

การบำบัดสีย้อมสีออกกโดยใช้โคโตซานชนิดเยื่อแผ่น

รวินิภา ศรีมูล^{1*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกวิทยาเขตจันทบุรี อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี 22210

และ จักรพันธ์ โพรธิพัฒน์²

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อ.เมือง จ.จันทบุรี 22000

* Corresponding Author: rawinipa_sr@mutto.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 9 มิถุนายน 2565

แก้ไข : 10 เมษายน 2566

ตอบรับ : 21 เมษายน 2566

DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.7

คำสำคัญ : สีย้อมสีออกก /

โคโตซานชนิดเยื่อแผ่น /

การบำบัดสีย้อม

การวิจัยนี้เป็นครั้งแรกที่พัฒนาโคโตซานชนิดเยื่อแผ่นสำหรับดูดซับสีย้อมจากอุตสาหกรรมทอสีออกกพื้นบ้าน พบว่า เมื่อใช้โคโตซานแบบเกล็ดที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรในสารละลายกรดแอสติกร้อยละ 5 โดยปริมาตร และการเตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้ลักษณะของเยื่อแผ่นที่ดีที่สุด เป็นแผ่นเรียบ ยืดหยุ่นเล็กน้อย มีรูพรุนสม่ำเสมอ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อม 3.0 กรัมต่อลิตร อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตรต่อนาที ดูดซับสีย้อมได้ร้อยละ 43.89 ± 1.72 พฤติกรรมการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช ซึ่งแสดงการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบวิวิธพันธุ์ ความสามารถในการดูดซับ (K_f) เท่ากับ 2.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ความแรงของการดูดซับ (n_f) เท่ากับ 1.1724 เมื่อทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากการทอสีออกกจริง พบว่า สามารถบำบัดได้ร้อยละ 32.31 ± 0.98 ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากน้ำทิ้งจากการย้อมกจริงมีเศษของกปนอยู่ ทำให้ไปอุดตันเยื่อแผ่น ประสิทธิภาพการดูดซับจึงมีค่าลดลง

Reed Mat Dye Treatment Using Chitosan Membrane

Rawinipa Srimoon^{1*}

Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi Campus, Khao Khitchakut
Chanthaburi 22210

and Jakkapan Potipat²

Rambhaibarni Rajabhat University, Maung, Chanthaburi 22000

*Corresponding Author: rawinipa_sr@rmutto.ac.th

¹ Assistant Professor, Department of Applied Science and Biotechnology, Faculty of Agro-Industrial Technology

² Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology

Article Info

Article History:

Received: June 9, 2022

Revised: April 10, 2023

Accepted: April 21, 2023

DOI : 10.14456/kmuttrd.2023.7

Keywords : Reed Mat Dye /
Chitosan Membrane /
Dye Treatment

Abstract

This research is the first study on the development of chitosan membrane for dye adsorption from wastewater of a local reed mat industry. The results illustrated that synthesized chitosan membrane from 2%w/v chitosan flakes in 5%v/v acetic acid and formed in 0.1 M NaOH exhibited the best characteristics; the membrane was smooth, slightly elastic and possessed homogeneously distributed pores. The maximum adsorption capacity was attained when the initial dye concentration was 3.0 g/l and the water flow rate of 1 l/min. Percentage of removal at such a condition was 43.89 ± 1.72 . The adsorption behavior could be fitted to the Freundlich adsorption isotherm, indicating the heterogeneous adsorption. The adsorption capacity (K_f) was 2.87 mg/g, while the adsorption intensity (n_f) was 1.1724. Percentage dye removal from real wastewater from the local reed industry was 32.31 ± 0.98 , which was significantly ($p < 0.05$) lower than that obtained when tested with synthetic wastewater. That is because the real wastewater contained reed residues, which clogged the membrane, resulting therefore in the lower adsorption capacity.

1. บทนำ

จังหวัดจันทบุรีเป็นแหล่งของอุตสาหกรรมทอเสื่อกกพื้นบ้านที่มีชื่อเสียงในระดับประเทศ มีผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเสื่อกกมากมาย เช่น เสื่อรองนอน กระเป๋าถือ เครื่องประดับ และตกแต่งบ้าน มีการพัฒนาทั้งลวดลายและสีสันทนจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถส่งขายได้ทั้งในและต่างประเทศ ในกระบวนการย้อมสีกกมีการใช้สีย้อมสังเคราะห์ซึ่งส่วนใหญ่

เป็นสีย้อมประเภทสีรีแอกทีฟ (Reactive Dye) ให้สีสันทนใสและคงทน ละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำมีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสในสถานะต่างโมเลกุลของสียึดกับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยวงแหวนแอโรมาติกหลายวง (Figure 1) ทำให้ย่อยสลายยากและตกค้างในสิ่งแวดล้อมนาน [1]

