



การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพจากของเหลือทิ้งทางการเกษตร
เพื่อการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตในน้ำ

อรอนงค์ เอกพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพจากของเหลือทิ้งทางการเกษตร
เพื่อการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตในน้ำ



อรอนงค์ เอกพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Preparation of Biosorbent from Agricultural Waste
for Crystal Violet dye Adsorption in Aqueous Solution



ORNANONG AEKKAPHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE
IN CHEMICAL EDUCATION
FACULTY OF SCIENCE
BURAPHA UNIVERSITY
2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา
วิทยานิพนธ์ของ อรอนงค์ เอกพงษ์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนวัช พินิจศักดิ์กุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.การะเกด เทศศรี)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ต้นติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62920414: สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: เปลือกข้าวโพด; ตัวดูดซับชีวภาพ; การดูดซับ; คริสตัลไวโอเล็ต

อรอนงค์ เอกพงษ์ : การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพจากของเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตในน้ำ . (Preparation of Biosorbent from Agricultural Wastefor Crystal Violet dye Adsorption in Aqueous Solution) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา ปี พ.ศ. 2567.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพและประสิทธิภาพของการใช้เปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร นำมาเป็นตัวดูดซับชีวภาพ สำหรับการกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต (CV) ซึ่งเป็นสีย้อมประจวบที่ใช้ในการย้อมผ้าฝ้าย และเนื้อไม้ ออกจากสารละลายน้ำ เปลือกข้าวโพดผ่านการเตรียมโดยการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกัน 3 ความเข้มข้น (98%, 75% และ 50% โดยน้ำหนัก) และเปรียบเทียบกับเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพที่เป็นตัวมาตรฐานในงานนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวตัวดูดซับชีวภาพโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (FT-IR) นอกจากนี้ ศึกษาผลของเวลาในการสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร) และปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ (0-10 กรัมต่อลิตร) ต่อการดูดซับสีย้อมเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ผลการวิจัยพบว่ากระบวนการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับสองเสมือน (Pseudo second-order kinetic model) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.999 การดูดซับเข้าสู่สมดุลในเวลา 120 นาที และพลังงานก่อกัมมันต์ที่คำนวณได้คือ 46.45 กิโลจูลต่อโมล นอกจากนี้แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์อธิบายข้อมูลสมดุลการดูดซับได้ดีที่สุด พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG°) มีค่าอยู่ในช่วง -8.45 ถึง -9.24 kJ mol^{-1} และ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีที่สภาวะมาตรฐาน (ΔH°) มีค่าเท่ากับ 11.14 kJ mol^{-1} แสดงถึงกระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพที่คายความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเองได้ แรงกระทำทางกายภาพระหว่างหมู่ฟังก์ชันในเปลือกข้าวโพดกับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเป็นบทบาทที่สำคัญต่อกระบวนการดูดซับ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเปลือกข้าวโพดซึ่งเป็นของเสียจากการเกษตรสามารถใช้เป็นตัวดูดซับชีวภาพที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นทางเลือกใหม่ที่ยั่งยืนในการกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่อไป

62920414: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORDS: corn husk; bio-sorbent; adsorption; crystal violet

ORNANONG AEKKAPHONG : PREPARATION OF BIOSORBENT FROM AGRICULTURAL WASTE FOR CRYSTAL VIOLET DYE ADSORPTION IN AQUEOUS SOLUTION. ADVISORY COMMITTEE: EKAPONG SUWATTANAMALA, 2024.

In this work, the potential and efficiency of usage corn husks, obtained as an agricultural waste by-product from harvesting, as an affordable biosorbent for the removal of crystal violet (CV) dye, a cationic dye used in dyeing of cotton and wood, from aqueous solution has been studied. Corn husks were prepared under three different concentrations of sulfuric acid treatment (98%, 75%, and 50% by weight) and compared with untreated corn husks as a reference. The surface characteristics of the bio-sorbents were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), while their functional groups were investigated through Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR). The study also explored the effects of key parameters, including contact time, initial dye concentration (10–50 mg L⁻¹), and bio-sorbent dosage (0–11.6 g/L), to determine optimal adsorption conditions. The results showed that the adsorption process followed a pseudo-second-order kinetic model with an R² value of 0.999, reaching equilibrium within 120 minutes and the calculated activation energy was 46.45 kJ mol⁻¹. The Langmuir isotherm model best described the adsorption equilibrium data. Thermodynamic analysis revealed that the Gibbs free energy change (ΔG°) ranged from -8.45 to -9.24 kJ mol⁻¹, indicating a spontaneous process. The enthalpy change (ΔH°) of 11.14 kJ mol⁻¹ suggested that the adsorption process was exothermic and driven by physical interactions. The functional groups on the corn husks played an important role in binding the crystal violet dye via physical interaction. This research demonstrates that corn husk waste is an effective, low-cost, eco-friendly biological adsorbent, presenting a new sustainable alternative for crystal violet removal in industrial wastewater treatment.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยการแนะนำ ช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดียิ่ง จาก ผศ.ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.อนวัช พิณจศักดิ์กุล ประธานสอบ วิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.การะเกด เทศศรี กรรมการสอบ ที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางที่ถูกที่ควร ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ได้อย่างสมบูรณ์ และทรงคุณค่า ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจให้เกิดการเรียนรู้อย่างไม่รู้จบสิ้น เป็นความ เมตตากรุณาที่ยิ่งใหญ่จากอาจารย์ที่มีต่อลูกศิษย์ เหนือสิ่งอื่นใดขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อนๆ เคมี ศึกษาที่ให้ทั้งกำลังใจและตลอดจนการสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่า และ คุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบ และอุทิศแด่พระคุณของบุพการีบิดา มารดาบูรพาจารย์และผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน

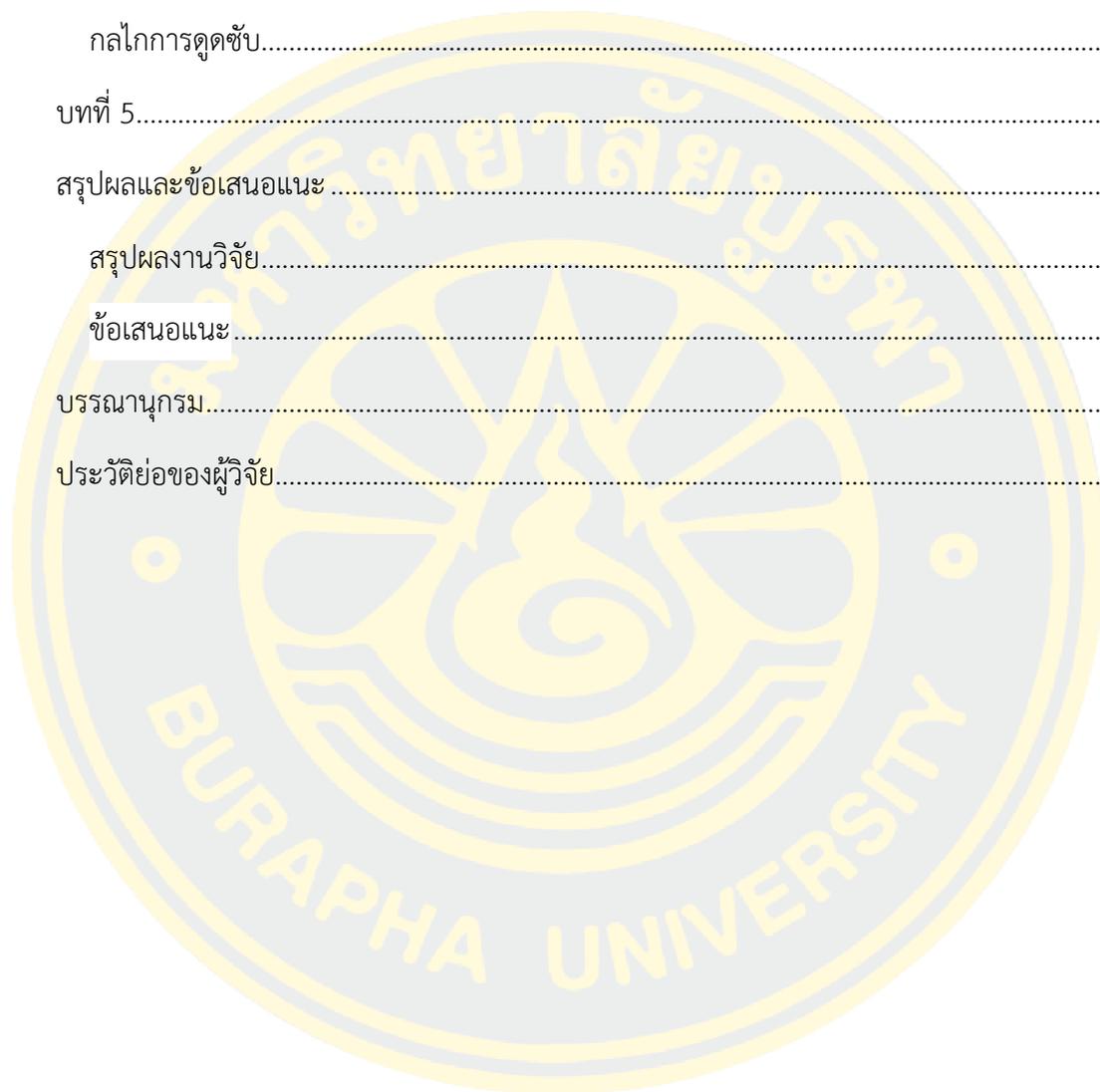
อรอนงค์ เอกพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2.....	6
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
สี่ล้อเบสิก.....	6
ลิทโนเซลล์โลส.....	7
การดูดซับ.....	9
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	10
ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	12
อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	15
หลักการทำงานของเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ.....	17

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3.....	20
วิธีการทดลอง	20
สารเคมี.....	20
เครื่องมือและอุปกรณ์	20
วิธีการทดลอง	21
ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก.....	21
ตอนที่ 2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีย้อมคริสตัลไวโอเลต.....	22
ตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4	22
ตอนที่ 4 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก.....	22
ตอนที่ 5 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม.....	25
ตอนที่ 6 การศึกษาสมดุลการดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด	27
ตอนที่ 7 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตกับ ตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด	27
บทที่ 4.....	28
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	28
การดูตกเส้นแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต.....	28
การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต.....	29
ผลการศึกษาสมบัติของตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4	30
ผลการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก	33

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ TCH-50	39
การศึกษาสมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ TCH-50	46
การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับ TCH-50	50
กลไกการดูดซับ.....	52
บทที่ 5.....	53
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	53
สรุปผลงานวิจัย.....	53
ข้อเสนอแนะ.....	54
บรรณานุกรม.....	55
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	61



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)	40
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์การศึกษาอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัว	43
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)	50

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของ Crystal violet	6
ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	7
ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส	8
ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	8
ภาพที่ 5 หลักการทำงานของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	17
ภาพที่ 6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต.....	28
ภาพที่ 7 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต	29
ภาพที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของเปลือกข้าวโพดที่ก่อน-หลังปรับสภาพด้วยกรด H ₂ SO ₄	31
ภาพที่ 9 สเปกตรัม FTIR ของ CH และ TCHs	32
ภาพที่ 10 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ	33
ภาพที่ 11 ผลของปริมาณของตัวดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ.....	35
ภาพที่ 12 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ	36
ภาพที่ 13 การวิเคราะห์ค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด	37
ภาพที่ 14 ผลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ CH, TCH-50,TCH-75, TCH-98....	38
ภาพที่ 15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลต	39
ภาพที่ 16 ผลของความเข้มข้นต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50	41
ภาพที่ 17 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพ	42
ภาพที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50	44
ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$	45
ภาพที่ 20 สมดุลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ (TCH-50).....	46

ภาพที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับ 48

ภาพที่ 22 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับ (TCH-50).. 50

ภาพที่ 23 กลไกการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด 52



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

มลพิษทางน้ำ นับเป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอัตราการเจริญเติบโตและขยายตัวทางอุตสาหกรรมขนาดใหญ่อย่างต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีประเภทสีย้อมที่ต้องผ่านกระบวนการฟอกย้อม จึงจำเป็นต้องใช้น้ำและสีย้อมในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก สีย้อมเป็นสารที่สามารถละลายน้ำได้ดี แต่สลายตัวได้ยาก เนื่องจากทนทานต่อแสง และความเป็นกรดด่าง จึงยากต่อการบำบัด และยังปิดกั้นแสงไม่ให้ส่องผ่านลงไปใต้น้ำ ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง (รวินิภา ศรีมูล, 2559) โดยเฉพาะสีย้อมประจวบกร เช่น สีย้อมคริสตัลไวโอเลต (Crystal violet, CV) หรือที่รู้จักกันทั่วไปว่า เจนเชียล ไวโอเลต (Gentian Violet) เป็นต้น ซึ่งสีย้อมนี้จัดอยู่ในประเภทสีย้อมเบสิก (Basic dye) กลุ่มไตรฟีนิลมีเทน ลักษณะเป็นผลึกสีเขียวย้ำ เมื่อละลายน้ำแล้วจะให้สีม่วงน้ำเงิน ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ หมึกพิมพ์ และใช้ย้อมสีเนื้อเยื่อ แบคทีเรีย รวมถึงการใช้เป็นยารักษาโรค (อดิศักดิ์ ศิริรักษ์, 2551) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับสีย้อมประจวบและประจวบกรแล้ว สีย้อมประจวบกรมีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมากกว่าสีย้อมประจวบ เนื่องจากมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับพื้นผิวเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีประจวบจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปในเซลล์ได้ (Gemici et al., 2023) หากได้รับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตเข้าสู่ร่างกายทางการสัมผัส สูดดมหรือกลืนกิน อาจส่งผลให้ระคายเคืองผิวหนังอย่างรุนแรง คลื่นไส้ อาเจียน (Georgin et al., 2020) หากได้รับในปริมาณมาก อาจทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อนในระบบทางเดินหายใจ เกิดภาวะไตวาย และตาบอดถาวรได้ (Pires et al., 2020)

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำจัด หรือลดปริมาณสีย้อมในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอมีหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological process) การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การกรองด้วยเยื่อเมมเบรน (Membrane filtration) การทำให้ตะกอนลอย (Flotation) การบำบัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical treatment) ซึ่งวิธีต่างๆ อาจยังคงมีข้อจำกัด และยังคงมีปัญหาในเรื่องของค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น รวมถึงอาจไม่เหมาะสมกับโรงงานขนาดเล็ก เพราะมีการลงทุนที่ค่อนข้างสูง และต้องใช้ผู้ที่มีความรู้และความชำนาญเป็นพิเศษ ดังนั้น วิธีการดูดซับ (Adsorption)

จึงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากทำได้ง่าย กระบวนการดำเนินการไม่ซับซ้อน ใช้เวลาน้อย ราคาถูก และมีประสิทธิภาพ (ชาญชัย คหาปนะ & ณภัทร โพธิ์วัน, 2563)

ในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาวิจัย และการพัฒนาตัวดูดซับชีวภาพ (Bio-sorbent) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติ หรือวัสดุดัดแปลงจากแหล่งกำเนิดทางชีวภาพ ที่มีความสามารถในการจับและกำจัดสารปนเปื้อนออกจากตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า การดูดซับ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนจะถูกดูดซับลงบนพื้นผิว หรือภายในโครงสร้างของตัวดูดซับชีวภาพ โดยประสิทธิภาพของตัวดูดซับชีวภาพในการดูดซับสารปนเปื้อนขึ้นอยู่กับสมบัติของพื้นผิว เช่น ความเป็นรูพรุน พื้นที่ผิว และหมู่ฟังก์ชัน สมบัติเหล่านี้ช่วยให้ตัวดูดซับชีวภาพสามารถดึงดูด และจับสารปนเปื้อนผ่านกลไกต่าง ๆ เช่น การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี ตัวดูดซับชีวภาพได้รับความสนใจอย่างมากเพราะสามารถย่อยสลายได้ ลดขั้นตอนและเวลาในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับที่ต้องใช้พลังงานสูง มาเป็นการปรับสภาพพื้นผิวด้วยวิธีการง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน ทำให้ราคาต้นทุน การผลิต ตัวดูดซับชีวภาพจึงถูก และได้ตัวดูดซับชีวภาพที่มีความสามารถในการดูดซับสารปนเปื้อน เช่น ไอออนของโลหะ สีย้อม ตัวทำละลายอินทรีย์ออกจากสารละลาย ซึ่งวัสดุชีวภาพที่จะนำไปเตรียมเป็นตัวดูดซับชีวภาพส่วนใหญ่จะได้มาจากของเสียหรือของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว เปลือกถั่ว ข้าวโพด ผักตบชวา กะลามะพร้าว กากชา เป็นต้น (Bozbeyoglu et al., 2020)

นอกจากปัญหามลพิษทางน้ำแล้ว ปัญหาที่โลกกำลังเผชิญอยู่ คือ ปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดจากการเผา การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล การตัดไม้ทำลายป่า ซึ่งคว้นจากการเผาปล่อยสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหลายชนิด สารที่พบมาก ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน รวมถึงสารก่อมะเร็ง เป็นต้น นอกจากนี้การเผายังส่งผลต่อการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ ออกสู่ชั้นบรรยากาศโลก และก๊าซเรือนกระจกดูดซับและกักเก็บความร้อนที่แผ่ออกจากโลกก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และเมื่ออุณหภูมิโลกสูงขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือที่เรียกว่าวิกฤตสภาพภูมิอากาศเกิดขึ้น และสิ่งที่ตามมา คือ เหตุการณ์สภาพอากาศสุดขั้ว เช่น คลื่นความร้อนที่ทำให้อากาศร้อนจัด ระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นเพิ่มความเสี่ยงน้ำท่วมในประเทศที่มีชายฝั่งทะเล พายุไต้ฝุ่นและฝนตกหนักเฉียบพลัน เป็นต้น (Thailand, 2022) องค์การอนามัยโลก (2016) ได้รายงานว่าในแต่ละปี คว้นจากการเผาส่งผลให้มนุษย์เสียชีวิตไปประมาณ 4.3 ล้านคนทั่วโลกจากโรคร้ายแรงหลายชนิด ได้แก่ โรคปอดอักเสบ โรคปอดอุดกั้นเรื้อรัง หรือโรคซีไอพีดี (COPD) โรคมะเร็งปอด โรคหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง (ชัชวาลย์ จันทรวิจิตร, 2565) สำหรับในประเทศไทยนั้น ปัญหาฝุ่นคว้นจากการเผาของเหลือทิ้งทางการเกษตรยังคงเป็นปัญหาที่มีมาอย่างยาวนาน ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงมากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมระบบ MODIS ของกรีนพีซระหว่างปี 2558 - 2563 ประเทศไทยร่วมกับศูนย์ภูมิภาคเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (ภาคเหนือ)

คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่าส่วนต่าง ๆ ของข้าวโพดที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร เป็นหนึ่งในต้นเหตุสำคัญของมลพิษทางอากาศจากการเผา โดยพบว่า คือ พื้นที่เผาไหม้และจุดความร้อน เกิดขึ้นในพื้นที่ปลูกข้าวโพดมีมากถึง 1 ใน 3 ตลอดช่วงระยะเวลากว่า 15 ปีที่ผ่านมา และภายในช่วงเวลา เพียง 5 ปี พื้นที่ป่าจำนวน 10.6 ล้านไร่ในพื้นที่ลุ่มน้ำโขงได้กลายเป็นพื้นที่ปลูกข้าวโพด ส่งผลให้ 20 ปี ที่ผ่านมา ภาคเหนือมีพื้นที่ปลูกข้าวโพดเพิ่มขึ้นกว่า 4 เท่า ขณะเดียวกันพื้นที่ปลูกเป็นที่ลาดชันเนินเขา ทำให้การนำรถไถเข้าไปไถกลบของเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก จึงเลือกกำจัด โดยการจุดไฟเผา เพราะใช้ต้นทุนต่ำ รวดเร็ว แต่สร้างปัญหาฝุ่นควัน PM 2.5 อย่างมหาศาล (Thailand, 2023)

