

ประสิทธิภาพของเปลือกถั่วลิสงในการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียในกระบวนการย้อมสีผ้าชุมชน

Efficiency of Peanut Shells in Dye Adsorption from Wastewater in Community-Based Fabric Dyeing Processes

ชุติกานจน์ จันทรรัตน์, นัยน์เนตร มีนาค และ จารูวรรณ วงศ์ทะเนตร*

Chutikarn Jantararat, Nainate Meenak and Jaruwon Wongthanate*

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University

E-mail : chutikarn9617@gmail.com, nainate.m@gmail.com and jaruwan.won@mahidol.ac.th*

*Corresponding author

(Received: 20 March 2025, Revised: 9 October 2025, Accepted: 15 October 2025)

<https://doi.org/10.57260/stc.2025.1131>

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของขนาดเปลือกถั่วลิสงน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้น 5, 6, 7, 8, 9 ระยะเวลาการสัมผัส 30, 45, 60, 75 นาที และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับในการกำจัดสีย้อมผ้าที่ปนเปื้อน รวมทั้งศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกถั่วลิสงที่ดูดซับสีย้อมผ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งดำเนินการทดลองโดยนำเปลือกถั่วลิสงขนาดต่างๆ น้ำหนัก 20 กรัม ใส่ลงในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าปริมาตร 150 มิลลิลิตร ในขวดลูกชุพขนาด 250 มิลลิเมตร และเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที ผลการศึกษา พบว่า น้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้ามีลักษณะเป็นสีน้ำเงินปนม่วงเข้ม และมีค่าสี 11,600 ADMI โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับสี ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 5 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และใช้เปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับสีได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 89.65 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกถั่วลิสงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับชีวมวลสำหรับการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นจากกระบวนการย้อมผ้าในชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพการดูดซับสี สีไดเรกต์ เปลือกถั่วลิสง SEM

Abstract

This research project aimed to determine the optimal conditions of peanut shells using the sizes smaller and larger than 2 mm, initial pH values of 5, 6, 7, 8, 9, contact times of 30, 45, 60, 75 minutes and compare the adsorption efficiency to remove dye as well as to study a morphology of peanut shells for dyeing adsorption using SEM. The experiment was conducted by using peanut shells of various sizes, each weighing 20 g, put into 150 mL of dyeing process wastewater in an Erlenmeyer flask 250 mL and shaken at 150 rpm. Based on the results, the characteristics of wastewater from fabric dyeing process were an indigo-colored appearance and a color value of 11,600 ADMI. The optimum conditions of dye removal were at initial pH 5, contact time of 30 minutes and the use of peanut shells smaller than 2 mm. Under these optimal conditions, the highest dye adsorption efficiency achieved was 89.65%. These results indicate that peanut shells smaller than 2 mm can be effectively used as a biomass adsorbent for the preliminary treatment of wastewater from community-based fabric dyeing processes.

Keywords: Adsorption efficiency of dye, Directs dye, Peanut shells, SEM

บทนำ

กระแสสังคมในปัจจุบันต้องการลดการซื้อและสนับสนุนเสื้อผ้าตามกระแส การปรับปรุงเสื้อผ้าเก่าหรือเสื้อผ้าอื่นๆ ที่มีอยู่เดิม เพื่อให้มีลักษณะและสีสันทันสมัยโดยไม่ต้องซื้อของใหม่ ได้ถูกส่งเสริมมากขึ้น ซึ่งการนำเสื้อผ้าไปย้อมสีใหม่จึงเป็นหนึ่งในแนวคิดที่เริ่มกลับมาได้รับความนิยม เนื่องจากสามารถทำได้ง่าย และมีค่าใช้จ่ายไม่สูง โดยผู้ที่ต้องการย้อมสีเสื้อผ้า ส่วนมากจะเลือกใช้บริการธุรกิจรับย้อมสีเสื้อผ้าที่เป็นร้านขนาดเล็ก พบได้ในชุมชน ซึ่งผู้ประกอบการรับย้อมสีเสื้อผ้า มักจะขาดความรู้และความเข้าใจที่เพียงพอเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการย้อมสี ทำให้เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการย้อมสี และใช้สีโดยตรง (Direct dyes) ซึ่งเป็นสีที่สามารถติดบนเส้นใยฝ้ายและเส้นใยเซลลูโลสอื่นๆ ได้โดยตรง และมีแรงยึดเหนี่ยวกับเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจน การย้อมสีกลุ่มนี้จำเป็นต้องเติมเกลือ เพื่อลดแรงผลักระหว่างสีย้อมและเส้นใย เนื่องจากว่าทั้งเส้นใยและสีย้อมต่างก็มีประจุลบทั้งคู่ และเนื่องจากสีชนิดนี้ยึดเกาะบนเส้นใยด้วยพันธะไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้สีตกได้ง่ายเมื่อซักล้าง จึงต้องใช้สารผนึกสีที่มีประจุบวก (Cationic fixing agent) ร่วมด้วยเมื่อจับกับโมเลกุลของสีย้อมให้เกิดเป็นสารเชิงซ้อนและละลายน้ำได้ยากขึ้น ซึ่งทำให้มีการคงทนต่อการซักได้มากขึ้น (วิโรจน์ สารการโกศล, 2560) น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมสามารถตรวจวิเคราะห์ปริมาณสีด้วยวิธีการตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งด้วยการวิธีวิเคราะห์ ADMI (American dye manufacturers institute) (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) น้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีเหล่านี้ จะถูกทิ้งลงในท่อน้ำเสียของชุมชนโดยไม่ได้ผ่านการกำจัดสีก่อน ส่งผลกระทบของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมผ้าด้วยสีโดยตรงต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

