

การกำจัดสีย้อมอินดิโกด้วยกระบวนการดูดซับ

REMOVAL OF INDIGO DYE
THROUGH ADSORPTION PROCESS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (สาขาเคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REMOVAL OF INDIGO DYE
THROUGH ADSORPTION PROCESS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การกำจัดสีย้อมอินดิโกด้วยกระบวนการดูดซับ
Removal of Indigo Dye Through Adsorption Process

ชื่อนักศึกษา นางสาวจุฑาทิพย์ กิ่งทอง รหัสนักศึกษา 62050265
นายณัฐพจน์ เอื้อชินกุล รหัสนักศึกษา 62050284

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2565
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ประจำปีการศึกษา 2565

คณะกรรมการ	ลายมือชื่อ
ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น กรรมการ	
รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การกำจัดสีย้อมอินดิโกด้วยกระบวนการดูดซับ		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจุฑาทิพย์ กิ่งทอง	รหัสนักศึกษา	62050265
	นายณัฐพงษ์ เอื้อชินกุล	รหัสนักศึกษา	62050284
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2565		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง		

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษนี้เป็นการสังเคราะห์ตัวดูดซับ PVP-BiOBr ด้วยวิธีการตกตะกอนเพื่อใช้ในกระบวนการดูดซับอินดิโก คาร์มิน โดยนำมาประยุกต์ใช้กับระบบการไหลอย่างต่อเนื่อง (Flow system) โดยนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM), เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD), เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer, BET) และเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV - Vis spectrophotometer) จากผลของ SEM พบว่า อนุภาคของ PVP-BiOBr มีการกระจายตัวได้ดี และจากผล BET พบว่า PVP-BiOBr มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ $5.0911 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.038401 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 163.01 \AA ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า PVP-BiOBr มีประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มินที่ดี โดยสามารถกำจัดอินดิโก คาร์มิน ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ได้ 95.91% และในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน โดยนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบการไหลอย่างต่อเนื่อง พบว่าสามารถกำจัดอินดิโกคาร์มิน ที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ได้ 90.6667% ในระยะเวลา 24 นาที

คำสำคัญ : PVP-BiOBr, การตกตะกอน, กระบวนการดูดซับ, อินดิโก คาร์มิน, ระบบการไหลอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Removal of Indigo Dye Through Adsorption Process
Students	Miss Jutathip Kingthong Student ID 62050265 Mister Nuttapoj Uahchinkul Student ID 62050284
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2022
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Saowapak Teerasong

Abstract

The objective of this special project is to synthesize the PVP-BiOBr adsorbent by a precipitation method for indigo carmine removal through adsorption process. The synthesized adsorbents were characterized by using scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffractometer (XRD), surface area and porosity analyzer (BET) and UV-spectrophotometer. From the SEM results, the particles of PVP-BiOBr are well-dispersed. and From BET results, the PVP-BiOBr has surface area, pore volume and the average pore size as 5.0911 m²/g, 0.038401 cm³/g and 16.301 Å, respectively. It was found that PVP-BiOBr offered good adsorption efficiency, it could remove 95.91% of 20 mg/L indigo carmine (50 mL) by 120 min in batch system. When applied in a flow system, it could remove 90.6667% of 20 mg/L of indigo carmine (10 mL) in 24 min.

Keyword : PVP-BiOBr, Precipitation, Adsorption, Indigo carmine, Flow system

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องมาจากได้รับความกรุณาและความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาดูแลอย่างใกล้ชิดและให้ความช่วยเหลือในระหว่างการทำวิจัย รวมถึงให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงข้อบกพร่องในการจัดทำรูปเล่มโครงการพิเศษ ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ และขอขอบพระคุณ ดร.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล และ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เชิงชั้น กรรมการสอบ โครงการพิเศษ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการอาคารวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ วิทยาศาสตร์รวมถึงสารเคมี เพื่อใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ หน่วยวิจัยเคมีวิเคราะห์เชิงประยุกต์ และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในการทำวิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ นักวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้การสนับสนุนการศึกษา อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและเป็นแรงผลักดันในการทำโครงการพิเศษ รวมถึงขอขอบพระคุณเพื่อน สาขาเคมีอุตสาหกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษเล่มนี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจไม่มากนัก และหากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

จุฑาทิพย์ กิ่งทอง
ณัฐพจน์ เอื้อชินกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 อินดิโก คาร์มิน	4
2.2 กระบวนการการดูดซับ	4
2.2.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ	4
2.2.2 ประเภทของกระบวนการดูดซับ	5
2.2.3 ระยะของการดูดซับ	6
2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ	7
2.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	7
2.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช	8
2.3.3 ทฤษฎีการดูดซับของ BET	9
2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	10
2.4.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม	11
2.4.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม	12
2.4.3 การแพร่ภายในรูพรุน	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.6 งานวิจัยนี้	14
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	15
3.1 สารเคมี	15
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	15
3.3 วิธีการทดลอง	16
3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับโพลีไวนิลไพโรลิดอน-บิสมต์ออกซีโบรไมด์ ...	16
3.3.2 การเตรียมสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร	16
3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ	17
3.3.4 การกำจัดอินดิโก คาร์มิน โดยกระบวนการดูดซับด้วย PVP-BiOBr ใน Batch system	17
3.3.5 การศึกษาไอโซเทอม	20
3.3.6 การใช้ Flow system ในการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยกระบวนการดูดซับ	20
3.3.7 การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ	21
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	23
4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr	23
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ	24
4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ	24
4.2.2 พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ	25
4.3 การกำจัดอินดิโก คาร์มิน โดยกระบวนการดูดซับใน Batch system	26
4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน ด้วยการใช้ตัวดูดซับ	26
4.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน ด้วยการใช้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง	27
4.3.3 การหาปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนของอินดิโก คาร์มิน	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การศึกษาไอโซเทอม	28
4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ	30
4.6 การใช้ Flow System ในการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยกระบวนการดูดซับ	31
4.7 การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ	32
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	34
5.1 สรุปผลการทดลอง	34
5.2 ข้อเสนอแนะ	34
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก	37
ภาคผนวก ก	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การเตรียมสารละลายอินดิโก คาร์มิน สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน (เตรียมในคิวเวต)	17



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของอินดิโก คาร์มิน	4
2.2 การเคลื่อนตัวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ	6
2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์	7
2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์	8
2.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช	9
2.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช	9
3.1 แผนภาพการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในระบบแบบ Batch ...	19
3.2 การตั้งอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการดูดซับ ในระบบแบบไหล	21
3.3 การตั้งอุปกรณ์สำหรับการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ	22
4.1 ลักษณะตัวดูดซับ	23
4.2 SEM image ของตัวดูดซับ	24
4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของ PVP-BiOBr	25
4.4 ผลการดูดซับ อินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr	26
4.5 กลไกการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับสีย้อมอินดิโก คาร์มิน	27
4.6 ผลการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง	27
4.7 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ของอินดิโก คาร์มินเมื่อผ่านการดูดซับ	28
4.8 กลไกการดูดซับ	29
4.9 สมการอัตราการดูดซับ	30
4.10 ผลการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ใน Flow system	31
4.11 แผนภูมิแสดงความสามารถในการ Reuse ของตัวดูดซับ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
IC	Indigo Carmine
BiOBr	Bismuth Oxybromide
PVP	Polyvinyl Pyrrolidone
SEM	Scanning Electron Microscope
XRD	X-Ray Diffractometer
BET	Surface area and Porosity analyzer
TOC	Total Organic Carbon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการใช้สีย้อมในโรงงานอุตสาหกรรมมีมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่บางโรงงานไม่มีการกำจัดสีย้อมออกก่อนจะปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ เช่น โรงงานย้อมผ้าขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตภายในน้ำรวมถึงทัศนียภาพที่ถูกทำลาย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีในการกำจัดสีย้อมออก ก่อนจะปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำ

วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ดี โดยกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณผิวระหว่างของแข็งและของเหลวรวมถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของของแข็ง การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) ไปยังวัสดุดูดซับ (Adsorbent)

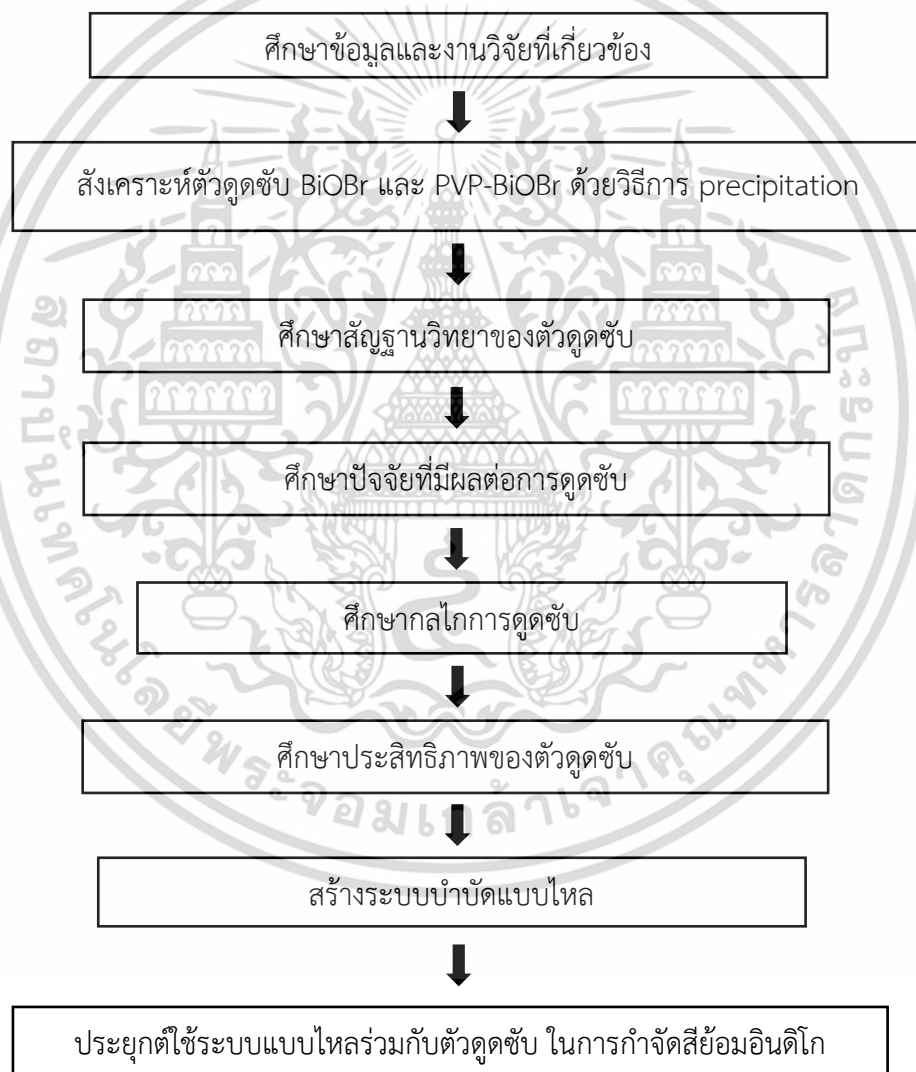
Indigo carmine (IC) เป็นสีย้อมเคมีที่พบได้บ่อยที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมที่มีการย้อมผ้าสียีนส์และผ้าหม้อห้อม โดยมีหลายงานวิจัยที่ได้มีการกำจัดสีย้อมอินดิโก เช่น การกำจัดสีย้อม RhB ด้วยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก (Photocatalytic process) เป็นกระบวนการที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [1], และการกำจัดสีย้อมอินดิโกด้วยกระบวนการดูดซับ (Adsorption process) เช่น การกำจัด IC ในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้อนุภาคนาโนที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นตัวดูดซับ [2], การดูดซับ IC โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวดูดซับ [3] และการดูดซับ IC โดยใช้อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ [4] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาตัวดูดซับโพลีไวนิลไพโรลิดอน-บิสมต์ออกซีโบรไมด์ (Polyvinyl pyrrolidone-Bismuth oxybromide, PVP-BiOBr) โดยบิสมต์ออกซีโบรไมด์ เป็นสารดูดซับชนิดหนึ่งที่เป็นสารกึ่งตัวนำ มีโครงสร้างของ $[Bi_2O_2]^{2+}$ ที่ถูกปิดข้างด้วยชั้นของ Br^- และมีแรงยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงแวน เดอ วาลส์ [5] จึงทำให้มีคุณสมบัติต้านไฟฟ้า แสง อีกทั้งยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี [6] และสังเคราะห์ได้ง่าย BiOBr จึงนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และนำโพลีไวนิลไพโรลิดอน มาปรับปรุงพื้นผิวของ BiOBr ช่วยในการลดแรงดึงผิวของอนุภาค BiOBr ทำให้อนุภาคกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และยังช่วยเปลี่ยนสัณฐานวิทยา ทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคของ BiOBr เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ [3] จากนั้นนำตัวดูดซับที่สังเคราะห์มาศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ (Adsorption) และกลไกการดูดซับ นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้ประยุกต์ใช้ระบบการไหล (Flow system) เพื่อกำจัดสีย้อมอินดิโกจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการให้น้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุตัวดูดซับที่อยู่ในภาชนะ โดยข้อดีของระบบบำบัดแบบไหลคือมีความต่อเนื่องในการกำจัดที่ดีกว่าระบบแบบ Batch เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.) เพื่อสังเคราะห์ PVP-BiOBr เป็นตัวดูดซับในการกำจัดสีย้อมอินดิโก
- 2.) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ PVP-BiOBr ในการกำจัดสีย้อมอินดิโก
- 3.) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับของ PVP-BiOBr ต่อสีย้อมอินดิโก
- 4.) สร้างระบบแบบไหลในการกำจัดสีย้อมอินดิโก เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบบำบัด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) ได้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr สำหรับกำจัดสีย้อมอินดิโก
- 2.) เข้าใจกลไกการดูดซับของ PVP-BiOBr ในการดูดซับสีอินดิโก
- 3.) ได้ระบบบำบัดแบบไหลร่วมกับการใช้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในการกำจัดสีอินดิโกในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม



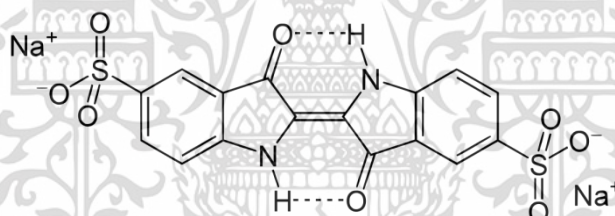
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินดิโก คาร์มีน (Indigo carmine)

อินดิโก คาร์มีน หรือ 5,5'-indigodisulfonic acid sodium salt เป็นเกลืออินทรีย์ที่มีลักษณะผงหรือเม็ดละเอียดสีน้ำเงินเข้มที่ได้จากครามโดยอะโรมาติกซัลโฟเนชัน ซึ่งทำให้สารประกอบนี้ละลายได้ในน้ำและไม่มีกลิ่น มักใช้ในการแต่งสีโดยจะให้สีครามหรือน้ำเงินแก่ผลิตภัณฑ์รวมถึงอาหาร เช่น ไอศกรีม ลูกอม และผลิตภัณฑ์ที่ใช้เคลือบหรือแต่งหน้าขนม เป็นต้น และยังใช้ภายในอุตสาหกรรม ซึ่งใช้เป็นสีย้อมเคมีที่พบได้บ่อยที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมที่มีการย้อมผ้าสีอินส์และผ้าหม้อห้อม รวมถึงในการวินิจฉัยทางการแพทย์ ความสามารถในการละลายของอินดิโก คาร์มีนในน้ำเป็นผลเสียที่อาจเกิดขึ้นกับสิ่งมีชีวิต คือก่อให้เกิดความไม่สบายทางทัศนียภาพ ขัดขวางการเดินทางของแสงในน้ำ ลดอัตราการถ่ายเทออกซิเจนสู่แหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดต่ำลง กระทบต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ มีความเป็นพิษเล็กน้อย แต่หากได้รับในปริมาณที่มากอาจเป็นสารก่อมะเร็งได้ ทำให้จำเป็นต้องกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มีนออกจากน้ำทิ้งก่อนจะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ



รูป 2.1 โครงสร้างทางเคมีของอินดิโก คาร์มีน

2.2 กระบวนการการดูดซับ [7]

2.2.1 กลไกของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการกักสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า Adsorbent การดูดซับพื้นผิวนี้อาจเป็นการดูดซับ ระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมี ได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึง เฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดซับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่ บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้น ที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.2.2 ประเภทของการดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูก ดูดซับกับผิวของสารดูดซับถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ กับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.3.2.1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) เป็นการดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนๆและเป็นแรงที่ไม่กำหนดทิศทาง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) หรือพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานความร้อนของการดูดซับค่อนข้างน้อย อยู่ในช่วง 20-40 กิโลจูลต่อโมล (0.2-0.4 eV) และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวของวัสดุดูดซับได้ง่าย และอาจเกิดการดูดซับแบบเชิงซ้อนหลายๆ ชั้นได้ (multilayer) โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติและจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่โมเลกุลเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ เนื่องจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวถูกดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2.3.2.2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับเกิดพันธะเคมีกับตัวดูดซับ เช่น การใช้วาเลนซ์อิเล็กตรอนร่วมกัน เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ตัวถูกดูดซับเดิมเกิดการเปลี่ยนแปลง คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิม จากนั้นจะมีการจัดเรียงอะตอมเป็นสารประกอบใหม่โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล (0.5-4 eV) พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากวัสดุดูดซับทำได้ยาก เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)

2.2.2.3) การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับ ตัวดูดซับ เป็นไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามหรืออาจเกิดจากการแทนที่ของประจุที่ผิวของวัสดุดูดซับกับ ไอออน ของตัวถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.4) การดูดซับแบบเจาะจง (Specific adsorption) เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนพื้นผิว แต่ตัวดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการดูดซับชนิดนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับชนิดนั้นๆ

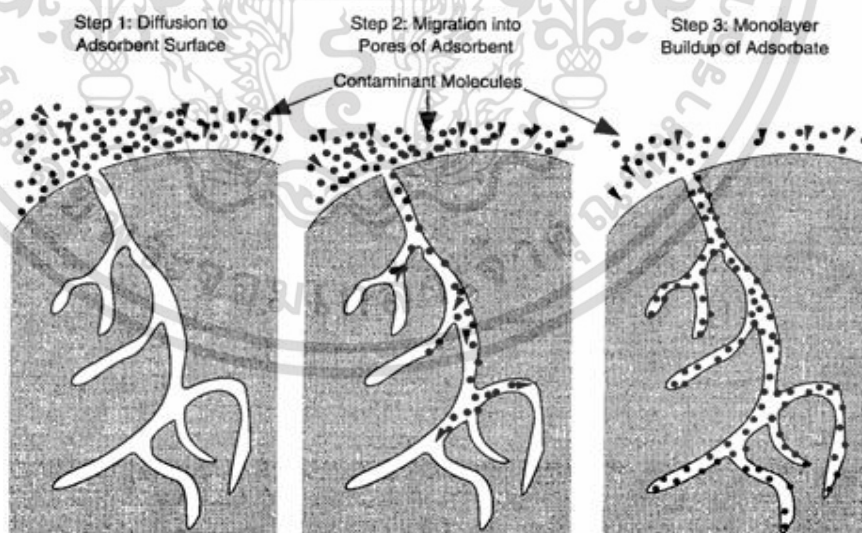
2.2.3 ระยะเวลาของการดูดซับ

การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือ เคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งทางอุตสาหกรรม การดูดซับจะพิจารณา เฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี



รูปที่ 2.2 การเคลื่อนตัวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ในกระบวนการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ [8]

ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลที่สัมผัสและอยู่ในสมดุลกับสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่สำหรับไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมใช้กันมากมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

แลงเมียร์ (Irving Langmuir) นักเคมีชาวอเมริกา ผู้ได้รับรางวัล โนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932 โดยได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีข้อกำหนดว่าพื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียวตัวถูกตัวจับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับโดยที่ไม่มีเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัดและไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนมีตัวถูกดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการที่ (2.1) และเมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง q และ C จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.3

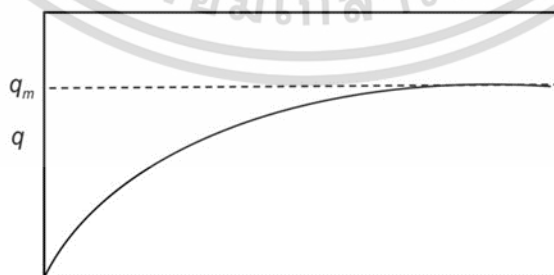
$$q_e = \frac{q_m K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

q_m คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทอมของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (L/mg)

C คือ ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (mg/L)



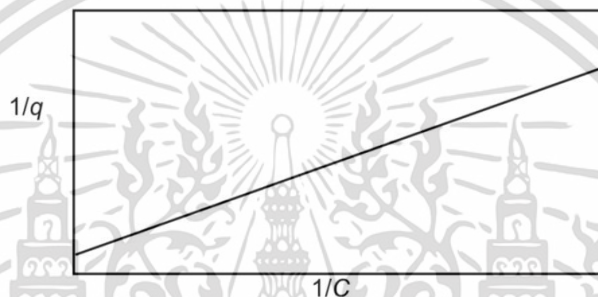
รูปที่ 2.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสมการที่ (2.1) มาจัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรงจะได้สมการที่ (2.2)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ (สมการ (2.2)) เมื่อนำมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_e}$ และ $\frac{1}{C}$ ค่า K_L และ q_m สามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกน y ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