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ของเหลือทิ้งทางการเกษตรจากข้าวโพดจึงเป็นอีกตัวเลือกหนึ่ง ที่สนใจนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับชีวภาพ โดยจากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้า แสดงให้เห็นถึงส่วน ต่าง ๆ ของข้าวโพดที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับกำจัดไอออนของโลหะหนัก และสีย้อมในน้ำได้ เช่น ชังข้าวโพด (Corn cob) มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล ฟลูออไรด์ และเหล็ก น้ำมัน สีย้อมสีเขียวมาลาไคต์จากน้ำ ช่อดอกตัวผู้ของข้าวโพด (Corn tassel) มีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม ตะกั่ว และสารประกอบฟีนอลิก ใบข้าวโพด (Corn leaf) มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบตะกั่ว โครเมียม และ เมทิลออเรนจ์ ก้านข้าวโพด (Corn stalk) มีความสามารถในการดูดซับทองแดง น้ำมันก๊าซ โครเมียม แคดเมียม สีย้อมคริสตัลไวโอเลต และไนเตรตไอออน ไหมข้าวโพด (Corn silk) มีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง โคบอลต์ นิกเกิล และสังกะสี สีย้อมครามอินดิโกและเมทิลีนบลู และเปลือกข้าวโพด (Corn husk) มีความสามารถ ในการดูดซับฟลูออไรด์ไอออน สีย้อมเมทิลีนบลู ปรอท ฟีนอล และพาราไนโตรฟีนอล (Anjali Sharma, 2019) ซึ่งจะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของข้าวโพดที่เป็นของเหลือทิ้งหลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิต สามารถ นำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับชีวภาพได้อีกทางเลือกหนึ่ง จากการลงพื้นที่จริง เพื่อสำรวจของเหลือทิ้งทาง การเกษตรในไร่ข้าวโพด พบของเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากที่รอการกำจัด หนึ่งในนั้น คือ ส่วน เปลือกข้าวโพดที่รอการกำจัดโดยการเผา ในงานวิจัยนี้จึงเลือกเปลือกข้าวโพด (Corn husk) มาพัฒนา เป็นตัวดูดซับชีวภาพเพื่อดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต โดยทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับ ชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด โดยปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และนำไปอบ ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่าการผลิตไบโอชาร์ที่ใช้อุณหภูมิสูง ถึง 350 – 450 องศาเซลเซียส (Rajput et al., 2024) ในขั้นตอนนี้จะทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวสัมผัส มากขึ้น ทำให้มีสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี และเลือกเฉพาะตัวดูดซับที่มีการปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้ความ เข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริก ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีย้อม ได้แก่ เวลาสัมผัส อุณหภูมิ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ เป็นต้น และศึกษาแบบจำลอง

ทางจลนพลศาสตร์ ไอโซเทอมของการดูดซับคริสตัลไวโอเล็ตที่เป็นสีย้อมประจุบวก (Cationic dye) บนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก

ดังนั้น การเตรียมตัวดูดซับชีวภาพในงานวิจัยนี้ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับของเหลือทิ้งทางการเกษตรและเป็นกระบวนการที่พยายามทำให้ของเหลือทิ้งกลายเป็นปริมาณที่ต่ำหรือศูนย์ (Zero waste) ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular economy) ที่เป็นรากฐานของแบบจำลอง BCG (Bio Circular Green Economy Model) ที่ใช้ในการขับเคลื่อนประเทศไทย 4.0 ซึ่งนำไปสู่เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goal, SDG) ต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่เป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยปรับสภาพพื้นผิวด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดซัลฟิวริก
2. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมส่งผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด และปริมาณการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต โดยใช้ตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด
3. ศึกษาจลนพลศาสตร์ และไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่เป็นของเหลือใช้จากการเกษตร โดยผ่านการปรับสภาพพื้นผิวด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ ของกรดซัลฟิวริก เพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. วิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) โดยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และพิสูจน์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy ของตัวดูดซับชีวภาพที่เตรียมขึ้น เป็นต้น
3. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมส่งผลต่อการดูดซับคริสตัลไวโอเล็ต ได้แก่ เวลาสัมผัส ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เป็นต้น โดยใช้ตัวดูดซับชีวภาพที่เหมาะสมซึ่งเตรียมได้จากข้อ 1 โดยใช้วิธีการทดลองแบบแบทช์ (Batch experiment)
4. ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ โดยเปรียบเทียบแบบจำลองอันดับหนึ่งและอันดับสองเสมือน เป็นต้น และศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
5. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยเปรียบเทียบแบบจำลองฟรุนดริช แลงเมียร์ และเทมคิน และศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบสถานะต่าง ๆ ที่เหมาะสม พารามิเตอร์ และข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ รวมถึงไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก
2. สามารถนำของเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเตรียมตัวดูดซับชีวภาพที่ต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพเพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดสีย้อม
3. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้งทางการเกษตรโดยพยายามทำให้ของเหลือทิ้งกลายเป็นปริมาณที่ต่ำหรือศูนย์ ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียนที่เป็นรากฐานของแบบจำลอง BCG

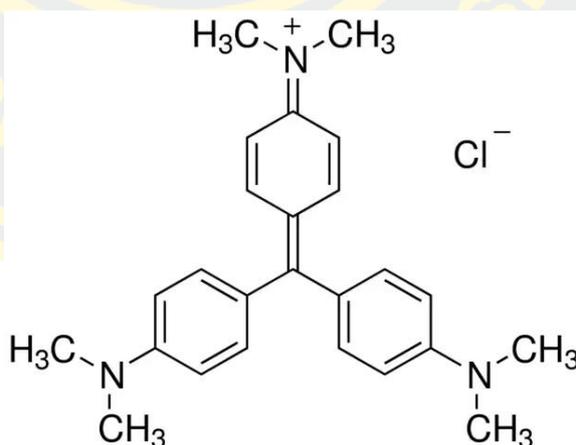
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สีย้อมเบสิก

สีย้อมเบสิก (Dyes) เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ สามารถละลายน้ำได้ มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) บางครั้งเรียก สีย้อมแคทไอออนิก (Cationic Dye) การเกาะติดของสีย้อมประเภทนี้ในเส้นใย อาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของสีย้อมกับประจุลบบน เส้นใย โดยมักใช้ย้อมเส้นใยอะคริลิก โพรตีน และไนลอน

คริสตัลไวโอเลต (Crystal violet, CV) เป็นสีย้อมเบสิกชนิดหนึ่ง ที่อยู่ในกลุ่มไตรฟีนิลมีเทน (Triphenylmethane) มีชื่อทางเคมี คือ 4-[(4-dimethylaminophenyl)-phenyl-methyl]-N,N-dimethyl-aniline มีองค์ประกอบเป็นวงแหวนอะโรมาติก (Aromatic ring) สามวงเชื่อมต่อกัน โดยแต่ละวงจะมีหมู่มีเทน (Methane group) ที่ต่ออยู่กับไนโตรเจนของวงแหวนดังกล่าว ดังภาพที่ 1 คริสตัลไวโอเลต มีลักษณะเป็นผลึกสีเขียวย้ำเข้ม เมื่อละลายน้ำให้สีม่วงน้ำเงิน มีสูตรโมเลกุล คือ $C_{25}H_{30}ClN_3$ มวลโมเลกุล $407.99 \text{ g mol}^{-1}$ และจุดหลอมเหลวเท่ากับ 215 องศาเซลเซียส มักนิยมใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เครื่องสำอาง การผลิตยา หมึกพิมพ์ อุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร สีย้อมแกรมในการศึกษาด้านแบคทีเรียวิทยา รวมถึงใช้ฆ่าเชื้อที่ผิวหนัง เช่น เจนเซียนไวโอเลต (Gentian violet) ใช้ในการทำลายหนองพยาธิทั้งในมนุษย์และสัตว์และยังมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา (อดิศักดิ์ ศิริรักษ์, 2551)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของ Crystal violet

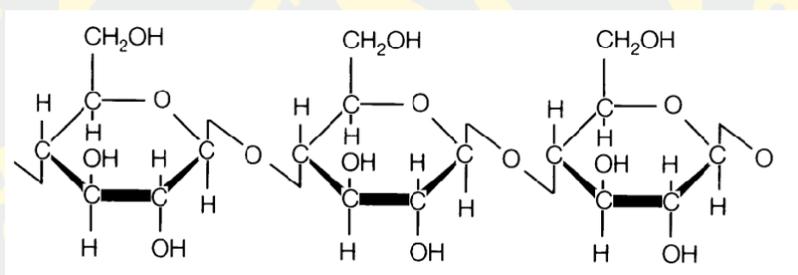
(SEN & MANIK, 2020)

ลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พืช ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้พืชมีความแข็งแรงและทนทาน โดยมักพบในพืชไม้ และเป็นแหล่งพลังงานชีวภาพที่สำคัญ ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดังนี้

เซลลูโลส

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพจากธรรมชาติที่ประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างพื้นฐานคือ กลูโคส (Glucose) ที่เรียงตัวเป็นโซ่ยาวเชิงเส้น หน่วยกลูโคสเหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา-1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-glycosidic bond) ดังภาพที่ 2 ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงและแข็งแรง โครงสร้างนี้มีพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ระหว่างสายโซ่โมเลกุลระหว่างกลุ่มไฮดรอกซิล (-OH) บนตำแหน่งคาร์บอนที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคสที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งทำให้เกิดเสถียรภาพและเพิ่มความแข็งแรงในเชิงกลไกแก่โครงสร้างเส้นใยของเซลลูโลส เซลลูโลสจึงมีความแข็งแรงและความคงทนสูงเหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ (Klemm et al., 2005)

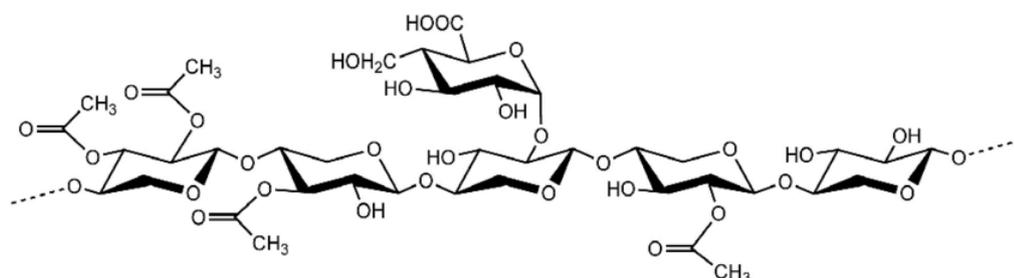


ภาพที่ 2 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

(Klemm et al., 2005)

เฮมิเซลลูโลส

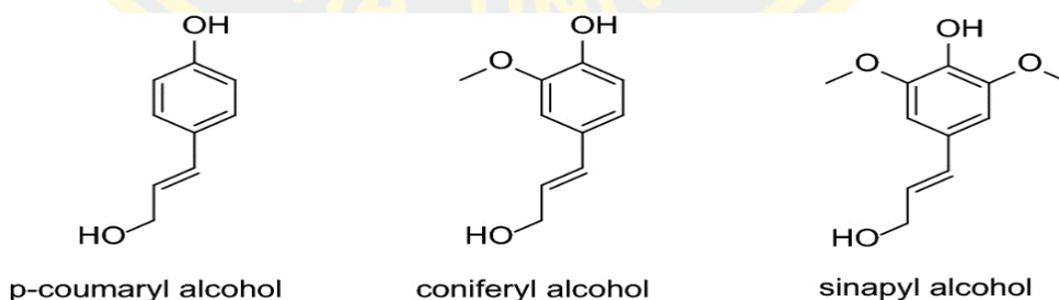
ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบโครงสร้างที่สำคัญรองจากเซลลูโลสในผนังเซลล์พืช มีโครงสร้าง แบบสุ่ม และไม่เป็นระเบียบ สามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายกว่าเซลลูโลส โพลีแซ็กคาไรด์ที่อยู่เฮมิเซลลูโลสมีความหลากหลายทางโครงสร้าง ประกอบด้วยน้ำตาลที่มีทั้ง 5 และ 6 คาร์บอน เช่น อะราบินอส (Arabinose), ไซโลส (Xylose), และแมนโนส (Mannose) ในไม้ ใยเซลลูโลสจะเชื่อมโยงกับเฮมิเซลลูโลสผ่านพันธะไฮโดรเจน ซึ่งช่วยเพิ่มความคงทนของโครงสร้างผนังเซลล์ของพืช และยังทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ที่ล้อมรอบโครงสร้างเซลลูโลสและช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับผนังเซลล์พืช (Armah et al., 2020)



ภาพที่ 3 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส
(Hu et al., 2020)

ลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างแบบอะโรมาติก (Aromatic structure) ที่ซับซ้อน ประกอบด้วยหน่วยโมเลกุลหลัก 3 ชนิด ได้แก่ P-coumaryl alcohol, Coniferyl alcohol และ Sinapyl alcohol ดังภาพที่ 4 ซึ่งทำหน้าที่เสริมความแข็งแรงและความทนทานให้กับผนังเซลล์พืช โดยช่วยป้องกันการสลายตัวของชีวภาพ โครงสร้างของลิกนินมีลักษณะโมเลกุลที่ไม่เป็นผลึก และสามารถทนต่อการย่อยสลายได้ดี เนื่องจากพันธะระหว่างหน่วยโมเลกุลของลิกนิน ได้แก่ พันธะอีเธอร์ (β -O-4), คาร์บอน-คาร์บอน, β -5, β - β และพันธะ 5-5 (Yao et al., 2022) ซึ่งมีความซับซ้อนสูง โครงสร้างที่ซับซ้อนและทนทานของลิกนินจึงมีบทบาทสำคัญในการปกป้องและเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับพืช (Armah et al., 2020)



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน
(Jazi et al., 2019)

การดูดซับ

การดูดซับ เป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุล (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ สามารถเกิดขึ้นได้จากแรงทางกายภาพหรือจากพันธะเคมี ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ การดูดซับมีบทบาทพื้นฐานในระบบนิเวศ ควบคุมการแลกเปลี่ยนระหว่างธรณีภาคกับไฮโดรสเฟียร์และบรรยากาศ อธิบายถึงการขนส่งสารในระบบนิเวศ และกระตุ้นกระบวนการสำคัญอื่นๆ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออนิก และกระบวนการของเอนไซม์ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือของเหลวกับของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ประเภทของการดูดซับ มีดังนี้

การดูดซับแบบกายภาพ

การดูดซับแบบกายภาพ เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้ มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย (Gupta & Bhattacharya, 2011; Thommes & Cychosz, 2014)

การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้ เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม หรือกลุ่มอะตอมเดิม มีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 100-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยากคือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

1. แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order model)

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (1)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (min^{-1})
 q_e คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับที่เข้าสู่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})
 q_t คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อตัวดูดซับที่เข้าสู่ ณ เวลา t ใด ๆ (mg g^{-1})

เมื่อจัดสมการนี้อยู่ในรูปอินทิเกรทจะแสดงได้เป็น

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ค่า q_e จากจุดตัดแกน y และค่า k_1 ได้จากความชัน ซึ่งเป็นค่าคงที่อัตราของการดูดซับ

2. แบบจำลองอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order model)

สมการแบบจำลองอันดับสองเสมือน แสดงได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (3)$$

เมื่อจัดสมการนี้อยู่ในรูปอินทิเกรทจะแสดงได้เป็น

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับของแบบจำลองอันดับสองเสมือน ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง t/qt กับ t จะได้ค่า q_e จากความชัน และค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y ซึ่งเป็น
ค่าคงที่อัตราของการดูดซับ (Patil et al., 2022)

3. สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) กับพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ

สมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ถูกนำมาใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ
ค่าคงที่อัตราการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งช่วยให้สามารถหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับ
โดยสมการอาร์เรเนียสในรูปแบบทั่วไปคือ

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (5)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ

A คือ ค่าคงที่ของอาร์เรเนียส

E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับ (kJ mol^{-1})

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)

การนำสมการอาร์เรเนียสมาประยุกต์ใช้กับการดูดซับนั้นสามารถทำได้โดยการวัดค่าคงที่อัตรา
การดูดซับที่อุณหภูมิแตกต่างกัน จากนั้นทำการเขียนกราฟระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ โดยความชันของ
กราฟที่ได้จะเท่ากับ $-\frac{E_a}{R}$ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับ
ได้ (Gemici et al., 2023)

ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับ คือ สมการแสดงความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุลระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิคงที่ เมื่อนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนเป็นกราฟจะได้เส้นแนวโน้มที่ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายการดูดซับกันอย่างแพร่หลาย คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) สมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของเทมคิน (Temkin's adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับของแลงเมียร์

สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ได้ถูกนำมาใช้อธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับ โดยกำหนดไว้ว่าทุก ๆ ตำแหน่งดูดซับเป็นแบบเดียวกัน (Homogeneous) การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้น ๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) ไม่มีการเคลื่อนย้าย หรือเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ และโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน

สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ แสดงได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (7)$$

โดยที่ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลในสารละลาย (mg L^{-1})

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สมดุล (mg g^{-1})

q_m คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับ (mg g^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L mg^{-1})

ในการหาค่าของ q_m และ K_L ทำได้โดยเขียนกราฟระหว่าง C_e กับ C_e/q_e จะได้กราฟที่มีความชันและจุดตัดของแกน y ความชันเท่ากับ $1/q_m$ และ $1/K_L q_m$ ตามลำดับ (Gemici et al., 2023)

นอกเหนือจากพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการดูดซับตามไอโซเทอร์มของแลงก์เมียร์แล้ว อีกหนึ่งตัวชี้วัดที่สำคัญคือค่า Separation factor (R_L) ซึ่งเป็นค่าที่ช่วยในการประเมินลักษณะของการดูดซับ โดยค่า R_L สามารถใช้แยกแยะพฤติกรรมของกระบวนการดูดซับได้ ดังนี้

โดย ค่า $R_L > 1$ หมายถึง unfavorable adsorption

$0 < R_L < 1$ หมายถึง favorable adsorption

$R_L = 0$ หมายถึง irreversible adsorption

$R_L = 1$ หมายถึง linear adsorption

ค่า R_L แสดงได้ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (8)$$

โดยที่ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg g^{-1})

K_L คือ ค่าคงที่ของแลงก์เมียร์ (L mg^{-1})

ไอโซเทอมของการดูดซับของฟรอนคลิช

ไอโซเทอมของฟรอนคลิช ใช้ได้กับการดูดซับบนพื้นผิวต่างชนิดกันโดยมีอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ คือพื้นผิวที่ใช้ในการดูดซับโมเลกุลนั้นไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous) และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ในกรณีนี้ความร้อนของการดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อพื้นผิวถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวดูดซับมากขึ้น ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีการดูดซับโมเลกุลจำนวนมากขึ้นบนพื้นผิว ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการจะลดลง

ไอโซเทอมของการดูดซับของฟรอนคลิช แสดงได้ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^n \quad (9)$$

โดยที่ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลในสารละลาย (mg L^{-1})

q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สมดุล (mg g^{-1})

q_m คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับ (mg g^{-1})

