

การดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด Adsorption of Direct Red 23 Dye by Corn Husks

หทัยรัตน์ สุขเพียรพร้อม (Hatairat Sukpreabprom)^{1*} E-mail: hatairat278@gmail.com

วาทีณี จันมี (Watinee Chanmee)² E-mail: watinee.ch@bsru.ac.th

อารี แจ้งเรือง (Aree Jangruang)³ E-mail: aree.ja@bsru.ac.th

ฐิติมา ละอองฐิติรัตน์ (Thitima La-onghitirat)⁴ E-mail: th.tooktook@gmail.com

นิศามณี ชุ่ยย่อง (Nisamanee Chunyoung)⁵ E-mail: yoknisamanee@gmail.com

^{1, 2} สาขาวิชาเคมี คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

(Chemistry Department, Faculty of Education, Bansomdejchaopraya Rajabhat University)

^{3, 4, 5} โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

(The Demonstration School of Bansomdejchaopraya Rajabhat University)

*Corresponding Author. E-mail : hatairat278@gmail.com

(Received: March 22, 2024; Revised: May 9, 2024; Accepted: May 15, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ผลการทดลองพบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับคือ พีเอช 2 เวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับคือ 120 นาที และการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น จลนศาสตร์ของการดูดซับศึกษาจากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม พบว่า จลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 สอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เมื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่า ข้อมูลการดูดซับที่สมดุลสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่า ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 43.86 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า เปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ ราคาถูก และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมได้

คำสำคัญ : การดูดซับ; สีย้อมไคเร็กซ์เรด 23; เปลือกข้าวโพด; ไอโซเทอม; จลนศาสตร์

Abstract

This research aimed to investigate the adsorption efficiency of direct red 23 dye using corn husks as an adsorbent. The effects of parameters such as pH, contact time, and initial concentration of direct red 23 dye were studied through batch experiments. The experimental results showed

that the optimum pH was 2, and the equilibrium absorption time was 120 minutes. The adsorption capacity increased with higher initial concentration of direct red 23 dye. The adsorption kinetics were examined using the pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic models. The results indicated that the pseudo-second-order kinetic model best described the adsorption kinetics of direct red 23 dye. In the adsorption isotherm study, the equilibrium adsorption data fitted the Langmuir isotherm better than the Freundlich isotherm, suggesting that the adsorption of direct red 23 dye onto corn husks followed a monolayer adsorption process. The maximum adsorption capacity of corn husks was 43.86 mg/g. This study demonstrated that corn husks, an agricultural waste, could be employed as an efficient, low-cost and eco-friendly adsorbent for the removal of direct red 23 dye.

Keywords: Adsorption; direct red 23 dye; corn husks; isotherm; kinetics

บทนำ

สีย้อมเป็นสารเคมีที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ อุตสาหกรรมการพิมพ์ อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เป็นต้น หากอุตสาหกรรมเหล่านี้ปล่อยน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ได้รับการบำบัดอาจก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และสุขภาพของมนุษย์ เช่น ทำลายทัศนียภาพทำให้แหล่งน้ำขาดความสวยงาม บดบังแสงอาทิตย์ที่จะส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง สัตว์น้ำอาจตายได้ สีย้อมหลายชนิดเป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ใช้แหล่งน้ำในการอุปโภคและบริโภค อาจทำให้เกิดโรคผิวหนัง เกิดความผิดปกติของระบบทางเดินหายใจ ระบบสืบพันธุ์ และระบบประสาทส่วนกลาง นอกจากนี้สีย้อมบางชนิดยังเป็นสารพิษ สารก่อกลายพันธุ์ และสารก่อมะเร็งอีกด้วย (รวินิภา ศรีมูล , 2559; Kumar et al., 2013) สีย้อมไคเร็กซ์ (Direct dye) เป็นสีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dye) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นหมู่เอโซ (Azo group, $-N=N-$) ซึ่งเชื่อมต่อกับวงอะโรมาติกของแนพทาลีนและเบนซีน นอกจากนี้ยังมีหมู่ซัลโฟนิค (Sulfonic group, $-SO_3H$) ที่ทำให้สีย้อมสามารถละลายน้ำได้ดีและให้ประจุลบ นิยมนำมาใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้าย เนื่องจากสีย้อมไคเร็กซ์ มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างที่ซับซ้อน จึงทำให้สลายตัวได้ยาก มีผลทำให้แหล่งน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมไคเร็กซ์กลายเป็นน้ำเสีย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ (จิรจิตต์ ไพรัตน์, 2559; Liu et al., 2018)

การบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical precipitation) การแยกสารผ่านเยื่อด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การย่อยสลายโดยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradation) และการใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูง (Ultrasonic) เป็นต้น นอกจากนี้วิธีการบำบัดน้ำทิ้งข้างต้นยังมีอีกวิธีหนึ่งที่มีความนิยมมากคือการดูดซับ (Adsorption) เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ใช้เวลาไม่นาน ใช้เงินลงทุนน้อย และมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีนักวิจัยจำนวนมากเริ่มให้ความสนใจ ศึกษา คิดค้น และพัฒนาตัวดูดซับต้นทุนต่ำ ซึ่งทำมาจากวัสดุ

ธรรมชาติ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกผลไม้ แกลบขานอ้อย กะลามะพร้าว กากชา กากกาแฟ ขี้เลื่อย กระดุกสัตว์ และเถาลอย เป็นต้น (พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และวีระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์, 2553; Gupta & Suhas, 2009; Seow & Lim, 2016)

เปลือกข้าวโพด (Corn husks) เป็นส่วนที่หุ้มฝักข้าวโพดไว้ มีลักษณะเป็นแผ่นยาวรี มีความยาวประมาณ 10-20 เซนติเมตร มีความเหนียว ประกอบด้วยเส้นใยที่เกาะกลุ่มกัน สามารถแยกเป็นเส้นใยกลุ่มเล็ก ๆ และเส้นใยเดี่ยวที่สามารถนำมาผลิตเป็นเส้นใยธรรมชาติได้ เปลือกข้าวโพดเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่มากมายในท้องถิ่น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ทำปุ๋ยหมัก เชื้อเพลิงอัดแท่ง กระดาษ ผลิตภัณฑ์สิ่งทอ และอาหารสัตว์ เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของเปลือกข้าวโพดประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเมื่อพิจารณาโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) จำนวนมากซึ่งสามารถสร้างพันธะกับโมเลกุลของสีย้อมได้ จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เปลือกข้าวโพดสามารถนำไปผลิตเป็นตัวดูดซับได้ (ภัทรานันท์ แวงวรรณ และคณะ, 2560; วัลภา แต้มทอง และคณะ, 2564) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาสร้างมูลค่าเพิ่ม โดยนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 อีกทั้งยังทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับและจลนศาสตร์ของการดูดซับอีกด้วย

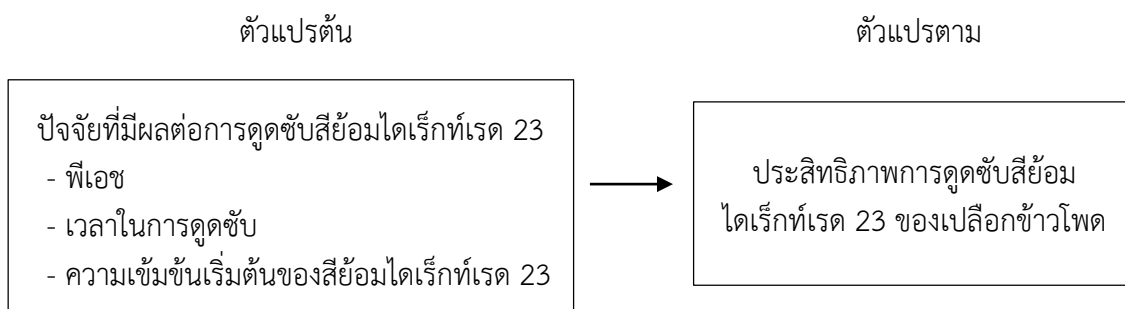
วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด ได้แก่ พีเอช เวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23

สมมติฐานในการวิจัย

1. เปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23
2. ปัจจัยที่เหมาะสมต่อความสามารถของเปลือกข้าวโพด ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ดีมากขึ้น

