrabarty, 2011; Adeniyi *et al.*, 2017) จึงเป็นไปได้ว่าภายในโมเลกุลของขานอ้อยมีการเปลี่ยนแปลงระดับโครงสร้าง สอดคล้องกับผลการศึกษาด้วยเทคนิค FT-IR ที่สัญญาณหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่ปรากฏ เกิดการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่มีพลังงานสูงขึ้นจากผลของปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) (Mimmo *et al.*, 2014) ในภาพที่ 4 พบสัญญาณที่เลขคลื่น 779 cm^{-1} ซึ่งเป็นสัญญาณของพันธะซิลิกอน-ออกซิเจน (Si-O) ในตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในโมเลกุล (ชาญชัย และณภัทร, 2563) นอกจากนี้การศึกษาด้วยเทคนิค SEM ยังยืนยันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจากลักษณะของพื้นผิวตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่มีความขรุขระมากขึ้นทำให้สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมได้มากขึ้น (Buddee *et al.*, 2011)

จากการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม ระยะเวลาในการดูดซับ สภาวะกรด-ด่าง ต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนในน้ำเสีย พบว่าปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับขานอ้อยและตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยปริมาณ 1.0 และ 2.0 กรัม มีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ ปริมาณ 1.0 กรัม ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลสีย้อม แต่เมื่อถึงจุดสมดุลการดูดซับ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ (ชาญชัย และณภัทร, 2563)

ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนที่ศึกษากันโดยส่วนมากจะอยู่ในช่วง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร (Mohamad *et al.*, 2019; Sharma and Nandi, 2013) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและความสามารถของตัวดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตรงกับจำนวนโมเลกุลของสีย้อม จากภาพที่ 6 แสดงค่าร้อยละการดูดซับที่ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมผ้ามาลาไคท์กรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่พื้นที่ในการดูดซับคงที่ จึงมีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง และผลจากการบดบังกันเองของโมเลกุลของสีย้อมที่เพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง โดยความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้ คือ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ตั้งแต่ 60 นาที แต่เมื่อพิจารณาในภาพที่ 7 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้น-ลดลงตลอดช่วงระยะเวลาที่ศึกษา ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการแบบไดนามิก ที่โมเลกุลของสีย้อมจะถูกดูดซับและปลดปล่อยที่พื้นผิวของตัวดูดซับตลอดเวลา (Henögl *et al.*, 2019)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสภาวะกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ จากภาพที่ 8 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มีค่าน้อยที่สุด และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 10 ทั้งนี้เพราะสีย้อมมาลาไคท์กรีนเป็นสีย้อมชนิดประจุบวก จะแตกตัวในสารละลายให้โครงสร้างที่มีประจุบวก มีผลให้โครโมฟอร์ (chromophore) ที่เป็นบวกกระจายอยู่ทั่วทั้งสารละลาย ในสภาวะกรด (pH 3) จะเกิดแรงผลักระหว่างประจุชั้นระหว่างประจุบวกในโมเลกุลของสีย้อมและประจุบวกที่พื้นผิวตัวดูดซับ (pH_{pzc} 6.86) ส่งผลให้โมเลกุลสีย้อมถูกดูดซับได้น้อย ในทางตรงกันข้ามเมื่อสารละลายอยู่ในสภาวะต่าง (pH 10) จะเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของโมเลกุลของสีย้อมและประจุลบที่พื้นผิวขานอ้อย ส่งผลให้โมเลกุลสีย้อมถูกดูดซับได้มากขึ้น (Butdee *et al.*, 2011; Sharma *et al.*, 2019) อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับที่สุด คือ ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 เนื่องจากเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้จากการเตรียมสารละลายสีย้อมในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเป็นกรด-ด่างที่ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับศูนย์ (pH_{pzc} 6.86) ของตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อย

การเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ นอกจากจะเป็นการช่วยลดปริมาณขยะชีวภาพแล้ว หากตัวดูดซับนั้นสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ก็จะเป็นการลดต้นทุนและเวลาในการแปรรูปตัวดูดซับ (Jampa *et al.*, 2020) จากผลการวิจัยการใช้ซ้ำในภาพที่ 9 พบว่าตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยมีสมบัติการใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 ครั้ง โดยผลการใช้ซ้ำในครั้งที่ 6 มีประสิทธิภาพการดูดซับลดลงต่ำกว่าร้อยละ 80.00 อย่างไรก็ตามการที่ตัวดูดซับสามารถใช้ซ้ำได้ก็เนื่องมาจากตัวดูดซับยังคงมีพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้อยู่นั่นเอง