น้ำเสียจากการย้อมผ้าที่มีสีโดเรกท์เป็นองค์ประกอบหลัก มักมีลักษณะสีเข้มข้นและมีสารเคมีปนเปื้อนจำนวนมาก สีที่ปนอยู่ในแหล่งน้ำมีผลต่อการซึมผ่านของแสง ซึ่งลดลงอย่างมาก ทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชน้ำและแพลงก์ตอนในน้ำถูกขัดขวาง เป็นเหตุให้ห่วงโซ่อาหารในระบบนิเวศน้ำเสียสมดุล (Yaseen & Scholz, 2019) นอกจากนี้การลดลงของแสงยังส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำ ทำให้สิ่งมีชีวิตน้ำ เช่น ปลา และสัตว์น้ำอื่นๆ ประสบภาวะขาดออกซิเจน (Hypoxia) หรืออาจถึงขั้นตายเป็นจำนวนมาก (Dutta & Bhattacharyya, 2023) ส่วนของแข็งที่ปนอยู่ในน้ำเสีย รวมถึงสารอินทรีย์จากสีย้อม ยังสามารถสะสมอยู่ในดินหรือตะกอน และมีแนวโน้มเกิดการสะสมในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต (Bioaccumulation) ซึ่งเมื่อเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร อาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ในระยะยาว (Katheresan et al., 2018) สำหรับมนุษย์สามารถได้รับผลกระทบจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมโดยตรงและโดยอ้อม การสัมผัสโดยตรง เช่น การใช้น้ำในการอุปโภคบริโภค หรือสัมผัสทางผิวหนัง อาจทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ดวงตา และระบบทางเดินหายใจ ขณะที่การได้รับสารปนเปื้อนผ่านการบริโภคสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำเสีย อาจส่งผลกระทบต่อระบบอวัยวะภายใน เช่น ตับ ไต และระบบสืบพันธุ์ เป็นต้น อาจเกิดมลพิษทางน้ำได้ เนื่องจากในระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชน ลักษณะของน้ำเสียจะไม่มีข้อมูลของสีที่ปนเปื้อนในน้ำปรากฏอยู่ รวมถึงกระบวนการบำบัดน้ำเสียของชุมชน จะไม่มีกระบวนการบำบัดขั้นสูงที่สามารถบำบัดสีได้ มีเพียงกระบวนการบำบัดขั้นต้นทางกายภาพเคมี กระบวนการบำบัดขั้นที่สองทางชีวภาพ และกระบวนการบำบัดขั้นที่สามสำหรับการฆ่าเชื้อโรคทั่วไป เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) เมื่อเข้าสู่กระบวนการบำบัดอาจส่งผลให้ระบบบำบัดน้ำเสียของชุมชนทำงานหนัก หรือทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไม่ได้มาตรฐานตามต้องการ แต่ถูกปล่อยออกไปรวมกับแหล่งน้ำในธรรมชาติ และอาจก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำต่อไปได้ในอนาคต เพื่อแก้ปัญหาการทิ้งน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการย้อมสีเสื้อผ้าที่ต้นเหตุ จากการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า มีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมหลายวิธี อาทิ กระบวนการทางชีวภาพ เช่น กระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์หรือเอนไซม์ที่มีความสามารถในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีองค์ประกอบของสี (นิตยา ผาสุกพันธุ์, 2558) กระบวนการทางเคมีที่อาจบำบัดด้วยวิธีการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) (Saismrutirarnjan & Sanjoy, 2020) และกระบวนการทางกายภาพ เช่น การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane technology) (วนิดา ชูอักษร, 2555) โดยทุกวิธีต่างมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย แต่เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมด้านขั้นตอนและงบประมาณ การศึกษากระบวนการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ถูกจัดว่ามีประสิทธิภาพสูงสามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยากและมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้วัสดุดูดซับธรรมชาติในการดูดซับสีได้ เช่น เปลือกมะพร้าว กะลามะพร้าว แกลบ เป็นต้น (Ali et al., 2021) ส่วนวัสดุชีวภาพที่นำมาศึกษาในกระบวนการดูดซับ เป็นวัสดุดูดซับจากธรรมชาติที่เป็นวัสดุเหลือใช้ หาได้ง่ายในธรรมชาติ และมีราคาถูกกว่าจึงเลือกนำมาใช้ในการศึกษารั้งนี้ ซึ่งการนำวัสดุจากธรรมชาติดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการดูดซับยังเป็นส่วนหนึ่งของการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ด้วย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากการบำบัดสีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้วัสดุดูดซับที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งและเป็นวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ คือเปลือกถั่วลิสง ซึ่งมีโครงสร้างเส้นใย