กรอบแนวคิดในการวิจัย



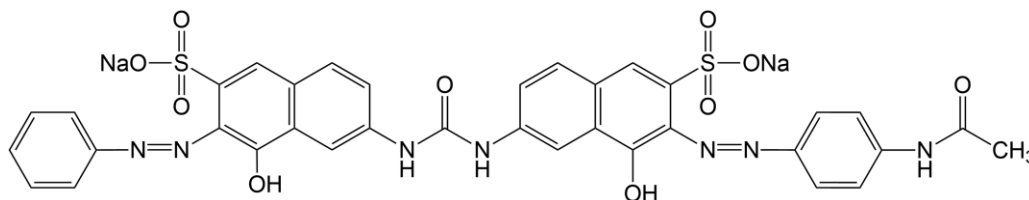
ระเบียบวิธีการวิจัย

1. การเตรียมตัวดูดซับ

นำเปลือกข้าวโพดมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกให้หมด แล้วนำไปตากแดดให้แห้งสนิท จากนั้นนำเปลือกข้าวโพดมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ปั่นให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่น คัดแยกขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 80 mesh หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บผงเปลือกข้าวโพดที่ได้ในภาชนะที่แห้งและปิดสนิท แล้วนำไปเก็บรักษาไว้ในโถดูดความชื้นที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการทดลองต่อไป นำตัวดูดซับที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM; บริษัท JEOL รุ่น JSM-IT300)

2. การเตรียมสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23

สีย้อมไดเร็กต์เรด 23 มีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{35}H_{25}N_7Na_2O_{10}S_2$ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 813.72 กรัมต่อโมล สูตรโครงสร้างทางเคมีแสดงดังรูปภาพที่ 1 เตรียมสารละลายมาตรฐานสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 จำนวน 1.000 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร จากนั้นทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่ต้องการในแต่ละการทดลอง



รูปภาพที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23

ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเพียบพร้อม, 2566

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23

การทดลองแบบแบตช์ (Batch experiments) ทำโดยชั่งเปลือกข้าวโพดปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร เติมสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสาร (Digital precise shaking water bath; บริษัท DAIHAN Scientific รุ่น Maxturdy-45) ตามเวลาที่กำหนด ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองเปลือกข้าวโพดออกจากสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer; บริษัท Metash รุ่น UV5100) ที่ความยาวคลื่น 505 นาโนเมตร นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณหาร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) และความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ตามสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

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

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (2)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 (มิลลิกรัมต่อลิตร) C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 (มิลลิกรัมต่อลิตร) q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม) W คือ ปริมาณของเปลือกข้าวโพด (กรัม) และ V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 (ลิตร)

3.1 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ

ทำการทดลองในสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ พีเอชของสารละลายให้เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 โดยปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปเขย่าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.2 การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ

ทำการทดลองในสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ พีเอชของสารละลายให้เป็น 2 นำไปเขย่าเป็นเวลา 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180 และ 240 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับ

ทำการทดลองในสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เป็น 2 นำไปเขย่าเป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับถูกนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ที่สภาวะสมดุลกับความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ของเปลือกข้าวโพด ณ อุณหภูมิคงที่ งานวิจัยนี้ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มีสมมติฐานว่า การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวของตัวดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) และไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับในตำแหน่งใกล้เคียงกัน (อุทัยวรรณ กันใจแก้ว, 2554; Vadivelan & Kumar, 2005) สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการที่ 3

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \quad (3)$$

เมื่อ q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเปลือกข้าวโพด (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ K_L คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า q_m หาได้จากความชัน และค่า K_L หาได้จากจุดตัดแกนในแนวดิ่ง

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชมีสมมติฐานว่า การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) พื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) และโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีแรงกระทำกับพื้นผิวของตัวดูดซับและโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ในชั้นถัดไป (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552; Dada et al., 2012) สมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชเขียนได้ดังสมการที่ 4

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ฟรอนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับ และ n คือ ค่าคงที่ฟรอนดลิชที่อธิบายถึงความเข้มข้นของการดูดซับ

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า n หาได้จากความชัน และค่า K_F หาได้จากจุดตัดแกนในแนวดิ่ง

5. การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

จลนศาสตร์ของการดูดซับถูกนำมาใช้อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาและกลไกของการดูดซับ งานวิจัยนี้ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first-order kinetic model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second-order kinetic model) โดยสมการเส้นตรงของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมแสดงดังสมการที่ 5

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (5)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 ที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม) t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาท) และ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (ต่อนาท)

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า k_1 และค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) หาได้จากความชันและจุดตัดแกนในแนวดิ่งตามลำดับ

สมการเส้นตรงของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงดังสมการที่ 6

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาทึ)

เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง โดยค่า k_2 และค่า $q_{e,cal}$ หาได้จากจุดตัดแกนในแนวตั้งและความชัน ตามลำดับ

อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (Initial adsorption rate) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7

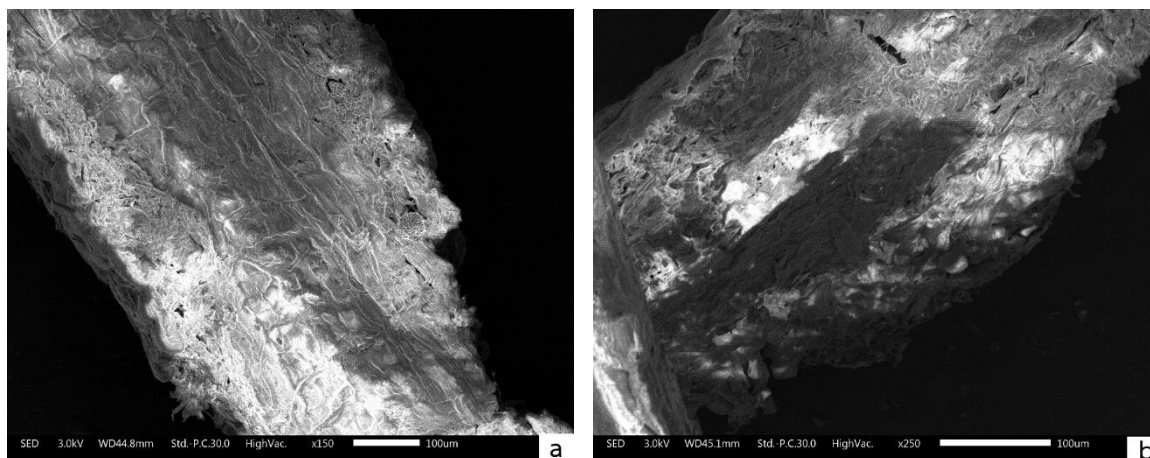
$$h = k_2 q_e^2 \quad (7)$$

เมื่อ h คือ อัตราเร็วในช่วงเริ่มต้นของการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาทึ) (Kowanga et al., 2016; Özacar & Şengil, 2004)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกข้าวโพดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 150 เท่า และ 250 เท่า พบว่า เปลือกข้าวโพดมีพื้นผิวขรุขระ มีลักษณะเป็นเส้นใยเรียงตัวยาว มีโพรงช่องว่าง และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่บนพื้นผิว แสดงดังรูปภาพที่ 2

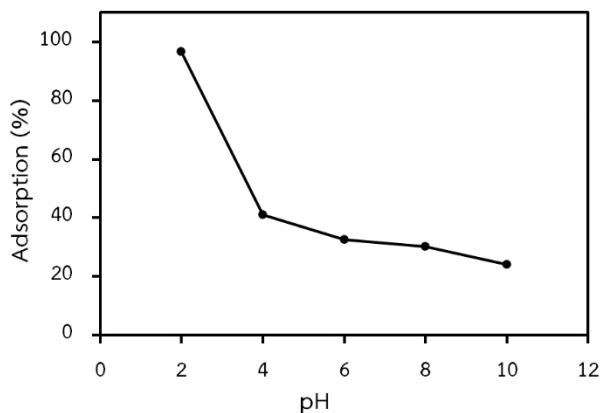


รูปภาพที่ 2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงลักษณะพื้นผิวของเปลือกข้าวโพด (a) ที่กำลังขยาย 150 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 250 เท่า

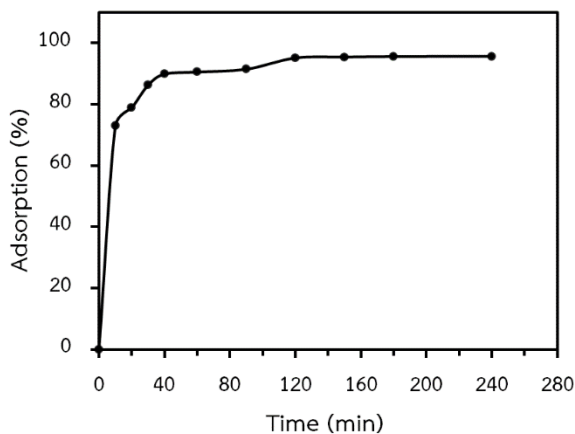
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเพียบพร้อม, 2566

2. ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 พบว่า เมื่อพีเอชของสารละลายสีย้อมเป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 ร้อยละการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 มีค่าเท่ากับ 96.74, 40.92, 32.47, 30.28 และ 23.98 ตามลำดับ จากรูปภาพที่ 3 จะสังเกตเห็นได้ว่า พีเอช 2 มีร้อยละการดูดซับสูงที่สุด ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 คือ พีเอช 2 สามารถนำไปใช้ศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ต่อไป



รูปภาพที่ 3 ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเปรียบพร้อม, 2566



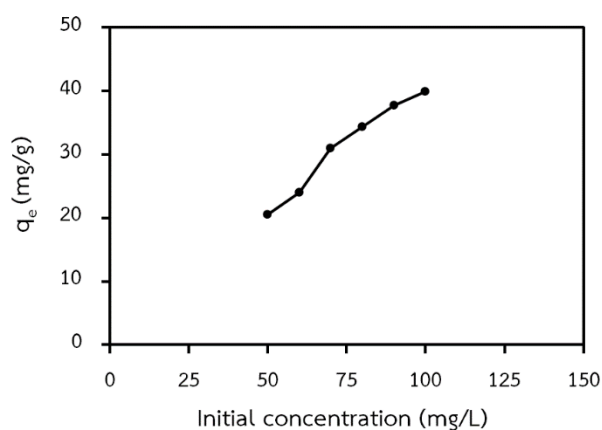
รูปภาพที่ 4 ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเปรียบพร้อม, 2566

3. ผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 พบว่า เมื่อเวลาในการดูดซับสีย้อมเป็น 10, 20, 30, 40, 60, 90, 120, 150, 180 และ 240 นาที ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 มีค่าเท่ากับ 72.96, 78.84, 86.27, 89.84, 90.55, 91.44, 95.13, 95.42, 95.58 และ 95.66 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในช่วง 10 นาทีแรกของการดูดซับ ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเริ่มคงที่จนเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที ดังแสดงในรูปภาพที่ 4 ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 คือ 120 นาที และสามารถนำไปใช้ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 ต่อไป

4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 เป็น 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสามารถในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 มีค่าเท่ากับ 20.50, 24.01, 30.95, 34.31, 37.67 และ 39.86 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปภาพที่ 5



รูปภาพที่ 5 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด

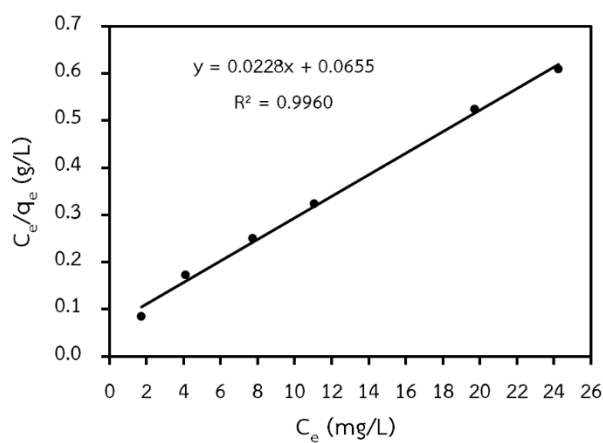
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเปรียบพร้อม, 2566

5. ไอโซเทอมของการดูดซับ

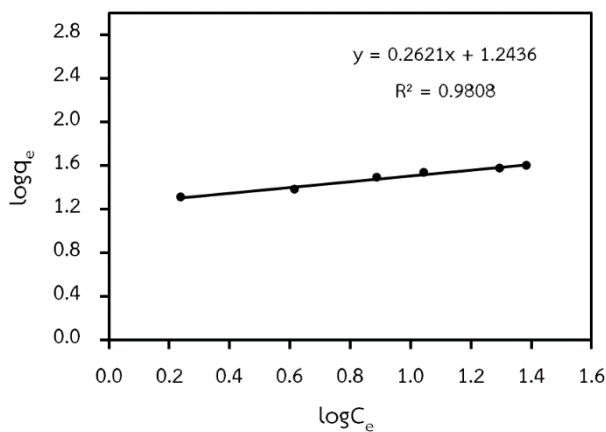
จากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด เมื่อใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชจะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปภาพที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ในขณะที่ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่า ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าเท่ากับ 0.9960 และ 0.9808 ตามลำดับ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเปลือกข้าวโพด (q_m) เท่ากับ 43.86 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าคงที่แลงเมียร์ (K_L) เท่ากับ 0.348 ลิตรต่อมิลลิกรัม

