

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดด้วยวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวา

ประดินันท์ เอี่ยมสะอาด^{1*} วชิราภรณ์ ตันติพนาทิพย์²

Received : September 20, 2022

Revised : April 17, 2023

Accepted : April 26, 2023

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของสีสังเคราะห์ในสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ รวมทั้งสุขภาพของมนุษย์เป็นอย่างมาก นำไปสู่ความสนใจในการพัฒนาแนวทางการบำบัดสีย้อมอุตสาหกรรมที่มักพบปนเปื้อนในน้ำทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของชีวมวลผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ซึ่งเป็นวัชพืชน้ำและเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมคองโกเรด โดยการเตรียมวัสดุดูดซับจากชีวมวลผักตบชวาที่มีขนาด 250 - 425 μm เพื่อใช้ในการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่าปริมาณวัสดุดูดซับ 1 g ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด 60 mg/l ระยะเวลาดูดซับ 150 นาที และค่า pH สารละลายเท่ากับ 2 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมคองโกเรดของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวา โดยให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดในช่วงระหว่าง 75.58 – 93.25% นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ค่าประจุรวมบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับยังพบว่าประจุรวมบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาเป็นประจุบวก ($\text{pH}_{\text{zpc}} = 5.8$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่สูงที่สุดในสารละลายสีย้อมที่มีค่า $\text{pH} = 2.0$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชีวมวลผักตบชวาสามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมคองโกเรดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ยังพบว่าการศึกษาสภาวะต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับยังเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนารูปแบบการบำบัดสีย้อมอุตสาหกรรมชนิดอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

คำสำคัญ: การดูดซับ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) วัสดุดูดซับ สีย้อมคองโกเรด

¹ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
อีเมล: pradinunt.e@aru.ac.th

² อาจารย์ประจำหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิตสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา
อีเมล: watcharaporn@aru.ac.th

* ผู้นิพนธ์หลัก อีเมล: pradinunt.e@aru.ac.th

OPTIMIZATION OF CONGO RED DYE ADSORPTION ONTO WATER HYACINTH BIOMASS ADSORBENT

Pradinunt Eiamsa-ard^{1*} Watcharaporn Tantipanathip²

Abstract

The contamination of synthetic dyes in the environment affects the ecosystem and many forms of life as well as deteriorates large-scale human health, leading to the remediation process development of the supplemented chemical dyes involved in industrial effluent. The purpose of this study was to determine the efficiency of water hyacinth biomass (*Eichhornia crassipes*), an aquatic weed and agricultural waste, as an adsorbent for the removal of Congo red dye. The derived 250 - 425 μm water hyacinth biomass adsorbent was applied for evaluation of factors affecting the Congo red dye adsorption in the batch experiment. The results revealed the maximum adsorption efficiency was properly demonstrated at 75.58–93.25% based on the variable conditions along with 1 g adsorbent dose, 60 mg/l initial Congo red concentration, 150 min of contact time as well as the solution pH of 2.0. Furthermore, the point of zero charges (pH_{zpc}) of water hyacinth biomass adsorbent was identified as the positively charged ($\text{pH}_{\text{zpc}} = 5.8$) in agreement with the highest adsorption capacity under the optimized pH 2.0 of Congo red dye solution. The experimental data, hence, confirmed the applicability of water hyacinth biomass categorized as the adsorbent for Congo red dye removal. The determination of adsorption parameters also exhibited an excellent method to treat an environment contaminated with other industrial dyes.

Keywords: Adsorption, Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), Adsorbent, Congo red dye

¹ Department of Environmental science, Faculty of Science and Technology, Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University, e-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

² Department of Environmental science, Faculty of Science and Technology, Phranakorn Si Ayutthaya Rajabhat University, e-mail: watcharaporn@aru.ac.th

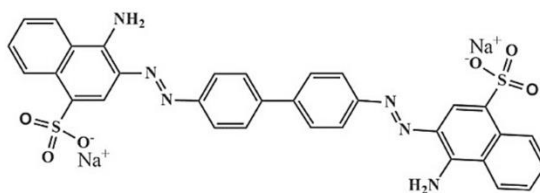
* Corresponding author, e-mail: pradinunt.e@aru.ac.th