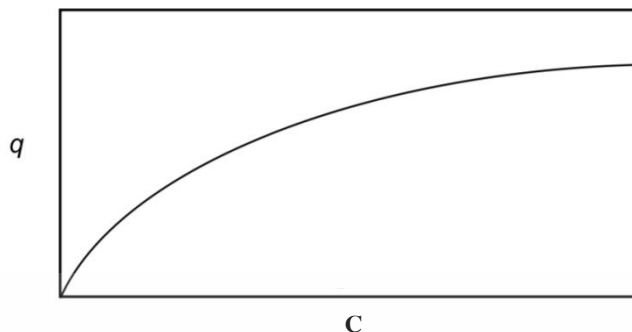
2.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880 – 1941 Herbert Max Finlay Freundlich นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันได้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface) พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอดมีรูปแบบของสมการไม่เชิงเส้นดังสมการที่ (2.3) และได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q และ C ดังแสดงในรูปที่ 2.5

$$q_e = K_F C^{1/n} \quad (2.3)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชแสดงถึงความสามารถในการดูดซับมีหน่วยเป็น (mg/g)/(mg/L)

n คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลอง

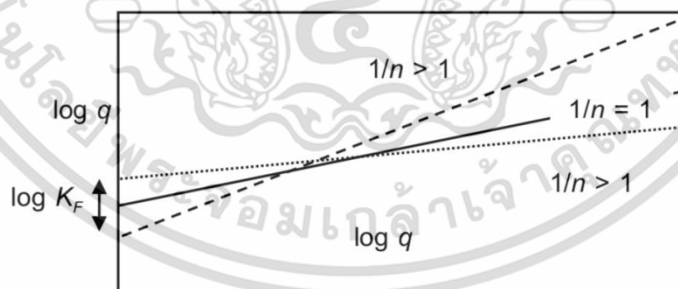


รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของฟรุนดลิช

เมื่อจัดสมการ (2.3) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงจะได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ สำหรับค่า $\frac{1}{n}$ หมายถึงไอโซเทอมของการดูดซับถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ถ้าค่ามากกว่า 1 หมายถึงบริเวณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับและถ้าน้อยกว่า 1 หมายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรุนดลิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่ออธิบายการดูดซับแบบหลายชั้นเรียกว่าสมการของ BET ดังสมการที่ (2.5) สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนั้นคือโมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับบนชั้นที่สองและชั้นต่อไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของสารดูดซับจึงเหมือนอยู่ในสภาวะอิมิตัวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรก ที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

$$\frac{1}{W \left(\frac{P_0}{P} \right) - 1} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (2.5)$$

- เมื่อ P คือ ความดันของการดูดซับ (mmHg)
 P₀ คือ ความดันอิมิตัว (mmHg)
 W คือ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ
 W_m คือ น้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง และ
 C คือ ค่าคงที่

ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไปซึ่งพื้นที่ผิว สามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุล ของแก๊สที่ปกคลุมพื้นที่ผิวเต็มหนึ่งชั้นคูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่มาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น

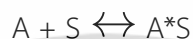
2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics) [8]

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นสมการที่ใช้อธิบายอัตราเร็วของการดูดซับซึ่งจะให้ข้อมูลที่ เป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบการดูดซับได้ สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และอันดับ สองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ ยังมีสมการการแพร่ภายในรูพรุน เป็นอีกสมการหนึ่งที่น่ามาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์และกลไกของการดูดซับได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้สมมุติฐานของการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วการดูดซับโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ (Adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมได้ดังสมการที่ (2.6)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t)^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (min)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับเวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับสมดุล (mg/g)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.6) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จะได้ดังสมการที่ (2.7)

$$\log\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = \left(\frac{k_1}{2.303}\right) t \quad (2.7)$$

เมื่อจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบสมการเชิงเส้น จะได้สมการที่ (2.8)

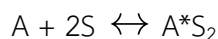
$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k_1}{2.303}\right) t \quad (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-\frac{k_1}{2.303}$ และได้ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียม

เป็นสมการที่อธิบายภายใต้การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Activesite) จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



สามารถเขียนสมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมได้ดังสมการที่ (2.9)

$$\frac{d q_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.9)$$

โดยที่ k_2 คือค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (min^{-1})

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (2.9) โดยมขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ จนถึง $q_t = t$ จะได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e} \right) t \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q_t}$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_e}$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\frac{k}{2.303}$

2.4.3 การแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle diffusion)

สำหรับจลนพลศาสตร์การดูดซับจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ นอกจากนั้นยังสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนอีกด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนเป็น อีกสมการหนึ่งที่น่ามาใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังสมการที่ (2.11)

$$q_t = k_i C^{0.5} + C \quad (2.11)$$

โดยที่ k_i คือค่าคงที่อัตราการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน ($\text{mg/g} \cdot \text{min}$)

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง q_t และ $t^{0.5}$ จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ k_i และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bofan Z. et al. งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ BiOBr เทียบกับ PVP-BiOBr ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการตกตะกอนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดสีย้อมและเตตระไฮดรอกซีควินอลีนโดยกระบวนการโฟโตแคทาไลติก เมื่อวิเคราะห์สัณฐานของตัวเร่งได้อนุภาคของ PVP-BiOBr ที่มีลักษณะเป็นกลีบดอกไม้ขนาดเล็กกว่า เกิดผิวสัมผัสที่มากกว่า ซึ่งจากการทดลองเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคทาไลติกที่เหนือกว่า จึงทำให้สามารถกำจัดสารมลพิษได้ดีกว่าเช่นกัน [1]

Elsayed E. et al. ศึกษาตัวดูดซับระดับนาโนที่แปลกใหม่ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและราคาไม่แพง ซึ่งได้มาจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำ (Nanoparticals from the water treatment residuals, nWTR) เพื่อกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มินออกจากน้ำที่ปนเปื้อน ได้ศึกษาการดูดซับและวิเคราะห์อิทธิพลของค่า pH, อัตราส่วนตัวดูดซับ/สารละลายอินดิโก คาร์มิน, เวลา, ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน และอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มการกำจัดสีย้อมอินดิโกจากน้ำเสียที่ปนเปื้อน โดยใช้อินดิโก คาร์มินเท่ากับ 172.4 มก. สำหรับ (Water treatment residuals, WTR) และ 30.86 มก. สำหรับ nWTR ทำให้ทราบว่าตัวดูดซับขนาดนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่า WTR จำนวนมากถึง 5.6 เท่า และสามารถเข้าถึงสมดุลของการดูดซับได้ภายใน 30 นาที และ nWTR จึงมีความเสถียรของตัวดูดซับมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มินที่ยอดเยี่ยม แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่มีแนวโน้มในการแก้ไขน้ำเสียที่ปนเปื้อนจากสีย้อม [2]

Ashwathaiyah A. et al. ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมครามด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยวิเคราะห์ค่าความแปรผันของค่า pH ปริมาณสารดูดซับ ความเข้มข้นของสีย้อม ระยะเวลา และอุณหภูมิ การดูดซับสีย้อมอินดิโก คาร์มินบนแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพที่ pH 12 (50 นาที) และเป็นไปตามพฤติกรรมไอโซเทอร์มชนิดแลงเมียร์ กระบวนการดูดซับเป็นไปตามจลนพลศาสตร์ของอัตราลำดับที่สองเทียม [3]

Mahmoud A. et al. ได้ศึกษาอนุภาคนาโนเฟอร์ไรต์แมกนีเซียมเมโซพอร์ัส ($MgFe_2O_4$) ถูกสังเคราะห์โดยวิธีโซล-เจลเพื่อกำจัดสีย้อมอินดิโกคาร์มินออกจากน้ำเสีย คุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ถูกตรวจสอบโดยใช้การวิเคราะห์ FESEM, EDX, XPS, XRD, HRTEM, SAED, FTIR, Zeta, VSM และ BET ได้พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ระบุลักษณะการดูดความร้อนของการกำจัดสีย้อมพร้อมกับการจัดเรียงโมเลกุล IC แบบสุ่มบนอนุภาคตัวดูดซับ ตัวดูดซับนาโน $MgFe_2O_4$ ที่สังเคราะห์ขึ้นแสดงพื้นที่ผิว $28.8 \text{ m}^2/\text{g}$ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 34 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุนแคบที่มีความสามารถในการดูดซับ 46 mg/g [4]

Teeradech S. et al. ได้ศึกษาโฟโตแคทาไลสต์บิสมัทออกซีโบรไมด์ (BiOBr) ด้วยวิธีโซลโวลเทอร์มอลคอมโพสิตกับ PVP โดยที่ PVP มีบทบาทสำคัญในการควบคุมโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา พื้นที่ผิวจำเพาะ และโฟโตกัมมันต์ BiOBr ที่ต่อยอดด้วย PVP ให้การกำจัดโอฟล็อกซาซิน (OFL) และนอร์ฟลอกซาซิน (NOR) ได้ 94 % และ 99.8 % ภายใต้แสงที่มองเห็นได้ (Photoactivity) ได้โครงสร้างจุลภาคที่เหมือนดอกไม้ตัวเร่งปฏิกิริยาโฟโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคทตาลิสต์ PVP-BiOBr แสดงการกำจัดมลพิษที่มีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่สำหรับการสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตอบสนองต่อแสงที่มองเห็นได้สำหรับการล้างสารพิษของยาปฏิชีวนะในน้ำเสีย [5]

You W. et al. ได้ศึกษา BiOBr ที่ดัดแปลงพื้นผิวของซีพิโอไลต์ด้วยกรด (Acidized sepiolite , AS) และโพลีไวนิลไพร์โรลิโดน (PVP) ได้ศึกษาสมบัติทางแสงของ PVP/AS/BiOBr ที่มีลักษณะเฉพาะอย่างเป็นระบบ โดยศึกษาการย่อยสลายของโรดามีน บี (RhB) และสารละลายไดโคลฟีแนกโซเดียมในน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงแสง PVP/AS/BiOBr นี้ ทำให้ทราบว่ากิจกรรมโฟโตแคทาลิติกของโฟโตแคทตาลิสต์ PVP/AS/BiOBr นั้นเหนือกว่าของ AS/BiOBr อาจเนื่องมาจากสัณฐานมีโครงสร้างกลวง มีการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ดีขึ้น และช่องว่างแถบที่แคบลง นอกจากนี้ยังวิเคราะห์รูปแบบการย่อยสลายด้วยโฟโตแคทาลิติกที่เป็นไปได้ของ PVP/AS/BiOBr ผ่านการติดตามผลพลอยได้จากการย่อยสลาย หลังจากการทดลองการย่อยสลายอย่างต่อเนื่อง ประสิทธิภาพการย่อยสลายและโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองยังคงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PVP/AS/BiOBr สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ [6]

Rawin S. et al. ได้ศึกษาจลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แคลบดัดแปร โดยใช้แคลบดัดแปรทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก และนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสี้อมเมทิลีนบลู พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิของสี้อมเมทิลีนบลู มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไอโซเทอมของการดูดซับสอดคล้องกับแบบสมการฟรุนดลิช และจลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการการดูดซับอันดับที่สองเทียม [9]

2.6 งานวิจัยนี้

ได้ศึกษาสมบัติและประสิทธิภาพของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ต่อการดูดซับสี้อมอินดิโก คาร์มิน โดยทำการสังเคราะห์ PVP-BiOBr ด้วยวิธีการตกตะกอนแล้วนำมาศึกษาลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM) และ Surface area and porosity analyzer (BET) เป็นต้น หลังจากนั้นทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยวิธีแบบBatch และประยุกต์ใช้ในวิธีแบบไหล (Flow system) เพื่อง่ายต่อการนำไปปรับใช้ภายในโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