ตารางที่ 1 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์			ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช		
q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F	n	R^2
43.86	0.348	0.9960	17.52	3.82	0.9808



รูปภาพที่ 6 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 ของเปลือกข้าวโพดแบบแลงเมียร์
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเพียรพร้อม, 2566



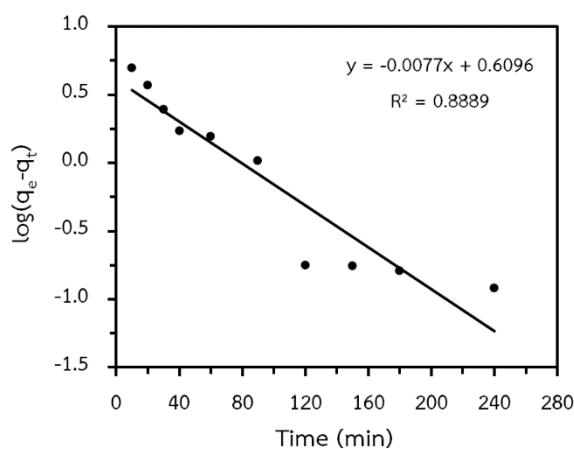
รูปภาพที่ 7 ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 ของเปลือกข้าวโพดแบบฟรุนดลิช
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเพียรพร้อม, 2566

6. จลนศาสตร์ของการดูดซับ

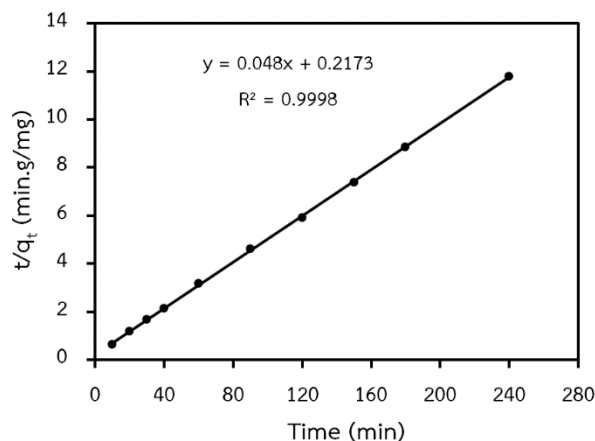
จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด เมื่อใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมจะได้กราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปภาพที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเท่ากับ 0.8889 และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเท่ากับ 0.9998 แสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมใกล้เคียง 1 มากที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e,cal}$) กับค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e,exp}$) พบว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการคำนวณใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่ได้จากการทดลอง มากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$q_{e,exp}$ (mg/g)	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม			
	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	$q_{e,cal}$ (mg/g)	k_2 (g/mg.min)	h (mg/g.min)	R^2
20.50	4.07	0.018	0.8889	20.83	0.011	4.77	0.9998



รูปภาพที่ 8 จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 เมื่อใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเพียบพร้อม, 2566



รูปภาพที่ 9 จลนศาสตร์การดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 เมื่อใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม
ที่มา : หทัยรัตน์ สุขเปรียบพร้อม, 2566

อภิปรายผล

จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของเปลือกข้าวโพดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เปลือกข้าวโพดมีโพรงช่องว่าง และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่บนพื้นผิว ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่า พื้นผิวและรูพรุนเป็นสมบัติที่มีผลต่อความสามารถของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับ เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนมากจะทำให้พื้นที่ผิวมากขึ้น และส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย (ไชยยันต์ ไชยยะ และคณะ, 2552) ดังนั้นเปลือกข้าวโพดซึ่งมีรูพรุนจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับได้

จากการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 พบว่า เมื่อสารละลายสีย้อมมีค่าพีเอชเป็น 2 ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 จะมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่พีเอชต่ำจะมีปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในสารละลายสีย้อมมากขึ้น และพื้นผิวของตัวดูดซับจะเต็มไปด้วยประจุบวก ทำให้เกิดการดึงดูดกันระหว่างประจุลบของสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 กับประจุบวกบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และเมื่อสารละลายสีย้อมมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4, 6, 8 และ 10 ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่พีเอชสูงจะมีปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในสารละลายสีย้อมมากขึ้น และพื้นผิวของตัวดูดซับจะเต็มไปด้วยประจุลบ ทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างไฮดรอกไซด์ไอออนกับประจุลบของสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 ในการเข้าจับกับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังเกิดการผลักกันระหว่างประจุลบของสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 กับประจุลบบนพื้นผิวของตัวดูดซับอีกด้วย ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพด คือ พีเอช 2 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัดสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 โดยใช้ลำต้นข้าวโพด (Fathi et al., 2015)