บทนำ

สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyes) เป็นสารประกอบเคมีที่มีคุณสมบัติในการย้อมเกาะกับพื้นผิววัสดุ โดยเฉพาะผ้าหรือสิ่งทอจึงนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ได้แก่ อุตสาหกรรมย้อมผ้า การผลิตกระดาษ และเครื่องสำอาง เป็นต้น (Yagub et al., 2014) โครงสร้างหลักของสีย้อมส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมักพบวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) ในโครงสร้าง นอกจากนี้ยังพบว่าสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ นั้นสามารถละลายได้ดีในน้ำ แต่ย่อยสลายได้ยากเนื่องจากคุณสมบัติของโครงสร้างที่ทนต่อปัจจัยทางกายภาพทั้งแสง ความร้อน รวมไปถึงความเป็นกรด-ด่าง ของแหล่งน้ำที่พบการปนเปื้อน เป็นต้น (Khatri et al., 2018) จึงทำให้การบำบัดหรือกำจัดสีย้อมเหล่านี้ไม่สามารถทำได้ง่ายภายในระยะเวลาจำกัด ทั้งนี้พบว่าการปนเปื้อนของสีย้อมในสิ่งแวดล้อมนั้นส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศเป็นอย่างมาก ดังเช่นการปนเปื้อนของ สีย้อมในแหล่งน้ำผิวดินไม่เพียงแต่ทำให้น้ำเปลี่ยนสีเพียงเท่านั้น แต่ยังขัดขวางการส่องผ่านของแสงทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง (Imran et al., 2014) ส่งผลต่อการเจริญของสัตว์น้ำ เนื่องจากการลดลงของปริมาณออกซิเจนละลาย (Dissolved oxygen, DO) นอกจากนี้ยังพบว่าสีย้อมที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยพบว่าองค์ประกอบของสีย้อมส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มสารก่อมะเร็ง และยังเป็นสารในกลุ่มที่กระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพันธุกรรมสิ่งมีชีวิตทุกชนิดอีกด้วย (Lellis et al., 2019)

ในแต่ละปีทั่วโลกมีการผลิตสีย้อมสังเคราะห์เพิ่มขึ้นถึง 108 ตัน โดยส่วนใหญ่เป็นสีในกลุ่มอะโซ (Azo dye) ซึ่งคิดเป็น 60 – 70% ของการผลิตทั้งหมด หนึ่งในผลิตภัณฑ์สีย้อมกลุ่มอะโซที่มีการใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Harja et al., 2022) ได้แก่ สีย้อมคองโกเรด (Congo red) ซึ่งจัดเป็นสีย้อมในกลุ่มอะโซประจุลบ (Anionic azo dye) ที่มีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิต โดยพบว่าเมื่อได้รับสัมผัสมักก่อให้เกิดอาการแพ้ โครงสร้างและองค์ประกอบของสีคองโกเรด ทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนัง ดวงตา และระบบทางเดินอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่าการได้รับเข้าสู่ร่างกายยังทำให้เกิดภาวะลิ่มเลือดและรบกวนระบบทางเดินหายใจอีกด้วย (Roy & Mondal, 2017) สีย้อมคองโกเรดเป็นสารประกอบเคมีในกลุ่มที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากเนื่องจากโครงสร้างที่ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติก (ภาพที่ 1) และยังทนต่อการเสื่อมสภาพด้วยปัจจัยทางกายภาพ-เคมี อุณหภูมิ ความร้อน รวมไปถึงการคงตัวต่อแสง (Foroughi-Dahr et al., 2014) เนื่องด้วยความสามารถในการย่อยสลายสีย้อมคองโกเรดที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมด้วยวิธีทางชีวภาพเกิดขึ้นได้ช้าจึงเป็นแนวทางที่ไม่ได้รับความนิยมในการเลือกใช้เพื่อการบำบัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรม ทั้งยังพบว่าวิธีการทางชีวภาพยังสามารถบำบัดได้ในสภาวะที่พบการปนเปื้อนในระดับความเข้มข้นไม่สูงมาก (Mondal, 2008) จึงนำไปสู่การศึกษาเทคโนโลยีอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้ในการบำบัดสีย้อมคองโกเรดที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation)

(Radoor et al., 2020) การตกตะกอนและรวมตะกอน (Coagulation and flocculation) (Luo et al., 2019) และ กระบวนการโอโซนเนชั่น (Ozonation process) (Tapalad et al., 2008) เป็นต้น



ภาพที่ 1 โครงสร้างสีย้อมคองโกเรต (ประยุกต์จาก Radoor et al., 2020)

จากเทคโนโลยีในการกำจัดสีย้อมที่ได้กล่าวมานั้นส่วนใหญ่มีต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง และยังพบว่าในการดำเนินงานในหลาย ๆ ขั้นตอนมีความยุ่งยากซับซ้อน รวมทั้งบางเทคโนโลยีทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษสูงขึ้น (Rajamohan, 2009) ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้เทคนิคการดูดซับ (Adsorption technique) จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจเนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูง การดำเนินการไม่ซับซ้อนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทั้งยังสามารถเลือกใช้วัสดุในการดูดซับที่ไม่มีความเป็นพิษได้หลายชนิด (Wong et al., 2020) หนึ่งในวัสดุที่น่าสนใจในการเลือกใช้เป็นวัสดุดูดซับ ได้แก่ ผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ซึ่งพบมากในแหล่งน้ำทั่วไป และยังเป็นวัชพืชน้ำที่สำคัญชนิดหนึ่ง เนื่องด้วยการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำและการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรน้ำ (Roy & Mondal, 2017) เป็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งเกี่ยวกับรายงานการเตรียมวัสดุดูดซับในการกำจัดสีย้อมคองโกเรตจากรากผักตบชวาที่ขนาดอนุภาค 75 – 300 μm พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึง 96% ในสภาวะของปัจจัยต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ในระยะเวลา 90 นาที (Wanyonyi et al., 2014) ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมีความสนใจนำผักตบชวามาเตรียมเป็นวัสดุดูดซับในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมคองโกเรตในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อพัฒนาสู่ทางเลือกในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียอุตสาหกรรมเป็นลำดับต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากชีวมวลผักตบชวาในการดูดซับสีย้อมคองโกเรต ควบคู่กับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับในระดับห้องปฏิบัติการ

