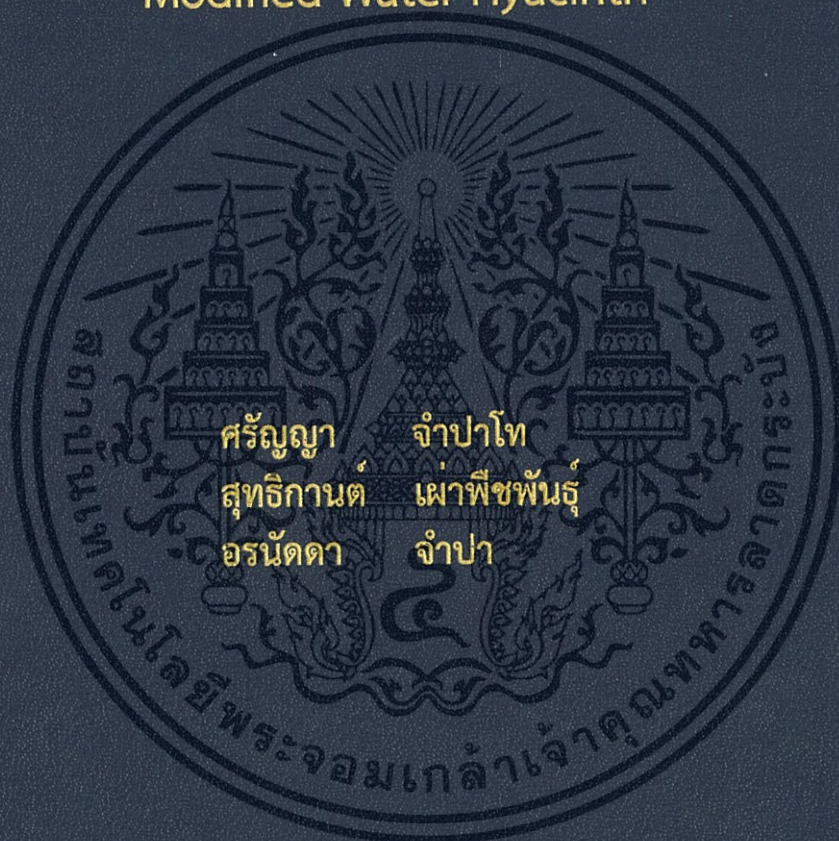


การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย
ซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

Adsorption of Direct Red 83 in Synthetic Wastewater
Using Cetyltrimethyl Ammonium Bromide
Modified Water Hyacinth



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การดูดซับสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ในน้ำเสียสังเคราะห์
โดยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย
ซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

Adsorption of Direct Red 83 in Synthetic Wastewater
Using Cetyltrimethyl Ammonium Bromide
Modified Water Hyacinth



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

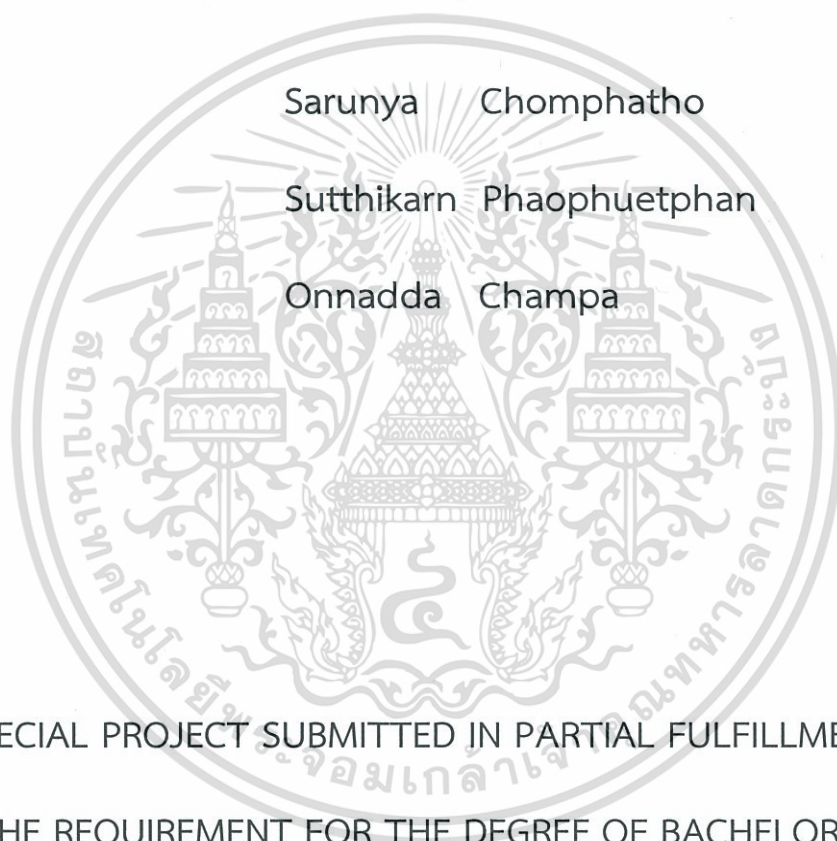
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Adsorption of Direct Red 83 in Synthetic Wastewater
Using Cetyltrimethyl Ammonium Bromide
Modified Water Hyacinth



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF
SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)

DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยผักตบชวา
ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์
Adsorption of Direct Red 83 in Synthetic Wastewater
Using Cetyltrimethyl Ammonium Bromide Modified
Water Hyacinth

ชื่อนักศึกษา

นางสาวศรัญญา จำปาโท รหัสนักศึกษา 56050759
นางสาวสุทธิกานต์ เผ่าพืชพันธุ์ รหัสนักศึกษา 56050776
นางสาวอรันตดา จำปา รหัสนักศึกษา 56050792

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา

เคมี




ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการ
พิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย ประธานกรรมการ	
ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศรัญญา	จำปาโท	รหัสนักศึกษา 56050759
	นางสาวสุทธิกานต์	เผ่าพีชพันธุ์	รหัสนักศึกษา 56050776
	นางสาวอรนัตตา	จำปา	รหัสนักศึกษา 56050792
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2559		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์		

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมลพิษทางน้ำที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมและสิ่งทอเป็นปัญหาอันดับต้น ๆ ของประเทศ น้ำเสียมีการปนเปื้อนสีย้อม ทำให้น้ำมีสีเข้มเป็นที่น่ารังเกียจ งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 โดยใช้ผักตบชวาซึ่งเป็นพืชที่จำนวนมากและหาได้ง่าย ผักตบชวาก่อนนำไปดูดซับจะทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยซีทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ศึกษาค่า pH_{pzc} และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีย้อม ได้แก่ pH, ปริมาณของตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย, อุณหภูมิ, และ อิเล็กโทรไลต์ วัดค่าความเข้มข้นของสีย้อมโดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร งานวิจัยนี้ยังรวมถึงการศึกษาไอโซเทอร์ม เทอร์โมไดนามิก และอัตราเร็วของการดูดซับ จากการทดลองพบว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีพื้นผิวไม่มีระเบียบ เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ลักษณะพื้นผิวมีระเบียบมากขึ้น หลังจากดูดซับสีย้อมพื้นผิวจะยิ่งดูเรียบมากขึ้น ค่า pH_{pzc} ของตัวดูดซับคือ 5.15 การดูดซับสูงที่สุดเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 3 เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ และอุณหภูมิในการบำบัด ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำเสีสีย้อม ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะลดลง สีย้อมประเภทนี้ เมื่อใส่อิเล็กโทรไลต์ในน้ำเสีสีย้อม พบว่าเกลือแคลเซียมจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมลดลงมากกว่าเกลือโซเดียม การดูดซับเป็นไปตามสมการการดูดซับแบบ Langmuir/ มีค่า q_e เป็น 66.2252 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า K_L เท่ากับ 1.6064 ลิตรต่อมิลลิกรัม ค่า R_L เท่ากับ 0.0062 จากสมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ค่า E ที่ได้บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากสมการการดูดซับของ

Redlich-Peterson ค่า b_R เท่ากับ 1.0797 ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Langmuir การดูดซับในครั้งนี้เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการศึกษาเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย ค่า K_2 จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย ค่า q_e จะเพิ่มขึ้น ค่า E_a , ΔH^0 , ΔS^0 , ΔG^0 ที่อุณหภูมิ 33°C, 45°C และ 55°C มีค่าเท่ากับ 30.31 KJ/mol, 3.95 KJ/mol, 152.25 J/mol.K, -7.7675 KJ/mol, -9.5946 KJ/mol และ -11.1171 KJ/mol ตามลำดับ กระบวนการดูดซับจะเป็นกระบวนการดูดความร้อน เป็นการดูดซับทางกายภาพและสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ

คำสำคัญ : การดูดซับ, การกำจัดสีย้อม, ไอโซเทอร์ม, ไคเนติกเรต 83, จลนศาสตร์, อุณหพลศาสตร์, ซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Adsorption of Direct Red 83 in Synthetic Wastewater Using Cetyltrimethyl Ammonium Bromide Modified Water Hyacinth
Students	Miss Sarunya Chomphatho Student ID 56050759 Miss Sutthikarn Phaophuetphan Student ID 56050776 Miss Onnadda Champa Student ID 56050792
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assist. Prof. Dr.Chompoonut Chaiyaraksa

Abstract

Currently, water pollution from textile and dyeing factories is the main problem in the country. Waste water is contaminated with dye and this makes the water look dark. This project investigated an adsorption of direct dye 83 using water hyacinth, which is a very abundant and easily available plant. Water hyacinth before adsorption was improved with Cetyltrimethyl Ammonium Bromide (CTAB). The physical characteristics of the adsorbent was investigated using the SEM and FTIR. The study included pH_{pzc} and factors influencing dye adsorption, such as pH, amount of adsorbent, initial concentration of solution, temperature and electrolyte. The dye concentration was measured by UV spectrometer at the wavelength of 535 nm. This study also included isotherms, thermodynamics and the rate of adsorption. The experiments showed that unmodified water hyacinth had no unity surface. The modified water hyacinth had more unity surface and after adsorption the surface became even smoother. The pH_{pzc} of the adsorbent was 5.15. The highest adsorption was obtained when pH of the wastewater was 3. The higher the temperature and amount of adsorbent, the higher the percentage of dye adsorption. The higher the dye concentration, the less the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

percentage of dye adsorption. Adding electrolytes to wastewater, it was found that calcium salts resulted in lower dye removal percentages than sodium salts. The adsorption based on the Langmuir adsorption equation with the q_e value of 66.2252 mg / g. The K_L value was 1.6064 liters per mg. The R_L value was 0.0062. The E value from Dubinin-Radushkevich isotherm indicated the physical absorption. The b_R value of the Redlich-Peterson was 1.0797, which supported the Langmuir adsorption. The adsorption followed the second order reaction. When the water temperature increased, the K_2 value increased. As the initial concentration of the dye increased, The value of q_e increased. The E_a , ΔH^0 , ΔS^0 , ΔG^0 at 33°C, 45°C and 55°C were 30.31 KJ/mol, 3.95 KJ/mol, 152.25 J/mol.K, -7.7675 KJ/mol, -9.5946 KJ/mol, and -11.1171 KJ/mol, respectively. It is a physical absorption and can occur naturally.

Keywords : Adsorption, Dye removal, Isotherm, Direct Red 83, Kinetic, Thermodynamic, Cetyltrimethyl ammonium bromide

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ทางผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ตลอดการทดลอง ทำให้โครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบผศ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และ ดร.กลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่อง แนวทางการแก้ปัญหา รวมไปถึงการตรวจสอบและติชมโครงการพิเศษเพื่อให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเคมี และเจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ในการทดลองต่าง ๆ ส่งผลให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา บุคคลในครอบครัว ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู ตลอดจนเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ที่คอยเป็นกำลังใจ แนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีตลอดจนการทำโครงการพิเศษฉบับนี้จนออกมาเสร็จสมบูรณ์

ศรัณญา จำปาโท
สุทธิกานต์ เผ่าพิชพันธ์
อรนัลดดา จำปา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ด
คำย่อ/สัญลักษณ์	ท
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 น้ำเสีย.....	4
2.1.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย.....	4
2.1.2 ปัญหามลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	5
2.1.3 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป.....	6
2.1.4 ประเภทสิ่งสกปรกของกระบวนการฟอกย้อม.....	6
2.1.5 การลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม.....	7
2.1.6 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า.....	8
2.2 สีย้อม.....	10
2.2.1 โครงสร้างสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	10
2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม.....	11
2.2.3 แหล่งกำเนิดของสีย้อม.....	12
2.2.4 การจำแนกประเภทของสีย้อม.....	13
2.3 การดูดซับ.....	14
2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ.....	15
2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี.....	15
2.4 กลไกการดูดซับ.....	16
2.5 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	16
2.5.1 แรงแวนเดอร์วาลส์.....	16
2.5.2 ไฟฟ้าสถิต.....	16
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	17
2.7 โลหะหนัก.....	18
2.7.1 อันตรายจากโลหะหนัก.....	18
2.8 สารละลายอิเล็กโทรไลต์และนอนอิเล็กโทรไลต์.....	20
2.9 องค์ประกอบของเซลล์พืช.....	20
2.9.1 ผนังเซลล์.....	21
2.9.2 คลอโรพลาสต์.....	23
2.10 ผักตบชวา.....	23
2.11 สารลดแรงตึงผิว.....	24
2.12 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	26
2.12.1 สมดุลของการดูดซับ.....	26
2.12.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	26
2.12.2.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	26
2.12.2.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm).....	27
2.12.2.3 ไอโซเทอร์มแบบเทมกิน (Temkin isotherm).....	28
2.12.2.4 ไอโซเทอร์มแบบ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)..	28
2.12.2.5 ไอโซเทอร์มแบบชิปส์ (Sips isotherm).....	29
2.12.2.6 ไอโซเทอร์มแบบRedlich-Peterson (R-P isotherm).....	29
2.13 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ.....	30
2.13.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order).....	30
2.13.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order).....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.13.3 แบบจำลองของ Elovich (Elovich model).....	31
2.13.4 แบบจำลองการแพร่กระจายภายในการดูดซับ (Intraparticle diffusion model).....	32
2.14 ค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation).....	32
2.15 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี.....	33
2.15.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี.....	33
2.15.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์.....	35
2.16 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี.....	36
2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีการทำงานวิจัย.....	43
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	43
3.1.1 อุปกรณ์.....	43
3.1.2 สารเคมี.....	44
3.2 วิธีการทดลอง.....	44
3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ.....	44
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	45
3.2.2.1 การเตรียมน้ำเสียที่ย้อมสีสังเคราะห์สีไดเร็กซ์เรด 83.....	45
3.2.2.2 การสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำเสียที่ย้อมสีสังเคราะห์สีไดเร็กซ์เรด 83.....	45
3.2.3 การปรับปรุงคุณภาพผิวกับขวดด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) 0.01 M.....	45
3.2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับ ทั้งก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และหลังการปรับปรุงคุณภาพ.....	45
3.2.5 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}).....	46
3.2.6 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อน้ำเสียที่ย้อมสีสังเคราะห์.....	46
3.2.6.1 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียที่ย้อมสีสังเคราะห์.....	46
3.2.6.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียที่ย้อมสีสังเคราะห์.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.6.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	47
3.2.6.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	48
3.2.6.5 ศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	48
3.2.6.6 ศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับ น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	49
3.2.7 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	49
3.2.8 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม.....	49
3.2.9 ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์.....	49
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	50
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา.....	50
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)	50
4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR).....	51
4.2 การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	53
4.3 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{pzc}).....	53
4.4 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์.....	54
4.4.1 อิทธิพลของค่า pH.....	54
4.4.2 อิทธิพลของปริมาณผักตบชวา.....	56
4.4.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	57
4.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	59
4.4.5 อิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	60
4.4.6 อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83.....	61
4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวา.....	62
4.5.1 สมการการดูดซับของ Langmuir.....	63
4.5.2 สมการการดูดซับของ Freundlich.....	64
4.5.3 สมการการดูดซับของ Temkin.....	65
4.5.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.5 สมการการดูดซับของ Sips.....	68
4.5.6 สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson (R-P).....	69
4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB).....	72
4.6.1 แปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมดังนี้ 100, 150 และ 200 g/m ³	72
4.6.2 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสีย้อมดังนี้ 33°C, 45°C และ 55 °C.....	74
4.7 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....	79
4.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี.....	81
4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) ของการดูดซับสีย้อม.....	82
4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) ของการดูดซับสีย้อม....	83
4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ของการดูดซับ.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	85
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
เอกสารอ้างอิง	87
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	116
ภาคผนวก ง.....	117
ภาคผนวก จ.....	118
ภาคผนวก ฉ.....	119
ภาคผนวก ช.....	120
ภาคผนวก ซ.....	121
ภาคผนวก ฌ.....	123

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางเคมี.....	15
2.2 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม.....	25
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ G ในทั้ง 4 กรณี.....	37
3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของผักตบชวา.....	45
4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ.....	52
4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson สำหรับการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวา ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ.....	71
4.3 ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion).....	78
4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	80
4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	82
4.6 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์.....	84
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83.....	93
ข.1 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุง คุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	95
ข.2 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุง คุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	96
ข.3 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย สีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุง คุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิ	

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ข.4 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	98
<p>ข.5 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	99
<p>ข.6 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	100
<p>ข.7 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	101
<p>ข.8 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	102
<p>ข.9 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....</p>	103

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	104
ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 150 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	105
ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	106
ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส.....	107
ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส.....	108
ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส.....	109

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และไม่เติมสารละลายมาตรฐาน โลหะหนัก.....</p>	110
<p>ข.17 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน ทองแดง.....</p>	110
<p>ข.18 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน โครเมียม.....</p>	111
<p>ข.19 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน แมงกานีส.....</p>	111
<p>ข.20 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน สังกะสี.....</p>	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
<p>ข.21 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน ทั้ง 4 ตัว.....</p>	112
<p>ข.22 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และไม่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์.....</p>	113
<p>ข.23 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....</p>	113
<p>ข.24 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....</p>	114
<p>ข.25 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมซัลเฟต.....</p>	114
<p>ข.26 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมฟอสเฟต.....</p>	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.27 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิลิโคไดรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายแคลเซียมไนเตรท.....	115
ค.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	116
ง.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	117
จ.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย ที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	117
ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับในการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส.....	118
ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 3 ควบคุมที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	119
ช.1 ค่า pH ของสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ที่ไม่ได้ใส่ตัวดูดซับ, ค่า pH เริ่มต้น และ pHสุดท้าย ของการทดลองหาค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์.....	120

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83.....	10
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พีซ.....	20
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ.....	31
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน.....	34
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$	35
4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา.....	50
4.2 สเปกตรัมของผักตบชวา วิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy.....	51
4.3 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83.....	53
4.4 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์.....	53
4.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อน้ำเสียมี pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5 และ 7 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m^3 ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	54
4.6 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) 5.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 เมื่อใช้ pH ของสารละลาย 2, 3, 4, 5 และ 7 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	55
4.7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	56
4.8 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียดีย้อม 100 g/m^3 pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	57
4.9 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100, 150 และ 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m ³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100, 150 และ 200 g/m ³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง.....	58
4.11 เปอร์เซนต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m ³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m ³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	59
4.12 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m ³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m ³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33 (อุณหภูมิห้อง), 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	60
4.13 กราฟแสดงอิทธิพลของโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไคเร็กซ์เรด 83.....	61
4.14 กราฟแสดงอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไคเร็กซ์เรด 83.....	62
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C _e /q _e กับ (C _e).....	63
4.16 สมการการดูดซับของ Freundlich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 150, 200 g/m ³	65
4.17 สมการการดูดซับของ Temkin เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 150, 200 g/m ³	66
4.18 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 150, 200 g/m ³	67
4.19 สมการการดูดซับของ Sips เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 150, 200 g/m ³	68
4.20 สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น 100, 150, 200 g/m ³	69
4.21 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 100, 150, 200 g/m ³	72
4.22 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 100, 150, 200 g/m ³	73
4.23 สมการของ Elovich เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 100, 150, 200 g/m ³	73
4.24 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) เมื่อใช้ความเข้มข้นสีย้อม เป็น 100, 150, 200 g/m ³	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo First Order Model) เมื่อใช้ข้อมูลหุ้มิในการดูดซับที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	74
4.26 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo Second Order Model) เมื่อใช้ข้อมูลหุ้มิในการดูดซับที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	75
4.27 สมการของ Elovich เมื่อใช้ข้อมูลหุ้มิในการดูดซับที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	75
4.28 การแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) เมื่อใช้ข้อมูลหุ้มิในการดูดซับที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	76
4.29 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหุ้มิต่าง ๆ.....	80
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหุ้มิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	81
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหุ้มิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส.....	82
ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมไดเร็กต์เรด 83.....	92
ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83.....	93
ข.1 เปร้เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ โดยผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เมื่อน้ำเสียมี pH เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m ³ ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m ³ ทำการทดลองที่อุณหุ้มิห้อง.....	94
ข.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา.....	121
ฅ.1 สเปคตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared.....	123

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
A	แฟกเตอร์ความถี่
A	ค่าคงที่การสมดุลการยึดเกาะ
a_R	ค่าคงที่ Redlich-Peterson (1/mg)
b_0	ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ
b_R	ค่าที่อยู่ระหว่าง 0-1
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
C_t	ความเข้มข้นที่เวลานั้น ๆ ของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว
C_e	ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะที่สมดุลของสารที่ถูกดูดซับ
E	พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ
E_a	พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา
g	กรัม
H_1	เอนทัลปี ณ ภาวะเริ่มต้น
H_2	เอนทัลปี ณ สภาวะสุดท้าย
J	จูล
K	เคลวิน
K_{DR}	ค่าคงที่ของ Dubinin-Radushkevich
K_F	ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น
kg	กิโลกรัม
k_{id}	ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน
KJ	กิโลจูล
K_L	ค่าคงที่ของแลงเมียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
K_R	ปริมาณสูงสุดของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับจากวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) (mg/g)
K_S	ค่าคงที่สมดุลของ Sips
k_1	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง
k_2	ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง
L	ลิตร
log	ล็อกกาลีทึม
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
mm	มิลลิเมตร
mol	โมล
nm	นาโนเมตร
pH	ค่าที่แสดงความเป็นกรดและด่าง
q_D	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของการดูดซับ
q_e	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล
q_{max}	ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด
q_t	ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่เวลานั้น ๆ
R	ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ Jmol}^{-1}/\text{K}^{-1}$)
R_L	ปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล
S_1	เอนโทรปี ณ สภาวะเริ่มต้น
S_2	เอนโทรปี ณ สภาวะสุดท้าย
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์ (ต่อ)

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
t	เวลา (นาที)
V	ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ
W	น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้
ln	ล็อกการิทึมธรรมชาติ
ΔG	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ
ΔH	การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปี
ΔS	การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี
1/n	ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ
μg	ไมโครกรัม
α	อัตราเร็วในการดูดซับ
β	สัมประสิทธิ์ของการคายซับ
$^{\circ}C$	องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มถือเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ สิ่งเหล่านั้นไม่ได้ใช้เพียงเพื่อปกปิดร่างกายจากสภาพอากาศและอันตรายเท่านั้น แต่ยังใช้สวมใส่ให้เหมาะสมกับงานและกิจกรรมต่าง ๆ ทำให้ผู้ผลิตมีการสร้างสรรค์ผลงานออกมาหลากหลายรูปแบบตามความนิยมเพื่อตอบสนองต่อผู้บริโภค ส่งผลให้อุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่มมีการขยายตัวสูงขึ้น อีกทั้งยังมีบทบาทต่อภาคเศรษฐกิจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากมีการผลิตและส่งออกไปยังต่างประเทศ โดยอุตสาหกรรมครอบคลุมตั้งแต่อุตสาหกรรมปั่นด้าย อุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมฟอกย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งในอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้นมีการใช้น้ำปริมาณมากในการผลิต รวมทั้งการใช้สารเคมีและสีย้อมชนิดต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเส้นใยจึงอาจส่งผลทำให้เกิดการปนเปื้อนของสีและสารเคมีในน้ำเสียของโรงงาน ลักษณะทั่วไปของน้ำเสียที่พบ ได้แก่ ปริมาณสารอินทรีย์สูง มีค่าความเป็นกรด ต่างสูง มีอุณหภูมิสูง สารแขวนลอยและโลหะหนักเจือปน เช่น ทองแดง (Cu), ตะกั่ว (Pb), โครเมียม (Cr), โคบอล (Co) และ สังกะสี (Zn) เป็นต้น หากปล่อยน้ำเสียเหล่านี้ลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจเกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและสิ่งแวดล้อมได้

สีย้อมผ้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายชนิด ได้แก่ สีแอสิด, สีไดเรกต์, สีเบสิก, สีสฟอรัส, สีรีแอคทีฟ, สีอะโซอิก, สีแว็ต, สีมอร์แดนท์ และสีซัลเฟอร์ เป็นต้น สีย้อมแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติสูตรโครงสร้างทางเคมี และวิธีใช้แตกต่างกันออกไป สำหรับสีไดเรกต์เป็นสารประกอบอะโซที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ จึงนิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งโมเลกุลของสีจะเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลของเส้นใยยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและสีย้อมประเภทนี้จะทนต่อแสงแดด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556) ดังนั้นควรเลือกสีย้อมให้เหมาะสมต่อเส้นใยสิ่งทอ

การปล่อยน้ำเสียที่มีสีเป็นปัญหาที่พบในอุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นส่วนมาก ซึ่งสีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยใช้เทคโนโลยีในการกำจัดสีย้อม เช่น การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon), การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane), การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation), การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation) และเทคโนโลยีทางชีวภาพ เป็นต้น แต่วิธีดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูงและมีความยุ่งยากซับซ้อนในการบำบัด ดังนั้นการเลือกเทคโนโลยีจะต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย ประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการด้วย นอกจากนี้ยังพบว่ามีการปนเปื้อนการบำบัดน้ำเสียสีย้อมที่น่าสนใจคือ การดูดซับด้วยวัสดุธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ผักตบชวาเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากเป็นพืชที่หาได้ง่ายโดยทั่วไปและมีจำนวนมาก ขยายพันธุ์ได้อย่างรวดเร็ว

เอกสารในแหล่งน้ำ อีกทั้งยังมีเปอร์เซ็นต์เซลลูโลสค่อนข้างสูงได้นำผักตบชวามาปรับปรุงคุณภาพด้วยค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดหนึ่งที่มีประจุเป็นบวก โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกจะมาจับกับอนุภาคที่มีประจุเป็นลบของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ไดเรกต์เรด 83 กระบวนการดูดซับดังที่กล่าวมาถือได้ว่าเป็นการใช้หลักการชั้นพื้นฐานที่ง่ายต่อการควบคุม บำรุงรักษา มีค่าใช้จ่ายน้อยในการดำเนินการและมีประสิทธิภาพสูงในการบำบัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาที่ก่อนปรับปรุงคุณภาพและหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)
2. เพื่อศึกษาค่า pH ที่ทำให้ค่าประจุที่ผิวของตัวดูดซับเป็นศูนย์
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ pH, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อม, อุณหภูมิ, โลหะหนักและอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย
4. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ
5. เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้นซึ่งหาได้จากสมการอาร์เรเนียส
6. เพื่อศึกษาจลนศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับสีย้อมไดเรกต์เรด 83

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สังเคราะห์ตัวกลางในการดูดซับซึ่งคือผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
2. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของผักตบชวาที่ก่อนปรับปรุงคุณภาพและหลังปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เครื่อง SEM และ FTIR
3. น้ำเสียสีย้อมไดเรกต์เรด 83 สังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 100-200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
4. การหาค่า pH ที่ทำให้ค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร ปรับพีเอช ดังนี้ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12
5. ศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) โดยการแปรผันตามพารามิเตอร์ดังนี้
 - แปรผันค่า pH ดังนี้ 2, 3, 4, 5, และ 7
 - แปรผันปริมาณของตัวดูดซับที่อัตราส่วน w/v ดังนี้ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 - แปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อม ดังนี้ 100, 150, และ 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 - แปรผันอุณหภูมิในการดูดซับ ดังนี้ 33 (อุณหภูมิห้อง), 45 และ 55 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แปรผันตามชนิดโลหะหนัก ทองแดง (Cu), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn) และ โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดรวมกัน ที่มีความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

- แปรผันตามชนิดอิเล็กโทรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂), โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄), โซเดียมฟอสเฟต (Na₃PO₄) และแคลเซียมไนเตรท Ca(NO₃)₂ ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

6. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสี่ย้อมสังเคราะห์

7. ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), Elovich model, Intraparticle diffusion model และหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองแปรผันปริมาณความเข้มข้นของน้ำเสียสี่ย้อมสังเคราะห์และอุณหภูมิ

8. ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ เอนทัลปี (ΔH°) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ โดยใช้ข้อมูลจากการแปรผันอุณหภูมินำไปหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) และหาค่าเอนโทรปี (ΔS°)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถประยุกต์ใช้วัสดุจากธรรมชาติที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะเป็นการลดวัชพืชทางน้ำ
2. เป็นแนวทางสำหรับนำไปประยุกต์ใช้การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดไดเรกต์เรด 83
3. เป็นแนวทางสำหรับนำไปประยุกต์ใช้การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดอื่น ๆ
4. เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย (Water Pollution) (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2559)

อุตสาหกรรมฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมชั้นกลางในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องด้วยอุตสาหกรรมฟอกย้อมต้องใช้น้ำในปริมาณมาก เพราะกระบวนการผลิตจะใช้ สารเคมีและสีย้อมชนิดที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใย โดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง เพื่อการล้างทำความสะอาดผ้าในขั้นตอนต่าง ๆ เช่น การย้อมสี (Dyeing) เป็นต้น ส่งผลให้มีน้ำเสียเกิดขึ้นในปริมาณมากตามไปด้วย

น้ำเสียที่ปล่อยมาจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม ประกอบด้วย สารแขวนลอย (Suspended solids) และสารอินทรีย์จากกระบวนการย้อมในปริมาณสูง ได้แก่ แป้ง สีย้อม กรดอะซิติก และเส้นใย เส้นด้ายที่ปนเปื้อนออกมาจากกระบวนการผลิต อีกทั้ง ยังมีสารอินทรีย์ประเภทโลหะหนักจากสีย้อมปนเปื้อน ในน้ำทิ้ง เช่น ทองแดง (Cu), ตะกั่ว (Pb), โครเมียม (Cr), โคบอล (Co), สังกะสี (Zn) เป็นต้น โดยน้ำเสีย จากการฟอกย้อมมีลักษณะสำคัญคือ การมีสีของน้ำทิ้ง และมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างสูง หากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อนุภาคสีอาจขัดขวางการส่องผ่านของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้พืชน้ำและสาหร่ายไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ แหล่งน้ำขาดออกซิเจน ทำให้มีผลต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมถึงสีของน้ำทิ้งที่ปล่อยออกมาทำให้แหล่งน้ำเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็น

2.1.1 แหล่งที่มาของน้ำเสีย (สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552)

แหล่งที่มาของน้ำเสียนอกจากจะเกิดขึ้นจากน้ำใช้ในการกระบวนการผลิตแล้วยังมีน้ำเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็น น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อมหรือการพิมพ์

คือกระบวนการต้มแป้ง กระบวนการทำความสะอาด กระบวนการฟอกขาว กระบวนการชุบมัน กระบวนการย้อมสี การตกแต่งพิเศษ และกระบวนการพิมพ์ผ้า ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง

น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม

ซึ่งมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยส่วนรวมแล้วต่ำกว่าน้ำเสียในประเภทแรก

น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม ไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นใย ก่อนย้อม ขั้นตอนการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ ซึ่งน้ำใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้งานการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต นอกจากนี้ น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตประเภทใหญ่ๆ คือ

1) น้ำที่ใช้ในหม้อไอน้ำ

มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งเข้าไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรงก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสียในที่สุด

2) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมลงในเวลาอันสั้นซึ่งจะทำได้โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำสะอาดสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

3) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

ซึ่งในบางกรณีอาจเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

4) น้ำเสียจากแหล่งอื่น เช่น น้ำใช้ของคนงาน น้ำจากโรงอาหารและห้องน้ำ เป็นต้น

2.1.2 ปัญหามลพิษในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2552)

โครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอมีลักษณะเป็นเครือข่ายเกี่ยวโยงกันจากอุตสาหกรรม ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ ดังนั้นเมื่อส่วนหนึ่งส่วนใดมีปัญหาหรือเป็นจุดอ่อนก็จะกระทบกับโครงสร้างอุตสาหกรรมทั้งระบบในภาพรวม ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขปัญหา เพื่อให้การพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอดำเนินไปได้ด้วยดีทั้งระบบ ปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมดังกล่าว ประกอบด้วยปัญหาอากาศเสีย น้ำเสีย กลิ่นเหม็น เสียงดัง สารเคมี รวมถึงของเสียที่เป็นของแข็ง เช่น เศษด้าย เศษผ้า เป็นต้น