- 1) บิสมัท (III) ไนเตรท เพนตะไฮเดรต (Bismuth (III) Nitrate Pentahydrate, $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- 2) โพลีไวนิลไพโรลิดอน (Polyvinylpyrrolidone, PVP)
- 3) เอทานอลบริสุทธิ์สูง (Absolute Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
- 4) อินดิโก คาร์มิน (Indigo Carmine, $\text{C}_{16}\text{H}_8\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\text{S}_2$)
- 5) โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium Bromide, KBr)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centifuge) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 3700
- 2) เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Diffraction Spectrophotometer, XRD) ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Smartlab
- 3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น SU8000
- 4) เครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิคบรูเนอร์ เอ็มเมทท์ เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller (BET) Surface Area Analysis Instrument) Rigaku รุ่น Smartlab
- 5) เครื่องวิเคราะห์ปริมาณรวมของคาร์บอนอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น VCSH
- 6) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-2900
- 7) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Visible Spectrophotometer) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น UV-2600
- 8) Magnetic stirrer
- 9) เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง
- 10) ขวดปรับปริมาตร ขนาด 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร
- 11) ปีกเกอร์ ขนาด 25, 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร

12) ปิเปต ขนาด 5 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 13) กระจกตวง ขนาด 100 มิลลิเมตร
- 14) ซ้อนตักสาร
- 15) กระจกนาฬิกา
- 16) กระจกชอลูมิเนียม
- 17) หลอดหยด
- 18) เตาอบ
- 19) เตาเผา
- 20) หลอด Centifuge
- 21) เยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- 22) โกร่งบดสาร
- 23) ครุชีเบล
- 24) หลอดไฟ 24 วัตต์
- 25) คิวเวต

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับโพลีไวนิลไพโรลิโดน-บิสมัทออกซิโบรไมด์ (PVP-BiOBr) [1]

การเตรียมตัวดูดซับ PVP-BiOBr ทำได้โดยนำ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ น้ำหนัก 1.02 กรัม มาละลายในเอทานอล ปริมาตร 60 มิลลิเมตร และปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเติม PVP น้ำหนัก 0.05 กรัม และปั่นกวนต่ออีก 60 นาที จากนั้นเติมโพแทสเซียมโบรไมด์ KBr น้ำหนัก 0.0833 กรัม และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง (ปิดภาชนะที่ใช้ด้วยกระจกชอลูมิเนียม ตลอดการปั่นกวน) จากนั้นนำสารที่ได้ไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centifuge) ที่ 12,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เทสารละลายใสเหนือตะกอนทิ้งไป และล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลสลับกัน 6 ครั้ง จากนั้นนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในการสังเคราะห์ BiOBr ทำได้ในทำนองเดียวกัน แต่ไม่มีการเติม PVP ลงไป

3.3.2 การเตรียมสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

การเตรียมสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มินทำได้โดยการชั่งน้ำหนักอินดิโก คาร์มินมา 0.005 กรัม ใส่ในขวดปรับปริมาตร ขนาด 250 มิลลิเมตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารตัวอย่างอินดิโก คาร์มินที่มีความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ PVP-BiOBr จะถูกวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค SEM และการวิเคราะห์พื้นที่ผิวตัวดูดซับด้วยเครื่องหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค BET

3.3.4 การกำจัดอินดิโก คาร์มิน โดยกระบวนการดูดซับด้วย PVP-BiOBr ใน Batch system

1) การสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อเทียบหาความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน

นำสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 5, 10 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร มาใส่ในคิวเวต 3 มิลลิลิตร เพื่อนำไปตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร [10] และนำมาพล็อตกราฟมาตรฐานเพื่อใช้เทียบหาความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน โดยพล็อตแกน y คือ ค่าการดูดกลืนแสง และแกน x คือ ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลายอินดิโก คาร์มิน สำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน (เตรียมในคิวเวต)

ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน (mg/L)	ปริมาตรของอินดิโก คาร์มิน ที่ ความเข้มข้น 20 mg/L (mL)	ปริมาตรของน้ำกลั่น (mL)
20	3	0
10	1.5	1.5
5	0.75	2.25

2) การหาเปอร์เซ็นต์การกำจัดอินดิโก คาร์มิน

สามารถหาได้จากสมการ

$$\% \text{ Removal} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย ค่า C_0 คือ ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน ณ เริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ค่า C คือ ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน ที่เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ [11]

โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{W} \quad (3.2)$$

โดย q_e คือ ความสามารถในการดูดซับอินดิโกของตัวดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของอินดิโก (มิลลิกรัม/ลิตร)

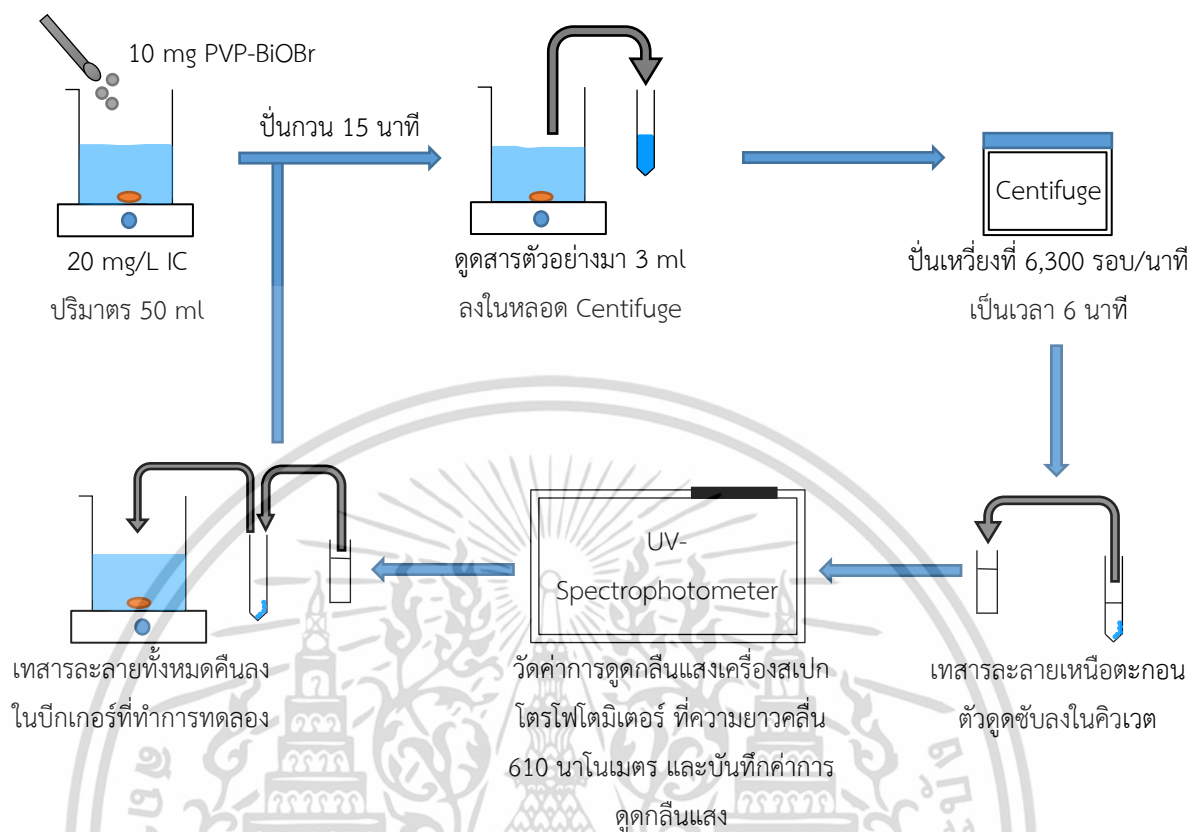
C_e คือ ความเข้มข้นของอินดิโกหลังผ่านกระบวนการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)

V คือ ปริมาตรของอินดิโก (ลิตร)

W คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

4) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ

ทวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร ลงใน ปีกเกอร์ และเติมตัวดูดซับ PVP-BiOBr ที่สังเคราะห์ได้ ลงไป 10 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปปั่นจน และทำการดูดสารตัวอย่างมา 3 มิลลิตร ทุกๆ 15 นาที นำมาปั่นเหวี่ยงที่ 6300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออก จากนั้นเทสารละลายเหนือตะกอนตัวดูดซับที่ได้ลงในควีเวต และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้วให้เทสารละลายและตะกอนคืนในปีกเกอร์ที่ทำการทดลองทุกครั้ง โดยทำจนครบ 150 นาที ทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนตัวดูดซับจาก PVP-BiOBr เป็น BiOBr



รูปที่ 3.1 แผนภาพการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในระบบแบบ Batch

- 5) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr โดยใช้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง

ตวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้มา 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 2 บีกเกอร์ และเติมตัวดูดซับ PVP-BiOBr ที่สังเคราะห์ได้ ลงไป 10 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปปั่นกวน โดยในขณะปั่นกวนให้ทำการฉายแสงด้วยหลอดไฟ (24 วัตต์ จำนวน 2 หลอด) ดูดสารตัวอย่างมา 3 มิลลิลิตร ทุกๆ 15 นาที เพื่อนำมาปั่นเหวี่ยงที่ 6300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออก จากนั้นเทสารละลายเหนือตะกอนตัวดูดซับที่ได้ลงในคิวเวต และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร เมื่อวิเคราะห์เสร็จแล้วให้เทสารละลายและตะกอนตัวดูดซับคืนในบีกเกอร์ที่ทำการทดลองทุกครั้ง โดยทำจนครบ 10 5 นาทีทำการทดลองซ้ำเช่นเดียวกับข้างต้น แต่เปลี่ยนสภาวะจากที่มีแสงเป็นไม่มีแสง โดยปิดหลอดไฟทั้ง 2 หลอด และทำการทดลองในกล่องดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) การหาปริมาณรวมของคาร์บอนอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC)

ดวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้มา 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ 7 บีกเกอร์ และเติมตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ ลงไป 10 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปปั่นกวน โดยในแต่ละบีกเกอร์ปั่นกวนเป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 20, 40 และ 60 นาที และนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ 6300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออก จากนั้นนำส่วนที่เป็นสารละลายมากรองผ่านเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณรวมของคาร์บอนอินทรีย์ (Total Organic Carbon, TOC)