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุดูดซับจากชีวมวลผักตบชวา

ชีวมวลผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) เก็บจากคลองสาธารณะในพื้นที่อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา พิจารณาเลือกเก็บลำต้นที่มีการเจริญเต็มที่และพบการแพร่กระจายมากบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยเฉลี่ยมีความสูงลำต้นประมาณ 30 cm กำจัดส่วนใบและรากก่อนนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด 2 ครั้ง ก่อนนำมาหั่นให้มีขนาดประมาณ 1 – 2 cm แล้วล้างอีกครั้งด้วยน้ำกลั่นปราศจากประจุ (Deionized water) (Adrona B30, Latvia) ทำให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บดละเอียดด้วยเครื่องปั่นเอนกประสงค์ แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 40 และ 60 mesh (Cole-parmer, USA) (ประยุกต์จาก Foroughi-Dahr et al., 2014) ก่อนนำตัวอย่างชีวมวลไปใช้ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดได้ดำเนินการกำจัดคลอโรฟิลล์โดยนำอนุภาคชีวมวลผักตบชวาที่เตรียมไว้แช่ในสารละลายเอทานอล 95% ในอัตราส่วน 1 : 10 (w/v) เป็นเวลา 30 นาที (ประยุกต์จาก Khan et al., 2015) จากนั้นกำจัดสารละลายเอทานอลออกแล้วตามด้วยการล้างชีวมวลผักตบชวากับน้ำกลั่นปราศจากประจุจำนวน 2 ครั้ง กรองแยกชีวมวลด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C Glass microfilter membrane, Whatman) ในระบบสุญญากาศ นำชีวมวลผักตบชวาไปทำให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นเอนกประสงค์ ก่อนนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 40 และ 60 mesh จะได้วัสดุดูดซับจากชีวมวลผักตบชวาที่มีขนาดอนุภาคระหว่าง 250 - 425 μm เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

2. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรด

เตรียมกราฟมาตรฐานสีย้อมคองโกเรด (Standard curve) โดยเตรียมสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้น 0 20 40 60 80 และ 100 mg/L วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 497 nm (UV/Visible Spectrophotometer SP-8001, Metertech, Taiwan) แล้วนำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของสีย้อมคองโกเรดภายหลังจากการดูดซับด้วยวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาที่เตรียมขึ้น ซึ่งในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรด (%CR adsorption) สามารถคำนวณจากค่าความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดก่อนและหลังการดูดซับภายใต้สภาวะในการดูดซับที่กำหนด นำค่าความเข้มข้นที่ได้ในการทดลองมาคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับดังสมการที่ 1 (ประยุกต์จาก Ponnusamy & Subramaniam, 2013)

$$\% \text{CR adsorption} = \frac{(C_0 - C_t) \times 100}{C_0} \quad (1)$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด (mg/L)

C_t = ความเข้มข้นสุดท้ายสีย้อมคองโกเรด (mg/L)

3. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากชีวมวลผักตบชวาได้พิจารณาการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด ระยะเวลาดูดซับ และค่า pH ของสารละลาย (ประยุกต์จาก Ponnusamy & Subramaniam, 2013)

3.1 การศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสม (Adsorbent dose) ทำได้โดยศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาที่ 0 1 2 3 4 5 และ 6 g ในการดูดซับสารละลายสีย้อมคองโกเรดที่ความเข้มข้น 20 mg/l ปริมาตร 100 ml ภายใต้สภาวะในการดูดซับที่ค่า pH = 7 ($\pm$ 0.5) ระยะเวลาดูดซับ 60 นาที อุณหภูมิ 30°C เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เมื่อครบกำหนดเวลาจึงกำจัดวัสดุดูดซับออกจากสารละลายสีย้อมคองโกเรดด้วยการกรองบนกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C Glass microfilter membrane, Whatman) แล้วนำสารละลายสีย้อมที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 497 nm เปรียบเทียบความเข้มข้นกับกราฟมาตรฐานสีย้อมคองโกเรด คำนวณประสิทธิภาพการดูดซับตามสมการที่ 1 และพิจารณาเลือกปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองถัดไป (ดำเนินการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ)