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้าย มีสีสันทสวยงาม คงทนต่อสภาวะแวดล้อม และให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ ซึ่งกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีและสีย้อมเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของเส้นใย กระบวนการเหล่านี้มักอาศัยน้ำเป็นตัวกลางเกือบทุกขั้นตอน อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก

นอกจากนี้ในน้ำทิ้งหลังผ่านกระบวนการฟอกย้อมแล้วจะมีสารเคมีปนเปื้อนอยู่ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น สารทำความสะอาด สีย้อม สารช่วยย้อม ซึ่งสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมแต่ละแห่งหรือแม้แต่การฟอกย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทเดียวกันแต่ต่างกันที่ขั้นตอน ก็จะมี ความแตกต่างของลักษณะน้ำเสียอย่างเห็นได้ชัดขึ้นอยู่กับประเภท ของการผลิต การเลือกใช้สารเคมี เป็นต้น

2.1.3 ลักษณะน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยทั่วไป

มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ซึ่งมีสาเหตุจากแป้ง สีย้อม กรดอะซิติก เส้นใยและเส้นด้ายที่ปนออกมาจากกระบวนการย้อมและตกแต่ง นอกจากนี้แล้วยังอาจเกิดจากสบู่ ไขมัน น้ำมัน ซึ่งจะเป็นฝัากลุ่มผิวน้ำและสารทำความสะอาดซึ่งมีลักษณะเป็นฟองโดยทั่วไปแล้วน้ำเสียนี้นักมีค่าบีโอดีประมาณ 100-1,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ประมาณ 500-1,200 มิลลิกรัม/ลิตร

มีค่าความเป็นกรดและด่าง (pH) และค่าสภาพด่าง (Alkalinity) สูง โดยมีค่า pH ประมาณ 9-12 และมีค่าสภาพความเป็นด่างประมาณ 300-900 มิลลิกรัมหินปูน/ลิตร สารที่ทำให้ น้ำเสียฟอกย้อมมีค่า pH และค่าสภาพด่างสูง ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งมีการใช้ในขั้นตอน การขจัดสิ่งสกปรกเจือปน (Scouring)

มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะในขั้นตอนที่มีการใช้ความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ขั้นตอนการขจัดสิ่งสกปรกเจือปน ขั้นตอนการย้อม และขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ

มีปริมาณทีเอส (หรือของแข็งละลายน้ำ) สูง ส่วนใหญ่เป็นการละลายของแข็งพวกเกลือโซเดียมและกรดต่าง ๆ

มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสีย ในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

มีโลหะหนักเจือปน เนื่องจากการเจือปนอยู่ในสีย้อมผ้า ได้แก่ ทองแดง ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี

มีปริมาณทีเอสเอส (หรือของแข็งแขวนลอยทั้งหมด) สูง โดยเฉพาะเศษเส้นใยที่หลุดออกมา ซึ่งเศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมาก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้

มีการปนเปื้อนของสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายประเภทตามชนิดที่เลือกใช้ ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

2.1.4 ประเภทสิ่งสกปรกของกระบวนการฟอกย้อม (ชนิษฐา, 2558)

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

1. สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก อาทิเช่น

- โซดาไฟ (Sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมัน

เป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่าง ๆ ถูกขจัดออกง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าประโยชน์ที่ได้นั้นคุ้มค่า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ต่างยังช่วยกำจัดสารอื่น ๆ อีก เช่น โปรตีน เพกทิน สารลงแป้งที่ตกค้าง เกลือแร่ต่าง ๆ ให้ละลายหลุดออกมา

- น้ำสบู่ (Detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion) การกำจัดสิ่งสกปรกอื่น ๆ ออกจากวัสดุรวมทั้งป้องกันมิให้ย้อนกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกมีทั้งประจุบวกและประจุลบ แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน

- สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์ หรือคีเลต สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะต่างปกติ ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไอออนเหล่านี้ นอกจากจะพบในน้ำแล้วยังพบว่ามีมาจากวัสดุด้วย เช่น ฝ้าย เป็นต้น

2. สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว อาทิเช่น

- สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2), โซเดียมเปอร์ออกไซด์ (Na_2O_2) เป็นต้น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (CaOCl_2) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ (NaOCl_2) เป็นต้น

- สารรีดิวซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$), โซเดียมฟอร์แมลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ($\text{HCHOHSO}_2\text{Na} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) การฟอกขาวด้วยสารกลุ่มนี้จะให้ความขาวที่ไม่ถาวรเรียกว่า temporary white

2.1.5 การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า (นภา ศิวรังสรรค์, 2555)

วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียแต่ละวิธีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อม และการเลือกใช้วิธีการกำจัดที่เหมาะสม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. โคแอกูเลชันด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักจะใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งสามารถใช้เป็นกระบวนการกำจัดขั้นต้นก่อนการบำบัดทางชีวภาพหรือวิธีการบำบัดอื่น ๆ สารช่วยสร้างตะกอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ไอออนของอลูมิเนียม (Al^{3+}), แคลเซียม (Ca^{2+}) และเฟอร์ริก (Fe^{3+}) (Mishra and Bajpai, 2016) เป็นต้น โดยปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับสารช่วยสร้างตะกอนแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อความสามารถในการตกตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2552) โดยหากค่าความ

เอกสาค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมอาจไม่จำเป็นต้องเติมสารช่วยสร้างตะกอนมากนักไปชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation and Reduction)

การออกซิเดชัน-รีดักชันด้วยสารเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของกลุ่มโครโมฟอร์ที่ทำให้เกิดสีไปอยู่ในอีกรูปหนึ่งซึ่งมองไม่เห็นสีสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชัน-รีดักชันจะเลือกจากศักยภาพในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์ทางเคมี ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการเกิดการออกซิเดชัน จากการศึกษาที่ผ่านมาสารที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ คลอรีน โอโซน และเพนตันรีเอเจนต์ เป็นต้น

คลอรีเนชัน (Chlorination) การออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนสามารถกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ เช่น สีย้อมรีแอคทีฟ สีย้อมแอซิด และสีย้อมไดเรกต์ แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมดิสเพอร์ส ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ ถึงแม้ว่าการใช้คลอรีนในการบำบัดสีย้อมจะเป็นวิธีการที่มีราคาถูกแต่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษ

โอโซนเนชัน (Ozonation) การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเป็นการกำจัดสีย้อมที่เกิดจากการที่โอโซนไปออกซิไดซ์พันธะคู่ของหมู่โครโมฟอร์ในโมเลกุลของสีย้อม แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็ว เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อมซึ่งส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยไนโตรเจน คลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารตั้งต้นเดิม แต่มีข้อดีคือ สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย

เพนตันรีเอเจนต์ (Fenton's reagent) เพนตันรีเอเจนต์เป็นสารเคมีที่เกิดจากการผสมกันระหว่างเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) การกำจัดสีย้อมโดยเพนตัน รีเอเจนต์เกิดจากการที่เพนตันรีเอเจนต์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เมื่อทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล ($OH\cdot$) ซึ่งมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงมาก (Meric, 2013)

3. เทคโนโลยีเยื่อกรอง (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรองสามารถใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ละลายและไม่ละลายน้ำได้ (Cheremisinoff, 2014) อีกทั้งสามารถนำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ กระบวนการกำจัดสีย้อมด้วยเยื่อกรอง เช่น ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) และนาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) โดยทั่วไปแล้วเทคนิคการกำจัดสีย้อมโดยใช้เยื่อกรองนี้ จะเป็นการทำให้โมเลกุลของสีย้อมรวมกันอย่างหนาแน่นบนด้านหนึ่งของเยื่อกรองในขณะที่น้ำจะผ่านทะลุเยื่อกรองไปได้ ซึ่งสามารถแยกขนาดโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ได้ไม่เพียงเฉพาะโมเลกุลสีย้อมเท่านั้น

2.1.6 เทคโนโลยีการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม

ส่วนใหญ่เป็นสีย้อมและสารเคมีที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ สามารถใช้เทคนิคการบำบัดน้ำเสียได้หลายวิธี ดังนี้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) เป็นการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การแยกเศษขยะออกจากน้ำเสียด้วยตะแกรง การตกตะกอนกรวดทรายโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง เพื่อลดภาระการทำงานและเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดในขั้นต่อไป ระบบบำบัดขั้นต้นที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ ตะแกรงดักขยะ (Screen) และถังปรับสภาพ (Equalization)

2. กระบวนการบำบัดทางเคมีกายภาพ (Physicochemical treatment) เทคโนโลยีที่มีการนำมาใช้ในโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในประเทศไทย ได้แก่

การตกตะกอนทางเคมี (Chemical coagulation-flocculation) เป็นวิธีสำหรับแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กออกจากน้ำเสีย โดยใช้สารเคมีในการตกตะกอน เช่น สารส้ม และปูนขาว เป็นต้น นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสี และสารอินทรีย์

กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) โอโซน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง จึงนิยมนำมาใช้ในการย่อยสลายสี และสารอินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อม

การดูดซับ (Adsorption) นิยมใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบตกตะกอนทางเคมี หรือระบบบำบัดทางชีวภาพ มักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน แต่ถ่านกัมมันต์อาจมีราคาแพงและไม่คุ้มค่ากับการนำมาใช้ใหม่ สารดูดซับที่ราคาถูกลงและมีประสิทธิภาพดี เช่น ไคโตซาน และแทนนิน ถูกนำมาพัฒนาเม็ดปิด ไคโตซาน-แทนนิน เพื่อใช้กำจัดสีในน้ำเสีย

การกรอง (Filtration) นิยมใช้เป็นถังกรองทราย มักใช้เป็นระบบขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้ง ทำหน้าที่กรองสารแขวนลอย หรือตะกอนเบาที่หลุดออกมาจากระบบบำบัดก่อนหน้า

กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) เป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกริยารีดอกซ์ สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียได้

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบใหม่ที่อาศัยกระบวนการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี เรียกว่า วิธีออกซิเดชันแบบก้าวหน้า (Advanced oxidation process, AOPs) โดยการนำ โฟโตคะตะลิสต์ชนิดซิงค์ออกไซด์ (ZnO photocatalyst) มาใช้เพื่อสลายสีย้อมอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย

3. กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (Biological treatment) วิธีนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การกำจัดปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย โดยอาศัยจุลินทรีย์มาย่อยสลายเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็น CO_2 (ถ้าใช้ระบบเติมอากาศ) หรือไปเป็น CH_4 และ H_2S (ถ้าใช้ระบบไม่เติมอากาศ) สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระบบ คือ

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic treatment process) ได้แก่ ระบบแอกติเวตเตดสลัดจ์ (Activated Sludge) และบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon)

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic treatment process) ได้แก่ ระบบบ่อไร้ออกซิเจน (Anaerobic ponds)

ระบบบำบัดน้ำเสียที่เลียนแบบกลไกทางธรรมชาติ ได้แก่ ระบบบ่อปรับเสถียร (Stabilization ponds)

ทั้งนี้ ยังมีเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพอื่น ๆ ที่สามารถนำมาใช้กำจัดสัจจากน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้แก่ การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae absorption) การย่อยสลายโดยเชื้อรา (Fungi decomposition) และการย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงคือ ลักษณะของน้ำเสีย เนื่องจากน้ำเสียจากการฟอกย้อมมีความหลากหลาย และแปรผันสูง การเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสีย ส่งผลให้การบำบัดน้ำเสียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้ง ยังมีปัจจัยอื่นสำหรับพิจารณาในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัด เช่น ปริมาณน้ำเสีย ประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ค่าใช้จ่าย เป็นต้น

2.2 สีย้อม (Dyestuff) (ชัยยุทธ์ ช่างสาร และเลิศณรงค์ ศรีพนม, 2543)

สีย้อม (Dyestuff) หมายถึง สารเคมีที่มีสี (Dyes) ที่สามารถเกาะติดเส้นใยได้ไม่หลุดออกง่าย ทำให้วัสดุนั้นมีสีเหมือนย้อม

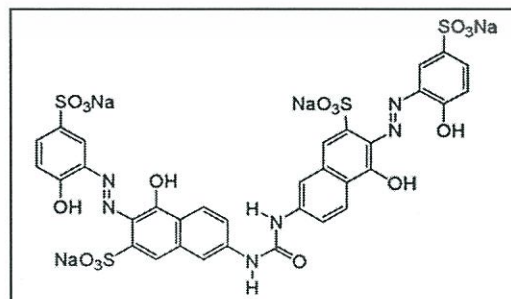
2.2.1 โครงสร้างสีย้อมไตรีดเรด 83

ชื่อทางเคมี : Direct Red 83

สูตรโมเลกุล : $C_{33}H_{20}N_6Na_4O_{17}S_4$

หมายเลข CAS : 15418-16-3

น้ำหนักโมเลกุล : 992.77



รูปที่ 2.1 โครงสร้างสีย้อมไตรีดเรด 83

ที่มา http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7739044.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โครงสร้างทางเคมีของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารอินทรีย์ โครงสร้างทางเคมีมี 2 กลุ่ม คือ

1) กลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophores group) เป็นกลุ่มที่มีพันธะคู่ สามารถให้สีได้โดยการดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และช่วงที่มองเห็นได้ (Visible range) ตั้งแต่ 200-800 nm

ตัวอย่าง C = C	ethylenic chromophores
C = O	carbonyl chromophores
-N = O	nitroso chromophores
-N = O	nitro chromophores
-N = N-	azo chromophores

2) กลุ่มออกโซโครม (Auxochrome group) เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกาะติดกับเส้นใยปกติแล้ว หมายถึง ซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว และไม่สามารถดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นเกิน แต่เมื่อไปเกาะในตำแหน่งที่ติดกับโครโมฟอร์จะทำให้เกิด ทำให้โครโมฟอร์ดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น

ตัวอย่าง -OH	hydroxyl
-NH ₂	amino
-COOH	carboxylic

สีที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้าอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ มีลักษณะเป็นผลึกหรือ ผงละเอียด สีย้อมบางชนิดละลายน้ำ โมเลกุลสามารถกระจายตัว หรือสามารถเปลี่ยนเป็นสารที่ละลายในตัวกลางที่ใช้ให้สีสิ่งทอได้ บางชนิดจะไม่สามารถละลายน้ำแต่จะละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อมจะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใยภายใต้สภาวะการย้อมและหลังจากซึมเข้าไป จะต้องอยู่ภายในเส้นใยได้ ซึ่งสีสามารถติดกับเส้นใยได้โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว ซึ่งอาจเกิด

1. พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)
2. แรงไอออน (Ionic forces)
3. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)
4. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waal's forces)

แรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลของสารอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดที่ตีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการย้อมอย่างมาก ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างยาวมาก ๆ จะทำให้เกิดการติดสีที่มีความคงทนสูงมากขึ้น (ชนิษฐา, 2558)

2.2.3 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

1) สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuffs) สีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติเป็นหนึ่งในภูมิปัญญาไทยที่สืบทอดมาแต่โบราณ สีที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ในยุคแรกของการใช้สีนั้นเป็นสีจากธรรมชาติที่ได้มาจากพืช สัตว์ ดิน และแร่ธาตุ ซึ่งใช้ย้อมผ้าใยธรรมชาติ ได้แก่ ลินิน ฝ้าย ขนสัตว์ และไหม มีการคิดสรรพ์พันธุ์พืชหรือสัตว์ที่มีหลากหลายในท้องถิ่น ใช้เป็นวัตถุดิบให้สีแต่ละพันธุ์พืชที่ได้รับการพัฒนาจนใช้ย้อมได้สีคุณภาพดีสีไม่ตกและไม่ซีดจางง่าย โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนประกอบพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นใบ เป็นต้น ซึ่งต้นไม้อะละชนิดให้โทนสีต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของต้นไม้นั้น ๆ และฝ้าย้อมสีธรรมชาติมีลักษณะเด่นที่สีนุ่มนวล ไม่ฉูดฉาด ตัวอย่างเช่น สีดำจากลูกมะเกลือ สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากเนื้อไม้ไผ่ สีแดงจากดอกกรรณิการ์ สีแดงจากรากต้นเข็ม ส่วนสีย้อมที่มาจากสัตว์ เช่น สีม่วงแดงของครั่ง สีม่วงจากหอยสังข์หนาม เป็นต้น (ดร.ศรันยา เกษมบุญญากร, 2555)

2) สีสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff) หรือที่เรียกกันว่าสีเคมี เป็นสีที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีเพื่อให้ได้สีที่มีคุณสมบัติตามต้องการ มนุษย์เพิ่งรู้จักการใช้สีย้อมผ้าสังเคราะห์เมื่อ ปี ค.ศ. 1856 โดยนายวิลเลียม เพอร์กิน (William Perkin) นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษพบวิธีสังเคราะห์ สีม่วงโดยบังเอิญ ส่งผลให้ในเวลาต่อมานักวิทยาศาสตร์สามารถค้นพบวิธีสังเคราะห์สีใหม่ ๆ นับร้อยสี ปัจจุบันมีการผลิตสีสังเคราะห์ออกมามากมาย และสามารถแบ่งสีออกได้หลายประเภท เพื่อให้เหมาะกับเส้นใยแต่ละชนิด และกระบวนการย้อมซึ่งมีลักษณะต่างกัน จึงมีการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีต่าง ๆ โดยวิธีที่นิยมมากที่สุด คือ การจำแนกสีตามการนำไปใช้ เพราะสีย้อมผ้าที่มีคุณภาพต้องมีความคงทนในการซัก มีความคงทนต่อแสงและต้องมีความคงทนต่อความร้อน (บุญรักษ์ กาญจนวรรณิชย์, 2553) ดังนั้นสังเคราะห์จึงเป็นสีที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้ย้อมเส้นใยแต่ละประเภทและมีคุณสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามสีที่ชาวบ้านส่วนใหญ่นิยมใช้กันเป็นสีสำเร็จรูป เช่น สีตราแมววิ่งรอบโลก ตราสิงโตเหยียบโลก เป็นต้น ซึ่งเป็นสีที่ย้อมง่าย หาซื้อสะดวก

ปัจจุบันปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะมลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตทางอุตสาหกรรมนับทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวสูง ทำให้มีการพัฒนาทั้งทางด้านกระบวนการผลิตและการแข่งขันที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ให้มากขึ้น น้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องใช้ร่วมกับวัตถุดิบในทุกขั้นตอนการผลิตไม่ว่า จะเป็นการผลิตเส้นใย การปั่น การทอ การถักผ้า และการฟอกย้อมก็ตาม โดยวัตถุดิบที่ใช้ เช่น สีย้อมผ้า สารเคมี เป็นต้น บางชนิดละลายน้ำได้ บางชนิดละลายน้ำไม่ได้ จึงทำให้น้ำมีสภาพที่แปรเปลี่ยนไปที่เรียกว่าน้ำเสีย เช่น อุณหภูมิสูงขึ้น มีกลิ่น มีสี ตลอดจนทำให้สิ่งมีชีวิต ที่อยู่ในน้ำตายเนื่องจากมีสารอินทรีย์ในน้ำปริมาณที่สูง ทำให้ขาดออกซิเจนและผลกระทบของน้ำเสียนี้อย่างยิ่งเป็นการทำงานของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 การจำแนกประเภทของสีย้อม (Classification of dyes) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2556)

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ได้ดังนี้ คือ

1) สีดิสเพอร์ส (Disperse dyes) เป็นสีที่ผลิตขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสอะซิเตด (Cellulose acetate) และนำมาย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ได้ดี เนื่องจากเส้นใยทั้งสองประเภทสามารถดูดน้ำได้น้อย สีดิสเพอร์สมีสมบัติทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีซีดง่ายหากถูกควั่นหรือก๊าซบางชนิด สีประเภทนี้มีสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะแขวนตัวเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวในน้ำเมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) ที่เหมาะสมสามารถใช้ย้อมในน้ำธรรมดา ไม่ต้องใช้สารเคมีชนิดอื่นช่วย นอกจากสารพา (Carrier) ให้ตัวสีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้น

2) สีรีแอคทีฟ (Reactive dyes) เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกซิล (OH-) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นด่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 °C และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใส ทุกสีติดทนในทุกสภาวะ สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีทำให้สีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาตัวสีจะยึดติดเส้นใย

3) สีเบสิก (Basic dyes) เป็นเกลือของด่างอินทรีย์ละลายน้ำได้ ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย มีโครโมฟอร์ (Chromophore) ให้ประจุบวก (Cation) บางครั้งเรียก สีแคทไอออน ถ้าย้อมเส้นใยเซลลูโลส เส้นใยต้องย้อมด้วยสารประกอบที่สามารถก่อรูปเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำกับตัวสีได้ก่อน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นเสมือนหนึ่งสะพานเชื่อมโยงระหว่างตัวสีกับเส้นใย สารประกอบนี้เรียกว่า สารช่วยติด (Mordant) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่ทนแสง

4) สีแอซิด (Acid dyes) คือ ตัวสีที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน ย้อมติดเส้นใยโปรตีนได้ในน้ำย้อมที่มีฤทธิ์กรดเจือจาง ใช้ย้อมเซลลูโลสที่ไม่ใช่เซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน และเส้นใยโพลีเอไมด์ (Polyamide) เป็นต้น

5) สีมอร์แดนท์และพรีเมทัลไลซ์ (Mordant and premetallized dyes) เป็นสีแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) กับโลหะบางชนิดได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่ก่อรูปใหม่นี้ไม่ละลายน้ำ ตามทฤษฎีเชื่อกันว่า โครงสร้างของเส้นใยจะสามารถรวมตัวกับไอออนของโลหะ ก่อรูปเป็นสารประกอบภายในทำให้สีมีความคงทนดีขึ้น ตัวสีเหล่านี้ยังคงเรียกว่า สีไดเรกต์ ส่วนที่เรียกว่า สีมอร์แดนท์ต้องเป็นกลุ่มสีซึ่งใช้ย้อมเฉพาะเส้นใยโปรตีน

6) สีไดเรกต์ (Direct dyes) เป็นสีสังเคราะห์ชนิดแรกที่ติดเส้นใยฝ้ายได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยติด บางครั้งเรียกสีย้อมฝ้าย ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ (AZO) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิค ซึ่งทำให้ตัวสีละลายน้ำได้ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

7) สีเอโซอิก (Azoic dyes) เป็นสีในกลุ่มสารประกอบเอโซเหมือนกัน แต่ตัวสีไม่ละลายน้ำ ก่อรูปเป็นสีบนเส้นใยได้โดยการย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล (Phenol) ซึ่งละลายน้ำได้ ก่อน สีในกลุ่มนี้ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

8) สีวัต (Vat dyes) เป็นสีที่มีความคงทนที่สุดในบรรดาสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยอาศัยสารรีดิวซ์ที่เหมาะสมจึงจะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ อย่างไรก็ตามไม่ใช่สีวัตทุกตัวจะมีความคงทนเหมือนกัน นอกจากนี้สีวัตสามารถใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน เส้นใยสังเคราะห์บางชนิดได้ด้วย

9) สีกำมะถัน (Sulphur or sulphide dyes) สีประเภทนี้ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นด่าง สีชนิดนี้ไม่สดใส

10) สีออกซิไดซ์ (Oxidation colorants) เป็นสีที่มีความคงทน แต่ไม่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม

11) สีโอเนียม (Onium dyes) เป็นสีพิกเมนต์ที่ละลายน้ำได้ โดยเลือกพิกเมนต์ที่มีสมบัติคงทนต่อสารเคมีและแสงนำมาปรับปรุงให้มีกลุ่มเคมีที่ละลายน้ำได้ นิยมใช้พิมพ์ผ้ามากกว่าย้อม

12) สีมิเนอรัล (Mineral colorants) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ไม่ละลายน้ำหลายชนิด นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

2.3 การดูดซับ (Adsorption) (ปรารธนา, 2555)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับระหว่างสถานะ (Phase) ต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบ ของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid –Solid Interface) ในการดูดซับโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.3.1 ประเภทของตัวดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับจะพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Cross-linking) จะเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) อย่างไรก็ตามการดูดซับทางกายภาพจะไม่ถาวรนัก อาจหลุดออกได้ง่ายถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น หรือถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดการเชื่อมขวาง

พันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิด การผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

ตารางที่ 2.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1.ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2.อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3.แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4.การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5.การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
6.พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7.รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ multilayer	Monolayer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กลไกการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2554)

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของ ตัวดูดซับเขาถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผานชั้นของของเหลวเขาถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น ควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย

2.5 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

2.5.1 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals forces)

เป็นแรงระหว่างโมเลกุลมีความแข็งแรงน้อยจึงต้องการพลังงานในการสลายพันธะหรือแรงระหว่างโมเลกุลน้อยมาก โมเลกุลที่ยึดจับกันด้วยแรงชนิดนี้มีจุดเดือด และจุดหลอมเหลวต่ำมาก โดยปกติโมเลกุลที่ไม่มีขั้วจะประพทิตัวเป็นกลาง ในบางครั้งอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของอะตอมหรือโมเลกุล ทำให้เกิดสภาพขั้วชั่วคราวขึ้น โดยตำแหน่งที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปรวมกันจะเกิดสภาพที่เป็นประจุลบ (d^-) และตำแหน่งที่ไม่มีอิเล็กตรอนจะเกิดสภาพประจุที่เป็นบวก (d^+) โมเลกุลที่มีสภาพขั้วแบบชั่วคราวสามารถเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลในสภาวะปกติมีสภาพขั้ว โดยที่ตำแหน่งที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมีประจุเป็นลบจะไปผลักอิเล็กตรอนของอีกโมเลกุลให้ไปอยู่ด้านตรงข้าม ทำให้เกิดอีกโมเลกุลมีสภาวะขั้วชั่วคราวอีกโมเลกุล ทำให้โมเลกุลทั้งสองมีประจุบวกและลบเรียกว่า Polarizability และเกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกและลบ

2.5.2 ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

เกิดจากความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้าภายในหรือบนพื้นผิวของวัสดุหนึ่ง ประจุยังคงอยู่กับที่จนกระทั่งมันสามารถจะเคลื่อนที่โดยอาศัยการไหลของอิเล็กตรอน (กระแสไฟฟ้า) หรือมีการปลดปล่อยประจุ ไฟฟ้าสถิตมีชื่อที่ขัดกับไฟฟ้ากระแสที่ไหลผ่านเส้นลวดหรือตัวนำอื่นและนำส่งพลังงาน ประจุไฟฟ้าสถิตสามารถสร้างขึ้น เมื่อไรก็ตามที่สองพื้นผิวสัมผัสกันและแยกจากกัน และอย่างน้อยหนึ่งในพื้นผิวนั้นมีความต้านทานสูงต่อกระแสไฟฟ้า (และดังนั้นมันจึงเป็นฉนวนไฟฟ้า)

แรงนั้นเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเกาะอยู่รอบ ๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์, 2550)

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ เนื่องจากตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ดูดซับได้มากกว่า ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่วนอัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ

2) ขนาดและลักษณะของสารดูดซับ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถของตัวถูกละลายลดลง เพราะในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายน้ำได้น้อย จะสามารถดูดซับได้ดี นอกจากนี้แล้ว ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับการดูดซับ คือ ถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นอัตราควบคุมกลไกแล้วความสามารถในการดูดซับจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับ คือเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง (ประเสริฐภรณ์, 2555)

3) พีเอช มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีผลต่อการดูดซับด้วย โดยทั่วไปไฮโดรเจนไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับได้ดี

4) อุณหภูมิ กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แต่การดูดซับของเหลวนั้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมีค่าความจุความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ิก (Alcoholic), คาร์บอนิก (Carbonylic) และ ฟีนอลิก (Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ($-OH$) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบนโมเลกุลของสีย้อมบางชนิด นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัมประสิทธิ์ การถ่ายเทมวล (Mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

5) เวลาสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยเวลาที่สัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ซึ่งถ้าเวลาที่สัมผัสเลยจากช่วงนี้ไปแล้วจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับเลย

6) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ Film diffusion หรือ Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความ

หนาแน่นมาก ทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปในตัวดูดซับ ดังนั้นการแพร่กระจายของสีย้อมในน้ำที่ปั่นป่วนจะดีกว่าน้ำที่นิ่งๆ ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ต้องคำนึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายนอกเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบาง ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยที่กำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ความปั่นป่วนในถังการดูดซับ คือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น (ประรัชกรณ, 2555)

2.7 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy metal) คือกลุ่มธาตุที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและความถ่วงจำเพาะสูงกว่า 4 มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ต้องเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มธาตุ Transition metals ซึ่งจัดว่าเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ไม่สลายตัวในกระบวนการทางธรรมชาติมีความเสถียร และสามารถสะสมอยู่ในอากาศ ดินและแหล่งน้ำรวมถึงสะสมอยู่ในสิ่งมีชีวิตได้อีกด้วย จัดเป็นกลุ่มธาตุที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต ธาตุที่จัดเป็นโลหะหนักมีทั้งหมด 22 ชนิดได้แก่ ทองแดง, เงิน, ทองคำ, ทองคำขาว, สังกะสี, ตะกั่ว, ดีบุก, โครเมียม, ทังสแตน, พลวง, แคลเดียม, พรอท, บิสมัท, พลวง, ไททาเนียม, แทนทาลัม, โคบอลต์, ยูเรเนียม, นิเกิล, แมงกานีส, โมลิบดีนัม และเบอรัมเนียม จะเห็นว่าเป็นล้วนแต่เป็นธาตุที่นิยมนำใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท

2.7.1 อันตรายจากโลหะหนัก

โครเมียม (Chromium; Cr) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมแยกแร่ ออกจากโลหะ (เหล็กกล้าและโลหะผสมอื่น ๆ) อุตสาหกรรมฟอกหนังและอุตสาหกรรมสิ่งทอบางประเภท สารประกอบโครเมียม(VI) ถูกใช้เป็นผงขัดโลหะ ชุบโลหะ รักษาเนื้อไม้ และสารป้องกันการสึกกร่อน โครเมียมในธรรมชาติมักอยู่ในรูปโครเมียม(III) ไอออน ซึ่งละลายน้ำได้น้อย และมักตกตะกอนอย่างรวดเร็ว สะสมอยู่ในดินตะกอนก้นน้ำ โครเมียม(VI) ไอออนสามารถพบได้ตามธรรมชาติบ้าง แต่คุณสมบัติที่ละลายน้ำได้รวดเร็ว ทำให้มันสามารถเคลื่อนที่ในน้ำได้ระยะทางไกล (ATSDR 2008, DeLaune et al. 1998, Lin 2002) ในแหล่งน้ำที่ไม่ปนเปื้อนมักพบปริมาณโครเมียมละลายที่ผิวน้ำต่ำกว่า 10 ไมโครกรัม/ลิตร และในตะกอนก้นน้ำต่ำกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (ATSDR 2008, Salomons & Forstner 1984) โครเมียม(III) ในปริมาณต่ำ ๆ เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชและสัตว์แต่ปริมาณที่สูงเกินไปอาจทำอันตรายได้ แต่โครเมียม(VI) แม้ปริมาณต่ำก็มีความเป็นพิษและสามารถทำอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะพวกที่อาศัยอยู่ในน้ำ (Baral et al. 2006) สารประกอบของโครเมียม(VI) ยังก่อให้เกิดการระคายเคือง และอาการภูมิแพ้ที่ผิวหนังของมนุษย์ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ นอกจากนี้ยังพบว่าโครเมียม (VI) เป็นสารก่อมะเร็งได้ด้วย

ทองแดง (Copper; Cu) เป็นโลหะที่มีการใช้ทั่วไปทั้งในรูปทองแดงบริสุทธิ์โลหะผสม ใช้เป็นวัสดุผลิตท่อ ตัวนำความร้อน หรือใช้ในรูปสารประกอบในอุตสาหกรรมเคลือบเงาโลหะ อุตสาหกรรมสิ่งทอ และอุตสาหกรรมผลิตสี เป็นต้น ปกติสามารถพบทองแดงได้ในสิ่งแวดล้อมในปริมาณต่ำกว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในตะกอนก้นแหล่งน้ำ พืชและสัตว์มีความต้องการทองแดงเป็นสารอาหารในปริมาณต่ำ แต่การได้รับทองแดงปริมาณสูงจะก่อให้เกิดความเป็นพิษ สามารถสะสมและส่งต่อไปตามห่วงโซ่อาหารได้ (ATSDR 2004) การปล่อยทองแดงลงสู่แหล่งน้ำ โดยเฉพาะในรูปสารละลาย ก่อให้เกิดผลกระทบกระจายอย่างกว้างขวางได้ และมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำหลายชนิดที่ไวต่อพิษทองแดงแม้ในความเข้มข้นต่ำ (ATSDR 2004, Adams & Chapman 2006, Sandahl et al. 2007)