3.3.5 การศึกษาไอโซเทอม

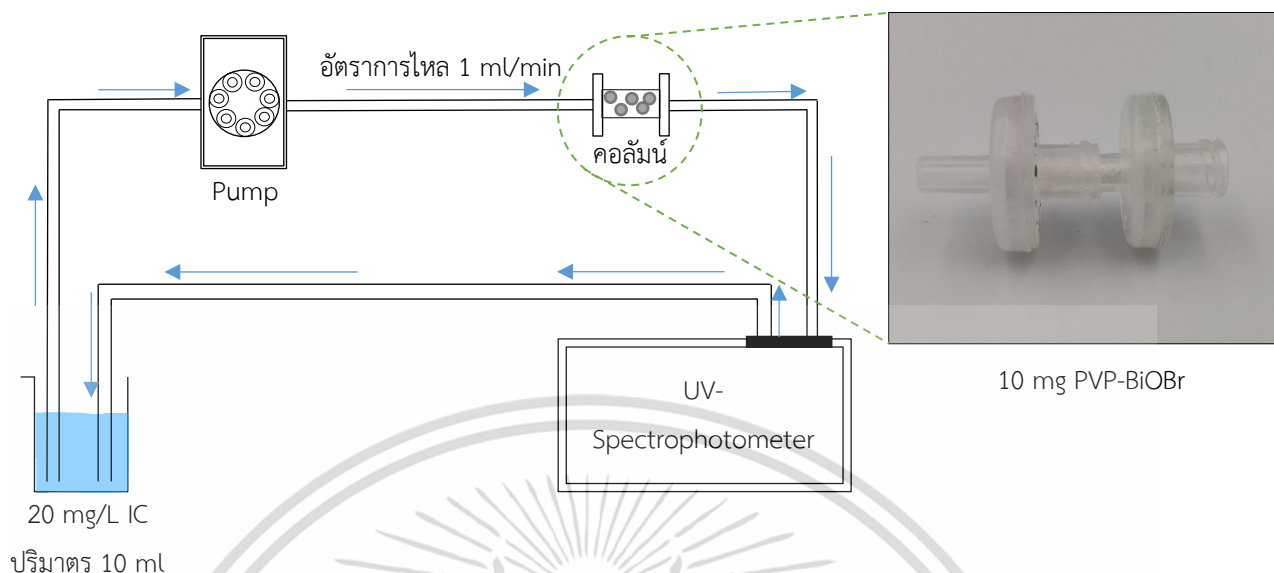
เตรียมสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 40, 60 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นดวงมาความเข้มข้นละ 50 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และเติมตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ ลงไปบีกเกอร์ละ 10 มิลลิกรัม จากนั้นนำแต่ละบีกเกอร์ไปปั่นกวน เมื่อครบ 60 นาที ทำการดูดสารตัวอย่างมา 3 มิลลิลิตร เพื่อนำมาปั่นเหวี่ยง ที่ 6300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออก จากนั้นเทสารละลายส่วนที่ใสที่ได้ลงในคิวเวต และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร

3.3.6 การใช้ Flow system ในการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยกระบวนการดูดซับ

ในการทดลองนี้จะเป็นการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ในระบบแบบไหล ด้วยกระบวนการดูดซับเพื่อเป็นต้นแบบสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้ บีกเกอร์ ขนาด 100 mL, เยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอน (สำหรับทำคอลัมน์บรรจุ PVP-BiOBr) ท่อลำเลียง คิวเวต และปั๊มเพอริสแตติก ดังรูป 3.2

ทำการทดลองโดยดวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้มา 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และบรรจุตัวดูดซับ 10 มิลลิกรัม ในคอลัมน์ตรงกลางระหว่างเยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอน และใช้ปั๊มดูดสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน โดยใช้อัตราการไหล เท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ติดตามการลดลงของค่าการดูดกลืนแสงอย่างต่อเนื่อง ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

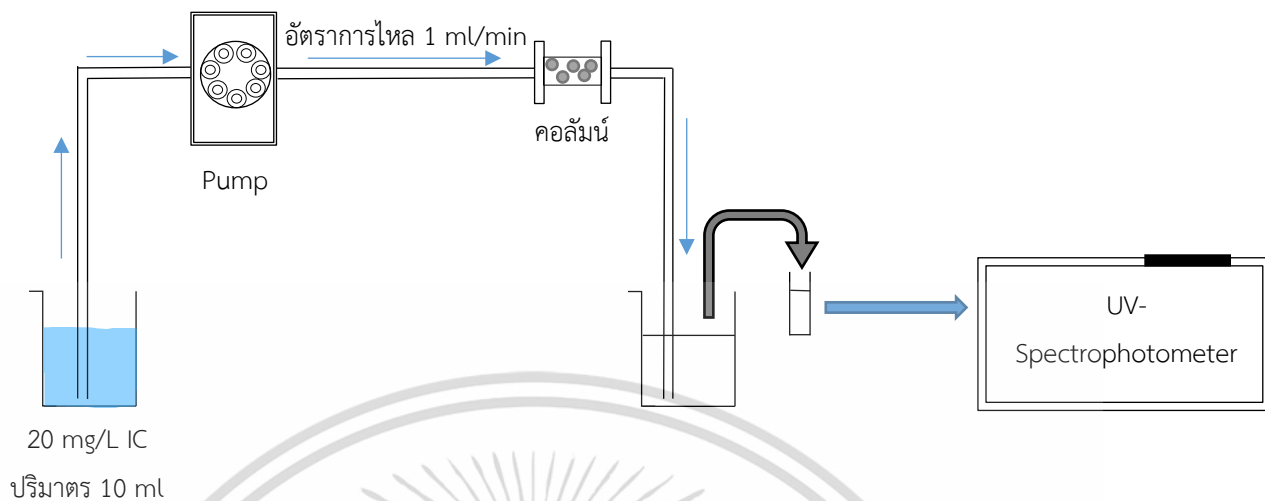


รูปที่ 3.2 การตั้งอุปกรณ์สำหรับปฏิกิริยาการดูดซับ ในระบบแบบไหล

3.3.7 การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ

ในการทดลองนี้จะเป็นการนำตัวดูดซับ PVP-BiOBr ที่ผ่านกระบวนการดูดซับแล้วมาใช้ซ้ำ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ว่าสามารถใช้ซ้ำได้กี่ครั้ง

ทำการทดลองโดย ตวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เตรียมได้มา 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ และบรรจุตัวดูดซับ 10 มิลลิกรัม ในคอลัมน์ตรงกลางระหว่างเยื่อกรองขนาด 0.45 ไมครอน และใช้ปั๊มดูดสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ให้ไหลผ่านคอลัมน์ที่มีตัวดูดซับ โดยใช้ อัตราการไหล เท่ากับ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที ติดตามค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 610 นาโนเมตร จากนั้นตวงสารตัวอย่างอินดิโก คาร์มิน ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร มาใหม่ และทำซ้ำโดยใช้ตัวดูดซับเดิม และทำขั้นตอนนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ



รูปที่ 3.3 การตั้งอุปกรณ์สำหรับการนำตัวอย่างกลับมาใช้ซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มีน ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยการนำเสนอผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 6 ตอน คือ ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr ตอนที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ ได้แก่ สัณฐานวิทยาและพื้นที่ผิวจำเพาะ ตอนที่ 3 การกำจัดอินดิโก คาร์มีน ด้วยกระบวนการดูดซับ ได้แก่ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มีนของตัวดูดซับ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มีนของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ใช้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง และการหาปริมาณรวมของคาร์บอนอินทรีย์ ตอนที่ 4 การศึกษาไอโซเทอม ได้แก่ ไอโซเทอมของแลงเมียร์ และไอโซเทอมของฟรุนดลิช ตอนที่ 5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ตอนที่ 6 การใช้ระบบแบบไหล ในการกำจัดอินดิโก คาร์มีน ด้วยกระบวนการดูดซับ และตอนที่ 7 การนำตัวดูดซับมาใช้ซ้ำ

4.1 การสังเคราะห์ตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr

ตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr ที่สังเคราะห์ได้ จะมีลักษณะเป็นของผงละเอียดสีขาวเหมือนกัน ทั้ง 2 ชนิด ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะตัวดูดซับ

ก) ตัวดูดซับ BiOBr

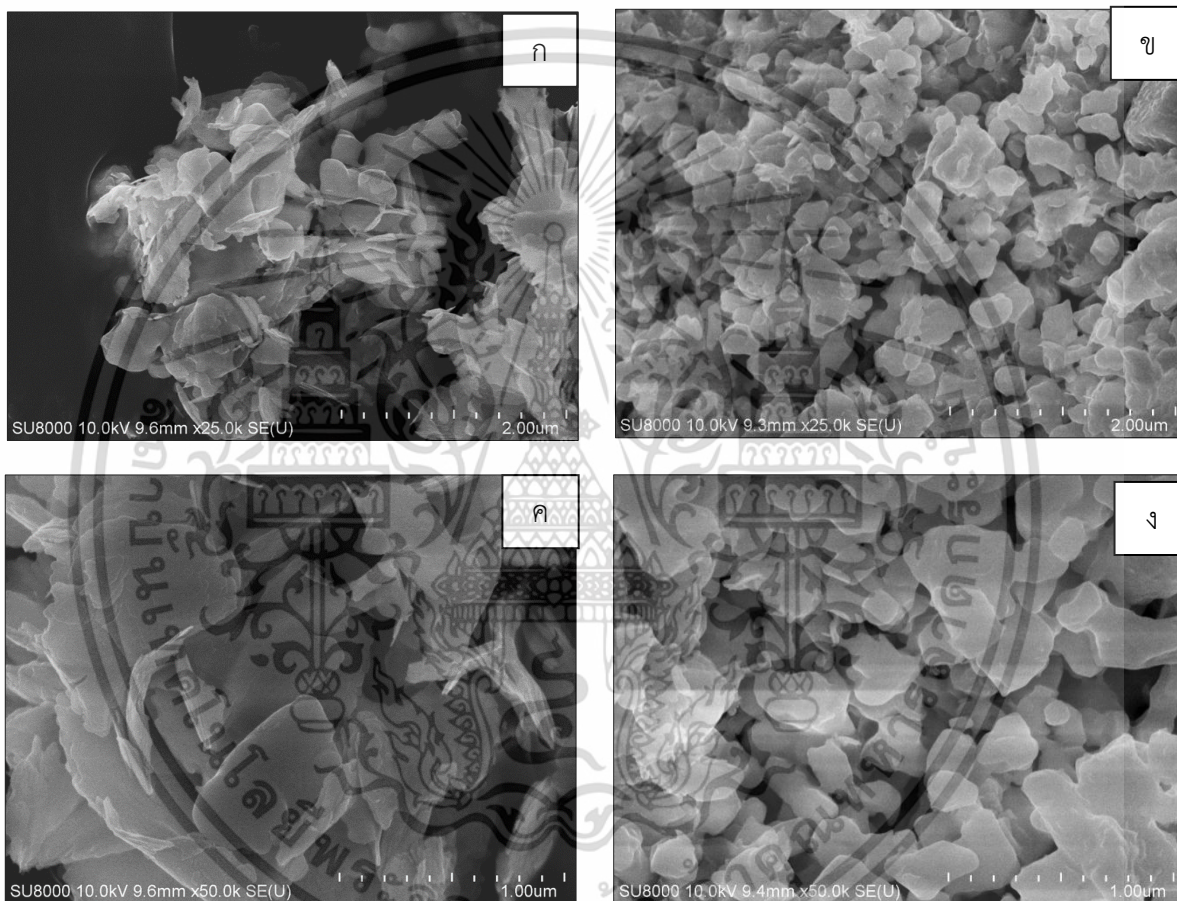
ข) ตัวดูดซับ PVP-BiOBr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ

4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ

การศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ โดยนำตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr มาทำการศึกษาพื้นที่ผิวและธาตุองค์ประกอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ (Scanning Electron Microscope , SEM) ที่กำลังขยาย 25,000 และ 50,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.2



