

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขานอ้อย

ADSORPTION OF REACTIVE BLACK 5 IN SYNTHETIC
WASTEWATER BY BAGASSE PITH



นางสาวจรรักษ์

นุชนท

นางสาวศรินทิพย์

สุนทรชัย

นางสาวแสงสุรีย์

วาระสิทธิ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขานอ้อย

ADSORPTION OF REACTIVE BLACK 5 IN SYNTHETIC
WASTEWATER BY BAGASSE PITH



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิทยาศาสตร์ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

**ADSORPTION OF REACTIVE BLACK 5 IN SYNTHETIC
WASTEWATER BY BAGASSE PITH**



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

KING MINGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ

การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขานอ้อย

Adsorption of Reactive Black 5 in Synthetic Wastewater by Bagasse Pith

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจรงค์

นุชนท

รหัสนักศึกษา 54051050

นางสาวศรินทิพย์

สุนทรชัย

รหัสนักศึกษา 54051122

นางสาวแสงสุรีย์

วาระสิทธิ์

รหัสนักศึกษา 54051140

ปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. พรรษวรรณ ศรีนาค	
อ. ปัทมา ลิฬหาวงศ์	
ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โครงการพิเศษ	การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขานอ้อย		
	Adsorption of Reactive Black 5 in Synthetic Wastewater by Bagasse Pith		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจรงค์	นุชนท	รหัสนักศึกษา 54051050
	นางสาวศรินทิพย์	สุนทรชัย	รหัสนักศึกษา 54051122
	นางสาวแสงสุรีย์	วาระสิทธิ์	รหัสนักศึกษา 54051140
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำขานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ขานอ้อยที่มีขนาด 35 mesh เพื่อนำมาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ พบว่า pH และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 คือ pH 2.5 และเวลา 30 นาที ตามลำดับ จากข้อมูลการดูดซับที่สภาวะสมดุล สามารถอธิบายได้ ด้วยรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 55.33 %

คำสำคัญ : การดูดซับ, สีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5, ขานอ้อย, การบำบัดน้ำเสีย, วัสดุธรรมชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Adsorption of Reactive Black 5 in Synthetic Wastewater by Bagasse Pith		
Name	Miss Jongrak	Nukuntod	ID. 54051050
	Miss Sarintip	Suntornchai	ID. 54051122
	Miss Sangsuree	Varasit	ID. 54051140
Degree	Bachelor of Science		
Major Program	Environmental Chemistry		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Chompoonut	Chaiyaraksa	

Abstract

The aim of this special project was to study the possibility of using a bagasses waste to adsorb a reactive black 5 dye from a synthetic wastewater. The initial concentration of dye synthetic wastewater was 100 mg/L. The 35 mesh size of the bagasses was used. The optimum adsorption condition was found at pH 2.5 and 30 minutes contact time. The maximum adsorption efficiency was 55.33 %. Langmuir isotherm was best to describe the adsorption.

Keywords : Adsorption, Reactive Black 5, Bagasse Pith, Wastewater Treatment, Natural Materials

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆเป็นอย่างดี คณะผู้ทำวิจัยโครงการพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยกรุณาดูแลเอาใจใส่ ให้ความรู้ ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนติดตามผลการทำงานและตรวจสอบหาแนวทางการแก้ไขข้อบกพร่องอันเป็นประโยชน์ ทำให้โครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ผศ.พรพรพรรณ ศรีนาค และอาจารย์ปัทมา ลิฬหาวงศ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบโครงการพิเศษ และช่วยชี้แนะข้อบกพร่องพร้อมทั้งแนวทางการแก้ไข รวมถึงตรวจสอบและคิชมผลงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม เจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมีคณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ และขอขอบพระคุณ บริษัท วินนิแม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ ผงสีซ็อมรีแอกทีฟ แบบล็ค 5 จนทำให้โครงการพิเศษนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาโดยตลอด และขอบคุณทุกๆคนในครอบครัวที่ให้ความรักความเข้าใจ คอยห่วงใย ดูแล และเป็นกำลังใจในการทำงานเสมอมาจนทำให้คณะผู้ทำโครงการพิเศษประสบความสำเร็จในชีวิต รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆพี่ๆในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกท่าน และถือโอกาสนี้กราบขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความกรุณาให้กำลังใจให้คำปรึกษาคำแนะนำที่ดี และอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
นิยามศัพท์	X
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สีย้อม	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดของสีย้อม	4
2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม	6
2.1.3 สีย้อมรีแอคทีฟ	11
2.1.4 ความเป็นพิษของสีย้อม	12
2.1.5 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	13
2.1.6 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม	14
2.1.7 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม	15
2.1.8 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม	15
2.2 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม	16
2.3 วิธีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย	17
2.4 กระบวนการดูดซับ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 หลักการดูดซับ	20
2.4.2 ประเภทของการดูดซับ	21
2.4.3 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว	21
2.4.4 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล	22
2.4.5 ประเภทของตัวดูดซับ	23
2.4.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	23
2.4.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับหรือไอโซเทอมของการดูดซับ	25
2.5 องค์ประกอบทางเคมีของพีช	27
2.5.1 เซลลูโลส	28
2.5.2 เฮมิเซลลูโลส	29
2.5.3 ลิกนิน	30
2.5.4 เพคติน	31
2.6 ชานอ้อย	32
2.7 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ให้เส้นใย	36
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	42
3.1.1 สารเคมี	42
3.1.2 อุปกรณ์	42
3.2 วิธีการทดลอง	43
3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ	43
3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสี่ข้อมสังเคราะห์	43
3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับ	43
3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสี่ข้อม	44
3.2.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับ	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีข้อม และการหลังการดูดซับสีข้อม	47
4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีข้อม และการหลังการดูดซับสีข้อม	49
4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบดส์ 5	51
4.4 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ	55
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	57
5.2 ข้อเสนอแนะ	57
เอกสารอ้างอิง	58
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณสีข้อม	61
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการทดลอง	64
ภาคผนวก ค ตารางแสดงการหาค่าไอโซเทอม	67
ภาคผนวก ง กราฟแสดงการหาค่าไอโซเทอม	69
ภาคผนวก จ รูปการเตรียมชานอ้อย	71
ภาคผนวก ฉ รูปการเตรียมสารละลายชุดควบคุม และ Blank	73
ภาคผนวก ช รูปเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	75
ภาคผนวก ซ รูปผลของชานอ้อยในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อม รีแอกทีฟ แบดส์ 5 ที่ค่า pH ต่างๆ	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	สูตร โครงสร้างสี่ข้อม Reactive black 5	12
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	26
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ mX ฟรุนดิช	27
รูปที่ 2.4	โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พืช	27
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของเซลล์ลูไลส	28
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของเฮมิเซลล์ลูไลส	29
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของลิกนิน	30
รูปที่ 2.8	โครงสร้างทางเคมีของเพคติน	31
รูปที่ 4.1	(ก) ลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยก่อนการดูดซับสี่ข้อม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)	48
	(ข) ลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยหลังการดูดซับสี่ข้อม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)	48
รูปที่ 4.2	(ก) สเปกตรัมของชานอ้อยก่อนการดูดซับสี่ข้อม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	50
	(ข) สเปกตรัมของชานอ้อยหลังการดูดซับสี่ข้อม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	50
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH	51
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับของชานอ้อย	52
รูปที่ 4.5	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนัของชานอ้อยในน้ำเสียสี่ข้อมที่มีความเข้มข้น 50 mg/L	54
	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนัของชานอ้อยในน้ำเสียสี่ข้อมที่มีความเข้มข้น 100 mg/L	54
	(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนัของชานอ้อยในน้ำเสียสี่ข้อมที่มีความเข้มข้น 150 mg/L	54
	(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนัของชานอ้อยในน้ำเสียสี่ข้อมที่มีความเข้มข้น 200 mg/L	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 (ก) รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 แบบ Langmuir	56
(ข) รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 แบบ Freundlich	56
รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5	62
รูปที่ ก-2 ภาพการสแกนหาความยาวคลื่นเด่น	63
รูปที่ ก-3 กราฟการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5	63
รูปที่ ง-1 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของชานอ้อย	70
รูปที่ ง-2 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของชานอ้อย	70
รูปที่ จ-1 ชานอ้อย	72
รูปที่ จ-2 ชานอ้อยที่ผ่านการล้างแล้ว	72
รูปที่ ฉ-1 ผงสีรีแอกทีฟ (Reactive Black 5)	74
รูปที่ ฉ-2 น้ำกลั่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ	74
รูปที่ ฉ-3 ปรับค่า pH ให้มีค่าเท่ากับ 2.5	74
รูปที่ ช-1 ตู้อบ (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert	76
รูปที่ ช-2 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง	76
รูปที่ ช-3 เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp	77
รูปที่ ช-4 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 ยี่ห้อ Sanyo	77
รูปที่ ช-5 เครื่องกรองสูญญากาศ (Suction pump) รุ่น Aspirator A-3s ยี่ห้อ Eyela	78
รูปที่ ช-6 เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jenway	78
รูปที่ ช-1 การเปรียบเทียบการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ของชานอ้อยที่ pH ต่างๆ	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ประเภทของสีย้อม จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี	11
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบ โครงสร้างทางกายภาพของชานอ้อย	37
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย	38
ตารางที่ 4.1 ค่า R^2 ไอโซแบบ Langmuir และ Freundlich ของชานอ้อย	56
ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ	62
ตารางที่ ก-2 ค่าการดูดกลืนแสง	63
ตารางที่ ข-1 การศึกษาหาค่า pH ที่เหมาะสม	65
ตารางที่ ข-2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม	65
ตารางที่ ข-3 การศึกษาหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน	66
ตารางที่ ค-1 การหาไอโซเทอมแบบ Langmuir	68
ตารางที่ ค-2 การหาไอโซเทอมแบบ Freundlich	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามศัพท์

ศัพท์ต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้

mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg	มิลลิกรัม
ml	มิลลิลิตร
g	กรัม
UV-vis	UV-visible spectrophotometer
N	นอร์มัล
q_e	ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
X	ปริมาณของตัวถูกดูดซับ
m	ปริมาณตัวดูดซับ
C_e	ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
k	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
n	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหามลพิษทางน้ำที่เกิดจากการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมได้เพิ่มความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมฟอกย้อมที่มีการใช้น้ำ และสารเคมีเป็นจำนวนมาก ทำให้ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นั่นคือ การปล่อยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งมวลสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียของอุตสาหกรรมฟอกย้อมนั้น มาจากกระบวนการย้อมสี (Dyeing) และการตกแต่งสำเร็จ (Finishing) (ขนิษฐา, 2007) ที่มีปริมาณ 220 ลบ.ม./วัน และ 3 ลบ.ม./วัน ตามลำดับ (คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ, 2557) โดยในจำนวนนี้จะมีปริมาณสารปนเปื้อนจากสีย้อมสูงมาก หากไม่มีการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ และเกิดสภาพไม่น่าดู สีย้อมที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้แก่ สีย้อมรีแอคทีฟ เนื่องจากสามารถย้อมเส้นใยของผ้าได้หลากหลายชนิด เช่น ฝ้าย, วิสกอต, ขนสัตว์ และไหม เป็นต้น สีย้อมรีแอคทีฟ แบบดี 5 เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีคุณสมบัติเป็นค่าง ให้สีที่สดใส และติดทนในทุกสภาวะ จึงยากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ (ขนิษฐา, 2550) การบำบัดน้ำเสียประเภทนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี และการทำให้เป็นสารแขวนลอย การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนหรือการโอโซนเข้มข้น และการกรองด้วยแผ่นเยื่อ (A.E.-A.A Said et.al, 2013) อย่างไรก็ตาม วิธีการบำบัดดังกล่าวมีข้อเสีย คือ มีกระบวนการบำบัดที่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูง วิธีการบำบัดที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง คือ วิธีการดูดซับ (Adsorption) โดยใช้ตัวดูดซับจากธรรมชาติ เนื่องจากกระบวนการบำบัดไม่ซับซ้อน และเสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่ำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย โดยในปีการผลิต 2556/57 มีพื้นที่ในการปลูกอ้อยจำนวน 10,078,025 ไร่ แบ่งเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยส่งโรงงาน 9,234,253 ไร่ และเป็นพื้นที่ปลูกอ้อยทำพันธุ์ 843,772 ไร่ โดยเพิ่มขึ้นจากปีการผลิต 2555/56 จำนวน 590,705 ไร่ หรือร้อยละ 6.23 (สนง. อ้อยและน้ำตาล, 2557) ส่วนชานอ้อย หมายถึง ส่วนของลำต้นที่หีบเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้ว ชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณส่วนประกอบทางเคมีของชานอ้อย คล้ายกับของไม้เนื้อแข็ง ส่วนประกอบดังกล่าวแปรไปตามชนิดพันธุ์ อายุ และสภาพที่อ้อยเติบโตขึ้นมา ชานอ้อยมีลิกนิน (Lignin) มีเซลลูโลส ชนิด Cross และ Bevan มีซิลิกา (Silica) สูงมาก และมีโพแทสเซียมกับแคลเซียมต่ำ เส้นใยอ้อยจัดเป็นเยื่อชนิดดี และฟอกสีได้ง่าย จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับสีย้อม (ปรีชา, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

ในโครงการพิเศษฉบับนี้ จึงเลือกทำการบำบัดสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ คือ ชานอ้อย โดยได้ทำการศึกษานาขนาดของรูพรุน และพื้นที่ผิวของชานอ้อยทั้งก่อน และหลังการดูดซับ แล้วทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ของชานอ้อย นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ได้แก่ ค่า pH, ระยะเวลาในการสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมรีแอกทีฟ ส่วน w/v ที่ต่างกัน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการทดลอง และเพื่อให้กระบวนการบำบัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถพัฒนาให้ใช้ได้กับการดูดซับสีข้อมอื่นๆ หรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำชานอ้อยที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากธรรมชาติ มาใช้เป็นตัวดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อม
2. เพื่อศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของชานอ้อยทั้งก่อนดูดซับสีข้อม และหลังดูดซับสีข้อม
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสีข้อมสังเคราะห์
4. เพื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมตัวดูดซับ คือ ชานอ้อย
2. สังเคราะห์น้ำเสียที่เป็นสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5
3. ศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีข้อม และหลังการดูดซับสีข้อม โดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscopy (SEM)
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีข้อม และหลังการดูดซับสีข้อม โดยใช้เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
5. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ดังนี้
 - แปรผันค่า pH ดังนี้ 2.5, 3, 4, 5 และ 6
 - แปรผันระยะเวลาในการสัมผัสดังนี้ 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60 และ 120 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-แปรผันความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน ดังนี้

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/L)	อัตราส่วน w/v ที่ใช้ (g/L)
50	0.05 และ 0.10
100	0.10 และ 0.15
150	0.15 และ 0.20
200	0.20 และ 0.25

6. สแกนความยาวคลื่นเพื่อหาค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดของสีย้อมรีแอกทีฟแบบสีค 5 (200-800 นาโนเมตร)

7. วิเคราะห์หาปริมาณสีย้อมรีแอกทีฟ แบบสีค 5 หลังจากทำการดูดซับ โดยใช้เครื่องมือ UV-Visible spectrophotometer

8. ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 100 มิลลิกรัม/ลิตร และใช้ปริมาณตัวดูดซับขานอ้อย เท่ากับ 0.1 กรัม และ 0.15 กรัม

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการช่วยลดปริมาณของเสียจำพวกขานอ้อย ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งให้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับที่มีราคาถูก โดยมีการควบคุมปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อม

2. เป็นแนวทางสำหรับนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสีย้อม

3. เป็นการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม

4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมชนิดอื่น

ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สีย้อม

สีย้อมผ้าโดยส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ คูกติดเส้นใยได้ ดังนั้นการย้อมสีให้ได้ผลดีจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งค่านี้ต้องมากกว่าความสามารถในการรวมตัวของสีกับน้ำ ภายใต้สภาวะที่โมเลกุลของสีย้อมจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการคูกติด (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น ปัจจัยที่ทำให้สีย้อมเกิดการคูกติดกับเส้นใย คือ

1. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bonds)
2. แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Forces)
3. แรงไอออน (Ionic Forces)
4. พันธะโควาเลนต์ (Covalent Bonds)

การคูกติดกันระหว่างโมเลกุลของเส้นใย จะต้องประกอบด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งอาจเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แต่แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดการยึดติดที่ดีที่สุด คือ พันธะโควาเลนต์ นอกจากนี้ขนาด และรูปร่างของ โมเลกุลของสีย้อมก็มีผลต่อการย้อมอย่างมาก เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็ก และยาวเท่าไร ก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น ทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบน และมีความกว้างยาวมากๆจะทำให้เกิดการคูกติดที่มีความคงทนสูงมากขึ้น (ราตรี และคณะ, 2543)

2.1.1 แหล่งกำเนิดของสีย้อม

1. สีย้อมธรรมชาติ (Natural dyestuff)