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 พบว่า การเพิ่มเวลาในการดูดซับมีผลทำให้ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 เพิ่มขึ้น โดยในช่วง 10 นาทีแรกจะเห็นได้ว่า ร้อยละการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 23 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากบนพื้นผิวของตัวดูดซับมีตำแหน่งของการดูดซับ (Adsorption site) ที่สามารถ

ดูดซับสีย้อมได้วางอยู่เป็นจำนวนมาก จึงสามารถดูดซับสีย้อมไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับได้ง่ายและรวดเร็วหลังจากนั้น ร้อยละการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 จะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งคงที่เมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุลของสีย้อม ทำให้ตำแหน่งของการดูดซับลดน้อยลง (Pormazar & Dalvand, 2020) ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 คือ 120 นาที

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 เพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม มีผลทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับความเข้มข้นของสีย้อมบนพื้นผิวของตัวดูดซับมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของการถ่ายเทมวลที่เพิ่มสูงขึ้น (รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา, 2554) ความสามารถในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 จึงมีค่าสูงขึ้น

ไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า การดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวบนพื้นผิวของเปลือกข้าวโพดที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Vadivelan & Kumar, 2005) โดยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของเปลือกข้าวโพดเท่ากับ 43.86 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่า เปลือกข้าวโพดมีประสิทธิภาพดีสามารถนำมาใช้ดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของตัวดูดซับชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 สูงสุด ของตัวดูดซับชนิดอื่น

ตัวดูดซับ	q_m (mg/g)	รายการอ้างอิง
เปลือกข้าวโพด	43.86	งานวิจัยนี้
แกลบ (Rice husk)	2.415	Abdelwahab et al., 2005
เปลือกส้ม (Orange peel)	10.718	Ardejani et al., 2007
เปลือกต้นโกงกางใบเล็ก (<i>Rhizophora apiculata</i> bark)	21.55	Tan et al., 2010
ลำต้นข้าวโพด (Corn stalk)	36.72	Fathi et al., 2015

กลไกการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมากกว่าแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า กลไกการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้เปลือกข้าวโพดเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสารละลายสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 กับเปลือกข้าวโพด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 โดยใช้ถ่านชีวภาพจากกากตะกอนน้ำเสีย (Jiang et al., 2021)

ข้อเสนอแนะ

1. ควรนำเปลือกข้าวโพดไปใช้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น ๆ เช่น สีย้อมดิสเพิร์ส สีย้อมรีแอ็กทีฟ และสีย้อมเบสิก เป็นต้น
2. ควรนำเปลือกข้าวโพดไปใช้ในการดูดซับสีย้อมที่ถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม และเป็นการนำของเหลือทิ้งมาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. ควรทำการปรับสภาพเปลือกข้าวโพดโดยการกระตุ้นทางเคมีหรือทางกายภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของเปลือกข้าวโพดให้ดียิ่งขึ้น
4. ควรทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ และศึกษาอุณหภูมิศาสตร์ของการดูดซับ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาคุณภาพของการดูดซับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- จิรกิตต์ ไพรัตน์. (2559). *การกำจัดสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอ็กทีฟด้วยแอคติเวเตดสลัดจ์* [วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ไม้ได้ตีพิมพ์]. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไชยยันต์ ไชยยะ, วราภรณ์ ธนะกุลรังสรรค์ และปทุมทิพย์ ตันทับทิมทอง. (2552). *อิทธิพลของสารกระตุ้นที่มีต่อหมู่
ทำหน้าที่และประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกเมล็ดยางพารา* (รายงานการวิจัย).
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. (2552). *กระบวนการดูดซับ*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และวีระวัฒน์ คลออุณนิมิตร์. (2553). การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ.
วิศวกรรมสาร, 27(4), 61-66.
- ภัทรานันท์ แวงวรรณ, วัลภา แต้มทอง และสุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ. (2560, มกราคม 31-กุมภาพันธ์ 3). *แผ่นเส้นใย
จากเปลือกข้าวโพด* [เอกสารนำเสนอ]. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55,
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมั่งคณา. (2554). จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เกล็ด
ดัดแปร. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 21(2), 337-348.
- รวินิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, 44(3), 419-434.
- วัลภา แต้มทอง, สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ และชัชจิรัส ภิรมย์ธรรมศิริ. (2564). ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด
และวิธีการแยกเส้นใยต่อสมบัติทางเคมีและสมบัติทางเชิงกลของเส้นใยเปลือกข้าวโพด. *วารสารมหาวิทยาลัยศรี
นครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี)*, 13(26), 91-105.
- อุทัยวรรณ กันใจแก้ว. (2554). *ผลของอุณหภูมิในการดูดซับกรดฮิวมิกในน้ำบนขี้เถ้า: เปรียบเทียบระหว่างขี้เถ้าจาก
เครื่องยนต์ดีเซลและขี้เถ้าจากชีวมวล* [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ไม้ได้ตีพิมพ์]. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Abdelwahab, O., Nemr, A. E., Sikaily, A. E., & Khaled, A. (2005). Use of rice husk for adsorption of
direct dyes from aqueous solution: A case study of direct F. Scarlet. *Egyptian Journal of
Aquatic Research*, 31(1), 1-11.