3.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรดที่เหมาะสม (Initial dye concentration) ดำเนินการโดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรดที่ 0 20 40 60 และ 80 mg/l ปริมาตร 100 ml โดยเลือกใช้ปริมาณวัสดุดูดซับที่ 1 g (ปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.1) ปรับค่า pH สารละลายเท่ากับ 7.0 ($\pm$ 0.5) กำหนดระยะเวลาดูดซับที่ 60 นาที อุณหภูมิ 30°C และเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมคองโกเรดตามขั้นตอนที่ระบุในขั้นตอนที่ 3.1 แล้วพิจารณาเลือกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรดที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.3 การศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม (Contact time) ดำเนินการโดยกำหนดระยะเวลาในการดูดซับที่ 0 30 60 90 120 150 และ 180 นาที โดยใช้ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 g และความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด 60 mg/l (ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.2) ปริมาตร 100 ml ปรับค่า pH สารละลายเท่ากับ 7.0 ($\pm$ 0.5) อุณหภูมิ 30°C และเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมคองโกเรดตามขั้นตอนที่ระบุในขั้นตอนที่ 3.1 แล้วพิจารณาเลือกระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.4 การศึกษาค่า pH ของสารละลายที่เหมาะสม โดยการเตรียมสารละลายสีย้อมคองโกเรดที่ความเข้มข้น 60 mg/l ปรับค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10 ($\pm$ 0.5) ด้วยสารละลาย 0.1 N NaOH หรือ 0.1 N H₂SO₄ จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 1 g อุณหภูมิ 30 °C ระยะเวลาในการดูดซับ 150 นาที (ระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3) และเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมคองโกเรดตามขั้นตอนที่ระบุในขั้นตอนที่ 3.1

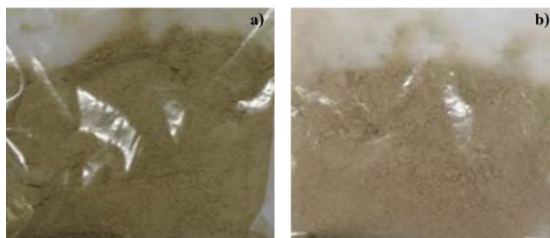
4. การศึกษาค่า pH ที่ทำให้ประจุบนผิวของวัสดุดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ (pH_{zpc} : point of zero charge)

การศึกษาค่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับทำได้โดยเตรียมสารละลาย 0.01 M NaCl ปริมาตร 50 ml (เตรียมโดยใช้น้ำกลั่นปราศจากประจุ) ปรับค่า pH ของสารละลาย 0.01 M NaCl ให้มีค่าเท่ากับ pH 2 – 12 (จำนวน 11 ชุดการทดลอง) ด้วยสารละลาย 0.01 N NaOH หรือ 0.01 N H_2SO_4 แล้วนำวัสดุดูดซับชีวมวล ผักตบชวา 0.01 g ใส่ลงในสารละลาย 0.01 M NaCl ที่ปรับค่า pH ตามที่กำหนด ศึกษาการดูดซับที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจึงวัดค่า pH ของสารละลาย 0.01 M NaCl สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของค่า pH ที่วัดได้หลังจากที่ครบกำหนดเวลา (pH_{final}) กับค่า pH เริ่มต้น ($pH_{initial}$) เพื่อประเมินค่า pH_{zpc} ซึ่งเป็นจุดที่ $pH_{final} - pH_{initial} = 0$ (Khaniabadi et al., 2017b; Bamroongwongdee et al., 2019)

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

1. การเตรียมวัสดุดูดซับจากชีวมวลผักตบชวา

การเตรียมชีวมวลผักตบชวาเป็นวัสดุดูดซับสำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดโดยการเตรียมชีวมวลผักตบชวาให้มีขนาดอนุภาค 250 - 425 μm (ภาพที่ 2a) ซึ่งก่อนการนำไปใช้ในการทดลองได้ผ่านขั้นตอนการกำจัดคลอโรฟิลล์ด้วยการแช่อนุภาคชีวมวลผักตบชวาในสารละลายเอทานอล 95% (ภาพที่ 2b) ทั้งนี้เพื่อลดการรบกวนการดูดกลืนแสงจากสีของรงควัตถุโดยเฉพาะคลอโรฟิลล์ที่อาจละลายในสารละลายสีย้อมคองโกเรดในระหว่างการทดลอง (Khan et al., 2015) โดยในการศึกษาวัสดุดูดซับในครั้งนี้ได้พิจารณาเลือกผักตบชวาเนื่องจากโครงสร้างของผนังเซลล์ประกอบด้วยลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic material) โดยเฉพาะในส่วนของรากและลำต้น ซึ่งประกอบด้วยสัดส่วนของพอลิเมอร์ชนิดเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินในสัดส่วนประมาณ 33 25 และ 10% ตามลำดับ (Salahuddin et al., 2021) จึงทำให้ชีวมวลผักตบชวาสามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมได้เนื่องจากความสามารถในการจับยึดกันระหว่างโครงสร้างสีย้อมและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์ลิกโนเซลลูโลส เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) เป็นต้น (Kezerle et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตาม ในการพัฒนาอนุภาคชีวมวลผักตบชวาให้เป็นวัสดุดูดซับควรพิจารณาถึงสมบัติทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมี รวมไปถึงการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาและพื้นผิววัสดุดูดซับ



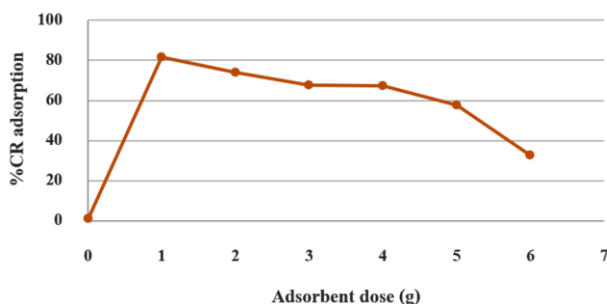
ภาพที่ 2 อนุภาคชีวมวลผักตบชวาที่มีขนาด 250 μm (a) และขนาด 250 μm ที่ผ่านการกำจัดคลอโรฟิลล์ (b)