(Fibrous) ที่ประกอบด้วยเซลลูโลส ฮีมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งให้การจัดเรียงเชิงโครงสร้างที่มีรูปพรรณสัณฐาน และม็อดคัประกอบเคมีประกอบด้วยคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) เป็นหลัก (Paczkowski et al., 2021) เพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าในขั้นต้นได้ โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ 1) เพื่อศึกษาสถานะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงภายใต้ปัจจัยที่แตกต่างกัน ได้แก่ ขนาดของวัสดุดูดซับธรรมชาติ (Size) ค่าพีเอชเริ่มต้น (Initial pH) และระยะเวลาการสัมผัส (Contact time) และ 2) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับจากเปลือกถั่วลิสงในการกำจัดสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

ระเบียบวิธีวิจัย

การเตรียมวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ

นำเปลือกถั่วลิสงที่รวบรวมจากตลาดสดที่ตั้งอยู่ในอำเภอสาลายา จังหวัดนครปฐม มาล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นจนสะอาดและผึ่งให้แห้ง 2 วัน และนำไปอบด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง (ภาพที่ 1) และนำไปตำด้วยครก แล้วนำเปลือกถั่วลิสงที่ผ่านการอบแห้งมาทำให้ละเอียดก่อนนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 10 Mesh (ขนาดรูเปิดประมาณ 2.0 มิลลิเมตร) เพื่อให้ได้วัสดุดูดซับเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 2) เก็บใส่ถุงแยกขนาดของเปลือกถั่วลิสง และนำไปใส่ในตู้ดูดความชื้นเพื่อป้องกันความชื้นก่อนนำไปใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 1 เปลือกถั่วลิสงเตรียมคัดเลือกขนาด



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2 เปลือกถั่วลิสงขนาดเล็กผ่านการร่อนตะแกรง

(ก) ขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร และ (ข) ขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้า

ดำเนินการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์จากกลุ่มธุรกิจขนาดเล็กในชุมชน ของเครือข่าย ศูนย์ฝักอาชีพ กรุงเทพฯ สนามหลวง 2 กรุงเทพมหานคร โดยใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบจ้วง (Grab sampling) ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่าสี (Color) (ADMI Spectrophotometer) ค่าความขุ่น (Turbidity) (Turbidity meter) ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids: TSS) ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids: TDS) (APHA, 2017) ค่าพีเอช (pH) (pH meter) ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) (Conductivity meter) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) และค่าปริมาณไนโตรเจนในน้ำเสีย (TKN) ตามวิธีการวิเคราะห์มาตรฐานน้ำและน้ำเสีย (APHA, 2017)

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับสีย้อมผ้าด้วยเปลือกถั่วลิสง

การศึกษานี้เป็นการทดลองการดูดซับแบบกะ (Batch adsorption test) (Songkampol & Wongthanate, 2017) โดยนำวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร ด้วยปริมาณขนาดละ 20 กรัม ในการดูดซับสีย้อมผ้าของน้ำเสียปริมาตร 150 มิลลิลิตร และทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 5-9 ของน้ำเสีย ด้วยสารละลายเข้มข้น NaOH 6M เพื่อเพิ่มค่า และสารละลายเข้มข้น HCl 6M เพื่อลดค่าพีเอช (Rattanavijit et al., 2022) มีระยะเวลาในการสัมผัส 30 นาที ซึ่งทำการเขย่าระหว่างวัสดุดูดซับกับน้ำเสียให้สัมผัสกันด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที (พัชรนันท์ จันทรพลอย และคณะ, 2563) และทำการทดลองระยะเวลาในการสัมผัสที่เวลา 30, 45, 60 และ 75 นาที (ภาพที่ 3) เมื่อเสร็จสิ้นการทดลองแล้ว ทำการแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำเสียด้วยการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C ขนาด 70 มม.) และนำน้ำเสียของแต่ละชุดการทดลองวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสีไดเรกต์โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์สำหรับวัดค่าสีแบบ ADMI (ADMI Spectrophotometer) (รุ่น Spectroquant®Prove 100 ยี่ห้อ Merck ประเทศเยอรมันนี) โดยใช้ค่าความยาวคลื่นแสงในการวัดค่าการ

ดูดกลืนแสงในช่วง 1-600 นาโนเมตร และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำผลการศึกษาที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการดูดซับสีของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม



ภาพที่ 3 การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที

ศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุดูดซับสีย้อมผ้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ดำเนินการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงก่อนผ่านกระบวนการดูดซับสีย้อมผ้า และลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงหลังผ่านกระบวนการดูดซับสีย้อมผ้าภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ทำการศึกษา โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูงชนิดฟิลด์ อีมิสชัน (Field emission scanning electron microscope (FESEM)) (รุ่น SU8010 Hitachi) และนำวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสง ติดบนแท่นติดตัวอย่าง (SEM stub) และฉาบเคลือบผิวของวัสดุดูดซับด้วยเครื่องฉาบเคลือบผิวตัวอย่างด้วยชั้นบางของโลหะทองคำ (Sputter coating) (Farida et al., 2025) และนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดต่อไป