K_F คือ ค่าคงที่ของฟรอนคลิช

n คือ ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln C_e$ กับ $\ln q_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ K_F จากความชันของกราฟระหว่าง $\ln C_e$ กับ $\ln q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อย แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น จะเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ (Bozbeyoglu et al., 2020) โดยทั่วไป หากการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ค่า n จะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ยิ่ง n มีค่ามาก ๆ หรือ $1/n$ มีค่าน้อย ๆ ระบุได้ว่าเกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ และเมื่อ $1/n$ มีค่าเท่ากับ 1 จะกลายเป็นไอโซเทอมการดูดซับเชิงเส้นตรง แสดงว่าการดูดซับเกิดขึ้นด้วยพลังงานที่เท่ากันทุกตำแหน่งที่ว่างไวบนตัวดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับของเทมคิน

ไอโซเทอมของเทมคิน ใช้ในการอธิบายการดูดซับของสารละลายบนพื้นผิวแข็ง โดยเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งทำให้ความร้อนของการดูดซับลดลงอย่างเป็นเส้นตรงตามระดับการครอบครองหรือปกคลุมพื้นผิว ในขณะที่การดูดซับเพิ่มมากขึ้นและโมเลกุลเรียงตัวหนาแน่นบนพื้นผิว ค่าพลังงานของจุดดูดซับต่าง ๆ บนพื้นผิวจึงไม่เท่ากัน พลังงานของการดูดซับจึงถูกกระจายเป็นเส้นตรงตามความเข้มข้นของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับของเทมคิน แสดงได้ดังนี้

$$q_e = B \ln (AC_e) \quad (11)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สมดุล (mg g^{-1})

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุลในสารละลาย (mg L^{-1})

A คือ ค่าคงที่สมดุลที่เกี่ยวข้องกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) (L g^{-1})

B คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับความร้อนของการดูดซับ (J mol^{-1})

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง ได้ดังนี้

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (12)$$

เมื่อ $B = RT/b$ คือ ค่าคงที่ของเทมคิน

b_T คือ ค่าคงที่เทมคินที่เกี่ยวข้องกับความร้อนของการดูดซับ ($J \text{ mol}^{-1}$)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ B และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $B \ln(A)$ หากเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงความเข้มข้นของ C_e แสดงว่าการดูดซับนั้นมีการกระจายพลังงานอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิว และความร้อนของการดูดซับลดลงอย่างเป็นเส้นตรงตามระดับการครอบครอง หรือปกคลุมพื้นผิว (Al-Harby et al., 2021)

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ โดยปกติแล้วกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ จะมีการคายพลังงานออกจากระบบ ซึ่งการคายพลังงานนี้อาจจะทำให้ความเป็นระเบียบในระบบลดลง หรือความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น โดยแสดงให้เห็นในค่าเอนทัลปี (ΔH°) ที่เป็นค่าลบ และเอนโทรปี (ΔS°) ที่มีค่าลบ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) ซึ่งมีค่าเป็นลบ ($\Delta G^\circ < 0$) (Lakshmi et al., 2009)

ในการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับ เราสามารถใช้พลังงานอิสระกิบส์เพื่อพิจารณาความเป็นไปหรือการเกิดขึ้นได้เองของกระบวนการดูดซับ ซึ่งกำหนดจากสมการพื้นฐานของกิบส์ (Gibb's free energy) ดังสมการ

$$G = H - TS \quad (13)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ ที่สภาวะมาตรฐาน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S \quad (14)$$

โดยที่ ΔG° แทนค่าการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน

โดยหากมีเครื่องหมายเป็นลบและบวก แสดงว่ากระบวนการเกิดขึ้นได้เอง (Spontaneous process) และเกิดขึ้นเองไม่ได้ (Non-spontaneous process) ตามลำดับ เมื่อนำสมการพื้นฐานนี้มาประยุกต์ใช้กับสภาวะสมดุลจะได้ว่า (Ahmed et al., 2020)

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K \quad (15)$$

โดยที่ K_c คือค่าคงที่สมดุล และ R คือค่าคงที่ของแก๊ส ในกรณีที่ใช้กับระบบสมดุลของการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับของแข็งที่เป็นตัวดูดซับและสารละลายเป็นตัวถูกละลาย ค่า K แทนด้วย K_c คือค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ คำนวณได้จากความเข้มข้นของสารละลายดังนี้

$$K_c = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} \quad (16)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และ C_e คือความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ ณ สภาวะสมดุล นอกจากนี้จะได้สมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_c) กับ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) ดังนี้

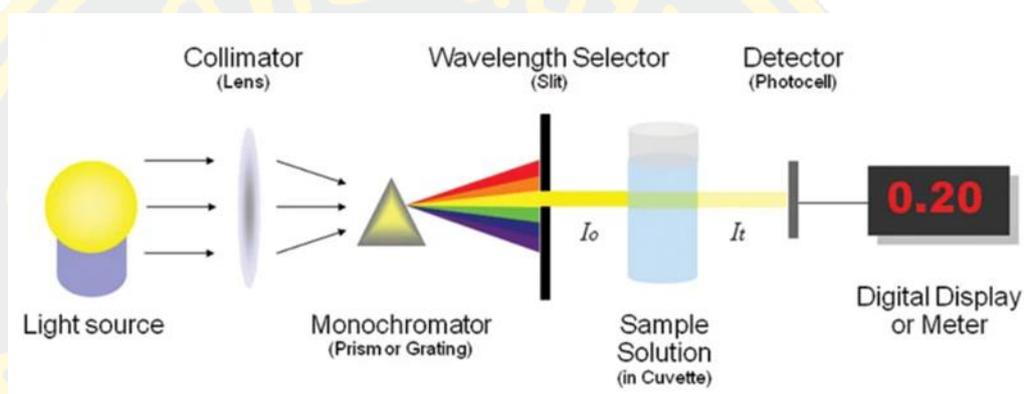
$$RT \ln K_c = T\Delta S^\circ - \Delta H^\circ \quad (17)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (18)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-\Delta H^\circ/R$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\Delta S^\circ/R$ ซึ่งสามารถหาค่าเอนทัลปี ΔH° โดยหากเครื่องหมายเป็นบวกและลบ บ่งชี้ว่าเป็นกระบวนการดูดความร้อน และคายความร้อนตามลำดับ และค่าเอนโทรปี ΔS° โดยหากได้เครื่องหมายเป็นบวก และลบ แสดงความไม่เป็นระเบียบ (Disorder) เพิ่มขึ้นและลดลงตามลำดับ (ความเป็นระเบียบลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ) (Osman et al., 2023)

หลักการการทำงานของเครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ในการทดสอบ

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and visible spectroscopy) เป็นเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีที่ใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล โดยมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 190 – 800 นาโนเมตร เทคนิคนี้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เนื่องจากมีความรวดเร็วและความแม่นยำสูงถูกใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์สารอินทรีย์ สารเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ทั้งในรูปของสารที่มีสีและไม่มีสี



ภาพที่ 5 หลักการทำงานของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

จากภาพที่ 5 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่สามารถปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ และเมื่อแสงถูกส่งผ่านตัวอย่างสารจะดูดกลืนแสงบางส่วนและส่งผ่านแสงบางส่วน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารนั้น ๆ จากนั้นแสงที่ผ่านตัวอย่างจะถูกแยกออกเป็นความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงโดยอุปกรณ์กระจายแสง เช่น เกรตติง (Grating) หรือปริซึม (Prism) ซึ่งจะช่วยให้เลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวัด หลังจากแสงถูกกรองให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ จะถูกส่งไปยังตัวตรวจจับแสง (Detector) ที่สามารถแปลงค่าความเข้มของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนออกจากตัวอย่างเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลักการของเทคนิคนี้อาศัยกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ซึ่งระบุว่า ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของสารละลายที่มีการดูดกลืนแสง เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะเกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนภายในอะตอมให้เปลี่ยนสถานะไปยังชั้นที่มีระดับพลังงานสูงขึ้น จากนั้นสามารถวัดปริมาณแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเมื่อเปรียบเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ เพื่อประเมินความเข้มข้นของสารในตัวอย่างได้ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบและระบุปริมาณสารที่ต้องการวิเคราะห์ในตัวอย่างที่เกี่ยวข้อง (Center, 2012)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Patil และคณะ (2020) ศึกษาการกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยเศษใบอ้อยมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปถ่านกัมมันต์โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น และการฉายรังสีไมโครเวฟทำการศึกษาผลของพีเอช (pH) ปริมาณตัวดูดซับ เวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อทำการศึกษากฎการดูดซับของการดูดซับ พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเสมือนค่า R^2 เท่ากับ 0.999 ข้อมูลของสมดุลการดูดซับอธิบายได้ดีในแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดย q_{max} ที่ได้คือ 149.25 mg g^{-1} ที่อุณหภูมิ 298 K ผลการศึกษาพบว่า การกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยเศษใบอ้อยมาแปรสภาพให้อยู่ในรูปถ่านกัมมันต์ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ pH 9.0 และ SLAC 0.45 กรัม ทำให้สามารถกำจัดสีย้อมที่เป็นพิษได้ 99.81% อย่างมีนัยสำคัญภายในระยะเวลา 60 นาที

Bozbeyoglu และคณะ (2020) ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลู (MB) ด้วยตัวดูดซับซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ Boehm titration, pH-pH_{pzc}, Iodine number และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วย FTIR เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์จะศึกษาผ่านไอโซเทอมของการดูดซับและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่า pH ของสารละลายเริ่มต้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับ กระบวนการดูดซับจะถึงจุดสมดุลที่เวลา 120 นาที และข้อมูลของสมดุลการดูดซับอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_{max}) ได้คือ 295.5 mg g^{-1} โดยการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 50% w/w พบว่าสูงกว่าที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 75% w/w และ 98% w/w

Sharma และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้ส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวโพด (Zea mays) ในการดูดซับโลหะที่เป็นพิษและมลพิษทางน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและสุขภาพที่สำคัญ โดยมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่หลากหลายเพื่อกำจัดสีย้อมและโลหะหนักในน้ำเสีย หนึ่งในเทคโนโลยีที่ถูกศึกษาอย่างแพร่หลายคือการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) ซึ่งเป็นการใช้วัสดุชีวภาพในการดักจับและกำจัดสารปนเปื้อนอันตราย ในการศึกษาพบว่าส่วนต่าง ๆ ของพืชหลายชนิด เช่น ซังข้าวโพด แกลบ และขุยมะพร้าว มีศักยภาพในการดูดซับมลพิษจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะการใช้ต้นข้าวโพดซึ่งสามารถใช้ในการดูดซับทางชีวภาพของมลพิษทางน้ำได้อย่างดีและมีประสิทธิภาพ และมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นทางเลือกที่มีความยั่งยืนในการลดมลพิษทางน้ำ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าต้นข้าวโพดมีศักยภาพสูงในการดูดซับโลหะหนักและไอออนที่เป็นพิษ อีกทั้งยังสามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ การนำของเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ต้นข้าวโพด มาปรับใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จึงถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Rajoriya และคณะ (2021) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำเปลือกไซมาแปรรูปเป็นวัสดุสำหรับการดูดซับสีย้อม Methyl red ผ่านกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน การศึกษานี้มุ่งเน้นถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่า pH ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ผลการทดลองพบว่ากระบวนการดูดซับของ Methyl red บนผิวของเปลือกไซมาเป็นไปตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเสมือน ในขณะที่ข้อมูลการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_{max}) อยู่ที่ 1.66 mg g^{-1} ซึ่งบ่งชี้ว่าการดูดซับเกิดขึ้นในลักษณะของการสร้างชั้นเดี่ยวบนพื้นผิวที่มีความสม่ำเสมอ ที่อุณหภูมิ 298 K ผลการทดลองยังพบว่าผงเปลือกไซมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม Methyl red จากสารละลายในน้ำ โดยสามารถกำจัดได้ถึง 82.2% ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับนี้เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และเป็นแบบดูดความร้อน ซึ่งหมายความว่ากระบวนการนี้ต้องการพลังงานความร้อนในการเกิดปฏิกิริยา

Bhavyasree และคณะ (2021) ศึกษาได้นำเสนอการเตรียมตัวดูดซับจากคอปเปอร์(II) ออกไซด์/คาร์บอน ที่สกัดจากใบ *Vitex negundo* Linn. เพื่อดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ สีย้อมเมทิลินบลู (MB) คูมาซีบลู (CBB) และคองโกเรด (CR) พบว่าปัจจัยเวลา และปริมาณตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับสีย้อมจะเพิ่มขึ้น และค่อยๆ เข้าสู่สมดุลเช่นเดียวกัน แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมที่มากเกินไปส่งผลให้การดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิดลดต่ำลง เนื่องจากตัวดูดซับเกิดความอิ่มตัว และเมื่อทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมทั้ง 3 ชนิด พบว่า สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเสมือน ข้อมูลของสมดุลการดูดซับอธิบายได้ดีในแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) 9.09, 4.05, 17.43 mg g^{-1} ของ CBB MB และ CR ตามลำดับ การดูดซับแบบชั้นเดี่ยว (Monolayer) และพื้นผิวมีความสม่ำเสมอ

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

สารเคมี

1. สีย้อมคริสตัลไวโอเลต ($C_{25}H_{30}ClN_3$, MW.407.99 g mol⁻¹, laboratory Reagent Grade, AJAX chemical)
2. กรดซัลฟิวริก (98% Sulfuric acid, H₂SO₄) บริษัท QReC New Zealand
3. โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) บริษัท Ajex Finechem New Zealand
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH, MW. 40.00), RCL Labscan, Iceland
5. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl, MW. 36.46), KEMAUS, Australia

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) บริษัท Mettler Toledo, Switzerland
2. เครื่อง AE-VIS 721 Visible Spectrophotometer รุ่น บริษัท ซายน์ลูชั่น จำกัด, นนทบุรี
3. ตู้อบลมร้อน รุ่น UN30 บริษัท Memmert, USA
4. Glass cuvette (Path length = 1 cm)
5. อ่างควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่า บริษัท Memmert, Germany
6. pH-indicator strips pH 0-14 Universal indicator บริษัท Merck, Germany
7. เครื่องบดละเอียด บริษัท CGOLDENWALL, Thailand
8. ตะแกรงร่อน ขนาด 50 และ 60 mesh
9. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1
10. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) บริษัท LEO รุ่น LEO 1450 VP, England
11. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น System 2000, USA

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการศึกษา ประกอบด้วยทั้งหมด 7 ตอน ดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก

- 1.1 เปลือกข้าวโพด ได้มาจากร้านค้าในตลาดสดหินใหญ่ จังหวัดกาญจนบุรี
- 1.2 นำเปลือกข้าวโพดมาคัดแยกส่วนของใบออกจากเส้นไหมข้าวโพด จากนั้นนำไปล้างทำความสะอาด และตากแดดให้แห้ง เป็นเวลา 1 วัน และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.3 นำเปลือกข้าวโพดมาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และนำไปบดด้วยเครื่องบดละเอียด ขนาด 500 มิลลิลิตร และร่อนผ่านรูดะแกรงขนาด 50 mesh
- 1.4 ชั่งผงเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการร่อนแล้ว 20 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ทั้งหมด 3 ชุด เพื่อเตรียมปรับสภาพพื้นผิว โดยใช้อัตราส่วนผงเปลือกข้าวโพด: กรดซัลฟิวริก เป็น 1:1
- 1.5 เตรียม H_2SO_4 ที่ความเข้มข้น 50%, 75% และ 98% w/w เพื่อใช้ในการปรับสภาพ ดังนี้
 - เตรียม H_2SO_4 ความเข้มข้น 50% w/w ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จาก H_2SO_4 เข้มข้น 98% w/w โดยนำน้ำกลั่นใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ใช้กระบอกตวง ตวง H_2SO_4 ปริมาตร 26 มิลลิลิตร จากนั้นเทใส่บีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นอยู่ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึง 50 มิลลิลิตร
 - เตรียม H_2SO_4 ความเข้มข้น 75% w/w ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จาก H_2SO_4 เข้มข้น 98% w/w โดยนำน้ำกลั่นใส่บีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ใช้กระบอกตวง ตวง H_2SO_4 98% w/w ปริมาตร 38 มิลลิลิตร จากนั้นเทใส่บีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นอยู่ และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึง 50 มิลลิลิตร
 - สำหรับ H_2SO_4 ความเข้มข้น 98% w/w สามารถทำได้โดยการใส่กระบอกตวง ตวง H_2SO_4 98% w/w ที่มีอยู่โดยตรง
- 1.6 ตวง 20 มิลลิลิตร ของ H_2SO_4 50% w/w, 75% w/w และ 98% w/w จากนั้นค่อยๆ เทลงในบีกเกอร์ที่มีผงเปลือกข้าวโพดบด 20 g ทั้ง 3 ชุดที่ชั่งเตรียมไว้จากข้อที่ 4 ตามลำดับ
- 1.7 นำไปเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 1.8 นำมาต้มด้วยน้ำกลั่นเดือด ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วกรองเอาสารละลายออก จากนั้นนำตัวดูดซับที่กรองได้มาปรับ pH ให้เป็นกลางด้วย 1% $NaHCO_3$ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- 1.9 กรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 การสร้างกราฟมาตรฐานของสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

- 2.1 เตรียมสารละลายคริสตัลไวโอเลต (CV) ที่มีความเข้มข้นอยู่ในระหว่าง $0.5-5 \text{ mg L}^{-1}$
- 2.2 นำสารละลายคริสตัลไวโอเลตไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 nm เพื่อหาความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max})
- 2.3 นำสารละลายที่เตรียมได้ในข้อ 1) มาวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดจากข้อ 2.2 แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน
- 2.4 สร้างกราฟมาตรฐานโดยแกน x คือความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต (mg L^{-1}) และแกน y คือค่าการดูดกลืนแสง

ตอนที่ 3 การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4

- 3.1 ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) โดยนำตัวอย่างผงเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CH) และปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4 50% w/w (TCH-50), 75% w/w (TCH-75) และ 98% w/w (TCH-98) ติดลงบนแท่น Stub ด้วยกระดาษทาสองหน้า และเคลือบตัวอย่างด้วยทองคำก่อนทำการวิเคราะห์
- 3.2 ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) โดยการนำผงเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผสมกับ KBr แล้วอัดให้เป็นแผ่น นำไปอบแห้งและนำมาทดสอบโดยทำการศึกษาในช่วงเลขคลื่น $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$

ตอนที่ 4 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริก

4.1 การศึกษาผลของเวลาสัมผัส

การศึกษาผลของเวลาต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดนี้ได้ใช้วิธีการดูดซับแบบกะ (Batch adsorption) ซึ่งใน 1 ชุดการทดลอง มี 6 แบบทซ์ แต่ละแบบทซ์ประกอบด้วยตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด และสารละลายสีย้อมที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ควบคุมอุณหภูมิและระดับการแกว่งทุกแบบทซ์ให้เท่ากัน โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

4.1.1 เตรียมสารละลายคริสตัลไวโอเลต (CV) ที่มีความเข้มข้น 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ต่อการทดลอง 1 ชุด (6 แบบพื้) โดยชั่งสีย้อมคริสตัลไวโอเลต 0.0075 กรัม จากนั้นละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร

4.1.2 ทำการเตรียมแบบพื้ โดยชั่งตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด 0.3000 กรัม บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ จากนั้นใสสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตจากบิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด เมื่อทำการปล่อยสารละลายสีย้อมลงไปสัมผัสกับตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดให้เริ่มจับเวลาทันที แล้วนำแต่ละแบบพื้ไปแกว่งในเครื่องหมุนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับการแกว่งให้คงที่เป็นระยะเวลา 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ตามลำดับ