2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากชีวมวลผักตบชวาได้พิจารณาการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด ระยะเวลาดูดซับ และค่า pH ของสารละลาย ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

2.1 การศึกษาปริมาณวัสดุดูดซับที่เหมาะสม (Adsorbent Dose)

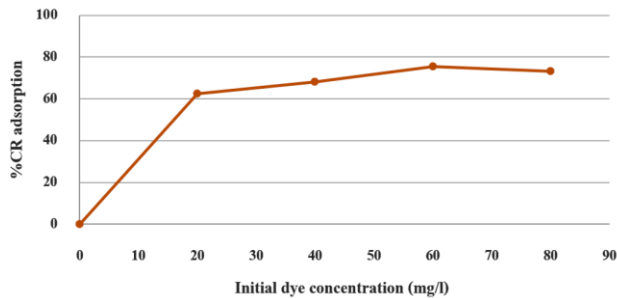
ปริมาณวัสดุดูดซับเป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการดูดซับ โดยพบว่าบริเวณจำเพาะ (Active site) ของวัสดุดูดซับเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด (Tejada-Tovar et al., 2021) เมื่อวัสดุดูดซับเกิดการอิ่มตัวหรือเกิดสมดุลของการดูดซับจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับลดลงแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับให้มากขึ้นก็ตาม (Forgacs et al., 2004) นอกจากนี้ยังพบว่า ในขณะที่ปริมาณวัสดุดูดซับในสารละลายมีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นนั้น อาจส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอนุภาควัสดุดูดซับ (Particle aggregation) ทำให้พื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับลดลง และส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ (Pavin et al., 2019) จากการทดลองใช้วัสดุดูดซับผักตบชวาที่ปริมาณ 0 1 2 3 4 5 และ 6 g ในการดูดซับสีย้อมคองโกเรด พบว่าการใช้วัสดุดูดซับปริมาณ 1 g ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ $81.70 \pm 0.15\%$ และยังพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุดูดซับมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (ภาพที่ 3) ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้สอดคล้องกับการทดลองใช้ไคตินจากเปลือกกุ้งในการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของวัสดุดูดซับมากกว่า 2 mg มีผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง อาจเนื่องมาจากสีย้อมถูกดูดซับบนวัสดุดูดซับอย่างสมดุลเมื่อใช้ปริมาณวัสดุดูดซับไม่เกิน 2 mg (Hou et al., 2021) ทั้งนี้จึงได้พิจารณาเลือกใช้วัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาปริมาณ 1 g ไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดเมื่อใช้วัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาปริมาณ 0 1 2 3 4 5 และ 6 g

2.2 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรดที่เหมาะสม (Initial dye concentration)

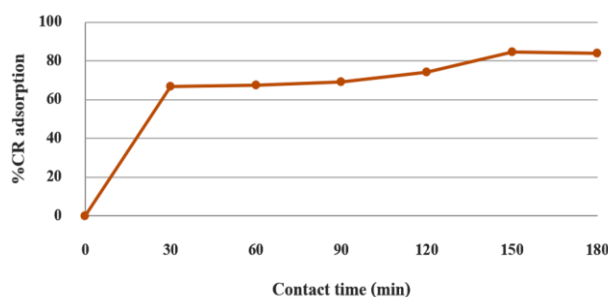
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคองโกเรดและปริมาณวัสดุดูดซับซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมของวัสดุดูดซับและส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดอย่างสัมพันธ์กัน โดยผลการทดลองศึกษาความเข้มข้นสีย้อมในช่วงระหว่าง 20 – 80 mg/l พบว่าการดูดซับสีย้อมของวัสดุดูดซับค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับความเข้มข้นสีย้อมที่เพิ่มขึ้นและพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ (%CR adsorption) สูงสุดที่ 75.58 ± 1.14 % เมื่อความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรดเท่ากับ 60 mg/l และลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 80 mg/l (ภาพที่ 4) สอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นระหว่าง 90 – 93% เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมจาก 25 – 100 ppm และจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมถึง 500 ppm (Pavin et al., 2019) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นสีย้อมที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีในสารละลาย ทำให้เกิดการสัมผัสและยึดจับระหว่างโมเลกุลสีกับวัสดุดูดซับผักตบชวา แต่อย่างไรก็ตามหากความเข้มข้นสีย้อมที่เพิ่มขึ้นในขณะที่การทดลองที่มีปริมาณวัสดุดูดซับเท่าเดิม ทำให้เกิดการแข่งขันเข้าจับบริเวณจำเพาะ (Active site) บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับและเกิดสมดุลของการดูดซับ โมเลกุลสีส่วนใหญ่จึงไม่สามารถดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับได้อีกและยังคงอยู่ในสารละลายจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมที่สูงเกินไป (Stjepanović et al., 2021; Tejada-Tovar et al., 2021) ทั้งนี้จึงได้พิจารณาเลือกความเข้มข้นสีย้อมคองโกเรด 60 mg/l ไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรด 0 20 40 60 และ 80 mg/l