รูป 4.2 SEM image ของตัวดูดซับ

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| ก) BiOBr ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า | ข) PVP-BiOBr ที่กำลังขยาย 25,000 เท่า |
| ค) BiOBr ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า | ง) PVP-BiOBr ที่กำลังขยาย 50,000 เท่า |

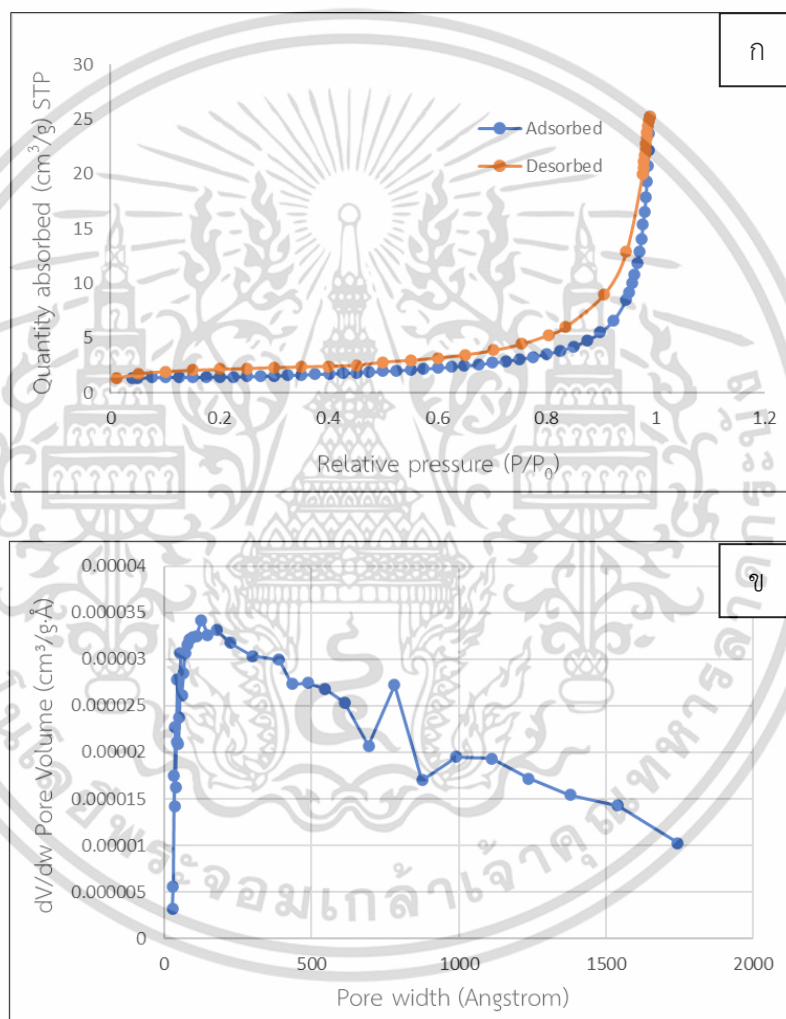
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ PVP-BiOBr มีความละเอียดและมีการกระจายตัวของอนุภาคที่มากกว่าตัวดูดซับ BiOBr ทำให้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr มีพื้นที่ผิวที่มากกว่า จึงสันนิษฐานว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวดูดซับ PVP-BiOBr มีความสามารถในการกำจัดอินดิโก คาร์มินได้ดีกว่าตัวดูดซับ BiOBr เนื่องจาก PVP ช่วยทำให้อุณหภูมิของ BiOBr ไม่เกาะตัวกันเองจนเป็นก้อนขนาดใหญ่

4.2.2 พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

นำตัวดูดซับ PVP-BiOBr มาทำการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวโดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET ได้ผลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของ PVP-BiOBr

ก) ความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สที่ถูกดูดซับกับความดันสัมพัทธ์ ข) การกระจายขนาดของรูพรุนของ PVP-BiOBr

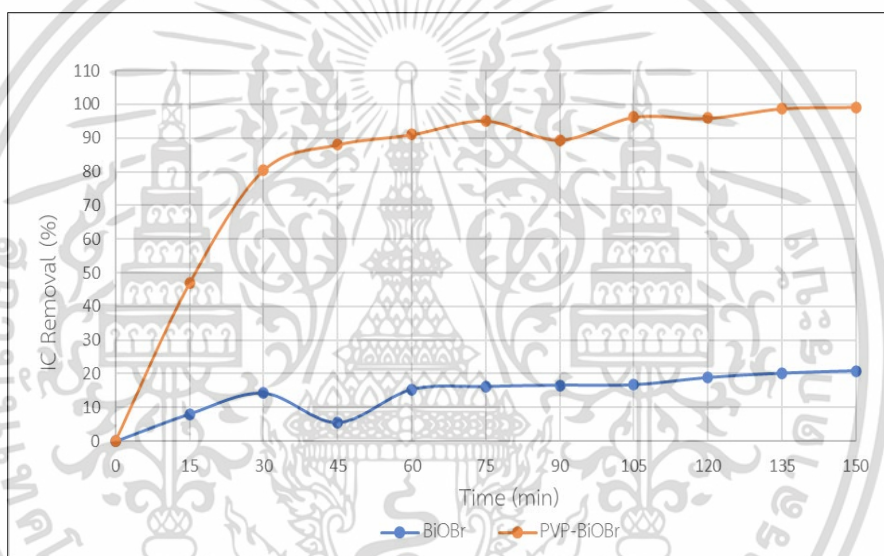
จากรูปที่ 4.3ก จะเห็นว่าตัวดูดซับ PVP-BiOBr เป็นไอโซเทอมแบบ IV ที่มี Hysteresis loop สูงขึ้นในช่วงความดันสัมพัทธ์ (P/P₀) 0.75-1.00 และจากรูปที่ 4.3ข จะเห็นว่ามีการกระจายขนาดรูพรุนอยู่ไม่กว้างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 27.5-1743 Å นอกจากนี้ยังทราบว่าตัวดูดซับ PVP-BiOBr มีพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน เท่ากับ 5.0911 m²/g และ 0.038401 cm³/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 163.01 Å (หรือ 16.301 นาโนเมตร) ซึ่งอยู่ในช่วงของ mesoporous

4.3 การกำจัดอินดิโก คาร์มิน โดยกระบวนการดูดซับใน Batch system

4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน ด้วยการใช้ตัวดูดซับ

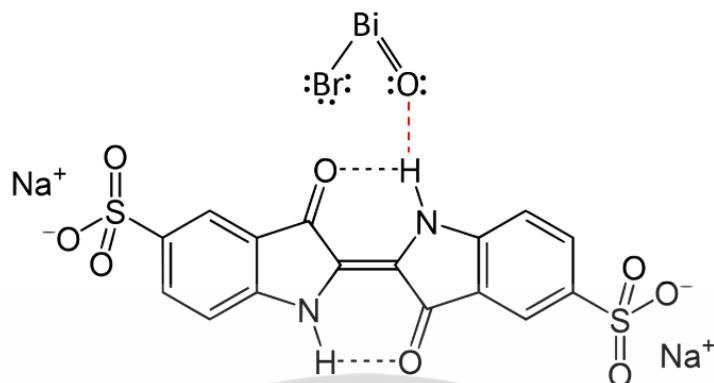
เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr โดยได้ผลดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการดูดซับ อินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ BiOBr และ PVP-BiOBr

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าตัวดูดซับ PVP-BiOBr สามารถดูดซับอินดิโก คาร์มินได้ดีกว่าตัวดูดซับ BiOBr โดยในนาที่ที่ 120 PVP-BiOBr สามารถกำจัดอินดิโก คาร์มินได้สูงถึง 95.91% ในขณะที่ BiOBr สามารถกำจัดไปได้เพียง 18.86% เท่านั้น เนื่องจาก PVP-BiOBr มีพื้นที่ผิวมากกว่า BiOBr ทำให้อินดิโก คาร์มิน นั้นไปจับกับ PVP-BiOBr มากกว่า BiOBr จึงสรุปได้ว่า PVP-BiOBr มีความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มินได้ดีกว่าตัวดูดซับ BiOBr เราจึงเลือก PVP-BiOBr มาใช้ในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน โดยกลไกการดูดซับระหว่างสีย้อมกับตัวดูดซับ เกิดขึ้นจากพันธะไฮโดรเจน ดังรูปที่ 4.5

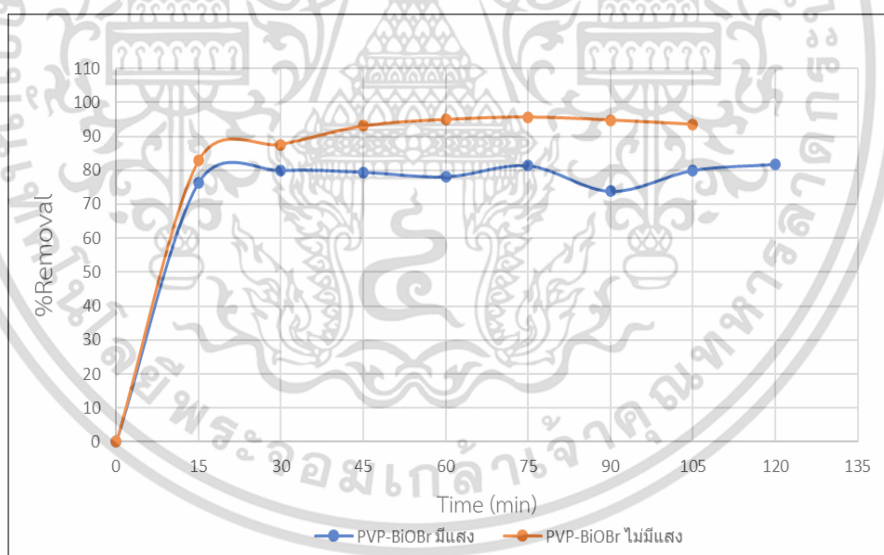
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กลไกการดูดซับระหว่างตัวดูดซับกับสีย้อมอินดิโก คาร์มิน

4.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มินด้วยการใช้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง

เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน โดยการใช้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr โดยได้ทำการทดลองทั้งในที่มืดและที่มีแสง ได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในสถานะที่มีแสงและไม่มีแสง