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการเตรียมไบโอชาร์จากขานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับน้ำเสีย สีของผงตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยเปลี่ยนเป็นสีดำและมีความละเอียดมากขึ้น จากการวิเคราะห์ลักษณะตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยพบว่าองค์ประกอบหลักเป็นสารเซลลูโลสอสัญฐานที่มีลักษณะพื้นผิวขรุขระเพิ่มขึ้น ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่าตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายสีย้อมมาลาโคห์กรีนสูงกว่าขานอ้อยปกติ (ร้อยละ 97.11 และ 94.96 ตามลำดับ) ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวดูดซับ 1.0 กรัม โดยสภาพกรด-ด่างของสารละลายส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับอันเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ ตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมมาลาโคห์กรีนที่มีความเข้มข้นสูงสุด 150 มิลลิกรัมต่อลิตร (มากกว่าร้อยละ 80.00) ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สูงกว่างานวิจัยอื่นโดยทั่วไป นอกจากนี้ตัวดูดซับไบโอชาร์จากขานอ้อยยังสามารถใช้ซ้ำได้มากกว่า 5 ครั้ง โดยไม่ต้องผ่านการปรับสภาพพื้นผิว ผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเลือกวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2565). *ปัญหาน้ำเสียชุมชน*. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2565, จาก: <https://www.pcd.go.th/waters/%e0%b8%a3%e0%b8%b9%e0%b8%9b%e0%b9%81%e0%b8%9a%e0%b8%9a%e0%b8%a3%e0%b8%b0%e0%b8%9a%e0%b8%9a%e0%b8%9a%e0%b8%b3%e0%b8%9a%e0%b8%b1%e0%b8%94%e0%b8%99%e0%b9%89%e0%b8%b3%e0%b9%80%e0%b8%aa%e0%b8%b5%e0%b8%a2-page-1-2/>.

กิตติยา ปลื้มใจ กรองทิพย์ เต็มเกาะ เอกรัฐ มีชูวาศ และวิษณุ เพชรภา. (2563). การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูลอสจากขานอ้อย. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 9(9), 31-37.

กิติโรจน์ หวันตาหลา ชยาภาส ทับทอง และสินศุภา จุ้ยจุลเจิม. (2550). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วย ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตถ่านหินและกะลามะพร้าว. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี, 10(2), 104-112.

ชินขฐา ชัยรัตน์วรณ. (2550). *สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม*. สืบค้นเมื่อ 10 พฤศจิกายน 2565, จาก: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&read=true&count=true.

สรุปกรณี ละเอียดย่อน. (2564). การประยุกต์ใช้ขานอ้อยฟางข้าวและไมยราบยักษ์เป็นวัสดุเพาะเห็ดนางรมเทา. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร, 39(1), 28-39.