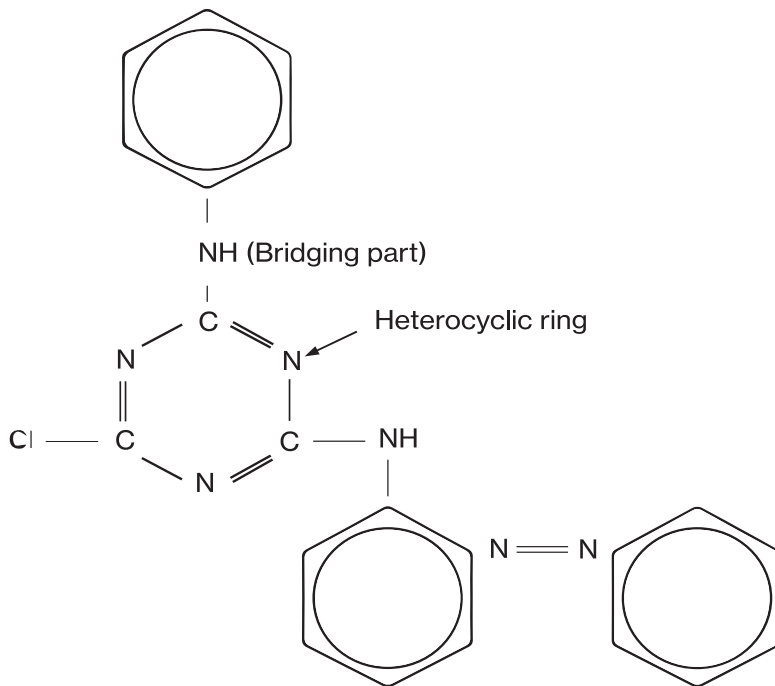


Figure 1 General structure of reactive dye

โดยทั่วไปการผสมสีย้อมมักจะใช้สีย้อมต่อน้ำในอัตราส่วน 1-3 ซ่อนโต๊ะต่อน้ำ 1 ปีบ หรือประมาณ 18 ลิตร คิดเป็นความเข้มข้น 0.83-2.5 กรัมต่อลิตร เมื่อย้อมเสร็จแล้วจะเกิดน้ำทิ้งที่มีสีคล้ำประกอบด้วยหลายสีปนกันในปริมาณมาก ประกอบกับการทอเสื่อกกในจังหวัดจันทบุรีจะเป็นอุตสาหกรรมพื้นบ้านขนาดเล็กที่ไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม น้ำทิ้งจึงมีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) สูง ทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลง และสีย้อมยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำเนื่องจากทำให้ระคายเคือง เป็นสารก่อมะเร็ง ปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องลงไปใต้น้ำทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลงส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร และเสียทัศนียภาพ [2-3] ดัง

นั้น น้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมจึงควรได้รับการบำบัดเบื้องต้นก่อน

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการบำบัดสีย้อมมีหลายวิธี เช่น กระบวนการทางชีวภาพโดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมย่อยสลายตัวอย่างเช่น จุลินทรีย์ในจีนัส *Klebsiella* sp. และ *Serratia* sp. [4] แต่จุลินทรีย์ก็ไม่สามารถย่อยสลายสีย้อมที่มีโครงสร้างซับซ้อนมาก ๆ ได้ จุลินทรีย์จำพวกราที่สามารถย่อยสลายสีย้อมได้ยังไม่ได้รับการยืนยันเรื่องความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ สีย้อมยังมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และมีความยุ่งยากในการนำไปใช้เนื่องจากต้องพัฒนาเป็นรูปแบบของฟิล์มตรึง การบำบัดสีย้อมด้วยวัสดุดูดซับที่เหมาะสมจึงเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ตัวดูดซับที่นิยมใช้มีหลายชนิด

เช่น ถ่านกัมมันต์ เบนโตนท์ ซิลิกาและซีโอไลท์ เป็นต้น [5-7] เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการนำวัสดุดูดซับที่เหมาะสมมาบำบัดสีในน้ำทิ้งจากการทอเสื่อกก นั่นคือ ไคโตซาน (Chitosan) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี ไคโตซานเป็นโพลีเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการกำจัดหมู่แอสิติลหรือปฏิกิริยาแอลคาไลน์ดีแอสิติลเลชัน (Alkaline Deacetylation) ของไคติน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในเปลือกของกุ้งและปู [8] มีโครงสร้างดัง Figure 2 หมู่แอมิโน (NH_2) บนสายโพลีเมอร์ของไคโตซานมีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลายกรดจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $-\text{NH}_3^+$ ทำให้สามารถดึงดูดกับสารที่มีประจุลบได้ ไคโตซานไม่ละลายน้ำแต่ละลายในสารละลายที่มี pH ต่ำกว่า 6.5 และจะตกตะกอนได้ดีเมื่อเป็นด่าง ไคโตซานเป็นสารที่ไม่เป็นพิษจึงมีความปลอดภัยในการใช้งานจากสมบัติในการดูดซับสิ่งปนเปื้อนหลายชนิดในน้ำเสียจึงมีการนำไคโตซานในรูปแบบต่าง ๆ ไปบำบัดสารมลพิษในน้ำหลายประเภท เช่น การ

กำจัดเหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำบาดาล [9] สีย้อม [10-15] โลหะหนัก [16-19] น้ำมัน [20-21] สารอนินทรีย์และสารอินทรีย์มลพิษ [22-24] เป็นต้น ไคโตซานมีหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นแบบผง (Powder) เกล็ด (Flake) แคปซูล (Capsule) เจล (Gel) เยื่อแผ่น (Membrane) เส้นใย (Fiber) หรือแบบเม็ด (Beads) แต่แบบผงและแบบเกล็ดไม่สะดวกต่อการใช้งาน เนื่องจากละเอียดและเบาามากไม่เสถียรในสารละลายกรด [25] ในการใช้งานนิยมนำไคโตซานผงหรือเกล็ดมาขึ้นรูปเป็นเม็ดหรือเยื่อแผ่นมากกว่า เนื่องจากใช้งานง่ายและนำไปล้างเพื่อใช้ซ้ำได้ ในการวิจัยนี้เลือกใช้ไคโตซานแบบเยื่อแผ่นที่เตรียมโดยวิธีทำให้เป็นกลาง (Neutralization Method) จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในดูดซับสีย้อมในห้องปฏิบัติการ แล้วนำไปทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากการทอเสื่อกกจริง ซึ่งผลจากการวิจัยในครั้งนี้ จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวิธีการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอเสื่อกกที่บ้านก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป

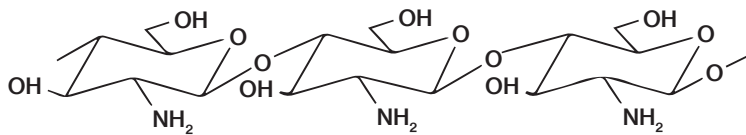


Figure 2 General structure of chitosan

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

ไคโตซานเกล็ด (Chitosan Flake) ของ Sinudom Agricultural Products Limited ประเทศไทย กรดแอสิติก (CH_3COOH) AR-grade ของ RCI Labscan โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR-grade ของ QRëC New Zealand สีย้อมมกสังเคราะห์ชนิดผงประเภทรีแอกทีฟสีเขียว สีเหลือง สีนํ้าเงิน และสีแดง