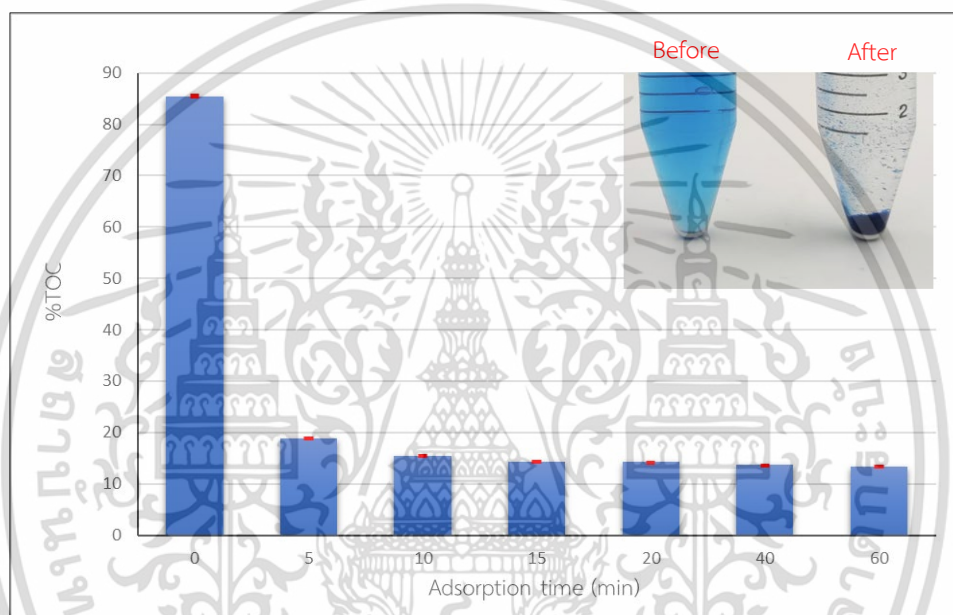
จากรูป 4.6 จะเห็นได้ว่าแสงไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับอินดิโก คาร์มิน จากการใช้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr คาดว่าเกิดจากความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มินในตอนเริ่มต้นมีค่าต่ำ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ทำให้ตัวดูดซับ PVP-BiOBr สามารถกำจัดอินดิโก คาร์มินได้ดี โดยไม่จำเป็นต้องใช้แสงในการช่วยกระตุ้น จึงเห็นว่าประสิทธิภาพของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ในสภาวะที่มีแสงและไม่มีแสงให้ผลไม่ต่างกัน

4.3.3 การหาปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนของอินดิโก คาร์มิน

เป็นการตรวจสอบปริมาณอินทรีย์คาร์บอนของอินดิโก คาร์มิน เมื่อทำการดูดซับที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 40 และ 60 นาที ได้ผลดังรูปที่ 4.7



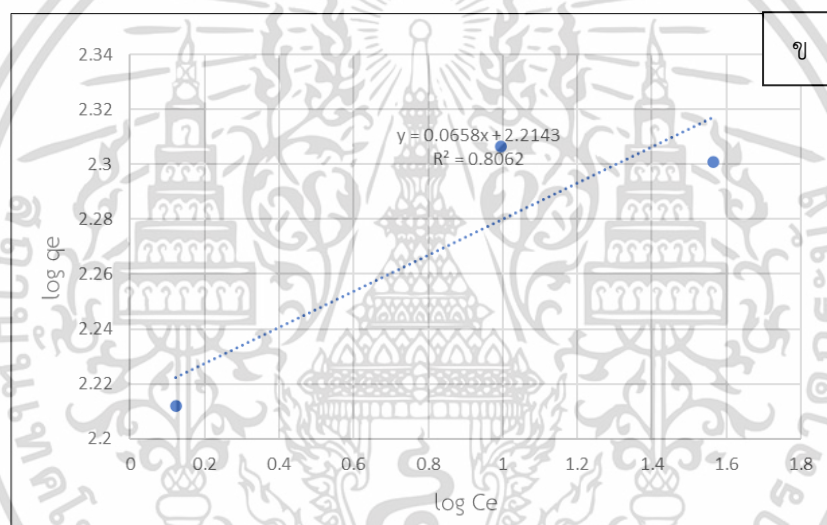
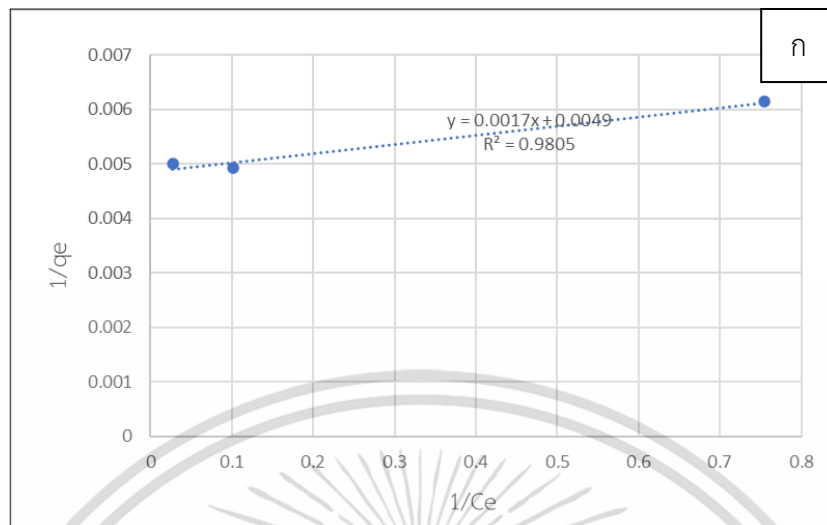
รูปที่ 4.7 ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ของอินดิโก คาร์มินเมื่อผ่านการดูดซับ

จากรูป 4.7 จะเห็นได้ว่า ในการทดลองการดูดซับอินดิโก คาร์มินพบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณของอินทรีย์คาร์บอนในอินดิโก คาร์มินลดลง จึงสรุปได้ว่า ระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับอินดิโก คาร์มิน

4.4 การศึกษาไอโซเทอม

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่ากระบวนการดูดซับในงานวิจัยนี้เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ หรือ แบบฟรุนดลิช โดยจะได้ผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.8ก และ 4.8ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กลไกการดูดซับ

ก) การดูดซับแบบแลงเมียร์

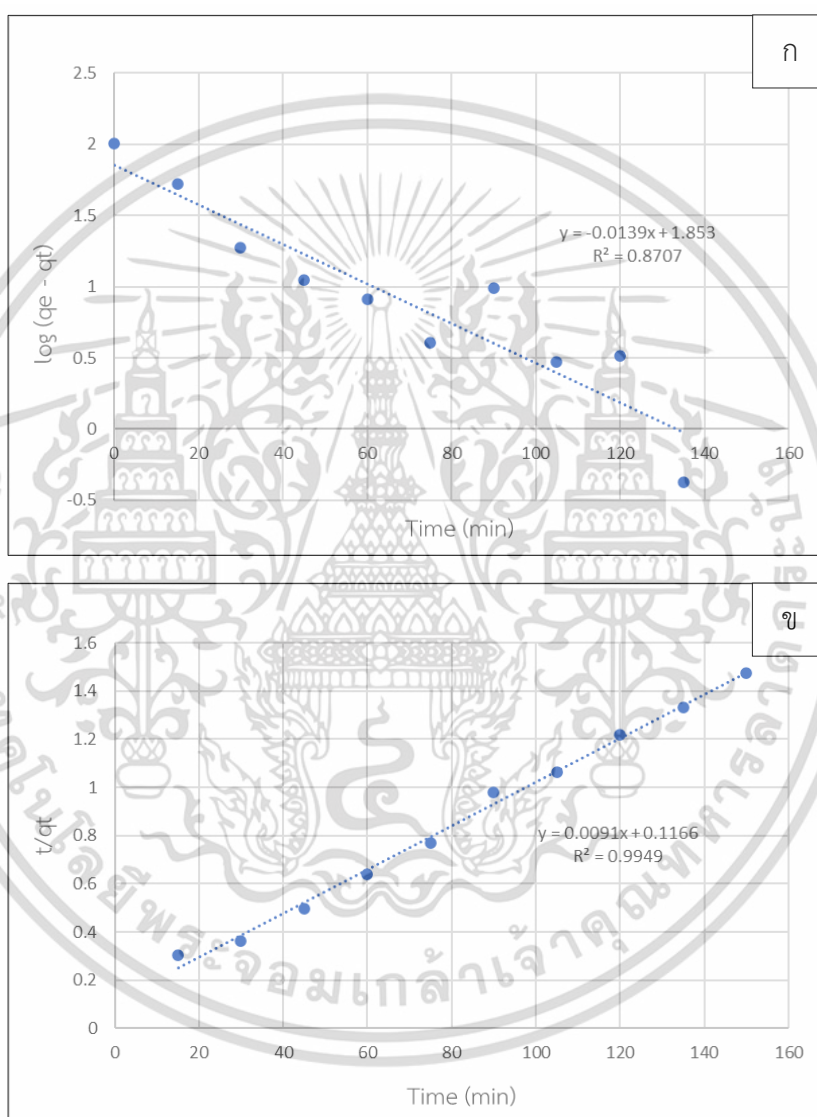
ข) การดูดซับแบบฟรุนดลิช

จากรูป 4.8ก จะเห็นว่า ค่า R-Square ของการดูดซับแบบแลงเมียร์ มีค่าเท่ากับ 0.9805 ในขณะที่รูป 4.8ข การดูดซับแบบฟรุนดลิช มีค่า R-Square เท่ากับ 0.8062 จึงสรุปว่า การดูดซับในการทดลองนี้เป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_m) ที่ 204.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เป็นการศึกษาเพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับ ว่าเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากอะไร โดยมีปรากฏการณ์การดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ การดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สมการอัตราการดูดซับ

ก) การดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม

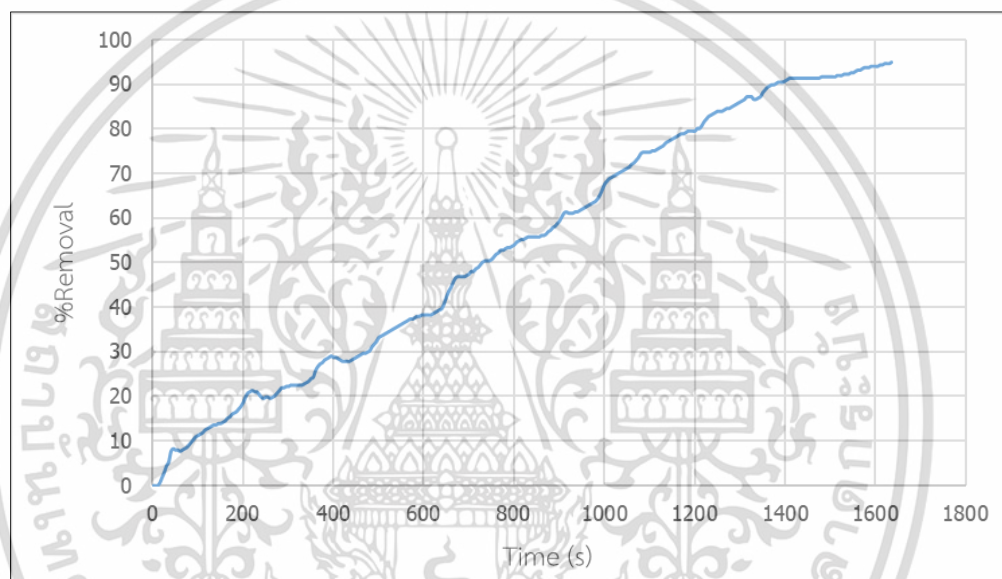
ข) การดูดซับอันดับที่สองเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9ก จะเห็นว่าค่า R-Square ของการดูดซับอันดับที่สองเทียมมีค่าเท่ากับ 0.9949 ในขณะที่รูป 4.9ข ที่เป็นการดูดซับอันดับที่หนึ่งเทียม มีค่า R-Square เท่ากับ 0.8707 จึงสรุปว่า การดูดซับในการทดลองนี้ เป็นการดูดซับอันดับที่สองเทียม ซึ่งเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงทางเคมี

4.6 การใช้ Flow System ในการกำจัดอินดิโก คาร์มิน ด้วยกระบวนการดูดซับ

เป็นการนำระบบแบบไหลมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับ โดยให้โดยให้อินดิโก คาร์มินไหลผ่านคอลัมน์ที่มีตัวดูดซับ PVP-BiOBr และไหลต่อเข้าไปยังคิวเวต ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10

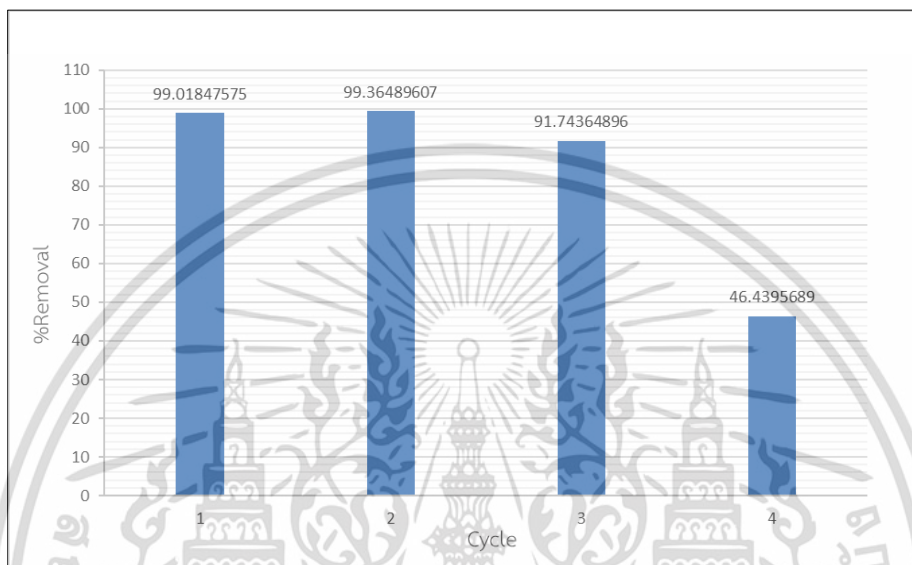


รูปที่ 4.10 ผลการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr ใน Flow system

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น จะสามารถกำจัดอินดิโก คาร์มินได้มากยิ่งขึ้น โดยในวินาทีที่ 1400 สามารถกำจัดอินดิโก คาร์มินได้มากถึง 90.6667% สรุปได้ว่า ระบบแบบไหลสามารถนำมาใช้ในการดูดซับอินดิโก คาร์มินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.7 การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ซ้ำ

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาว่าตัวดูดซับ PVP-BiOBr สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้กี่ครั้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 แผนภูมิแสดงความสามารถในการ Reuse ของตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่า ในการนำตัวดูดซับ PVP-BiOBr มาใช้ซ้ำในครั้งที่ 1 จนถึงครั้งที่ 3 ตัวดูดซับสามารถกำจัดอินดิโก คาร์มินได้มากกว่า 90% และในขณะที่ครั้งที่ 4 สามารถกำจัดได้เพียง 46.44% เท่านั้น จึงสรุปได้ว่า ตัวดูดซับ PVP-BiOBr สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้สูงสุด 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มีน ด้วยกระบวนการดูดซับ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ตัวดูดซับ PVP-BiOBr ได้ด้วยกระบวนการตกตะกอน และสรุปผลการกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มีนได้ดังนี้

1. ตัวดูดซับ PVP-BiOBr มีประสิทธิภาพในการกำจัดอินดิโก คาร์มีน ได้ดีกว่าตัวดูดซับ BiOBr
2. ในกระบวนการดูดซับอินดิโก คาร์มีน ด้วยตัวดูดซับ PVP-BiOBr แสงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอินดิโก คาร์มีน
3. เวลาที่มีผลต่อการดูดซับอินดิโก คาร์มีน
4. กระบวนการดูดซับในงานวิจัยนี้เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับที่สองเทียม
5. ระบบแบบไหลสามารถนำมาใช้ในการดูดซับอินดิโก คาร์มีนได้ โดยในวินาทีที่ 1400 สามารถกำจัดอินดิโก คาร์มีนได้มากถึง 90.67%
6. สามารถนำตัวดูดซับ PVP-BiOBr กลับมาใช้ซ้ำได้สูงสุด 3 ครั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในระหว่างการปั่นกวในขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวดูดซับควรใช้กระดาษอลูมิเนียมปิดที่ปากภาชนะตลอดเวลา เพื่อป้องกันการระเหยของเอทานอล
2. ในขั้นตอนการล้างตะกอน ของการสังเคราะห์ตัวดูดซับ ควรรอให้นาน เพื่อให้ตะกอนตกลงไปที่ข้างล่างภาชนะเยอะขึ้น จะทำให้ได้ตัวดูดซับในปริมาณที่เยอะขึ้นตาม
3. ในการกำจัดสีย้อมอินดิโก คาร์มีน ด้วยกระบวนการดูดซับ ในระบบแบบไหล ควรระวังไม่ให้มีฟองอากาศเข้าสู่ระบบ เพราะจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bofan, M. Zang, L. Zang, P.A. Bingham, W. Li and Shiro K. 2020 “PVP surfactant-modified flower like BiOBr with tunable bandgap structure for efficient photocatalytic decontamination of pollutants.” *Applied Surface Science*. 530 : 147233
- [2] Mai, E. Elkhatib, S. Gouveia, C. Cameselle and Emad A . 2022 “Cost-effective ecofriendly nanoparticles for rapid and efficient indigo carmine dye removal from wastewater: Adsorption equilibrium, kinetics and mechanism.” *Environmental Technology & Innovation*. 28 : 102595
- [3] Ramesh, T. N. Kirana, D. V. Ashwini, A. Manasa and T.R. 2017 “Calcium hydroxide as low cost adsorbent for the effective removal of indigo carmine dye in water.” *Saudi Chemical Society* 21, 165–171
- [4] Mahmoud, M.A. Ahmed and Ashraf A. M. 2021 “Effective removal of indigo carmine dye from wastewaters by adsorption onto mesoporous magnesium ferrite nanoparticles.” *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 16 : 100550
- [5] Teeradech, T. Chankhanittha, K. Hemavibool and Suwat N. 2022 “Solvothermal synthesis of BiOBr photocatalyst with an assistan of PVP for visible-light-driven photocatalytic degradation of fluoroquinolone antibiotics.” *Catalysis Today* 384-386 : 209-227
- [6] You Wang, Q. Yang, X. Wang, J. Yang, Y. Dai, Y. He, W. Chen and Wen Z. 2019 “Photocatalytic degradation of rhodamin B and diclofenac sodium on hollow hierarchical microspheres of BiOBr modified with sepiolite and polyvinylpyrrolidone (PVP).” *Materials Science & Engineering B* 244 : 12-22
- [7] รศ.ดร. ศิริพร จิ่งสุทธิวงษ์. 2560. “การศึกษาวัสดุดูดซับเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยวิธีทางเคมีคำนวณ.” โครงการวิจัยจากทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2560 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [8] อติศักดิ์ คีรีรักษ์. 2561. “การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเล็ต.” ปรินญาวิทยาศาสตร์วิทยาสถิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [9] รวิทร์ สุทธะนันท์. 2554. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้แกลบดัดแปร.” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 21 ฉบับที่ 2
- [10] Elba Ortiz, Hugo Solís and Sandra Loera-Serna. 2016 “Degradation of Indigo Carmine Using Advanced Oxidation Processes: Synergy Effects and Toxicological Study.” Environmental Protection 7 : 1693-1706
- [11] Mai, E. Elkhatib, S. Gouveia, C. Cameselle and Emad A . 2022 “Enhanced removal of Indigo Carmine dye from textile effluent using green cost-efficient nanomaterial: Adsorption, kinetics, thermodynamics and mechanisms” Sustainable Chemistry and Pharmacy 29 : 100753

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

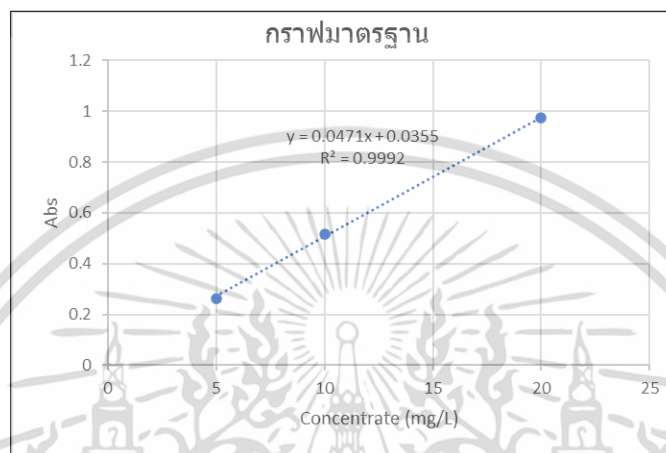


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณหาความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มินจากกราฟมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณ



จากรูปจะเห็นว่ากราฟมาตรฐานมีสมการแผนภูมิคือ

$$y = 0.0471x + 0.0355$$

โดยพล็อตแกน y คือ ค่าการดูดกลืนแสง และแกน x คือ ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน (มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยเมื่อจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน

จะได้สมการ

$$x = \frac{(y - 0.0355)}{0.0471}$$

หากวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ 0.75 ดังนั้น

$$x = \frac{(0.75 - 0.0355)}{0.0471}$$

$$x = 15.1699$$

จะได้ความเข้มข้นของอินดิโก คาร์มิน เท่ากับ 15.1699 mg/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ

โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

ตัวอย่างการคำนวณ : ชั่งตัวดูดซับ PVP-BiOBr มา 10 mg (W) มาใส่ในบีกเกอร์ที่มีอินดิโกความเข้มข้น 20 mg/L (C_0) ปริมาตร 50 ml (V) หลังจากผ่านกระบวนการดูดซับ 60 นาทีพบว่า เข้มข้นของอินดิโกลดลง เหลือเพียง 1.2 mg/L (C_e)

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

$$= \frac{(20 - 1.2) \times 0.05}{0.01}$$

$$q_e = 94 \text{ mg/g}$$

จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับอินดิโก คาร์มินของตัวดูดซับ PVP-BiOBr เท่ากับ 94 mg/



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการงานพิเศษ/ปัญหาพิเศษ/สหกิจศึกษา

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า นางสาวจุฑาทิพย์ กิ่งทอง รหัสประจำตัว 62050265

นายณัฐพจน์ เอื้อชินกุล รหัสประจำตัว 62050284

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี

ขอรับรองว่าโครงการงานพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การกำจัดสีย้อมอินดิโกด้วยกระบวนการดูดซับ

ชื่อภาษาอังกฤษ Removal of Indigo Dye Through Adsorption Process

ปีการศึกษา 2565

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมียดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการงานพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว โปรแกรมอักขรวิสุทธิ์ 9.00 %

ลงชื่อ.....
(นางสาวจุฑาทิพย์ กิ่งทอง)
นักศึกษา

ลงชื่อ.....
(นายณัฐพจน์ เอื้อชินกุล)
นักศึกษา

ข้าพเจ้า รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการงานพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....
(รศ.ดร.เสาวภาคย์ อีราทรง)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้