- ชาญชัย คหาปนะ และณภัทร โพธิ์วัน. (2563). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 15(2), 58-70.
- เทพฤทธิ์ ปิติฤทธิ์. (2544). *การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟในสารละลายสีย้อมโดยการดูดซับด้วยซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- นัฐภูมิ เพ็ชรชาติ พิมพ์ชนก ธาตรีวิจิตร หนึ่งหทัย ธราพร ศราวุฒิ ชูโลก และนวรรตน์ สีตะพงษ์. (2566). สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 39-49, doi: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2023.v42i1.254379>.
- นิรมล ปันลาย ประชุม คำพูน และกิตติพงษ์ สุวิโร. (2563). ผลิตภัณฑ์แผ่นใยซีเมนต์อัดผสมขานอ้อย. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรม*, 3(2), 59-69.
- ปณัฏ์ สุขสร้อย ปวิณอิศร์ชิต์ เคนจันท์ และฉัตรชัย เสนขวัญแก้ว. (2559). ศักยภาพการใช้ขานอ้อยเป็นอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 34(2), 133-140.
- พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์. (2555). การดูดซับสีย้อมด้วยผลิตภัณฑ์จากเกลบ. *รายงานวิจัย*. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วีระพงษ์ แซ่โจ้ว. (2545). *การบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยระบบ sequencing batch reactor system*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- สุดสายชล หอมทอง นเรศ เชื้อสุวรรณ และสุบดินท์ นิมรัตน์. (2554). การกำจัดสีเมทิลเรดด้วยการดูดซับ/วิธีทางชีวภาพ. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 16(2), 63-74.
- สุทธิดา พุทไธสง ปวีณา แอบเพชร และรวินา ศรีมูล. (2564). ประสิทธิภาพของผักตบชวาและจอกในการบำบัดน้ำเสียชุมชนด้วยระบบการปลูกแบบไร่น้ำจาลอง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 40(6), 415-421.
- สุภาวดี น้อยน้ำใส. (2560). การบำบัดน้ำเสียสีย้อมผ้าประเภทไตรรงค์ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*, 18(1), 31-40.
- Adeniyi, O.D., Yakatun, A.A., Adeniyi, M.I., Olutoye, M.A., Okafor, J.O., Dikwal, C.M., Ojo, A. and Kalu, E.E. (2017). Studies on characterization of solid fuel using municipal solid waste from Bida, Nigeria. In Ojurongbe, O. (Ed.). *Translating research findings into policy in deve*, pp. 322-326. Enfield: LAP LAMBERT Academic Publishing.
- Azaritorbat, A. and Nasernejad, B. (2023). Optimization of the removal efficiency of o-toluidine adsorption on sugarcane bagasse or biodegradation using *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on bagasse. *South African Journal of Chemical Engineering*, 44, 318-328, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.02.003>.
- Buddee, S., Wongnawa, S., Sirimahachai, U. and Puetpaibool, W. (2011). Recyclable UV and visible light photocatalytically active amorphous TiO₂ doped with M (III) ions (M=Cr and Fe). *Materials Chemistry and Physics*, 126(1-2), 167-177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.11.044>.

- Deepa, A., Prakash, P. and Mishra, B.K. (2021). Performance of biochar-based filtration bed for the removal of Cr(VI) from pre-treated synthetic tannery wastewater. *Environmental Technology*, 42(2), 257-269, doi: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1626912>.
- Henögl, E., Haberl, V., Ablasser, J. and Schennach, R. (2019). Adsorption and desorption of organic molecules from thin cellulose films. *Frontiers in Materials*, 6, doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00178>.
- Jampa, S.S.K., Unnarkat, A.P., Vanshpati, R., Pandian, S., Sinha, M.K. and Dharaskar, S. (2020). Adsorption and recyclability aspects of humic acid using nano- ZIF-8 adsorbent. *Environmental Technology and Innovation*, 19, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100927>.
- Mali, A.K. and Nanthagopalan, P. (2021). Thermo-mechanical treatment of sugarcane bagasse ash with very high LOI: A pozzolanic paradigm. *Construction and Building Materials*, 288, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122988>.
- Mandal, A. and Chakrabarty, D. (2011). Isolation of nanocellulose from waste sugarcane bagasse (SCB) and its characterization. *Carbohydrate Polymers*, 86(3), 1291-1299, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.030>.
- Mimmo, T., Panzacchi, P., Baratieri, M., Davies, C.A. and Tonon, G. (2014). Effect of pyrolysis temperature on miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) biochar physical, chemical and functional properties. *Biomass and Bioenergy*, 62, 149-157, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.004>.
- Mohamad, M., Mohammad, R., May, T.S. and Wei, L.J. (2019). Removal of malachite green by sugarcane bagasse biochar using response surface methodology. *AIP Conference Proceedings*, 2068(1), doi: <https://doi.org/10.1063/1.5089328>.
- Saygili, H. and Güzel, F. (2018). Usability of activated carbon with well-developed mesoporous structure for the decontamination of malachite green from aquatic environments: Kinetic, equilibrium and regeneration studies. *Journal of Porous Materials*, 25, 477-488, doi: <https://doi.org/10.1007/s10934-017-0459-1>.
- Sharma, A., Syed, Z., Brighu, U., Gupta, A.B. and Ram, C. (2019). Adsorption of textile wastewater on alkali-activated sand. *Journal of Cleaner Production*, 220, 23-32, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.236>.
- Sharma, N. and Nandi, B.K. (2013). Utilization of sugarcane bagasse, an agricultural waste to remove malachite green dye from aqueous solutions. *Journal of Materials and Environmental Science*, 4(6), 1052-1065.
- Surendra, S.T. and Sharanappa, S. (2000). Integrated management of nitrogen and phosphorus in maize (*Zea mays*) and their residual effect on cowpea (*Vigna unguiculata*). *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 70(2), 119-121.