การวิเคราะห์ข้อมูล

ดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Statistic 18 เพื่อช่วยในการพิจารณาการกำจัดสีย้อมไธเรกต์ด้วยวัสดุดูดซับธรรมชาติของเปลือกถั่วลิสง โดยมีค่าความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ 95% ($p < 0.05$) รวมถึงการใช้ Duncan's new multiple range test เพื่อช่วยในการแบ่งกลุ่มของข้อมูลในแต่ละการทดลอง และวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสง (Songkampol & Wongthanate, 2017) ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการดูดซับสี (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม (ADMI)

C_e คือ ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมหลังการดูดซับ (ADMI)

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาคูณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไคเรกท์

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไคเรกท์จากกลุ่มธุรกิจขนาดเล็กในชุมชนของเครือข่ายศูนย์ฝักอาชีพ กทม.สนามหลวง 2 กรุงเทพมหานคร พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียทางกายภาพและเคมี ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

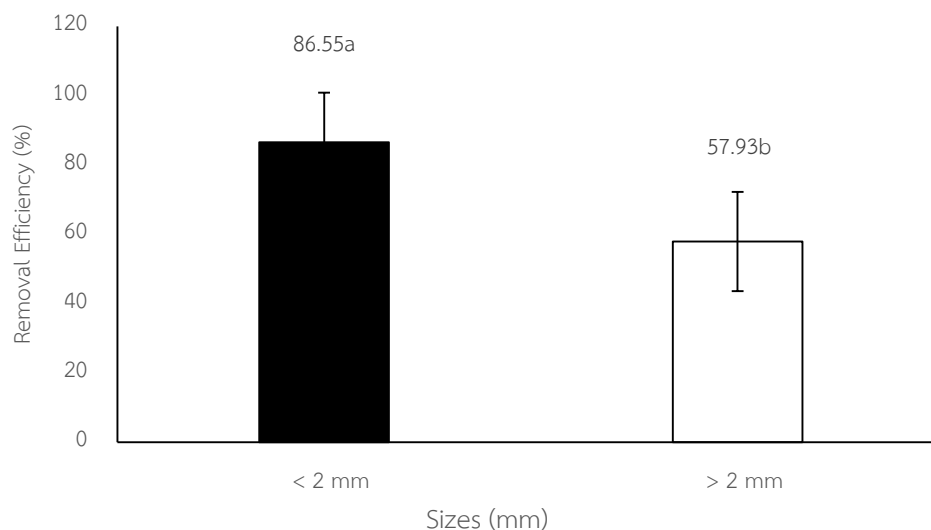
ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไคเรกท์

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าวิเคราะห์	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)
สี (Color)	ADMI	11,600	< 300
ค่าความขุ่น (Turbidity)	NTU	17.74	-
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	mg/L	0.0865	< 50
ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	mg/L	4.65	< 3,000
ค่าไนโตรเจนในน้ำ (TKN)	mg/L	4.26	< 100
ค่าพีเอช (pH)	-	8.17	5.5-9.0
ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD)	mg/L	267.92	< 120
ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)	$\mu\text{S}/\text{cm}$	6,522	-

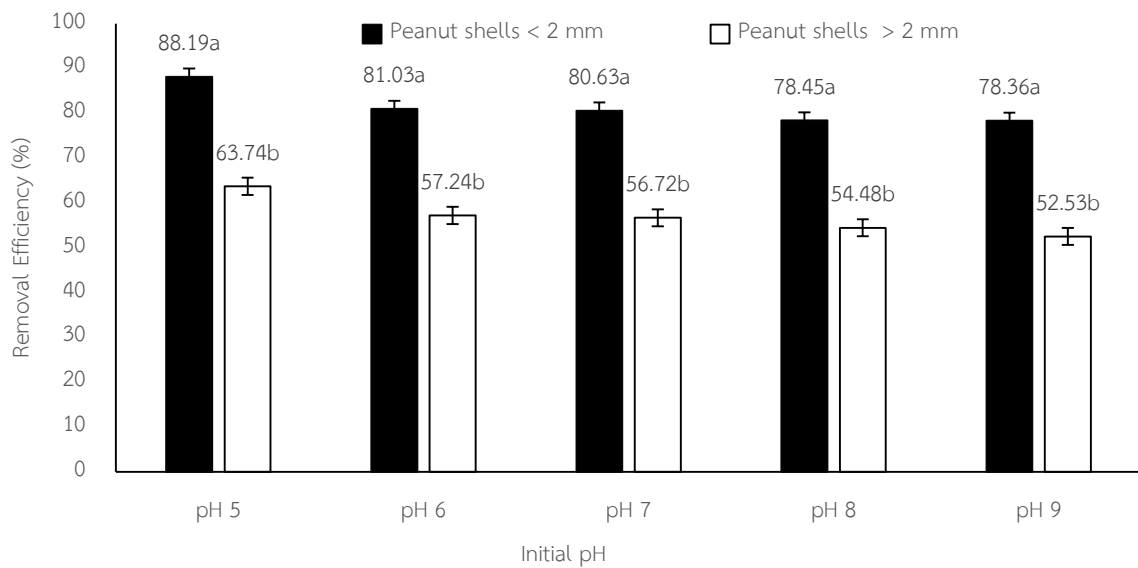
สภาวะที่เหมาะสมของขนาด (Size) ค่าพีเอชเริ่มต้น (Initial pH) และระยะเวลาการสัมผัส (Contact time) ของวัสดุดูดซับสีย้อมผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสง

ผลการทดลองพบว่า ขนาดของวัสดุดูดซับธรรมชาติมีผลต่อการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไคเรกท์ของน้ำเสียอยู่ที่ 86.55% และ 57.93% ที่ค่าพีเอช 8.17 และระยะเวลาดูดซับ 30 นาที (ภาพที่ 4) และผลการทดลองการนำวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะของน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 5, 6, 7, 8 และ 9 และใช้ระยะเวลาดูดซับ 30 นาที พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้น 5-9 มีผลต่อการดูดซับของวัสดุดูดซับธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของเปลือกถั่วลิสงทั้งสองขนาด โดยประสิทธิภาพการดูดซับสีไคเรกท์ของน้ำทิ้งมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อน้ำทิ้งอยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 5 และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นสูงขึ้น ซึ่งวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไคเรกท์ของน้ำเสียภายใต้สภาวะของน้ำทิ้งดังกล่าวคือ 88.19%, 80.63%, 81.03%, 78.45 และ 78.36% ตามลำดับ ในส่วนของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะค่าพีเอชเริ่มต้นช่วงเดียวกัน พบว่า มี

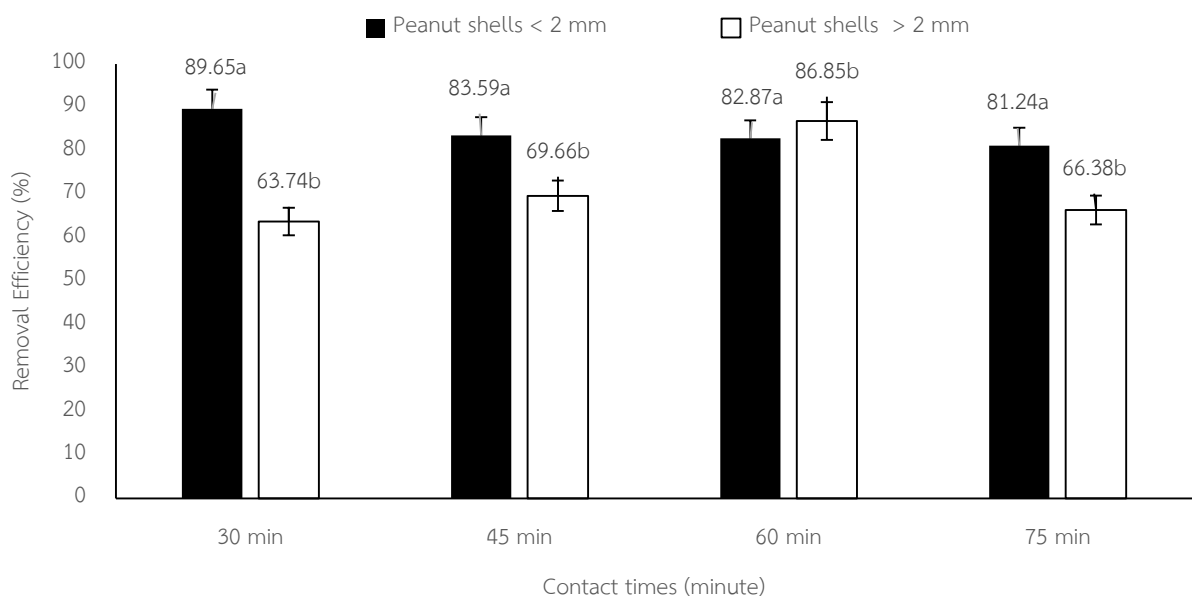
ประสิทธิภาพในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียที่ 63.74%, 57.24%, 56.72%, 54.48% และ 52.53% ตามลำดับ (ภาพที่ 5) นอกจากนี้ผลการทดลองการนำวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะของน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 5 และใช้ระยะเวลาดูดซับแตกต่างกันที่ 30, 45, 60, และ 75 นาที พบว่าระยะเวลาในการดูดซับมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีของวัสดุดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของเปลือกถั่วลิสงทั้งสองขนาด โดยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีแนวโน้มประสิทธิภาพการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาการดูดซับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งที่ 89.65%, 83.59%, 82.87% และ 81.24% ตามลำดับ และวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียที่ 63.74%, 69.66%, 86.85% และ 66.38% ตามลำดับ (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพการดูดซับสีน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร (ค่าพีเอช 8.17 และระยะเวลาดูดซับ 30 นาที)



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการดูดซับสีน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชแตกต่างกัน (ระยะเวลาดูดซับ 30 นาที)



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพการดูดซับสีน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร (ค่าพีเอช 5) ภายใต้สภาวะของระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกัน

ประสิทธิภาพการดูดซับสีไคเรกต์ของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสง

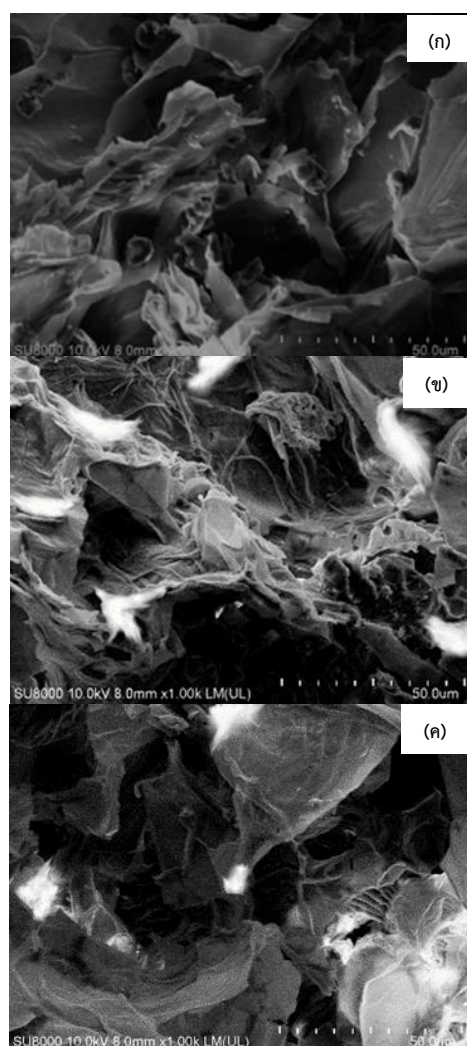
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า วัสดุดูดซับธรรมชาติของเปลือกถั่วลิสงที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสีไคเรกต์จากกระบวนการย้อมสีผ้า ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ด้วยปริมาณขนาดละ 20 กรัม ที่สภาวะค่าพีเอชเริ่มต้น 5 และใช้เวลาการดูดซับที่ 30 นาที (วัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร) และ 60 นาที (วัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร) โดยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไคเรกต์ของน้ำทิ้งประมาณ 89.65% ส่วนวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไคเรกต์ของน้ำทิ้งประมาณ 86.85% และผลของคุณลักษณะของน้ำทิ้งหลังการดูดซับสีไคเรกต์ด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไคเรกต์ของน้ำทิ้งได้สูง พบว่าพารามิเตอร์ของน้ำทิ้งมีความเข้มข้นลดลงมาก (1,201 ADMI) และค่าซีไอลดลง (160.80 mg/L) ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์บางตัว (ค่าความขุ่น ค่าพีเอช ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าการนำไฟฟ้า) มีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวแม้ว่าจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่พบว่ายังอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ดังแสดงผลการเปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าของเปลือกถั่วลิสงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยเปลือกถั่วลิสงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าน้ำทิ้ง	ค่าน้ำทิ้งหลังการดูดซับสี		ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)
		ก่อน	เปลือกถั่ว	เปลือกถั่ว	
		การดูดซับสี	ลิสงขนาด < 2 มม.	ลิสงขนาด > 2 มม.	
สี (Indigo color)	ADMI	11,600	1,201	1,525	< 300
ค่าความขุ่น	NTU	17.74	34.80	4.73	-
ค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)	mg/L	0.0865	0.07	0.037	< 50
ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS)	mg/L	4.65	10.17	7.28	< 3,000
ค่าไนโตรเจนในน้ำ (TKN)	mg/L	4.26	90.72	91.28	< 100
ค่าซีโอดี (COD)	mg/L	267.92	160.80	200.30	< 120
ค่าพีเอช	-	8.17	5.14	5.24	5.5-9.0
ค่าการนำไฟฟ้า	μS/cm	6,552	7,161	7,060	-

ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงจากสียูเรเทคท์ของกระบวนการย้อมสีผ้า

จากผลการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาโดยเครื่องกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของวัสดุดูดซับคือ เปลือกถั่วลิสงที่ขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร พบว่า ลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกถั่วลิสงก่อนการดูดซับสี (ภาพที่ 7 (ก)) และภายหลังการดูดซับสี (ภาพที่ 7 (ข) และ (ค)) มีลักษณะสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกัน โดยวัสดุเปลือกถั่วลิสงก่อนดูดซับสีทั้งสองขนาดมีลักษณะสัณฐานคล้ายกันคือ มีลักษณะขรุขระเป็นแผ่นซ้อนกันและสลับกันบางส่วน มีลักษณะเป็นโพรงคล้ายปล่อง ส่วนวัสดุเปลือกถั่วลิสงหลังการดูดซับสี มีลักษณะการเกาะตัวของโมเลกุลของสียูเรเทคท์ตามโพรงและรอยแตกของเปลือกถั่วลิสง



ภาพที่ 7 ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (ก) วัสดุดูดซับสีของเปลือกถั่วลิสงก่อนดูดซับสี (ข) วัสดุดูดซับ ของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร ภายหลังการดูดซับสี และ (ค) วัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร ภายหลังการดูดซับสี

การอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์จากกลุ่มธุรกิจขนาดเล็กในชุมชน (ตารางที่ 1) พบว่าสีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์ที่มีลักษณะสีม่วงไปทางครามและค่าพารามิเตอร์ของน้ำเสียทางกายภาพและเคมีภาพรวมมีผลการวิเคราะห์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อมสีผ้า ยกเว้นค่าสีและค่าซีโอดีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์ที่มีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) โดยใช้การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยสีไดเรกต์ด้วยวัสดุดูดซับธรรมชาติของเปลือกถั่วลิสงภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีการใช้วัสดุดูดซับชีวมวลหลายชนิด (Biomass-based adsorbents) เช่น เปลือกมะพร้าว ถ่านไม้ ชานอ้อย เป็นต้น มาใช้งานในการดูดซับสีย้อมผ้าไดเรกต์ (Ali et al., 2021) เมื่อเปรียบเทียบระหว่างขนาดของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่แตกต่างกันพบว่า ขนาดของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไดเรกต์ได้ดียิ่งขึ้น (ภาพที่ 4) เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่มากขึ้น (พิเชษฐ์ หนูหมื่น, 2557) และค่าพีเอชเริ่มต้น 5-9 ยังมีผลต่อการดูดซับของวัสดุดูดซับธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงทั้งสองขนาด โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อน้ำเสียอยู่ในสภาวะที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นลดลงที่ 5 (ภาพที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาว่าสีไดเรกต์มีโครงสร้างเป็นหมู่ซัลโฟนิคที่ให้ประจุลบ (OH^-) ประกอบกับค่าพีเอชที่ลดลงจะทำให้ประจุบวก (H^+) ของน้ำเสียเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างประจุบวกบนผิวของเปลือกถั่วลิสงกับประจุลบจากหมู่ซัลโฟนิคของสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการดูดซับของเปลือกถั่วลิสงต่อสีไดเรกต์ในน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำ ส่งผลให้สีไดเรกต์ถูกดูดเข้าหาพื้นที่ผิวที่มีประจุบวกของเปลือกถั่วลิสง (ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์ และ สุมลรัตน์ กองวี, 2560) อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมการศึกษาของค่าพีเอชเริ่มต้นต่ำกว่า 5 เพื่อให้สอดคล้องกับค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ได้กำหนดไว้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ซึ่งวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงทั้งสองขนาด (ขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร และขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 5 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งสูงสุดที่ระยะเวลาดูดซับ 30 นาที (วัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร) ประมาณ 89.65% และประสิทธิภาพในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งสูงสุดที่ระยะเวลาดูดซับ 60 นาที (วัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร) ประมาณ 86.85% ซึ่งมีแนวโน้มการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียคล้ายคลึงกันโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด (ภาพที่ 6) เนื่องจากพื้นที่ในการดูดซับของวัสดุดูดซับยังว่างอยู่ (ภาพที่ 7 ก)) หลังจากนั้นการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับลดลง (ภาพที่ 7 ข)) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาว่าการดูดซับของวัสดุดูดซับธรรมชาติที่ใช้มีแนวโน้มสูงขึ้นในช่วงแรก และจะชะลอตัวลงและเข้าสู่สภาวะสมดุลในเวลาต่อมา (วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ, 2558) นอกจากนี้ความแตกต่างของขนาดวัสดุดูดซับยังมีผลต่อเวลาในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำเสียด้วย โดยวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าจะใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่น้อยกว่า ส่วนวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าจะใช้ระยะเวลาในการดูดซับที่มากกว่าด้วย ดังนั้นจึงพบประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งด้วยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร สำหรับลักษณะสัญญาณวิทยาของเปลือกถั่วลิสงก่อนและหลังการดูดซับสีไดเรกต์มีความแตกต่างกัน (ภาพที่ 7 ก) และ (ข)) โดยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงทั้งสอง

ขนาดก่อนการดูดซับสีมีพื้นที่ผิวขรุขระและมีรูพรุน ส่วนวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงหลังการดูดซับสีแล้วที่ขนาดน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีความหนาเพิ่มมากกว่าวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงขนาดมากกว่า 2 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับจากผักตบชวา พบว่าหลังการดูดซับสีไดเรกต์ สัณฐานวิทยาของผิววัสดุมีความแตกต่างไปจากเดิม โดยมีลักษณะของการอุดตันของรูพรุน และการสะสมของโมเลกุลสีย้อมบนพื้นที่ผิววัสดุ ซึ่งสะท้อนถึงกลไกการยึดติดของโมเลกุลสีที่คล้ายคลึงกัน (ชาญชัย คหาปนะ และ ณภัทร โพธิ์วัน, 2563)

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า คุณลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์จากกลุ่มธุรกิจขนาดเล็กในชุมชนมีผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานฟอกย้อม ยกเว้นค่าสีของน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าด้วยสีไดเรกต์ (11,600 ADMI) และค่าซีโอดีของน้ำเสียดังกล่าวซึ่งมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสงที่มีขนาดน้อยกว่าและมากกว่า 2 มิลลิเมตร ปริมาณขนาดละ 20 กรัม ในสภาวะที่เหมาะสมคือ ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 5 และระยะเวลาในการสัมผัสที่ 30 และ 60 นาที ตามลำดับ สามารถดูดซับสีของน้ำเสียให้ลดลงเหลือเพียง 1,201 ADMI และ 1,525 ADMI ซึ่งมีประสิทธิภาพของการดูดซับสีไดเรกต์ของน้ำทิ้งจากกระบวนการย้อมสีผ้า โดยมีแนวโน้มของการดูดซับสูงถึงประมาณ 89.65% และ 86.85% ตามลำดับ และโมเลกุลสีดูดติดบริเวณผิวของวัสดุดูดซับของเปลือกถั่วลิสง ดังนั้นวัสดุดูดซับธรรมชาติของเปลือกถั่วลิสงมีประสิทธิภาพการดูดซับสีไดเรกต์ในน้ำเสียจากกระบวนการย้อมสีผ้าในชุมชนได้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

1. การศึกษาการยืดอายุการใช้งาน วิธีการเก็บรักษา และการนำวัสดุดูดซับสีแล้วไปใช้ประโยชน์อื่น
2. การศึกษาตัววัสดุดูดซับสีแบบกระตุ้นทางกายภาพและเคมี (ค่าพีเอชต่ำกว่า 5) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีด้วยวัสดุดูดซับชีวมวลชนิดอื่น
3. การนำข้อมูลจากผลการศึกษาครั้งนี้ไปใช้ประโยชน์ในสถานประกอบการในพื้นที่จริงศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนบางส่วนจากคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และขอขอบพระคุณ คุณอนุพันธ์ เสี่ยงใหญ่และคุณอัญชลี บุรภักดิ์ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สนับสนุนเครื่องมือวิทยาศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2560). *คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน*. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. <https://www.pcd.go.th/publication/4241>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2559). *กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมและเขตประกอบการอุตสาหกรรม 2559*. <https://www.pcd.go.th/laws/4378>
- ชาญชัย คหาปน และ ณภัทร โพธิ์วัน. (2563). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 15(2), 58-70. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/sej/article/view/240021>
- นิตยา ผาสุกพันธุ์. (2558). การบำบัดสีย้อมผ้าจากน้ำเสีย โรงงานฟอกย้อมสิ่งทอด้วยจุลินทรีย์. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 19(1), 17-24. <https://digital.car.chula.ac.th/cuej/vol19/iss1/3>
- ปานใจ สื่อประเสริฐสิทธิ์ และ สมรัตน์ กองวิ. (2560). การดูดซับสีย้อมเร็กต์เรดโดยใช้ถ่านแกลบดำ. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 36(1), 45-52. <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/JSMU/10985192.pdf>
- พัชรนันท์ จันทรพลอย, กฤติยาภรณ์ หลวงดี และณภรณ์ จิวาลักษณ์. (2563). การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูของถ่านเปลือกส้มโอที่เตรียมจากการเผาแบบเตาลาน, *วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 14(1), 15-25. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RMUTP/article/view/228977>
- พิเชษฐ์ หนูหมื่น. (2557). *การดูดซับสีในน้ำเสียจากกระบวนการทำผ้าบาติกด้วยวิธีหมัก*. (วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/10129/1/396568.pdf>
- วนิดา ชูอักษร. (2555). เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 17(1), 181-191. <https://scijournal.buu.ac.th/index.php/sci/article/view/773/715>
- วิรัชรอง แสงอรุณเลิศ. (2558). การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือกหอยแครงโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี. *วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์*, 7(7), 98-110. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/JSTNSRU/article/view/39791>
- วิโรจน์ สารการโกศล. (2560). มลภาวะและอันตรายของน้ำทิ้งจากการย้อมผ้า. *วารสารสิ่งแวดล้อม* 21(1), 7-14. <https://thaienvi.com/storage/ckeditor/file/file-104-Thai-851968489.pdf>
- Ali, K., Javaid, M. U., Ali, Z., & Zaghum, M. J. (2021). Biomass-derived adsorbents for dye and heavy metal removal from wastewater. *Adsorption Science & Technology*, 2021, 9357509. <https://doi.org/10.1155/2021/9357509>
- American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. (23rd ed.). Washington D.C.

- Dutta, S., & Bhattacharyya, A. (2023). Ecotoxicological effects of synthetic dyes on aquatic organisms: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100780. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100780>
- Farida, H., Farid, H., Saida, B., Abdelmalek, C., Reda, Y. A., & Boubekour, N. (2025). Application of NaOH-Activated Peanut Shells as a Low-Cost Adsorbent for the Removal of Cationic Dyes. *Global NEST Journal*, 27(6), 1–10. <https://doi.org/10.30955/gnj.06229>
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Paczkowski, P., Puszka, A., & Gawdzik, B. (2021). Effect of Eco-Friendly Peanut Shell Powder on the Chemical Resistance, Physical, Thermal, and Thermomechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin Composites. *Polymers*, 13(21), 3690. <https://doi.org/10.3390/polym13213690>
- Rattanavijit, U., Chaipetch, W., Salae, N., & Khaekta., P. (2022). Adsorption of fabric dye from synthetic wastewater by using agricultural waste as biosorbent. *Journal of Vocational Education in Agriculture*, 6(1), 39-50. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/JVIA/article/view/253303>
- Saismrutirajan, M., & Sanjoy, K., M. (2020). Adsorption/photodegradation of methylene blue from synthetic wastewater on titanate nanotubes surfaces. *Water Science & Technology*, 82(11), 2562-2575. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.535>
- Songkarnpol, N., & Wongthanate, J. (2017). Optimal Conditions of dye removal from textile dyeing industrial wastewater by adsorption process. *The Journal of Industrial Technology*, 13(3), 70-84. https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jit_journal/article/view/110295
- Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: A critical review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1193–1226. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>