2.2 การเตรียมไคโตซานเยื่อแผ่น

ออกแบบการทดลองเพื่อเตรียมไคโตซานเยื่อแผ่นโดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 4×3 มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณไคโตซานแบบเกล็ด 4 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 2, 3 และ 4 โดยมวลต่อปริมาตร และความเข้มข้นของ

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 ระดับ คือ 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลาร์ เตรียมโดยวิธีทำให้เป็นกลางตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก Bekçi และคณะ [10] และ Igberase และ Osifo [18] ละลายไคโตซานแบบเกล็ดตามอัตราส่วนที่กำหนดลงในสารละลายกรดแอสิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร กวนผสมนาน 1 คืน จากนั้น เทสารละลายไคโตซาน 5 มิลลิลิตร ลงใน Petri Dish ชนิดพอลิเอทิลีนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร เคาะ Petri dish เบาๆ เพื่อให้แผ่นไคโตซานหนาสม่ำเสมอ และไม่มีฟองอากาศ ทิ้งไว้ 1 คืน จากนั้น เทสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในไคโตซานให้ท่วม ทิ้งไว้อีก 1 คืน ให้จับตัวล้าง เยื่อแผ่นที่ได้ด้วยน้ำล้างเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารเคมีส่วนเกิน ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง จากนั้น นำไปศึกษา ลักษณะสมบัติต่อไป

2.3 การศึกษาลักษณะพื้นฐานของไคโตซานเยื่อแผ่น

ศึกษาลักษณะพื้นฐานของไคโตซานเยื่อแผ่นที่เตรียมได้ เลือกเฉพาะที่ขึ้นรูปเป็นแผ่นได้และไม่เป็นขุย โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของ LEO รุ่น LEO1450VP ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมกกในห้องปฏิบัติการ

2.4.1 การความยาวคลื่นสูงสุดของการดูดกลืนแสงของสีย้อมกก

เตรียมสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟ 4 สี ได้แก่ สีเขียว สีเหลือง สีน้ำเงิน และสีแดง ผสมกันในอัตราส่วนสีละ 0.75 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้นรวมของสีเท่ากับ 3.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใช้ในการย้อมสีกกโดยทั่วไป ทำการแสกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800 นาโนเมตร เพื่อหาความยาวคลื่นสูงสุดเพื่อการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ของ Libra S22 Biochrom

2.4.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมกก

หาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมกกในห้องปฏิบัติการโดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3x3 มีปัจจัยที่ศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 3 ระดับ (ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นของสีย้อมกกที่นิยมใช้ย้อมกกจริง ซึ่งอยู่ระหว่าง 0.83-2.5 กรัมต่อลิตร) คือ 0.75 กรัมต่อลิตร (ใช้อัตราส่วนสีละ 0.1875 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) , 1.5 กรัมต่อลิตร (ใช้อัตราส่วนสีละ 0.375 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) และ 3.0 กรัมต่อลิตร (ใช้อัตราส่วนสีละ 0.75 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) ปริมาตร 10 ลิตร และอัตราการไหลของน้ำสีย้อม 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 ลิตรต่อนาที ออกแบบอุปกรณ์บำบัด ดัง Figure 3 เป็นแบบนำไหลต่อเนื่องปรับอัตราการไหลบริเวณวาล์ว นำไคโตซานเยื่อแผ่นจำนวน 1 แผ่น วางที่ส่วนรองรับน้ำได้วาล์ว น้ำสีย้อมจะผ่านตัวดูดซับแล้วไหลลงในถังรองรับ ทำการบำบัดจนกว่าน้ำสีย้อมจะไหลหมด อัตราการไหลที่เหมาะสมพิจารณาจากร้อยละของการกำจัดสีย้อม ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 1

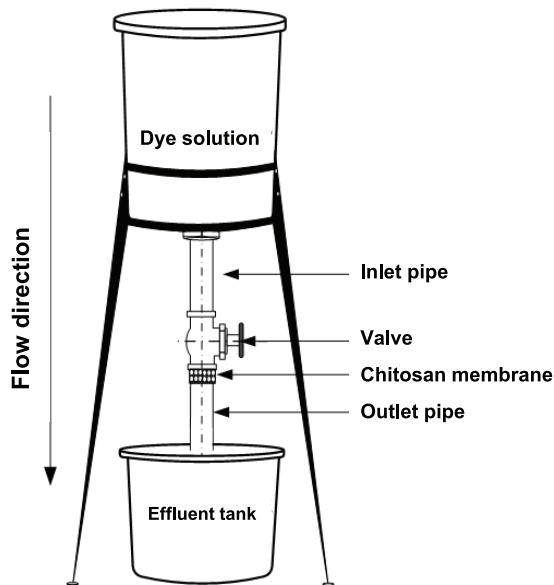


Figure 3 Dye treatment equipment diagram

$$\text{ร้อยละการกำจัดสีย้อม} = \frac{(A_1 - A_2)}{A_1} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ A_1 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมก่อนบำบัด,
 A_2 คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมหลังบำบัด

2.5 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอเสื่อกกพื้นบ้าน

ทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอเสื่อกกพื้นบ้านในจังหวัดจันทบุรี นำโคโดซานชนิดเยื่อแผ่นที่เตรียมได้ อุปกรณ์บำบัด และสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.4 ไปทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีโดยได้รับอนุเคราะห์น้ำทิ้งจากกลุ่มทอเสื่อกกพื้นบ้านในตำบลบางสระเก้า อำเภอกาญจนดิษฐ์ จังหวัดจันทบุรี

2.6 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมบนโคโดซานเยื่อแผ่น

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมบนโคโดซานเยื่อแผ่นโดยแปรความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมระหว่าง 0.75-3.0 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 ลิตร อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ใช้เวลาบำบัด 10 นาที เก็บตัวอย่างที่ปลายท่อน้ำไหลออก (Outlet Pipe) สร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) ดังสมการที่ 2 และ 3 ตามลำดับ [10]

ไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{C_m L} + \frac{C_e}{C_m} \quad (2)$$

ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช

$$\ln C_s = \ln K_f + n \ln C_e \quad (3)$$

โดยที่ C_e = ความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร),

C_s = ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม),

C_m = ปริมาณสีย้อมมากที่สุดที่สามารถดูดซับได้บนตัวดูดซับ (Maximum Adsorption) (มิลลิกรัมต่อกรัม),

L = ค่าคงที่แลงก์เมียร์ (Langmuir Constant) (ลิตรต่อมิลลิกรัม),

K_f = ค่าคงที่ฟรุนดลิชหรือความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ

n_f = ความแรงของการดูดซับ (Adsorption Intensity for Heterogeneity Factor)

2.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

แต่ละการทดลองวิเคราะห์ 3 ซ้ำ รายงานในรูปค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean ± SD.) วิเคราะห์ความแปรปรวน Oneway-ANOVA และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์

3.1 ลักษณะพื้นฐานของโคโดซานเยื่อแผ่นที่เตรียมได้

จากการเตรียมโคโดซานเยื่อแผ่นโดยวิธีทำให้เป็นกลางโดยใช้โคโดซานแบบเกล็ดในสารละลายกรดแอซิดิกเข้มข้นร้อยละ 5 ทำให้เกิดแผ่นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ลักษณะของเยื่อแผ่นโคโดซานที่ได้ แสดงใน Figure 4

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อปริมาณโคโดซานร้อยละ 1 โดยมวลต่อปริมาตร ไม่เกิดเป็นแผ่นและยุ่งมากไม่ว่าจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเท่าใดก็ตาม ในขณะที่เยื่อแผ่นที่เตรียมจากปริมาณโคโดซานร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร ได้เยื่อแผ่นเรียบใส ยืดหยุ่นเล็กน้อย และปริมาณโคโดซานร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ได้เยื่อแผ่นลักษณะเรียบ นุ่ม ชุ่มมีเม็ดเล็กๆกระจายทั่วพื้นผิว และยืดหยุ่นมาก ส่วนปริมาณโคโดซานร้อยละ 4 โดยมวลต่อปริมาตร เกิดเป็นแผ่นแต่เมื่อแห้งมีขุยผงโคโดซานส่วนเกินมาก แข็งและไม่ยืดหยุ่น จึงคัดเลือกเฉพาะเยื่อแผ่นที่เตรียมจากโคโดซานร้อยละ 2 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ไปศึกษาลักษณะต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ผลเป็นดัง Figure 5 พบว่า โคโดซาน ร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ (2%/0.1 M) ภาพตัดขวางจาก SEM แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนเล็กๆ ปริมาณมากแต่เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 และ 1.0 โมลาร์ (2%/0.5 M และ 2%/1.0 M) ไม่เกิดรูพรุนภายในเยื่อแผ่น ในขณะที่เมื่อใช้ปริมาณโคโดซาน ร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตรในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทุกความเข้มข้น เยื่อแผ่นที่ได้ทึบไม่มีรูพรุน ดังนั้น จึงเลือกใช้เยื่อแผ่นที่เตรียมโดย

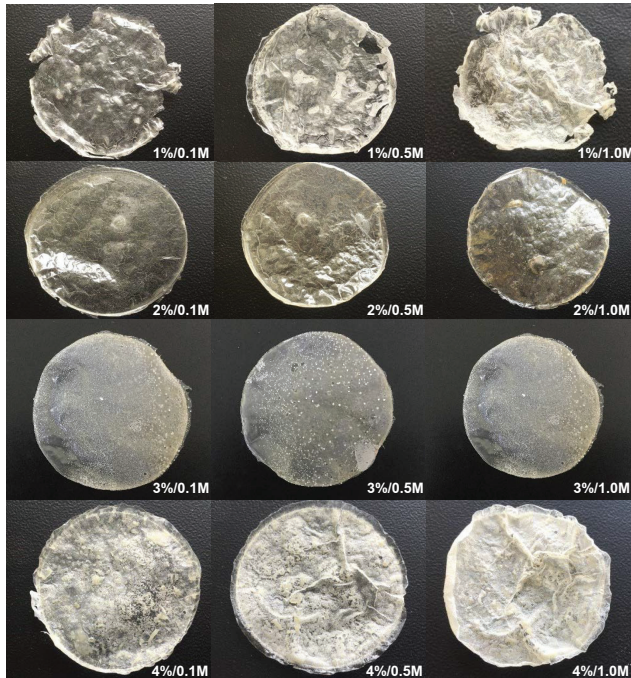


Figure 4 Characteristics of synthetic chitosan membranes at different conditions (%chitosan/molar concentration of NaOH)

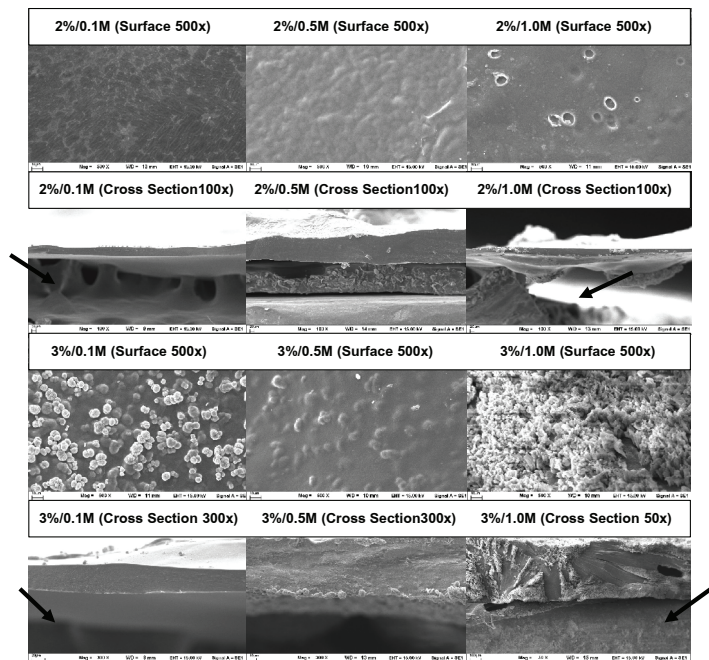


Figure 5 SEM images (surface and cross section) of chitosan membranes synthesized from 2% and 3% chitosan with different molar concentration of NaOH (the arrow symbol indicates the porous layer of the membrane)