4.1.3 ยกแบบพื้ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิเมื่อครบระยะเวลาของการดูดซับสีย้อมที่ต้องการ นำไปกรองแยกสารละลายสีย้อมออกจากตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทันที นำสารละลายที่กรองได้ไปหาความเข้มข้นของสีย้อมคริสตัลไวโอเลตที่ไม่ถูกดูดซับ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer

4.1.4 นำค่าการดูดกลืนแสงนี้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม โดยอาศัยสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานจากหัวข้อ 2.4

4.1.5 นำความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่คำนวณได้ หาปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ใช้ (q_t) ด้วยสมการ 3-1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)}{w} \times V \quad (19)$$

โดย q_t คือ ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ใช้ (mg g^{-1})

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg L^{-1})

C_t คือ ความเข้มข้นที่เหลือของสีย้อม (mg L^{-1})

V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (L)

w คือ น้ำหนักกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด (g)

แต่ละแบบพื้ในชุดการทดลอง มีระยะเวลาของการดูดซับ (t) ที่แตกต่างกัน แต่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม และปริมาณตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดจะเหมือนกัน กล่าวได้ว่า ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด หรือ q_t เป็นฟังก์ชันของระยะเวลาการดูดซับ

จากนั้นทำการหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อม หาได้จากสมการ (3-2) ดังนี้

$$\% \text{removal} = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100 \quad (20)$$

โดย C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมก่อนการดูดซับ (mg L^{-1})

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือหลังจากการดูดซับที่เวลาใดๆ (mg L^{-1})

4.2 การศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้

ในการศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด จะทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30.00 มิลลิลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับการแกว่งให้คงที่ ระยะเวลา 120 นาที แต่ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ในแต่ละแบบจะแตกต่างกัน เริ่มตั้งแต่ 0.1000, 0.1500, 0.2000, 0.2500, และ 0.3000 หรือคิดในรูปปริมาณ Dosage ซึ่งเป็นน้ำหนักของตัวดูดซับต่อปริมาตรของสารละลายสีย้อม 1 ลิตร เท่ากับ 3.33, 5, 6.6, 8.33, และ 10 กรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแต่ละขั้นตอนตามหัวข้อที่ 4.1.1

4.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด จะทำการทดลองโดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 0.1500 กรัม สารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต 30.00 มิลลิลิตร โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับการแกว่งให้คงที่ ระยะเวลา 120 นาที แต่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในแต่ละแบบจะใช้แตกต่างกัน คือ 10.00, 15.00, 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแต่ละขั้นตอน ตามหัวข้อที่ 4.1.1

4.4 การศึกษาผลการหาค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์

ในการศึกษาผลการหาค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์ เริ่มจากปรับ pH ของน้ำปราศจากไอออนให้มีค่าต่างกันในช่วง 3-10 ด้วย 0.1 M NaOH หรือ 0.1 M HCl วัด pH ของน้ำด้วย pH-indicator strips บันทึกเป็นค่า pH_i (Initial pH) จากนั้นผสมน้ำที่ปรับ pH แล้ว 30 มิลลิลิตร กับตัวดูดซับ 0.1500 กรัม ในขวดรูปชมพู่ ปิดฝาและเขย่าเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำของผสมตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลา วัด pH ของน้ำที่ผสมตัวดูดซับ บันทึกค่าเป็น pH_f (Final pH) เขียนกราฟระหว่าง pH_i (แกน x) และ pH_f (แกน y) จะได้ pH_{pzc} ซึ่งมีค่าเท่ากับจุดตัดแกน x

4.5 การศึกษาการดูดซับสีของคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 98%, 75% และ 50% เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่แตกต่างกัน

ในการศึกษานี้ เริ่มต้นจากแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุด การทดลอง 1 ชุด (6 แบทช์) ได้แก่ ชุดตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ยังไม่ปรับสภาพ (CH) และชุดตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 50% (TCH-50), 75% (TCH-75) และ 98% (TCH-98), โดยแต่ละชุดการทดลอง ใช้ตัวดูดซับจำนวน 0.1500 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 120 นาที และควบคุมระดับการแกว่งให้คงที่ แต่จะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีใน แต่ละแบทช์แตกต่างกัน คือ 10.00, 15.00, 20.00, 30.00, 40.00 และ 50.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อครบระยะเวลา ยกแบทช์ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิ นำไปกรองแยกสารละลายสีออกออกจากตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 หนึ่งที นำสารละลายที่กรองได้ไปหาความเข้มข้นของสีของคริสตัลไวโอเล็ตที่ไม่ถูกดูดซับ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible spectrometer นำค่าการดูดกลืนแสงนี้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสี โดยอาศัยสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานจากข้อ 2.4 จากนั้นความเข้มข้นของสารละลายสีที่คำนวณได้ หาปริมาณสีที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ใช้ (q_t) ด้วยสมการ (19) และหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีด้วย สมการ (20)

ตอนที่ 5 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีและอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสี

ในการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสี และระยะเวลาการสัมผัสต่อจลนพลศาสตร์ในการดูดซับสีของคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first order) และแบบจำลองอันดับสองเสมือน (Pseudo-second order) และค่าคงที่อัตราการดูดซับ ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ชุด ที่ความเข้มข้นของสี 15.00, 30.00, 45.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ระยะเวลาของการดูดซับของแต่ละแบทช์ตั้งแต่ 5 10 15 30 60 120 และ 180 นาที และควบคุมอุณหภูมิเท่ากันทุกแบทช์ โดยมีขั้นตอนการทำงานทดลอง ดังนี้

5.1 เตรียมสารละลายสีของคริสตัลไวโอเล็ต ที่ความเข้มข้น 15.00, 30.00, 45.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ต่อการทดลอง 1 ชุด (6 แบทช์) โดยชั่งสีของคริสตัลไวโอเล็ต 0.00375, 0.0075, 0.01125 กรัม ตามลำดับ ลงในบีกเกอร์ จากนั้นละลายสีของคริสตัลไวโอเล็ตด้วยน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสารละลายในขวดวัดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร

5.2 เตรียมแบทช์ตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดกับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต โดยเริ่มใช้สารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตจากบิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่มีความเข้มข้น 15.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด 0.1500 กรัม เริ่มจับเวลาทันทีที่ปล่อยสารละลายลงไปสัมผัสกับตัวดูดซับ แล้วนำแต่ละแบทช์ไปแกว่งเป็นระยะเวลา 5 10 15 30 60 120 และ 180 นาที ด้วยเครื่องหมุนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับของการแกว่งให้คงที่

5.3 ยกแบทช์ออกจากอ่างควบคุมอุณหภูมิเมื่อครบระยะเวลาของการดูดซับสีย้อมที่ต้องการนำไปกรองแยกสารละลายสีย้อมออกจากตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทันที วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด

5.4 นำค่าการดูดกลืนแสงนี้ไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม โดยอาศัยสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานจากข้อ 2.4

5.5 นำความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่คำนวณได้ หาปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ใช้ (q_t) ด้วยสมการ (20)

5.6 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.2 – 5.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเป็น 30.00 และ 45.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสองเหมือน และคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ที่ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเท่ากับ 30.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 30.00 มิลลิลิตร เหมือนกัน แต่แปรผันระยะเวลาของการดูดซับ และทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลองในแต่ละชุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ตามแบบจำลองจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งและอันดับสองเหมือน และคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับจลนพลศาสตร์ของการดูดซับรวมถึงค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับ

ตอนที่ 6 การศึกษาสมดุลการดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด

การทดลองนี้ได้ศึกษาสมดุลระหว่างปริมาณสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลกับปริมาณที่เหลืออยู่ในสารละลาย ในการทดลองจะแบ่งชุดการทดลองออกเป็น 3 ชุดที่อุณหภูมิของการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยแต่ละชุดจะใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 0.1500 g และเวลาการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ 180 นาที โดยทำการทดลอง ดังนี้

6.1 เตรียมสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต ที่ความเข้มข้น 15.00, 30.00, 45.00, 60.00, 75.00 และ 90.00 มิลลิกรัมต่อลิตร

6.2 เตรียมแบบห้ตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดกับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต โดยใช้สารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตจากบิวเรต ขนาด 50 มิลลิลิตร ที่ได้จาก stock solution ปริมาตร 30.00 มิลลิลิตร ที่มีตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด 0.1500 กรัม บรรจุอยู่ในขวดรูปชมพู่ เริ่มจับเวลาทันทีที่ปล่อยสารละลายลงไปในสัมผัสกับตัวดูดซับ แล้วนำแต่ละแบบห้ไปแกว่งเป็นระยะเวลา 180 นาที ด้วยเครื่องหมุนในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมระดับของการแกว่งให้คงที่

6.3 เมื่อครบระยะเวลาของการดูดซับ 180 นาที หลังจากนั้นนำแต่ละแบบห้ไปกรองแยกเอาสารละลายสีย้อมออกจากตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทั้งนี้ จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Visible spectrometer ที่ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ สภาวะสมดุล (C_e) โดยอาศัยสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 2.4

6.4 นำความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายตัวอย่างที่คำนวณได้ไปคำนวณหาปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของตัวดูดซับที่ใช้ที่สมดุล (q_e)

6.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 6.2-6.5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของการดูดซับสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเป็น 30 และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตอนที่ 7 การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตกับตัวดูดซับเปลือกข้าวโพด

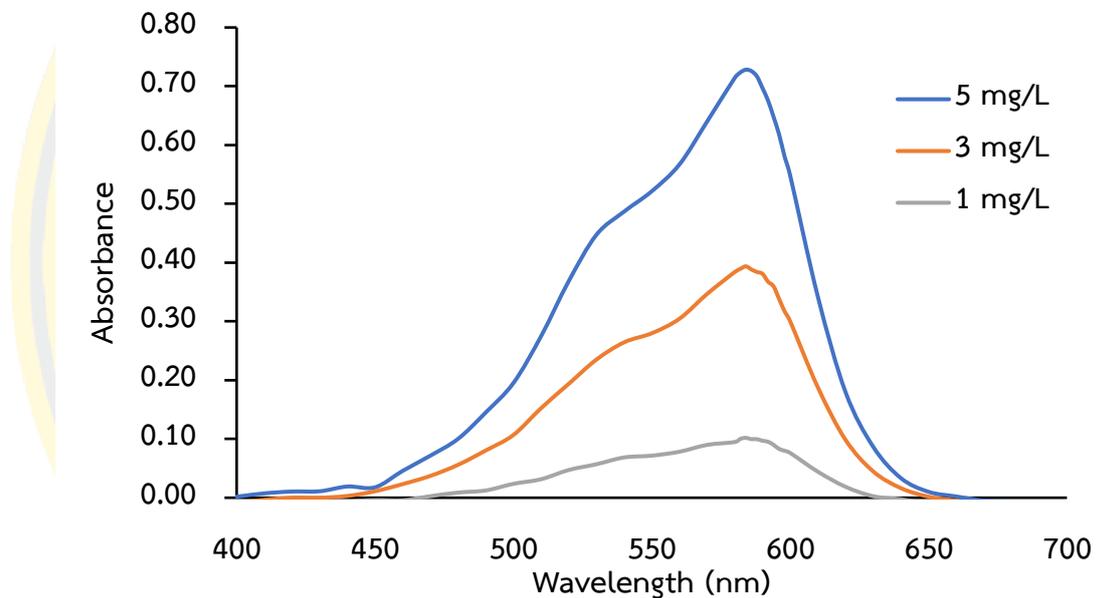
จากการศึกษาในตอนที่ 6 คำนวณหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่แต่ละอุณหภูมิ และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ทางอุณหพลศาสตร์การดูดซับที่สภาวะมาตรฐาน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี และ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

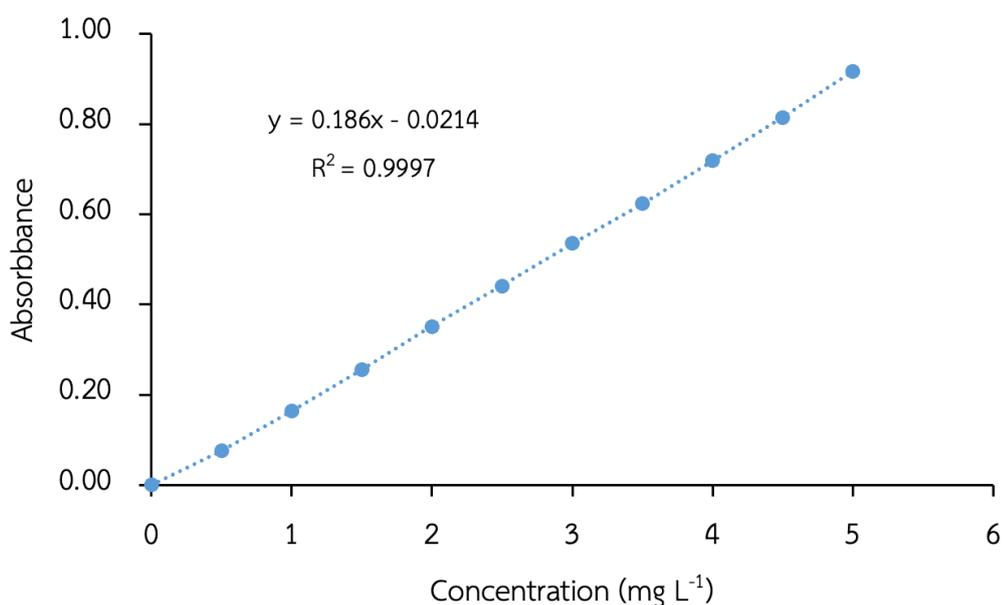
การดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลตที่มีความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความยาวคลื่นที่ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ของสีย้อมคริสตัลไวโอเลตปรากฏที่ 584 นาโนเมตร โดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสีย้อมแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 สเปกตรากการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานสีย้อมคริสตัลไวโอเลต

การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ของสารละลายสี้อมคริสตัลไวโอเลต

การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายสี้อมคริสตัลไวโอเลตสำหรับการวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสี้อมคริสตัลไวโอเลตหลังการดูดซับ สามารถทำได้โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานสี้อมคริสตัลไวโอเลต ในช่วง 0.5-10 มิลลิกรัมต่อลิตร กับค่าการดูดกลืนแสงที่ค่าความยาวคลื่นซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) เท่ากับ 584 นาโนเมตร แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสี้อมคริสตัลไวโอเลต

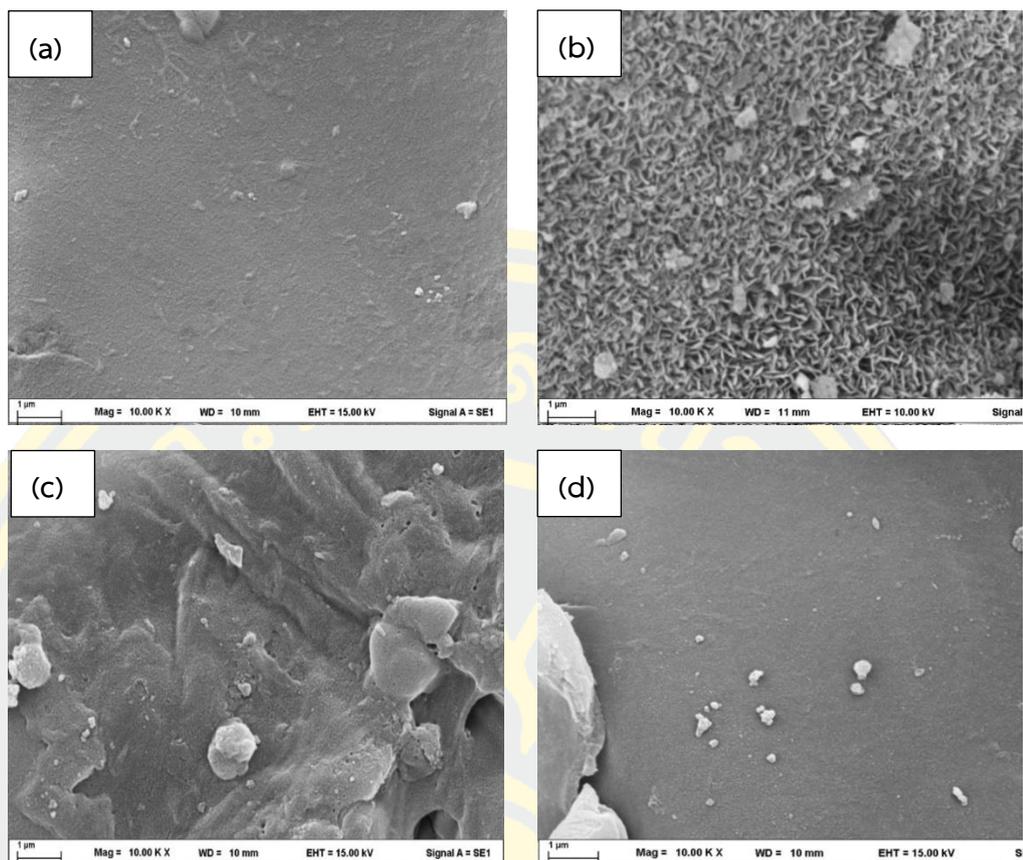
จากภาพที่ 7 แสดงกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานสี้อมคริสตัลไวโอเลตได้สมการเส้นตรง $y = 0.186x - 0.0214$, $R^2 = 0.9997$ โดยมีค่าความชัน และค่าจุดตัดแกน y เท่ากับ 0.186 L mg^{-1} และ 0.0214 ตามลำดับ ใช้สำหรับการคำนวณหาความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายสี้อมคริสตัลไวโอเลตหลังการดูดซับ

ผลการศึกษาสมบัติของตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ภาพที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาภายใต้กำลังขยาย 10,000x ที่พื้นผิวของเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CH) และหลังปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 50%w/w (TCH-50), 75%w/w (TCH-75) และ 98%w/w (TCH-98) ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ภาพที่ 8(a) แสดงพื้นผิวของเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CH) มีลักษณะเรียบและสม่ำเสมอ โครงสร้างยังคงสภาพเดิมตามธรรมชาติ ไม่มีร่องรอยจากการกัดกร่อนจากสารเคมี เนื่องจากยังไม่ได้เกิดกระบวนการคาร์บอนเซชัน แสดงให้เห็นถึงเส้นใยที่ยังหนาแน่น ในภาพที่ 8(b) เปลือกข้าวโพดหลังปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 50%w/w (TCH-50) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างชัดเจน เริ่มเห็นความพรุนและโครงสร้างที่มีการแตกออกเป็นรูขนาดเล็กจำนวนมาก เกิดจากการคายน้ำ และการสลายพันธะ β -glycosidic ในเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ออกไปบางส่วน ทำให้โครงสร้างเกิดรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น (Chiang et al., 2017) ภาพที่ 8(c) แสดงเปลือกข้าวโพดที่ได้รับการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 75%w/w พบว่าเกิดการคายน้ำ และการสลายพันธะโครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเกิดอย่างรุนแรงขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นของกรดซัลฟิวริก และภาพที่ 8(d) แสดงเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98%w/w พบว่าโครงสร้างที่ปรากฏมีการสลายตัวของอย่างชัดเจน ความพรุนบนพื้นผิวเกิดขึ้นในระดับที่ลึกและกว้างขึ้น เนื่องมาจากกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 98% ส่งผลให้เกิดการคายน้ำอย่างรุนแรง และทำให้โครงสร้างเกิดความเปราะบาง (Bozbeyoglu et al., 2020)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ภาพ SEM พื้นผิวของ TCH-50 (b) เป็นพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอและโครงสร้างที่มีรูพรุนชัดเจนกว่าพื้นผิวอื่น ๆ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้อาจมีส่วนช่วยในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตได้ (Homagai et al., 2022) และการเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกในการปรับสภาพพื้นผิว ส่งผลต่อการสลายตัวของโครงสร้างของเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในระดับรุนแรง โครงสร้างของวัสดุอาจเปราะบางมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นไม่เหมาะสมสำหรับการจับตัวกับโมเลกุลขนาดใหญ่ของสีย้อม (Bozbeyoglu et al., 2020)