ตะกั่ว (Lead; Pb) เป็นโลหะที่สามารถพบได้ในธรรมชาติในปริมาณต่ำโดยเฉพาะบริเวณที่ไม่มีกิจกรรมของมนุษย์ ตะกอนก้นน้ำจากแหล่งน้ำจืดที่ไม่ปนเปื้อนมีปริมาณตะกั่วต่ำกว่า 30 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตะกั่วเป็นสารที่มีความเป็นพิษสูงต่อมนุษย์และไม่พบว่ามีประโยชน์ในแง่ของโภชนาการของทั้งพืชและสัตว์ (ATSDR 2007, Adams & Chapman 2006, WHO 1989) หากได้รับตะกั่วสู่ร่างกายช้า ๆ แม้ปริมาณต่ำก็อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบประสาท โดยเฉพาะการเจริญของระบบประสาทในเด็ก ระบบเลือด ไต และระบบสืบพันธุ์ได้ (ATSDR 2004, Jusko et al. 2008, Sanders et al. 2009) มีบางรายงานระบุว่าอาจไม่มีระดับความเข้มข้นของตะกั่วที่ปลอดภัย โดยเฉพาะผลที่จะเกิดกับระบบประสาทส่วนกลางของมนุษย์ (Canfield et al. 2003)

นิเกิล (Nickel; Ni) ถูกนำไปใช้ทั้งในรูปโลหะบริสุทธิ์ โลหะผสม และสารประกอบ ซึ่งมีการใช้ในอุตสาหกรรม การผลิตสี ท่อ เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ คะตาลีสต์ แบตเตอรี่ และเซรามิก (ATSDR 2005b, DHHS 2005) ปกติแล้วปริมาณ นิเกิลในตะกอนก้นแหล่งน้ำตามธรรมชาติที่ไม่ปนเปื้อนมักจะมีต่ำกว่า 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และที่ละลายในน้ำมักพบที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 20 ไมโครกรัม/ลิตร (Alloway 1990, ATSDR 2005b, Salomons & Forstner 1984) นิเกิลที่เกาะอยู่ในตะกอนดินสามารถอยู่ได้คงทน แต่นิเกิลละลายน้ำได้เล็กน้อยและสามารถกระจายไปได้ นิเกิลที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำจะมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตและระบบสืบพันธุ์ของทั้งพืชและสัตว์รวมทั้งมนุษย์ แต่นิเกิลที่มีปริมาณความเข้มข้นสูงสามารถส่งผลเสียหลากหลายต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งผลกระทบต่อระบบทางเดินอาหารและหัวใจ (ATSDR 2005b, Cempel & Nikel 2006) แต่นิเกิลที่มีปริมาณความเข้มข้นต่ำอาจส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ (Deleebeeck et al. 2008) นอกจากนี้พบว่ามีประชากรมนุษย์กว่า 2-5% ไวต่อนิเกิล ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากนิเกิลแม้ในปริมาณที่ต่ำมาก (ATSDR 2005b) และสารประกอบนิเกิลบางชนิดยังถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์อีกด้วย (DHHS 2005, IARC 1990)

สังกะสี (Zinc; Zn) และสารประกอบสังกะสีเป็นสารที่มีการนำมาใช้มากมายในอุตสาหกรรม ทั้งการเคลือบหรือ ชุบเหล็ก เหล็กกล้า โลหะผสมใช้สำหรับทำท่อ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ผลิตสี แบตเตอรี่ และคะตาลีสต์ เป็นต้น ระดับสังกะสีที่พบในตะกอนในแหล่งน้ำธรรมชาติมักต่ำกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และที่ละลายในน้ำมักต่ำกว่า 50 ไมโครกรัม/ลิตร (ATSDR 2005, Salomons & Forstner 1984) สังกะสีเป็นธาตุที่มีความจำเป็นในด้านโภชนาการของ สัตว์รวมทั้งมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การได้รับสังกะสีในปริมาณที่มากเกินไปจะก่อให้เกิดการสะสม และเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตน้ำได้ (Adams & Chapman 2006, ATSDR 2005a) อาการของคนหรือสัตว์ที่ได้รับสังกะสีในปริมาณสูงจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อดับอ่อน เกิดภาวะโลหิตจาง ปวดบริเวณกระเพาะและลำไส้ (ATSDR 2005a, IPCS 2001)

2.8 สารละลายอิเล็กโทรไลต์และนอนอิเล็กโทรไลต์

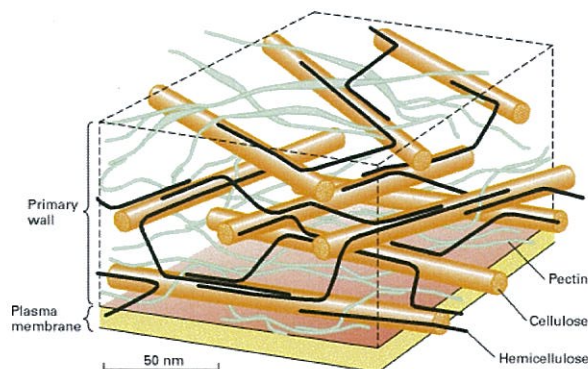
อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) หมายถึง สารที่เมื่อละลายในน้ำแล้วจะสามารถนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีไอออนซึ่งอาจจะเป็นไอออนบวกหรือไอออนลบเคลื่อนที่อยู่ในสารละลาย สารละลายอิเล็กโทรไลต์นี้อาจเป็นสารละลายกรด เบส หรือเกลือก็ได้ เช่น สารละลายกรดเกลือ (HCl) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายของเกลือ (KNO_3) ซึ่งในสารละลายดังกล่าวประกอบด้วยไอออน H^+ , Cl^- , OH^- , K^+ และ NO_3^- ตามลำดับ

1) อิเล็กโทรไลต์แก่ (strong electrolyte) เป็นสารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้มาก อาจแตกตัวได้ 100% และนำไฟฟ้าได้ดีมาก เช่นกรดแก่ และเบสแก่ และเกลือส่วนใหญ่จะแตกตัวได้ 100% ตัวอย่างเช่น H_2SO_4 , HNO_3 , HCl, HBr, HClO_4 , NaOH, KOH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ba}(\text{OH})_2$ และเกลือที่ละลายน้ำทั้งหมด เป็นต้น

2) อิเล็กโทรไลต์อ่อน (weak electrolyte) เป็นสารที่ละลายน้ำแล้วแตกตัวได้บางส่วน นำไฟฟ้าได้น้อย ตัวอย่างเช่น CH_3COOH , H_2CO_3 , HNO_2 , H_2SO_3 , H_2S , $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, H_3BO_3 , HClO, NH_4OH และ HF เป็นต้น

นอนอิเล็กโทรไลต์ (Non-electrolyte) หมายถึง สารที่ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อละลายน้ำ เนื่องจาก สารพวกนอนอิเล็กโทรไลต์จะไม่สามารถแตกตัวเป็นไอออนได้ เช่น น้ำบริสุทธิ์ น้ำตาล แอลกอฮอล์ เป็นต้น

2.9 องค์ประกอบของเซลล์พืช



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พืช (G. R. Kantharaj, 2008)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการได้จัดทำขึ้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาหรือเว็บไซต์นี้เผยแพร่ข้อมูลใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของเซลล์ที่พบเฉพาะในพืช (ชุติกากัญ โภคินพลวัฒน์, 2554)

2.9.1 ผนังเซลล์ (Cell wall) เป็นส่วนที่อยู่ภายนอกเยื่อหุ้มเซลล์ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นจำนวนมาก เมื่อสร้างใหม่ ๆ ผนังเซลล์จะมีลักษณะบาง ต่อมาจะหนาขึ้นเพราะมีการสะสมสารต่าง ๆ โดยชั้นใหม่ที่เกิดจะติดกับส่วนของเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้ชั้นเก่าถูกดันห่างออกจาก โปรโตพลาสต์ ชั้นใหม่นี้เรียกว่าผนังเซลล์ชั้นที่สอง (Secondary cell wall) ซึ่งจะมีความหนาไม่เท่ากันตลอด ทำให้เกิดลักษณะที่เป็นรูเปิด เพื่อให้สารต่าง ๆ เคลื่อนผ่านได้เรียกว่า พิต (Pit) ผนังเซลล์มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ

2.9.1.1 ไมโครไฟบริลลา โพลีแซคคาไรด์ (Microfibrillar Polysaccharides) ซึ่งกลุ่มที่พบมากที่สุด คือ เซลลูโลส (Cellulose) และไคติน (Chitin)

2.9.1.1.1 เซลลูโลส เป็นลูกโซ่ของ ดี-กลูโคส (D-glucose) ซึ่งเรียงตัวเกาะกันแบบ b-1, 4-glycosidic bond ซึ่งมีความยาวต่างกันไป แต่โดยปกติจะมีกลูโคสอยู่ประมาณ 2,000-14,000 หน่วย ยาวประมาณ 1-7gmm. และจับกับลูกโซ่ข้างเคียงด้วยแขนแบบไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ทำให้เกิดเป็นลักษณะที่เรียกว่า ไฟบริล (Fibrils) ซึ่งหนาไม่เกิน 2,500 A และยาวหลายไมโครเมตร แต่ละไฟบริลจะเรียงต่อกันด้วยไฮโดรเจนบอนด์ ซึ่งทำให้เกิดการติดกันขึ้นมา เซลลูโลสจะฝังตัวอยู่ในของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอนเรียกแมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์ ส่วนของไฟบริลจะทนต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์และสารเคมี ผนังเซลล์จึงมีหน้าที่ป้องกันอันตรายและเพิ่มความแข็งแรงให้กับเซลล์ พืชในพืชชั้นต่ำที่มีเซลลูโลสน้อย เช่น เชื้อราจะมีไคติน (Chitin) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.9.1.1.2 ไคติน เป็นส่วนประกอบที่พบมากในผนังเซลล์ของเชื้อรา และเป็นส่วนประกอบของสัตว์ที่ไม่มีกระดูกสันหลัง โมเลกุลของไคตินจะเรียงต่อกันยาว โดยไม่แตกสาขาสารประกอบทางเคมีเป็นพวก N-acetyl-D-glucosamine โดยเกาะกันแบบ b-1, 4-glycosidic bond ทำให้เกิดเป็นไฟบริลเช่นเดียวกับเซลลูโลส

2.9.1.2 แมทริกซ์ โพลีแซคคาไรด์ (Matrix polysaccharides) ส่วนนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเพคติน (Pectin) ซึ่งแยกออกจากกันโดยคุณสมบัติในการละลายน้ำ เพราะเพคตินนั้นสามารถแยกได้โดยการต้มกับน้ำเป็นเวลานาน แต่เฮมิเซลลูโลสนั้นต้องแยกโดยใช้ไปแตสเซียมไฮดรอกไซด์แมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ทำหน้าที่หุ้มห่อส่วนของไมโครไฟบริลลาโพลีแซคคาไรด์

2.9.1.2.1 เฮมิเซลลูโลส ชื่อของเฮมิเซลลูโลสนั้นใช้เรียกเมื่อพบโพลีแซคคาไรด์ชนิดนี้ใหม่ ๆ ซึ่งเข้าใจว่าเป็นสารเริ่มต้นที่จะทำให้เกิดเซลลูโลส ซึ่งในปัจจุบันพบว่าไม่จริง เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยไซแลนซ์ (Xylans) ซึ่งมีน้ำตาลไซโลส (Xylose) แมนแนน (Mannans) ซึ่งมีน้ำตาล แมนโนส (Mannose) และ กาแลกแตน (Galactans) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) นอกจากนั้นยังมีกลูโคแมนแนน ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลแมนโนส ไซโลกลูแคน ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลกลูโคส และแคลโลส (Callose) จัดเป็นเฮมิ

เซลลูโลสซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เกาะกันแบบ b-1, 3-glycosidic bond ซึ่งจะพบบริเวณปลายเซลล์ของท่ออาหาร (Sieve tubes)

2.9.1.2.2 เพคติน ทำหน้าที่เชื่อมให้เซลลูโลสติดกัน เป็นส่วนประกอบที่มีมากในส่วนมิดเดิลลามেলা (Middle lamella) นอกจากนั้นเพคตินยังเกิดในน้ำผลไม้ต่าง ๆ สารเคมีที่พบใน เพคตินคือ กรดแอลฟา ดี กาแลคตูโรนิก (μ -D-galacturonic acid) อะราบีแนนส์ (Arabinans) และ กาแลคแตนส์ (Galactans)

2.9.1.3 ลิกนิน (Lignins) การเกิดลิกนินในพืชมักจะควบคู่ไปกับเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่ค้ำจุน และท่อน้ำท่ออาหาร จะพบในผนังเซลล์ทุติยภูมิ ซึ่งตายแล้วการเกิดลิกนินทำให้เซลล์แข็งแรง ทำให้ไฟบริลไม่เคลื่อนที่และป้องกันอันตรายให้ไฟบริลด้วย อาจพบลิกนินในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น ฝรั่งและละมุด ลิกนินประกอบด้วยสารเคมีที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พวกฟีโนลิกส์ (Phenolics) ลิกนินทำให้เซลล์เกิดความแข็งแรงมากขึ้นและต้านทานต่อสารเคมีและการกระทบกระเทือนต่าง ๆ

2.9.1.4 โปรตีน ในการพบโปรตีนในผนังเซลล์นั้นระยะแรกเข้าใจว่าเกิดจากการปนเปื้อนมาจากส่วนของไซโตพลาสต์ (Cytoplasm) แต่ในปัจจุบันได้มีการสรุปแน่ชัดแล้วว่า ในเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโตจะมีโปรตีนในผนังเซลล์ ประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประกอบด้วยเอนไซม์พวกไฮโดรเลส (Hydrolases) กลูคาเนส (Glucanase) เพคติน เมทิลเอสเตอเรส (Pectin Methylsterase) และ เอทีพีเอส (ATPase) เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีโปรตีนที่เป็นโครงสร้างเป็นพวกไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) ซึ่งประกอบด้วยไฮดรอกซีโพรลีนเป็นส่วนใหญ่ (Hydroxyproline) โดยเกาะกับโพลีแซคคาไรด์แบบ Non covalent bond

2.9.1.5 น้ำ เป็นส่วนประกอบที่พบในส่วนของเพคตินที่มีลักษณะเป็นวุ้น (Gel) และยังทำหน้าที่ลดปริมาณของไฮโดรเจนบอนด์ที่เกาะกันระหว่างไฟบริลและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำจะทำให้การติดกันของไฟบริลกับเฮมิเซลลูโลสเปลี่ยนไปและน้ำยังเป็นตัวทำลายสารเคมีในผนังเซลล์ด้วย โดยเฉพาะขณะที่เซลล์ขยายตัว

2.9.1.6 ส่วนที่หุ้มห่อภายนอก (Incrusting substances) สิ่งที่หุ้มห่อข้างนอกของผนังเซลล์ของเซลล์ผิว (Epidermis) จะเป็นสารพวกคิวติเคิล (Cuticle) เพื่อช่วยลดการสูญเสียน้ำหรือรับน้ำเพิ่มมากขึ้นและยังป้องกันอันตรายจากสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์ได้ด้วย นอกจากนั้นยังมีสารประกอบอินทรีย์บางชนิดพบในผนังเซลล์ของพืชบางชนิด สารเหล่านี้ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมซิลิเกต เป็นต้น สามารถแบ่งผนังเซลล์ออกได้เป็น 3 ชนิด ด้วยกันคือ

2.9.1.6.1 ผนังเซลล์ชั้นที่หนึ่งหรือผนังเซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell wall) เกิดขึ้นหลังจากที่เซลล์หยุดการขยายตัวแล้ว จะทำหน้าที่หุ้มห่อเยื่อหุ้มเซลล์อยู่อีกที่หนึ่ง

2.9.1.6.2 ผนังเซลล์ชั้นที่สองหรือผนังเซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell wall) คือผนังเซลล์ที่อยู่ระหว่างผนังชั้นที่หนึ่ง และเยื่อหุ้มเซลล์ ประกอบด้วยเซลลูโลสและลิกนินเป็นส่วนใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.1.6.3 มิติเตลลามลลา คือ ส่วนที่เป็นผนังร่วมของเซลล์สองเซลล์ที่อยู่ติดกันเป็นส่วนของผนังเซลล์ที่เกิดขึ้นในขณะที่เซลล์แบ่งเป็นสองเซลล์ ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมเซลล์สองเซลล์ให้ติดกัน ประกอบด้วยสารเพคติน

2.9.2 คลอโรพลาสต์ (Chloroplast) เป็นพลาสต์ ที่มีสีเขียวพบเฉพาะในเซลล์พืช และสาหร่าย เกือบทุกชนิด พลาสต์มีเยื่อหุ้มสองชั้นภายในโครงสร้างพลาสต์ จะมีเม็ดสีหรือรงควัตถุบรรจุอยู่ ถ้ามีเม็ดสีคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เรียกว่า คลอโรพลาสต์ ถ้ามีเม็ดสีชนิดอื่น ๆ เช่น แคโรทีนอยด์ เรียกว่า โครโมพลาสต์ ถ้าพลาสต์นั้นไม่มีเม็ดสี เรียกว่า ลิวโคพลาสต์ (Leucoplast) ทำหน้าที่เป็นแหล่งเก็บสะสมโปรตีนหรือเก็บสะสมแป้งที่เรียกว่า เม็ดสี (Starch grains) เรียกว่า Amyloplast ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารคลอโรฟิลล์ ภายในคลอโรพลาสต์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลว เรียกว่า สโตรมา (Stroma) มีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสงแบบที่ไม่ต้องใช้แสง (Dark reaction) มี DNA RNA ไรโบโซม และเอนไซม์อีกหลายชนิดปะปนกันอยู่ในของเหลว เป็นเยื่อลักษณะคล้ายเหรียญที่เรียงซ้อนกันอยู่ เรียกว่า กรานา (Grana) ระหว่างกรานาจะมีเยื่อเมมเบรนเชื่อมให้กรานาติดต่อกัน เรียกว่า อิกเตอร์กรานา (Intergrana) หนัวยย่อย ซึ่งเปรียบเสมือน เหรียญแต่ละอันเรียกเหรียญแต่ละอันว่ากรานาลามลลา (Grana lamella) หรือ กรานาไทลาคอยด์ (Grana thylakoid) ไทลาคอยด์ในตั้งเดียวกัน ส่วนที่เชื่อมติดกัน เรียกว่า สโตรมา ไทลาคอยด์ (Stroma thylakoid) ไม่มีทางติดต่อกันได้ แต่อาจติดกับไทลาคอยด์ในตั้งอื่น หรือกรานาอื่นได้ทั้งกรานา และอินเตอร์กรานา เป็นที่อยู่ของคลอโรฟิลล์ รงควัตถุอื่น ๆ และพวกเอนไซม์ ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ด้วยแสง แบบที่ต้องใช้แสง (Light reaction) บรรจุอยู่ หน้าที่สำคัญของคลอโรพลาสต์ คือ การสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) โดยแสงสีแดง และแสงสีน้ำเงินเหมาะสม ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงมากที่สุด

2.10 ผักตบชวา (Water Hyacinth)

ผักตบชวาถูกนำเข้ามาในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2444 ในสมัยรัชกาลที่ 5 โดยนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในฐานะเป็นไม้ประดับสวยงาม โดยเจ้านายฝ่ายในที่ตามเสด็จประพาสประเทศอินโดนีเซีย ได้เห็นพืชชนิดนี้มีดอกสวยงาม จึงนำกลับมาปลูกในประเทศไทย และใส่อ่างดินเลี้ยงไว้หน้าสนามวังสระปทุม จนกระทั่งเกิดน้ำท่วมวังสระปทุมขึ้น ทำให้ผักตบชวาหลุดลอยกระจายไปตามแม่น้ำ ลำคลองทั่วไป และแพร่พันธุ์อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

ลักษณะไม้ น้ำไหลทอดเลื้อยไปตามผิวน้ำ ต้นอวบ น้ำ ใบรูปไข่ค่อนข้างกลม สีเขียวเป็นมัน ก้านใบพองออกเพื่อช่วยให้ลอยน้ำได้ ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอด กลีบดอกบาง 6 กลีบ สีฟ้าอมม่วง กลีบบนขนาดใหญ่ และมีแต้มสีเหลืองกลางกลีบ ออกดอกปลายฤดูหนาว จนถึงต้นฤดูร้อน ขยายพันธุ์ แยกต้นอ่อนที่ปลายไหลไปปลูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผักตบชวาที่พบขึ้นตามแหล่งขึ้นและ หรือมีโคนตม ก้านใบจะไม่มีลักษณะพองโป่ง รากจะยึดติดกับผิวดินแน่น ผักตบชวาสามารถสืบพันธุ์ได้ 2 วิธี คือ โดยอาศัยเพศ และไม่อาศัยเพศ

2.11 สารลดแรงตึงผิว

2.11.1 คุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว (วิชาฯ ภูจินดา, 2548)

สารลดแรงตึงผิว หรือ Surface Active Agent มีชื่อเรียกโดยทั่วไปทางวิทยาศาสตร์ว่า “Surfactant” สารลดแรงตึงผิวเดิมมาจากภาษาเยอรมันว่า Tensid ซึ่งตั้งโดยนักเคมีชาวเยอรมันในปี ค.ศ. 1960 สารลดแรงตึงผิวส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) และ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) ส่วนที่ไม่ชอบน้ำมักจะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือมีธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็น องค์ประกอบหลัก ส่วนใหญ่จะมาจากไขมันและน้ำมันตามธรรมชาติ รวมทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และโพลีเมอร์สังเคราะห์ ลักษณะที่สำคัญของสารลดแรงตึงผิวคือเมื่อใส่สารลดแรงตึงผิวเพียงเล็กน้อยลงในน้ำ สารลดแรงตึงผิวจะไปลดแรงตึงผิวของน้ำ เพื่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ ง่ายขึ้น เช่น การเกิดฟอง การทำให้เปียก และกระบวนการทำความสะอาด เป็นต้น ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะพยายามหนีน้ำโดยไปเกาะกับพื้นผิวที่ว่าง เช่น อากาศ ส่วนที่ชอบน้ำจะยังคงอยู่ในน้ำ สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทโดยแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ได้แก่

- 1) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) ได้แก่ Cetyl trimethylammonium bromide (CTAB) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $C_{16}H_{33}N(CH_3)_3^+Br^-$ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวกมักจะมีพบในผลิตภัณฑ์ ยาสีฟัน ครีมนวดผม และน้ำยาปรับผ้านุ่ม เป็นต้น
- 2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) ได้แก่ Sodium dodecyl sulphate (SDS) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $CH_3(CH_2)_{11}SO_4^-Na^+$ ซึ่งมักจะเป็นส่วนประกอบในผงซักฟอก และสบู่ เป็นต้น
- 3) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) ได้แก่ Polyoxyethylene alcohol ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ $(C_nH_{2n+1}(OCH_2CH_2)_mOH)$ สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุนี้นักจะนำไปผสมในสบู่เหลวล้างหน้า
- 4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic surfactant) ได้แก่ β -N- Alkylaminopropionic Acids มีสูตรโมเลกุล คือ $RN^+H_2CH_2CH_2COO^-$ ซึ่งเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอาง สารป้องกันการกัดกร่อน และสารยับยั้งแบคทีเรีย เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบความสามารถของสารลดแรงตึงผิวทั้ง 4 ชนิด ในการทำให้เกิดฟอง การซักล้าง และการทำให้พื้นผิวเกิดความอ่อนนุ่ม (Tiger Chemical Company, 1997)

ประเภท / คุณสมบัติ สารลดแรงตึงผิว	การเกิดฟอง	ความสามารถ ในการซักล้าง	ความสามารถ ในการทำให้ อ่อนนุ่ม
ประจุลบ	ดีที่สุด	ค่อนข้างดี	ไม่แน่นอน
ไม่มีประจุ	ค่อนข้างดี	ดี	ดี
ประจุบวก	ดี	ปานกลาง	ไม่ดี
ประจุบวกและประจุลบ	ไม่ดี	ดี	ดีที่สุด

2.11.2 การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์

- 1) สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น ผงซักฟอก สบู่ ยาสีพื้น ยาสระผม ครีมนวดผม และผลิตภัณฑ์ที่มีฟอง เป็นต้น
- 2) สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและครีมกันแดด
- 3) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์ ผลิตยา
- 4) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการย้อมผ้า การเคลือบสีไม้หรือโลหะ การผลิตพลาสติก การทำหนังสือสัตว์ การผลิตเนยเทียม เค้กและไอศกรีม เป็นต้น
- 5) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น บำบัดน้ำเสีย กำจัดมลพิษทางดิน ดูดซับของเสีย เป็นต้น
- 6) สารลดแรงตึงผิวถูกนำมาใช้ในกระบวนการสกัดแยก เช่น การสกัดแยกแร่ การแยกน้ำมันออกจากน้ำ เป็นต้น

นอกจากสารลดแรงตึงผิวจะมีบทบาทในชีวิตประจำวันแล้ว เช่น ในกระบวนการทำความสะอาด สารลดแรงตึงผิวยังมีบทบาทที่สำคัญและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อย่างไรก็ตามแล้วแต่การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้ประโยชน์นั้นจะต้อง พิจารณาอย่างรอบคอบ ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวก็สามารถทำลายสิ่งแวดล้อมได้เช่นกันถ้ามีการใช้ในปริมาณที่ไม่ถูกต้องและมีการนำสารลดแรงตึงผิวผิดประเภทมาใช้ ตัวอย่างเช่น ในการปล่อยน้ำซักผ้าหรือน้ำยาล้างจานที่เข้มข้นซึ่งมีสารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบลงในแม่น้ำลำคลองจะทำให้เกิดฟองอย่างมาก นอกจากจะทำลายสุนทรียภาพของแม่น้ำลำคลองแล้วยังสร้างผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจต้องใช้เวลานานที่กระบวนการธรรมชาติจะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมดโดยแบคทีเรียหรือจุลินทรีย์ US.EPA. ได้กำหนดความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในน้ำดื่มให้ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Kawamura, 2000)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 สมดุลและไอโซเทอร์มของการดูดซับ

2.12.1 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในการละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้น C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับเมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไป จนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล ณ สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

2.12.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ในการศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของสารที่ถูกดูดซับและพื้นผิวสารดูดซับ รวมทั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลของ ขั้นตอนที่เกิดขึ้น มักดำเนินการโดยการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับซึ่งเป็นการคำนวณความเข้มข้นของสาร ถูกดูดซับที่อยู่ในรูปของก๊าซหรือสารละลายก่อนและหลังเกิดการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ ในกระบวนการดูดซับ นั้น เมื่อโมเลกุลของสารดูดซับมาสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับในช่วงเวลาหนึ่ง จะเกิดสภาพสมดุลขึ้นระหว่าง มวลของสารที่ถูกดูดซับกับมวลของสารเดียวกันที่เหลืออยู่ในก๊าซหรือสารละลาย ภายใต้สภาวะสมดุลนี้ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของแข็งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการมวล คือ

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{W} \quad (2.1)$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) V}{W} \quad (2.2)$$

$$\text{dye removal (\%)} = \frac{(C_0 - C_e) \times 100}{C_0} \quad (2.3)$$

โดย q_e = จำนวนการดูดซับที่ยึดต่อปริมาณตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล

q_t = จำนวนการดูดซับที่ยึดต่อปริมาณตัวดูดซับที่เวลานั้น ๆ

C_t = ความเข้มข้นที่เวลานั้น ๆ ของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับในก๊าซหรือของเหลว

C_e = ความเข้มข้นหลังจากเข้าสู่สภาวะสมดุลของสารที่ถูกดูดซับ

V = ปริมาณของสารละลายหรือก๊าซ

W = น้ำหนักแห้งของสารดูดซับที่ใช้

2.12.2.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งาน ได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้

ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + C_e/q_m \quad (2.4)$$

โดย q_m = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว ($\mu\text{g}/\text{mg}$)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล เรียกว่า ค่าการดูดซับที่สมดุล

K_L = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (สมการ 2.4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ K_L หาได้จากความชัน (Slope) และจุดตัดแกน (Intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (Separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = 1/(1+K_L C_0) \quad (2.5)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับ เป็นเส้นตรง (Linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (Irreversible)

2.12.2.2 ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิช (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอร์มแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่สมดุล (mg/L)

q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F = ค่าคงที่ที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมากหรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอร์มของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้า น้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับที่มีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.12.2.3 ไอโซเทอร์มแบบเทมกิน (Temkin isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจาก ในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกละลาย (Adsorbent-adsorbate interactions) สมการของ Temkin เขียนได้เป็น

$$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e \quad (2.7)$$

โดย b_0 = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)

A = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (Maximum binding energy)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ Jmol}^{-1}/\text{K}^{-1}$)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ค่าคงที่ A และ B หาได้จากจุดตัดแกนและความชันของเส้นกราฟตามลำดับ

2.12.2.4 ไอโซเทอร์มแบบ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพสมการของไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} [RT \ln(1 + 1(C_e))]^2 \quad (2.8)$$

โดย q_D = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

K_{DR} = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (mol^2/kJ^2) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

C_e = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mol/L)

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (8.134 J/mol K)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_e กับ $\ln C$ สามารถหาค่า n และ K_{DR} ได้จากจุดตัดแกนและค่าความชัน ตามลำดับค่า n และ K_{DR} จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ (E) ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระ หาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2n}} \quad (2.9)$$

โดย E = พลังงานที่ดูดซับเฉลี่ยของการดูดซับ (kJ/mol)

จากผลพบว่า ค่าพลังงานดูดซับอิสระ (E) สามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า $E = 8-16$ kJ/mol เป็นกระบวนการดูดซับไหลโดยการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมี ถ้าค่า $E < 8$ kJ/mol

จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า $E > 16$ kJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี

2.12.2.5 ไอโซเทอร์มแบบซิปส์ (Sips isotherm)

ซิปส์ (Sips) เสนอแบบจำลองสมดุลดูดซับแบบใหม่โดยเป็นแบบจำลองที่ผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่างแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังนี้

$$q_e = q_{\max} \left(\frac{K_S P}{1 + K_S P} \right)^n ; n < 1 \quad (2.10)$$

โดย q_e = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ (mg/g)

P = ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ

K_S = ค่าคงที่สมดุลดูดซับของซิปส์ (L/mg)

n = ดัชนีชี้กำลัง

2.12.2.6 ไอโซเทอร์มแบบ Redlich-Peterson (R-P)

สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson ซึ่งจะผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่าง Langmuir และ Freundlich ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \left(K_R \frac{C_e}{q_e} - 1 \right) = b_R \ln C_e + \ln a_R \quad (2.11)$$

โดย K_R = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับจากวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) (mg/g)
 a_R = ค่าคงที่ไอโซเทอรัม Redlich-Peterson
 b_R = เลขชี้กำลังระหว่าง 0 ถึง 1

2.13 แบบจำลองในการศึกษาอัตราในการดูดซับ (Model for adsorption Rate)

(สันทัด และคณะ, 2542)

2.13.1 แบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order)

สมการแบบจำลองอันดับหนึ่งแสดงในสมการ

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1/2.303)t \quad (2.12)$$

โดย q_e = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)
 q_t = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (กรัม/กิโลกรัม)
 k_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/นาที)
 t = เวลา (นาที)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\log (q_e - q_t)$ กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_1 ได้จากความชัน

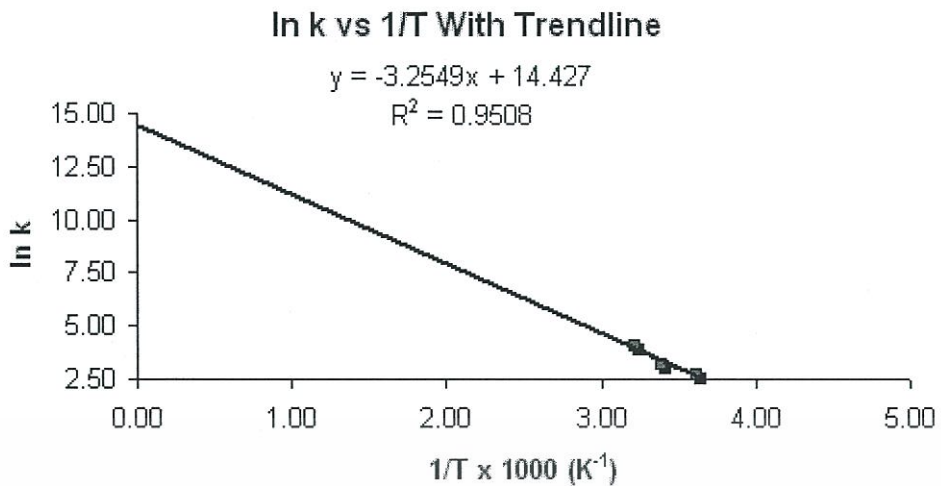
2.13.2 แบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (Pseudo-second order)

สมการแบบจำลองอันดับสองแสดงในสมการ

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t q_e \quad (2.13)$$

โดย q_e = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวที่ถูกดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (กรัม/กิโลกรัม)
 q_t = ปริมาณที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (กรัม/กิโลกรัม)
 k_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/(mg min))
 t = เวลา (นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่กับอุณหภูมิ

ที่มา : <http://mmsphyschem.com/actEnergy.htm>

2.13.3 แบบจำลองของ Elovich (Elovich model)