2.3 การศึกษาระยะเวลาดูดซับที่เหมาะสม (Contact time)

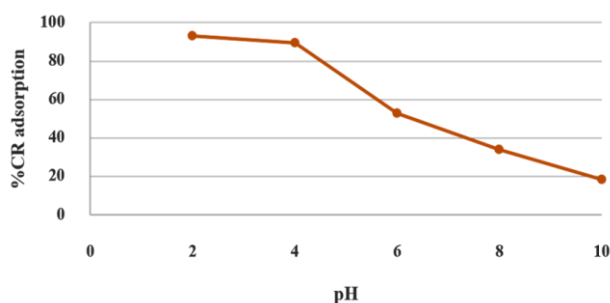
ในกระบวนการดูดซับสีย้อมทั่ว ๆ ไปพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาที่วัสดุดูดซับสัมผัสกับโมเลกุลสีย้อมมักส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงแรกจะพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากระดับความเข้มข้นสีย้อมในสารละลายและบริเวณจำเพาะ (Active site) ของพื้นผิววัสดุดูดซับมีมากพอสำหรับกระตุ้นกลไกการดูดซับ และหลังจากนั้นการดูดซับจะเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุล ในระยะนี้โมเลกุลสีที่สัมผัสอยู่บนพื้นผิวจะถูกดูดซับและอาจเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนของวัสดุดูดซับ (Hu et al., 2010; Wanyonyi et al., 2014) ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่ระยะเวลา 150 นาที การดูดซับสีย้อมคองโกเรดของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาเกิดขึ้นสูงสุดที่ $84.56 \pm 0.02\%$ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับที่ 180 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับเริ่มคงที่และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย (ภาพที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองดูดซับสีย้อมคองโกเรดด้วยวัสดุดูดซับที่เตรียมจากไม้ป้อปลา (*Populus euroamericana*) พบว่าในช่วง 60 นาทีแรกอัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเข้าสู่สมดุลของการดูดซับในระยะเวลา 180 นาที โดยพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับคงที่แม้ว่าระยะเวลาการดูดซับเพิ่มมากขึ้น (Stjepanović et al., 2021) ทั้งนี้จึงได้พิจารณาเลือกระยะเวลาการดูดซับที่ 150 นาที ไปใช้ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรด ที่ระยะเวลาดูดซับ 0 30 60 90 120 150 และ 180 นาที

2.4 การศึกษาค่า pH ของสารละลายที่เหมาะสม

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุบนพื้นผิววัสดุดูดซับและประจุของโมเลกุลสีย้อม จากผลการทดลองพบว่าวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาสามารถดูดซับสีย้อมคองโกเรตได้สูงในสภาวะที่สารละลายเป็นกรด โดยเฉพาะที่ pH 2.0 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ $93.25 \pm 0.35\%$ และเมื่อค่า pH ของสารละลายสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ pH 10.0 มีค่าต่ำที่สุด ($18.25 \pm 1.27\%$) (ภาพที่ 6) สอดคล้องกับผลการทดลองกำจัดสีย้อมคองโกเรตด้วยการดูดซับบนวัสดุดูดซับเปลือกเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ pH ต่ำ (pH = 2.0) (Ponnusamy & Subramaniam, 2013) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในสารละลายที่มี pH ต่ำ ความเข้มข้นของ H^+ มีปริมาณสูง จึงทำให้พื้นผิวของวัสดุดูดซับอึดตัวไปด้วยอนุภาค H^+ และมีคุณสมบัติเป็นประจุบวก ดังนั้นในสภาวะสารละลายที่มี pH ต่ำ จึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic attraction) ของประจุบวกบนพื้นผิววัสดุดูดซับกับประจุลบในโมเลกุลสีย้อมคองโกเรต ส่งผลให้การดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Al-Degs et al., 2008; Khaniabadi et al., 2017a) นอกจากนี้ยังพบว่าในสภาวะสารละลายสีย้อมคองโกเรตที่ pH ต่ำ สามารถกระตุ้นให้เกิดการดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากพันธะเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุดูดซับประเภทลิกโนเซลลูโลส เช่น พันธะไฮโดรเจนและพันธะไอออนิก เป็นต้น (Foroughi-Dahr et al., 2014)

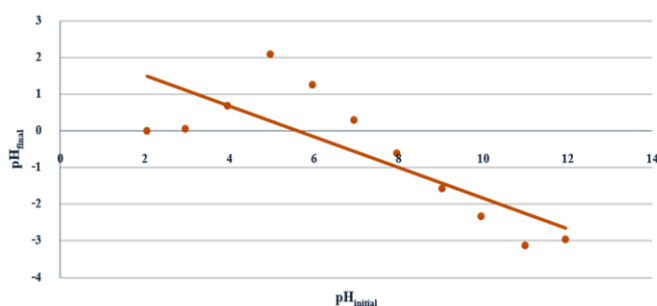


ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรตที่ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 2 4 6 8 และ 10

3. การศึกษาค่า pH ที่ทำให้ประจุบนผิวของวัสดุดูดซับมีค่าเป็นศูนย์ (pH_{zpc} : point of zero charge)