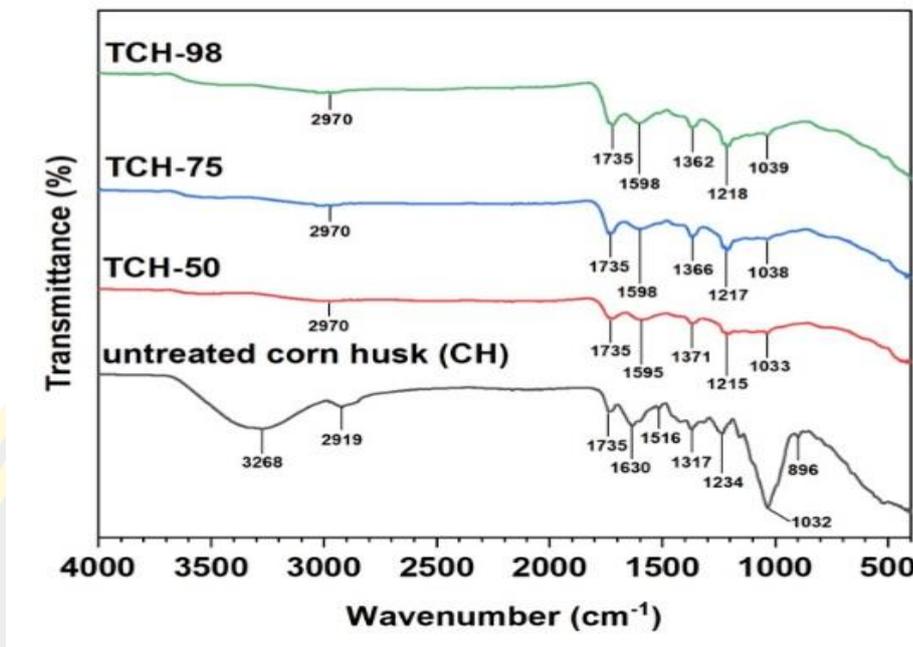
ภาพที่ 8 ภาพถ่าย SEM ของเปลือกข้าวโพดที่ก่อน-หลังปรับสภาพด้วยกรด H_2SO_4

(a) เปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้ปรับสภาพ (CH)

(b)-(d) เปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วย 50%, 75% และ 98% ของ H_2SO_4 ตามลำดับ

ผลการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์ FTIR สเปกโทรสโกปี ที่ใช้ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว CH และ TCHs จากการวิเคราะห์พบว่าเปลือกข้าวโพดที่ไม่ผ่านการบำบัด (CH) พบว่าพีคการสั่นแบบ stretching ของหมู่ O-H ที่เป็นองค์ประกอบหลักใน Lignocellulose ที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์สามส่วน ได้แก่ Cellulose, Hemicellulose และ Lignin (Omer et al., 2022) ซึ่งปรากฏเลขคลื่น $3200-3400\text{ cm}^{-1}$ พีคการสั่นแบบ Symmetric และ Asymmetric stretching ของพันธะ C-H ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น ประมาณ 2919 cm^{-1} ซึ่งพบในหมู่เมทิล (CH_3) และเมทิลีน (CH_2) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเซลลูโลส พีคการสั่นแบบ Stretching -ของหมู่ Ester C=O และ Aromatic C=O ปรากฏเลขคลื่นประมาณ 1735 cm^{-1} , 1630 (1598) cm^{-1} บ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่เอสเทอร์หรือกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งพบใน เฮมิเซลลูโลส



ภาพที่ 9 สเปกตรัม FTIR ของ CH และ TCHs

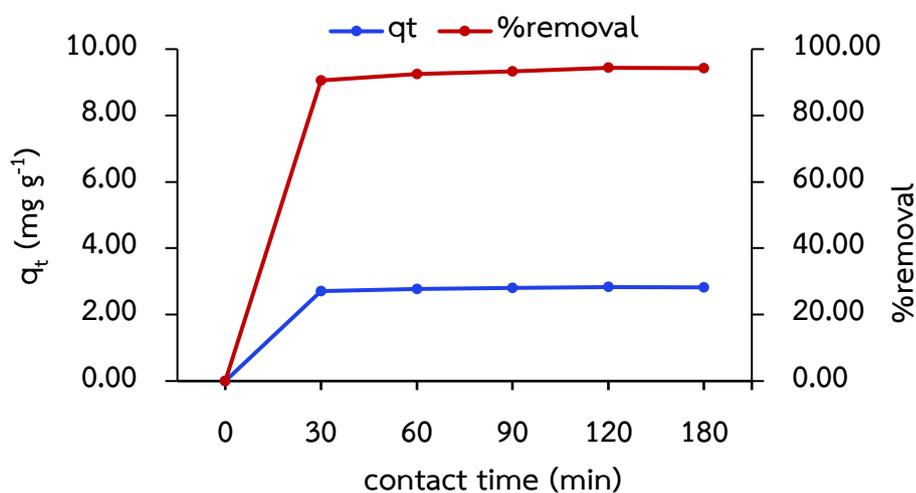
สำหรับการสั่นของ Lignin C-O linkage ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1516 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับวงแหวนอะโรมาติกในลิกนิน และพิคการสั่นแบบ Bending ของพันธะ C-O ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1032 cm^{-1} พบได้ในโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเปลือกข้าวโพด และสำหรับการสั่นของหมู่ β -Glycosidic ปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 896 cm^{-1} แสดงถึงการเชื่อมต่อของหน่วยกลูโคสในเซลลูโลสผ่านพันธะ β -glycosidic ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโครงสร้างเซลลูโลส (Yeasin & Mondal, 2015) และเมื่อเปรียบเทียบกับ TCHs พบว่าพิคการสั่นแบบ Stretching ของหมู่ O-H หายไปบางส่วน ซึ่งอาจเกิดจากการการปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริกที่ทำให้เกิดการคายน้ำอย่างรุนแรง (Bozbeyoglu et al., 2020) โดยเฉพาะ TCH-50 พิคปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 2970 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าพันธะ C-H ยังมีอยู่แม้จะผ่านการกำจัดออกบางส่วนแล้ว พิคปรากฏที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1595 และ 1371 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการกำจัดลิกนินบางส่วน ซึ่งทำให้ตัวอย่างมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ที่พิคปรากฏตำแหน่งเลขคลื่น 1215 และ 1033 cm^{-1} ยังคงแสดงถึงโครงสร้างของเซลลูโลสที่เหลืออยู่ สำหรับ TCH-75 พิคปรากฏตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 2970 , 1735 , และ 1366 cm^{-1} ยังคงอยู่ แต่ความเข้มลดลง ซึ่งแสดงถึงการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น ทำให้เซลลูโลสมีความบริสุทธิ์มากขึ้น และโครงสร้าง TCH-98 พิคปรากฏตำแหน่งเลขคลื่น 2970 cm^{-1} แสดงถึงการคงอยู่ของพันธะ C-H ที่ยังมีอยู่ในปริมาณเล็กน้อย พิคปรากฏตำแหน่งเลขคลื่น 1362 cm^{-1} มีความเข้มต่ำมาก ซึ่งบ่งชี้ถึงการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสเกือบทั้งหมด ทำให้ตัวอย่าง TCH-98 มีความบริสุทธิ์สูงสุด

การกำจัดลิแกนด์และเฮมิเซลลูโลสออกจากพื้นผิวของเปลือกข้าวโพด ทำให้ตัวอย่าง TCHs มีโครงสร้างเซลลูโลสที่บริสุทธิ์มากขึ้น มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนเซลลูโลสสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนหรือแรงกระทำไฟฟ้าสถิตกับโมเลกุลของสารสี้อมที่มีขั้วและหมู่คาร์บอนิลและพันธะ C=O ยังมีบทบาทในการเพิ่มตำแหน่งที่ว่างไว (Active site) บนพื้นผิวให้กับวัสดุตัวดูดซับ เนื่องจากสามารถเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole) กับโมเลกุลสี้อมที่มีขั้ว ทำให้มีตำแหน่งการจับตัวของสี้อมมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น (Omer et al., 2022)

ผลการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสี้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก

ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสี้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

จากการศึกษาผลของเวลาสัมผัส ตั้งแต่ 0 ถึง 180 นาที โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด 0.3000 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 10



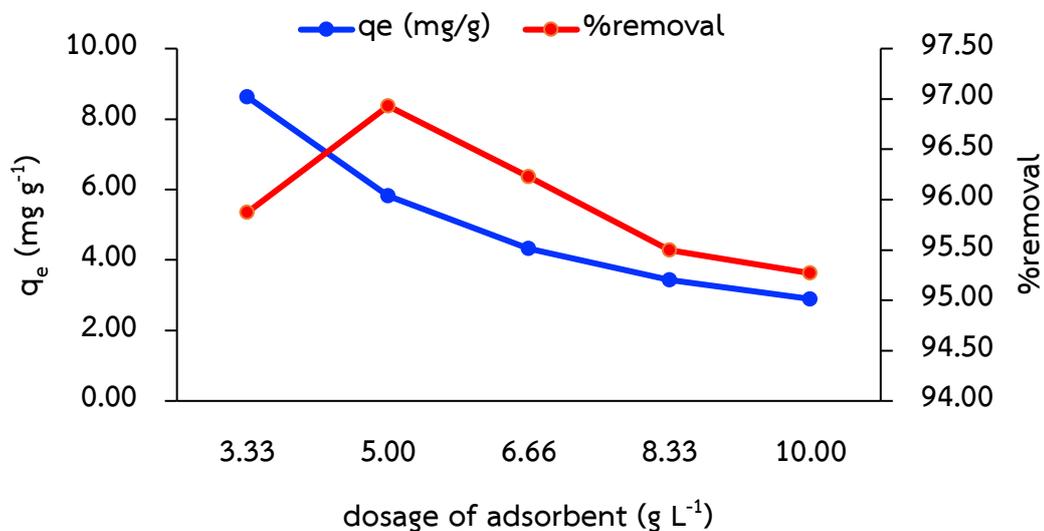
ภาพที่ 10 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับสี้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 30 mg L⁻¹, ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.30 g cm⁻¹ และอุณหภูมิ 30 °C

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละการกำจัดสีย้อม พบว่าในช่วงเวลา 30 นาทีแรก ร้อยละการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้น โดยที่ร้อยละการกำจัดสีย้อมสูงสุด ประมาณ 94.36 ที่เวลา 120 นาที

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความสามารถในการดูดซับสีย้อม พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง อัตราการกำจัดสีย้อมเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และค่อย ๆ ชะลอลง จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ซึ่งบ่งบอกถึง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่ว่างบนตัวดูดซับลดลงจนกระทั่งพื้นที่สำหรับการดูดซับปกคลุมไปด้วยโมเลกุลสีย้อม และไม่สามารถดูดซับเพิ่มเติมได้ ซึ่งแสดงว่าพื้นที่ผิวของการดูดซับเกิดการอิ่มตัวของโมเลกุลสีย้อม (Ahmed et al., 2020) ดังนั้นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับคือ 120 นาที โดยที่ปริมาณการกำจัดสีย้อมมีค่าสูงสุด

ผลของปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

จากการศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 30 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจาก 0.1000 ถึง 0.1500 กรัม ร้อยละการกำจัดสีย้อมมีการเพิ่มขึ้นจาก 95.87% ถึง 96.92% ดังภาพที่ 11 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นทำให้ตำแหน่งที่ว่างสำหรับการดูดซับเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมสามารถจับตัวกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น ซึ่งช่วยให้การกำจัดสีย้อมมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ในช่วงปริมาณที่เหมาะสมนี้ (Karunakaran et al., 2022) อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเกินกว่า 0.1500 กรัม ร้อยละการกำจัดสีย้อมจะลดลง เนื่องจากการเกาะกลุ่มของอนุภาคตัวดูดซับ (Rápó & Ton, 2021) ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวที่สามารถใช้งานได้ลดลง และทำให้สีย้อมเข้าถึงตำแหน่งการดูดซับบนตัวดูดซับได้ยากขึ้น อีกทั้งตำแหน่งที่ว่างบนพื้นผิวอาจเริ่มถึงจุดอิ่มตัว จึงไม่สามารถเพิ่มการดูดซับได้ (Ahmed et al., 2020)

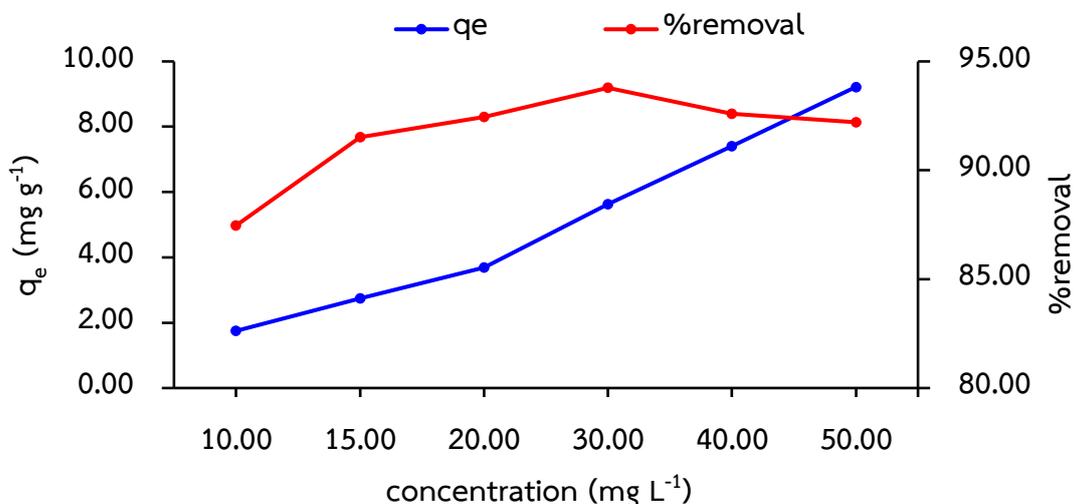


ภาพที่ 11 ผลของปริมาณของตัวดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 30 mg L⁻¹ และอุณหภูมิ 30 °C

ดังนั้น ปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมคือ 5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากที่ปริมาณนี้ ร้อยละการกำจัดสีย้อมมีค่าสูงสุด การเลือกปริมาณตัวดูดซับที่ 5 กรัมต่อลิตร จึงการประหยัดต้นทุนในการใช้ตัวดูดซับเพื่อกำจัดสีย้อมในงานวิจัยนี้

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 0.1500 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเพิ่มขึ้น ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมสูงสุดอยู่ที่ 93.63 จากนั้นร้อยละการกำจัดสีย้อมลดลงเหลือ 92.58 และ 92.20 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเป็น 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 12 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายมีค่าสูงขึ้น โมเลกุลสีย้อมที่พยายามดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นกันโดยที่ตำแหน่งที่ว่างที่เกิดการดูดซับมีจำนวนจำกัด ดังนั้นเมื่อมีโมเลกุลสีย้อมจำนวนมากที่ถูกดูดซับไปแล้ว โมเลกุลสีย้อมเหล่านั้นจะเริ่มผลักกันเองเนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ทำให้พื้นผิวดูดซับกลายเป็นบริเวณที่มีพลังงานสูง ทำให้โมเลกุลสีย้อมตัวอื่นยากต่อการดูดซับ นอกจากนี้โมเลกุลสีย้อมที่ดูดซับแล้วยังสามารถปิดกั้นตำแหน่งที่ว่างทำให้โมเลกุลอื่นไม่สามารถเข้าถึงได้ง่ายอีกด้วย (Patil et al., 2022)

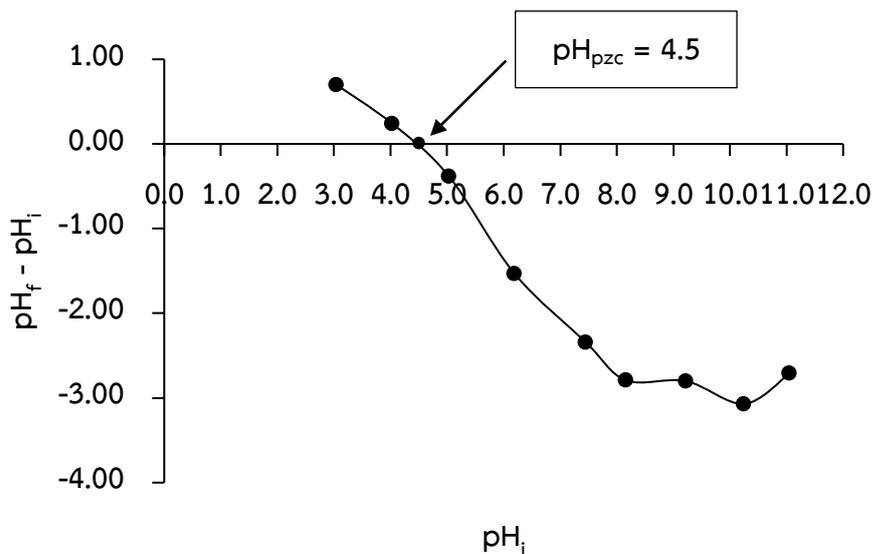


ภาพที่ 12 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ 0.30 g cm^{-1} และอุณหภูมิ $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมกับความสามารถในการดูดซับสีย้อม พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับหรือปริมาณดูดซับที่สมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเป็นการเพิ่มความแตกต่างของความเข้มข้น ส่งผลต่อการเคลื่อนที่โมเลกุลของสีย้อมเข้าหาตัวดูดซับมากขึ้น ช่วยเพิ่มโอกาสในการดูดซับ การเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมที่สูงขึ้นยังสามารถช่วยเอาชนะความต้านทานการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสีย้อมที่เคลื่อนจากสารละลายไปยังตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (Paska et al., 2014)

ผลการหาค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์

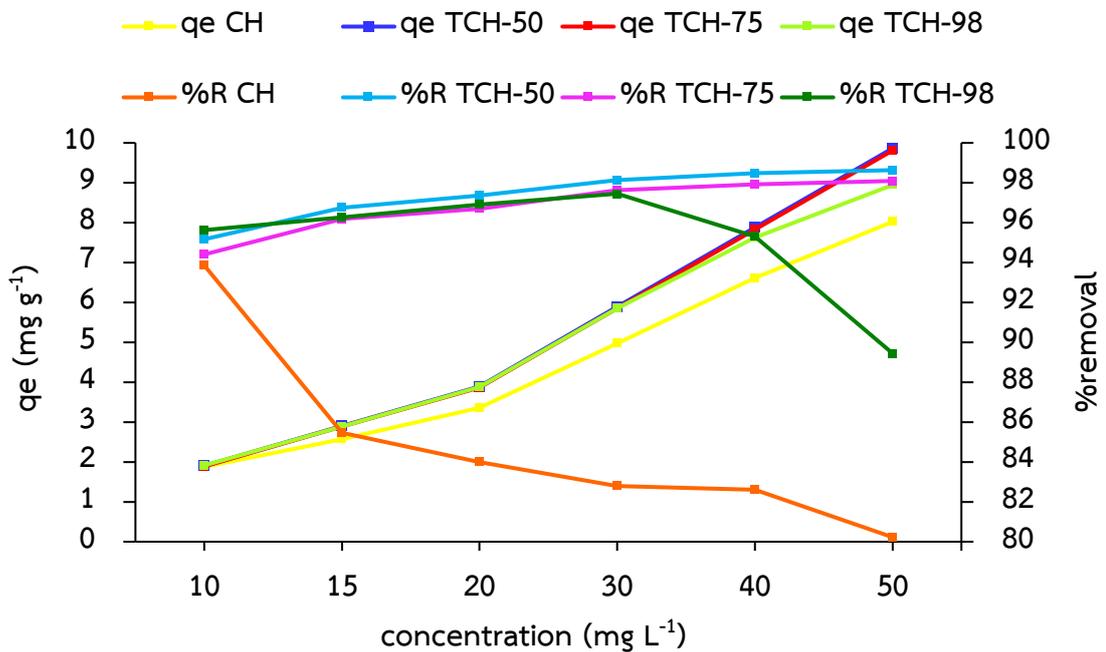
การหาค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์ แสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งพบว่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 4.5 กล่าวได้ว่าที่ $\text{pH} > 4.5$ พื้นผิวของตัวดูดซับมีประจุลบ และสีย้อมคริสตัลไวโอเลตมีประจุบวก จึงทำให้ตัวดูดซับทางชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดสามารถดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตได้ (Tuti Handayania et al., 2024) โดยในการศึกษาการดูดซับทำภายใต้สภาวะค่า pH ประมาณ 6-7 ซึ่งพื้นผิวยังคงสภาพมีประจุลบ