ใช้โคโคซานร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร ทำให้เกิดเยื่อแผ่นในสารละลายไฮโดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ (2%/0.1 M) ในการทดลองการดูดซับสีย้อม เนื่องจากเยื่อแผ่นเรียบใสไม่เป็นขุย มีความยืดหยุ่นเล็กน้อย และมีรูพรุนภายในสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมกับการนำไปดูดซับสารต่างๆ ได้ดี เมื่อนำไปชั่งน้ำหนักพบว่า เยื่อแผ่นโคโคซานในสภาวะนี้มีน้ำหนักเฉลี่ย 0.1749 ± 0.0029 กรัม ($n=10$)

3.2 ความยาวคลื่นสูงสุดของการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม

เนื่องจากน้ำย้อมสีจะมีสีคล้ำประกอบไปด้วยหลายสีปนกันปริมาณมากในการทดลองใช้สีย้อมประเภทรีแอกทีฟ 4 สี ได้แก่ สีเขียว สีเหลือง สีนํ้าเงิน และสีแดง ผสมกันให้มีความเข้มข้นเริ่มต้นสีเท่ากับ 3.0 กรัมต่อลิตร แสกนความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800 นาโนเมตร เพื่อหาความยาวคลื่นสูงสุดเพื่อการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อม ผลเป็นดัง Figure 6 พบว่า ความยาวคลื่นสูงสุดเพื่อการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมมีค่า 509 นาโนเมตร จึงใช้ความยาวคลื่นนี้ในการวัดค่าความเข้มข้นในการทดลองต่อไป

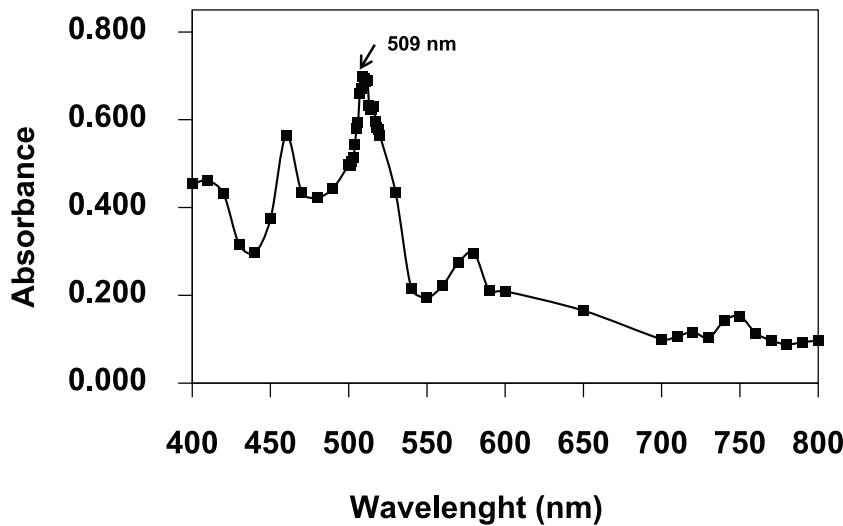


Figure 6 Wavelength of maximum (λ_{max}) of dye solution.

3.3 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมในห้องปฏิบัติการ

ผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดสีย้อม กก ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีและอัตราการไหล คำนวณค่าร้อยละของการกำจัดสีย้อมโดยเปรียบเทียบการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมก่อนบำบัดกับค่าการดูดกลืนแสงของสีย้อมหลังบำบัด ผลการศึกษาแสดงใน Figure 7 พบว่า ร้อยละของการบำบัดขึ้นกับอัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้นสีเท่ากับ 3.0 กรัมต่อลิตร ให้ค่าการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุดคือ ร้อยละ 43.89 ± 1.72 สูงกว่าสภาวะอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่ออัตราการไหลซ้ำการกำจัดสีดีกว่า

อัตราการไหลเร็ว เนื่องจากสีย้อมมีเวลาสัมผัสกับโคโคซานเยื่อแผ่นได้นานกว่า ทำให้สามารถลดปริมาณสีได้ดีกว่า ร้อยละของการกำจัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสีในสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration Gradient) ระหว่างความเข้มข้นสีในสารละลายกับความเข้มข้นสีบนเยื่อแผ่นโคโคซาน ทำให้การดูดซับบนเยื่อแผ่นเกิดได้ดีขึ้น ผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jeyaseelan และคณะ [26] ซึ่งทดลองดูดซับสีย้อมคองโกเรดโดยใช้โคโคซานแบบเกล็ดเชื่อมขวางด้วยซัลเฟต พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีและเวลาที่ให้ตัวดูดซับสัมผัสกับสีย้อมการดูดซับจะเกิดได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี

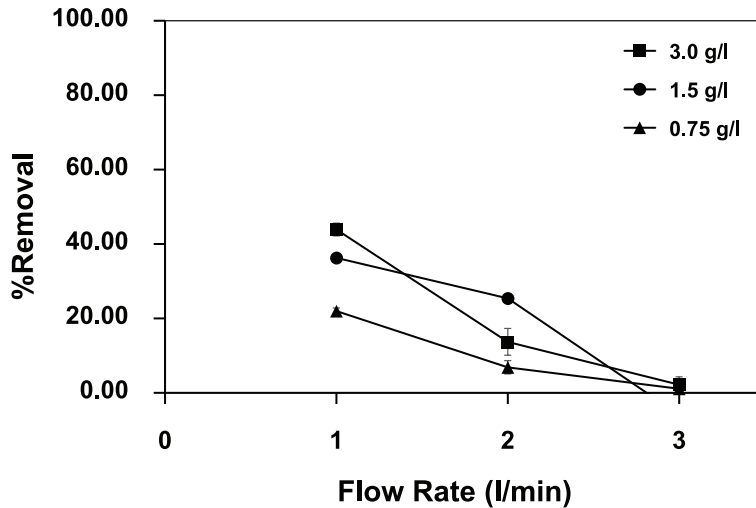


Figure 7 Percentage of dye removal with different initial dye concentration and flow rate.