คือ สีที่สกัดได้จากวัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติเช่น พืช สัตว์ และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นมาจากกระบวนการตามธรรมชาติ สีธรรมชาติมีบทบาทเกี่ยวข้องกับวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์มาช้านานนับตั้งแต่สมัยโบราณ มนุษย์ได้เรียนรู้ที่จะนำสีจากวัสดุธรรมชาติมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ เช่น ทาสีตามร่างกาย สีของภาชนะเครื่องปั้นดินเผา ย้อมสิ่งทอ เครื่องใช้เครื่องนุ่งห่ม ภาพวาดฝาผนัง และเป็นส่วนประกอบในพิธีกรรมต่างๆ ตามความเชื่อของแต่ละท้องถิ่นสีธรรมชาติที่มีการใช้ในอดีตนั้นมักจะได้มาจาก พืช สัตว์ และแร่ธาตุต่างๆ โดยมีพัฒนาการสืบทอดกันมาจนถึงปัจจุบัน (ศูนย์วิชาการและเทคโนโลยีสิ่งทอพื้นบ้าน, 2557)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dyestuff)

เป็นสีที่ William Henry Perkin เป็นคนแรกที่สังเคราะห์สีม่วงอ่อน (Mauve) ขึ้นได้โดยบังเอิญจาก Alinine ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ หลังจากนั้นจึงเกิดสีสังเคราะห์นานาชนิดขึ้น เช่น สีแดง (Fuchsin) สีส้ม และสีเหลือง (Azo Dyes) และสีชมพู (Phenolphthalein) ปัจจุบันนิยมใช้สีสังเคราะห์มากขึ้น เพราะราคาถูกกว่า สบายกว่า ทนทานกว่า มีสีให้เลือกมากมาย การข้อมให้สีสม่ำเสมอ ไม่เป็นด่าง เป็นดอกเป็นดวง

ความเป็นพิษ โดยทั่วไปสีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์มีอัตราการตาย หรือเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา, 2537) แต่สีย้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารมีพิษได้ เช่น สีย้อมที่มีโครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งเป็นสีย้อมที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมฟอกย้อม โดยมีการใช้ถึง 60-70 % ของสีที่ใช้กันอยู่ สีอะโซจะมีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถออกซิไดส์ต่อไปได้ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้เป็นขั้นสุดท้ายในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วยเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมที่สมบูรณ์ (โกมล, 2541) อย่างไรก็ตาม สารอะโรมาติกเอมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีก็สามารถก่อให้เกิดมะเร็งมีเพียง 15 ชนิด เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกเอมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกอะมิโนซัลโฟนิก (Aromatic aminosulphonic acid) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง หรือมีโอกาสที่จะก่อมะเร็งน้อยมาก (อังคณา, 2540) สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ โดยการหายใจ ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ การสัมผัสทางผิวหนัง และการปะปนเข้าไปกับอาหารที่กิน

สำหรับผลกระทบของสีย้อมกับสิ่งแวดล้อม พบว่าสีย้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ปัญหาสำคัญของสีย้อมในน้ำทิ้งปัจจุบัน จึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทิ้ง สีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม แม้จะมีปริมาณสีอยู่ในแหล่งน้ำเพียงเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้วปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นได้จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ และจากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่า สีย้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้ง ถึงแม้ว่าสีจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

2.1.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม (กรองกาญจน์, 2530)

สีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็นลักษณะใหญ่ๆ ตามลักษณะทางกายภาพ การใช้งาน และ โครงสร้างทางเคมี ได้ดังนี้

1. จำแนกตามลักษณะทางกายภาพ

แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ สีย้อมละลายน้ำได้ และชนิดที่ไม่ละลายน้ำ

1. สีย้อมที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ สีย้อมกรด (Acid Dyes), สีย้อมด่าง (Basic Dyes), สีย้อมตรง (Direct Dyes) และสีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

2. ชนิดที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ สีย้อมอะโซ (Azo Dyes), สีย้อมกระจาย (Disperse Dyes), สีย้อมแวต (Vat Dyes), สีย้อมเม็ด (Pigment Dyes), สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) และสีย้อมที่ลิกนิน (Metal Complex Dyes)

2. จำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

สีย้อมสามารถจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี ออกเป็น 15 ชนิด ดังนี้

1. สีย้อมไนโตรโซ (Nitroso Dyes) มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารอะโรมาติก (Aromatic Compounds) ที่มีหมู่ไนโตรโซ (-N=O) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในตำแหน่งที่ติดกันในวงเบนซีน ซึ่งในการย้อมจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะต่างๆ เช่น เหล็ก, โครเมียม, โคบอลต์ และนิกเกิล

2. สีย้อมไนโตร (Nitro Dyes) โครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่ไนโตร (-NO₂) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรือหมู่อะมิโน (-NH₂) ในตำแหน่งที่ติดกัน หรือตรงกันข้ามในวงแหวนวงเบนซีน โครงสร้างของสารประกอบอะโรมาติกเป็นโครงสร้างควิโนไดอิด (Quinodoid) แบ่งออกเป็นสีย้อมซัลโฟเนตไนโตร (Sulfonated Nitro Dyes) ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์ และสีย้อมซัลโฟเนตไนโตร (Un sulfonated Nitro Dyes) เป็นสีย้อม Pigment

3. สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) เป็นสีย้อมที่มีหมู่อะโซ (-N=N-) หนึ่งกลุ่มหรือมากกว่า ทำหน้าที่เป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรืออะมิโน (-NH₂) เป็นออกโซโครม สารตัวกลางในปฏิกิริยา (Intermediate) มี 2 ชนิด คือ ไดอะโซ (Diazo) และสารร่วมทำปฏิกิริยา (Coupling) ซึ่งดำเนินปฏิกิริยาภายใต้สภาวะกรดหรือด่าง ไดอะโซเนียม (Diazonium) ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะริลลามีน (Arylamine) หรือเฮเทอโรไซคลิกเอมีน (Heterocyclic Amine) กับสารร่วมปฏิกิริยา สีย้อมอะโซเป็นกลุ่มสีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสีย้อมชนิดนี้ใช้ย้อมได้กับเส้นใยทุกชนิด (อังคณา, 2540)

4. สีย้อมอะโซอิก (Azoic Dyes) เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายต่างๆ ต้องเตรียมขึ้นบนเส้นใย มีโครโมฟอร์ และออกโซโครมเหมือนสีย้อมอะโซ

5. สีย้อมสติลเบน (Stilbene Dyes) โครงสร้างมีสติลเบน (C₆H₅-CH=CH-C₆H₅) และหมู่อะโซ เป็นโครโมฟอร์

6. **สีคาโรทีนอยด์ (Carotenoid Dyes)** โครงสร้างมีหมู่โซ่พอลิอิน (Polyene) ของคาร์บอนอย่างน้อย 18 อะตอม เป็นโครโมฟอร์ สีชนิดนี้เป็นสีทั่วไปที่พบในธรรมชาติ สำหรับสีคาโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้เป็นสีผสมอาหาร เช่น เบตา-คาโรทีน (β-Carotene) เป็นต้น

7. **สีไดฟีนิลมีเทน (Diphenylmethane Dyes)** โครงสร้างหลักเป็นไดฟีนิลมีเทน มีหมู่อิมิน ($-C=NH$) เป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม ส่วนใหญ่ใช้ย้อมกระดาษ นอกจากนี้ อาจใช้ย้อมขนสัตว์ ไหม หน้าง ฝ้าย หรือเส้นใยอะคริลิก

8. **สีแซนทีน (Xanthrene Dyes)** โครงสร้างหลักเป็นแซนทีน (Dibenzo-1,4-Pyran) และมีหมู่อะมิโน หรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม โครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ นิยมเรียกสีชนิดนี้ว่า สีอะมิโนแซนทีน (Amino Xanthrene Dyes) หรือสีไฮดรอกซิลแซนทีน (Hydroxyl Xanthrene Dyes) สีย้อมกลุ่มนี้ให้สีสดใส เนื่องจากสารถลายให้ฟลูออเรสเซนซ์ ใช้ย้อมขนสัตว์ และไหมได้ ใช้ย้อมผ้าฝ้ายโดยใช้แทนนินเป็นมอร์แคนท์

9. **สีอะคริดีน (Acridine Dyes)** โครงสร้างหลักเป็นอะคริดีน และมีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม มีโครโมฟอร์เป็นโครงสร้างควิโนดอยด์ สีชนิดนี้นิยมใช้ย้อมหนัง และใช้เป็นสีเบสิกสำหรับย้อมไหม และเซลลูโลส

10. **สีควิโนลีน (Quinoline Dyes)** โครงสร้างหลักเป็นควิโนลีน สีกลุ่มนี้มีโครโมฟอร์คือ 2(2-Quinoly)-1,3-indandiene สีพวกนี้นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย และสีเบสิกสำหรับย้อมกระดาษ

11. **สีแอนทราควิโนน (Anthraquinone Dyes)** โครงสร้างหลักคือ แอนทราควิโนนเป็นโครโมฟอร์ และมีหมู่อะมิโนหรือหมู่ไฮดรอกซิลเป็นออกโซโครม นิยมใช้เป็นสีวัต สีแอตติค สีมอร์แคนท์

12. **สีอินดิโกอยด์ (Indigoid Dyes)** โครโมฟอร์คือ $-CO-C=C-CO-$ และมีหมู่อะมิโนหรือซัลเฟอร์เป็นออกโซโครม ใช้เป็นสีวัตในการย้อมผ้าฝ้าย

13. **สีไทอะโซล (Thiazole Dyes)** โครงสร้างหลักคือ วงแหวนไทอะโซลเป็นโครโมฟอร์ มีหมู่อะมิโนเป็นออกโซโครม สีชนิดนี้ใช้ย้อมผ้าฝ้ายได้โดยตรง

14. **สีซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes)** เป็นสีที่มีกำมะถัน (S) เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างทางเคมี สีซัลเฟอร์นี้ไม่ละลายน้ำ และสีไม่ติดเส้นใยต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสารประกอบลิวโค (Leuco Compound) โดยทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide) หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (Sodium Hydrosulfide) ก่อน ทำให้สีเกาะติดเส้นใย นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ผ้าไหม และขนสัตว์

15. **สีฟทาโลไซยานิน (Phthalocyanin Dyes)** สีกลุ่มนี้มี Tetrabenzoporphyrine เป็นโครโมฟอร์ และโครงสร้างโมเลกุลที่สามารถจับโลหะ มีสมบัติคงทนต่อแสง ความร้อน กรด และเบส ใช้สำหรับสีเคลือบผิว, หมึกพิมพ์, พลาสติก, เส้นใย และยาง เป็นต้น

3. จำแนกตามลักษณะการใช้งาน

สีย้อมสามารถจำแนกตามลักษณะการใช้งาน ออกเป็น 12 ชนิด ดังนี้

1. **สีย้อมแอซิด (Acid Dyes)** เป็นสีย้อมที่ไม่ละลายในสารละลายกรด และใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม ไนลอน หนังกแท้ และกระดาษ โดยทั่วไปสีย้อมแอซิดจะมีโครงสร้างทางเคมีเป็นสารประกอบจำพวกอะโซไตรอาร์ลมีเทน (AzoTriarylmethane) หรือ แอนทราควิโนน (Anthraquinone)

2. **สีย้อมอะโซอิก (Azoic Dyes)** เป็นสีย้อมที่ทำให้เกิดสีขึ้นบนเส้นใย โดยการเตรียมเป็นเกลือไดอะโซเดียม (Diazodium Salt) ก่อน และเมื่อนำไปสัมผัสกับเส้นใยแล้วจะเกิดปฏิกิริยาเป็นสีย้อมบนเส้นใยที่อุณหภูมิต่ำ จะช่วยทำให้เกลือไดอะโซเดียมไม่สลายตัว จนกระทั่งทำปฏิกิริยาควบคู่กับเส้นใยเป็นสีย้อมอะโซอิก เป็นสีย้อมที่ให้สีสดใส สว่างเจิดจ้า และมีสมบัติติดทนทาน ดังนั้นจึงทนทาน มีอายุการใช้งานนาน และใช้สำหรับงานพิมพ์บนผ้าฝ้าย

3. **สีย้อมเบสิก (Basic Dyes)** เป็นสีย้อมที่มีหมู่อะมิโนหรืออนุพันธ์ของหมู่อะมิโน สีย้อมเบสิกจะละลายในสารละลายกรด และไม่ละลายในสารละลายเบส โครงสร้างส่วนใหญ่ของสีย้อมเบสิกจะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี เป็นพวกกลุ่มของสารประกอบไตรอาร์ลมีเทน (Triarylmethane) หรือ แซนทีนส์ (Xanthenes) สีย้อมเบสิกสามารถใช้ย้อมขนสัตว์ หรือใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ (Mordant) เพื่อย้อมผ้า สีย้อมเบสิกสามารถนำไปใช้เป็นหมึกพิมพ์กระดาษคาร์บอนสำหรับทำกระดาษสำเนา และใช้สำหรับผลิตแถบหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์ดีด สีย้อมเบสิกสามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตเป็นหมึกเขียนและหมึกพิมพ์

4. **สีย้อมไคเร็กซ์ (Direct Dyes)** เป็นสีย้อมที่สามารถนำไปใช้สำหรับย้อมผ้าได้โดยตรง และไม่ต้องใช้ร่วมกับสีย้อมมอร์แดนต์ สีย้อมไคเร็กซ์สามารถใช้สำหรับย้อมผลิตภัณฑ์ผ้าผสม และใช้ย้อมขนสัตว์ หรือใช้ย้อมไหม โดยทั่วไปแล้ว โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมไคเร็กซ์เป็นสีย้อมกลุ่มอะโซ สมบัติการละลายโดยทั่วไปแล้ว สามารถทำให้ลดลง โดยการเติมเกลือลงไปในอ่างย้อมสี สีย้อมไคเร็กซ์บางตัวสามารถใช้ย้อมบนเส้นใย โดยทำปฏิกิริยาการเติมเกลือไดอะโซเดียมบนวัสดุก่อน จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาการควบคู่ เพื่อทำให้เกิดเป็นสีย้อมที่ไม่ละลายบนเนื้อผ้าหรือเส้นใย สารประกอบที่ใช้กัน โดยทั่วไป สำหรับการทำปฏิกิริยาควบคู่ คือ เบต้าแนฟทอล (β -naphthol)

5. **สีย้อมดิสเพอร์ส (Disperse Dyes)** เส้นใยสังเคราะห์จำนวนมาก เช่น เส้นใยเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate) เส้นใยพลาสติก และเส้นใยพอลิเอสเทอร์ (Polyester) จะมีความยากลำบากในการย้อมติดสี สีดิสเพอร์สมีความสามารถในการย้อมได้ดีกับวัสดุดังกล่าว และสามารถย้อมสีได้เหนียว ผิด โดยสีจะกระจายตัวดูขรุขระ และแทรกตัวลงบนเส้นใย สีย้อมกลุ่มอะโซสามารถใช้เป็นสีย้อมดิสเพอร์สได้ แต่สีย้อมกลุ่มแอนทราควิโนนจะใช้ประโยชน์เป็นสีย้อมดิสเพอร์สที่ดีกว่า เนื่องจากสมบัติที่ไม่ละลายในตัวทำละลาย อย่างไรก็ตาม สีย้อมกลุ่มอะโซ และสี

ข้อมกลุ่มแอนทราควิโนน สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในเส้นใยได้ดี โดยหมู่เอทานอลามีน (-NH-CH₂CH₂-OH) ซึ่งเป็นหมู่ที่พบในสีข้อมคิสเพอร์ส จะช่วยในการกระจายตัว และเกิดการดูดซับเข้าไปในเส้นใยได้ดี

6. **สีข้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)** เป็นสีข้อมที่เกิดจากการสร้างพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างสีข้อม และเส้นใยเซลลูโลส ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการข้อมโดยสีชนิดนี้จะทนทานต่อการซักล้างได้ดี สีข้อมรีแอคทีฟ เป็นสีข้อมชนิดใหม่ที่สุดซึ่งได้พัฒนาในปี ค.ศ. 1956 สามารถใช้ในการข้อมผ้าฝ้าย เรยอน และไนลอนบางชนิด

7. **สารฟลูออเรสเซนต์ไวเทนนิ่ง (Fluorescent Whitening)** สารฟลูออเรสเซนต์ไวเทนนิ่ง จะช่วยทำให้เสื้อผ้าที่เหลืองกลับขาวพิเศษกว่า และมีความสว่างสดใส จึงนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ และผงซักฟอก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมกาว อุตสาหกรรมสีทา และอุตสาหกรรมกระดาษ โดยใช้เป็นสารเติมแต่งที่มีชื่อว่า สารเพิ่มความสดใส (Optical Brightener)

8. **สีอาหาร ยา และเครื่องสำอาง** ในปัจจุบันจะมีประมาณ 52 สีเท่านั้น เนื่องจากมีการควบคุมอย่างเข้มงวดในการใช้งาน โดยคณะกรรมการอาหารและยาแห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ความบริสุทธิ์ และความปลอดภัยจะมีการควบคุมเป็นพิเศษ เพื่อที่จะรองรับความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค ในปัจจุบันมีการค้นคว้ากันอย่างมากมายในสีตระกูลนี้ เพื่อที่จะพัฒนาให้สียึดเกาะกับสารพอลิเมอร์ เมื่อบริโภคผ่านเข้าไปในระบบย่อยอาหารแล้วไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือตกค้างภายในร่างกาย สีตระกูลนี้มีหลายตัวที่ได้ผ่านการทดสอบความเป็นพิษเรื้อรัง และทดสอบผลตกค้างต่อผู้บริโภค และได้ผ่านการยอมรับแล้ว ซึ่งมีสีทั้งหมดที่มีสูตร โครงสร้างทางเคมีเป็นแอนทราควิโนน อะโซ และอินดิโกยด์

9. **สีข้อมมอร์แดนต์ (Mordant Dyes)** สีข้อมมอร์แดนต์บางตัวเมื่อรวมกับเกลือของโลหะจะให้ผลึกภัณฑ์สีข้อมที่ไม่ละลาย เรียกว่า เลคส์ (Lakes) และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นรงควัตถุ (Pigments) ถ้าหากต้องการข้อมสิ่งทอที่ผลิตจากผ้าฝ้าย ขนสัตว์ หรือเส้นใยโปรตีน ก็จะนำสิ่งทอเหล่านี้ใส่เกลือของอะลูมิเนียม เกลือโครเมียม หรือเกลือเหล็ก และเมื่อสิ่งทอดังกล่าวสัมผัสกับสีข้อมจะทำให้เกิดสีข้อมที่ไม่ละลาย โดยเกลือของโลหะจะตกตะกอนบนเส้นใย ซึ่งทำให้สีข้อมมีความทนทานต่อแสง และทนทานต่อการซักล้างได้ดี หมู่ -OH และหมู่ -COOH ที่เกาะอยู่บนสีข้อมอะโซ หรือแอนทราควิ-โนน จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะเกิดเป็นสีมอร์แดนต์ได้

10. **สีข้อมโซลเวนท์ (Solvent Dyes)** เป็นสีข้อมที่สามารถละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ (Alcohol) สารละลายคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (Chlorinated Hydrocarbons) หรือสารละลายแอมโมเนีย (Ammonia) สีข้อมโซลเวนท์ เป็นสีข้อมที่ใช้ในการข้อมเส้นใยสังเคราะห์ที่มีความยากลำบากในการข้อมสี เช่น เส้นใยพอลิเอสเตอร์ (Polyester) เส้นใยพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) และเส้นใยไนลอน (Nylon) เป็นต้น

ลิตะครีเลต (Polyacrylate) และเส้นใยเซลลูโลสไตรอะซิเตต (Cellulose Triacetate) ตัวทำละลายที่ใช้ได้ดีในปัจจุบัน คือ เปอร์คลอโร-เอทิลีน (Perchloroethylene) เทคโนโลยีการย้อมสีชนิดนี้จะช่วยลดปัญหาสีย้อมตกค้างในการย้อมได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการย้อมสี สีย้อมโซเวนท์สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นสีที่ใช้ในน้ำมัน ขี้ผึ้ง วานิช คริมขัดรองเท้า ลิปสติก และน้ำมันเชื้อเพลิง เป็นต้น

11. สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur Dyes) เป็นสีย้อมที่มีราคาถูก และใช้ในการย้อมผ้าฝ้ายให้มี Dull Shades สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่มีความทนทานต่อการซีดจางสีเนื่องจากแสง ทนต่อการซักล้าง และทนกรด แต่มีความไวต่อการเปลี่ยนสีกับคลอรีน และน้ำยาฟอกสีไฮโปรคลอไรท์ (Hypochlorite) หมู่โครโมฟอร์ของสีย้อมซัลเฟอร์มีความยุ่งยากซับซ้อน และยังไม่เป็นที่รู้จักกันแน่นอน สีย้อมซัลเฟอร์ผลิตโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารซัลไฟด์ หรือพอลิซัลไฟด์กับสารประกอบอะโรมาติกที่มีหมู่คลอรีน สีย้อมซัลเฟอร์โดยทั่วไปจะไม่ค่อยมีสีเมื่ออยู่ในรูปรีดิวซ์ในสารละลายของเกลือ โซเดียมซัลไฟด์ แต่มีสีเข้มขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะออกซิเดชัน สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่รู้จักกันอย่างดีและใช้กันมาเป็นเวลานาน

12. สีย้อมแวต (Vat Dyes) สีย้อมกลุ่มนี้จะมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่ยุ่งยาก ส่วนใหญ่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน (Anthraquinone) หรืออินแดนทรีน (Indanthrene) ในสารละลายที่สภาวะรีดักชัน สีย้อมกลุ่มนี้จะละลายในสารละลายอัลคาไลน์ (Alkalines) และไม่มีสี ซึ่งเรียกว่า Leuco Vats สารละลายดังกล่าวจะใช้ใส่ลงไป在线ใยฝ้าย ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือสัมผัสกับอากาศจะเกิดเป็นสีขึ้นมา สีย้อมแวตเป็นสีที่มีราคาแพง สามารถใช้กับสิ่งทอที่ใช้ประจำวันที่มีการซักล้างบ่อยๆ เช่น เสื้อเชิ้ตสุภาพบุรุษ สีย้อมแวตสามารถนำไปใช้เป็นสีพิมพ์ผ้า สีพิมพ์ผ้าจะมีส่วนผสมของโซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (Sodium Hydrosulfite) และสารประกอบอัลดีไฮด์ (Aldehyde) ที่มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี สามารถนำไปทำการพิมพ์สีบนผ้าก่อน ต่อจากนั้นนำไปทำให้เกิดเป็นสีโดยผ่านผ้าเข้าไปในอ่างที่บรรจุสารออกซิไดส์ เช่น โซเดียมไดโครเมต (Sodium dichromate) หรือ โซเดียมเปอร์โบเรต (Sodium perborate) นอกจากนี้ ประเภทของสีย้อมยังสามารถจำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี ดังแสดงในตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

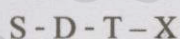
ตารางที่ 2.1 ประเภทของสีย้อม จำแนกตามชนิดของเส้นใยที่นำไปย้อมสี (อุตสาหกรรมย้อมผ้า, 2537)

เส้นใย	ประเภทของสี
ฝ้าย	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ลินิน	Direct, Sulfur, Azo, Vat, Reactive
ขนสัตว์	Acid, Metal-complex, Mordant, Reactive
ไหม	Acid, Direct, Reactive, Basic
เรยอน	Direct, Reactive
อะซีเตท	Disperse
ไนลอน	Acid, Modified basic, Metal-complex
โพลีเอสเตอร์	Disperse
อะคริลิก	Modified basic, Modified acids

2.1.3 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive Dyes)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมฟอกย้อม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) เป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ละลายน้ำได้ดี และย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดี โดยจะมีคุณสมบัติเป็นไอออนลบ เมื่ออยู่ในน้ำมีฤทธิ์เป็นด่าง ในขณะที่ย้อม โมเลกุลของสีจะเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเส้นใยเซลลูโลส แล้วเชื่อมโยงติดกัน โดยพันธะโควาเลนต์แบบครอสลิงก์ (Cross Link) กับเซลลูโลส ได้สารประกอบชนิดใหม่ ทำให้ได้สีที่มีความทนทานต่อการซักฟอก

โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมรีแอคทีฟ ประกอบด้วย 4 กลุ่ม นอกจากนี้ยังสามารถเขียนได้เป็นสัญลักษณ์ของโครงสร้างอย่างง่าย คือ

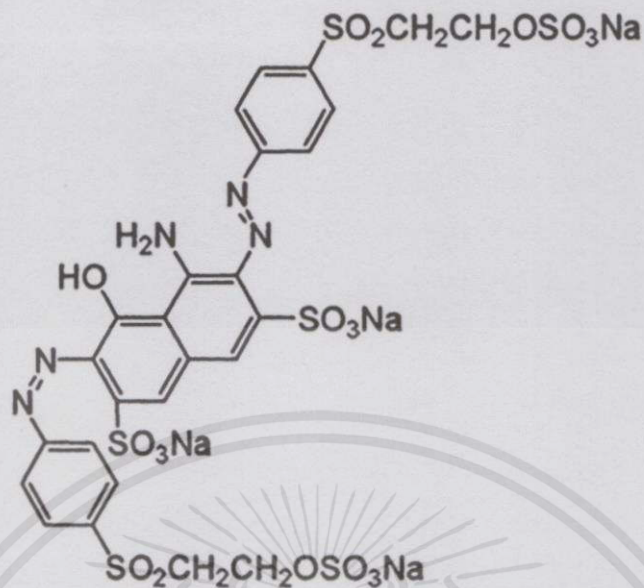


เมื่อ D = Chromophoric group เป็นกลุ่มที่ทำให้เกิดสี (Chromophore) และสร้างการยึดเกาะ (Substantivity) กับเส้นใยเซลลูโลส

X = Reactive system เป็นกลุ่มที่ทำให้สีเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของเส้นใย

T = Bridging group เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง Reactive system กับ Chromophore ยกตัวอย่าง เช่น หมู่ -NH, -NHCO, -SO₂, -NHSO₃ และ -NCH₃ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน S = Solubilising group คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูง และเป็นกลุ่มที่ติดอยู่กับโครโมฟอร์ (Chromophoric group) โดยทั่วไปเป็นกรดซัลโฟนิค (-SO₃Na) ซึ่งอาจมีเพียงกลุ่มเดียวหรือมากกว่า 1 กลุ่ม



รูปที่ 2.1 สูตร โครงสร้างสีย้อม Reactive black 5 (World dye variety, 2014)

Molecular Formula : $C_{26}H_{21}N_5Na_4O_{19}S_6$

Molecular Weight : 991.82

2.1.4 ความเป็นพิษของสีย้อม

โดยทั่วไป สีย้อมเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ จากประวัติที่มีการเก็บรวบรวมในต่างประเทศไม่พบว่าผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมพิมพ์ มีอัตราการตายหรือการเจ็บป่วยสูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด (นันทยา, 2537) แต่สีย้อมบางชนิดอาจเปลี่ยนแปลงกลายเป็นสารพิษที่มีพิษได้ เช่น สีย้อมที่มีโครงสร้างแบบอะโซ ซึ่งป็นสีย้อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีการใช้ 60-70 % ของสีที่ใช้กันอยู่ สีอะโซจะมีพันธะคู่ของไนโตรเจน (N=N) เป็นหมู่โครโมฟอร์ ซึ่งในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน หมู่อะโซจะถูกทำลายโดยสารรีดิวซ์ (Reducing agent) พันธะอะโซจะแตกตัวออกได้เป็นสารอะโรมาติกเอมีน (Aromatic amine) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ของสารก่อมะเร็ง และเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ทดลองได้ แต่สารพิษนี้สามารถถูกออกซิไดซ์ต่อไปได้ในสภาวะที่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นการบำบัดสีย้อมโดยใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องใช้กระบวนการบำบัดแบบใช้ออกซิเจนร่วมด้วย เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสีย้อมที่สมบูรณ์ (โกมล, 2541) อย่างไรก็ตาม สารอะโรมาติกเอมีนที่ใช้ในอุตสาหกรรมสีก็สามารถก่อให้เกิดมะเร็งมีเพียง 15 ชนิด เท่านั้น โดยทั่วไปแล้วสีอะโซจะไม่แตกตัวให้สารอะโรมาติกเอมีน แต่จะแตกตัวให้กรดอะโรมาติกเอมีโนซัลโฟมิก (Aromatic aminosulphonic acid) ซึ่ง

ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง หรือมีโอกาที่จะก่อให้เกิดมะเร็งน้อยมาก (อังคณา, 2540) สีข้อมอาจเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ โดยการหายใจ ด้วยการสูดดมสีที่ฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศ โดยการสัมผัสทางผิวหนัง และโดยการปะปนเข้าไปกับอาหารการกิน

สำหรับผลกระทบของสีข้อมต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสีข้อมเป็นสารที่สลายตัวทางชีวภาพได้ยาก แต่มีความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ ดังนั้นปัญหาสำคัญของสีข้อมในน้ำที่ปัจจุบันจึงไม่ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีข้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำที่ สีข้อมเป็นสารที่มีสีเข้มข้นแม้จะมีสีอยู่ในแหล่งน้ำในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ทำให้น้ำมีสีเป็นที่น่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น โดยทั่วไปแล้ว ปริมาณของสีที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำแล้วสังเกตเห็นเป็นสีต่างๆได้ จะอยู่ในช่วง 0.1-1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดสี สภาพแสง และระดับความใสของน้ำ โดยจากการศึกษาของ Brown และ Hamburger (1987) พบว่า สีข้อมที่ปล่อยมาจากโรงงานย้อมสิ่งทอมีความเข้มข้นประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่โรงงานจะต้องกำจัดสีจากน้ำทิ้ง แม้ว่าสีจากน้ำทิ้งจะมีความเป็นพิษต่ำก็ตาม

2.1.5 น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

1. แหล่งกำเนิดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

น้ำเสียในการย้อมผ้า เกิดจากกระบวนการต่างๆ ดังนี้

1. กระบวนการต้มแป้ง เป็นการกำจัดแป้งที่ติดมากับกระบวนการทอออก การต้มแป้งเป็นการทำให้แป้งสลายตัวเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้
2. กระบวนการทำความสะอาด เป็นการเอาสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยออกก่อนที่จะนำไปทอเป็นผืนผ้า
3. กระบวนการฟอกขาว เป็นการกำจัดสีธรรมชาติของเส้นใยออก โดยการใช้โซเดียมไฮโป-คลอไรท์ กระบวนการนี้จะทำก่อนการย้อม เพื่อให้สีติดดียิ่งขึ้น และคงสภาพสี เพื่อให้สีเปลี่ยนสภาพสีน้อยที่สุด
4. กระบวนการชุบมันเป็นการทำ เพื่อให้ผ้าเพิ่มความมัน และดูดซับสีได้มากขึ้น ทำให้ผ้านุ่ม ทำได้โดยการชุบผ้าลงในน้ำยาโซดาที่อุณหภูมิต่ำ
5. กระบวนการย้อมสี และการตกแต่งพิเศษ
6. กระบวนการพิมพ์ผ้า
7. น้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดโรงงาน

นอกจากนี้กระบวนการฟอกย้อมยังอาศัยไอน้ำจากหม้อไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการ ถ้าไอน้ำถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำ จะได้น้ำที่สะอาดที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำถูกส่งไปให้ความร้อนแก่น้ำย้อมโดยตรง จะไปเพิ่มปริมาณของน้ำ

ย้อม และถูกรวมเป็นน้ำเสีย ส่วนน้ำหล่อเย็นในกระบวนการย้อม ใช้เพื่อลดอุณหภูมิของน้ำย้อมลงในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำสะอาด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.1.6 ประเภทของสิ่งเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท สามารถจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1. สีย้อม (Dye)

การย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลาย และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

2. สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมรวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการตกแต่งสำเร็จ แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

2.1 สารช่วยย้อม (Auxiliary chemicals) ได้แก่ สารช่วยจัดสิ่งสกปรก (Scouring agent) สารช่วยเปียก (Wetting agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีสม่ำเสมอ (Leveling agent)

2.2 สารเคมีพื้นฐาน (Basic chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด, ด่าง, บัฟเฟอร์, เกลือ, สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

2.3 สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ, สารกันเชื้อรา, สารกันไฟ และสารกันยับ เป็นต้น สารเคมีต่างๆ ที่กล่าวข้างต้น เมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และถูกปล่อยปนออกมากับน้ำเสีย

3. สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อม ล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากนัก โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาในระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะ มีสิ่งสกปรกที่ติดมากับเส้นใยธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และหลุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบสิ่งหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เศษเส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องข้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ (Polyesters) ยังมีสาร โอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใย และปะปนในน้ำเสียด้วย

5. สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนชนิดอื่น ๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบจำพวก Chlorinated benzene สารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่องจักร เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำเสียอย่างมากต่อคุณสมบัติของน้ำเสีย

2.1.7 มลพิษที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

โดยทั่วไปมลภาวะที่เกิดจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม มีดังนี้

1. ความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

น้ำเสียจากน้ำข้อมผ้ามักมีสารที่มีพิษ ซึ่งจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และจุลินทรีย์ในกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา ได้แก่ สารประกอบอะนินีน

2. การลดลงของออกซิเจนในแหล่งน้ำ

น้ำเสียจากโรงงานข้อมผ้าเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง เนื่องจากออกซิเจนถูกนำไปใช้ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ และใช้ในการทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสีข้อมของบางประเภท

3. ทำให้สภาวะทางกายภาพของแหล่งน้ำเสื่อมลง

น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ จะก่อให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อผู้พบเห็น ทำให้แม่น้ำไม่น่าดู นอกจากนี้ สีข้อมที่มีความเข้มข้นสูงจะขัดขวางการเดินทางของแสงลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศของแหล่งน้ำนั้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

2.1.8 แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม

แนวทางการลดของเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อม มีดังนี้ (สุวรรณี จรรยาพูน, 2547)

1. การเลือกสีข้อมและสารเคมีที่ใช้เหมาะสม

การเลือกใช้สารเคมีที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการลดของเสียที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเป็นพิษที่แตกต่างกัน และการใช้ปริมาณไม่ว่ากรณีใดๆ ทางต้น ออกทางท้าย เหตุผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สารเคมีหรือสีข้อมในปริมาณที่เหมาะสม เป็นการลดปริมาณสารเคมีส่วนเกิน ซึ่งปริมาณสารเคมีส่วนเกินนั้นจะกลายเป็นมลพิษทางน้ำต่อไป จากการศึกษากระบวนการฟอกย้อม พบว่า หาก

สามารถลดปริมาณสารเคมีได้ 20-50 % จะสามารถลดปริมาณของเสียในน้ำทิ้งในรูปของ BOD ได้ถึงปริมาณ 30-50 % ผลอีกประการหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดเจนก็คือ ค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีจะลดลงด้วย

2. การนำเทคโนโลยีที่สะอาดมาใช้ในโรงงาน

เทคโนโลยีที่สะอาด หมายถึง เทคโนโลยีที่เป็นการผลิตที่ปราศจากของเสียหรือมีของเสียน้อยที่สุด แม้ว่าเทคโนโลยีเหล่านี้ ส่วนใหญ่มีราคาแพง และอาจต้องใช้เวลาในการปรับปรุงโรงงาน เพื่อให้ใช้เทคโนโลยีได้ระยะยาว การเลือกใช้เทคโนโลยีนี้จัดเป็นทางออกที่ดี

3. การลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้ง

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งแปรผันตามปริมาณ และความสกปรกของน้ำ ดังนั้นการลดปริมาณและความสกปรกของน้ำข้อมสามารถช่วยลดภาระในการบำบัดน้ำทิ้งของโรงงานลงได้ วิธีลดปริมาณและความสกปรกของน้ำทิ้งอาจทำได้มากมายหลายทาง เช่น การใช้น้ำด้วยความประหยัด การเลือกใช้สีที่มีเปอร์เซ็นต์การดูดติดในเส้นใยสูง เป็นต้น

4. การนำเทคโนโลยีที่เหมาะสมมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง

น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมมีความหลากหลายทั้งในด้านคุณภาพ และปริมาณ ดังนั้นโรงงานควรเลือกใช้กรรมวิธีในการบำบัดน้ำทิ้งที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของโรงงาน เพื่อให้สามารถดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

5. การนำกลับมาใช้ใหม่

วิธีการลดปริมาณสีสามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือ การนำกลับมาใช้ใหม่ หรือใช้ซ้ำอีกเท่าที่จะทำได้ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการเตรียมควรจะใช้ให้เหมาะสม เลือกชนิดที่สามารถใช้ซ้ำได้อีกโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา เช่น เกิดจุดบนผ้า ทำให้สีของผ้าไม่สม่ำเสมอ (ล้นทม, 2535)

2.2 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม (วนิดา, 2555)

สีในแหล่งน้ำแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1. สีแท้หรือสีจริง (True color)

หมายถึง สีที่เกิดจากสารต่างๆในน้ำ และละลายกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ โดยสารที่มีผลต่อการเกิดสีแท้ส่วนใหญ่ ได้แก่ สารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยากประเภทฮิวมิก และฟัลวิค (Humic acid and fulvic acid) ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต และผลิตผลจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต ซึ่งมีความคงตัวสูงมากจนไม่สามารถย่อยสลาย และแยกออกโดยการกรองได้ การกำจัดสีแท้จึงทำได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์แจกทางสน อีเมล ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สีปรากฏ (Apparent color)

หมายถึง สีที่เกิดจากสารแขวนลอยในน้ำที่สะท้อนแสงปรากฏให้เห็นแก่สายตา เช่น แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ ตะกอนของดินและทราย สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น การกรองหรือ หรือการตกตะกอน

สำหรับสีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ โดยสีแท้มักเป็นสีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม และอบไม้ยางพารา ส่วนสีปรากฏเกิดจากสารแขวนลอยในน้ำ จาก 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียเองเนื่องจากการปนเปื้อนมาแต่แรกในน้ำเสีย เช่น สีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมทอผ้า ฟอกย้อม เยื่อกระดาษ ซึ่งสีที่เกิดขึ้นเป็นสีปรากฏจากสารเคมีในกระบวนการผลิต รวมทั้งลิกนินและแทนนิน โดยอาจแบ่งประเภทตามการแตกตัวให้ประจุ เส้นใยที่ใช้ย้อม หมูช่วยละลาย รวมทั้งโครงสร้างทางเคมีของสี นอกจากนี้สีที่เกิดขึ้นในน้ำเสียหลังจากการกักเก็บหรือหลังจากผ่านการบำบัด เช่น ในระบบบำบัดแบบผึ่งบ่อ (Oxidation pond) ที่อาศัยสาหร่ายในออกซิเจน แต่สาหร่ายทำให้น้ำมีสีเขียว เป็นต้น

2.3 วิธีการกำจัดสีข้อมในน้ำเสีย

สิ่งเจือปนในน้ำทั้งเนื่องจากการย้อมผ้าในโรงงานฟอกย้อมนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นสีข้อม และสารเคมีซึ่งเป็นส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ในน้ำ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และจะถูกปล่อยลงแหล่งน้ำทิ้ง แม้จะมีการโต้เถียงกันว่าสีข้อมไม่ควรถูกจัดให้เป็นสารก่อมลภาวะในน้ำ แต่เนื่องจากทำให้เกิดความรู้สึกน่ารังเกียจต่อคนทั่วไป ตามความในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม กำหนดให้สีในน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้น น้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมก่อนปล่อยออกจากโรงงาน ต้องผ่านระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อทำการกำจัดสารต่าง ๆ รวมทั้งสีที่ตกค้างก่อน วิธีการบำบัดสีมีหลายวิธี ดังนี้ (รัชนีชัย, 2557)

1. การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation)

เป็นกระบวนการกำจัดสีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยมักใช้ร่วมกับการปรับค่าความเป็นกรด ด่าง และสามารถใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้น ก่อนกระบวนการบำบัดทางชีววิทยา สารตกตะกอนที่นิยมใช้คือ ปูนขาว สารส้ม เพอร์รัสคลอไรด์ หรือเพอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น การกำจัดสีโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยสารส้ม เป็นผลจากการทำให้โมเลกุลของสีถูกดูดซับบนอนุภาคของสารส้ม ทำให้เกิดตะกอนของสีจมตัวลงในน้ำทิ้ง จากนั้นทำให้น้ำทิ้งเป็นกลางก่อนปล่อยลงท่อน้ำทิ้ง เทคนิคนี้สามารถกำจัดสีออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งจะมีลักษณะแตกต่างกันไปตามชนิดของโมเลกุลสี-ข้อม ถ้าสีข้อมมีโมเลกุลเล็ก เช่น สีประเภทสีแอซิด สีรีแอคทีฟ การเกิดตะกอนของสีโดยใช้สารส้มจะไม่สามารถทำได้ ดังนั้นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการตกตะกอนให้เป็นอย่างดี โดยให้สารช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอน เช่น โพลีอิเล็กโตร

ไคท์ ซึ่งต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากความเข้มข้นของโพลีอิเล็กโตรไลต์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้ง จะส่งผลเสียต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน

2. กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment)

กระบวนการนี้อาศัยจุลินทรีย์ในการลดสี โดยจุลินทรีย์ที่เติบโตขึ้นมาใหม่ จะมีการดูดซับสีไปด้วยการทำให้สามารถบำบัดสีได้ แบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

- ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์ในการทำลาย กินดูดซับ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ให้มีค่าความสกปรกลดลง

- ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated Lagoon) คัดแปลงจากการบำบัดน้ำเสียแบบที่มีอากาศ และไม่มีอากาศรวมกัน โดยเพิ่มเครื่องเติมอากาศที่ผิวน้ำ ระบบนี้คล้ายกับระบบตะกอนเร่งต่างกัน เพียงบ่อนี้จะมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ขุดจากพื้นดิน โดยตรง คุณภาพของน้ำเมื่อผ่านกระบวนการนี้จะมีค่า บีโอดีลดลงประมาณร้อยละ 30-50

3. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ เป็นกระบวนการดูดซับที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย สามารถใช้กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของของเสียที่จะถูกดูดซับ ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 400 ซึ่งโดยทั่วไป น้ำหนักโมเลกุลของของเสียในอุตสาหกรรม สีจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า 400 และสูงกว่า 1,200 ดังนั้นก่อนการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ จะต้องมีการปรับขนาด โมเลกุลของของเสียให้เหมาะสมก่อน โดยการไฮโดรไลซิสด้วยปูนขาว ซึ่งต้องใช้ปูนขาวปริมาณมากในการปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในช่วง 10-11 ซึ่งส่งผลให้พีเอชของน้ำทิ้งสูง ดังนั้น ต้องมีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนปล่อยทิ้ง ด้วยการกำจัดสีด้วยกระบวนการดูดซับบนถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลของสีดูดติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้นนั่นเอง แต่การทำให้ โมเลกุลของสีหลุดออกจากผิวของถ่านนั้นทำได้ยาก ต้นทุนการนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่จึงสูงมาก เพราะต้องผ่านการเผา และการกำจัดกากซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูง รวมถึงค่าใช้จ่ายในส่วนที่มีการปรับพีเอชก่อนปล่อยออกจากโรงงานด้วย ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่นิยมแม้จะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงก็ตาม

4. การออกซิไดซ์ด้วยโอโซน (Ozone Treatment)

โดยทั่วไปโมเลกุลสีย้อมจะมีหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นสารประกอบ อินทรีย์เป็นพวกวงแหวนกับพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยว ดังนั้นการที่จะทำลายโมเลกุลของสีนั้น ต้องทำลายหมู่โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือพันธะเดี่ยวก่อน ซึ่งการบำบัดทางชีววิทยาไม่สามารถทำได้ กระบวนการกำจัดสีโดยใช้โอโซนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ไม่นานนัก ซึ่งอาจได้รับความนิยมเมื่อมาตรฐานการปล่อยน้ำทิ้งเข้มงวดขึ้น การโอโซนเช่น (Ozonation) เป็นการออกซิไดซ์พันธะคู่ที่เป็นพันธะเคมี ของหมู่โครโม

ฟอร์ของโมเลกุลด้วยโอโซน แต่เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมากจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบในน้ำที่อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โมเลกุลของสีย้อม ซึ่งส่วนใหญ่มีประจุลบด้วยไนโตรเจนคลอรีน หรือซัลเฟอร์จะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่เป็นพิษ ต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าสารเริ่มต้นเดิม

5. เทคโนโลยีเยื่อแผ่น (Membrane Technology)

กระบวนการกำจัดสีด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) สามารถใช้ในการกำจัดสี นำเอาสารเคมีที่ใช้ในการย้อมสี และสีย้อมบางชนิดกลับมาใช้ใหม่ได้ แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

5.1 ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) ใช้สำหรับการกำจัดสีย้อม ที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกปล่อยออกจากหม้อย้อมหลังจากผ่านการล้าง โดยใช้กำจัดสีประเภทสีย้อมสีดิสเพอร์สที่ใส่ย้อมเส้นใยประเภทโพลีเอสเตอร์ และสีย้อมประเภทสีย้อมซัลเฟอร์ สีแสด และสีอะโซอิกที่ใส่ย้อมเส้นใยฝ้าย และวิสคอส (Viscose) สีย้อมคิสเพอร์สเมื่อผ่านกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

5.2 ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เหมาะสำหรับการกำจัดอิมัลชันสีย้อม และโมเลกุลของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ เป็นกระบวนการที่จะต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย (Brackish Water) และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล (Sea Water) ซึ่งเยื่อแผ่นแรกจะสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลือ จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สอง และสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 อย่างไรก็ตาม สีย้อมที่ใส่ย้อมเส้นใยประเภทฝ้าย ไม่สามารถใช้กระบวนการนี้ได้

5.3 ไดนามิก เมมเบรน (Dynamic Membrane) ใช้กำจัดสีย้อมที่มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ โดยใช้ตัวรองรับที่มีรูพรุน เช่น เหล็ก แสตนเลส วัสดุคาร์บอน หรือเซรามิก ซึ่งต่อมาได้พัฒนามาใช้ Hydrous zirconium (IV) oxide และกรดโพลีอะคริลิก (Zr/PAA) เพื่อปรับปรุงขนาดของรูพรุน กระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า

6. นาโนฟิลเตรชัน (Nano filtration)

ใช้กำจัดสีย้อมประเภทสีรีแอคทีฟที่ใส่ย้อมเส้นใยฝ้าย เนื่องจากการย้อมสีรีแอคทีฟต้องใช้สาร อิเล็กโตรไลต์ช่วยในการย้อม เช่น โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งกระบวนการนี้สามารถแยกสารพวกอิเล็กโตรไลต์เหล่านี้ออกมา และนำกลับมาใช้ได้ด้วย

7. เทคโนโลยีใหม่ๆ (New Technology)

เทคโนโลยีใหม่ๆ มากมายที่เกิดขึ้นนั้นมักมีพื้นฐานตั้งอยู่บนเทคนิคต่างๆกัน เช่น

7.1 ตัวดูดซับชนิดอนินทรีย์ ซึ่งถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น และมีการนำมาใช้กันอยู่ในโรงงานประสิทธิภาพในการกำจัดสีค่อนข้างดี อัตราการกำจัดเป็นไปอย่างรวดเร็ว ให้ผลการกำจัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ที่กำหนดไว้แม้จะมีความแปรผันของความเข้มข้นสีที่สูงหรือมีสารเจือปนก็ตาม ซึ่งต้นทุนวิธีนี้ต่ำกว่าเทคนิคอื่นๆ ที่คล้ายกันดังนั้น เทคนิคนี้จึงคุ้มค่าต่อการพิจารณาต่อไป

7.2 ระบบที่มีพื้นฐานของอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในระหว่างกำลังพัฒนา พลังงานที่ใช้จะสูง และบางครั้งคลอรีน และไฮดรอกซีเรดิคัลสามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการแตกพันธะอย่างควบคุมไม่ได้ ตัวดูดซับชนิดอินทรีย์หรือพืชแห้ง เช่น ผักตบชวาจะมีองค์ประกอบที่สำคัญ คือ เซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันน้ำตาลไว้แลกเปลี่ยน ไอออน หรือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ได้

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายของสารเคมี (Mass transfer) ที่สามารถละลายน้ำได้ไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และมนุษย์สร้างขึ้น พื้นผิวที่ดูดซับสารบนเป็นอนเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbate) ปรากฏการณ์ดูดซับนี้เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสองชนิด ซึ่งได้แก่ พื้นผิวระหว่างของเหลวกับของแข็ง พื้นผิวระหว่างของแข็งกับก๊าซ พื้นผิวระหว่างของแข็งกับของแข็ง และพื้นผิวระหว่างของเหลวกับของเหลว กระบวนการดูดซับเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้กันอย่างมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กได้จนถึงขั้น โมเลกุล นอกจากนี้ ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารปนเปื้อนได้ค่อนข้างสูงเทียบกับวิธีการตกตะกอน หรือกรองแบบธรรมดา เช่น การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสารปนเปื้อนจากอากาศและน้ำ การใช้ดินเหนียวดูดซับยาฆ่าแมลงในดิน หรือโลหะหนักจากกระบวนการฝังกลบ (Landfill) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารพิษที่จะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน

2.4.1 หลักการดูดซับ (ชุตินา, 2543)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดี และน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้จับ และติดที่ผิวของมันซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี และยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุมมีประสิทธิภาพดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพคือต้องการพื้นที่น้อย และ ไม่มีกลิ่น

2.4.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

1. การดูดซับทางกายภาพ

เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

2.4.3 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่กักพวกละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้งสามสถานะคือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว, ก๊าซ-ของเหลว, ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid-

Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำ และไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับ โมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอกการถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุลความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อย เพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับ โดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.4.4 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

1. กลไกการดูดซับ (ชุตินา, 2543)

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

1.2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดติดที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2. อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) (ชุตินา, 2543)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 4 ขั้นตอน

2.1 การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นกระบวนการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรง หรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดกระบวนการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับ

2.4 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ Active Sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมาก และอาจดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมี หรือทั้ง 2 แรง พร้อมกัน

2.4.5 ประเภทของตัวดูดซับ

1. สารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ เป็นต้น สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภท สารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2. ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่า สารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้น เพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 450-1500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-1000 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืช และสัตว์จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน

3. ประเภทของสารอินทรีย์สังเคราะห์ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม (ซึ่งถือว่าต่ำเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์) อย่างไรก็ตาม เรซินมีข้อได้เปรียบกว่า คือ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่ามาก และรีเจนเนอเรชั่นมักเป็นสารที่มีราคาถูก เช่น เกลือแกง

2.4.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ (Size and Surface Area)

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่สารภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2. ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Natural of Adsorption)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง

เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผันกับอัตราการดูดซับ

3. อัตราการปั่นกวน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกวนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกวนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกวนสูงทำให้ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มลดลง โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของสารดูดซับ

4. ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ การเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะ q เวลาใดๆมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากแรงขับเคลื่อนที่มากที่เกิดจากผลต่างของความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับปริมาณสีย้อมบนตัวดูดซับ หลังจากนั้นปริมาณดูดซับจำเพาะ q เวลาใดๆจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ซึ่งภายหลังจากการเข้าสู่สมดุลแล้ว ระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบต่อระบบ ดังนั้นในการบำบัดสีย้อมระยะเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

5. ค่า pH

การที่ pH ของสารละลายมีค่าต่ำกว่า pH_{ZPC} (pH of zero point of the charge) บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุบวกของ H^+ และการที่ pH ของสารละลายมีค่ามากกว่า pH_{ZPC} บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะแสดงประจุลบของ OH^- โดยตัวดูดซับที่ประจุบวกบนพื้นผิวจะสามารถดึงดูดโมเลกุลของสารที่ประจุลบได้ดี ดังนั้นการดูดซับสีย้อมกรดจึงเกิดได้ดีในสารละลายที่มี pH ต่ำ และเมื่อเพิ่ม pH ทำให้ปริมาณตัวดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ตัวดูดซับสีย้อมประเภทสีย้อมเบสจะเกิดได้ดีในสารละลายที่มีค่า pH สูง เนื่องจากมีแรงดึงดูดบนประจุบวกบนโมเลกุลสีย้อม และการลด pH ทำให้ปริมาณตัวดูดซับจำเพาะมีแนวโน้มลดลง (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

6. อุณหภูมิ

กระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลงแต่การดูดซับของเหลวหนัก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีค่าน้อยมาก เนื่องจากของเหลวมีค่าความจุความร้อนสูง การเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการกระตุ้นหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่แอลกอฮอล์ (Alcoholic) คาร์บอนิลิก (Carbonylic) และฟีนอลิก

(Phenolic) ซึ่งอยู่บนพื้นผิวของการดูดซับทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนตัวดูดซับกับประจุบวกบน โมเลกุลของสีย้อมบางชนิด นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

7. ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ปริมาณตัวดูดซับจำเพาะที่สมดุลเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเป็นการเพิ่มแรงขับเคลื่อนให้การถ่ายเทมวล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณของสีย้อมบนตัวดูดซับกับสารละลาย ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะที่สมดุลของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นในขณะที่ปริมาณตัวดูดซับคงที่นั้น ทำให้ร้อยละของการกำจัดสีย้อมมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสีย้อมทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้น (พรสวรรค์ และคณะ, 2553)

2.4.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ หรือไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

1. ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดยเออร์วิงแลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐาน คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งที่แน่นอน (adsorption site) โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่ง โมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากัน และคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการ

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ q_e = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม

x = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (mg)

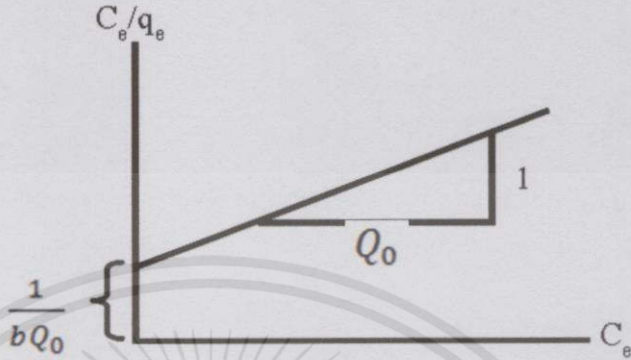
m = เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)

C_e = เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ Q_0 แทน Q_0 หรือ เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว มาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น b ทั้งห้าม b ให้คิดเป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q_0} + \frac{C_e}{Q_0} \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{bQ_0}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q_0}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

2. ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm) เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดยฟิน-เลย์ฟรุนดิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough Surface) โดยแต่ละพื้นผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่และมีการรวมพื้นผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกันข้อเสียของสมการฟรุนดิชคือใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี จากการศึกษาไอโซเทอมของฟรุนดิชที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ ดังสมการ

$$q_e = \frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n} \dots\dots\dots (3)$$

- เมื่อ q_e = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
- x = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (mg)
- m = เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)
- C_e = เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
- K_f = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
- n = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรุนดิชเมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{x}{m} = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและข้อมูลอื่นที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้

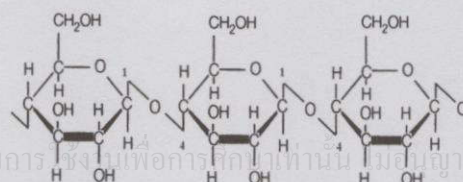
เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า K ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารหาค่า n

2.5.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวของกลูโคส พบมากในพืช เพื่อทำหน้าที่เสริมโครงสร้างของลำต้น และกิ่งก้านของพืช ผัก และผลไม้ให้แข็งแรงเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืช และพบว่าสาร Organic carbon ในโลกนี้มีมากกว่าครึ่งหนึ่งเป็นเซลลูโลสเซลลูโลสประกอบด้วย D-glucose molecules ที่จัดเป็นเส้นยาวตรงเชื่อมต่อกันด้วย β -1,4-glycosidic bond ร่างกายคนเราไม่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ แต่จะมีการขับถ่ายออกมาในลักษณะของกาก เรียกว่า เส้นใยอาหาร ช่วยกระตุ้นให้ลำไส้ใหญ่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทำให้ขับถ่ายสะดวก พืชประเภทผัก ถั่ว และผลไม้ จัดเป็นแหล่งที่ให้เส้นใยอาหาร เพราะมีเซลลูโลสอยู่ปริมาณสูง เซลลูโลสเมื่อย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เพราะมีโมเลกุลใหญ่มาก ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,250-12,500 โมเลกุล พบมากที่สุดในพืชเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช ในพืชผักผลไม้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อเยื่อของพืช มีมากตามใบผัก ก้านผัก และเปลือกนอกของผลไม้ การรับประทานเซลลูโลสเป็นประโยชน์ คือ ช่วยในการขับถ่ายได้ โดยทำให้เป็นกากอาหารในลำไส้ทำหน้าที่กระตุ้นให้ลำไส้ใหญ่เกิดการขับถ่ายกากอาหารที่ไม่ย่อย และป้องกันท้องผูก เซลลูโลสเมื่อย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมีสูตรโครงสร้างซับซ้อน มีสูตร $(C_6H_{10}O_5)_n$ ประกอบด้วย โมเลกุลของโมโนแซ็กคาไรด์จำนวนมากมายหลายพัน โมเลกุล

ชนิดของเซลลูโลส แบ่งตามความสามารถในการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. แอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ไม่สามารถละลายในสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 %
2. เบต้า-เซลลูโลส (β -cellulose) คือ เซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 % ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพที่เป็นกรด
3. แกมมา-เซลลูโลส (γ -cellulose) คือ เซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5 % และสารละลายกรด แต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์



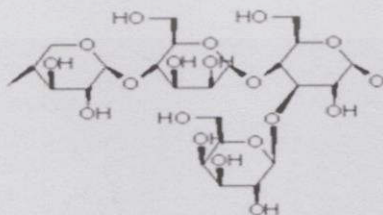
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส (ปรีชา, 2528)

2.5.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ และมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือมีไซโลสมากที่สุดถึง 85–90 % และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 กรดแมนนูโรนิก (Mannuronic acid) และกรดกาแลคตูโรนิก (Galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกละลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจาง หรือ เอนไซม์เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย

โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสของพืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และลิกนินทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรง และโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลสอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิ-เซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (Delignification) ร่วมด้วย

สมบัติของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด และพบส่วนนี้อยู่ในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกละลาย และสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพคติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจล ได้ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส

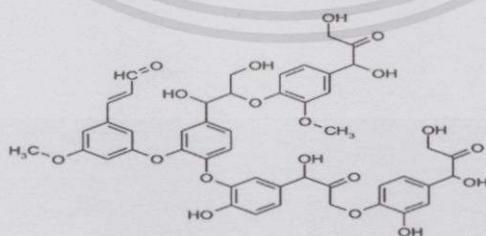


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (ปรีชา, 2528) นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุลทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมี และเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์โครงสร้างของลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็น โมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อย คือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บน โมเลกุลลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมทอกซี (Methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน

สมบัติของลิกนิน ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญ คือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำ และตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูงขณะที่บางส่วนของกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (Alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (Dioxane) ไพริดีน (Pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้ เมื่อมีการเติมหมู่เมธิล (Methylation) และหมู่อะซิetyl (Acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมไฮดรอกซีไฮดรอกซีก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วยการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์ และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องทำการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของลิกนิน (ปรีชา, 2528)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

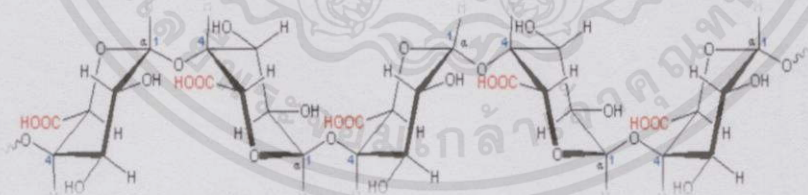
2.5.4 เพคติน (Pectin)

เพคติน (Pectin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภท Heteropolysaccharide มีหน่วยย่อยคือกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) ประมาณ 65 % โดยน้ำหนัก) และเมทิลิกาแล็กทูโรเนต และน้ำตาลหลายชนิด เช่น Rhamnose, Galactose และ Arabinose พบตามธรรมชาติในผนังเซลล์ของพืช (Plant cell wall) และรอยต่อระหว่างผนังเซลล์ โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส (Cellulose) ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์เพคตินที่พบในพืช ประกอบด้วยสาร 4 ชนิด คือ โปรโตเพคติน (Protopectin) กรดเพคตินิก (Pectinic acid) เพคติน (Pectin) และกรดเพกติก (Pectic acid)

เพคตินมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผักผลไม้สด และผลิตภัณฑ์จากผักผลไม้ เพคตินที่อยู่ในผลไม้ดิบหรือห่าม จะอยู่ในรูปของโปรโตเพคติน ซึ่งไม่ละลายน้ำ ระหว่างการสุกของผลไม้โปรโตเพคตินจะเปลี่ยนเป็นเพคติน ซึ่งละลายน้ำได้ ทำให้ผลไม้มีเนื้อสัมผัสนุ่มลง ความแน่นเนื้อลดลง ในผลไม้มีเอนไซม์ที่ย่อยเพคติน (Pectinase) ได้แก่ เพคตินเมทิลเอสเทอเรส (Pectin methyl esterase) เมื่อเซลล์แตกเอนไซม์นี้จะย่อยสลายเพคติน

การใช้เพคตินในอาหารเพคตินเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ใช้ในอาหารเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) เพคตินที่ผลิตเป็นการค้าสกัดได้จากเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม (Citrus) กากของแอปเปิ้ลที่คั้นน้ำแล้ว (Apple pomace) และหัวบีท (Beet)

โครงสร้างโมเลกุลของเพคตินเป็น Polysaccharide ประเภท Heteropolysaccharide โมเลกุลของเพคตินเป็นโพลีเมอร์ของ α -D-galacturonic acid ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิดแอลฟา 1-4 ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลอิสระ (COOH) และหมู่คาร์บอกซิลที่รวมอยู่กับ เมทิล (COOCH₃) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างทางเคมีของเพคติน (Tamaki, 2007)

คุณสมบัติทางเคมีของเพคติน สารกลุ่มเพคตินเป็นโพลีแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนในพืช พบในพืชชั้นสูงโดยปรากฏในชั้นระหว่างเซลล์หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังเซลล์ ทำให้เกิดช่องสำหรับอาหารและน้ำผ่านในผนังเซลล์ สารกลุ่มเพคตินเป็นสารเคลือบเส้นใยเซลลูโลสที่สำคัญ และอาจเชื่อมต่อกับพันธะโคเวเลนต์กับโพลีเมอร์อื่นๆ สารกลุ่มเพคตินจัดจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ โปรโตเพคติน กรดเพคตินิก และกรดเพคติกเพคตินมีอิทธิพลต่อพัฒนาการการเจริญไปถึงการแก่ชรา และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชและผลไม้

2.6 อ้อย (Bagasse) (คู่มือการเพิ่มผลผลิต, 2548)

อ้อยได้ถูกนำไปจากเกาะนิวกินี โดยการติดต่อด້าขาย และการล่าเมืองขึ้นของมนุษย์สมัยก่อนประวัติศาสตร์ อย่างไรก็ตาม บรานดิซได้สันนิษฐานการแพร่กระจายของอ้อยจากนิวกินี ไว้เป็น 3 ทางตามลำดับเวลา คือ

1. ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้สู่หมู่เกาะ โซโลมอน นิวเฮบริดิส และนิวกาเลโดเนีย เกิดขึ้นนานนับจำนวนหมื่นๆปีก่อนคริสต์ศักราช
2. ไปทางทิศตะวันตกเข้าสู่หมู่เกาะชาว ประเทศอินโดนีเซีย แหลมมาลายู ฟิลิปปินส์ อินโดจีน ซึ่งรวมถึงประเทศไทย ตลอดถึงชายฝั่งแถบอ่าวเบงกอล ประเทศอินเดีย การกระจายตัวด้านนี้เริ่มเมื่อประมาณ 6,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช กว่าอ้อยจะกระจายตัวจากนิวกินีไปถึงอินเดียนั้น ใช้เวลาถึง 3,000 ปี การกระจายตัวทางทิศตะวันตกนี้มีความสำคัญมาก เพราะได้ก่อให้เกิดการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมน้ำตาลจนมีความเจริญอย่างที่เห็นอยู่ในปัจจุบัน
3. ไปทางทิศตะวันออกเฉียงสู่เกาะต่างๆ คือ ฟิจิ ตองกา ซามัว คุกมาร์เคซัส โซโซเอตี อิสเทอร์และฮาวาย รวมทั้งเกาะอื่นๆในมหาสมุทรแปซิฟิกด้วย การกระจายตัวตามทิศทางดังกล่าว เกิดขึ้นเมื่อประมาณไม่เกิน 500 ปี หลังจากที่อ้อยถึงอ่าวเบงกอลแล้ว

ลักษณะทั่วไปของอ้อย

ส่วนใหญ่เป็นลักษณะของอ้อยดั้งเดิม ถิ่นกำเนิดอยู่แถบหมู่เกาะนิวกินี และอ้อยลูกผสม (Hybrid cane) ที่ได้จากการผสมระหว่างอ้อยชนิดต่างๆ โดยมีลักษณะทั่วไป ดังนี้

ราก อ้อยมีระบบรากฝอย (Fibrous Root System) แผ่กระจายออกโดยรอบลำต้นในรัศมีประมาณ 50-100 เซนติเมตร ลึก 100-150 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม อ้อยไม่มีรากแก้ว นอกจากเมื่อปลูกด้วยเมล็ด ซึ่งลูกอ้อยมีรากแก้ว เรียกว่า ไพมารี รุท (Primary Root) หรือ เซมิ-นอล รุท (Seminal Root) ปกติอ้อยขยายพันธุ์โดยใช้ลำต้นตัดเป็นท่อน ท่อนละ 2-3 ตา แต่ละท่อนเรียกว่า ท่อนพันธุ์ (sett หรือ cutting หรือ seedpiece หรือ seed cane) เมื่อนำท่อนพันธุ์ลงปลูกจะปรากฏราก 2 ชุด คือ

1. รากของท่อนพันธุ์ (set root หรือ cutting root) อาจเรียกว่า รากชั่วคราว เป็นรากที่เกิดจากปุ่มราก ในบริเวณเกิดรากของท่อนพันธุ์ รากพวกนี้มีลักษณะพอม และแตกแขนงมาก ในขณะที่ตาของท่อนพันธุ์กำลังเจริญเป็นหน่อ (Shoot) จะได้น้ำ และธาตุอาหารจากคินทางรากเหล่านี้ รากของท่อนพันธุ์จะทำหน้าที่ต่อไปจนกระทั่งหน่อเกิดราก หน้าที่ของรากท่อนพันธุ์ก็จะหมดไป รากท่อนพันธุ์ รวมทั้งตัวของท่อนพันธุ์เดิมก็จะเสื่อมสภาพลงไปด้วยเช่นกัน

2. รากของหน่อ (Shoot Root) หรือ อาจเรียกว่า รากถาวร เป็นรากที่เกิดจากปุ่มรากของหน่อที่เกิดจากท่อนพันธุ์นั้น รากชนิดนี้มีขนาดใหญ่กว่ารากชนิดแรก เมื่อเกิดใหม่จะมีลักษณะอวบ ไม่มีแขนง สีขาว และสีจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเข้มเมื่ออายุมากขึ้น แม้ว่าปุ่มรากที่ปรากฏในบริเวณเกิด

รากของแต่ละข้อ จะมีจำนวนจำกัด แต่เนื่องจากส่วน โคนของลำต้นที่อยู่ใต้ดินมีปล้องถี่มาก ทำให้ รากมีจำนวนมาก รากจะเจริญออกมาจากปุ่มรากนี้เท่านั้น การเจริญของรากจะเกิดทยอยกัน โดย ต่อเนื่อง ในขณะที่รากเก่ากำลังเสื่อมสภาพลงนั้น รากใหม่ที่เกิดมาก็จะทำหน้าที่แทน แม้ว่ารากที่ เกิดในแต่ละข้อมีจำนวนจำกัด แต่การแตกสาขาไม่มีขอบเขตจำกัด โดยเฉพาะในดินที่เหมาะสม รากเหล่านี้สามารถขยับในแนวตั้งและแนวนอนได้มากกว่า 100 เซนติเมตร นอกจากรากที่อยู่ใต้ดิน แล้ว ยังมีรากที่เกิดจากข้อเหนือพื้นดิน ทั้งข้อที่อยู่ใกล้ผิวดิน และข้อที่สูงขึ้นไป อ้อยบางพันธุ์อาจมี รากยาวที่ข้อ ซึ่งอยู่ห่างจากพื้นดินมาก

ลำต้น (Stalk) อ้อยได้ชื่อว่า “หญ้ายักษ์” (Giant grass) ทั้งนี้ เพราะมีลำต้นสูงใหญ่ อ้อยที่ เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน อาจมีลำต้นสูงประมาณ 2-3 เมตร และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5-5.0 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพแวดล้อม และการปฏิบัติรักษาของเกษตรกร ลำต้น ประกอบด้วยข้อ และปล้องจำนวนมาก ทั้งข้อ และปล้องรวมเรียกว่า จอยต์ (Joint) ซึ่งเรียกง่าย ๆ ว่า “ปล้อง” อ้อยที่ตัดเมื่ออายุ 12 เดือน จะมีปล้อง 20-30 ปล้อง โดยปล้องอ้อยจะมีปล้องเพิ่มขึ้น โดย เฉลี่ยประมาณเดือนละ 3 ปล้อง แต่ละปล้องเมื่อโตเต็มที่ จะยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร ความยาว ของปล้องขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม ปล้องที่เกิดในช่วงที่มีปริมาณน้ำพอเหมาะจะยาวกว่า ปล้องที่เกิดในช่วงที่มีปริมาณน้ำมากหรือน้อยจนเกินไป อย่างไรก็ตาม แม้ว่า จะได้รับปริมาณน้ำอย่าง เหมาะสม ความยาวของปล้องก็จะแตกต่างกัน คือ ปล้องที่อยู่บริเวณ โคนต้นจะสั้นมาก แล้วจะ ค่อยๆ ยาวขึ้น แล้วจะสั้นลงอีกเมื่อใกล้เข้าสู่บริเวณยอด ลักษณะดังกล่าวจะปรากฏในอ้อยที่ไม่มีดอก ส่วนอ้อยที่มีดอก ปล้องที่รองรับช่อดอกจะมีความยาวที่สุด แล้วลดลงตามลำดับ จนกระทั่งถึงส่วน ที่ปล้องมีความยาวไล่เลี่ยกัน

รูปร่างของปล้อง (Internode Patterns) ปล้องจะมีรูปร่างแตกต่างกันตามชนิดและพันธุ์ เช่น เป็นรูปทรงกระบอก (Cylindrical) มัดข้าวต้ม (Tumescant) กลางคอด (Bobbin-Shaped) โคนใหญ่ (Conoidal) โคนเล็ก (Obconoidal) หรือ โค้ง (Curved) การจัดเรียงของปล้องอาจเป็นแนวเส้นตรง หรือซิกแซกก็ได้

สีของลำต้น (Stalk Color) สีของลำต้นแตกต่างกันตามพันธุ์ และสภาพแวดล้อม โดยทั่วไป มีสีแตกต่างกันตั้งแต่สีเขียวอ่อนถึงสีม่วงแก่เกือบดำ สีต่างๆ เหล่านี้เกิดจากรงควัตถุ (Pigments) ที่เป็นพื้นฐาน มี 2 ชนิด คือ ชนิดแรกสีเขียว เกิดจากคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ซึ่งอยู่ในเนื้อเยื่อของ ลำต้น ในส่วนที่เรียกว่า เอพิเดอร์มิส (Epidermis) และส่วนที่อยู่ถัดเข้าไปส่วนชนิดที่สองสีแดง เกิด จากแอนโทไซยานิน ปริมาณของรงควัตถุทั้ง 2 ชนิด มีมากน้อยแตกต่างกันไป พวกที่มีแอนโทไซยา นินอยู่มากลำต้นก็จะออกสีแดง ในทำนองเดียวกัน ต้นที่มีสีเขียวอยู่มากก็จะออกสีเขียว

นอกจากนี้ก็อาจมีรงควัตถุอื่นๆปนอยู่อีก เช่น รงควัตถุสีแดงปนเหลืองหรือส้ม ได้แก่ คาโรทีนอยด์ (Carotinoid) และรงควัตถุสีเหลือง ได้แก่ แซนโทฟิลล์ (Xanthophyll) เป็นต้น

ส่วนประกอบของข้อและปล้อง

1. ตา (Bud หรือ Eye) เกิดที่ข้อในบริเวณเกิดราก (Root Band) โดยปกติแต่ละข้อจะมีหนึ่ง ตาเกิดสลับกันคนละข้างของลำต้น ในบางกรณีบางข้ออาจไม่มีตาหรือมีมากกว่าหนึ่งตาก็ได้ ขนาด รูปร่าง และลักษณะของตาขึ้นอยู่กับพันธุ์

2. บริเวณที่เกิดราก (Root Band หรือ Root Ring) คือ อาณาเขตที่อยู่ระหว่างรอยกาบ และ วงเจริญเป็นที่เกิดปมราก ความกว้างของบริเวณนี้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ ด้านที่มีตามักจะกว้างกว่าด้านที่ อยู่ตรงข้ามสี ความกว้าง และปริมาณไข (Wax) ที่เกาะ ตลอดจนระดับของบริเวณนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับ ส่วนของปล้องจะแตกต่างกันตามพันธุ์

3. ปมราก (Root Primordia หรือ Root Initials) เป็นจุดเล็กๆในบริเวณที่เกิดราก รากจะ เจริญออกมาจากปมเหล่านี้ ปมรากที่อยู่ตอนบนมีขนาดเล็กกว่าตอนล่าง สี ขนาด จำนวนแถว และ การจัดเรียงของปมรากจะเป็นลักษณะประจำพันธุ์

4. วงเจริญหรือวงแหวน (Growth Ring) คือ ส่วนที่มีลักษณะคล้ายวงแหวนเรียบที่อยู่เหนือ บริเวณที่เกิดราก เป็นส่วนที่มีไขเกาะน้อย มีสีแตกต่างกันตามพันธุ์ การที่เรียกวงเจริญก็เพราะว่า ส่วนนี้เจริญเติบโตอย่างเห็นได้ชัดในอ้อยที่ลึ้ม ส่วนของวงเจริญด้านล่างจะยึดตัวมากกว่า ทำให้ลำ ต้นตั้งขึ้น วงเจริญอยู่ตรงกับตา อาจโค้งขึ้นเหนือตาหรือผ่านไปทางด้านหลังตาก็ได้ ซึ่งเป็นลักษณะ ประจำพันธุ์เช่นกัน

5. รอยกาบ (Leaf Scar หรือ Sheath Scar) เป็นรอยที่เกิดขึ้นหลังจากกาบใบหลุดแล้ว การ หลุดยากหรือง่ายของกาบใบเป็นลักษณะประจำพันธุ์ นอกจากนี้ลักษณะบางอย่าง เช่น ความลาดเท และความยื่นบริเวณใต้ตาก็เป็นลักษณะประจำพันธุ์เช่นกัน

6. วงไข (Wax Ring) คือ ส่วนของปล้องที่มีไขเกาะมากกว่าส่วนอื่นๆ มีลักษณะเป็นวง แหวนอยู่ใต้รอยกาบ ส่วนนี้อาจจะคอดหรือเสมอกับลำต้น ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์

7. รอยแตกคุดหรือรอยแตกกลางงา (Corky Cracks) คือ รอยแตกเล็กๆที่ผิวหรือเปลือกของ ลำต้นตามความยาวปล้อง ลักษณะและปริมาณของรอยแตกขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม

8. รอยแตกลึก (Growth Crack หรือ Ring Crack) เป็นรอยแตกขนาดใหญ่ เกิดตามความยาว ของลำต้นลึกเข้าไปในเนื้ออ้อย รอยแตกส่วนมากมักจะยาวตลอดปล้อง ปล้องละรอย และรอย ดังกล่าวมักเกิดขึ้นในบางปล้องเท่านั้น การเกิดรอยแตกลึกขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม

9. รอยตกสะเก็ด (Corky Patch) เป็นรอยแตกคุดๆที่ผิว คล้ายตกสะเก็ด จำนวนและลักษณะ ที่เกิด ขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม

10. ร่องตา (Bud Furrow หรือ Bud Groove) เป็นร่องที่เกิดขึ้นที่ปล้องซึ่งอยู่ตรงและเหนือ ตาขึ้นไป แถบบางพันธุ์อาจไม่มี สำหรับพันธุ์ที่มีร่องนี้อาจยาว สั้น ตื้น หรือลึก แล้วแต่ชนิดพันธุ์

เมื่อตัดลำต้นออกตามขวาง จะปรากฏส่วนที่แตกต่างกันให้เห็น ได้ชัด แบ่งได้เป็น 3 ส่วน

ส่วนแรก ส่วนนอกสุดที่มีความแข็งมาก เรียกว่า เปลือก (Hard Rind) ถัดเข้าไปซึ่งนุ่มกว่า เรียกว่า

เนื้ออ้อย (Flesh) ประกอบด้วย เซลล์ที่ทำหน้าที่เก็บน้ำตาล (Parenchyma หรือ Storage Cells) และไฟเบอร์ (Fiber) ซึ่งส่วนหลังนี้จะเห็นได้ชัดเจนเมื่อฝนรอยตัด จากการศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ปรากฏว่า ส่วนที่เป็นเปลือกประกอบด้วยเซลล์ผิวหนา ซึ่งมีลิกนิน (Lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เปลือกทำหน้าที่ให้ลำต้นแข็งแรง และป้องกันส่วนที่อยู่ภายในลำต้น ส่วนที่เป็นไฟเบอร์นั้นที่จริงคือส่วนของท่อน้ำ ท่ออาหารนั่นเอง ในลำต้นหนึ่งๆจะมีท่อดังกล่าวอยู่ประมาณ 1,200 ท่อ ความหนาแน่นของไฟเบอร์มีมากที่บริเวณใกล้เปลือก และมีน้อยลงเมื่อใกล้จุดกึ่งกลางของลำต้น ที่จุดกึ่งกลางอาจจะตันหรือมีรูเล็กๆ นอกจากนี้บริเวณใกล้จุดกึ่งกลางมักจะมีไส้ (Pith) รวมเป็นกลุ่มที่อาจกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งเป็นลักษณะประจำพันธุ์ ในส่วนที่เป็นปล้อง ท่อน้ำ ท่ออาหาร จะขนานกันไป แต่ที่ข้อจะแยกตัวออกโดยบางส่วนจะไปสู่ปล้องที่อยู่ถัดขึ้นไป และบางส่วนแยกไปสู่กาบใบ ปุ่มราก หรือตา เป็นต้น

ส่วนที่นิ่มซึ่งอยู่รอบๆไฟเบอร์ คือ เซลล์ ซึ่งทำหน้าที่เก็บน้ำตาล เมื่ออ้อยถูกบีบด้วยลูกหีบ เซลล์เหล่านี้จะแตก ปล่อน้ำตาลที่อยู่ภายในออกมา ความแข็งหรือความนิ่มของเนื้ออ้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ และคุณภาพของไฟเบอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับพันธุ์ และสภาพแวดล้อม พวกอ้อยเขียวจะมีลำใหญ่ นุ่ม เช่น อ้อยสิงคโปร์และมอริเชียส จะมีไฟเบอร์น้อยกว่าร้อยละ 10 ส่วนพวกลำเล็กและแข็ง เช่น พันธุ์ CO 281 อาจมีถึงร้อยละ 17 เป็นต้น พื้นที่หน้าตัดลำต้นของแต่ละพันธุ์ จะแตกต่างกันไป ตั้งแต่รูปร่างค่อนข้างกลมจนถึงรูปไข่ หรือรี

ใบอ้อย จะมีลักษณะคล้ายใบข้าว แต่มีขนาดใหญ่และยาวมากกว่าใบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาบใบ และแผ่นใบ กาบใบ คือ ส่วนที่ติด และโอบรอบลำต้นทางด้านที่มีตา การโอบรอบลำต้นของกาบจะสลับข้างกัน เช่น ใบหนึ่งขวาทับซ้าย ใบถัดขึ้นไปจะเป็นซ้ายทับขวา ฐานกาบใบกว้างที่สุดแล้วเรียวยาวสู่ปลาย ส่วนแผ่นใบ จะอยู่ต่อจากกาบใบขึ้นไป ทั้งสองส่วนจะแยกจากกันตรงรอยต่อ (Blade Joint) ด้านในของรอยต่อนี้ จะมีส่วนยื่นเป็นเยื่อบางๆ รูปร่างคล้ายกระจับ เรียกว่า ลิ้นใบ (Ligule) ที่ส่วนปลายของกาบใบจะมีความกว้างมากกว่าฐานของแผ่นใบ จึงทำให้มีส่วนเกินซึ่งมักจะยื่นขึ้นไปข้างบน เรียกว่า หูใบ (Auricle) ซึ่งอาจมีทั้งสองข้าง ข้างเดียว หรือไม่มีเลยก็ได้ ในกรณีที่มีข้างเดียวมักจะอยู่ด้านในเสมอ ลักษณะของรูปร่างของลิ้นใบและหูใบจะแตกต่างกันตามพันธุ์ กาบใบส่วนมากมักมีสีแตกต่างจากตัวใบ เช่น สีเขียวอ่อน หรือเขียวอมม่วง เป็นต้น บริเวณหลังกาบใบอาจมีขน และมีไขเกาะ ซึ่งลักษณะดังกล่าวข้างต้น จะมีลักษณะที่จำเพาะของแต่ละชนิดพันธุ์

ช่อดอก (Inflorescence) ดอกอ้อยเกิดเป็นช่อที่ยอดของลำต้น ช่อดอกมีลักษณะคล้ายหัวถูกศร จึงมีชื่อเรียกโดยเฉพาะว่า “แอโรว์” (Arrow) การออกดอกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พันธุ์ อายุ และสภาพแวดล้อม ซึ่งสภาพแวดล้อมที่สำคัญ ได้แก่ ช่วงแสง (Photoperiod) หรือความยาวของวัน อุณหภูมิและความชื้น ปัจจัยเหล่านี้จะต้องมีอย่างเหมาะสม และเป็นเวลานานพอจึงจะทำให้อ้อยออกดอก

ดอกอ้อย จะมีขนาดเล็กมาก เกิดเป็นคู่ๆ ในแต่ละคู่ ดอกหนึ่งจะมีก้าน (Pedicelled หรือ Stalked-Spikelet) ส่วนอีกดอกจะไม่มีก้าน (Sessil-Spikelet) ที่รอบฐานของแต่ละดอกมีขนยาวสีขาวคล้ายไหมจำนวนมาก เรียกว่า บริสเทิล หรือ คัลลัสแฮร์ (Bristle หรือ Callus Hair) ก่อนดอกบาน ขนเหล่านี้จะแนบอยู่กับตัวดอก เมื่อดอกบานก็จะกางออกโดยรอบเป็นรัศมี ทำให้คล้ายทำด้วยไหมทั้งซ้อ แต่ละดอกมีกลีบดอก 3 กลีบ เรียงจากข้างนอกเข้าไป เรียกว่า กาบนอก (Outer Glume) กาบใน (Inner Glume) และสเตอร์ราลล์เลมมา (Sterile Lemma) หรือ กาบที่สาม (Third Glume) ตามลำดับ

เมล็ด เมล็ดอ้อยเป็นผล (Fruit) ชนิดคาริออพซิส (Caryopsis) คล้ายเมล็ดข้าว แต่มีเล็กกว่ามาก ตามปกติเมล็ดอ้อยมักจะติดแน่นอยู่กับส่วนของดอก จึงมีชื่อเรียกโดยเฉพาะ ว่า พืชซ์ หรือ ฟลัฟฟ์ (Fuzz หรือ Fluff) เมล็ดเหล่านี้ ถ้าเพาะในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมก็จะงอกเป็นต้นอ้อยใหม่ได้