ภาพที่ 13 การวิเคราะห์ค่าประจุสุทธิที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

ผลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 50%, 75% และ 98% เทียบกับความเข้มข้นของสีย้อมที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 14 แสดงผลการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตด้วยตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพดที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ และได้รับการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นที่ต่างกัน ได้แก่ 50%, 75%, และ 98% โดยแต่ละตัวดูดซับแทนด้วยสัญลักษณ์ ได้แก่ CH, TCH-50, TCH-75, และ TCH-98 ตามลำดับ แต่ผลการทดลองใช้ตัวดูดซับจำนวน 0.15 กรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลาสัมผัส 120 นาที โดยเริ่มต้นทดสอบกับสีย้อมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นระหว่าง 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่า CH และ TCHs สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม โดยที่ CH, TCH-50 และ TCH-75 แสดงความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจาก 1.87, 1.90 และ 1.88 (ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็น 8.02, 9.86 และ 9.80 (ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร) มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ขณะที่ TCH-98 ก็มีความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้นจาก 1.91 เป็น 8.94 มิลลิกรัมต่อกรัม (ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้นทั้งตัวดูดซับ CH และ TCHs และความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ TCHs มีค่ามากกว่าตัวดูดซับ CH นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับ



ภาพที่ 14 ผลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ CH, TCH-50, TCH-75, TCH-98 เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่แตกต่างกันของสีย้อม

นอกจากนี้จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า CH และ TCHs มีร้อยละการกำจัดสีย้อมที่แตกต่างกันมาก โดย CH มีร้อยละการกำจัดสีย้อมต่ำกว่า TCHs อย่างเห็นได้ชัด อาจเนื่องมาจากพื้นที่ผิวน้อย และไม่เป็นรูพรุน จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมเข้าไปแทรกซึมได้ยาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ TCH-50, TCH-75, TCH-98 พบว่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อสีย้อมมีความเข้มข้นต่ำ ตัวดูดซับทั้งสามสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่า 95% ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอยู่ในระดับสูงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น สำหรับ TCH-50 และ TCH-75 ยังคงมีร้อยละการกำจัดสีย้อมสูงกว่า 97% แม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นถึง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสีย้อมเดียวกัน TCH-50 มีร้อยละการกำจัดสีย้อมที่สูงกว่า TCH-75 อีกด้วย

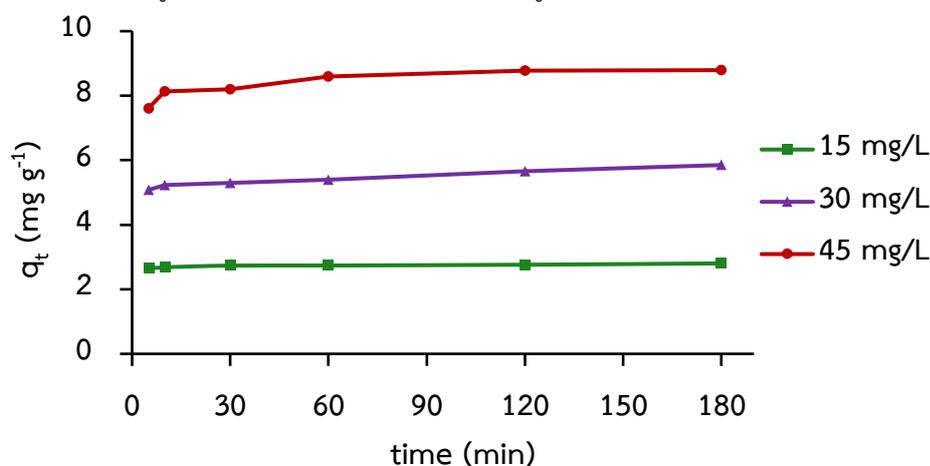
สำหรับ TCH-98 พบว่าร้อยละการกำจัดสีย้อมลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จาก 95.61% เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลือ 89.44% เมื่อความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาจากการลดลงของร้อยละการกำจัดสีย้อมที่ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมคริสตัลไวโอเลตเพิ่มขึ้น TCH-98 ซึ่งผ่านการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นสูง จะมีพื้นที่ผิวมากขึ้น ทำให้สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีในช่วงแรก อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มสูงขึ้น รูพรุนใน TCH-98 อาจเต็มอย่างรวดเร็ว จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง (Bozbeyoglu et al., 2020)

จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า TCH-50 เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต เนื่องจากความสามารถในการดูดซับ และร้อยละในการกำจัดสีย้อมอยู่ในระดับที่ดีกว่า TCH-75, TCH-98 เล็กน้อย และมีข้อได้เปรียบคือใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นเพียง 50% ในการปรับสภาพ และประกอบกับผลการวิเคราะห์ SEM และ FTIR ก่อนหน้าที่บ่งชี้ว่า TCH-50 มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี มีพื้นที่ผิวและความพรุนมากที่สามารถดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตได้ ดังนั้นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการศึกษาจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับต่อไปจึงเลือกใช้ตัวดูดซับ TCH-50

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ TCH-50

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับ TCH-50 งานวิจัยนี้ศึกษาโดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic model) 2 แบบ คือแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order model) และแบบจำลองอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order model) เพื่อหาอันดับของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ค่าการดูดซับสีย้อมที่สถานะสมดุล และค่าคงที่อัตราของการดูดซับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตที่มีต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ TCH-50 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทดลองอัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นและค่อย ๆ ลดลงจนคงที่เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 120 นาที นอกจากนี้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่สูงขึ้น ทำให้ปริมาณการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล (q_e) เพิ่มขึ้นตามแสดงในภาพที่ 15 เนื่องจากการเพิ่มจำนวนโมเลกุลสีย้อมในสารละลายทำให้มีโอกาสสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการดูดซับโมเลกุลสีย้อมบนเปลือกข้าวโพดมากขึ้น และเพิ่มโอกาสในการชนของโมเลกุลสีย้อมกับตำแหน่งที่ว่างบนตัวดูดซับ จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้ (Oloo et al., 2020)



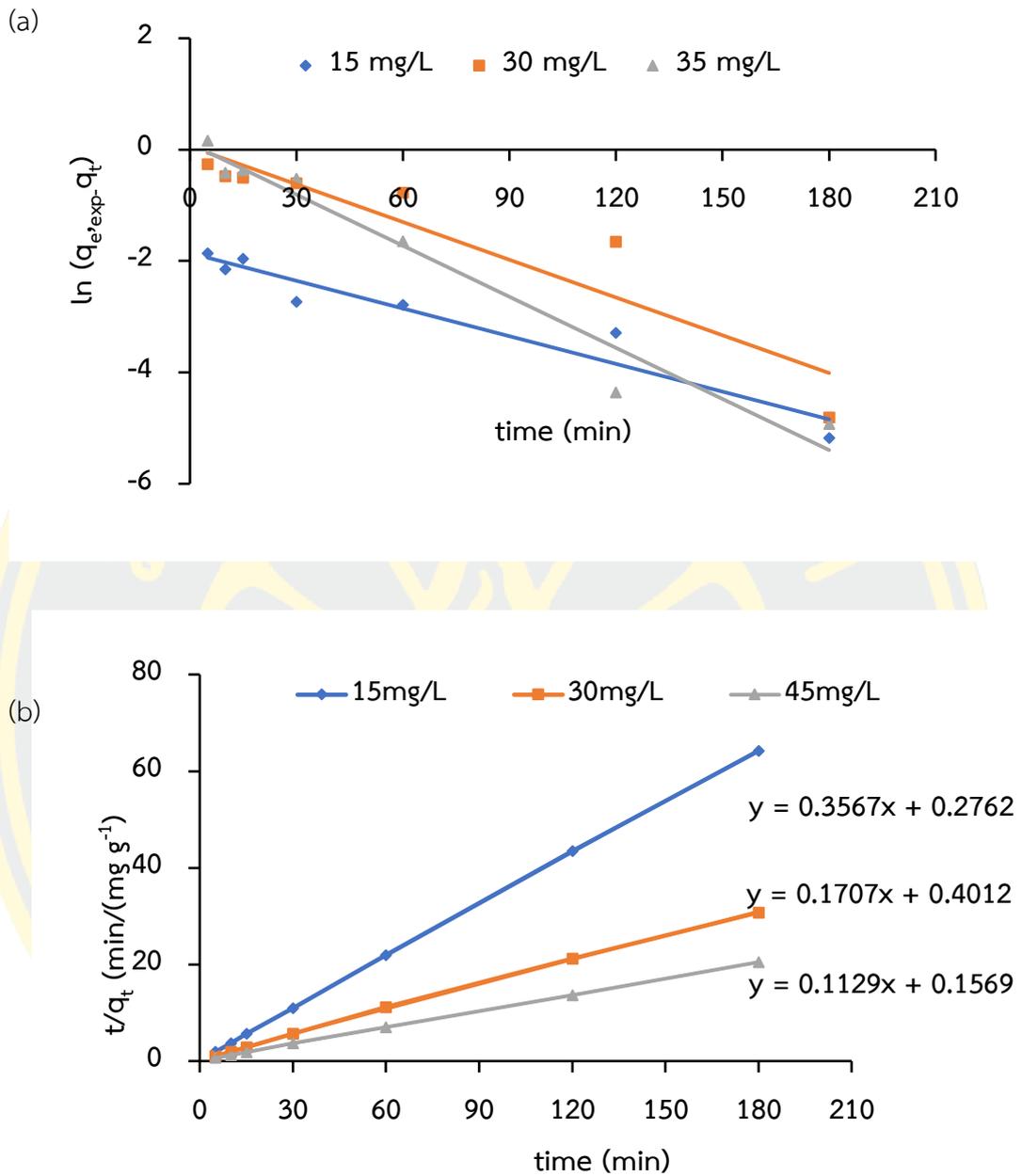
ภาพที่ 15 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับ TCH-50 โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 0.15 g และอุณหภูมิ 30 °C

ผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือนซึ่งทำได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง $\ln(q_{e, \text{exp}} - q_t)$ กับ t ดังภาพที่ 16 (a) คำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) จากความชันและค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) จากจุดตัดแกน y ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการทดลองที่ได้พบว่าข้อมูลการดูดซับทุกความเข้มข้นเริ่มต้น มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.8384-0.9748 ซึ่งต่ำกว่า 0.99 และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) กับค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e, \text{exp}}$) พบว่ามีค่าแตกต่างกัน แสดงว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตไม่สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองอันดับสองเสมือนซึ่งทำได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง t/qt กับ t ดังภาพที่ 16 (b) มีความเป็นเส้นตรง โดยค่า R^2 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.9992 – 0.9999 คำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_2) จากจุดตัดแกน y และค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) จากความชัน ดังแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e, \text{exp}}$) เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_2) ที่คำนวณได้มีค่าลดลง แต่ค่า $q_{e, \text{cal}}$ มีค่าสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นจลนพลศาสตร์การดูดซับของสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก (TCH-50) เป็นไปตามแบบจำลองอันดับสองเสมือนในทุกความเข้มข้น

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)

ความเข้มข้น (mg L^{-1})	15	30	45
แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน			
k_1 (min^{-1})	1.9976	0.2766	-0.1092
$q_{e, \text{cal}}$ (mg g^{-1})	0.14	0.76	1.12
$q_{e, \text{exp}}$ (mg g^{-1})	2.80	5.85	8.79
R^2	0.8384	0.9613	0.9597
แบบจำลองอันดับสองเสมือน			
k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	0.8584	0.1250	0.0812
$q_{e, \text{cal}}$ (mg g^{-1})	2.77	5.68	8.86
R^2	0.9999	0.9992	0.9999



ภาพที่ 16 ผลของความเข้มข้นต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50

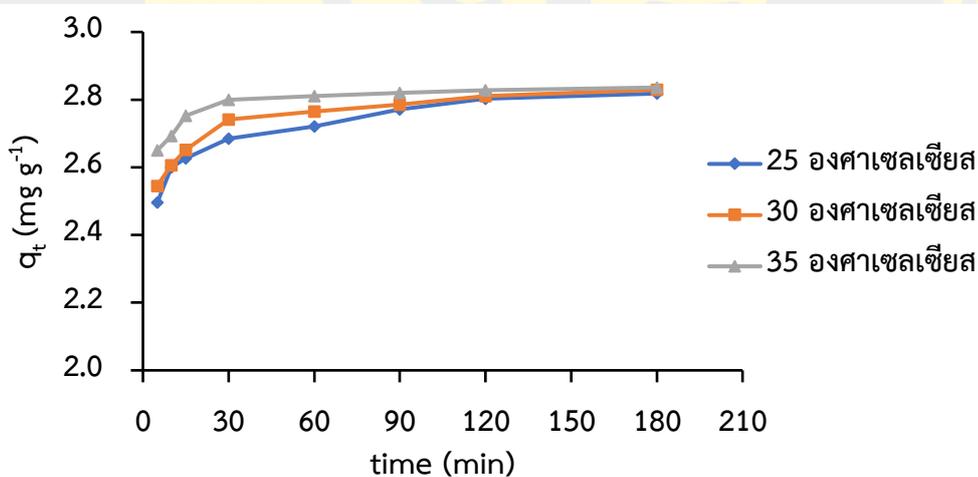
(a) แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order model)

(b) แบบจำลองอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order model)

ผลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับ TCH-50

จากการศึกษาโดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ 2 แบบ คือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน และแบบจำลองอันดับสองเสมือน เพื่อหาอันดับของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม ค่าการดูดซับสีย้อมที่สภาวะสมดุล ค่าคงที่อัตราของการดูดซับ และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a)

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อจลนพลศาสตร์ของการดูดซับบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก ณ อุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตเท่ากับ 30 mg L^{-1} พบว่าทุกอุณหภูมิ ในช่วงเวลาเริ่มต้น อัตราการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไป อัตราการดูดซับเริ่มมีค่าที่ลดลงและสุดท้ายก็เข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งเกิดขึ้นที่ระยะเวลาการดูดซับ 120 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ปริมาณการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่สภาวะสมดุล (q_e) ก็มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งปรากฏในภาพที่ 17 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะเพิ่มพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีการเคลื่อนที่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลสีย้อมกับตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากกระบวนการนี้เข้าสู่สมดุลอย่างรวดเร็ว ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงที่กำหนดมีผลเล็กน้อยต่อการดูดซับ (Rápó & Ton, 2021)



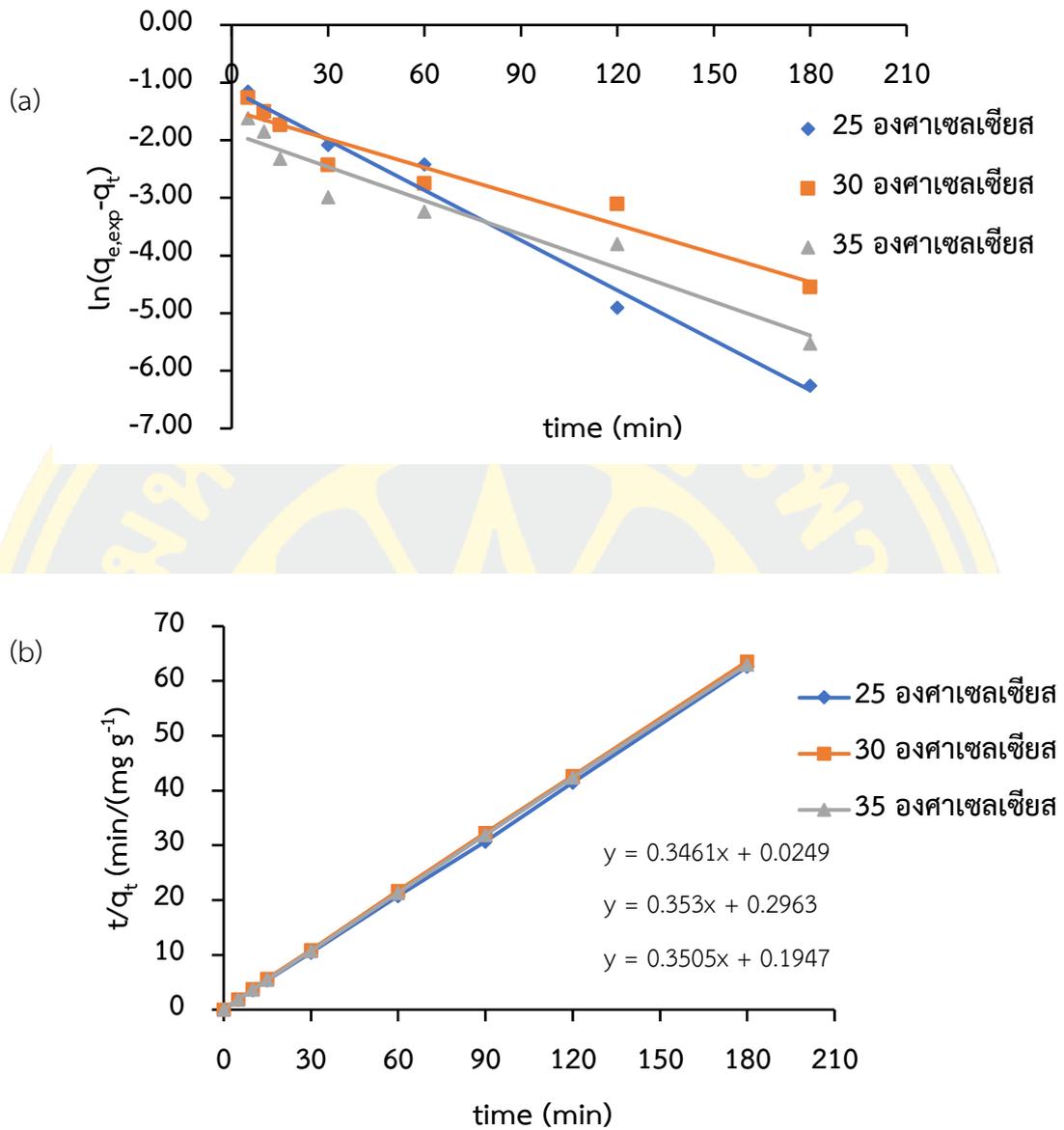
ภาพที่ 17 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)

ผลจากการศึกษาจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือนซึ่งทำได้โดยการเขียนกราฟระหว่าง $\ln(q_{e, \text{exp}} - q_t)$ กับ t ดังภาพที่ 18 (a) คำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) จากความชันและค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) จากจุดตัดแกน y ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์การศึกษาอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)