ผลการศึกษาค่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับผักตบชวาพบว่ามีค่าเท่ากับ 5.8 ($pH_{zpc} = 5.8$) (ภาพที่ 7) ซึ่งแสดงถึงประจุรวมบนวัสดุดูดซับ และค่า pH_{zpc} ยังเป็นการยืนยันรูปแบบการดูดซับของพื้นผิวได้อีกด้วย จากผลการทดลองพบว่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับผักตบชวาเท่ากับ 5.8 สามารถอธิบายได้ว่าที่สภาวะสารละลายที่มี $pH < 5.8$ นั้น บนพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีประจุบวก ซึ่งมีผลต่อการกำจัดสีย้อมคองโกเรตซึ่งเป็นสารสีกลุ่ม

ประจุลบ (Anionic dye) เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Electrostatic attraction) สอดคล้องกับผลการศึกษา pH สารละลายที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพ การดูดซับที่พบว่าการดูดซับจะเกิดได้ดีที่ pH ต่ำ ($pH = 2$) ในขณะที่สภาวะของสารละลายที่มี $pH > 5.8$ พื้นผิวของวัสดุดูดซับชีวมวลมีประจุเป็นลบ ส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างประจุของวัสดุดูดซับผักตบชวากับสีย้อมคองโกเรตเกิดขึ้นได้น้อยกว่าในสารละลายที่มีค่า $pH < 5.8$ ทั้งนี้จากผลการทดลองศึกษาค่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับผักตบชวานั้นพบว่า การดูดซับสีย้อมคองโกเรตเกิดขึ้นได้ดีเมื่อ pH ของสารละลายมีค่าน้อยกว่า pH_{zpc} เนื่องจากประจุมบนพื้นผิววัสดุดูดซับมีค่าเป็นบวก (Bamroongwongdee et al., 2019; Wu et al., 2020)



ภาพที่ 7 pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวา

สรุป

การเตรียมวัสดุดูดซับสีย้อมคองโกเรตจากผักตบชวา (*Eichhornia crassipes*) ซึ่งเป็นชีวมวลกลุ่มวัชพืชน้ำและเป็นวัสดุอินทรีย์ที่พบปริมาณมากในระบบนิเวศน้ำจืดทั่วไป โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมคองโกเรตซึ่งได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรต ระยะเวลาดูดซับ และค่า pH ของสารละลาย ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณวัสดุดูดซับ 1 g ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมคองโกเรต 60 mg/l ระยะเวลาดูดซับ 150 นาที และค่า pH เท่ากับ 2 เป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสูงสุดในช่วงระหว่าง 75.58 – 93.25% และจากผลการทดลองศึกษาค่า pH_{zpc} ของวัสดุดูดซับ พบว่าประจุมบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับชีวมวลผักตบชวาเป็นประจุบวก ($pH_{zpc} = 5.8$) สอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมคองโกเรตสูงสุดที่ 93.25% ในสภาวะสารละลายที่มีค่า $pH = 2.0$ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองพบว่าชีวมวลผักตบชวาสามารถพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับสีย้อมคองโกเรตโดยเฉพาะกลุ่มสีย้อมอะโซที่ได้รับความนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมหลายประเภท

ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองศึกษาประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับประเภทชีวมวลในการดูดซับสีย้อมอาจจำเป็นต้องมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุดูดซับนอกเหนือจากการศึกษาสภาพประจุบนพื้นผิว เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของวัสดุดูดซับให้สามารถดูดซับสีได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในการประยุกต์ใช้วัสดุดูดซับจากชีวมวลผักตบชวาเพื่อการบำบัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในสภาพแวดล้อมนั้น จำเป็นต้องมีการพัฒนารูปแบบของวัสดุดูดซับให้เหมาะสมต่อการใช้งาน และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้มีสูงสุด ควบคู่กับการศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ที่อาจมีผลต่อการดูดซับ รวมทั้งยังสามารถนำไปสู่การพัฒนาารูปแบบกระบวนการการดูดซับที่เหมาะสมกับสีย้อมประเภทอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน ตลอดจนการประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Al-Degs, Y. S., El-Barghouthi, M. I., El-Sheikh, A. H. & Walker, G. M. (2008). Effect of solution pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*, 77(1), 16-23.
- Bamroongwongdee, C., Suwannee, S. & Kongsomsaksiri, M. (2019). Adsorption of Congo red from aqueous solution by surfactant-modified rice husk: Kinetic, isotherm and thermodynamic analysis. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 41(5), 1076-1083.
- Forgacs, E., Cserh ti, T. & Oros, G. (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment International*, 30(7), 953-971.
- Foroughi-Dahr, M., Abolghasemi, H., Esmaili, M., Shojamoradi, A. & Fatoorehchi, H. (2014). Adsorption characteristics of congo red from aqueous solution onto tea waste. *Chemical Engineering Communications*, 202(2), 181-193.
- Harja, M, Buema, G. & Bucur, D. (2022). Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*, 12(6087), 1-18.
- Hou, F., Wang, D., Ma, X., Fan, L., Ding, T., Ye, X. & Liu, D. (2021). Enhanced adsorption of Congo red using chitin suspension after sonoenzymolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70(105327), 1-9.
- Hu, Z., Chen, H., Ji, F. & Yuan, S. (2010). Removal of congo red from aqueous solution by cattail root. *Journal of Hazardous Material*, 173, 292-297.

- Imran, M., Crowley, D. E., Khalid, A., Hussain, S., Mumtaz, M. W. & Arshad, M. (2014). Microbial biotechnology for decolorization of textile wastewaters. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, 14, 73-92.
- Kezerle, A., Velić, N., Hasenay, D. & Kovačević, K. (2018). Lignocellulosic materials as dye adsorbents: adsorption of methylene blue and congo red on brewers' spent grain. **Croatia Chemica Acta**, 9(1), 53-64.
- Khan, M. I., Zafar, S., Ahmad, H. B., Hussain, M. & Shafiq, Z. (2015). Use of *Morus alba* L. leaves as biosorbent for the removal of congo red dye. **Fresenius Environmental Bulletin**, 24(6a), 2251-2258.
- Khaniabadi, Y. O., Basiri, H., Nourmoradi, H., Mohammadi, M. J., Yari, A. R., Sadeghi, S. & Amrane, A. (2017a). Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by montmorillonite as a low-cost adsorbent. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, 16(1), 20160203.
- Khaniabadi, Y. O., Mohammadi, M. J., Shegerd, M., Sadeghi, S., Saeedi, S. & Basiri, H. (2017b). Removal of congo red dye from aqueous solutions by a low-cost adsorbent: activated carbon prepared from Aloe vera leaves shell. **Environmental Health Engineering and Management Journal**, 4(1), 29-35.
- Khatri, J., Nidheesh, P. V., Singh, T. A. & Kumar, M. S. (2018). Advanced oxidation processes based on zero-valent aluminium for treating textile wastewater. **Chemical Engineering Journal**, 348, 67-73.
- Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A. & Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. **Biotechnology Research and Innovation**, 3(2), 275-290.
- Luo, X., Liang, C. & Hu, Y. (2019). Comparison of different enhanced coagulation methods for azo dye removal from wastewater. **Sustainability**, 11(7), 4760.
- Mondal, S. (2008). Methods of dye removal from dye house effluent: an overview. **Environmental Engineering Science**, 25(3), 383-396.

- Pavin, S., Hossen, A., Ranman, W., Hossen, I., Halim, A., Biswas, B. K. & Khan, A. S. (2019). Uptake hazardous dye from wastewater using water hyacinth as bio-adsorbent. **European Journal of Sustainable Development Research**, 3(1), em0065.
- Ponnusamy, S. K. & Subramaniam, R. (2013). Process optimization studies of congo red dye adsorption onto cashew nut shell using response surface methodology. **International Journal of Industrial Chemistry**, 4(17), 1-10.
- Radoor, S., Karayil, J., Parameswaranpillai, J. & Siengchin, S. (2020). Removal of anionic dye Congo red from aqueous environment using polyvinyl alcohol/sodium alginate/ZSM-5 zeolite membrane. **Scientific Reports**, 10, 15452.
- Rajamohan, N. (2009). Equilibrium studies on sorption of anionic dye onto acid activated water hyacinth roots. **African Journal of Environmental Science and Technology**, 3(11), 399-404.
- Roy, T. K. & Mondal, N. K. (2017). Biosorption of Congo Red from aqueous solution onto burned root of *Eichhornia crassipes* biomass. **Applied Water Science**, 7, 1841-1854.
- Salahuddin, N., Abdelwahab, M. A., Akelah, A. & Elnagar, M. (2021). Adsorption of congo red and crystal violet dyes onto cellulose extracted from Egyptian water hyacinth. **Natural Hazards**, 105, 1375-1394.
- Stjepanović, M., Velić, N., Galić, A., Kosović, I., Jakovljević, T. & Habuda-Stanić, M. (2021). From waste to biosorbent: removal of congo red from water by waste wood biomass. **Water**, 13(3), 279.
- Tapalad, T., Neramittagapong, A., Neramittagapong, S. & Boonmee, M. (2008). Degradation of congo red dye by ozonation. **Chiang Mai Journal of Science**, 35(1), 63-68.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortiz, Á. & Gonzalez-Delgado, Á. D. (2021). Adsorption of azo-anionic dyes in a solution using modified coconut (*Cocos nucifera*) mesocarp: kinetic and equilibrium study. **Water**, 13(10), 1382.
- Wanyonyi, W. C., Onyari, J. M. & Shiundu, P. M. (2014). Adsorption of Congo red dye from aqueous solutions using roots of *Eichhornia crassipes*: kinetic and equilibrium studies. **Energy Procedia**, 50, 862-869.

- Wong, S., Ghafar, N. A., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R. & Amin, N. A. S. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. **Scientific Reports**, 10, 2928.
- Wu, K., Pan, X., Zhang, J., Zhang, X., Zene, A. S. & Tian, Y. (2020). Biosorption of congo red from aqueous solutions based on self-immobilized mycelial pellets: Kinetics, isotherms, and thermodynamic studies. **ACS Omega**, 5, 24601-24612.
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S. & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, 209, 172-184.