แต่ปริมาณตัวดูดซับมีได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การดูดซับจะลดลงเนื่องจากการดูดซับถูกจำกัดด้วยที่ว่างบนผิวและภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

สีย้อมที่ใช้ในการย้อมสีอ็อกเป็นสีย้อมประเภทสีรีแอกทีฟละลายน้ำมีประจุลบ ในขณะที่บนผิวเยื่อแผ่นไคโตซานที่เตรียมในสารละลายกรด หมู่อะมิโน ($-NH_2$) จะรับโปรตอนแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $-NH_3^+$ ทำให้สามารถดึงดูดกับสีย้อมที่มีประจุลบได้ดี [15] กลไกการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับด้วยแรงทางไฟฟ้า นอกจากนี้ จากภาพตัดขวาง SEM พบว่าเยื่อแผ่นไคโตซานที่ใช้ในการศึกษานี้ มีรูพรุนเล็กๆ สม่ำเสมอ ซึ่งเหมาะกับการดูดซับโมเลกุลของสีย้อมจะแพร่เข้าสู่รูพรุนได้นอกเหนือจากการดูดซับที่ผิว [24]

3.4 ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอสีอ็อก

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอสีอ็อกพื้นบ้านในจังหวัดจันทบุรี พบว่า สามารถบำบัดได้ร้อยละ 32.31 ± 0.98 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากในน้ำทิ้งจากการย้อมกจริงจะมีเศษกากปนออกมาด้วยทำให้ไปอุดตันบริเวณที่ว่างแผ่นไคโตซาน ทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง

3.5 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมบนไคโตซานเยื่อแผ่น

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์และไอโซ

เทอมการดูดซับของฟรอนดลิช แสดงดัง Figure 8 พบว่า การดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช ($R^2=0.9992$) มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับของแลงก์เมียร์ ($R^2=0.8487$) แสดงว่า การดูดซับสีย้อมกด้วยไคโตซานแบบเยื่อแผ่นนี้เป็นการดูดซับแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Adsorption) และการดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer) ประกอบกับการดึงดูดกันระหว่างประจุบวกบนผิว ไคโตซานกับสีย้อมที่มีประจุลบเป็นแรงทางไฟฟ้า สีย้อมจะถูกดูดซับไว้ได้หลายชั้นจึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเกิดได้ดี เมื่อคำนวณค่าคงที่ในไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิช พบว่า K_f หรือความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) มีค่าเท่ากับ 2.87 มิลลิกรัมต่อกรัม และ n_f หรือความแรงของการดูดซับ (Adsorption Intensity for Heterogeneity Factor) มีค่าเท่ากับ 1.1724 ค่า n_f ในการทดลองนี้อยู่ระหว่าง 1-10 แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีเมื่อคำนวณค่า $1/n_f$ มีค่าเท่ากับ 0.8530 ซึ่งน้อยกว่า 1 แสดงว่าการดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันมาก [27] จากการศึกษาของ Jeyaseelan และคณะ [26] พบว่า เมื่อใช้ไคโตซานเชื่อมขวางด้วยซัลเฟต (Sulphate-Crosslink) ดูดซับสีย้อมคองโกเรดซึ่งเป็นสีย้อมที่มีประจุลบเช่นเดียวกับสีย้อมก การดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนดลิชเช่นเดียวกัน มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 91.8 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าผลการวิจัยในครั้งนี้ เนื่องจากไคโตซานมีการเชื่อมขวางด้วย

ซัลเฟต (Sulfate Cross-link) ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้กับไคโตซาน และการทดลองยังเป็นแบบกะ (Batch Adsorption) มีเวลาที่ตัวดูดซับสัมผัสกับสารละลายสี้อมนาน 90 นาที ในขณะที่การวิจัยครั้งนี้เป็นแบบไหลต่อเนื่อง (Continuous Adsorption) มีเวลาบำบัดนาน 10 นาที ตามอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ทำให้การดูดซับต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของ Règo และคณะ [28] ซึ่งใช้ไคโตซานแบบแผ่นกำจัดสี้อมอะโซ (ทาร์ทราซีนและอะมาแรนธ์) โดยเป็นการทดลองแบบกะ ให้เวลาไคโตซานแผ่นฟิล์มสัมผัสกับสารละลายสี้อม 30 และ 120 นาที สำหรับทาร์ทราซีนและอะมาแรนธ์ พบว่า สามารถดูดซับสี้อมทั้งสองได้ดีที่สุด 413.8 และ 278.3 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าการดูดซับสี้อมมากในการวิจัยนี้เช่นกัน ซึ่งส่วนใหญ่การใช้ไคโตซานในการดูดซับสี้อมนิยมศึกษาการดูดซับแบบกะหรือให้สี้อมสัมผัสกับไคโตซานในช่วงระยะเวลา

หนึ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าการบำบัดสี้อมค่อนข้างสูง มีงานวิจัยน้อยมากที่ใช้ไคโตซานแบบเยื่อแผ่นและให้น้ำเสียไหลผ่านดังเช่นการศึกษาในครั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาการดูดซับสารแบบน้ำไหลผ่านตัวดูดซับต่อเนื่องของ Arman และคณะ [29] ซึ่งใช้ไคโตซานชนิดเกล็ดศึกษาสมมูลการดูดซับสี้อมเมทิลีนบลูแบบไหลต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง หรือ 16.67 ลิตรต่อนาที พบว่าการดูดซับเมทิลีนบลูมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม การดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอมของแลงก์เมียร์ สามารถกำจัดเมทิลีนบลูได้ 7.2 กรัมต่อไคโตซาน 2.0 กิโลกรัม หรือ 3.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับสี้อมมากของไคโตซานเยื่อแผ่นที่ได้ในการวิจัยครั้งนี้ (2.87 มิลลิกรัมต่อกรัม) อย่างไรก็ตามการบำบัดแบบน้ำไหลผ่านต่อเนื่องสามารถปล่อยน้ำสี้อมให้ไหลผ่านตัวดูดซับได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาจึงมีความสะดวกต่อการนำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์บำบัดต้นแบบในอนาคต