Temperature (°C)	25	30	35
แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน			
k_1 (min ⁻¹)	0.3428	0.4206	0.6310
$q_{e, \text{cal}}$ (mg g ⁻¹)	1.12	0.31	0.23
$q_{e, \text{exp}}$ (mg g ⁻¹)	2.81	2.83	2.85
R^2	0.9500	0.8362	0.8223
แบบจำลองอันดับสองเสมือน			
k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	0.3428	0.4206	0.6310
$q_{e, \text{cal}}$ (mg g ⁻¹)	2.82	2.83	2.85
$q_{e, \text{exp}}$	2.81	2.83	2.85
R^2	0.9999	0.9999	0.9999
$1/T$ (K ⁻¹)	0.0034	0.0033	0.0032
$\ln k_2$	-1.0707	-0.8662	-0.4605
E_a (kJ mol ⁻¹)	46.45		
R^2	0.9641		

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ข้อมูลการดูดซับทุกอุณหภูมิ มีค่า R^2 อยู่ในช่วงระหว่าง 0.8223 - 0.9500 ซึ่งต่ำกว่า 0.99 และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, \text{cal}}$) กับค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e, \text{exp}}$) พบว่ามีค่าแตกต่างกัน แสดงว่าจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตไม่สอดคล้องกับแบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน



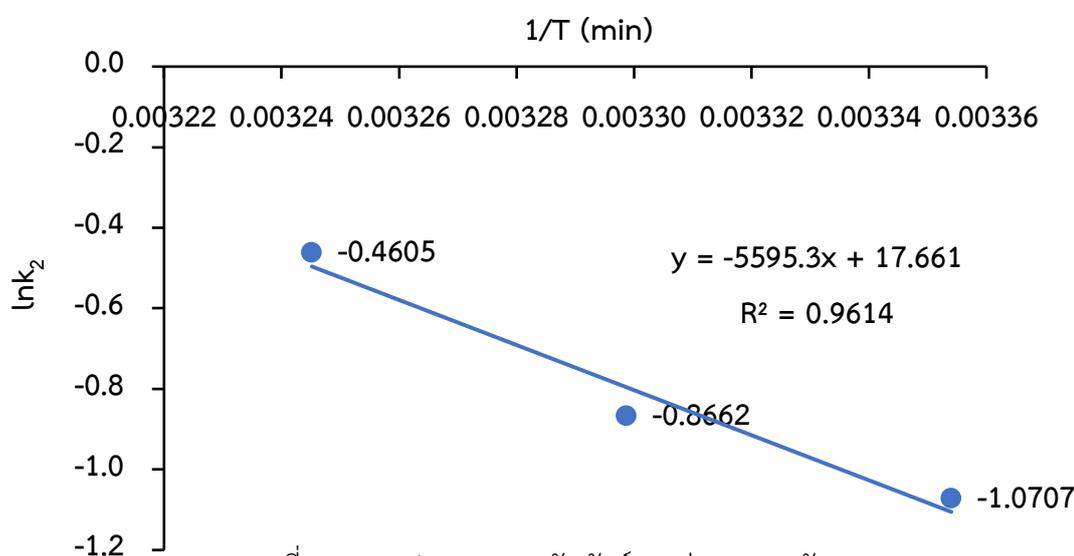
ภาพที่ 18 ผลของอุณหภูมิต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50

(a) แบบจำลองอันดับหนึ่งเสมือน (Pseudo-first-order model)

(b) แบบจำลองอันดับสองเสมือน (Pseudo-second-order model)

จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองอันดับสองเสมือน ซึ่งทำโดยการเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t ดังภาพที่ 18 (b) คำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_2) จากจุดตัดแกน y และค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, cal}$) จากความชัน แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณ ($q_{e, cal}$) มีค่าใกล้เคียงกับค่าการดูดซับที่สมดุลที่ได้จากการทดลอง ($q_{e, exp}$) กราฟที่ได้ตามแบบจำลองอันดับสองเสมือนมีความเป็นเส้นตรง โดยค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.9999 ดังนั้นจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก (TCH-50) ทุกอุณหภูมิสอดคล้องกับแบบจำลองอันดับสองเสมือน และค่าคงที่อัตราการดูดซับแสดงดังตารางที่ 2 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_2) ที่คำนวณได้มีค่าเพิ่มขึ้น และค่า $q_{e, cal}$ มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าที่อุณหภูมิสูง เกิดการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมระหว่างในสารละลายไปยังบนผิวของตัวดูดซับ ค่าปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นการดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดความร้อน เพราะความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น

การคำนวณพลังงานกระตุ้น (E_a) สำหรับการดูดซับคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50 ทำโดยการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ เทียบกับ $1/T$ ตามสมการ Arrhenius แสดงดังภาพที่ 19

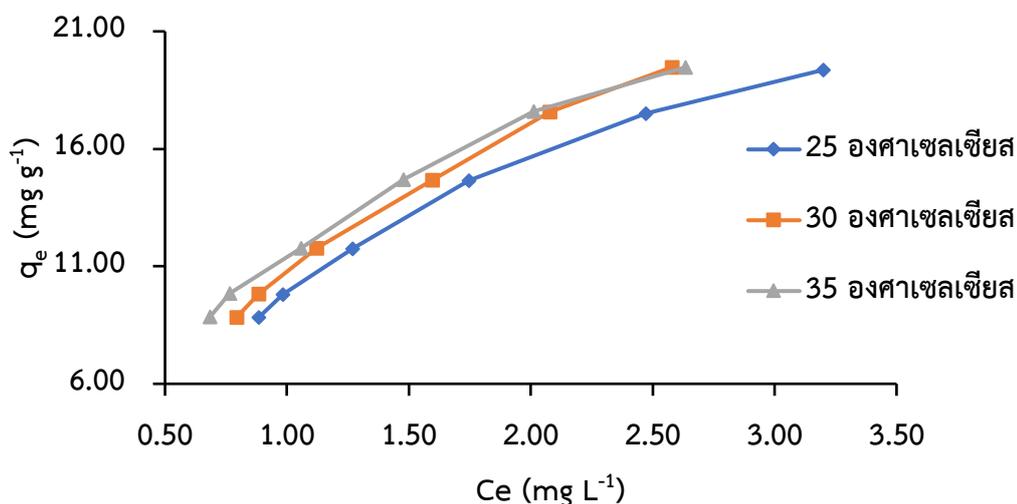


ภาพที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_2$ กับ $1/T$

จากภาพที่ 19 คำนวณพลังงานกระตุ้น (E_a) สำหรับการดูดซับคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50 เท่ากับ $46.45 \text{ kJ mol}^{-1}$ กล่าวได้ว่า การดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก (TCH-50) เป็นการดูดซับทางกายภาพ (Doğan et al., 2009; Gemici et al., 2023; Inglezakisa & Zorpasb, 2012)

การศึกษาสมมูลและไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ TCH-50

จากการศึกษาสมมูลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก (TCH-50) ที่อุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 20

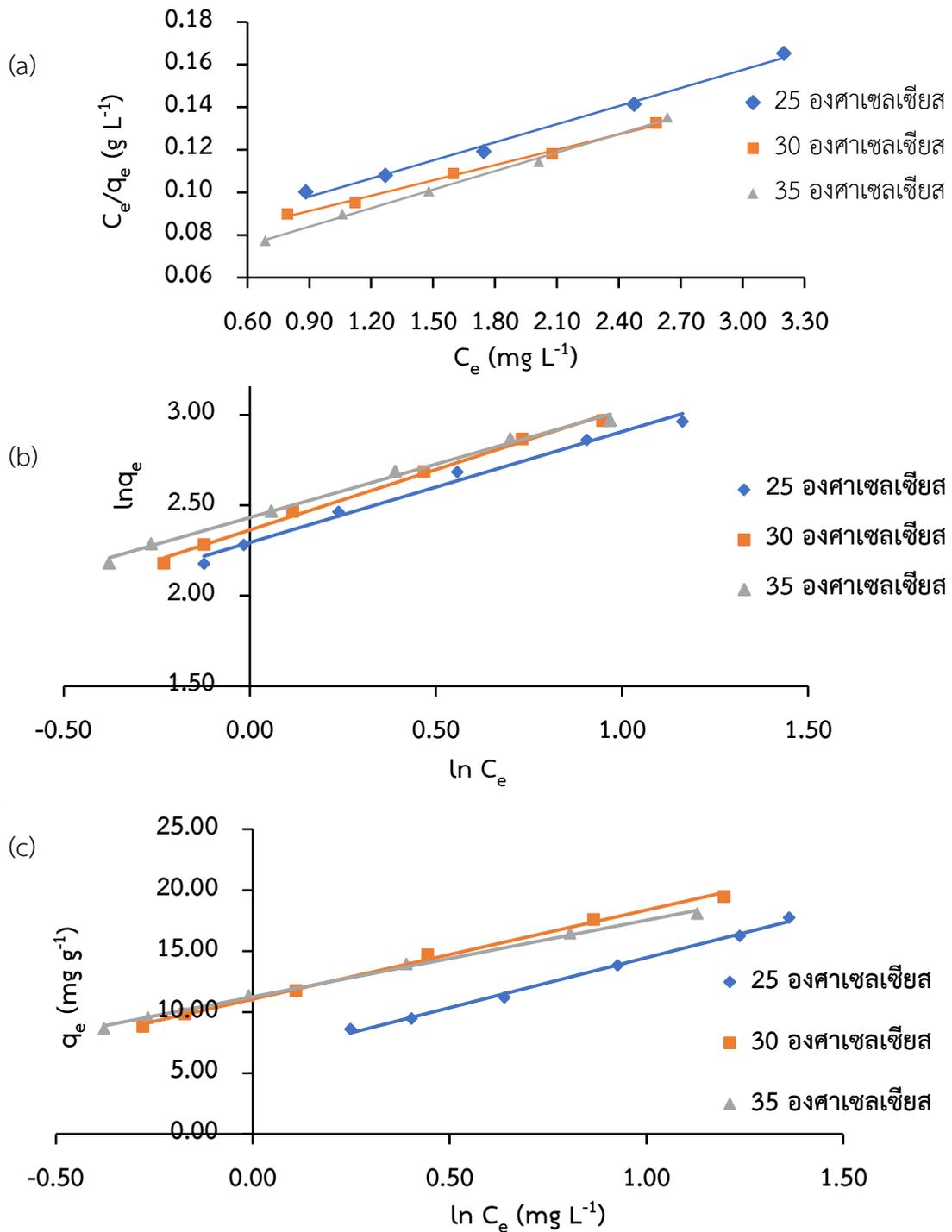


ภาพที่ 20 สมมูลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ (TCH-50)

พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลมีค่าเพิ่มขึ้น พิจารณาแต่ละอุณหภูมิ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายมีค่ามาก บริเวณที่เกิดการดูดซับ (Active sites) ของตัวดูดซับถูกล้อมรอบด้วยไอออนของสีย้อมมากกว่า ทำให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้มาก และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การดูดซับที่สภาวะสมดุลเพิ่มขึ้น แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาสมมูลการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพพื้นผิว ด้วยกรดซัลฟิวริก (TCH-50) นี้ วิเคราะห์ผ่านไอโซเทอมการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้แบบจำลอง 3 แบบในการเปรียบเทียบ ได้แก่ แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า พื้นผิวตัวดูดซับมีความสม่ำเสมอทุกจุด และการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ไม่มีอันตรกิริยาระหว่าง โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ และแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดริช ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าพื้นผิวตัวดูดซับไม่สม่ำเสมอ แต่ละตำแหน่งบนพื้นผิวมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานของการดูดซับ ที่แตกต่างกัน และไอโซเทอมของเทมคิน ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า การดูดซับของสารละลายบนพื้นผิว ของแข็ง โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งทำให้ความร้อนของการดูดซับลดลงอย่าง เป็นเส้นตรงตามระดับการครอบครองพื้นผิวหรือสัดส่วนการปกคลุมผิวที่เพิ่มขึ้น จากนั้นนำไอโซเทอมแต่ละ แบบจำลองมาใช้วิเคราะห์สมมูลของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือก ข้าวโพดแสดงดังภาพที่ 21

จากผลการศึกษาไอโซเทอมของสมมูลการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพ จากเปลือกข้าวโพด (TCH-50) ที่อุณหภูมิในการดูดซับต่างกัน แสดงดังภาพที่ 21 (a-c) พบว่า สมการ ของแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ มีค่า R^2 มากกว่าสมการของแบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดริช และเทมคิน โดยสมการของแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์มีค่า R^2 มากกว่า 0.99 และเมื่อพิจารณา ค่า R_L มีค่าอยู่ในช่วง 0.0239 – 0.0302 โดย $0 < R_L < 1$ แสดงว่า ข้อมูลการทดลองการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับเปลือกข้าวโพดเป็นไปตามสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์เป็นอย่างดี ทุกอุณหภูมิ แสดงว่า ในกระบวนการดูดซับบนพื้นผิวเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic attractions) ระหว่างโมเลกุลสีย้อมที่มีประจุบวกและตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่มีประจุลบ และไม่สามารถมีโมเลกุลสีย้อมมาดูดซับเพิ่มขึ้นได้หรือบริเวณที่มีการดูดซับแล้วจะไม่มี การดูดซับซ้อนทับได้อีก แสดงว่า เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว และพื้นผิวมีความสม่ำเสมอ (Omer et al., 2022; Patil et al., 2022) และจากตารางที่ 3 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลต สูงสุด (q_{max}) มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม โดยมีค่าเท่ากับ 19.36 19.46 และ 19.47 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาไม่ได้แตกต่างกันมาก จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคริสตัลไวโอเลตสูงสุด (q_{max}) ไม่ได้แสดงความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้จากแบบจำลองไอโซเทอมของเทมคิน ค่า b_T เป็นบวก แสดงว่า การดูดซับ เป็นกระบวนการดูดความร้อน หากค่า b_T มีค่าน้อยกว่า 8 kJ mol^{-1} บ่งชี้ว่าเป็นการดูดซับทาง กายภาพ และค่า b_T อยู่ในช่วงระหว่าง $8 - 16 \text{ kJ mol}^{-1}$ แสดงว่าการดูดซับเกิดผ่านการแลกเปลี่ยน ไอออน (Ion exchange) และ หากค่า b_T มีค่ามากกว่า 16 kJ mol^{-1} แสดงว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Be et al., 2021) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ การดูดซับของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ ชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพ (TCH-50) เป็นการดูดซับทางกายภาพ



ภาพที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับ สีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับ (TCH-50) ที่อุณหภูมิ 25 30 และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

(a) แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm model)

(b) แบบจำลองไอโซเทอมของฟรุนดริช (Freundlich isotherm model)

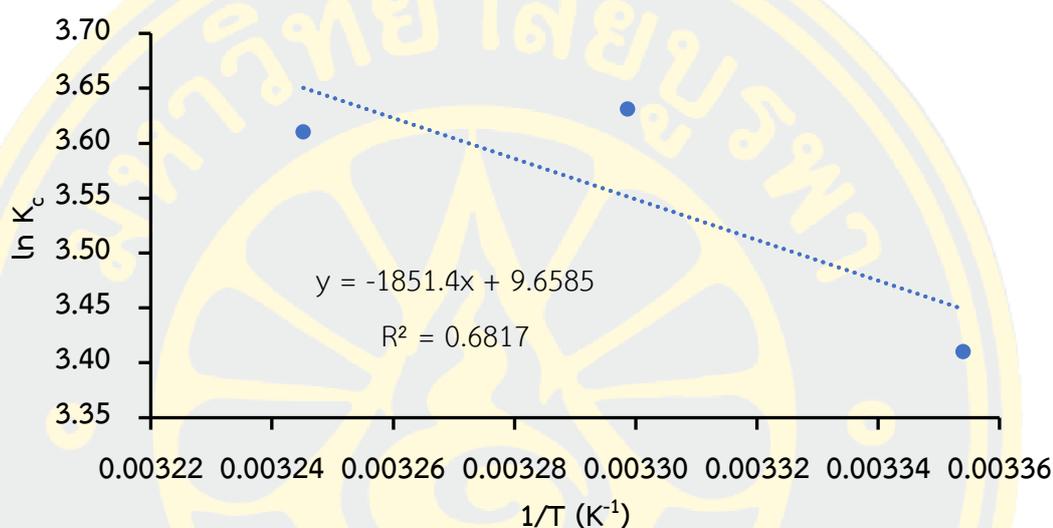
(c) แบบจำลองไอโซเทอมของเทมคิน (Temkin isotherm model)

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของสมดุลการดูดซับสี ย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temperature (°C)	25	30	35
Langmuir model			
q_m (mg g ⁻¹)	19.36	19.48	19.47
K_L (L mg ⁻¹)	0.7124	0.7417	0.9057
R_L	0.0302	0.0291	0.0293
R^2	0.9948	0.9955	0.9963
Freundlich model			
K_F (mg g ⁻¹)	1.2210	10.827	11.3793
n	1.42	1.88	1.94
R^2	0.9867	0.9761	0.9787
Temkin model			
K_T (L mg ⁻¹)	0.9073	0.9506	0.9951
b_T (J mol ⁻¹)	0.1831	0.2702	0.1763
B	13.5380	9.3278	14.5318
R^2	0.9864	0.9818	0.9930

การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับ TCH-50

อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ (แกน y) กับ $1/T$ (แกน x) ภายใต้ช่วงอุณหภูมิ 25 - 35 °C โดยค่า K_c คือค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ



ภาพที่ 22 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับ (TCH-50)

จากภาพที่ 22 การศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด ได้สมการเส้นตรง $y = -1851.4x + 9.6585$, $R^2 = 0.6817$ โดยมีค่าความชัน และค่าจุดตัดแกน y เท่ากับ -1851.4 K และ 9.6585 ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ที่สภาวะมาตรฐาน (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีที่สภาวะมาตรฐาน (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีที่สภาวะมาตรฐาน (ΔS°) แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ทางการศึกษาอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด (TCH-50)

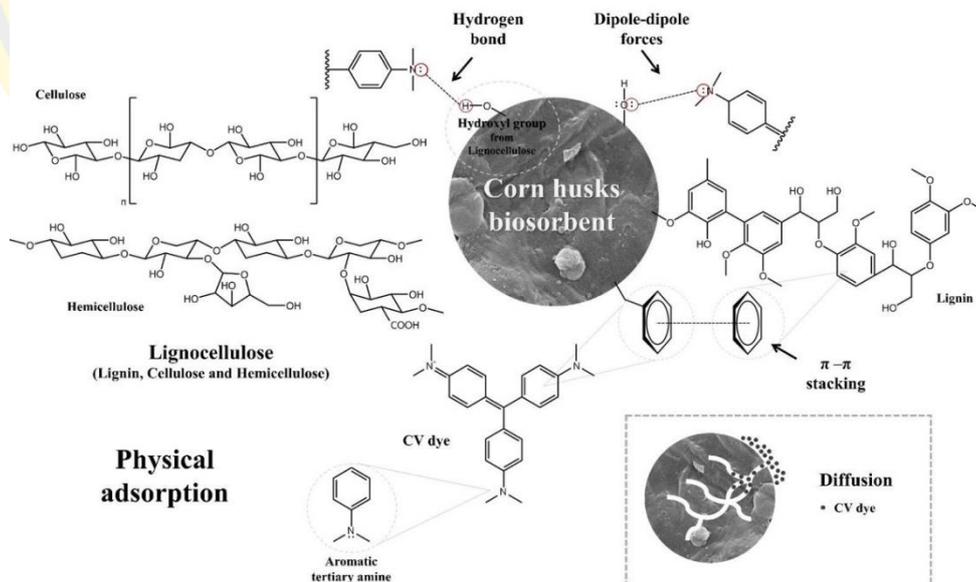
Temperature (°C)	ΔG° (kJ mol ⁻¹)	ΔH° (kJ mol ⁻¹)	ΔS° (J mol ⁻¹ K ⁻¹)
25	-8.45		
30	-9.15	15.39	80.30
35	-9.24		