สมการนี้ได้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมาจากสมมติฐานของสมการนี้ว่า พื้นที่ผิวของแข็งหรือสารดูดซับต่างชนิดกัน และพลังงานจากการดูดซับนั้นต่างกัน และการดูดซับที่พื้นผิวของสารดูดซับมีการใช้งานหรือถูกใช้ไปในการดูดซับน้อย จะทำให้การคายซับและแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับไม่ส่งผลต่อจลศาสตร์ของการดูดซับนี้ (Gupta and Bhattacharyya, 2011) สมการของ Elovich แสดงได้ดังนี้ (Araroni and Tompkins, 1970)

ถ้า $\beta qt \gg 1$ และ $qt = 0$ ที่ $t = 0$ และ $qt = qt$ ที่ $t = t$ จะได้สมการในรูปของสมการเส้นตรง แสดงได้เป็น

$$q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t \quad (2.14)$$

โดย α = อัตราเร็วในการดูดซับ

β = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ

สมการนี้จำกัดการใช้งานเฉพาะช่วงเริ่มต้นของการดูดซับในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับเท่านั้น โดยกระบวนการดูดซับนั้นยังไม่เข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้พฤติกรรมของการดูดซับที่อธิบายโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสอง และสมการของ Elovich นี้สามารถใช้อธิบายการดูดซับได้ดีเมื่อสัดส่วนของพื้นผิวบนสารดูดซับถูกใช้งานได้ไม่เกินร้อยละ 70 ของพื้นผิวทั้งหมด (Rudzinski and Plazinski, 2009)

พื้นฐานของกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ประเภทการดูดซับ ขั้นตอนของกลไก ไอโซเทอร์ม และจลศาสตร์ของการดูดซับจะถูกนำมาใช้กันมากในการอธิบายกลไกการบำบัดและกำจัดมลพิษของวัสดุนาโนโดยเฉพาะอนุภาคนาโนที่เป็นรูพรุน (Nanoporous materials) อนุภาคนาโนไอออน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคนาโนคาร์บอนที่มีกระบวนการดูดซับเป็นกลไกหลักในการกำจัดมลพิษ เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้เส้นตรง ซึ่งสามารถหาค่า k_2 ได้จากจุดตัดแกน y

2.13.4 แบบจำลองการแพร่กระจายภายในสารดูดซับ (Intraparticle diffusion model)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังนี้ (Banerjee et al., 1997; Manju et al., 2002)

$$q_t = k_{id}(t)^{1/2} + C \quad (2.15)$$

โดย k_{id} = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อพลอตระหว่าง q_t กับ $t^{1/2}$ จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ k_{id} และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

2.14 ค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) (ปองพล สุริยะกันธร, 2556)

จากกฎอัตราสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยากับสภาวะต่าง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลง

จากกฎอัตรา
$$\text{rate} = k [A]^m [B]^n \quad (2.16)$$

บอกได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ค่าคงที่อัตราอาจเปลี่ยนแปลงไปได้เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปหรือมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิและพลังงานก่อกัมมันต์ (ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) เปลี่ยนไปสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สามารถบอกความสัมพันธ์ของสามตัวแปรนี้ได้ นั่นคือ
เห็นได้ว่าค่าคงที่อัตราของปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นไปตาม สมการของอาร์เรเนียส

$$K = Ae^{-E_a/RT} \quad (2.17)$$

ถ้าเราเขียนสมการให้อยู่ในรูปลอการิทึมธรรมชาติ จะได้ว่า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln k = \ln A e^{-E_a/RT} \quad (2.18)$$

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2.19)$$

ถ้ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง และมีค่าความชันเท่ากับ $-E_a/R$ และมีจุดตัดแกน $\ln k$ ที่จุด $\ln k = \ln A$

โดย $A =$ แฟกเตอร์ความถี่ (Frequency factor) ซึ่งมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรสำหรับแต่ละปฏิกิริยา

$E_a =$ พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ของปฏิกิริยา (kJ/mol)

$R =$ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol)

$T =$ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (หน่วย K)

เรียกแฟกเตอร์ความถี่และพลังงานก่อกัมมันต์ว่าเป็นพารามิเตอร์ของอาร์เรเนียส (Arrhenius parameter) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตรา k_1 กับอุณหภูมิ T_1 และค่าคงที่อัตรา k_2 กับอุณหภูมิ T_2 เราก็สามารถคำนวณหาพลังงานก่อกัมมันต์ หรือคำนวณหาค่าคงที่อัตราที่อุณหภูมิอื่นเมื่อทราบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1}$$

$$\ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2}$$

นำ $\ln k_2$ ไปลบออกจาก $\ln k_1$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ln k_1 - \ln k_2 &= \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \\ \ln \frac{k_1}{k_2} &= \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \\ &= \frac{E_a}{R} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} \right) \end{aligned}$$

สำหรับปฏิกิริยาง่าย ๆ อาจถือว่าแฟกเตอร์ความถี่เท่ากับค่าคงที่ของการชนระหว่างอนุภาคของสารตั้งต้น แต่สำหรับปฏิกิริยาซับซ้อนมากขึ้นเราจะต้องคำนึงถึงการจัดตัวของโมเลกุลขณะเข้าชนด้วย

2.15 อุณหพลศาสตร์และสมดุลเคมี (นภดล ไชยคำ และคณะ, 2542)

2.15.1 ความหมายของเอนทัลปีและเอนโทรปี

ความร้อนของปฏิกิริยาหรือเอนทัลปี (Heat or enthalpy of reaction) เป็นเทอร์มที่ใช้บอกถึงปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือถูกคายออกมาต่อโมลของสารที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ถ้าปฏิกิริยาเกิดที่ความดันคงที่และงานที่เกี่ยวข้องเป็นแบบขยายตัวหรือหดตัวเท่านั้น ให้เอนทัลปี คือ H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปี คือ $\Delta H = H_2 - H_1$

Δ อ่านว่า เดลต้า (Delta) H_2 และ H_1 เป็นสถานะสุดท้าย (Final state) และสถานะเริ่มต้น (Initial state) ตามลำดับ

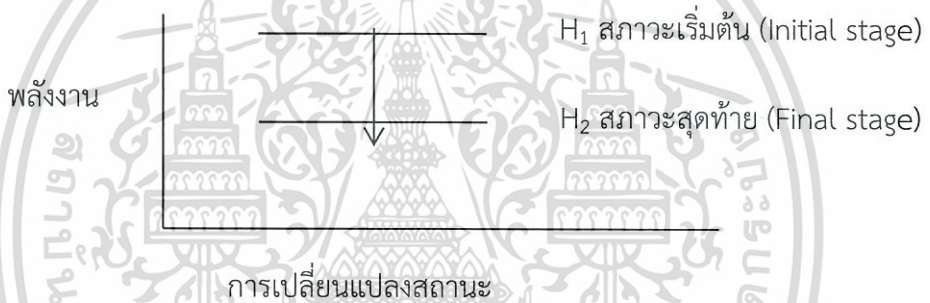
เครื่องหมายบวกของเอนทาลปี เมื่อสารเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปี

$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (2.20)$$

โดยที่ $H_2 =$ สถานะสุดท้าย (Final state)

$H_1 =$ สถานะเริ่มต้น (Initial state)

ในกรณีที่ H_2 มีค่าน้อยกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพมากกว่า H_1 (ระบบที่มีเสถียรภาพมากกว่า จะมีพลังงานน้อยกว่า) การเปลี่ยนแปลงสถานะนี้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนสถานะกับพลังงาน (Chang, 1996)

$\Delta H =$ ลบ = ความร้อนคายออกจากระบบ (Exothermic)

ตรงกันข้ามถ้า H_2 มีพลังงานมากกว่า H_1 หรือ H_2 มีเสถียรภาพน้อยกว่า H_1 ความร้อนจะต้องถูกดูดเข้าไปในระบบ หรืออาจกล่าวได้ว่าเราจะต้องให้ความร้อนแก่ระบบ

$\Delta H =$ บวก = ความร้อนจะถูกดูดเข้าไปในระบบ (Endothermic)

เอนโทรปี (Entropy, S) คือ ปริมาณที่บอกลถึงความไม่เป็นระเบียบของระบบหรืออาจกล่าวได้ว่าเอนโทรปีบอกให้ทราบว่าอะตอม โมเลกุล หรือไอออนกระจายตัวอยู่ในระบบอย่างไม่เป็นระเบียบมากน้อยเพียงใด ยิ่งระบบมีความเป็นระเบียบมากเพียงใด เอนโทรปีก็จะลดลงเพียงนั้น

ให้ $S_1 =$ เอนโทรปี ณ สถานะเริ่มต้น

$S_2 =$ เอนโทรปี ณ สถานะสุดท้าย

และ $\Delta S = S_2 - S_1$

$\Delta S =$ การเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี

ΔS เป็นปริมาณการวัดได้โดยให้ความร้อนแก่ระบบ เมื่อให้ความร้อนแก่ระบบ อุณหภูมิสูงขึ้น

ทำให้ความเป็นระเบียบเริ่มลดลงหรือไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น เอนโทรปี S_2 มีค่าสูงขึ้น ($\Delta S > 0$) และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเพิ่มความร้อนขึ้นไปอีก ความไม่เป็นระเบียบมากขึ้นตามลำดับ S_2 มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังนั้นเห็นได้ว่า $\Delta S =$ แปรผันโดยตรงกับปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นให้กับระบบ

ถ้า $\Delta S =$ บวก (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)

ถ้า $\Delta S =$ ลบ (ระบบมีความไม่เป็นระเบียบลดลงหรือความเป็นระเบียบเพิ่มขึ้น)

2.15.2 การหาค่าเอนทัลปีโดยใช้สมการของแวนท์ฮอฟฟ์

จากสมการของกิบส์และเฮลโมทซ์ นำไปสู่การคำนวณการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่สมดุล (K) ตามสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (T) ได้ดังนี้คือ

$$d(\Delta G^0/T) = (\Delta H^0/T^2) / dT \quad (2.21)$$

ที่สภาวะสมดุล

$$\Delta G^0 = -RT \ln K$$

ดังนั้น

$$d(-R \ln K) = (-\Delta H^0/T^2) / dT$$

$$d(\ln K) = (-\Delta H^0/RT^2) / dT \quad (2.22)$$

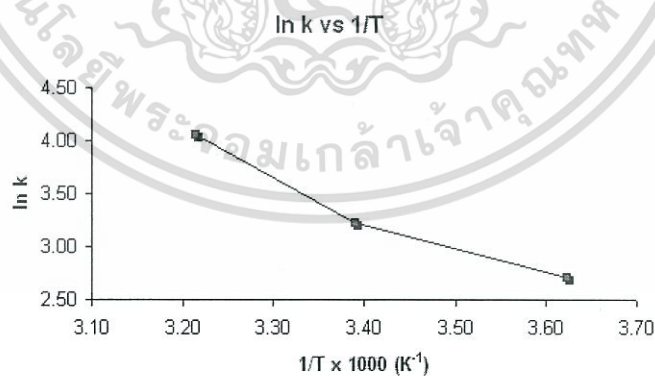
หรือ

$$d(\ln K) = (-\Delta H^0/R)d(1/T) \quad (2.23)$$

เรียกสมการที่ (2.20) ว่า สมการของแวนท์ฮอฟฟ์ (Van't Hoff equation) เมื่ออินทิเกรต สมการ (2.23) และสมมติว่า ΔH^0 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ดังนั้น

$$\ln K = (-\Delta H^0/R)d(1/T) + \text{ค่าคงที่} \quad (2.24)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง ดังแสดงในรูป (2.3) และจากความชันของกราฟ สามารถนำไปคำนวณหา ΔH^0 ได้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K$ และ $1/T$

ที่มา : <http://mmsphyschem.com/actEnergy.htm>

2.16 พลังงานอิสระและสมดุลเคมี (Thermodynamic and equilibrium)

กิบส์ (Josiah W. Gibbs) เป็นนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน ได้นำฟังก์ชันทางเทอร์โมไดนามิกส์อีกฟังก์ชันหนึ่งมาใช้ คือ G เรียกว่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs free energy) หรือเรียกสั้นลงว่าพลังงานอิสระ มีนิยามดังนี้

$$G = H - TS \quad (2.25)$$

สังเกตว่าปริมาณทั้งหมดในสมการ (2.23) เป็นสมบัติของระบบ รวมทั้งอุณหภูมิ T ด้วยและจะเห็นว่า G มีหน่วยเป็นพลังงาน (ทั้ง H และ TS ก็มีหน่วยเป็นพลังงาน) และเป็นฟังก์ชันสถานะเช่นเดียวกับ H และ S การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ (ΔG) ของระบบในกระบวนการที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิคงที่ คือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.26)$$

สรุปสถานะการเกิดปฏิกิริยาและสถานะที่ระบบจะอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิและความดันคงที่ โดยอาศัยค่าของ ΔG ได้ดังนี้

$\Delta G < 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางที่ไปข้างหน้า

$\Delta G > 0$ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ แต่เกิดขึ้นได้เองในทิศทางย้อนกลับ

$\Delta G = 0$ ระบบอยู่ในสมดุล ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ในสมการ (2.26) ทำนายเครื่องหมายของ ΔG นั้น เราจำเป็นต้องทราบค่าของ ΔH และ ΔS ถ้า ΔH มีค่าเป็นลบ (ปฏิกิริยาคายความร้อน) และ ΔS มีค่าเป็นบวก (ปฏิกิริยาทำให้ระบบมีความไม่เป็นระเบียบสูงขึ้น) ΔG มีแนวโน้มที่จะเป็นลบ แต่อุณหภูมิก็อาจมีผลต่อทิศทางของปฏิกิริยาด้วยว่าจะเกิดขึ้นได้เองในทิศทางใด ความสัมพันธ์ที่เป็นได้ 4 แบบ คือ

- ถ้าทั้ง ΔH และ ΔS มีค่าเป็นบวก ΔG จะเป็นลบก็ต่อเมื่อ $T \Delta S$ มีค่ามากกว่า ΔH นั่นคือเมื่อ T มีค่าสูงขึ้น
- ถ้าทั้ง ΔH เป็นบวก และ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นบวกเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- ถ้าทั้ง ΔH เป็นลบ และ ΔS เป็นบวก ΔG จะเป็นลบเสมอไม่ว่าอุณหภูมิจะเป็นเท่าใดก็ตาม
- ถ้าทั้ง ΔH เป็นลบ และ ΔS เป็นลบ ΔG จะเป็นลบเฉพาะเมื่อ $T \Delta S$ มีค่าน้อยกว่า ΔH นั่นคือ T มีค่าต่ำ

ในกรณีแรกและกรณีสุดท้าย อุณหภูมิที่จะทำให้ ΔG มีค่าเป็นลบนั้นขึ้นอยู่กับค่าของ ΔH และ ΔS

ตารางที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อเครื่องหมายของ G ในทั้ง 4 กรณี

H	S	G
+	+	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองที่อุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองได้ในทิศทางตรงกันข้าม
+	-	G มีค่าเป็นบวกเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองใน ทิศทางตรงกันข้ามที่ทุกอุณหภูมิ
-	+	G มีค่าเป็นลบเสมอ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่ทุก อุณหภูมิ
-	-	ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองที่อุณหภูมิต่ำ ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาย้อนกลับเกิดขึ้นได้เอง

การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยา คือ

$$\Delta G^0 = G^0 (\text{สำหรับผลิตภัณฑ์}) - G^0 (\text{สารตั้งต้น})$$

ΔG^0 ในสมการนี้ หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นในสภาวะมาตรฐาน กลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ในสภาวะมาตรฐานเช่นกัน สมมติว่าเมื่อเริ่มปฏิกิริยาในสารละลายโดยให้สารตั้งต้นทุกชนิดอยู่ในสภาวะมาตรฐาน (คือความเข้มข้นเท่ากับ 1 M) ทันทีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะไม่อยู่ในมาตรฐานอีกต่อไป เพราะต่างก็มีความเข้มข้นไม่เท่ากับ 1 M ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช่มาตรฐาน จะต้องทำนายทิศทางของปฏิกิริยาจาก ΔG ไม่ใช่จากความสัมพันธ์ระหว่าง ΔG และ ΔG^0 คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln Q \quad (2.27)$$

เมื่อ R เป็นค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/K.mol) T เป็นอุณหภูมิสมบูรณ์ของปฏิกิริยา และ Q เป็นอัตราส่วนของปฏิกิริยา จากสมการนี้จะเห็นว่า ΔG มีค่าขึ้นอยู่กับ ΔG^0 และ $RT \ln Q$ สำหรับปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ T ใด ๆ ΔG^0 จะมีค่าที่แน่นอนแต่ค่าของ $RT \ln Q$ มีค่าที่ไม่แน่นอน เพราะ Q อาจเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบของสารในปฏิกิริยา จะมีการพิจารณากรณีพิเศษ 2 วิธี ดังนี้คือ

กรณีที่ 1 ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นลบมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นบวกมากพอที่จะหักล้างกับพจน์ G^0 ได้ จนกว่าจะเกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้นมากพอ

กรณีที่ 2 ถ้า ΔG^0 มีค่าเป็นบวกมาก พจน์ $RT \ln Q$ จะมีค่าไม่เป็นลบมากกว่าความเป็นบวกของ G^0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฉพาะเมื่อมีสารผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อยและสารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ โดยนิยามแล้วที่สมดุล $\Delta G = 0$ และ $Q = K$ เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลตั้งนั้นจะได้

$$0 = \Delta G^0 + RT \ln K$$

หรือ
$$\Delta G^0 = -RT \ln K \quad (2.28)$$

สมการที่ (2.28) เป็นสมการที่สำคัญที่สุดสมการหนึ่งเพราะเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ดังนั้น ถ้าทราบค่าของ K เราจะคำนวณค่า ΔG^0 ได้ หรือถ้าทราบค่าของ ΔG^0 ก็จะคำนวณหา K ได้เช่นกัน

2.20 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.20.1 Sengil และ Ozacar (2551) ศึกษาการดูดซับทองแดง(II) ทางชีวภาพจากสารละลายด้วยแทนนินจากต้นไมยราบ โดยศึกษาผลของขนาดของตัวดูดซับ, pH เริ่มต้น, เวลา และความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะ เป้าหมายของการศึกษานี้คือเข้าใจกลไกของการกำจัดทองแดง, ศึกษาไอโซเทอร์มที่สอดคล้องกับการดูดซับและศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับด้วยการทดลองแบบแบดซ์ ผลการทดลองที่ได้นำมาศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich และ Temkin ไอโซเทอร์มที่สอดคล้องกับการทดลองมากที่สุดคือไอโซเทอร์มของ Langmuir ผลการทดลองนำมาหาค่าจลนศาสตร์ของการดูดซับ ได้แก่ Pseudo-first order, Second-order, สมการ Elovich และ Intraparticle diffusion เพื่อหาแบบจำลองที่สอดคล้องกับการดูดซับทองแดงมากที่สุด ผลการทดลองสรุปว่าสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากที่สุดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุด ในทางตรงกันข้ามแบบจำลองของสมการ Elovich ก็สอดคล้องกับการดูดซับด้วยเช่นกัน การศึกษาเทอร์โมไดนามิก ได้แก่ เอนโทรปี, เอนทาลปีและค่าพลังงานอิสระของกิบส์ เท่ากับ 153.0 J/mol K, 42.09 kJ/mol และ -2.47 kJ/mol ตามลำดับ

2.20.2 Han และคณะ (2553) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ฟางข้าวสาลีที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดซิตริก โดยใช้การทดลองแบบแบดซ์ น้ำหนักที่หายไปจากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ (TGA) คือความชื้น, เซลลูโลสและเส้นใยลิกนิน ศึกษาพื้นผิวของตัวดูดซับด้วย FTIR จากการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับชี้ให้เห็นว่าการดูดซับไอออนของทองแดงและสีเมทิลีนบลูเป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สอง การดูดซับอาจถูกควบคุมโดยการถ่ายเทมวลจากการแพร่ของสารที่เข้าสู่พอร์ การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของทั้ง Freundlich และ Langmuir การดูดซับสูงสุดที่สภาวะสมดุลของไอออนทองแดงและสีเมทิลีนบลูจาก ไอโซเทอร์มของ Langmuir เท่ากับ 39.17 และ 396.9 mg g⁻¹ ที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

293 เคลวิน ตามลำดับ การศึกษาเทอร์โมไดนามิกพบว่า การดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ และเป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน

2.20.3 Sudipta Chatterjee และคณะ (2553) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมคองโกเรดด้วยไฮโดรเจนปีสของโคโตซานด้วยท่อานาโนคาร์บอน การดูดซับด้วยไฮโดรเจนปีสของโคโตซานวิเคราะห์ได้จากการที่ผนังของท่อานาโนคาร์บอนดูดซับเต็มไปด้วยสีย้อมคองโกเรดซึ่งเป็นสีย้อมที่เป็นประจุลบ การดูดซับในท่อานาโนคาร์บอนเป็นวิธีที่มีประโยชน์ที่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น ร้อยละของซัลเฟอร์เมื่อใช้ไฮโดรเจนปีสของโคโตซานร่วมกับท่อานาโนคาร์บอนจะมีค่าสูงกว่าปีสของโคโตซานปกติ ภายหลังจากการดูดซับสีย้อมคองโกเรดโดยวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray (EDX) พบว่าแบบจำลองไอโซเทอร์มแลงเมียร์สอดคล้องมากกว่าฟรุนดิช และค่าปัจจัยที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (n) ของตัวดูดซับ วิเคราะห์ได้จาก ไอโซเทอร์ม Sips (0.98) ความสามารถสูงสุดในการดูดซับของตัวดูดซับที่ได้จากแบบจำลองของไอโซเทอร์มแลงเมียร์เท่ากับ 450.4 mg/g

2.20.4 Patricia Blanes และคณะ (2554) ได้ศึกษาการดูดซับไตรวาเลนต์โครเมียมในสารละลายด้วยสาหร่ายแดง การทดลองเป็นแบบแบดซ์ โดยมีปัจจัยการดูดซับ ได้แก่ พีเอช, เวลาที่สัมผัส, ความเข้มข้นของโลหะไอออนและปริมาณมวลชีวภาพ ซึ่งการดูดซับ Cr (III) จะขึ้นอยู่กับพีเอช และปริมาณตัวดูดซับ จลนศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order และไอโซเทอร์มของการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับคือ 16.11 mg/g ที่พีเอช 4 และใช้ปริมาณตัวดูดซับ 10 g/L จากการวิเคราะห์การดูดซับ Cr (III) บนสาหร่ายแดง ส่วนมากเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าในการศึกษานี้สาหร่ายแดงเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และใช้ต้นทุนต่ำในการดูดซับ Cr (III) ในน้ำเสีย

2.20.5 Sushmita Banerjee และ Chattopadhyaya (2556) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมที่เป็นพิษและทาร์ทราซีนจากสารละลายด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การกำจัดสารละลายสีย้อมประจุลบและทาร์ทราซีนโดยใช้ซีลีเยอ ทำการทดลองแบบแบดซ์ พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอช, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและอุณหภูมิ มีสมดุลของการดูดซับนาที่ 70 ที่พีเอช 3 ร้อยละการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย และดูดซับได้สูงสุดที่ร้อยละ 97 ปริมาณ 1 mg/L ของทาร์ทราซีน ซึ่งการดูดซับดีขึ้นจากร้อยละ 71 เป็น 97 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นลดลงจาก 1.5 mg/L เป็น 1 mg/L สมดุลของการดูดซับวิเคราะห์ได้จากแบบจำลองไอโซเทอร์มแลงเมียร์, ฟรุนดิช, เทมกิน และDubinin-Radushkevich ความสามารถของตัวดูดซับในแบบจำลองไอโซเทอร์มแลงเมียร์ 4.71 mg/g ที่อุณหภูมิ 318 K จลนศาสตร์ในการดูดซับสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order และมีค่าคงที่ $2.7 \times 10^{-3} \text{ g mg}^{-1}$ พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิก อาทิเช่นพลังงานอิสระ (ΔG°), เอนทัลปี (ΔH°) และเอนโทรปี (ΔS°) ซึ่งในการศึกษานี้พบว่า พลังงานอิสระ (ΔG°) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเป็นลบ สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการดูดซับเกิดได้เอง และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

2.20.6 Venkat S. Mane และ Vijay Babu (2556) ได้ศึกษาจลนศาสตร์และสภาพสมดุลในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมคองโกเรดโดยใช้ซีลื้อจากไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งนำซีลื้อมาปรับปรุงคุณภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถประเมินผลได้จาก SEM, FTIR และ TOA ค่าพื้นที่ผิวของ The Brunauer Emmett-Teller (BET), ปริมาณของรูพรุน และค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ $0.3742 \text{ m}^2/\text{g}$, $0.00836 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ 893.6 \AA ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค $182.8 \text{ }\mu\text{m}$ ค่าความหนาแน่นทั้งหมด $212 \text{ kg}/\text{m}^3$ และค่าความพรุนของตัวดูดซับ 0.3 โดยมีปัจจัยที่หลากหลาย ได้แก่ พีเอชเริ่มต้น, ระยะเวลาที่สัมผัส, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ ในการศึกษาพบว่าข้อมูลที่สอดคล้องสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich สภาวะที่ดีที่สุดพีเอชเท่ากับ 7 จลนศาสตร์การดูดซับจะเกิดขึ้นซ้ำร่วมกับกระบวนการสมดุลควอไซ ในเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งจลนศาสตร์ในการดูดซับศึกษาจากแบบจำลอง pseudo first-order, pseudo second-order และสมการ Weber-Morris พบว่าสอดคล้องกับสมการ Pseudo-second order นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาการดูดซับแบบดูดความร้อน พารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิก ได้แก่ พลังงานอิสระ, เอนทัลปี และเอนโทรปี

2.20.7 Asfaram และคณะ (2557) ศึกษาจลนศาสตร์, เทอร์โมไดนามิก และสมดุลไอโซเทอร์มของการกำจัดสีย้อมไคเร็กซ์เรด 12B โดยใช้เปลือกกระเทียมเป็นตัวดูดซับ การกำจัดสีย้อมที่มาจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่สำคัญมากทั้งในด้านสุขภาพอนามัยและการรักษาสิ่งแวดล้อม เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและผลสัมฤทธิ์ของตัวดูดซับที่ได้จากเปลือกกระเทียม มีปัจจัยของกระบวนการดูดซับสีย้อมหลายอย่าง ได้แก่ พีเอช, ความเข้มข้นของสีย้อม, ปริมาณตัวดูดซับ, ขนาดอนุภาค, เวลาและอุณหภูมิ พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order และมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99 ในเวลา 25 นาที มีปริมาณตัวดูดซับ 0.2 g ต่อ 50 มิลลิกรัม และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 50 mgL^{-1} มีพารามิเตอร์ของเทอร์โมไดนามิก คือ พลังงานอิสระของกิบส์, เอนโทรปี และเอนทัลปี ซึ่งพบว่าเป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (endothermic)

2.20.8 Gopal และคณะ (2557) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมไคเร็กซ์เรด โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกระถินหางกระรอกเคลือบด้วยพอลิอะนิลีน ซึ่งตัวดูดซับได้มาจากถ่านกัมมันต์ของเมล็ดกระถินหางกระรอกที่เคลือบด้วยพอลิอะนิลีน โดยเตรียมตัวดูดซับพื้นที่ผิวแบบ BET $1028 \text{ m}^2/\text{g}$ เพื่อดูความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมไคเร็กซ์เรด 23 ที่พีเอชเท่ากับ 3 สามารถดูดซับได้ดีที่สุด และพบว่าจลนศาสตร์ของการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสัมประสิทธิ์สูง $0.9968 < r^2 > 0.9996$ แบบจำลองการแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุน (intra particle) มีบทบาทสำคัญในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 23 บนตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 90.91 เป็น 109.89 mg/g โดยที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30°C เป็น 45°C การศึกษาแบบจำลองคอลัมน์ด้วย Thomas, Yoon-Nelson, และ Bohart-Adams ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าแบบจำลองของ Yoon-Nelson มีค่า R^2 สูงสุด (0.9844-0.9953) และค่า Sd ต่ำ (0.09-0.37)

2.20.9 Ibrahim และ Sani (2557) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมคองโกเรดด้วยเปลือกแตงโมและใบสะเดา การศึกษาการดูดซับที่สภาวะสมดุลของสีย้อมคองโกเรดด้วยผงของเปลือกแตงโมและใบสะเดาเป็นตัวดูดซับ โดยเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich and Harkins-Jura ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) อยู่ในช่วง 0.9359-0.9998 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มที่ทำการศึกษา จากไอโซเทอร์มของ Dubinin-Radushkevich ได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (q_D) อยู่ในช่วง 20.72-26.06 mg g^{-1} ซึ่งดีกว่าไอโซเทอร์มของ Langmuir ซึ่งมี q_m อยู่ในช่วง 18.62 - 24.75 mg g^{-1} จากตัวดูดซับทั้งสองชนิด โดยความสามารถในการดูดซับของเปลือกแตงโมมีค่ามากกว่าใบสะเดา ค่า RL ของไอโซเทอร์ม Langmuir แสดงให้เห็นว่าไม่เป็นการดูดซับแบบ Langmuir (เป็นการดูดซับทางเคมี) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิด ในขณะที่ ค่า n_F จากไอโซเทอร์มของ Freundlich ซึ่งให้เห็นว่าการใช้ใบสะเดาเป็นตัวดูดซับสีย้อมคองโกเรดไม่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มนี ค่าพลังงานอิสระของไอโซเทอร์ม Dubinin-Radushkevich อยู่ในช่วง 0.29-0.32 kJ/mol บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ ค่าการ b_T ของไอโซเทอร์มแบบ Temkin อยู่ในช่วง -0.95 ถึง 0.74 kJ/mol ก็แสดงถึงการดูดซับทางกายภาพเช่นกัน

2.20.10 Sadaf และคณะ (2557) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์ไวโอเล็ต 51 ในสารละลาย ด้วยของเสียประเภทลิกโนเซลลูโลส โดยใช้ตัวดูดซับทางชีวภาพคือขานอ้อยในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์ ไวโอเล็ต 51 การศึกษาเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ พีเอช, ระยะเวลาสัมผัส, ปริมาณตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้น และอุณหภูมิ ในการศึกษาพบว่า การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์ไวโอเล็ต 51 ค่าพีเอชที่เหมาะสมเท่ากับ 2 และปริมาณตัวดูดซับ 0.05 กรัม พบว่าเป็นกระบวนการดูดซับแบบคายความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับจลนศาสตร์แบบจำลองการดูดซับอันดับสองและไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ในการศึกษาเทอร์โมไดนามิกเป็นการบอกถึงความเป็นไปได้ของกระบวนการดูดซับ โดยมีปัจจัยที่สำคัญ คือ ความสูงของเบต, อัตราการไหลและความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม สามารถอธิบายคุณลักษณะตัวดูดซับทางกายภาพได้โดย กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM) และ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งจะแสดงถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมู่ไฮดรอกซิล, คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล กระบวนการดูดซับแสดงให้เห็นว่าชานอ้อยสามารถใช้เป็นตัวซับทางชีวภาพในการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์ไวโอเลต 51 จากน้ำเสียดูดซับและในอุตสาหกรรม

2.20.11 Sumanjit และคณะ (2558) ได้ศึกษาการดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของ ผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก สามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), การหาพื้นที่ผิวจำเพาะตามทฤษฎีของ The Brunauer Emmett-Teller (BET), เทคนิค XRD, กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องกราด (SEM) และการหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ เนื่องมาจากเวลาที่สัมผัส, ความเข้มข้นของสีย้อม, ปริมาณตัวดูดซับและอุณหภูมิ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำมาวิเคราะห์จลนศาสตร์ของการดูดซับและเทอร์โมไดนามิก พบว่ามีการสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order และ ไอโซเทอร์มแลงเมียร์มีค่าการดูดซับสูงสุดที่ 103.2 mg g^{-1} พลังงานอิสระกิบส์, เอนทัลปี, เอนโทรปี แสดงถึงระบบการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้และเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

2.20.12 รวีนิภา ศรีมูล (2559) ได้ศึกษาการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียดูดซับสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียดูดซับที่มีมาจากหลายแหล่ง ส่วนใหญ่ย่อยสลายได้ยาก เป็นสารก่อมะเร็ง ปิดกั้นแสงที่ลงสู่แหล่งน้ำและทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง รวมทั้งทำให้เสียทัศนียภาพน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมจึงควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ กระบวนการดูดซับเป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมได้ดี บทความนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียโดยใช้กระบวนการดูดซับ เนื้อหาครอบคลุมชนิดของสีย้อม การดูดซับสีย้อมด้วยถ่านกัมมันต์ การดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ การดูดซับด้วยคอลัมน์ และไอโซเทอร์มของการดูดซับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) รุ่น Genesis 10S UV-Vis ยี่ห้อ Thermo Scientific บริษัท Thermo Fisher Scientific Inc. ประเทศอังกฤษ
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo บริษัท ซายน์ เอ็นจิเนียร์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer บริษัท Perkin Elmer Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา
4. เครื่องบดสับ รุ่น CP-390 ยี่ห้อ OTTO ประเทศไทย
5. เครื่องกรองลดความดัน (Filter pressure) รุ่น Aspirator A-35 ยี่ห้อ EYEL ประเทศญี่ปุ่น
6. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort ประเทศเบลเยียม
7. เครื่องกวนมอเตอร์พร้อมเทอร์โมสตัท รุ่น MR Hei-Tec ยี่ห้อ Heiolph ประเทศญี่ปุ่น
8. ตู้อบสาร (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert ประเทศเยอรมนี
9. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด รุ่น ML204 ยี่ห้อ Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
10. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital shaker ยี่ห้อ Gallenkamp บริษัท Jepsen & Jessen Technology ประเทศเยอรมนี
11. กระดาษกรอง (Filter papers) ยี่ห้อ Whatman เบอร์42
12. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11 ประเทศอังกฤษ
13. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
14. ขวดน้ำกลั่น (Wash bottle)
15. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 สารเคมี

1. สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) เกรด Commercial, บริษัท เอกสรรค์ เน็ตเวิร์ค จำกัด ประเทศไทย
2. ซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เกรด PR, บริษัท UNILAB ประเทศนิวซีแลนด์
3. กรดไฮโดรคลอริก (conc. HCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม
5. แคลเซียมไนเตรท ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) ยี่ห้อ Fisher Chemical, บริษัท European Distribution Center ประเทศเบลเยียม
6. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ยี่ห้อ Carlo Erba, บริษัท Carlo Erba Reagenti SPA.
7. โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ยี่ห้อ Carlo Erba, บริษัท Carlo Erba Reagenti SPA.
8. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ยี่ห้อ Carlo Erba, บริษัท Carlo Erba Reagenti SPA.
9. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ยี่ห้อ Loba Chemie, บริษัท Loba Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย
10. สารละลายมาตรฐานโครเมียม (Chromium standard solution), บริษัท Merck ประเทศเยอรมนี
11. สารละลายมาตรฐานสังกะสี (Zinc AAS standard), บริษัท Ajax Finechem Pty Ltd. ประเทศนิวซีแลนด์
12. สารละลายมาตรฐานแมงกานีส (Manganese solution) ยี่ห้อ Fisher Chemical ประเทศอังกฤษ
13. สารละลายมาตรฐานทองแดง (Copper standard solution) ยี่ห้อ Scharlau, บริษัท Scharlab ประเทศสเปน
14. น้ำกลั่น (Distilled water)
15. ผักตบชวาส่วนลำต้น

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ

1. นำผักตบชวามาล้างด้วยน้ำทำความสะอาด แล้วตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ
2. นำผักตบชวามาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. นำผักตบชวาที่ได้ไปบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh

4. นำผักตบชวาที่ผ่านการร่อนแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ปลอ่ยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

3.2.2.1 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83)

ชั่งสีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) มา 0.05 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.2.2.2 การสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83)

นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาเจือจางจนได้น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาสแกนหาความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงสูงสุดโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (สแกนจาก 200-800 นาโนเมตร)

3.2.3 การปรับปรุงคุณภาพผักตบชวาด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) 0.01 M

1. ชั่งผักตบชวาที่เตรียมไว้ในข้อ 3.2.1 มา 75 กรัม ใส่บีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร จำนวน 500 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน ใช้แท่งแก้วคนสารคนเป็นระยะเป็นเวลา 6 ชั่วโมง (Sumanjit และคณะ, 2015)
3. นำไปกรอง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นให้สะอาด
4. นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เพื่อเก็บไว้ใช้ในการทดลองต่อไป

3.2.4 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการปรับปรุงคุณภาพ และหลังการปรับปรุงคุณภาพ

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์คุณสมบัติของผักตบชวา

พารามิเตอร์	เครื่องมือในการวิเคราะห์
ขนาดของอนุภาค	Scanning Electron Microscope
หมู่ฟังก์ชัน	Fourier Transform Infrared Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{PZC})

1. เตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.01 โมลต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปรับ pH ของสารละลายเป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
3. เมื่อปรับ pH ได้ตามต้องการแล้วจึงใส่ผักตบชวาที่ถูกปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ปริมาณ 0.15 กรัม ลงไปในขวดรูปชมพู่แล้วปิดฝาขวดให้สนิท
4. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัด pH ภายหลังจากการเขย่าอีกครั้ง
5. นำไปเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) โดยประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากเส้นความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นและความเป็นกรด-เบสสุดท้ายตัดกับเส้นทแยงมุม

3.2.6 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

3.2.6.1 ศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไ้เดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่า pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 2 ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที (Rusly and Ibahim, 2010)
3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) มา 2.5 กรัม ($w/v = 5.0 \text{ kg/m}^3$) ใส่ลงในบีกเกอร์
4. เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ครั้งละ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 90 นาที
5. นำน้ำเสียที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์จาก pH 2 เป็น 3, 4, 5, และ 7 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ปรับค่า pH เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) มา 0.25 กรัม (w/v = 0.5 kg/m³) ใส่ลงในบีกเกอร์
4. เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer
6. ทำการทดลองเช่นเดิม เปลี่ยนปริมาณของตัวดูดซับจาก 0.25 กรัม (w/v = 0.5 kg/m³) เป็น 0.5 กรัม (w/v = 1.0 kg/m³), 0.75 กรัม (w/v = 1.5 kg/m³) และ 1 กรัม (w/v = 2.0 kg/m³) ตามลำดับ

3.2.6.3 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งปรับค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที
3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.2) ใส่ลงในบีกเกอร์
4. เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาทีแรก ให้เก็บน้ำเสียสีย้อมทุก ๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ทำการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมจาก 100 g/m^3 เป็น 150 g/m^3 , และ 200 g/m^3 ตามลำดับ

3.2.6.4 ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น $100 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ ซึ่งปรับค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด $1,000 \text{ มิลลิลิตร}$

2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบนาที่

3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.2) ใส่ลงในบีกเกอร์

4. เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร โดยในช่วง 60 นาที แรก ให้เก็บสารละลายสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 10 นาที หลังจากนั้นเก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ทุก ๆ 30 นาที จนครบที่เวลา 180 นาที

5. นำน้ำเสียสีย้อมที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

6. ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนอุณหภูมิในการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (33) เป็น 45 และ 55 องศาเซลเซียส

7. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ซ้ำ

3.2.6.5 ศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น $100 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ มาเติมสารละลายเข้มข้น (Stock Solution) ของทองแดง (Cu) ให้มีความเข้มข้นของโลหะ $0.5 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}$ จากนั้นปรับค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด $1,000 \text{ มิลลิลิตร}$

2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบนาที่

3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.2) ใส่ลงในบีกเกอร์

4. เก็บน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร ที่นาที่ที่ 60

5. นำน้ำเสียสีย้อมที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

6. ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนชนิดของโลหะเป็น โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn) และโลหะทั้ง 4 ชนิดรวมกัน

7. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ซ้ำ

3.2.6.6 ศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสี้อมสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียสี้อมสังเคราะห์สีไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83) ที่มีความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาเติมโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.1) ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2. นำมาใส่เครื่องกวนมอเตอร์ ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง ปั่นกวนด้วยความเร็วรอบ 120 รอบนาที

3. ชั่งผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพ (จากการทดลอง 3.2.3) ที่ปริมาณที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.6.2) ใส่ลงในบีกเกอร์

4. เก็บน้ำเสียสี้อมสังเคราะห์ 5 มิลลิลิตร ที่นาที่ที่ 60

5. นำน้ำเสียที่ได้ไปกรองแบบลดความดันจนครบ จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.2.2) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

6. ทำการทดลองเช่นเดิม แต่เปลี่ยนชนิดของสารจากโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2), โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4), โซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) และแคลเซียมไนเตรท $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร

7. ทำการทดลองเหมือนข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ซ้ำ

3.2.7 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ โดยใช้ไอโซเทอร์มของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.6.3 มาวิเคราะห์

3.2.8 ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับน้ำเสียสี้อมสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม โดยศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับ 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo - second order), Elovich model และ Intraparticle diffusion model และหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการอาร์เรเนียส โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.6.3 และ 3.2.6.4 มาวิเคราะห์

3.2.9 ศึกษาทางอุณหพลศาสตร์ ค่าที่ทำการศึกษาคือเอนทาลปี (ΔH°) จากสมการของแวนฮอฟฟ์ โดยใช้ข้อมูลจากการแปรผันอุณหภูมิไปหาค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°) และหาค่าเอนโทรปี (ΔS°) โดยนำข้อมูลจากการทดลอง 3.2.6.4 มาวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวา

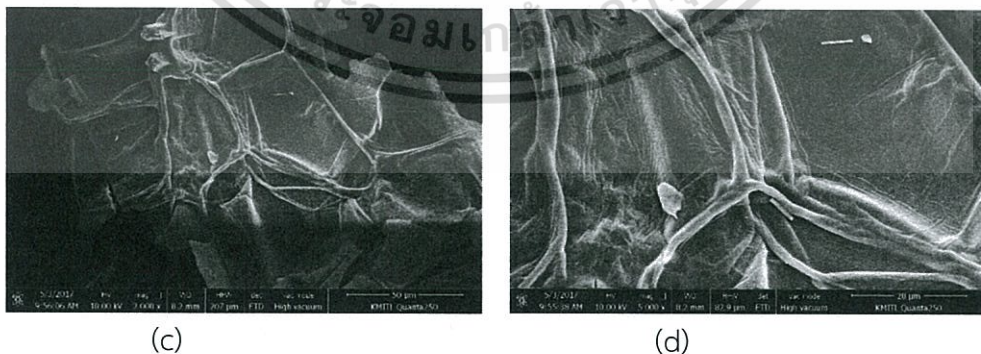
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)

นำผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพและปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ไปปั่นละเอียดเป็นผงให้มีขนาด 500 ไมครอน หรือขนาด 35 mesh จากนั้นนำไปศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ถ่ายภาพพื้นผิวดูดซับก่อนปรับปรุงคุณภาพ, ปรับปรุงคุณภาพแล้วและที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วภายหลังจากการดูดซับสีย้อมไตรเรคต์เรด 83 ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.1



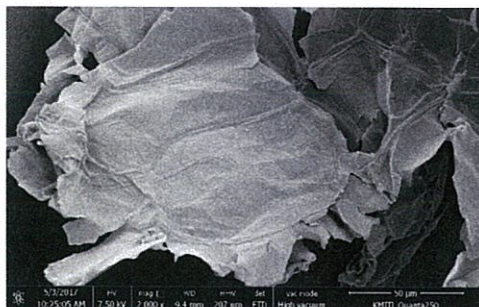
รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา

- (a) ผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 2000 เท่า
(b) ผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ กำลังขยาย 5000 เท่า



- (c) ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพก่อนดูดซับสีย้อมกำลังขยาย 2000 เท่า
(d) ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพก่อนดูดซับสีย้อมกำลังขยาย 5000 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)



(f)

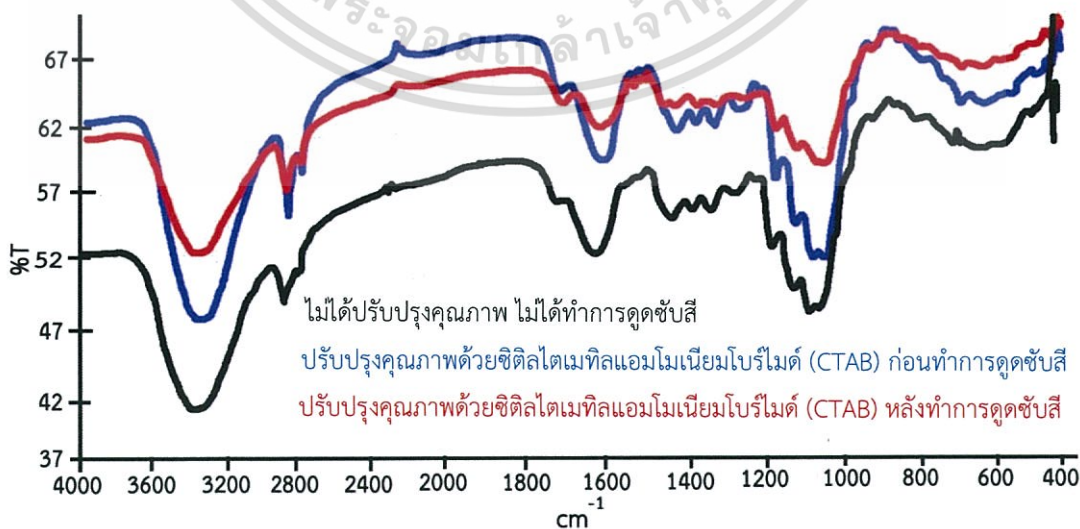
(e) ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพหลังดูดซับสี้อมกำลังขยาย 2000 เท่า

(f) ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพหลังดูดซับสี้อมกำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.1 พบว่าผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีพื้นผิวขรุขระ มีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบ เมื่อนำผักตบชวามาปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ความพรุนของผิวลดลงเล็กน้อย แต่ลักษณะพื้นผิวมีระเบียบมากขึ้น อาจเนื่องมาจากซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เข้าไปเคลือบติดที่ผิวตัวดูดซับ ภายหลังจากการดูดซับสี้อมไดเร็กต์เรด 83 พื้นผิวมีลักษณะเรียบมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลของสี้อมได้แทรกเข้าไปในรูพรุนและดูดยึดกับผิวตัวดูดซับทางกายภาพด้วยแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Sumanjit และคณะ, 2015)

4.1.2 การวิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

นำผักตบชวาที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพ, ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ก่อนการดูดซับและผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) หลังการดูดซับสี้อมไดเร็กต์เรด 83 มาศึกษาหุ่ฟังก์ชันขององค์ประกอบสารโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมของผักตบชวา วิเคราะห์ด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ความยาวคลื่นที่หมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ

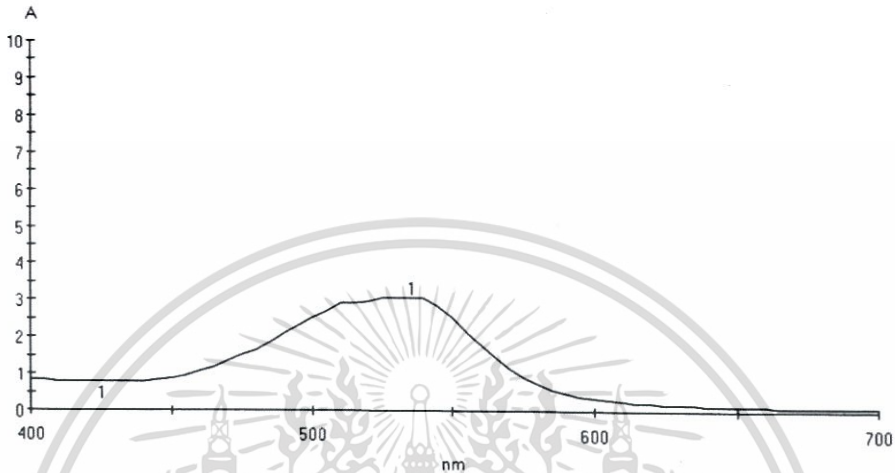
Wavenumber (cm ⁻¹)			หมู่ฟังก์ชัน
ไม่ปรับปรุงคุณภาพ	ปรับปรุงคุณภาพ	ผ่านการดูดซับ	
3406.42	3402.33	3414.09	O-H
2921.64	2923.33	2922.85	C-H
1635.00	1619.04	1630.85	C=C
1424.76	1425.81	1429.95	C-O cellulose
		1458.93	C-H
	1163.28	1155.55	C-N Amine
		1105.31	C-O Alcohol
1058.54	1055.74	1034.51	C-O

จากตารางพบว่า เมื่อนำผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพมาวิเคราะห์สเปกตรัม พบหมู่ฟังก์ชัน O-H (stretching vibration) ที่ความยาวคลื่น 3406.42 cm⁻¹, หมู่ C-H (stretching) ที่ 2921.64 cm⁻¹, หมู่ C=C (stretching) ที่ 1635.00 cm⁻¹, หมู่ C-O (stretching) ที่ 1424.76 cm⁻¹ คือ ส่วนที่เป็นสารประกอบเซลลูโลส (Ibrahim และคณะ, 2015) และหมู่ C-O (stretching of primary alcohol) ที่ 1058.54 cm⁻¹ เมื่อนำผักตบชวามาปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) มีการเพิ่มขึ้นของหมู่ฟังก์ชัน C-N (stretching of Amine) ที่ความยาวคลื่น 1163.28 cm⁻¹ (stretching) ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือ ช่วง 3400 cm⁻¹ (stretching) มีความกว้างของแต่ละพีคไม่เท่ากัน ในช่วง 2900 cm⁻¹ (stretching) พีคแหลมและหดสั้นขึ้น ซึ่งพบว่าการที่พีคหดสั้นขึ้นเนื่องจากหมู่อะลิฟาติกของ C-H (stretching) ลดลง เกิดการแทนที่ของแคทไอออน (H⁺) ของตัวปรับปรุงคุณภาพ (Foroughi-dahra และคณะ, 2015) และในช่วง 1600 cm⁻¹ (stretching) พีคมีลักษณะหดสั้นขึ้นเกิดจากการที่โมเลกุลน้ำของตัวดูดซับลดลง ประจุบวกของสารปรับปรุงคุณภาพเข้าไปแทนที่ของไฮเดรตแคทไอออน (Wang และคณะ, 2008) โดยภายหลังจากการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ของผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วมีหมู่ฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้น 2 หมู่ฟังก์ชันคือ C-H (bending) ที่ 1458.93 cm⁻¹ และหมู่ C-O (stretching of Secondary alcohol) ที่ 1105.31 cm⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

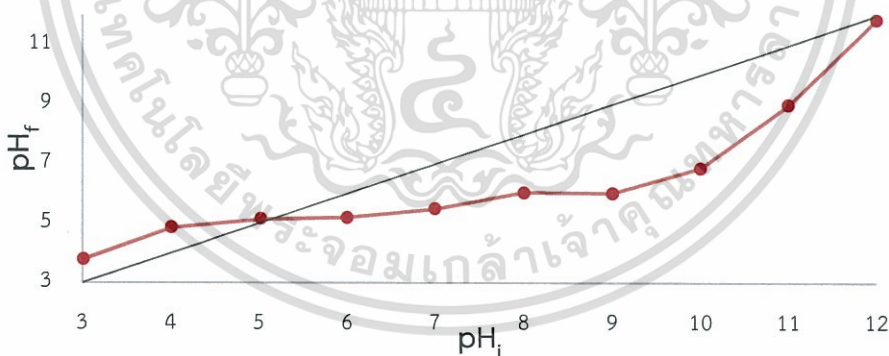
4.2 การศึกษาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 (Direct Red 83)

เมื่อสแกนน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer) ที่ช่วงความยาวคลื่น 200-800 นาโนเมตร โดยพบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ 535 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saien และคณะ (2009)



รูปที่ 4.3 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมไดเร็กต์เรด 83

4.3 การศึกษาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (Point of zero charge, pH_{PZC})



รูปที่ 4.4 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{PZC}) ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

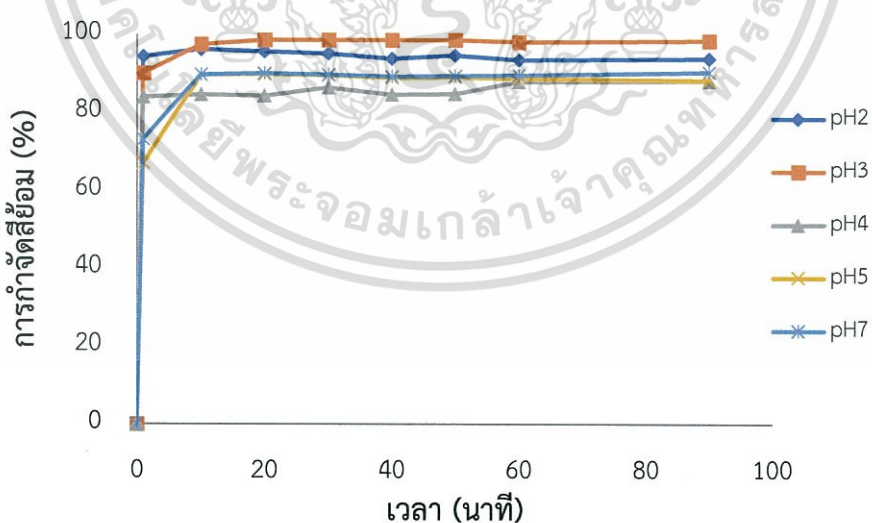
การหาค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (pH_i) และความเป็นกรด-เบสสุดท้าย (pH_f) พบว่าค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์มีค่าเท่ากับ pH 5.15 ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งประจุที่ผิวเป็นศูนย์หมายถึงค่าความเป็นกรด-เบสที่ทำให้ประจุที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเป็นกลาง หรือประจุรวมที่ผิวมีค่าเป็นศูนย์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ngah และคณะ (2012) อธิบายได้ว่า เมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุเป็นบวก และเมื่อความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ ผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุเป็นลบ พิจารณาได้ว่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่าน้อยกว่า pH 5.15 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จะแสดงค่าเป็นบวก ดังนั้นจึงสามารถดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้ามหากความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีค่ามากกว่า pH 5.15 ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จะแสดงค่าเป็นลบ จะเกิดการดูดซับไอออนที่มีประจุลบได้เพียงเล็กน้อย

4.4 การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

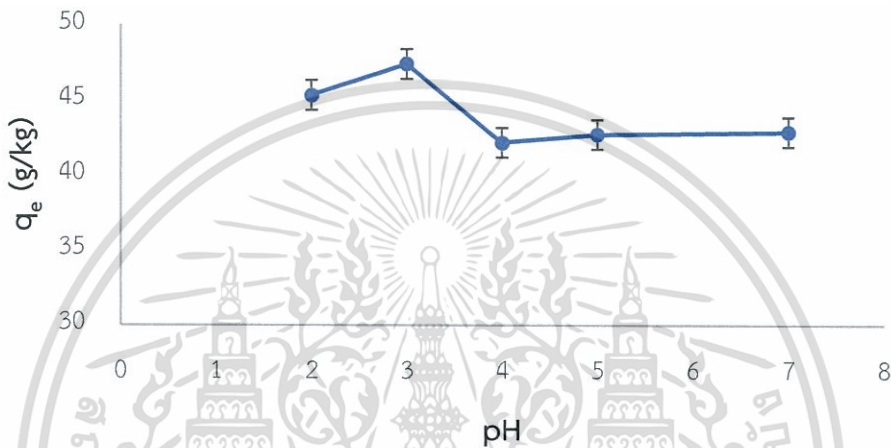
4.4.1 อิทธิพลของค่า pH

การศึกษาผลของ pH ของสารละลายเริ่มต้นในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83 โดยใช้ปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้นดังนี้ 2, 3, 4, 5 และ 7 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ กับค่า pH ของน้ำเสีย ได้ดังรูปที่ 4.5 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) กับค่า pH ของน้ำเสีย ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อน้ำเสียมี pH เท่ากับ 2, 3, 4, 5 และ 7 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m³ ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m³ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นจะค่อย ๆ เกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลในช่วงเวลาที่ 60 เนื่องจากในกระบวนการถ่ายเทมวลระหว่างสารละลายกับตัวดูดซับ ในช่วงแรกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูง เพราะเป็นการแพร่ของสารเข้าสู่ผิวของตัวดูดซับ (film diffusion) แต่ในช่วงหลังเกิดได้ช้ากว่าเพราะเป็นการแพร่ของโมเลกุลเข้าสู่รูพรุน (particle diffusion) และเป็นการดูดซับโมเลกุลของสารเข้าสู่รูพรุน เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า pH จาก 2 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเท่ากับ 93.87, 98.49, 88.21, 88.32, 90.46 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



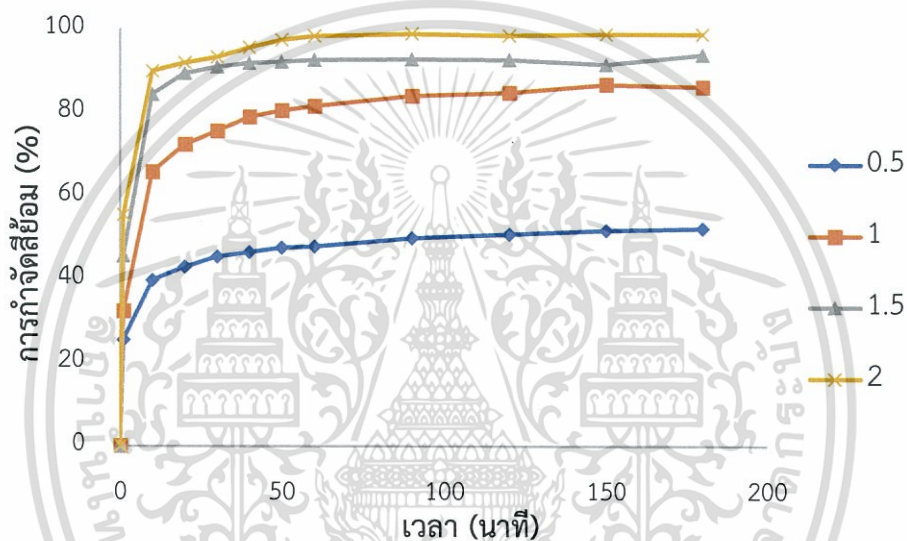
รูปที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) 5.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 เมื่อใช้ pH ของสารละลาย 2, 3, 4, 5 และ 7 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จากการศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับ ในช่วง pH 2-7 พบว่าความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) เพิ่มสูงสุดที่ pH เท่ากับ 3 โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับ (Removal efficiency) ร้อยละ 98.49 ดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 จากค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 5.15 พบว่าที่ pH 3 เป็นสภาวะที่เหมาะสมและมีประจุบวกเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับมาก จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงสุด แต่เมื่อทำการทดลองที่สภาวะ pH 4 ประจุบวกบนผิวของตัวดูดซับมีไม่มากพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับที่ pH 5 และ 7 เมื่อทำการทดลองที่สภาวะ pH 7 อาจเกิดจากประจุลบบนผิวของตัวดูดซับยังมีไม่มากพอที่สภาวะนี้ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างจากการทดลองที่สภาวะ pH 5 ในกรณีของ pH 2 ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้อยกว่า pH 3 อาจเกิดจากสภาวะเป็นกรดที่มากเกินไป จึงทำให้สารปรับปรุงคุณภาพหรือซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซึ่งเป็นตัวทำให้ผิวของตัวดูดซับมีประจุบวกเพิ่มขึ้นถูกทำลายไป จึงทำให้การดูดซับน้อยกว่าที่สภาวะ pH 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

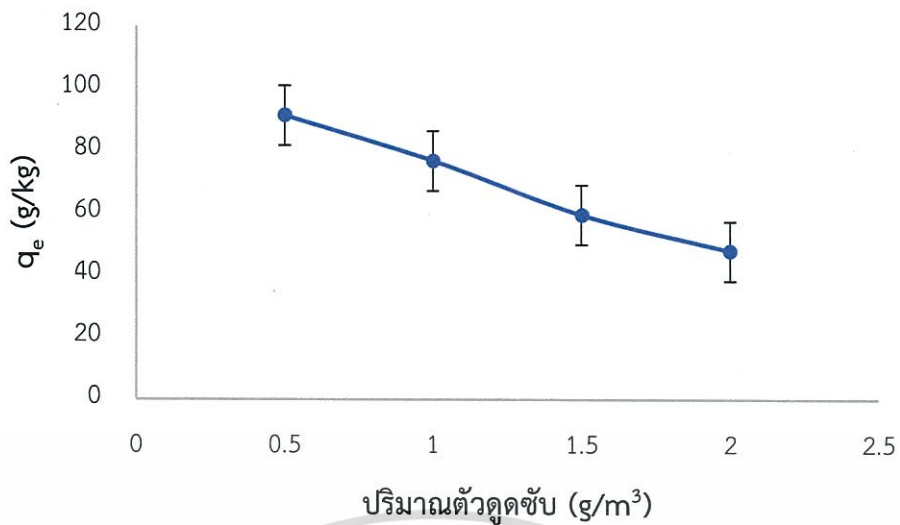
4.4.2 อิทธิพลของปริมาณผักตบชวา

การศึกษาผลของปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณของผักตบชวาดังนี้คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.7 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรัมของสีต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) กับปริมาณตัวดูดซับ ได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 kg/m³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นจะค่อยๆเกิดการดูดซับอย่างช้า ๆ จนเข้าสู่สมดุลในช่วงเวลาที่ 60 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสีย้อมไปยังพื้นที่ผิวของผักตบชวาและผ่านเข้าไปในรูพรุนภายในเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นเข้าสู่สมดุลอย่างช้า ๆ และเมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v จาก 0.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 1, 1.5 และ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จาก 52.19 ไปเป็น 86.16, 93.875 และ 98.84 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสีเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของผักตบชวามากขึ้น โดยพื้นที่ผิวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณผักตบชวา

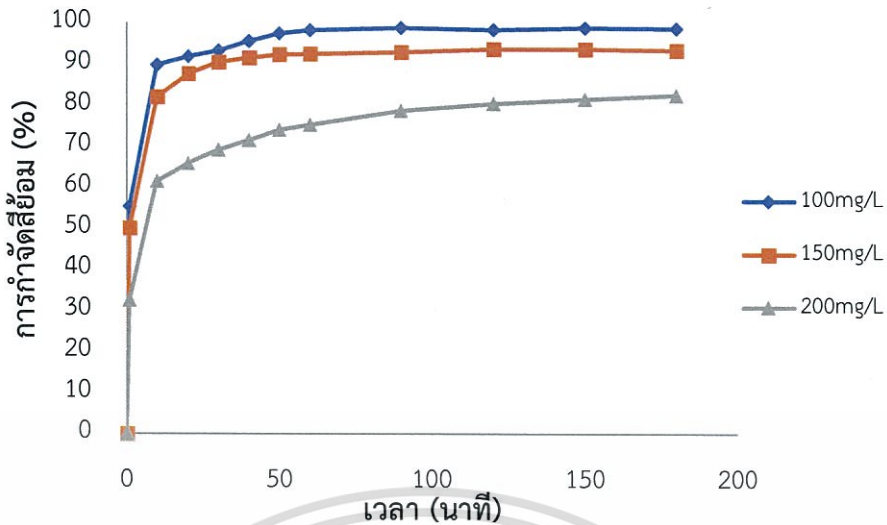


รูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่ภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 kg/m³ และใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อม 100 g/m³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

การเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ลดลง ใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในการทดลองต่อไป เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุด

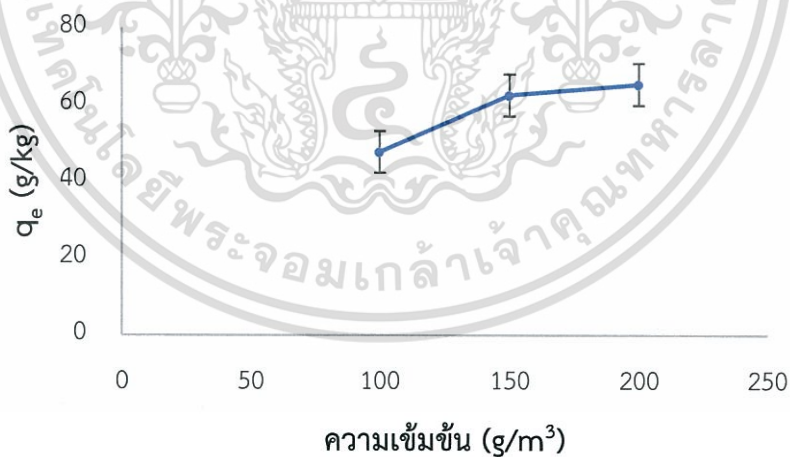
4.4.3 อิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายในการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ใช้ปริมาณผักตบชวา 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมเป็นดังนี้คือ 100, 150 และ 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ กับความเข้มข้นของสารละลาย ได้ดังรูปที่ 4.9 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับน้ำเสียสีย้อม (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) กับความเข้มข้นของสารละลาย ได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100, 150 และ 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจาก 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ไปเป็น 150 และ 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าการเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 98.84, 93.44 และ 82.54 เปรอ์เซ็นต์ ตามลำดับ การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

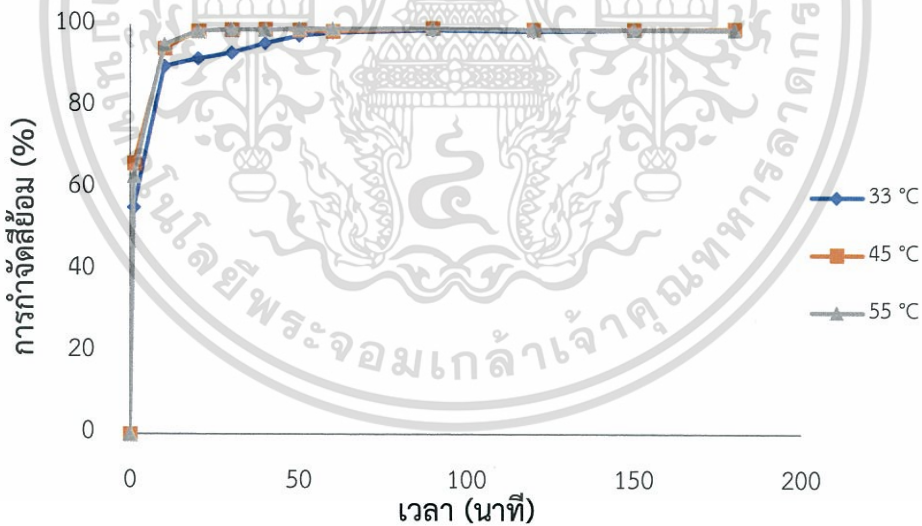


รูปที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m^3 และ ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100, 150 และ 200 g/m^3 pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง

การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม โดยความเข้มข้นน้ำเสียสีย้อม เริ่มต้นตั้งแต่ 100, 150 และ 200 g/m³ สภาวะการทดลองอื่นคงที่คือ pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m³ พบว่า ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ สารละลายเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้กับ การถ่ายเทมวลซึ่งเกิดขึ้นจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสีย้อมบนตัวดูดซับกับความเข้มข้นของ สารละลายทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

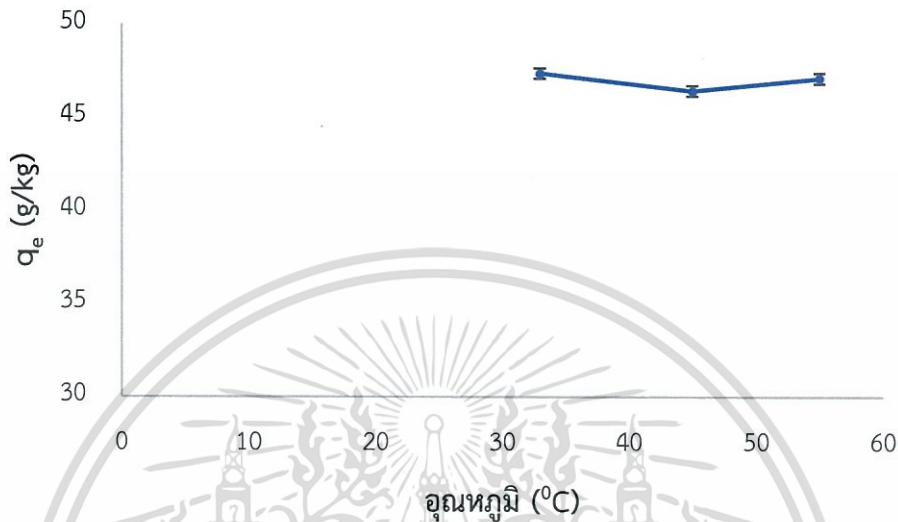
4.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 โดยใช้ปริมาณ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของน้ำสีย้อมเท่ากับ 3 เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำสีย้อมดังนี้ 33 (อุณหภูมิห้อง), 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ กับอุณหภูมิ ได้ดังรูปที่ 4.11 และเขียนกราฟแสดง ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับสีย้อม (กรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ) กับ อุณหภูมิ ได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m³ pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.11 ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้องคือ 33 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การกำจัด สีย้อมสูงสุด 98.84 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 45 และ 55 องศาเซลเซียส เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมอยู่ที่ 99.21 และ 98.84 ตามลำดับ เมื่อทดสอบทางสถิติแล้วพบว่าที่อุณหภูมิต่าง ๆ มี เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



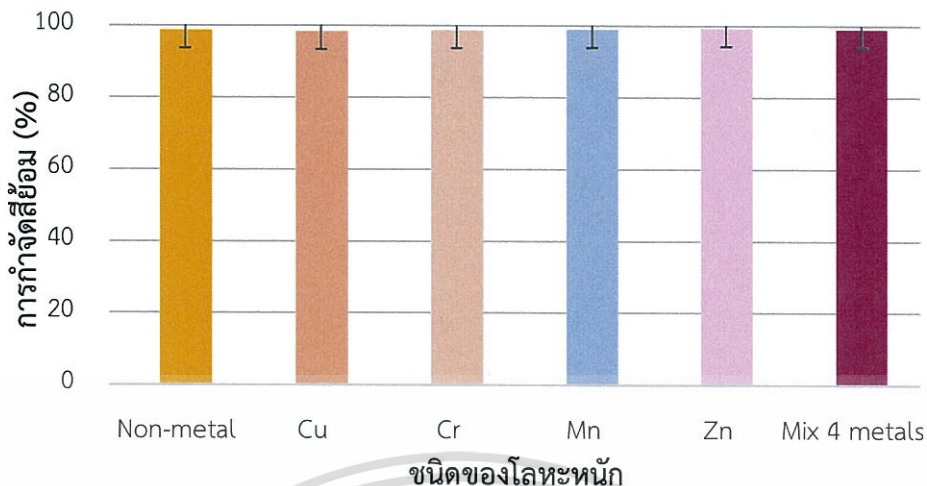
รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกรัมของตัวดูดซับ) ที่สภาวะสมดุล เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตร สีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m^3 และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 pH เท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 33 (อุณหภูมิห้อง), 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.12 พบว่าความสามารถในการดูดซับ (กรัมของสีย้อมต่อกรัมของตัวดูดซับ) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 33 เป็น 45 และ 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากในการทดลอง ใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด อุณหภูมิจึงมีผลต่อการดูดซับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.4.5 อิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83

การศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 โดยใช้ปริมาณ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ $2.0 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น $100 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$ pH ของน้ำสีย้อมเท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเติมโลหะหนักความเข้มข้น 0.5 mg/L ในน้ำสีย้อมดังนี้ Cu, Cr, Mn, Zn และ โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดรวมกัน สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมกับชนิดของโลหะหนัก ได้ดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

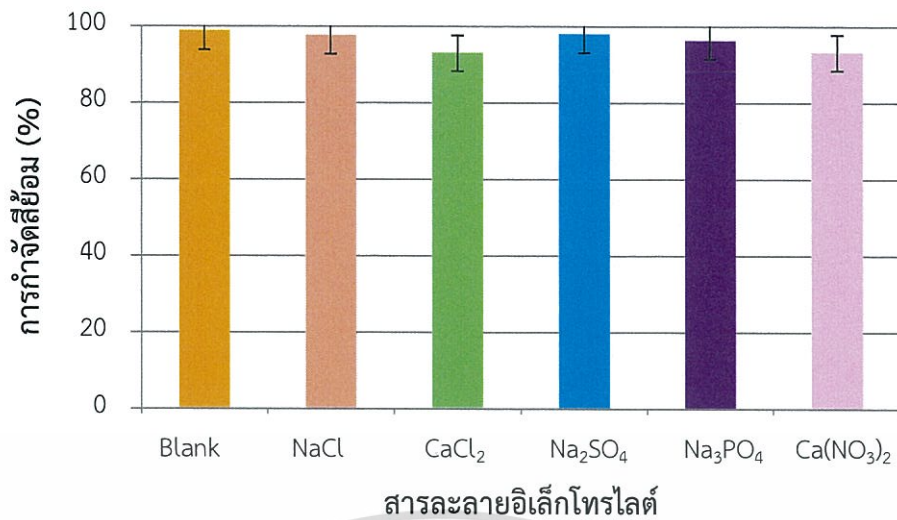


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงอิทธิพลของโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรีทเรด 83

จากรูปที่ 4.13 เมื่อเติมโลหะหนักลงในน้ำเสียสีย้อมเทียบกับที่ไม่เติมโลหะหนักพบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมื่อไม่เติมโลหะหนักอยู่ที่ 98.77 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเติมโลหะหนัก Cu, Cr, Mn, Zn และ โลหะหนักทั้ง 4 ชนิดรวมกันลงไป เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมอยู่ที่ 98.37, 98.75, 99.01, 99.08 และ 99.34 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเติมไอออนของโลหะหนักไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อม สีย้อมไตรีทเรด 83 เป็นสีย้อมประจุลบ (dye) เมื่อเติมไอออนของโลหะซึ่งมีประจุบวกลงไปจึงไม่เกิดการแย่งจับกันระหว่างตัวดูดซับที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวที่เป็นประจุบวกและตัวถูกดูดซับที่มีประจุลบ

4.4.6 อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรีทเรด 83

การศึกษาผลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไตรีทเรด 83 โดยใช้ปริมาณผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของน้ำสีย้อมเท่ากับ 3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใส่อิเล็กโทรไลต์ในสารละลายน้ำเสียสีย้อมความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร ดังนี้ NaCl, CaCl₂, Na₂SO₄, Na₃PO₄ และ Ca(NO₃)₂ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมกับชนิดของ อิเล็กโทรไลต์ ได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83

จากรูปที่ 4.14 เมื่อเติมอิเล็กโทรไลต์ลงในน้ำเสียสีย้อมเทียบกับที่ไม่เติมอิเล็กโทรไลต์พบว่า เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมเมื่อไม่เติมอิเล็กโทรไลต์อยู่ที่ 98.77 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเติมอิเล็กโทรไลต์ NaCl, CaCl₂, Na₂SO₄, Na₃PO₄ และ Ca(NO₃)₂ ลงไปเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมอยู่ที่ 97.64, 93.99, 97.98, 96.29 และ 93.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเติมอิเล็กโทรไลต์ลงในน้ำเสียสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 เป็นผลทำให้การดูดซับสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 ลดลง สีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 เป็นสีย้อมประจุลบ (dye) เมื่อเติมอิเล็กโทรไลต์ลงไปประจุลบของ Cl⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻ และ NO₃⁻ จะเกิดการแย่งจับประจุบวกที่ผิวของตัวดูดซับกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับประจุลบของอิเล็กโทรไลต์ จากผลการทดลองพบว่าเกลือแคลเซียมมีอิทธิพลในการขัดขวางการดูดซับมากกว่าเกลือโซเดียม ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเนื่องจากเติมเกลือแคลเซียมลดลงมากกว่าการเติมเกลือโซเดียม เนื่องจากแคลเซียมมีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูงกว่าโซเดียม จึงทำให้แย่งจับประจุลบของสีย้อมได้ดีกว่าโซเดียม Maurya และคณะ (2006) ศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยเห็ดราที่มีขนาดใหญ่ พบว่าเมื่อเติม อิเล็กโทรไลต์ลงในน้ำเสีย ได้แก่ เกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมื่อเติม CaCl₂ ลดลงมากกว่าการเติม NaCl ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

4.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวา

ทำการทดลองดูดซับสีย้อมที่มีความเข้มข้นตั้งนี้คือ 100, 150 และ 200 g/m³ ใช้ปริมาณผักตบชวา 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH ของสารละลายเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิห้อง นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson ผลการคำนวณแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.1 สมการการดูดซับของ Langmuir

สมการการดูดซับของ Langmuir เป็นแบบจำลองที่เป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง แต่มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น (Monolayer)

สมการการดูดซับของ Langmuir คือ

$$C_e/q_e = (1/K_L q_m) + C_e/q_m$$

โดย C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

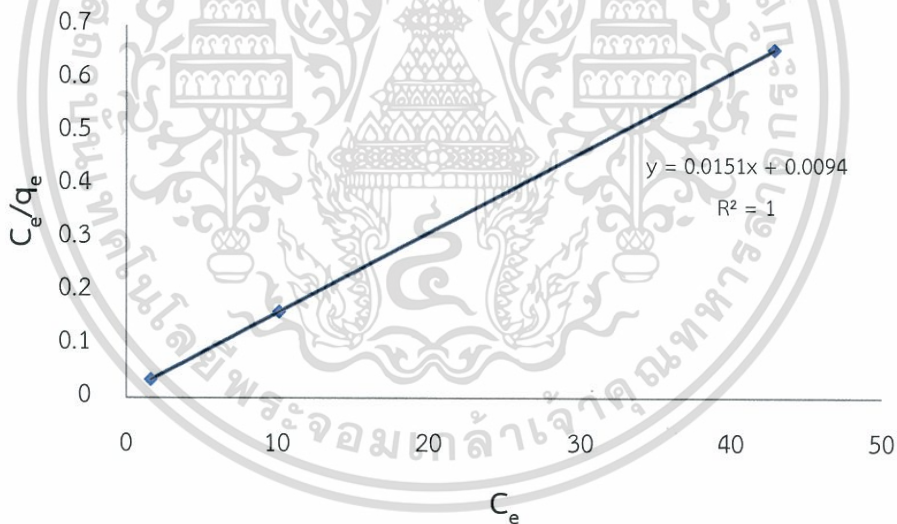
q_e = ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

q_m = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

K_L = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของ Langmuir (L/mg)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และเขียนกราฟได้ดัง

รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e/q_e กับ (C_e)

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.0151 และจุดตัดแกน $y = 0.0094$ สามารถหาค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q_m) ค่าคงที่สมการ Langmuir (K_L) และค่า R_L ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความเข้มข้น} = 1/q_m$$

$$R_L = 1/(1+K_L C_0)$$

$$0.0151 = 1/q_m$$

$$R_L = 1/(1+(1.6064 \text{ L/mg}) \cdot (100 \text{ mg/L}))$$

$$q_m = 66.2252 \text{ mg/g}$$

$$R_L = 0.0062$$

$$\text{จุดตัดแกน } y = 1/K_L q_m$$

$$0.0094 = 1/K_L (66.2252 \text{ mg/g})$$

$$K_L = 1.6064 \text{ L/mg}$$

ค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอร์มว่าสอดคล้องกับการดูดซับแบบ Langmuir หรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่เป็นแบบ Langmuir (Unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (Linear), $0 > R_L < 1$ การดูดซับเป็นแบบ Langmuir (Favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (Irreversible) ซึ่งจากผลการทดลองครั้งนี้มีค่า R_L เป็น 0.0062 สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับที่เป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir Sumanjit และคณะ (2015) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมคองโกเรดโดยใช้ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยสารลดแรงตึงผิวไอออนบวกผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir เช่นกัน

4.5.2 สมการการดูดซับของ Freundlich

สมการการดูดซับของ Freundlich มีสมมติฐานว่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของพื้นผิวมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous) พื้นผิวดูดซับขรุขระ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทั้งกลไกทางกายภาพและเคมี การดูดซับเกิดขึ้นได้หลายชั้น (Hameed และคณะ, 2007) พื้นผิวและพลังงานในการดูดซับจะมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล

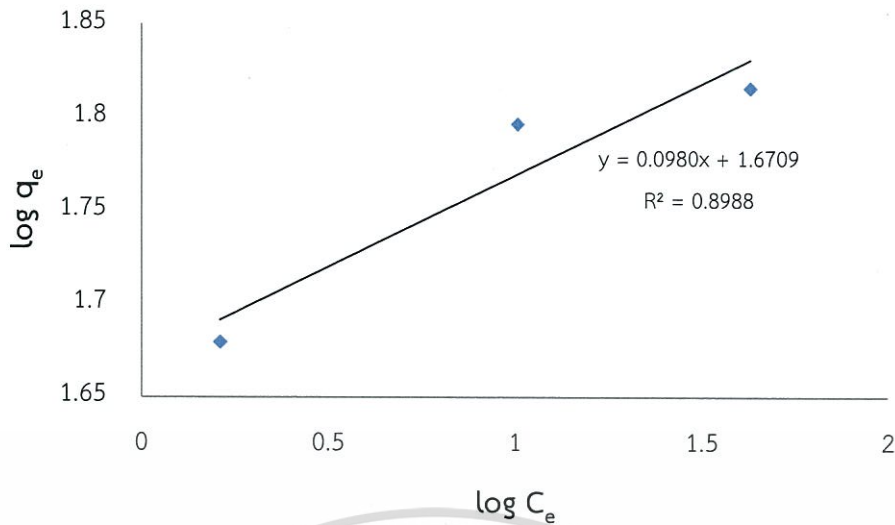
สมการการดูดซับของ Freundlich คือ

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C_e$$

โดย K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (L/g)

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Freundlich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.0980 และจุดตัดแกน $y = 1.6709$ สามารถหาค่าคงที่ $1/n$ และ K_F ได้ดังนี้

ความชัน = $1/n$

$$0.0980 = 1/n$$

$K_F = 46.8705$ L/g ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้สูงพอสมควรเมื่อเทียบกับเมื่อ

คำนวณตามแบบจำลองการดูดซับแบบอื่น ๆ Ibrahim และ Sani (2014) ศึกษาการดูดซับสีคองโกเรดด้วยเปลือกแตงโม ได้ค่า K_F เท่ากับ 37.204 mg/g และค่า $1/n$ เท่ากับ 0.098 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองในครั้งนี้

จุดตัดแกน $y = \log K_F$

$$1.6709 = \log K_F$$

4.5.3 สมการการดูดซับของ Temkin

สมการการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอร์มการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอร์มนี้มีสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรง เมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (adsorbent-adsorbate interactions)

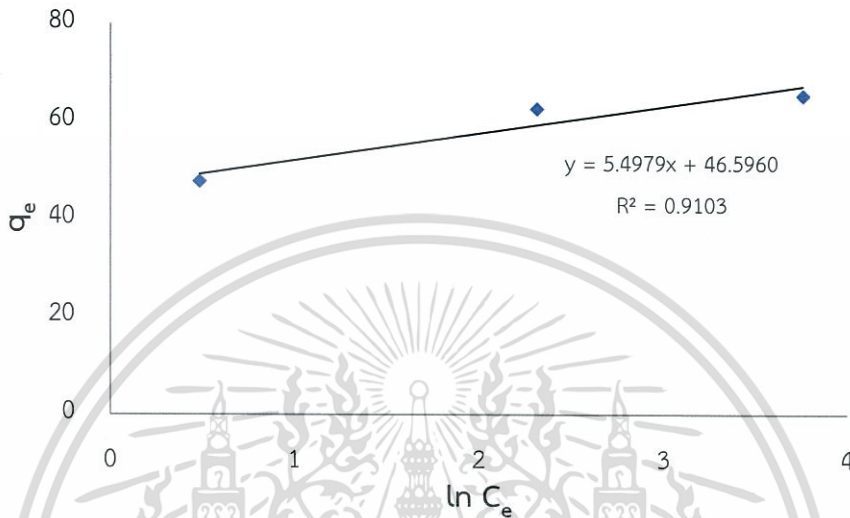
สมการการดูดซับของ Temkin คือ

$$q_e = \frac{RT}{b_0} \ln A + \frac{RT}{b_0} \ln C_e$$

โดย b_0 = ค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol)

A = ค่าคงที่สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (maximum binding energy)

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Temkin และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 5.4979 และจุดตัดแกน $y = 46.5960$ สามารถหาค่าคงที่ b_0 และ A ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความชัน} &= \frac{RT}{b_0} & \text{จุดตัดแกน } y &= \frac{RT}{b_0} \ln A \\ 5.4979 &= \frac{RT}{b_0} & 46.5960 &= 5.4979 \ln A \\ b_0 &= 0.4628 \text{ J/mol} & \ln A &= 0.0085 \text{ L/g} \\ & & A &= 1.0085 \text{ L/g} \end{aligned}$$

Sadaf และคณะ (2014) ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมไตรเร็กต์ไวโอเล็ต 51 จากของเสียประเภทลิกโนเซลลูโลส ผลการทดลองได้ค่า A เท่ากับ 1.15 L/g ซึ่งใกล้เคียงกับค่า A ในครั้งนี้คือ 1.0085 L/g

4.5.4 สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich

สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ไอโซเทอร์มได้เสนอการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับ เป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพที่เกิดบนผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

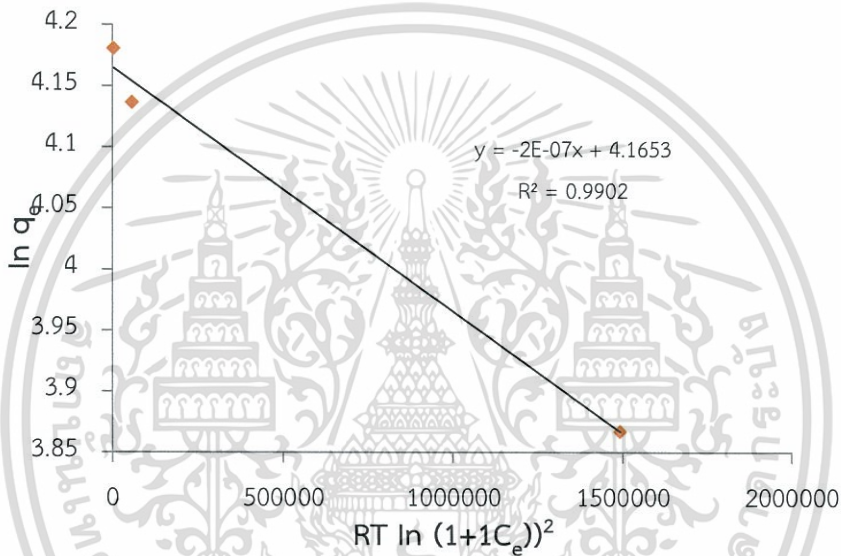
สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich คือ

$$\ln q_e = \ln q_D - K_{DR} [RT \ln(1+C_e)]^2$$

โดย q_D = ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

K_{DR} = ค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (mol^2/kJ^2) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln q_e$ กับ $[RT \ln(1+C_e)]^2$

จากกราฟจะได้ ความชัน = $K_{DR} = 2 \times 10^{-7}$ จุดตัดแกน $y = \ln q_D = 4.1653$

$E = 1/(2K_{DR})^{1/2}$ $q_D = 64.4120 \text{ mg/g}$

$E = 1.5811 \text{ kJ/mol}$

ในการคำนวณพลังงานอิสระจากไอโซเทอร์มการดูดซับของ D-R เมื่อได้ค่า E ระหว่าง 8-16 kJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออน, $E < 8 \text{ kJ/mol}$ จะเป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และเมื่อ $E > 16 \text{ kJ/mol}$ จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี จากผลการทดลองที่ได้คือค่า E เท่ากับ 1.5811 kJ/mol เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ Sumanjit และคณะ (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของพื้นที่ผิวของดอกผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไอออนบวกได้ค่า E เท่ากับ 0.75 kJ/mol ซึ่งแสดงถึงการดูดซับทางกายภาพ และคำนวณค่า q_D เท่ากับ 56.74 mg/g ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.5 สมการการดูดซับของ Sips

สมการการดูดซับของ Sips เกิดจากการมีข้อจำกัดของพฤติกรรมของแบบจำลองการดูดซับระหว่าง Langmuir และ Freundlich

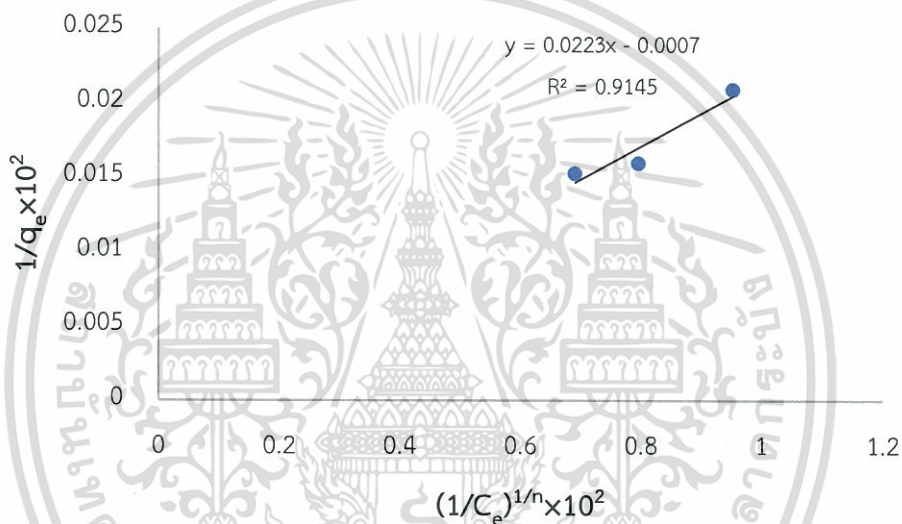
สมการการดูดซับของ Sips คือ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m K_S} \left(\frac{1}{C_e} \right)^{1/n} + \frac{1}{q_m}$$

โดย K_S = ค่าคงที่การดูดซับของ Sips (L/mg)

n = ค่าแสดงการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Sips และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{q_e}$ กับ $\left(\frac{1}{C_e} \right)^{1/n}$

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 0.0223 และจุดตัดแกน $y = -0.0007$ สามารถหาค่าคงที่ K_S และ n ได้ดังนี้

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{q_m K_S}$$

$$\text{จากสมการ } x = (1/C_e)^{1/n}$$

$$0.0223 = \frac{1}{(1428.57)K_S}$$

$$n = 0.189$$

$$K_S = 0.03139$$

แบบจำลองนี้มีเพื่อการจำกัดพื้นที่การดูดซับที่ถูกต้องโดยไม่ต้องมีการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ เมื่อ C_e มีค่าต่ำ ประสิทธิภาพไอโซเทอร์มของ Sips จะลดลงเป็นไอโซเทอร์มแบบ Freundlich ในทางตรงกันข้าม เมื่อ C_e มีค่าสูง จะทำนายว่าเป็นการดูดซับแบบ Langmuir

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) (Foo และคณะ, 2010) เมื่อ n เป็นค่าที่อธิบายลักษณะของระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เมื่อ $n = 1$ สมการของ Sips จะลดลงเป็นสมการ Langmuir ซึ่งอธิบายกระบวนการดูดซับที่เป็นเนื้อเดียวกัน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kumara และคณะ (2014) ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเม็ดสีจากดอกสำหรับด้วยอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) สอดคล้องกับแบบจำลองไอโซเทอร์มของ Sips มีค่า $n = 0.24$ ซึ่งให้เห็นว่าเป็นการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

4.5.6 สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson (R-P)

สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson ซึ่งจะผสมลักษณะแบบจำลองสมดุลดูดซับระหว่าง Langmuir และ Freundlich

สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson คือ

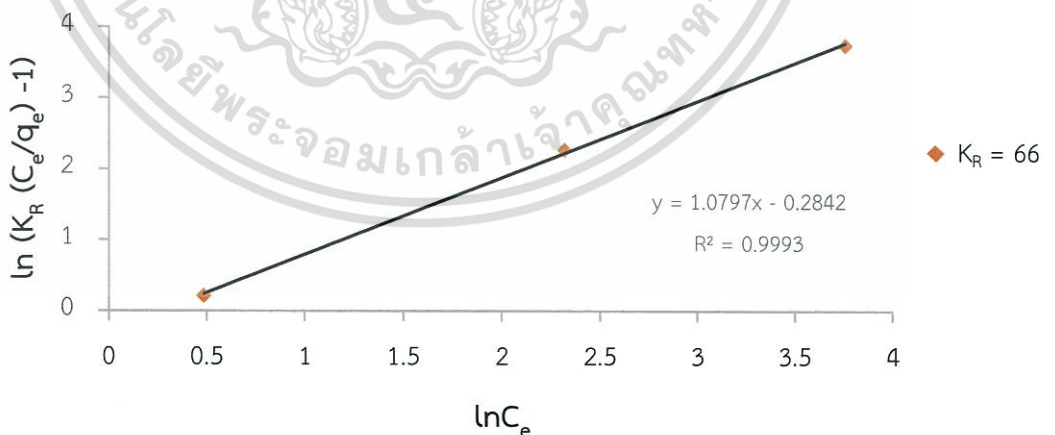
$$\ln \left(K_R \frac{C_e}{q_e} - 1 \right) = b_R \ln C_e + \ln a_R$$

โดย K_R = ปริมาณสูงสุดของสารถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับจากวิธีการลองผิดลองถูก (trial and error) (mg/g)

a_R = ค่าคงที่ไอโซเทอร์ม Redlich-Peterson

b_R = เลขชี้กำลังระหว่าง 0 ถึง 1

นำผลการทดลองมาคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Redlich-Peterson และเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \left(K_R \left(\frac{C_e}{q_e} \right) - 1 \right)$ กับ $\ln C_e$

จากกราฟจะได้ความชัน (Slope) = 1.0797 และจุดตัดแกน $y = -0.2842$ สามารถหาค่าคงที่ K_R , a_R และ b_R ได้ดังนี้

ความชันเมื่อ K_R เป็น 66 = $b_R = 1.0797$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เสกสมรสสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{จุดตัดแกน } y = \ln a_R$$

$$-0.2842 = \ln a_R$$

$$a_R = 1.3287 \text{ mg/L}$$

มีการศึกษามากมายที่บอกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ R-P มีความแม่นยำมากกว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich เนื่องจากเป็นไอโซเทอร์มที่ประกอบด้วย 3 พารามิเตอร์ เมื่อ $b_R = 1$ สมการของ R-P จะเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir และเมื่อ $b_R = 0$ สมการของ R-P จะเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich (Kumara และคณะ, 2014) จากผลการคำนวณพบว่าค่า $b_R = 1.0797$ แสดงว่าการดูดซับสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83 เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Blanes และคณะ (2011) ทำการดูดซับโครเมียม (Cr^{3+}) แบบชีวภาพด้วยสาหร่ายสีเขียว *Polysiphonia nigrescens* ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ R-P พบว่าค่า b_R เท่ากับ 0.92 สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ Langmuir

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Langmuir และสมการแบบจำลองการดูดซับของ Freundlich จากตารางที่ 4.2 พบว่าจากสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 1 ซึ่งมากกว่าสมการแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich แสดงว่าการดูดซับของน้ำเสียสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นการดูดซับแบบ Langmuir ซึ่งแบบจำลองการดูดซับนี้มีสมมติฐานว่าโมเลกุลของสารดูดซับแต่ละโมเลกุลจะดูดซับสารได้เพียงโมเลกุลเดียว โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจะไม่มีแรงกระทำระหว่างกันเองหรือไม่ปฏิกิริยาต่อกันเอง โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับแล้วจะไม่สามารถเกิดการย้ายตำแหน่งการดูดซับได้ ดังนั้นโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจึงมีจำนวนที่แน่นอน และการดูดซับจะเกิดขึ้นโดยมีตำแหน่งที่แน่นอน ค่าความร้อนและพลังงานของการดูดซับในแต่ละตำแหน่งเท่ากันทั้งหมดและมีค่าที่คงที่ ด้วยสมมติฐานดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการดูดซับจะสามารถเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 66.2252 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า K_L เท่ากับ 1.6064 ลิตรต่อมิลลิกรัม ค่า R_L เท่ากับ 0.0062 บ่งบอกชี้ว่าการดูดซับเป็นแบบ Langmuir ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Temkin และ Sips ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับเมื่อคำนวณตามแบบจำลองอื่น ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich เท่ากับ 0.9902 ซึ่งเป็นค่าที่สูง ค่า E ที่ได้บอกได้ว่าการดูดซับทางกายภาพ และมีค่า q_D เท่ากับ 64.41 มิลลิกรัมต่อกรัมซึ่งเป็นค่าที่ได้ใกล้เคียงกับการคำนวณโดยใช้สมการของ Langmuir ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับของ Redlich-Peterson isotherm เท่ากับ 0.9993 และมีค่า b_R เท่ากับ 1.0797 ซึ่งจากผลการทดลองนี้สนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Langmuir

ตารางที่ 4.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson สำหรับการดูดซับสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

	ค่าที่ได้		ค่าที่ได้
Langmuir isotherm		Dubinin-Radushkevich isotherm	
q_{\max} (mg/g)	66.2252	K_{Dr}	2×10^{-7}
K_L (L/mg)	1.6064	q_D (mg/g)	64.4120
R_L	0.0062	E (kJ/mol)	1.5811
R^2	1	R^2	0.9902
Freundlich isotherm		Temkin isotherm	
K_F (L/g)	46.8705	b_0 (kJ/mol)	0.4628
$1/n$	0.0980	A (L/g)	1.0085
R^2	0.8988	R^2	0.9103
Sips isotherm		Redlich-Peterson isotherm	
K_S (L/mg)	0.0314	K_R (mg/g)	66
q_m (mg/g)	1428.57	a_R (mg/L)	1.3287
n	0.189	b_R	1.0797
R^2	0.9145	R^2	0.9993

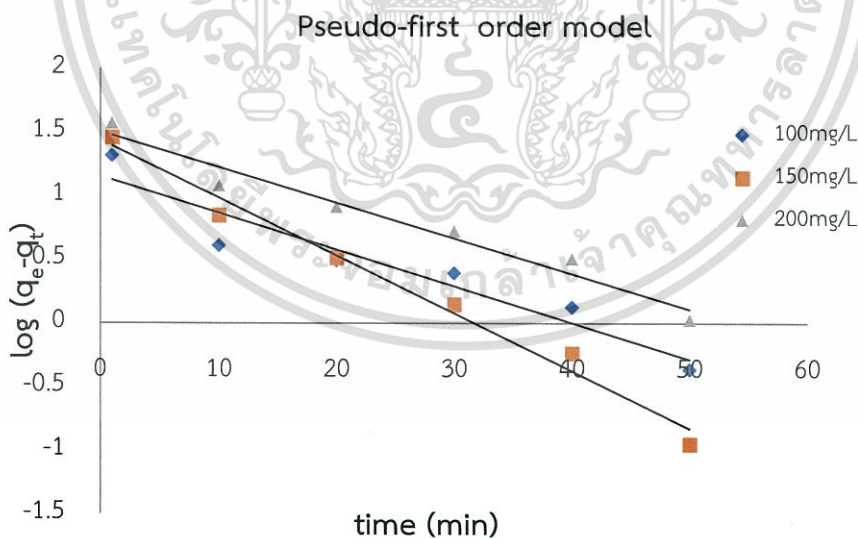
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 จลนศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)