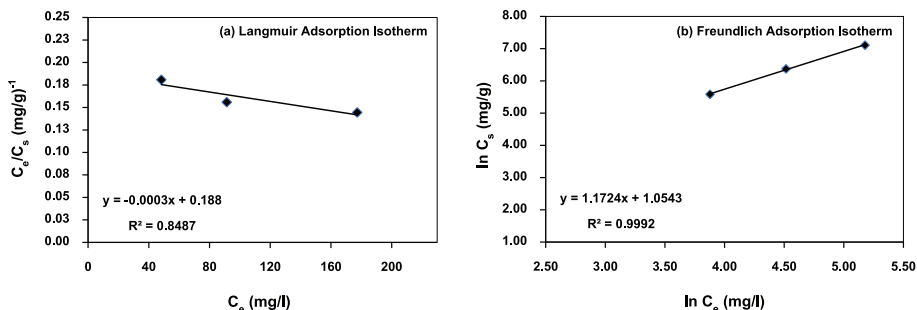


Figure 8 (a) Langmuir adsorption isotherm and (b) Freundlich adsorption isotherm, of dye solution using chitosan membrane

4. สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นครั้งแรกที่มีการใช้ไคโตซานชนิดเยื่อแผ่นเพื่อดูดซับสี้อมในอุตสาหกรรมทอเสื้อกักพื้นบ้าน เยื่อแผ่นไคโตซานที่สังเคราะห์จากไคโตซานชนิดเกล็ดปริมาณร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตรในสารละลายกรดแอสติกร้อยละ 5 โดยปริมาตร ให้เกิดเยื่อแผ่นในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ให้ลักษณะของเยื่อแผ่นดีที่สุดเป็นโพรงมีรูพรุนสม่ำเสมอ เมื่อนำไปใช้ในการดูดซับสี้อม สามารถดูดซับสี้อมได้ร้อยละ 43.89 ± 1.72 ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมและอัตราการไหลของน้ำ การดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช แสดงถึง

ดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดและการดูดซับบนผิวพื้นผิวหลายชั้น เมื่อทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสี้อมโดยใช้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอเสื้อกักพื้นบ้านในจังหวัดจันทบุรี พบว่า สามารถบำบัดได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากในน้ำทิ้งจากการย้อมกกจริง ๆ นั้นมีองค์ประกอบหลากหลายและมีเศษของกากปนออกมามาก ทำให้ไปอุดตันบริเวณที่วางแผ่นไคโตซานเพื่อดูดซับ ทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้น หากจะนำไปใช้จริงน้ำทิ้งจากการย้อมกกควรมีการกรองเศษกักทิ้งไปก่อนที่จะนำไปดูดซับสี้อมด้วยไคโตซาน อย่างไรก็ตามผลการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์บำบัด

สีย้อมในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมทอเสื่อกกพื้นบ้านเพื่อลดมลพิษจากสีย้อม สำหรับแนวทางพัฒนาต่อไป คือ การศึกษาการคายดูดซับ (Desorption) เพื่อนำไคโตซานกลับมาใช้ซ้ำ การเพิ่มประสิทธิภาพของไคโตซานเยื่อแผ่นโดยวิธีการต่างๆ เช่น การเชื่อมขวาง (Cross-link) หรือ การต่อกิ่ง (Grafting) รวมทั้งในอนาคตการย้อมสีก็อาจมีการพัฒนาการใช้สีย้อมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมให้มากขึ้น เพื่อลดภาระและต้นทุนการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มอุตสาหกรรมทอเสื่อกกพื้นบ้าน ตำบลบางสระเก้า อำเภอแหลมสิงห์ จังหวัดจันทบุรี สำหรับความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำสีย้อมเสื่อกก และห้องปฏิบัติการกล้องจุลทรรศน์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา สำหรับความอนุเคราะห์การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

6. เอกสารอ้างอิง

1. Lade, H.S., Waghmode, T.R., Kadam, A.A. and Govindwar, S.P., 2012, "Enhanced Biodegradation and Detoxification of Disperse Azo Dye Rubine GFL and Textile Industry Effluent by Defined Fungal-Bacterial Consortium," *International Biodeterioration and Biodegradation*, 72, pp. 94-107.
2. Weisburger, J., 2002, "Comments on the History and Importance of Aromatic and Heterocyclic Amines in Public Health," *Mutation Research-Fundamental of Molecular Mechanics and Mutagenesis*, 506-507, pp. 9-20.
3. Yanan, D., Yanlei, S., Wenjuan, C., Jinming, P., Yan, Z. and Zhongyi, J., 2011, "Ultrafiltration Enhanced with Activated Carbon Adsorption for Efficient Dye Removal from Aqueous Solution," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19 (5), pp. 863-869.
4. Leangthanom, N. and Chanthamalee, J., 2013, "Potential of Bacteria Isolated from a Dye

Contaminated Site on Decolorization of Reed Dyeing Wastewater," *KKU Science Journal*, 41 (4), pp. 1043-1056. (In Thai)