ค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่บ่งชี้ถึงแรงกระทำระหว่างโมเลกุลระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับจากงานวิจัยก่อนหน้าแสดงได้ดังนี้ หากค่า ΔH° อยู่ในช่วง 4 - 10 kJ mol⁻¹ แสดงว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุลเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ หากค่า ΔH° อยู่ในช่วง 2 - 40 kJ mol⁻¹ แสดงว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุล เป็น พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen-bonding forces) หากค่า ΔH° อยู่ในช่วง 2 - 29 kJ mol⁻¹ แสดงว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุล เป็น แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Dipole-dipole interaction) และหากค่า $\Delta H^\circ > 60$ kJ mol⁻¹ แสดงว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุลเป็น พันธะเคมี (Chemical bonding forces) ในทำนองเดียวกัน หากค่า ΔG° อยู่ในช่วง -20 - 0 kJ mol⁻¹ แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพ และ -400 - 80 kJ mol⁻¹ แสดงว่า กระบวนการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี (Qiu et al., 2012; Zhou et al., 2014) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการศึกษาด้านอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตด้วยตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด จากตารางที่ 4 พบว่าค่า ΔG° มีค่าอยู่ในช่วง -8.45 ถึง -9.15 kJ mol⁻¹ แสดงถึงกระบวนการเป็นการดูดซับทางกายภาพที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ สำหรับ ΔH° มีค่าเท่ากับ 15.39 kJ mol⁻¹ แสดงว่า แสดงถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบดูดความร้อน และเกี่ยวข้องกับแรงกระทำทางกายภาพ (Physical interaction) ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน และแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic forces) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับยืนยันว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพที่ดูดความร้อนและเกิดขึ้นได้เองซึ่งเป็นไปตามพารามิเตอร์ b_T ของแบบจำลองเทมคิน แต่อย่างไรก็ตามสมมูลของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาก่อนหน้าที่ได้นำเอาเศษไม้ของต้น *Salix alba* L. (SA) และ *Salix babylonica* L. (SB) มาใช้ดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตออกจากสารละลายน้ำ โดยแสดงค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) เท่ากับ 17.73 kJ mol⁻¹ (SA) และ 16.97 kJ mol⁻¹ (SB) สมดุลการดูดซับอธิบายได้ดีด้วยแบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ และ ΔH° มีค่า 5.40 - 5.72 kJ mol⁻¹ ของตัวดูดซับ SA และ SB ตามลำดับที่สอดคล้องกับการดูดซับทางกายภาพ และค่า ΔG° มีค่าเป็นลบทั้งหมด (Gemici et al., 2023)

จากตารางที่ 4 ΔS° มีค่าเท่ากับ 80.30 J mol⁻¹ K⁻¹ แสดงถึงการเกิดความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้นในกระบวนการดูดซับ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการรวมตัวของโมเลกุลสีย้อม (Dye aggregation) กลายเป็นไดเมอร์หรือโพลิเมอร์ในสารละลายก่อนการดูดซับ (Lueck et al., 1992) และเมื่อโมเลกุลของสีย้อมเกิดการหลุดออกจากไดเมอร์หรือโพลิเมอร์ กลายเป็นโมเลกุลเดี่ยวในระหว่างเกิดการดูดซับ ทำให้มีความอิสระในการเคลื่อนที่มากขึ้น ซึ่งนำไปสู่ความไม่เป็นระเบียบที่สูงขึ้น และอีกเหตุผลหนึ่ง ในสารละลายสีย้อม ตัวทำละลาย เช่น น้ำ จะล้อมรอบโมเลกุลของสีย้อมในกระบวนการที่เรียกว่า Solvation ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวทำละลายที่ล้อมรอบและความเป็นระเบียบในระบบ เมื่อสีย้อมเกิดการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับโมเลกุลของสีย้อมจึงจำเป็นต้องหลุดออกจากการจับกับโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบ ส่งผลให้ความเป็นระเบียบในระบบลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพแบบดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นเองได้ และเพิ่มความไม่เป็นระเบียบ

กลไกการดูดซับ

จากค่าพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ค่า ΔH° สามารถบ่งชี้รูปแบบของอันตรกิริยาหรือแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับได้ เมื่อพิจารณา ค่า ΔH° ซึ่งมีค่าเท่ากับ $15.39 \text{ kJ mol}^{-1}$ ภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด แสดงว่า กระบวนการดูดซับเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาหรือแรงกระทำทางกายภาพ ได้แก่ พันธะไฮโดรเจน และแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (Qiu et al., 2012; Zhou et al., 2014) และเมื่อนำข้อมูลดังกล่าวร่วมกับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR เสนอแนะได้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตกับตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด อาจเกี่ยวข้องกับพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอม H ในหมู่ O-H ของโครงสร้างลิกนินเซลลูโลส ที่ประกอบด้วย ลิกนิน เซลลูโลส หรือเอมิเซลลูโลส กับอเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอม N ในหมู่ Aromatic tertiary amine ของโมเลกุลสีย้อม แรงดึงดูดระหว่างขั้วของอะตอม N ในหมู่ Aromatic tertiary amine ของโมเลกุลสีย้อมกับอเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอม O ในหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด และอาจเกี่ยวข้องกับแรงกระทำระหว่างพันธะพาย-พาย (π - π stacking) ที่เกิดจากวงอะโรมาติกของโมเลกุลลิกนินกับโมเลกุลสีย้อม และอาจมีแรงกระทำทางไฟฟ้าสถิตเพิ่มเติมระหว่างประจุบวกของโมเลกุลสีย้อมกับประจุลบที่พื้นผิวของตัวดูดซับ กลไกการดูดซับแสดงดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 กลไกการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมและคุณสมบัติของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน แล้วนำมาศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา โดยวิเคราะห์ผ่านภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบนพื้นผิวของตัวดูดซับของเปลือกข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 50% (TCH-50) เป็นพื้นผิวที่โครงสร้างที่มีรูพรุนชัดเจน ซึ่งทำให้สีย้อมมีโอกาสแพร่เข้าไปในตัวดูดซับมากขึ้น จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับสารละลายสีย้อมบนตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด ได้แก่ พันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างอะตอมไฮโดรเจนในกลุ่ม O-H รวมถึงอิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของอะตอมออกซิเจนที่แสดงถึงประจุลบในหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพด ที่สามารถทำให้เกิดการดึงดูดทางไฟฟ้ากับประจุบวกของอะตอมไนโตรเจนในกลุ่ม Aromatic tertiary amine ของโมเลกุลสีย้อมได้ แสดงให้เห็นว่า TCH-50 จึงเหมาะแก่การนำมาใช้ในการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตมากที่สุด เพราะในการปรับสภาพใช้กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าตัวดูดซับตัวอื่น ๆ

เมื่อศึกษาเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการกำจัด CV สูงสุด ได้มาจากตัวดูดซับ TCH-50 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ TCH-75 และ TCH-98 พบว่าความสามารถในการดูดซับของ TCH-50 เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่นานขึ้น และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่สูงขึ้น แต่จะลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ของการดูดซับ ได้แก่ ปริมาณตัวดูดซับชีวภาพ TCH-50 ที่ 0.1500 กรัม ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ให้ผลเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการกำจัดสูงสุดของสีย้อม CV เป็น 95% - 98% ในช่วงความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นที่ 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่ากระบวนการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเหมือน ซึ่งเข้าสู่สมดุลภายใน 120 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ค่าการดูดซับสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิ คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น และจากค่าคงที่อัตรา (k_2) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงว่า ปฏิกิริยาการดูดซับเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน ซึ่งจากค่าคงที่อัตรา (k_2) ทำให้สามารถคำนวณได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ เท่ากับ $46.45 \text{ kJ mol}^{-1}$

และจากการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเลตที่ปรับสภาพพื้นผิวด้วยกรดซัลฟิวริก พบว่า สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์มากกว่าสมการไอโซเทอมของฟรุนดริช และเทมคิน มีค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทาลปี (ΔH°) มีค่าเท่ากับ $15.39 \text{ kJ mol}^{-1}$ และมีค่าเป็นบวก แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อน การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปี (ΔS°) มีค่าเท่ากับ $80.30 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ แสดงว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นมีความไม่เป็นระเบียบสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระกิบส์ (ΔG°) มีค่าเป็นลบทั้งหมด แสดงว่า กระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้เองภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่กำหนด

ดังนั้น การดูดซับที่เกิดขึ้นจึงเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ความสามารถในการดูดซับสูงสุด มีค่า $19.36 - 19.47$ มิลลิกรัมต่อกรัม โดยภาพรวมแล้ว งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของตัวดูดซับชีวภาพจากเปลือกข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนต่ำสำหรับการกำจัดสีย้อมคริสตัลไวโอเลตในสารละลายน้ำ ก่อให้เกิดประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องบำบัดน้ำเสีย และส่งผลให้เกิดความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ ควรมีการศึกษาค่าพื้นที่ผิว BET ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย เป็นต้น
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการนำตัวดูดซับทางชีวภาพกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อความคุ้มค่าและความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

- Ahmed, M., Mashkoor, F., & Nasar, A. (2020). Development, characterization, and utilization of magnetized orange peel waste as a novel adsorbent for the confiscation of crystal violet dye from aqueous solution *Groundwater for Sustainable Development*, 10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100322>
- Al-Harby, N. F., Albahly, E. F., & Mohamed, N. A. (2021). Kinetics, Isotherm and Thermodynamic Studies for Efficient Adsorption of Congo Red Dye from Aqueous Solution onto Novel Cyanoguanidine-Modified Chitosan Adsorbent. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13244446>
- Anjali Sharma, A. T., Jyoti Singh, B.S. Chhikara. (2019). Biosorption of metal toxicants and other water pollutants by Corn (Maize) plant: A comprehensive review. *Journal of Integrated SCIENCE& TECHNOLOGY*, 7(2), 19-28.
- Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., & Kukwa, D. T. (2020). *Valorization of Lignocellulosic and Microalgae Biomass*. intechopen.
- Be, S., Vinitnantharat, S., & Pinisakul, A. (2021). Effect of Mangrove Biochar Residue Amended Shrimp Pond Sediment on Nitrogen Adsorption and Leaching. *Sustainability*, 13. <https://doi.org/10.3390/su13137230>
- Bozbeyoglu, P., Duran, C., Baltaci, C., & Gundogdu, A. (2020). Adsorption Of Methylene Blue from Aqueous Solution with Sulfuric Acid Activated Corn Cobs: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamics Assessment. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 7(3), 239-256. [https://doi.org/DOI: 10.17350/HJSE19030000193](https://doi.org/DOI:10.17350/HJSE19030000193)
- Center, M. I. (2012). *UV-visible Spectrophotometer*. สืบค้นจาก https://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=41&id=46
- Chieng, B. W., Lee, S. H., Ibrahim, N. A., Then, Y. Y., & Loo, Y. Y. (2017). Isolation and Characterization of Cellulose Nanocrystals from Oil Palm Mesocarp Fiber.

Polymers, 9. <https://doi.org/10.3390/polym9080355>

Doğan, M., Abak, H., & Alkan, M. (2009). Adsorption of methylene blue onto hazelnut shell: Kinetics, mechanism and activation parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 164. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jhazmat.2008.07.155>

Gemici, B. T., Ozel, H. U., & Ozel, H. B. (2023). Adsorption property and mechanism of forest wastes based natural adsorbent for removal of dye from aqueous media. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 13653–13665. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03265-8>

Georgin, J., Dotto, G. L., Allasia, D., Oliveira, M. L. S., Franco, D. S. P., & Netto, M. S. (2020). Evaluation of *Ocotea puberula* bark powder (OPBP) as an effective adsorbent to uptake crystal violet from colored effluents: alternative kinetic approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 25727–25739. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-020-08854-6>

Gupta, S. S., & Bhattacharyya, K. G. (2011). Kinetics of adsorption of metal ions on inorganic materials: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.12.004>

Homagai, P. L., Poudel, R., Poudel, S., & Bhattarai, A. (2022, Apr). Adsorption and removal of crystal violet dye from aqueous solution by modified rice husk. *Heliyon*, 8(4), e09261. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09261>

Hu, L., Fang, X., Du, M., Luo, F., & Guo, S. (2020). Hemicellulose-Based Polymers Processing and Application. *American Journal of Plant Sciences*, 11, 2066-2079. <https://doi.org/10.4236/ajps.2020.1112146>

Inglezakisa, V. J., & Zorpasb, A. A. (2012). Heat of adsorption, adsorption energy and activation energy in adsorption and ion exchange systems. *Desalination and Water Treatment*, 39. <https://doi.org/10.5004/dwt.2012.3000>

Jazi, M. E., Narayanan, G., Aghabozorgi, F., Farajidizaji, B., Aghaei, A., Kamyabi, M. A., Navarathna, C. M., & Mlsna, T. E. (2019). Structure, chemistry and

physicochemistry of lignin for material functionalization. *SN Applied Sciences*, 1.
<https://doi.org/10.1007/s42452-019-1126-8>

Karunakaran, K., Usman, M., & Sillanpää, M. (2022). A Review on Superadsorbents with Adsorption Capacity ≥ 1000 mg g⁻¹ and Perspectives on Their Upscaling for Water/Wastewater Treatment. *Sustainability*, 14.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su142416927>

Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. *Polymer Science*, 44.
<https://doi.org/10.1002/anie.200460587>

Lakshmi, U. R., Srivastava, V. C., Mall, I. D., & Lataye, D. H. (2009). Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. *Journal of Environmental Management*, 90.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.01.002>

Lueck, H. B., Rice, B. L., & Mchale, J. L. (1992). Aggregation of triphenylmethane dyes in aqueous solution: dimerization and trimerization of crystal violet and ethyl violet. *Spectrochimica Acta*, 48(6), 819-828. [https://doi.org/10.1016/0584-8539\(92\)80076-9](https://doi.org/10.1016/0584-8539(92)80076-9)

Oloo, C. M., Onyari, J. M., Wanyonyi, W. C., N.Wabombaa, J., & Muinde, V. M. (2020). Adsorptive removal of hazardous crystal violet dye from aqueous solution using *Rhizophora mucronata* stem-barks: Equilibrium and kinetics studies. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 64-72.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enceco.2020.05.001>

Omer, A. s., Naeem, G. A. E., Abd-Elhamid, A. I., Farahat, O. O. M., El-Bardan, A. A., Soliman, H. M. A., & Nayl, A. A. (2022). Adsorption of crystal violet and methylene

blue dyes using a cellulose-based adsorbent from sugarcane bagasse: characterization, kinetic and isotherm studies. *Journal of Materials Research and Technology*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.045>

Osman, A. I., El-Monaem, E. M. A., Elgarahy, A. M., Aniagor, C. O., Hosny, M., Farghali, M., Rashad, E., Ejimofor, M. I., López-Maldonado, E. A., Yap, I. I. P. S., Rooney, D. W., & Eltaweil, A. S. (2023). Methods to prepare biosorbents and magnetic sorbents for water treatment: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01603-4>

Paska, O. M., Păcurariu, C., & Muntean, S. G. (2014). Kinetic and thermodynamic studies on methylene blue biosorption using corn-husk. *RSC Advances*, 4. <https://doi.org/10.1039/c4ra10504d>

Patil, S. A., Kumbhar, P. D., Satvekar, B. S., Harale, N. S., Bhise, S. C., Patil, S. K., Sartape, A. S., Kolekar, S. S., & Anuse, M. A. (2022). Adsorption of toxic crystal violet dye from aqueous solution by using waste sugarcane leaf-based activated carbon: isotherm, kinetic and thermodynamic study. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 19, 2891-2906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13738-022-02500-3>

Pires, I. C. B., Candido, I. C. M., & Oliveira, H. P. d. (2020). Adsorptive Removal of Crystal Violet from Water by Chemically Modified Coconut Shell. *Water Conservation Science and Engineering*, 5. <https://doi.org/10.1007/s41101-020-00090-w>

Qiu, T., Yu Zeng, C. Y., & Tian, H. (2012). Adsorption Thermodynamics and Kinetics of p-Xylene on Activated Carbon. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57. <https://doi.org/10.1021/je300138a>

Rajput, V., Saini, I., Parmar, S., Pundir, V., Kumar, V., Kumar, V., Naik, B., & Rustagi, S. (2024). Biochar production methods and their transformative potential for environmental remediation. *Discover Applied Sciences*, 6. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06125-4>

- Rápó, E., & Ton, S. (2021). Factors Affecting Synthetic Dye Adsorption; Desorption Studies: A Review of Results from the Last Five Years (2017–2021). *Molecules*, 26. <https://doi.org/10.3390/molecules26175419>
- SEN, S., & MANIK, N. B. (2020). Effect of back electrode on trap energy and interfacial barrier height of crystal violet dye-based organic device. *Bulletin of Materials Science*, 60. <https://doi.org/10.1007/s12034-020-2047-2>
- Thailand, G. (2022). ภาวะโลกร้อนคืออะไร การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ วิกฤตสภาพภูมิอากาศ แตกต่างกันอย่างไร? สืบค้นจาก <https://www.greenpeace.org/thailand/story/23339/climate-what-is-climate-emergency>
- Thailand, G. (2023). ฝุ่นป่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และมลพิษ PM2.5 ข้ามพรมแดน ในอนุภูมิภาคลุ่มน้ำโขง ปีพ.ศ. 2558-2563. สืบค้นจาก <https://www.greenpeace.org/static/planet4-thailand-stateless/2021/04/46bdd195-minireport-forest-maize-haze-transboundary.pdf>
- Thommes, M., & Cychosz, K. A. (2014). Physical adsorption characterization of nanoporous materials: progress and challenges. *Adsorption* 20. <https://doi.org/10.1007/s10450-014-9606-z>
- Tuti Handayania, c., Emriadia, D., Putri Ramadhanib, & Zeina, R. (2024). Modelling studies of methylene blue dye removal using activated corn husk waste: Isotherm, kinetic and thermodynamic evaluation *South African Journal of Chemical Engineering* 47. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.10.003>
- Yao, L., Yang, H., Meng, X., & Ragauskas, A. J. (2022). Toward a Fundamental Understanding of the Role of Lignin in the Biorefinery Process. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.804086>
- Yeasmin, M. S., & Mondal, M. I. H. (2015). Synthesis of Highly Substituted Carboxymethyl Cellulose Depending on Cellulose Particle Size. *International Journal of Biological Macromolecules*, 80, 725-731. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.07.040>
- Zhou, Y., Zhang, M., Wang, X., Huang, Q., Min, Y., Ma, T., & Niu, J. (2014). Removal of

Crystal Violet by a Novel Cellulose-Based Adsorbent: Comparison with Native Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry Research*.

<https://doi.org/10.1021/ie404135y>

ซ์ชวาลย์ จันทรวิจิตร. (2565). ควันจากการเผาซัวมวล อาจอันตรายกว่าที่คิด. วารสารสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร, 26(2).

ชาญชัย คหาปนนะ, & ฦภัทร โพธิ์วัน. (2563). การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสี้อมเมทิลินบลู โดยใช้วัสดุดูดซับที่เตรียมจากผักตบชวา. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 15(2), 58-70.

รวินิภา ศรีมูล. (2559). การบำบัดสี้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 44(3).

อดิศักดิ์ ศิริรักษ์. (2551). การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกลงจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีครามสตัลไวโอเลต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์].

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อรอนงค์ เอกพงษ์
วัน เดือน ปี เกิด	18 กุมภาพันธ์ 2535
สถานที่เกิด	กาญจนบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	567 ม.1 ต.ป่อปลอย อ.ป่อปลอย จ.กาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	การศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์-เคมี มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตสงขลา