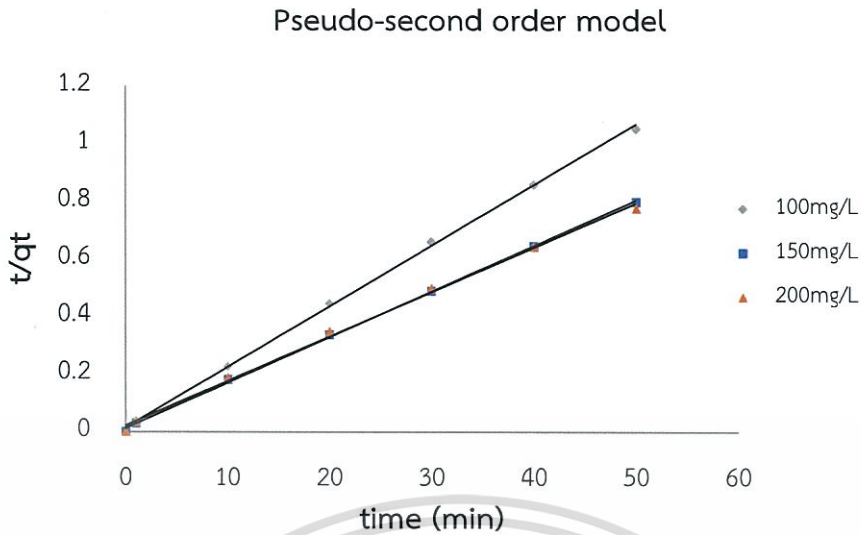
ทำการศึกษากลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) โดยแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ ไตรเร็กซ์เรด 83 และอุณหภูมิในการดูดซับ ใช้แบบจำลองในการพิจารณา 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order Model), แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order Model), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) ผลการศึกษาแสดงได้ดังนี้

4.6.1 แปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อมดังนี้ 100, 150 และ 200 g/m³

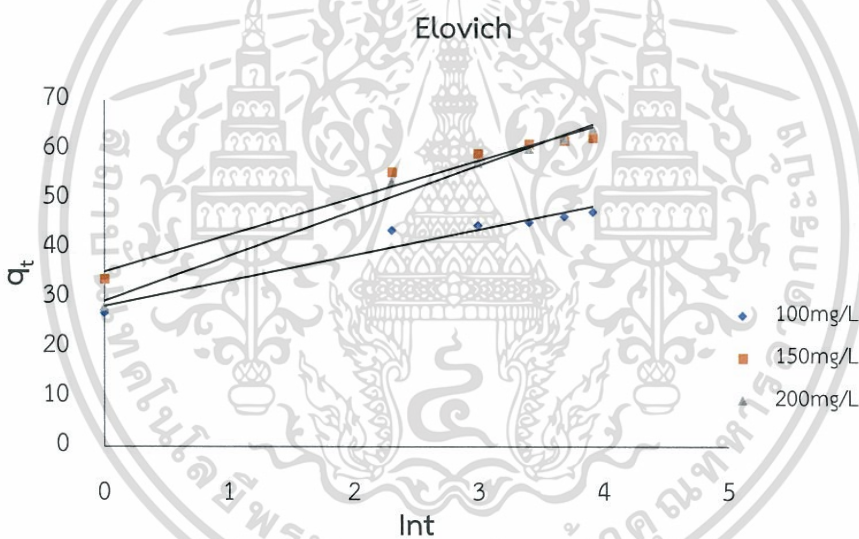
เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสีย้อม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ที่เวลาต่าง ๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ($\log(q_e - q_t)$) กับเวลา (t)

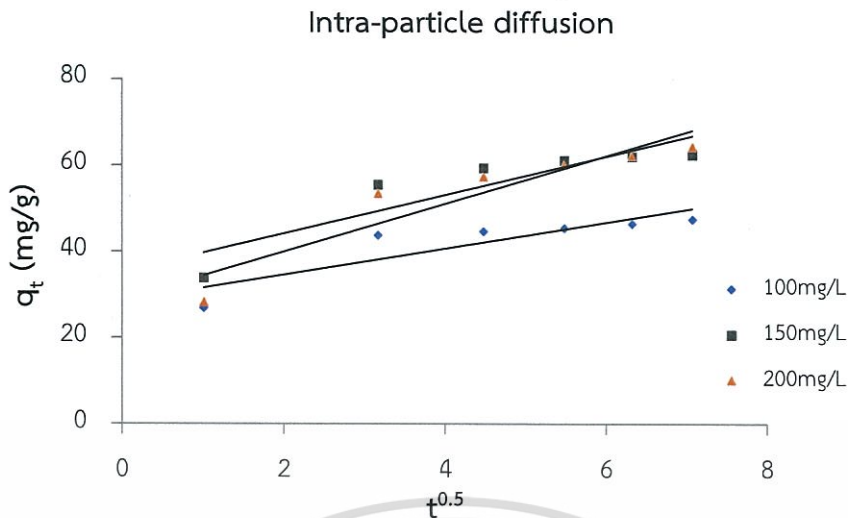


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (t)



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ ล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$)

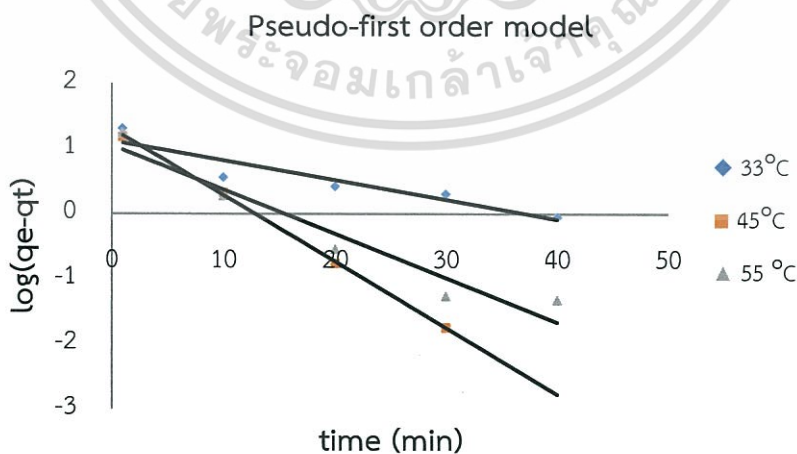
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



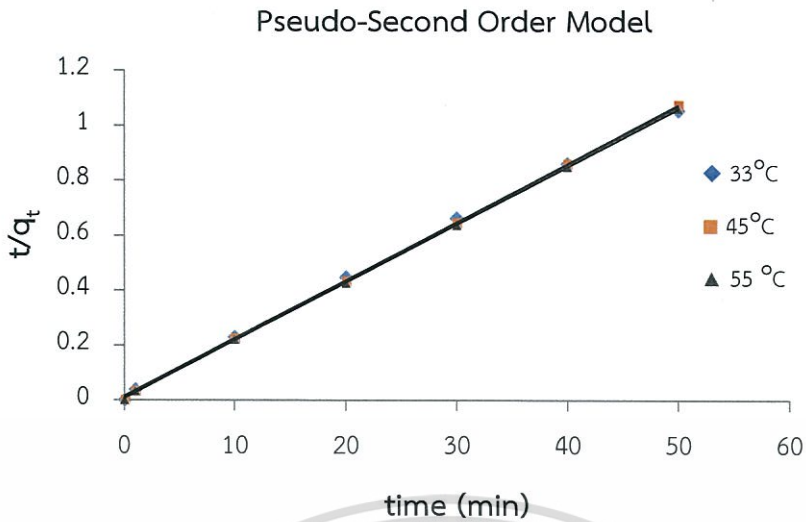
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ $t^{0.5}$

4.6.2 แปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสีย้อมดังนี้ 33°C, 45°C และ 55 °C

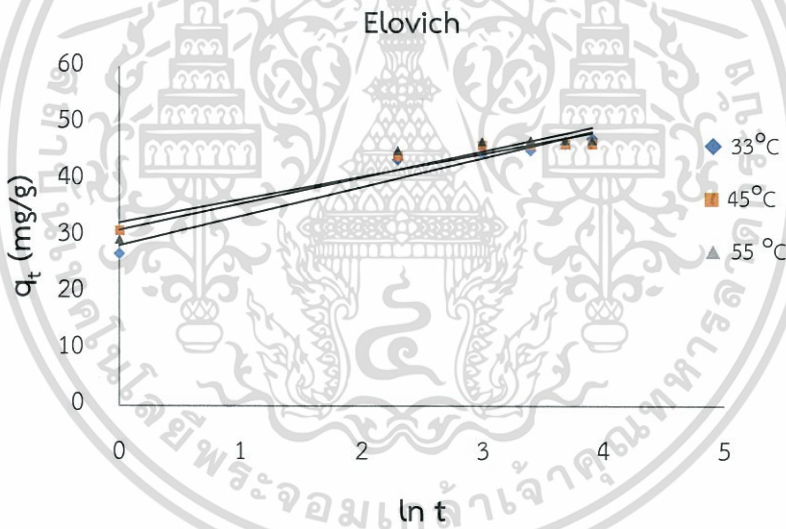
เมื่อทำการทดลองดูดซับโดยแปรผันอุณหภูมิของน้ำเสียสีย้อม นำผลการทดลองที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ที่เวลาต่าง ๆ (q_t) และความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (q_e) ซึ่งหาได้จากการดูดซับที่เวลาที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุดกับเวลา นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการตามแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ และสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.25, 4.26, 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมของความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลลบความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ ($\log(q_e - q_t)$) กับเวลา (t)

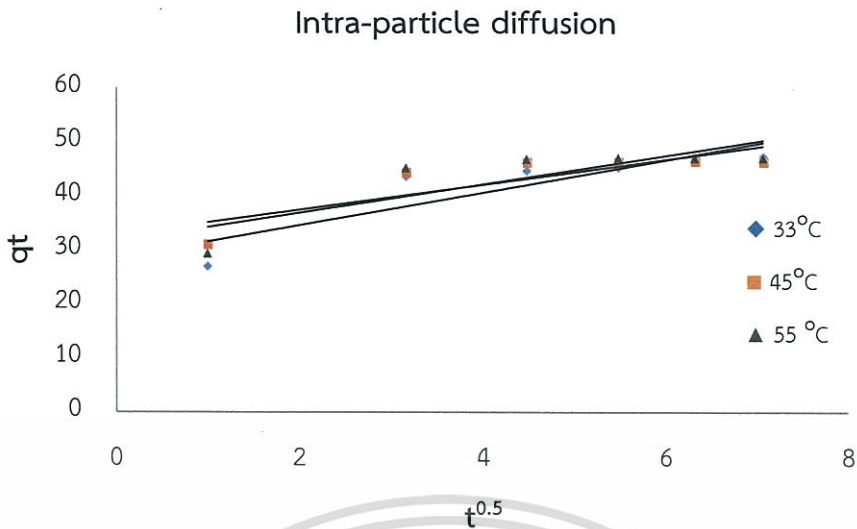


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (t/q_t) กับเวลา (t)



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ ล็อกการิทึมธรรมชาติของเวลา ($\ln t$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาต่อความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (q_t) กับ ($t^{0.5}$)

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first Order Model) อธิบายได้ว่าหากสารตั้งต้นตัวใดตัวหนึ่งในปฏิกิริยามีปริมาณมากเกินไปจนการเกิดปฏิกิริยาจะถือว่าความเข้มข้นของสารนั้นคงที่ตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่าการถ่ายโอนมวลผ่านพื้นที่ผิวภายนอกมีขอบเขตอย่างจำกัด

สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเป็นดังนี้

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - (k_1 / 2.303)t$$

โดย K_1 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับหนึ่ง (1/min)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $k_1/2.303$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\log q_e$

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-Second Order Model) อธิบายได้ว่าการดูดซับเกิดจากแรงทางเคมี ที่เกิดจากการให้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นที่ผิวตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างจำกัด

สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเป็นดังนี้

$$t/q_t = [1/k_2 q_e^2] + [1/q_e]t$$

โดย K_2 = ค่าคงที่อัตราสำหรับแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง (g/(mg.min))

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $[1/q_e]$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $[1/k_2 q_e^2]$

แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich อธิบายการดูดซับทางเคมี ซึ่งสมการนี้
เหมาะสำหรับการพิจารณาการดูดซับที่พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

สมการตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Elovich เป็นดังนี้

$$q_t = 1/\beta \ln(\alpha\beta) + 1/\beta \ln t$$

โดย α = อัตราเร็วในการดูดซับ (mg/g min)

β = สัมประสิทธิ์ของการคายซับ (g/mg)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ $1/\beta$ และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $1/\beta \ln(\alpha\beta)$

แบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) อธิบายถึงอัตราเร็ว
ของการแพร่ของสารเข้าไปในรูพรุน

สมการตามแบบจำลองการแพร่ภายในสารดูดซับ เป็นดังนี้

$$q_t = k_{id}(t)^{1/2} + C$$

โดย k_{id} = ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min)

เมื่อพล็อตกราฟ ความชันของกราฟจะมีค่าเท่ากับ k_{id} และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ C

ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order),
การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสาร
ดูดซับ (Intra-particle diffusion) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y ของกราฟที่ 4.21-
4.28 สามารถสรุปและแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order), การเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion)

	ความเข้มข้น (g/m ³)			อุณหภูมิ (°C)		
	100	150	200	33	45	55
Pseudo first order						
K ₁ (1/min)	0.03	0.05	0.03	0.03	0.10	0.07
q _e (mg/g)	47.82	62.60	65.44	47.39	46.45	47.12
R ²	0.9096	0.9830	0.9597	0.8688	0.9303	0.9995
Pseudo second order						
K ₂ (g/mg min)	0.03	0.01	0.02	0.03	0.07	0.06
q _e (mg/g)	47.39	63.29	64.52	47.39	46.73	47.39
R ²	0.9993	0.9994	0.9973	0.9993	0.9992	0.9992
Elovich						
α (mg/g min)	1268.73	835.63	230.61	1268.73	2038.61	807.73
β (mg/g)	0.1938	0.1333	0.1095	0.1938	0.1905	0.1644
R ²	0.9415	0.9689	0.9867	0.9415	0.9889	0.9810
Intra particle diffusion						
K _{id} (mg/g min)	3.0302	4.4622	5.554	3.0302	2.3385	2.6579
R ²	0.7715	0.8150	0.8676	0.7715	0.7196	0.7005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

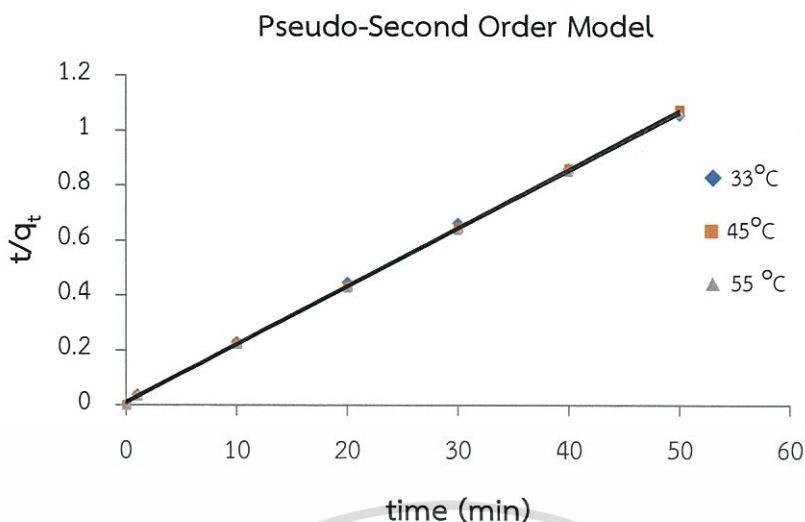
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) พบว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order) ของการดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่างกันและที่อุณหภูมิแตกต่างกัน มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order) การดูดซับสีย้อมไคโรเร็กซ์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จึงมีความสอดคล้องกับแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมี หรือการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันของพื้นผิวผักตบชวาและโมเลกุลของสีย้อม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย ค่า K_2 จะไม่ต่างกันนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย ค่า K_2 จะเพิ่มขึ้น แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน (Endothermic) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q_e) จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย ค่า q_e จะไม่เพิ่มขึ้น งานวิจัยของ Sumanjit และคณะ, (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของพื้นที่ผิวของดอกผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไอออนบวก ผลการทดลองพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง และค่า K_2 มีค่าเท่ากับ 0.00344 g/mg min ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้

จากสมการของ Elovich ค่าคงที่ที่ได้จากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sumanjit และคณะ, 2015 ที่ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของพื้นที่ผิวของดอกผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไอออนบวก จากผลการศึกษากลศาสตร์ของการดูดซับด้วยสมการของ Elovich ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการคายซับ (β) เท่ากับ 0.212 mg/g และอัตราเร็วในการดูดซับ (α) เท่ากับ 498 mg/g min ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองในครั้งนี้

สำหรับสมการการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) มีค่าไม่สูงนักจึงอาจไม่เป็นสมการที่ดีที่สุดที่จะอธิบายกลศาสตร์ของการดูดซับได้ดี

4.7 พลังงานกระตุ้นของการดูดซับน้ำเสียดูดด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order model) ทำให้สามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส ได้ดังรูปที่ 4.29 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราเร็ว (k_2) (g/mg min)	R^2
33	0.03	0.9993
45	0.07	0.9992
55	0.06	0.9992

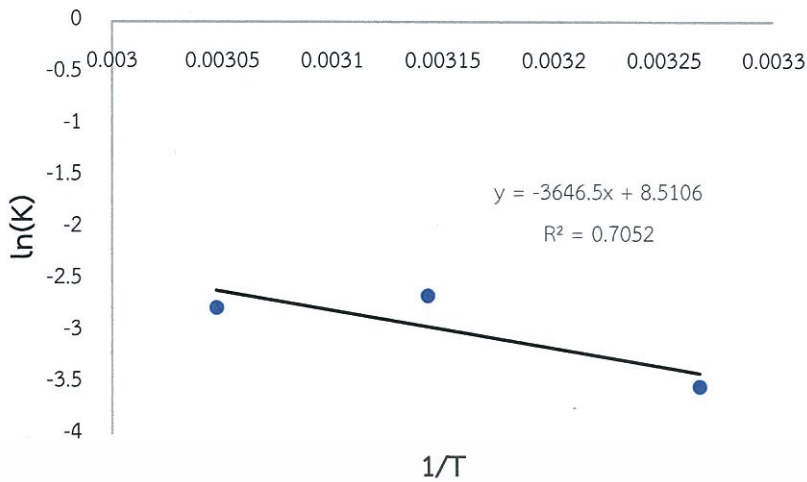
จากตารางที่ 4.4 เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 33 องศาเซลเซียสไปเป็น 45 และ 55 องศาเซลเซียส สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับได้เท่ากับ 0.03, 0.07, 0.06 g/mg.min ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิมิมีผลทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับแบบดูดความร้อน (Endothermic) การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) คือ

$$\ln k = \ln A - E_a/RT$$

โดยที่ความชันของกราฟ คือ $-E_a/R$ และจุดตัดแกน y คือ $\ln A$

เมื่อทำการพล็อตกราฟระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของค่าคงที่อัตราเร็ว ($\ln k$) และหนึ่งส่วนอุณหภูมิ ($1/T$) ทำให้สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียสที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

พลังงานกระตุ้นคือพลังงานที่น้อยที่สุดที่อนุภาคของสารจะต้องได้รับเพิ่มเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ซึ่งพลังงานกระตุ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของสารเคลื่อนที่เร็วขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานมากขึ้นทำให้อุณหภูมิชนกันตำแหน่งที่เหมาะสมมากขึ้น จึงมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี โดยปฏิกิริยาเคมีที่ต้องใช้พลังงานกระตุ้นมากเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ยาก แต่ปฏิกิริยาที่ใช้พลังงานกระตุ้นน้อยเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถบ่งบอกถึงกลไกการดูดซับได้ ถ้าหากค่า E_a อยู่ในช่วง 5-50 kJ/mol เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพ และถ้าค่า E_a อยู่ในช่วง 60-800 kJ/mol จะเป็นกลไกการดูดซับทางเคมี (Deniz, 2011) จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ มีค่าเท่ากับ 30.31 kJ/mol เป็นการดูดซับทางกายภาพและสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งจากการทดลอง จากงานวิจัยของ Han และคณะ (2010) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูโดยใช้ฟางข้าวสาลีที่ปรับปรุงคุณภาพ จากการทดลองพบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับเท่ากับ 24.24 kJ/mol ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง การดูดซับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เป็นกลไกการดูดซับทางกายภาพและเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

4.8 อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับน้ำเสียสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี

การศึกษาการดูดซับน้ำเสียสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เมื่อใช้อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 2.0 kg/m³ และใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m³ ปรับค่า pH เท่ากับ 3 ค่าอุณหพลศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของการดูดซับ (ΔH°) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS°) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) ของการดูดซับสีย้อม

การคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี สามารถหาค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_c) คำนวณได้จากสมการ

$$K_c = q_e/c_e$$

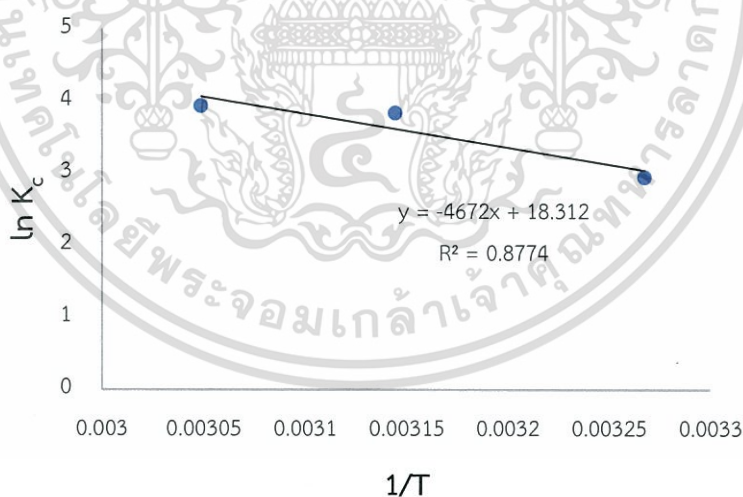
$$\ln K_c = \Delta S^0/R - \Delta H^0/RT$$

ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่สมดุลของการดูดซับ (K_c)
33	19.05
45	46.57
55	51.60

เมื่อนำผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในช่วง 33 ถึง 55 องศาเซลเซียส ของการดูดซับสีย้อม ไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln K_c$ กับ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชัน เท่ากับ $-\Delta H^0/R$ และจุดตัดแกนตั้งเท่ากับ $\Delta S^0/R$



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการแวนฮอฟฟ์ที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

จากความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์สามารถคำนวณค่าเอนทาลปีมาตรฐาน (ΔH^0) เท่ากับ 38.84 kJ/mol ค่าเอนทาลปีมาตรฐานมีค่าเป็นบวก ($\Delta H^0 =$ บวก) แสดงว่าการดูดซับสีย้อม ไตรเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นการดูดซับแบบดูดความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับลดลงจะทำให้การดูดซับลดลง Sumanjit และคณะ (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของพื้นที่ผิวของดอกผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไอออนบวก จากผลการทดลอง ค่า ΔH^0 เท่ากับ 3.95 KJ/mol แสดงให้เห็นว่าผลการดูดซับที่ได้เป็นการดูดความร้อนในธรรมชาติ และจะดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูงเช่นกัน

4.8.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) ของการดูดซับสีย้อม

จากจุดตัดแกน y ที่ได้จากสมการของแวนฮอฟฟ์เท่ากับ $\Delta S^0 / R$ ได้ค่าเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) เท่ากับ 152.25 J/mol.K ซึ่งค่าเอนโทรปีของการดูดซับบ่งบอกถึงความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับ (Absorbent) และตัวถูกดูดซับ (Absorbate) โดยที่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก ($\Delta S^0 = +$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมาก บอกลักษณะการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่ถ้าค่าเอนโทรปีมีค่าเป็นลบ ($\Delta S^0 = -$) แสดงว่ามีความไม่เป็นระเบียบระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับน้อย บอกลักษณะการเกิดพันธะหรือไม่มีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ จากค่าเอนโทรปีที่คำนวณได้มีค่าเป็นบวก แสดงว่า โมเลกุลของสีย้อมที่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีความติดแน่นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ Sumanjit และคณะ (2015) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของพื้นที่ผิวของดอกผักตบชวาโดยใช้สารลดแรงตึงผิวไอออนบวก ผลการทดลองได้ค่า ΔS^0 เท่ากับ 108.4 J/mol.K บอกลักษณะการเกิดพันธะหรือมีแรงกระทำต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้

4.8.3 ค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (ΔG^0) ของการดูดซับ

จากค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปี (ΔH^0) และค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการดูดซับ (ΔS^0) นำมาแทนค่าในสมการ $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$

ค่าพลังงานอิสระมาตรฐาน (ΔG^0) ของการดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -7.7675, -9.5946 และ -11.1171 kJ/mol โดยทั่วไปการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าพลังงานอิสระมาตรฐานอยู่ในช่วง -20 ถึง 0 kJ/mol และการดูดซับทางเคมีจะมีค่าอยู่ในช่วง -80 ถึง -400 kJ/mol (Awwad, 2010) ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ได้มีเท่ากับลบ การดูดซับสีย้อมด้วยผักตบชวาที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ (Spontaneous Reaction) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sengil & Ozacar, (2008) การดูดซับทองแดง (II) ทางชีวภาพจากสารละลายด้วยแทนนินจากต้นไมยราบ ได้ค่า ΔG^0 เท่ากับ -9.38 kJ/mol แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสามารถเกิดได้เองในธรรมชาติ

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์

ΔH^0 (kJ/mol)	ΔS^0 (J/mol.K)	ΔG^0 (kJ/mol)		
		33°C	45°C	55°C
38.8452	152.2546	-7.7675	-9.5946	-11.1171



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผักตบชวาที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีพื้นผิวขรุขระ พื้นผิวไม่มีระเบียบ เมื่อนำผักตบชวามาปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ลักษณะพื้นผิวมีระเบียบมากขึ้น หลังจากการดูดซับสีย้อม พื้นผิวมีลักษณะเรียบมากขึ้น

2. สีย้อมไดเรกต์เรด 83 มีค่าการดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิลสูงสุดที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร

3. ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์มีค่าประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (pH_{pzc}) ที่ pH 5.15

4. ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเมื่อน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 3

5. เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้น (% removal) แต่ค่าความสามารถในการดูดซับ เมื่อคิดเป็นกรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับ (q_e) จะลดลง

6. เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นสารละลายสีย้อม ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะลดลง แต่ค่าความสามารถในการดูดซับ เมื่อคิดเป็นกรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น

7. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการบำบัดสีย้อม ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมและค่าความสามารถในการดูดซับ เมื่อคิดเป็นกรัมของสีย้อมต่อกิโลกรัมของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

8. การเติมไอออนของ Cu, Cr, Mn, Zn ลงในน้ำเสีย จะไม่มีผลต่อการกำจัดสีย้อมประเภทนี้

9. เมื่อใส่เกลือโทรไลต์ชนิด NaCl, CaCl₂, Na₂SO₄, Na₃PO₄ และ Ca(NO₃)₂ ในน้ำเสียสีย้อม ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร พบว่าเกลือแคลเซียมจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมลดลงมากกว่าเกลือโซเดียม

10. ในการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อม โดยพิจารณาสมการการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin, Dubinin-Radushkevich, Sips และ Redlich-Peterson พบว่าการดูดซับในครั้งนี้เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบ Langmuir มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 66.2252 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่า K_L เท่ากับ 1.6064 ลิตรต่อมิลลิกรัม ค่า R_L เท่ากับ 0.0062 จากสมการการดูดซับของ Dubinin-Radushkevich ค่า E ที่ได้บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากสมการการดูดซับของ Redlich-Peterson ค่า b_R เท่ากับ 1.0797 ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ว่า การดูดซับเป็นแบบ Langmuir ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแบบจำลองการดูดซับของ Temkin และ Sips ไม่สูงมากเมื่อเทียบกับเมื่อคำนวณตามแบบจำลองอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ในการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับสีย้อม โดยใช้แบบจำลองในการพิจารณา 4 แบบ คือ แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Pseudo-first order Model), แบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (Pseudo-second order Model), สมการของ Elovich และการแพร่ภายในสารดูดซับ (Intra-particle diffusion) พบว่าการดูดซับในครั้งนี้เป็นไปตามแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง อธิบายได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนทางเคมีหรือการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันของพื้นผิวผักตบชวาและโมเลกุลของสีย้อม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย ค่า K_2 จะไม่ต่างกันนัก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย ค่า K_2 จะเพิ่มขึ้น แสดงว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการแบบดูดความร้อน (Endothermic) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมในน้ำเสีย ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (q_e) จะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำเสีย ค่า q_e จะไม่เพิ่มขึ้น

12. ค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสีย้อมมีค่าเท่ากับ 30.31 kJ/mol จึงเป็นการดูดซับทางกายภาพและสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ

13. ค่า ΔH^0 เท่ากับ 3.95 kJ/mol แสดงให้เห็นว่าผลการดูดซับที่ได้เป็นการดูดความร้อน

14. ΔS^0 มีค่าเป็นบวกคือเท่ากับ 152.25 J/mol.K แสดงว่าโมเลกุลของสีย้อมที่เกิดพันธะต่อกันระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีความติดแน่นของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

15. ΔG^0 เมื่อดูดซับสีย้อมที่อุณหภูมิ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ -7.7675, -9.5946 และ -11.1171 kJ/mol ตามลำดับ แสดงว่าการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ (Spontaneous Reaction) และเป็นการดูดซับทางกายภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของตัวดูดซับด้วยสารเคมีชนิดอื่นเพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไดเรทเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์
2. ควรนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมในโรงงานอุตสาหกรรม
3. ควรศึกษาการเติมสารเคมีที่ใช้จริงในโรงงานฟอกย้อมลงไปในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับ
4. ควรศึกษาการดูดซับสีย้อมแอนไอออนชนิดอื่น ๆ เมื่อเทียบกับสีย้อมไดเร็กต์เรด 83
5. ควรศึกษาการนำตัวดูดซับที่ใช้แล้วมาใช้ให้เป็นประโยชน์หรือทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมวิทยาศาสตร์และบริการ. 2559. **วิธีการบำบัดน้ำเสียจากการฟอกย้อม**. [Online]. Available: <http://www.sptn.dss.go.th/otopinfo/index.php/2014-10-09-08-12-02/article-1/101-2016-11-15-07-10-54> เข้าถึงเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2560.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556. **คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ**. [Online]. Available : http://www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf เข้าถึงเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2560.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. **ปัญหามลพิษจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ**. [Online]. Available: http://www.thaiwasteexchange.net/detail_knowledge.php?kid=37 เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2660.

ชนิษฐา. 2558. **ประเภทของสีย้อม**. [Online]. Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=6&bookID=370&read=true&count=true เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2560.

ชัยยุทธ ช่างสาร และ เลิศณรงค์ ศรีพนม. 2543. **เคมีประยุกต์**. สำนักพิมพ์. เพ็ชรสุกุล, กรุงเทพฯ. ชุติกานันท์ โภคินพลวัฒน์. 2554. **ส่วนประกอบของเซลล์ที่พบเฉพาะในพืช** [Online]. Available: <https://chutikan134.wordpress.com/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2560

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์. 2550. “ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งโรงงานย้อมผ้าดอยตุงโดยใช้ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์ผสมดินเป็นวัสดุเฉพาะปลูกในระบบบำบัดแบบหมุนเวียนน้ำเสีย.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ภาควิชาสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นภา ศิวรังสรรค์. 2555. **ระบบบำบัดน้ำเสียเคมี**. [Online]. Available: <http://www.greenwater.net> นภดล ไชยคา, พีรวรรณ พันธุนาวิน และลัดดา ผดุงทรัพย์. 2542. **เคมี**. 1, แมคกรอ-ฮิล, กรุงเทพฯ. ประรณนา. 2555. **กระบวนการดูดซับ**. [Online]. Available: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/> เข้าถึงเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2560.