5. Krysztafkiewicz, A., Binkowski, S. and Jesionowski, T., 2002, "Adsorption of Dyes on a Silica Surface," *Applied Surface Science*, 199, pp. 31-39.
6. Wang, C.C., Juang, L.C., Hsu, T.C., Lee, C.K., Lee, J.F. and Huang, F.C., 2004, "Adsorption of Basic Dyes onto Montmorillonite," *Journal of Colloid Interface Science*, 273, pp. 80-86.
7. Woolard, C., Strong, J. and Erasmus, C., 2002, "Evaluation of the Use of Modified Coal Ash as a Potential Sorbent for Organic Waste Streams," *Journal of Applied Geochemistry*, 17 (8), pp. 1159-1164.
8. Muxika, A., Etxabide, A., Uranga, J., Guerrero, P. and De La Caba, K., 2017, "Chitosan as a Bioactive Polymer: Processing, Properties and Applications," *International Journal of Biological Macro molecules*, 105 (2), pp. 1358-1368.
9. Sananmuang, R., Udnan, Y. and Chuachuad, W., 2008, "Removal of Iron in Synthetic Ground Water by Chitosan Membrane," *NU International Journal of Science*, 5 (2), pp. 200-209. (In Thai)
10. Bekçi, Z., Özveri, C., Seki, U. and Yurdakoç, K., 2008, "Sorption of Malachite Green on Chitosan Bead," *Journal of Hazardous Materials*, 154 (1-3), pp. 254-261.
11. Boardman, S.J., Lad, R., Green, D.C. and Thornton, P.D., 2017, "Chitosan Hydrogels for Targeted Dye and Protein Adsorption," *Journal of Applied Polymer Science*, 134 (21), pp. 44846-44856.
12. De Luna, M.S., Ascione, C., Santillo, C., Verdolotti, L., Lavorgna, M., Buonocore, G.G., Castaldo, R., Filippone, G., Xia, H. and Ambrosio, L., 2019, "Optimization of Dye Adsorption Capacity and Mechanical Strength of Chitosan Aerogels Through Crosslinking Strategy and Graphene Oxide Addition," *Carbohydrate Polymers*, 211, pp. 195-203.

13. Khanday, W.A., Asif, M. and Hameed, B.H., 2017, "Cross-Linked Beads of Activated Oil Palm Ash Zeolite/ Chitosan Composite as a Bio-Adsorbent for the Removal of Methylene Blue and Acid Blue 29 Dyes," *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, pp. 895-902.
14. Sadighi, A. and Faramarzi, M.A., 2013, "Congo Red Decolorization by Immobilized Laccase Through Chitosan Nanoparticles on the Glass Beads," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44 (2), pp. 156-162.
15. Vakili, M., Zwain, H.M., Mojiri, A., Wang, W., Gholami, F., Gholami, Z., Giwa, A.S., Wang, B., Cagnetta, G. and Salamatinia, B., 2020, "Effective Adsorption of Reactive Black 5 onto Hybrid Hexadecylamine Impregnated Chitosan-Powdered Activated Carbon Beads," *Water*, 12 (8), p. 2242.
16. Cheng, J., Gao, M., Yang, L., Zhang, L. and Zhu, B., 2020, "Coral-Inspired Nanotentaclization Porous Composite Gel for Efficient Removal of Lead (II) from Aqueous Solution," *Materials and Design*, p. 195.
17. Huang, T., Shao, Y.W., Zhang, Q., Deng, Y.F., Liang, Z.X., Guo, F.Z., Li, P.C. and Wang, Y., 2019, "Chitosan-Cross-Linked Graphene Oxide/Carboxy methyl Cellulose Aerogel Globules with High Structure Stability in Liquid and Extremely High Adsorption Ability," *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7 (9), pp. 8775-8788.
18. Igberase, E. and Osifo, P., 2015, "Equilibrium, Kinetic, Thermodynamic and Desorption Studies of Cadmium and Lead by Polyaniline Grafted Cross-Linked Chitosan Beads from Aqueous Solution," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 26 (5), pp. 340-347.
19. Lai, K.C., Hiew, B.Y.Z., Lee, L.Y. and Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., Chiu, W.S. and Khiew, P.S., 2019, "Ice-Templated Graphene Oxide/Chitosan Aerogel as an Effective Adsorbent for Sequestration of Metanil Yellow Dye," *Bioresource Technology*, 274, pp. 134-144.
20. Pitakpoolsil, W. and Hunsom, M., 2013, "Adsorption of Pollutants from Biodiesel Wastewater Using Chitosan Flakes," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 44 (6), pp. 963-971.
21. Srimoon, R. and Potipat, J., 2021, "Development of Chitosan Beads as an Oil Adsorbent and Its Application in Household Grease Traps," *ScienceAsia*, 47 (3), pp. 330-339.
22. De Souza, J.F., Da Silva, G.T. and Fajardo, A.R., 2017, "Chitosan-Based Film Supported Copper Nano particles: a Potential and Reusable Catalyst for the Reduction of Aromatic Nitro Compounds," *Carbohydrate Polymers*, 161, pp. 187-196.
23. Liu, X. and Zhang, L., 2015, "Removal of Phosphate Anions Using the Modified Chitosan Beads: Adsorption Kinetic, Isotherm and Mechanism Studies," *Powder Technology*, 277, pp. 112-119.
24. Mahaninia, M.H. and Wilson, L.D., 2017, "Phosphate Uptake Studies of Cross-Linked Chitosan Bead Materials," *Journal of Colloid and Interface Science*, 485, pp. 201-212.
25. Krajewska, B., 2004, "Application of Chitin and Chitosan-Based Materials for Enzyme Immobilizations: aReview," *Enzyme Microbial Technology*, 35 (2-3), pp. 126-139.
26. Jeyaseelan, C., Chaudhary, N. and Jugade, R., 2022, "Sulphate-Crosslinked Chitosan as an Adsorbent for the Removal of Congo Red Dye from Aqueous Solution," *Air, Soil and Water Research*, 11, pp. 1-8.
27. Dada, A.O., Olalekan, A.P., Olatunya, A.M. and Dada, O., 2012, "Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn²⁺ onto Phosphoric Acid Modified Rice Husk," *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3 (1), pp. 38-45.
28. Rêgo, T.V., Cadaval, T.R.S., Dotto, G.L. and

Pinto, L.A.A., 2013, "Statistical Optimization, Interaction Analysis and Desorption Studies for the Azo Dyes Adsorption onto Chitosan Films," *Journal of Colloid and Interface Science*, 411, pp. 27-33.

29. Arman, Y., Rojkongsub, M. and Piyamongkara, K., 2018, "Adsorption Methylene Blue Dye by Chitosan Flake: Equilibrium and Applied to Use for Industrial Factory," *Journal of KMUTNB*, 28 (4), pp. 825-835. (In Thai)