- Ardejani, F. D., Badii, Kh., Limaee, N. Y., Mahmoodi, N. M., Arami, M., Shafaei, S. Z., & Mirhabibi, A. R. (2007). Numerical modelling and laboratory studies on the removal of direct red 23 and direct red 80 dyes from textile effluents using orange peel, a low-cost adsorbent. *Dyes and Pigments*, 73(2), 178-185.
- Dada, A. O., Olalekan, A. P., Olatunya, A. M., & Dada, O. (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin-Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn^{2+} unto phosphoric acid modified rice husk. *Journal of Applied Chemistry*, 3(1), 38-45.
- Fathi, M. R., Asfaram, A., & Farhangi, A. (2015). Removal of direct red 23 from aqueous solution using corn stalks: Isotherms, kinetics and thermodynamic studies. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 135, 364-372.
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal - A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313-2342.
- Jiang, R., Yu, G., Ndagijimana, P., Wang, Y., You, F., Xing, Z. & Wang, Y. (2021). Effective adsorption of Direct Red 23 by sludge biochar-based adsorbent: adsorption kinetics, thermodynamics and mechanisms study. *Water Science & Technology*, 83(10), 2424-2436.
- Kowanga, K. D., Gatebe, E., Mauti, G. O., & Mauti, E. M. (2016). Kinetic, sorption isotherms, pseudo-first-order model and pseudo-second-order model studies of Cu(II) and Pb(II) using defatted Moringa oleifera seed powder. *The Journal of Phytopharmacology*, 5(2), 71-78.
- Kumar, A., Chaudhary, P., & Verma, P. (2013). Adsorption of reactive red 194 dye from textile effluent by using class F fly ash. *Scholars Journal of Applied Medical Sciences*, 1(2), 111-116.
- Liu, N., Wang, H., Weng, C. H., & Hwang, C. C. (2018). Adsorption characteristics of Direct Red 23 azo dye onto powdered tourmaline. *Arabian Journal of Chemistry*, 11(8), 1281-1291.
- Özacar, M., & Şengil, İ. A. (2004). Application of kinetic models to the sorption of disperse dyes onto alunite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 242(1-3), 105-113.
- Pormazar, S. M., & Dalvand, A. (2020). Adsorption of direct red 23 dye from aqueous solution by means of modified montmorillonite nanoclay as a superadsorbent: Mechanism, kinetic and isotherm studies. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37(12), 2192-2201.
- Seow, T. W., & Lim, C. K. (2016). Removal of dye by adsorption: A review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(4), 2675-2679.
- Tan, L. S., Jain, K. & Rozaini, C. A. (2010). Adsorption of textile dye from aqueous solution on pretreated mangrove bark, an agricultural waste: equilibrium and kinetic studies. *Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation*, 5(3), 283-294.
- Vadivelan, V., & Kumar, K. V. (2005). Equilibrium, kinetics, mechanism, and process design for the sorption of methylene blue onto rice husk. *Journal of Colloid and Interface Science*, 286(1), 90-100.