ปองพล สุริยะกันธร, ฤทธิชัย อัครราชันย์. 2557. “อิทธิพลของอุณหภูมิและความหนาของชั้นวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ของดอกคาโมมายล์อบแห้ง” วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 45 (3/1) (พิเศษ). 228-231

พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และวีระวัฒน์ คลออุฒิมันตร์. 2543. “การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ” วิศวกรรมลาดกระบัง. 27(4):61-66.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ยุพดี กุศลรัตน์กิตติวงศ์, อุษณีย์ รักษาไชยวรรณ และ โกวิทป์ ปิยะมังคลา. 2558. “จลนศาสตร์และกลไก การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานดัดแปรเรซิน: ผลความเป็นกรด-เบสของสารละลาย” วารสาร มก. 28(4): 63-72.
- รวินิภา ศรีมูล. 2559. “การบำบัดน้ำเสียสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ” วารสาร วิทยาศาสตร์ มข. 4(3): 419-434.
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทป์ ปิยะมังคลา. 2554. “จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้เกล็ดดัดแปร” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 21(2):337-348.
- วิสาชา กุ๋จินดา. 2548. “การใช้ประโยชน์สารลดแรงตึงผิวในการบำบัดน้ำเสีย” วารสารการจัดการ สิ่งแวดล้อม. 1(1):1-15.
- วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 17(1):181-191
- ศุภย์นวัตกรรมวัสดุ. 2557. [Online]. Available: <http://www.mic.eng.ku.ac.th/services.php> เข้าถึงเมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2560.
- ศุภย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ. 2556. [Online]. Available: <https://mtec.or.th/academic-services/mtec-knowledge/1427-> เข้าถึงเมื่อวันที่ 11 กุมภาพันธ์ 2560.
- ศรันยา เกษมบุญญากร, 2555. สัทธิรมชาติ [Online]. Available:http://www.pirun.ku.ac.th/~agrsyp/?page_id=86 เข้าถึงเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2560.
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2555. [Online]. Available: สารละลาย อิเล็กโทรไลต์ <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1451-1?groupid=269> เข้าถึงเมื่อ 24 กุมภาพันธ์ 2560.
- สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2552. อุตสาหกรรมฟอกย้อม. [Online]. Available : https://www.google.co.th/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiL3s_xxa3RAhVKMY8KHTnXCDUQFggYMAA&url=http%3A%2F%2Fscience.buu.ac.th%2Fojs246%2Findex.php%2Fsci%2Farticle%2FviewFile%2F773%2F715&usq=AFQjCNHmYorRDaoWn0zdjZNI54jL4XvQ&sig2=qGf rmudJ43iJLbTI6eol7Q เข้าถึงเมื่อ 27 กุมภาพันธ์ 2560.
- Akl M. Awwad and Ahlam M. Farhan. 2012. “Equilibrium, Kinetic and Thermodynamics of Biosorption of Lead (II) Copper (II) and Cadmium (II) Ions from Aqueous Solutions onto Olive Leaves Powder” *American Journal of Chemistry*. 2(4): 238-244.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Asfaram A, Fathi MR, Khodadoust S and Naraki M. 2014. "Removal of Direct Red 12B by garlic peel as a cheap adsorbent: Kinetics, thermodynamic and equilibrium isotherms study of removal" **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**. 127:415-421.
- Fatih Deniz and Sengul Karaman. 2011. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by pine tree leaves. **Chemical Engineering Journal**. 170:6-74.
- N. Gopal, M. Asaithambi, P. Sivakumar and Vadivel Sivakumar. 2014. "Adsorption studies of a direct dye using polyaniline coated activated carbon prepared from *Prosopis juliflora*" **Journal of Water Process Engineering**. 2(1):87-95.
- Ibrahim and S.Sani. 2014. "Comparative Isotherms Studies on Adsorptive Removal of Congo Red from Wastewater by watermelon Rinds and Neem-Tree Leaves" **Open Journal of Physical Chemistry**. 4:139-146.
- Madrid, Jordan F.; Nuesca, Guillermo M., Abad and Lucille V. 2014. "Amine functionalized radiation-induced grafted water hyacinth fibers for Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cr^{3+} uptake" **Radiation Physics and Chemistry**. 97:246-252.
- N. Gopal, M. Asaithambi, P. Sivakumar and Vadivel Sivakumar. 2014. "Adsorption studies of a direct dye using polyaniline coated activated carbon prepared from *Prosopis juliflora*" **Journal of Water Process Engineering**. 2(1):87-95.
- Nityand Singh Maura, Atul Kumar Mittal, Peter Cornel and Elmar Rother. 2006. "Biosorption of dyes using dead macro fungi: Effect of dye structure, ionic strength and pH" **Bioresource Technology**. 97: 512-521.
- N. T. R. N. Kumara, Nurulhayah Hamdan, Mohammad Iskandar Petra, Kushan U. Tennakoon, and Piyasiri Ekanayake. 2014. "Equilibrium Isotherm Studies of Adsorption of Pigments Extracted from Kuduk-kuduk (*Melastoma malabathricum* L.) Pulp onto TiO_2 Nanoparticles" **Journal of Chemistry**. Hindawi Publishing Corporation.
- Li Wang and Ai qin Wang. 2008. "Adsorption properties of Congo Red from aqueous solution onto surfactant-modified montmorillonite" **Journal of Hazardous Materials**. 160:173-180
- Medhat Ibrahim, Osama Osman, Abdel aziz Mahmoud and Hanan Elhaes. 2015. "Spectroscopic analyses of water hyacinth: FTIR and modeling approaches" **Der Pharma Chemica**. 7(9):182-188.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mohammad Foroughi-dahr, Hossein Abolghasemi, Mohamad Esmaili and Bettina Rasem 2015. "Experimental study on the adsorptive behavior of Congo red in cationic surfactant-modified tea waste" **Process Safety and Environmental Protection**. 95:226-236.
- Patricia Blanes, Luis Sala, Silvia García, Juan González, María Frascaroli, Masafumi Harada, Cong Cong, Yasuhiro Niwa, Cristina Matulewicz, Héctor Prado, Adriana Cortadi and Martha Gattuso. 2011. "Biosorption of Trivalent Chromium from Aqueous Solution by Red Seaweed *Polysiphonia nigrescens*" **Journal of Water Resource and Protection**. 3:832-843.
- Runping Han, Lijun Zhang, Chen Song, Manman Zhang, Huimin Zhu, LiJuan Zhang. 2010. "Characterization of modified wheat straw, kinetic and equilibrium study about copper ion and methylene blue adsorption in batch mode" **Carbohydrate Polymers**. 79:1140-1149.
- Sana Sadaf, Haq Bhatti, Sana Nausheen and Saima Noreen. 2014. "Potential Use of Low-Cost Lignocellulosic Waste for the Removal of Direct Violet 51 from Aqueous Solution: Equilibrium and Breakthrough Studies" **Arch Environ Contam Toxicol**. 66:557-571.
- Sumanjit Kaur, Seema, Rakesh Kumar Mahajan and Vinod K Gupta. 2015. "Modification of surface behavior of *Eichhornia crassipes* using surface active agent: An adsorption study" **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 21:189-197.
- Sushmita Banerjee and M.C. Chattopadhyaya. 2013. "Adsorption characteristics for the removal of a toxic dye, tartrazine from aqueous solutions by a low cost agricultural by-product" **Arabian Journal of Chemistry**. In press.
- Venkat and P.V. Vijay Babu. 2013. "Kinetic and equilibrium studies on the removal of Congo red from aqueous solution using Eucalyptus wood (*Eucalyptus globulus*) saw dust" **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 44:81-88.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83

ก.1 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration curve)

1. นำสารละลายสีย้อมที่ความเข้มข้นเจือจางมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นนำสเปกตรัมที่ได้มาหาค่าความยาวคลื่นที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด
2. เตรียมสารละลายสีที่ความเข้มข้นต่าง คือ 20, 40, 60, 80, 100, 120 และ 140 กรัม/ลูกบาศก์เมตร
3. นำสารละลายสีย้อมที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{\max}
4. นำข้อมูลที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมจะได้กราฟมาตรฐาน

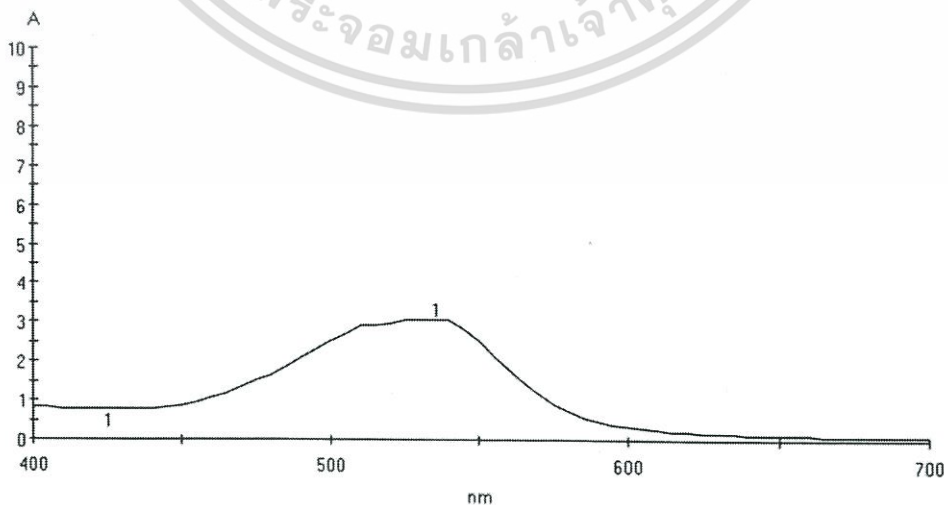
ก.2 วิธีการหาความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม

1. นำสารละลายสีย้อมที่ต้องการหาความเข้มข้น มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ λ_{\max} ของแต่ละความเข้มข้นโดยวิธีการเทียบมาตรฐาน

ก.3 กราฟมาตรฐาน

ความยาวคลื่นแสงที่ให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{\max}) คือ 535 นาโนเมตร

รูปที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83

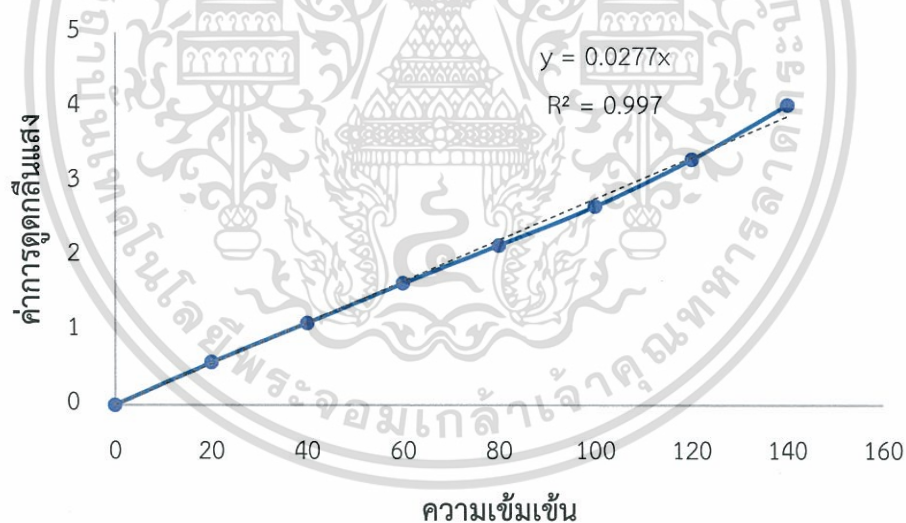


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสารละลายสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83

ค่าความเข้มข้นของสีย้อม (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)
20	0.572
40	1.105
60	1.637
80	2.148
100	2.670
120	3.301
140	4.033

รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83

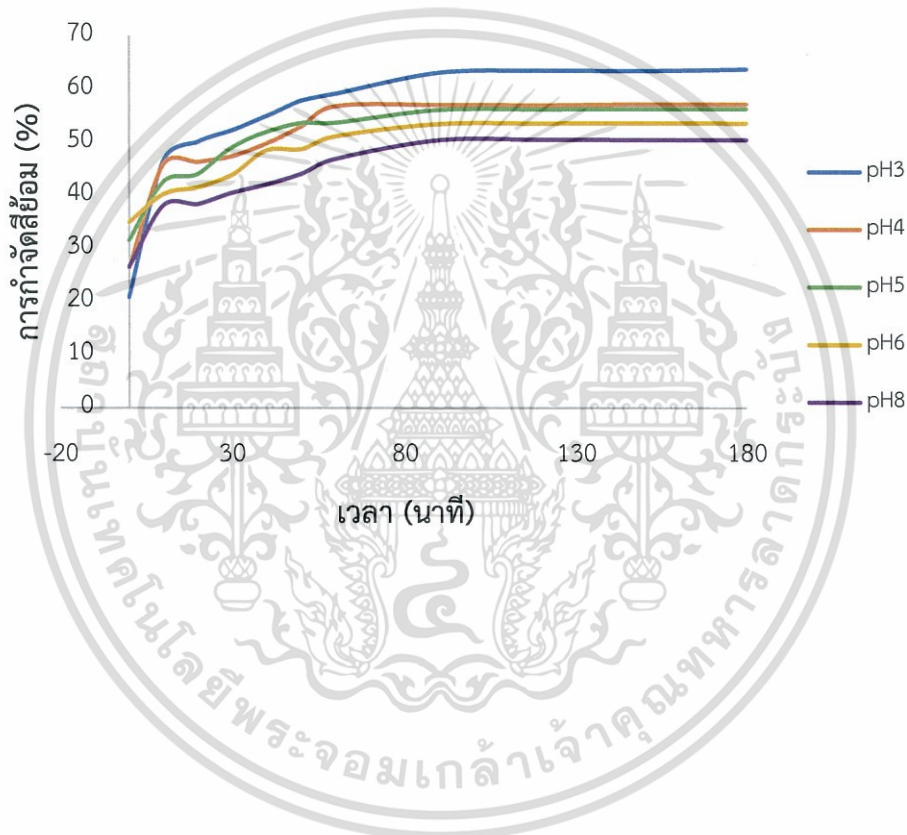


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่ผลต่อการละลาย

รูปที่ ข.1 เปรอ์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ โดยผักตบชวาที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ เมื่อน้ำเสีย มี pH เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 8 อัตราส่วนของน้ำหนักตัวดูดซับต่อปริมาตรสีย้อมสังเคราะห์ (w/v) เท่ากับ 5.0 kg/m^3 ใช้ความเข้มข้นของสีย้อม 100 g/m^3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.1 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 2 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.688	96.9015	
1	0.1484	5.3490	
10	0.0986	3.5563	
20	0.1121	4.0408	
30	0.1285	4.6319	
40	0.1610	5.8044	
50	0.1409	5.0776	
60	0.1726	6.2211	45.3402
90	0.1648	5.9401	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.676	96.4689	
1	0.2620	9.4443	
10	0.0637	2.2960	
20	0.0345	1.2444	
30	0.0359	1.2927	
40	0.0359	1.2927	
50	0.0334	1.2059	
60	0.0455	1.6400	47.4145
90	0.0404	1.4567	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 4 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.659	95.8561	
1	0.4241	15.2890	
10	0.4068	14.6660	
20	0.4164	15.0111	
30	0.3598	12.9639	
40	0.4079	14.7043	
50	0.4031	14.5318	
60	0.3185	11.4836	42.1862
90	0.3135	11.3014	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิลิโคไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6670	96.1445	
1	0.8801	31.7277	
10	0.2723	9.8164	
20	0.2704	9.7491	
30	0.2771	9.9894	
40	0.2952	10.6432	
50	0.2875	10.3644	
60	0.2971	10.7105	42.7170
90	0.3115	11.2297	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 5.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ควบคุม pH เท่ากับ 7 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.665	95.7119	
1	0.7145	25.7561	
10	0.2697	9.7243	
20	0.2610	9.4085	
30	0.2727	9.8296	
40	0.2844	10.2507	
50	0.2793	10.0689	
60	0.2756	9.9349	42.8884
90	0.2533	9.1309	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของผักตบชวาที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.6 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 0.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6670	96.1445	
1	1.9860	71.5947	
10	1.6070	57.9318	
20	1.5270	54.8195	
30	1.4563	52.5003	
40	1.4243	51.3468	
50	1.3987	50.4215	91.4460
60	1.3870	50.0009	
90	1.3373	48.2104	
120	1.3110	47.2611	
150	1.2850	46.3238	
180	1.2750	45.9633	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรรงค์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6990	97.2981	
1	1.8257	65.8147	
10	0.9240	33.3099	
20	0.7473	26.9411	
30	0.6603	23.8048	
40	0.5677	20.4642	
50	0.5287	19.0583	76.8339
60	0.4967	17.9047	
90	0.4303	15.5134	
120	0.4087	14.7323	
150	0.3580	12.9058	
180	0.3743	13.4946	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.8 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 1.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6937	97.1058	
1	1.4303	51.5631	
10	0.4303	15.5134	
20	0.2843	10.2501	
30	0.2413	8.7000	
40	0.2190	7.8949	
50	0.2113	7.6185	59.4772
60	0.2047	7.3782	
90	0.1925	6.9396	
120	0.2010	7.2460	
150	0.2090	7.5344	
180	0.1655	5.9662	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิลิโคไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6980	97.2620	
1	1.2033	43.3798	
10	0.2727	9.8295	
20	0.2183	7.8708	
30	0.1820	6.5610	
40	0.1190	4.2899	
50	0.6090	2.4874	47.8199
60	0.0450	1.6222	
90	0.0293	1.0575	
120	0.0400	1.4420	
150	0.0300	1.0815	
180	0.0313	1.1296	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสี่อ้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.10 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสี่อ้อมไดเรกต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration	
		in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6980	97.2620	
1	1.2033	43.3798	
10	0.2727	9.8295	
20	0.2183	7.8708	
30	0.1820	6.5610	
40	0.1190	4.2899	
50	0.6090	2.4874	
60	0.0450	1.6222	47.8199
90	0.0293	1.0575	
120	0.0400	1.4420	
150	0.0300	1.0815	
180	0.0313	1.1296	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ความเข้มข้น 150 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	3.7550	135.3665	
1	1.8785	67.7193	
10	0.6748	24.3245	
20	0.4638	16.7180	
30	0.3598	12.9689	
40	0.3138	11.3106	
50	0.2880	10.3823	
60	0.2818	10.1570	62.6048
90	0.2610	9.4090	
120	0.2358	8.4987	
150	0.2348	8.4627	
180	0.2465	8.8862	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.12 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 200 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	4.8215	173.8135	
1	3.2520	117.2335	
10	1.8575	66.9623	
20	1.6445	59.2837	
30	1.4840	53.4977	
40	1.3690	49.3520	
50	1.2495	45.0441	
60	1.1910	42.9352	65.4392
90	1.0270	37.0230	
120	0.9440	34.0309	
150	0.8865	31.9580	
180	0.8415	30.3358	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.13 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6980	97.2603	
1	1.2033	43.3790	
10	0.2727	9.8294	
20	0.2183	7.8707	
30	0.1820	6.5609	
40	0.1190	4.2898	
50	0.0690	2.4874	47.3873
60	0.0450	1.6222	
90	0.0293	1.0574	
120	0.0400	1.4420	
150	0.0300	1.0815	
180	0.0313	1.1295	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.14 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 45 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6047	98.8957	
1	0.8810	31.7592	
10	0.1450	5.2271	
20	0.0373	1.3458	
30	0.0287	1.0334	
40	0.0257	0.9253	
50	0.0277	0.9974	46.4500
60	0.0347	1.2497	
90	0.0180	0.6489	
120	0.0237	0.8532	
150	0.0233	0.8411	
180	0.0207	0.7450	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 องศาเซลเซียส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)
0	2.6397	95.1574	
1	1.0087	36.3615	
10	0.1317	4.4765	
20	0.0413	1.4900	
30	0.0283	1.0214	
40	0.0280	1.0094	
50	0.0253	0.9132	47.1229
60	0.0233	0.8411	
90	0.0250	0.9012	
120	0.0280	1.0094	
150	0.0260	0.9373	
180	0.0300	1.0815	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.5 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับสารละลาย
น้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.16 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ
สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)
pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และไม่เติมสารละลายมาตรฐาน
โลหะหนัก

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6580	95.8183	0.0000
60	0.0327	1.1776	98.7728

ตารางที่ ข.17 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ
สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)
pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน
ทองแดง

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6697	96.2389	0.0000
60	0.0433	1.5621	98.3763

ตารางที่ ข.18 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน โครเมียม

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6330	94.9171	0.0000
60	0.0330	1.1896	98.7469

ตารางที่ ข.19 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน แมงกานีส

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6330	94.9171	0.0000
60	0.0330	1.1896	98.7469

ตารางที่ ข.20 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน สังกะสี

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6780	96.5393	0.0000
60	0.0163	0.5888	99.3897

ตารางที่ ข.21 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไคเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายมาตรฐาน ทั้ง 4 ตัว

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6107	94.1120	0.0000
60	0.0240	0.8652	99.0803

ข.6 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ตารางที่ ข.22 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และไม่เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.685	96.7916	0.0000
60	0.0329	1.1860	98.7728

ตารางที่ ข.23 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.5987	93.6794	0.0000
60	0.0607	2.1870	97.6450

ตารางที่ ข.24 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.5987	93.6794	0.0000
60	0.0607	2.1870	97.6450

ตารางที่ ข.25 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมซัลเฟต

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.6077	94.0038	0.0000
60	0.0527	1.8986	97.9802

ตารางที่ ข.26 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายโซเดียมฟอสเฟต

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	2.5170	90.7354	0.0000
60	0.0933	3.3646	96.2919

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.27 ผลของอัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีผลต่อการดูดซับ สารละลายสีย้อมไตรเร็กต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) pH เท่ากับ 3 ความคุมอุณหภูมิที่ 33 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายแคลเซียมไนเตรท

t (min)	Absorbance	Concentration in solution (g/m ³)	Percent Removal
0	1.5757	56.8012	0.0000
60	0.1093	3.9414	93.1275



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลโดยใช้ไอโซเทอร์ม ของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ ค.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวา ที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น (g/m ³)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C ₀) (g/m ³)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลาย (C _e) (g/m ³)	q _e (g/kg)
100	97.2620	1.6222	47.8199
150	135.3665	10.1570	62.6048
200	173.8135	42.9353	65.4392

ภาคผนวก ง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับโดยศึกษาอัตรา การเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับที่สภาวะเหมาะสม

ตารางที่ ง.1 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

ความเข้มข้น (g/m^3)	ความเข้มข้นเริ่มต้น ของสีย้อม (C_0) (g/m^3)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่ เหลือในสารละลาย (C_e) (g/m^3)	q_e (g/kg)
100	97.2620	1.6222	47.8199
150	135.3665	10.1570	62.6048
200	173.8135	42.9352	65.4392

ตารางที่ ง.2 ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมและความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่ใช้ในการหาจลนศาสตร์ของการดูดซับในการดูดซับสารละลายสีย้อมไดเร็กต์เรด 83 ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 6 ควบคุมอุณหภูมิที่ 33, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (K)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (C_0) (g/m^3)	ความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลือ ในสารละลาย (C_e) (g/m^3)	q_e (g/kg)
306	97.2620	2.4874	47.3873
318	93.8974	0.9974	46.4500
328	95.1591	0.9133	47.1229

ภาคผนวก จ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าพลังงานกระตุ้น
จากสมการอาร์เรเนียส (Ea)

ตารางที่ จ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าพลังงานกระตุ้นของการดูดซับ ในการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเร็กซ์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรด้วย ผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร pH เท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 33 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (K)	Concentration in solution (g/m ³)	q _e (g/kg)	1/t
306	2.4874	47.3873	0.0033
318	0.9974	46.4500	0.0031
328	0.9133	47.1229	0.0030

ภาคผนวก ฉ

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของค่าเอนทัลปีมาตรฐาน (ΔH) ตารางที่ ฉ.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการดูดซับในการดูดซับ สารละลายสีย้อมไดเรกต์เรด 83 ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยผักตบชวาที่ปรับปรุงคุณภาพที่อัตราส่วน w/v เท่ากับ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร ควบคุม pH เท่ากับ 3 ควบคุมที่อุณหภูมิ 25, 33, 35, 45 และ 55 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (K)	q_e (g/kg)	K_c	1/t
306	47.3873	19.0507	0.033
318	46.4500	46.5723	0.0031
328	47.1229	51.5987	0.0030

ภาคผนวก ข

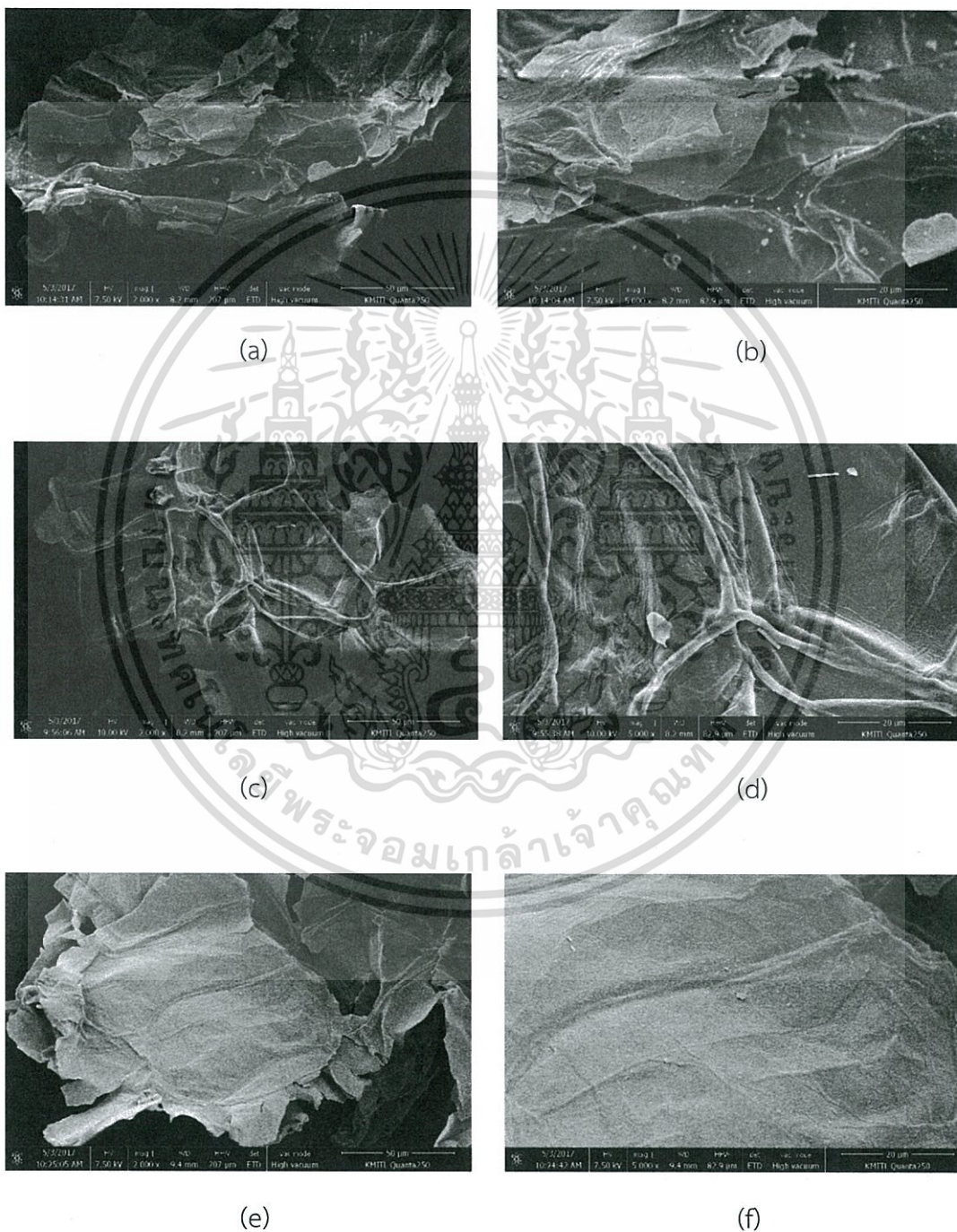
ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาสถานะที่เหมาะสมของค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์
(pH_{pzc})

ตารางที่ ข.1 ค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ไม่ได้ใส่ตัวดูดซับ, ค่า pH เริ่มต้น และ
pH สุดท้ายของการทดลองหาค่าประจุพื้นผิวที่เป็นศูนย์

Blank	Initial pH	Final pH
3	3.01	3.79
4	4.01	4.86
5	5.02	5.14
6	6	5.20
7	7	5.49
8	8	6.04
9	9	6.02
10	10	6.86
11	11	8.99
12	12	11.85

ภาคผนวก ข

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับโดยใช้
เครื่อง Scanning Electron Microscope



รูปที่ ข.1 ลักษณะพื้นผิวของผักตบชวา

(a) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสีย้อม กำลังขยาย 2000 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (b) ผักตบชวาไม่ปรับสภาพ ไม่ได้ดูดซับสี้อม กำลังขยาย 5000 เท่า
- (c) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ก่อนดูดซับสี้อม กำลังขยาย 2000 เท่า
- (d) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ก่อนดูดซับสี้อม กำลังขยาย 5000 เท่า
- (e) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์หลังดูดซับสี้อม กำลังขยาย 2000 เท่า
- (f) ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยซิติลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์หลังดูดซับสี้อม กำลังขยาย 5000 เท่า

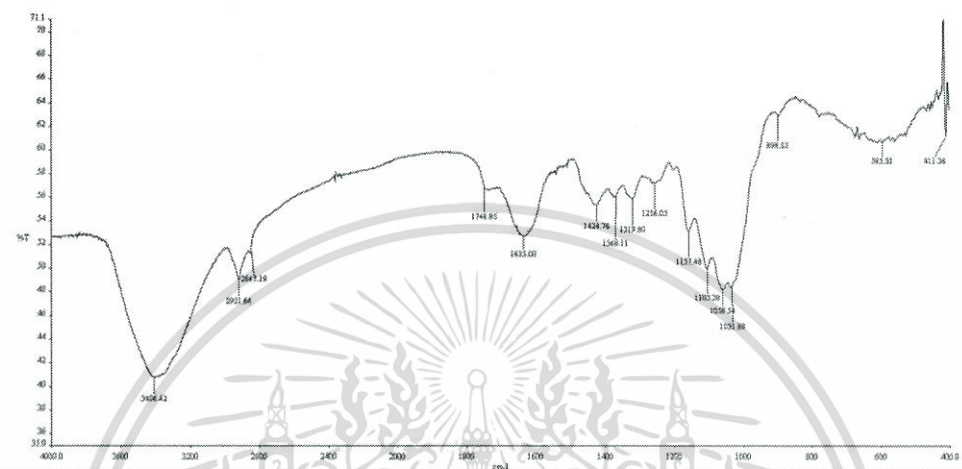


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

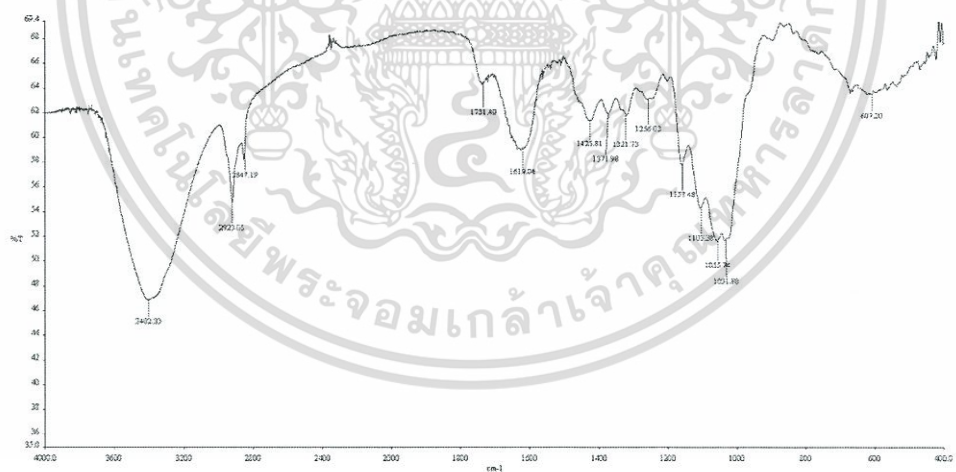
ภาคผนวก ฅ

ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับโดยใช้

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

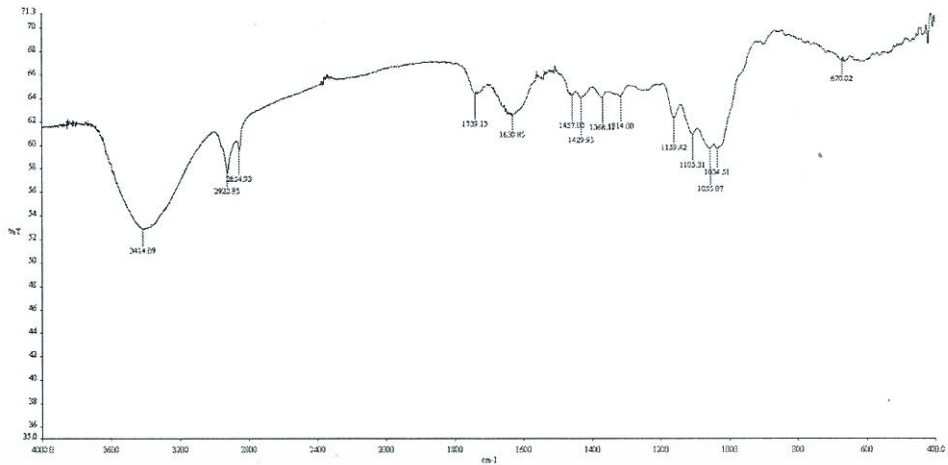


(a)



(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c)

รูปที่ ๓.1 สเปกตรัมของผักตบชวา เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

- (a) ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ ไม่ได้ทำการดูดซับสี
- (b) ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิลิโคนไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ไม่ได้ทำการดูดซับสี
- (c) ปรับปรุงคุณภาพด้วยซิลิโคนไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ หลังทำการดูดซับสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้