ประโยชน์จากอ้อย

ตามตำรายาไทยจะใช้ลำต้นเป็นยาขับปัสสาวะ โดยใช้ลำต้นสด 70-90 กรัม หรือแห้ง 30-40 กรัม หั่นเป็นชิ้น ต้มน้ำ แบ่งดื่มวันละ 2 ครั้ง ก่อนอาหาร แก้ไตพิการ หนองใน และขับนิ่ว แพทย์พื้นบ้านใช้ขับเสมหะ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า “อ้อยแดง” มีฤทธิ์ขับปัสสาวะในสัตว์ทดลองด้วย

นอกจากนี้ อ้อยยังเป็นพืชที่ให้ความหวาน สามารถนำมาแปรรูปได้หลายชนิด กากของลำต้นสามารถนำมาทำเป็นกระดาษ และปุ๋ยได้

2.7 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ให้เส้นใย

ชานอ้อย (Bagasses)

อ้อยเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว จำพวกหญ้าที่อยู่ในสกุล (Genus) Saccharum ซึ่งเป็นตระกูลเดียวกับข้าวฟ่าง ข้าวโพด และหญ้าจอบหนัสนั้น (Saccharum officinarum) ชอบอากาศร้อน แสงแดดจัด และชุ่มชื้น นิยมปลูกพื้นที่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 25 องศาเหนือและใต้ ในประเทศไทยสามารถปลูกได้ทุกภาค ยกเว้นภาคใต้ การปลูกขยายพันธุ์โดยใช้ท่อนพันธุ์อ้อยที่ปลูกในประเทศไทย มี 2 ชนิด คือ อ้อยชนิดเปลือกแข็งใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล และชนิดเปลือกอ่อนใช้ขับเคี้ยวหรือทำเป็นน้ำอ้อย

จากการสำรวจปริมาณชานอ้อยทั้งหมด จากกรมวิชาการเกษตรสำรวจประเมินชานอ้อยของโรงงานผลิตน้ำตาล 46 โรงงาน พบว่า โรงงานทั้งหมดสามารถผลิตชานอ้อยโดยเฉลี่ย 338,544.85 ตัน มีเพียง 11 โรงงาน มีการใช้ชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมด มี 2 โรงงาน ขายให้กับโรงงานผลิตแอลกอฮอล์ในราคาเฉลี่ย 63.33 บาทต่อตัน และมี 3 โรงงาน ขายให้กับโรงงานน้ำตาลอื่นๆ ในราคาเฉลี่ย 66.33 บาทต่อตัน อีก 8 โรงงาน ขายให้กับโรงงานกระดาษ และบอร์ดในราคา

เฉลี่ย 187.5 บาทต่อตัน บางโรงงานนำขานอ้อยไปเพาะเห็ดฟาง นอกจากนำไปใช้ประโยชน์แล้วยังมีเหลือเฉลี่ย 30,865.29 ตัน ซึ่งจะเผาทิ้ง เมื่อมองถึงประโยชน์ของขานอ้อยให้มีคุณค่าสูงขึ้นจากสถิติปริมาณผลผลิตอ้อย

1. ส่วนประกอบโครงสร้างทางกายภาพของขานอ้อย

ในการผลิตแผ่นชั้นไม้อัดโดยการใช้วัตถุดิบจากขานอ้อย วัตถุดิบขานอ้อย ในส่วนของเส้นใยของลำต้นอ้อยหลังผ่านการบีบคั้นสกัดเอาน้ำตาลออกแล้ว จะประกอบด้วยเส้นใย และของแข็งที่ละลายได้จำนวนเล็กน้อย ความเป็นเส้นใยของขานอ้อยมีสูง และละเอียด มีความแข็งแรงและอ่อนตัวได้ง่าย (Flexible) และมีไส้กลาง (Pith) หรือ Parenchy ปะปนอยู่ด้วยในปริมาณที่มากถึง 30 % ทำให้มีผลเสียต่อการนำเส้นใยจากขานอ้อยไปทำไม้อัดชนิดความหนาแน่นปานกลาง

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบโครงสร้างทางกายภาพของขานอ้อย

ชนิดของเนื้อเยื่อ	% น้ำหนัก	% การกระจายของเซลล์
เนื้อเยื่อไฟเบอร์ (True fiber)	55	35
ท่อเวลเซล (Vessel)	20	17
พิต (Pith)	20	35
ส่วนที่ไม่ใช่ไฟเบอร์	5	13

ลำต้นอ้อย ประกอบด้วยเนื้อเยื่อไฟเบอร์ (True fiber) เป็นเซลล์รูปทรงกระบอกของเปลือกไม้และเนื้อเยื่อลำเลียง มีผนังหนา และเหนียว พิต (Pith) เป็น Parenchyma cell ของเนื้อเยื่อชั้นในของลำต้น มีรูปร่างไม่แน่นอน ผนังบางและนุ่ม เนื้อเยื่อไฟเบอร์ และองค์ประกอบทางเคมีเกือบจะเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างแตกต่างกันมาก เนื้อเยื่อไฟเบอร์มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางสูงประมาณ 70:1 ในสภาพเปียก เมื่อนำมาทำให้แห้งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การยึดตัวและหดตัวจะมีค่าสูง เส้นใยแต่ละเส้นจะอยู่ใกล้กัน และเชื่อมติดกัน ทำให้มีความแข็งแรงยึดตัวกันได้ดี ส่วนพิตจะมีขนาดรูปร่างไม่แน่นอน มีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5:1 แต่ละเซลล์จะไม่เชื่อมติดกัน ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์แต่มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำที่ดี สามารถดูดซึมน้ำได้หลายเท่าของน้ำหนักของมัน แต่การใช้ประโยชน์ไม่แพร่หลาย ส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อไฟเบอร์ มีลักษณะเหนียว ผนังหนา มีรูปร่างเป็นเซลล์ไฟเบอร์ยาวคล้ายทรงกระบอก เช่นเดียวกับเนื้อเยื่อไม้ มักอยู่รอบนอกต้นอ้อย มีเส้นใยที่ยาว ให้ค่าความเรียว (Slenderness) ซึ่งกำหนดโดยอัตราส่วนของความยาวต่อความกว้างของเส้นใย (Length/Width) ประมาณ 70 เท่า ส่วนพิตมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม ผนังบางมีขนาดรูปร่างที่แตกต่างกัน และมักอยู่ส่วนในของลำต้น มีขนาดเส้นใยสั้น ให้ค่าสัดส่วน (Ratio) ของ Length/Width เพียง 5 เท่า ส่วนประกอบทางเคมีคล้ายไฟเบอร์ ค่าสัดส่วนของความเรียว (Slenderness) ของเส้นใยเป็นตัวชี้ให้ทราบว่าวัสดุที่ให้เส้นใยชนิดไหนมี

ความเหมาะสมต่อการนำไปผลิตแผ่นใยไม้อัด วัสดุชนิดใดที่ให้ความเร็วของเส้นใยสูงมักเกิดการประสานตัวระหว่างเส้นใยได้ดีกว่า และส่งผลให้แผ่นเส้นใยไม้อัดที่ได้มีค่าความแข็งแรงสูง

2. ส่วนประกอบทางเคมีของขานอ้อย

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของ β -glucose ต่อกันด้วยพันธะ β (1-4) ที่มีสูตร $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นโครงสร้างในเนื้อเยื่อพืช โดยจะพบอยู่ร่วมกับลิกนิน เพนโตแซนกัน แทนนิน ไขมัน และสารที่ทำให้เกิดสี เซลลูโลสจะมีโมเลกุลยาวและแข็ง การย่อยเซลลูโลสจะได้ Cellobiose และสุดท้ายจะได้กลูโคสโดยเอนไซม์ β -glucosidases จำนวนกลูโคสที่มัต่อกัน หรือ Degree of polymerization (Dp) จะมีค่าแตกต่างกัน และสามารถมีค่า Dp สูงถึง 10,000 หน่วย และมีน้ำหนักโมเลกุล 1,620,000 สำหรับ Dp เซลลูโลสของกากอ้อย เท่ากับ 2,000-3,000 หน่วย

เฮมิเซลลูโลส และเพนโตแซนจะประกอบด้วย หน่วยน้ำตาลเพนโตสมากกว่ากลูโคส และมีค่า Dp ต่ำกว่าประมาณ 40 หน่วย ไม่ละลายน้ำ ส่วนเพนโตแซนเป็นรูปหนึ่งของเฮมิเซลลูโลส และสามารถละลายน้ำได้ เฮมิเซลลูโลส และเพนโตแซนส่วนมากจะเป็น Heteropolysaccharides

ลิกนินเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส สูตรโมเลกุล $C_{49}H_{52}O_{14}$ โครงสร้างจะประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่ฟีนอลที่มี และ ไม่มีการเติมหมู่เมธิล

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของขานอ้อย

ส่วนประกอบของขานอ้อย	อัตราส่วน
Cellulose	47.0
Lignin	19.5
Hemi-cellulose	25.1
Ash	1.4
อื่นๆ	0.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทนา และคณะ 2555 ได้ทำการศึกษาถึงการดูดซับสีย้อมเบสิก (Astrazon® Red BBL 200%) ด้วยสาหร่ายน้ำจืดสีเขียวสกุล *Spirogyra* ซึ่งดำเนินการทดลองแบบกะ และศึกษาถึงปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น พีเอชของสารละลาย, ปริมาณของตัวดูดซับ และ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมต่อการดูดซับสีย้อมเบสิก โดยมวลชีวภาพจากสาหร่าย และ ความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกโดยมวลชีวภาพจากสาหร่าย ด้วยการนำตัวดูดซับแห้งมา กวนในสารละลายสีย้อมเบสิกที่พีเอชต่างๆ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ วิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายโดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ความ เข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า มวลชีวภาพ จากสาหร่ายมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมเบสิกมากที่สุดที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 และผลของ ปริมาณของตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับ ที่จุดสมดุลบ่งชี้ว่าการดูดซับสีย้อมเบสิกลดลง เมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับเบสิกทางชีวภาพของ สาหร่ายจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น

พรสวรรค์ และคณะ 2553 ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนในสีย้อมด้วยการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับจากธรรมชาติที่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม, ระยะเวลาในการดูดซับ, อัตราส่วนของตัวดูดซับต่อ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม, ความเป็นกรดด่างของสารละลาย, อุณหภูมิของการดูดซับ, ความ เข้มข้นไอออนในสารละลาย, ขนาดตัวดูดซับ, ความเร็วรอบในการปั่นกวน, โครงสร้าง และขนาด โมเลกุลของสีย้อม และองค์ประกอบของตัวดูดซับ พบว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ส่งผลต่อการดูดซับที่ ต่างกัน สามารถบอกถึงแนวโน้มที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เพิ่มความสามารถของตัว ดูดซับนำไปสู่การลดต้นทุน และลดความเป็นพิษที่เกิดกับสิ่งแวดล้อม ตลอดจนการนำวัสดุจาก ธรรมชาติไปสังเคราะห์เป็นตัวดูดซับทางพอลิเมอร์ เพื่อนำไปเป็นตัวดูดซับสำหรับดูดซับสารชนิดอื่น ต่อไป

คูสิต และคณะ 2554 ศึกษาการใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสี Reactive Dye โดย ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่อการดูดซับสีย้อม, ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสีย้อม, ผลของ ระยะเวลาในการสัมผัสต่อการดูดซับสีย้อม และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อม จาก การทดลองที่สภาวะดังกล่าวพบว่า การใช้สาหร่าย *Spirogyra* ดูดซับสี Reactive Dye มีค่าพีเอชที่ เหมาะสม คือ 3 มีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 30 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม คือ 18 ชั่วโมง และการใช้สาหร่าย *Spirogyra* ที่มีความเข้มข้น 4, 8 และ 12 g/L ในการดูดซับสีย้อม พบว่าที่ ความเข้มข้น 8 g/L มีความเหมาะสมที่สุดในการดูดซับ

Johann F. Osma et al., 2007 ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีซีย้อม พบว่า การดูดซับสีซีย้อมเกิดที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองโดยการผสม Mandarin Peeling (MP) หรือ Sunflower Seed Shells (SS) จำนวน 4 กรัม กับสารละลายสีซีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ที่ pH 2 และ pH 4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปเขย่า 100 รอบต่อนาที ที่เวลาขณะหนึ่ง จากนั้นนำไปวัดความยาวคลื่นด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 597 นาโนเมตร ซึ่งตรงกับค่าการดูดกลืนแสงที่สูงสุดของสีซีย้อมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 หรือปริมาณที่แน่นอนในช่วงความยาวคลื่น 400-750 นาโนเมตร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสีซีย้อมนั้นส่วนใหญ่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย ได้ค่าความคลาดเคลื่อน 4 เปอร์เซ็นต์

Yahya Hamzeh et al., 2012 ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีซีย้อม 2 ชนิด ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน คือ Acid Orange 7 และ Remazol Black 5 โดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง จากต้นคาโนลา พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ประกอบด้วย ค่า pH, ขนาดของตัวดูดซับ, ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีซีย้อม และระยะเวลาในการสัมผัส จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 2.5, ขนาดตัวดูดซับ 0.42-0.60 มิลลิเมตร, ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสม คือ 120 นาที ส่วนการศึกษารูปแบบไอโซเทอม จากการศึกษาทดลองได้รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับ เป็นแบบ Langmuir ได้ค่า R^2 ของ Acid Orange 7 และ Remazol Black 5 เท่ากับ 0.9972 และ 0.9949 ตามลำดับ

K.A.G. Gusmão et al., 2013 ได้ศึกษากระบวนการดูดซับสีซีย้อมชนิดแคทไอออนิก ที่ผ่านการปรับปรุงทางเคมีโดยการนำ EDTA มาปรับปรุงคุณภาพซันอ้อย เพื่อดูดซับสี Methylene Blue (MB) และ Gentian Violet (GV) ศึกษาลักษณะพื้นผิว โดยใช้เครื่อง BET ศึกษาองค์ประกอบหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เครื่อง FTIR บัญชีต่างๆที่ทำการศึกษา คือ ค่าพีเอช, ระยะเวลาสัมผัส, ความเข้มข้นเริ่มต้น, จลศาสตร์การดูดซับ และรูปแบบไอโซเทอม จากการศึกษาทดลองพบว่า ค่าการดูดซับที่สูงที่สุดในการดูดซับสี MB และสี GV คือ 202.43 และ 327.83 mg/g ใช้พลังงานในการดูดซับเท่ากับ -22.50 และ -24.21 kJ/mol ตามลำดับ รูปแบบไอโซเทอมเป็นแบบ Langmuir

K. Santhy และ P. Selvapathy 2006 ได้ทำการทดลองดูดซับสีซีย้อม 3 ชนิดคือ Reactive Orange 12, Reactive Red 2 และ Reactive Blue 4 ด้วยถ่านลอย ซึ่งผลการทดลอง พบว่า ปริมาณดูดซับจำเพาะของจากสีซีย้อมมีค่าไม่เท่ากัน โดยปริมาณดูดซับจำเพาะที่ได้จากการดูดซับสีซีย้อม Reactive Orange 12 มีค่าสูงสุดและสีซีย้อม Reactive Blue มีค่าต่ำสุด ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ปริมาณดูดซับจำเพาะไม่เท่ากันเนื่องจากสีซีย้อม Reactive Blue 4 มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนทำให้ขนาดโมเลกุลมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการดูดซับต่อโมเลกุลมาก จำนวนโมเลกุลต่อหน่วยพื้นที่ตัวดูดซับจึงมีค่าลดลง

M.A. Al-Ghoutiet et al., 2003 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และกลไกการดูดซับของไคอะตอมเอเซียสเอร์ท (ไคอะตอมไมท์) เพื่อใช้กำจัดสีย้อมในโรงงานสิ่งทอ โดยศึกษาสมบัติทางกายภาพของไคอะตอมไมท์ ได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลาย (pH_{Solution}) ด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช ค่าพีเอชของสารละลายที่มีค่าประจุเท่ากับศูนย์ (pH_{ZPC}) และความหนาแน่นของประจุที่ผิว (Surface Charge Density) ด้วยวิธีอัลคาไลน์เมตริกไทเทรชัน (Alkalimetric Titration Method) และพื้นที่ผิว (Surface Area) ด้วยวิธีเซียร์ (Sear Method) จากนั้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของไคอะตอมกับสีย้อม 3 ชนิด ได้แก่ สีย้อมเมทิลินบลู (MB) สีย้อมริแอกทีฟแบล็ค (RB) และสีย้อมริแอกทีฟเฮลโล (RY) โดยแปรค่าพีเอชของสารละลายเป็น 2-11 และศึกษากลไกการดูดซับของไคอะตอมไมท์ที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมด้วยเทคนิคฟลูออริเมตริกอินฟราเรด (FT-IR Technique) และสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ผลการทดลอง พบว่า ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 8.2 ค่าพีเอชของสารละลายที่มีค่าประจุเท่ากับศูนย์มีค่าเท่ากับ 5.4 และค่าพื้นที่ผิวมีค่าเท่ากับ 27.8 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับการดูดซับของสีย้อมบนไคอะตอมไมท์ พบว่า ค่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับดังกล่าว คือ สีย้อมเมทิลินบลู ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดแคทไออนิก (Cationic Dyes) จะถูกดูดซับได้ดีเมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น (ค่าพีเอชประมาณ 11) สำหรับสีย้อมริแอกทีฟแบล็ค และริแอกทีฟเฮลโล ซึ่งเป็นสีย้อมชนิดรีแอกทีฟไออนิก (Anionic Dyes) จะดูดซับได้ดีเมื่อค่าพีเอชลดลง (ค่าพีเอชประมาณ 3) และยังพบว่าขนาดอนุภาคของไคอะตอมไมท์มีผลน้อยมากต่อการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

1. ผงสีรีแอกทีฟ (Reactive Black 5) (เกรด RPE, บริษัท วินนิแม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 1 N (เกรด RPE, บริษัท Carlo Erba, Italy)
3. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1 N (เกรด RPE, บริษัท Carlo Erba, Italy)
4. กรดไนตริก (HNO₃) เข้มข้น 20 % (เกรด RPE, Merck)
5. น้ำกลั่น (Distilled water)
6. ชานอ้อย

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jenway
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ Leo
3. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer
4. เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp
5. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 ยี่ห้อ Sanyo
6. เครื่องกรองสูญญากาศ (Suction pump) รุ่น Aspirator A-3s ยี่ห้อ Eyela
7. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
8. ตู้อบ (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert
9. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S ยี่ห้อ Sartorius
10. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
11. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11
12. กรวยกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel)
13. ขวดคั้นน้ำกลั่น (Wash bottle)
14. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

หมายเหตุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผ่านการแช่ HNO₃ 20 % เป็นเวลา 1 วันล้างด้วย

น้ำกลั่นแล้วเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับ

1. นำขานอ้อยมาล้างด้วยน้ำกลั่น ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปตากแดด ประมาณ 6 ชั่วโมง
2. นำขานอ้อยที่ตากแดดแล้วมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
3. นำขานอ้อยที่ได้ไปบดให้ละเอียดแล้ว ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh
4. นำขานอ้อยที่ร่อนแล้วมาล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ค่า pH ที่เป็นกลาง
5. กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
6. นำขานอ้อยที่ผ่านการกรองลดความดันแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์

3.2.2 การเตรียมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ Reactive black 5 (RB-5)

3.2.2.1 การเตรียมสต็อกน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์

ชั่ง Reactive black 5 (RB-5) มา 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม Reactive black 5 (RB-5) ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร

3.2.2.2 การสแกนหาค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดของสีย้อมรีแอคทีฟแบล็ค 5

นำน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร มาสแกนหาความยาวคลื่น โดยใช้เครื่อง UV-visible spectrophometer (สแกนจาก 200-800 นาโนเมตร)

3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพ ของวัสดุดูดซับทั้งก่อนการดูดซับ และหลังการดูดซับ

3.2.3.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของวัสดุดูดซับ

- 1) นำขานอ้อยที่ผ่านการเตรียมในข้อ 3.2.1 แล้วมาบด
- 2) นำมาโรยลงบนแท่นรองรับ (Support) ให้มีการกระจายตัวที่ดี
- 3) จากนั้นทำการเคลือบทองเป็นเวลา 3 นาที โดยให้กระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ ควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศ
- 4) นำขานอ้อยที่ผ่านการเคลือบทองแล้วไปส่งไปที่วางชิ้นงานที่อยู่ภายในเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานของวัสดุดูดซับ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
- 5) ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับแล้ว
- 6) เปรียบเทียบลักษณะรูปร่างพื้นผิวของวัสดุดูดซับทั้งก่อนดูดซับและหลังดูดซับ

3.2.3.2 การศึกษาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

1) นำขานอ้อยที่ยังไม่ผ่านการดูดซับปริมาณ 1 กรัม กับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 100 มิลลิกรัม ใส่ลงในโถงบดสาร บดสารทั้งสองให้เข้ากัน

2) นำตัวอย่างที่ผสมเข้ากันแล้วใส่ลงในแม่พิมพ์ จากนั้นนำไปอัดด้วยเครื่องฉีดไฮดรอลิก ที่ความดัน 15,000 N เป็นเวลา 5 นาที

3) ถอดตัวประกอบแม่พิมพ์ออก ตัวอย่างจะติดอยู่กับแม่พิมพ์โดยมีลักษณะเป็นวงกลมใสๆ ที่เกิดจากสารผสมระหว่างขานอ้อยกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)

4) นำตัวอย่างใส่แผ่นฟิล์ม นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ($4000-400\text{ cm}^{-1}$) ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR Spectroscopy) เพื่อทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน

5) ทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนเป็นขานอ้อยที่ผ่านการดูดซับแล้ว

6) วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุดูดซับทั้งก่อนดูดซับและหลังดูดซับ

3.2.4 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม

3.2.4.1 การศึกษา pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม

1) ชั่งขานอ้อย 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2) เติมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ Reactive black 5 (RB-5) ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งได้ปรับค่า pH ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 2.5 ลงไป ปริมาณ 25 มิลลิลิตร

3) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที

4) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 5,000 รอบ เป็นเวลา 5 นาที

5) นำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบลดความดันนำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

6) ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำ อีก 2 ซ้ำ

7) ทำชุดควบคุม (control) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

8) ทำ Blank ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ใช้น้ำกลั่น (Distilled Water) แทนน้ำเสียสังเคราะห์

9) เปลี่ยนค่า pH จาก 2.5 เป็น 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 3.2.4.2 การศึกษาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม

1) ชั่งขานอ้อย 0.1 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

- 2) เติมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ Reactive black 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 3) โดยควบคุมค่า pH ในสภาวะที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1) ลงไป 25 มิลลิตร
- 4) นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0 นาที
- 5) จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 5,000 รอบ เป็นเวลา 5 นาที
- 6) นำไปกรองโดยใช้ชุดเครื่องกรองลดความดัน นำสารละลายส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer
- 7) ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ซ้ำ
- 8) ทำชุดควบคุม (control) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ
- 9) ทำ Blank ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ใช้น้ำกลั่น (Distilled Water) แทนน้ำเสียสังเคราะห์
- 10) เปลี่ยนเวลาในการเขย่าจากเวลา 0 นาที เป็น 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ

3.2.4.3 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน

- 1) ชั่งชานอ้อย ตามอัตราส่วน w/v ดังตาราง ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิกรัม
- 2) เติมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ลง 25 มิลลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม ดังตาราง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/L)	น้ำหนักชานอ้อย (g)
50	0.05 และ 0.10
100	0.10 และ 0.15
150	0.15 และ 0.20
200	0.20 และ 0.25

- 3) ปรับค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ โดยควบคุมค่า pH ในสภาวะที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1)
- 4) จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.2)
- 5) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกมาจากสารละลาย
- 6) นำไปกรองโดยกรองโดยใช้ชุดกรองลดความดัน นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer
- 7) ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำ อีก 2 ซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
- 8) ทำชุดควบคุม (control) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

9) ทำ Blank ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ใช้น้ำกลั่น (Distilled Water) แทนน้ำเสียสังเคราะห์

10) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของชานอ้อย ที่เข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน

3.2.5 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับ

1) ชั่งชานอ้อย 0.05 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิกรัม

2) เติมน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ Reactive black 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 25 มิลลิตร

3) ปรับค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมสังเคราะห์ โดยควบคุมค่า pH ในสภาวะที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.1)

4) จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสม (จากการทดลอง 3.2.4.2)

5) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อแยกตัวดูดซับออกจากสารละลาย

6) นำไปกรองโดยกรองโดยใช้ชุดกรองลดความดัน นำสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-visible Spectrophotometer

7) ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำ อีก 2 ซ้ำ

8) ทำชุดควบคุม (control) ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ไม่ใส่วัสดุดูดซับ

9) ทำ Blank ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-6 แต่ใช้น้ำกลั่น (Distilled Water) แทนน้ำเสียสังเคราะห์

10) เปลี่ยนน้ำหนักชานอ้อยจาก 0.05 กรัม เป็น 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 กรัม ตามลำดับ

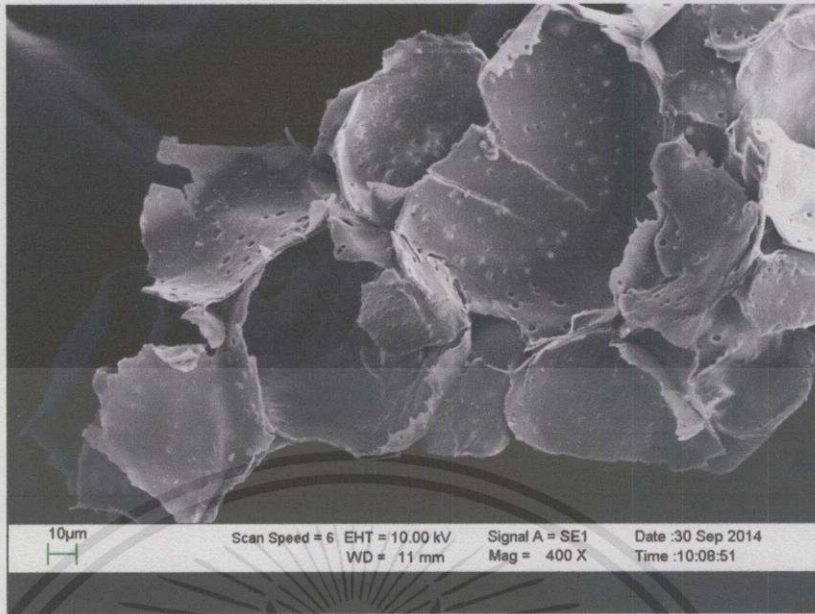
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

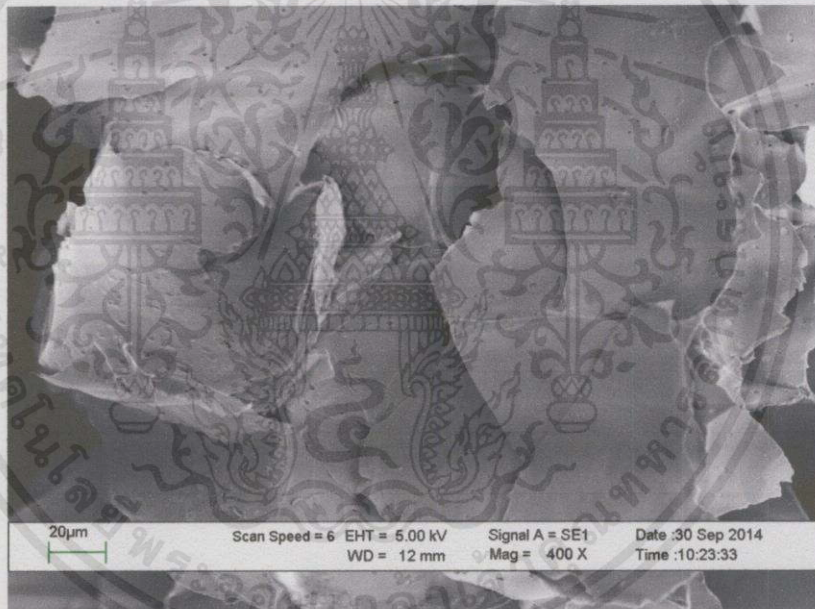
โครงการพิเศษเรื่อง การดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟ แบล็ค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ขานอ้อยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือใช้อย่างขานอ้อย มาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีย้อม และหลังการดูดซับสีย้อม โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และศึกษาห่มู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในขานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีย้อม และหลังการดูดซับสีย้อมโดยใช้เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) หลังจากนั้นทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟ แบล็ค 5 โดยทำการศึกษาค่าความเป็นกรดค่า, ระยะเวลาในการสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟ แบล็ค 5 ต่อมาทำการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสีย้อมรีแอดทีฟ แบล็ค 5 ผลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดสามารถแสดงไว้ในหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของขานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีย้อม และการหลังการดูดซับสีย้อม

นำขานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีย้อม และหลังการดูดซับสีย้อมที่ผ่านการคัดแยกขนาด โดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 35 mesh นำไปฉาบผิวด้วยทองคำ ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของขานอ้อย โดยการนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) และ 4.1 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยก่อนการดูดซับสีข้อม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)
 (ข) ลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยหลังการดูดซับสีข้อม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยก่อนการดูดซับสีช้อม และหลังการดูดซับสีช้อม โดยนำไปส่องกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า โครงสร้างเส้นใยบนโมเลกุลของชานอ้อยก่อนการดูดซับสีช้อมมีรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วเส้นใยเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) ส่วน โครงสร้างเส้นใยบนโมเลกุลของชานอ้อยหลังการดูดซับสีช้อมมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วเส้นใยเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) นั่นเป็นเพราะว่า โมเลกุลของสีช้อมได้แพร่เข้าไปในรูพรุนบนโครงสร้างเส้นใยของชานอ้อย เมื่อแพร่เข้าไปจนเกิดภาวะสมดุล จึงทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง

4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีช้อม และ การหลังการดูดซับสีช้อม

นำชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีช้อม และหลังการดูดซับสีช้อมมาศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลองจากการใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบของชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีช้อม และหลังการดูดซับสีช้อม แสดงสเปกตรัมดังรูป 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) พบว่าทั้งชานอ้อยทั้งก่อน และหลังการดูดซับสีช้อมมีแอกทีฟ แบล็ค 5 เป็นหมู่คาร์บอนิล ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดคาร์บอกซิลิก ชนิดของแถบความยาวคลื่น แสดงดังต่อไปนี้

- แถบความยาวคลื่นที่ 3342 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิกในเซลล์ลูโลส เฮมิเซลล์ลูโลส เพคติน และลิกนิน

- แถบความยาวคลื่นที่ 2895 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของแอลดีไฮด์ซึ่งเป็นแถบการยึดของหมู่ methyl, methylene และ methoxy

- แถบความยาวคลื่นที่ 2278 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของคีโตน

- แถบความยาวคลื่นที่ 1726 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของแอนไฮไดรด์

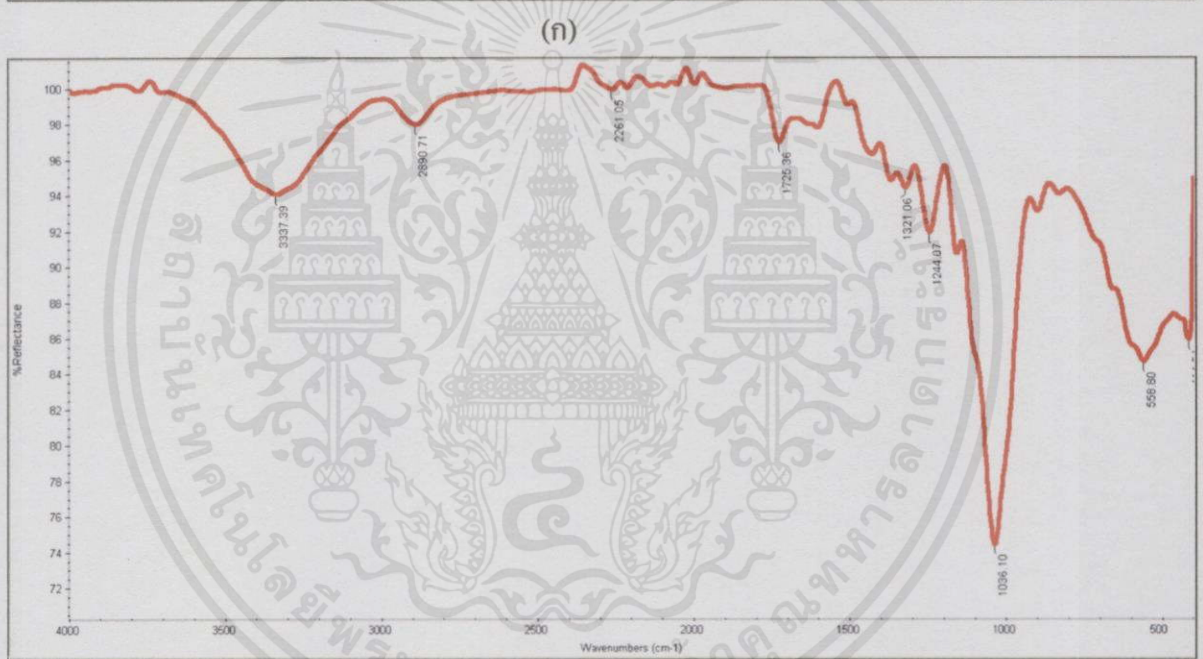
- แถบความยาวคลื่นที่ 1323 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์

- แถบความยาวคลื่นที่ 1242 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นหมู่ฟังก์ชันของเอสเทอร์

และแถบความยาวคลื่นที่ 529 cm^{-1} แสดงให้เห็นว่าแถบการยึดนี้เป็นของหมู่คีโตน

แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (ก) และ 4.2 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (ก) สเปกตรัมของขาน้อยก่อนการดูดซับสีข้อม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

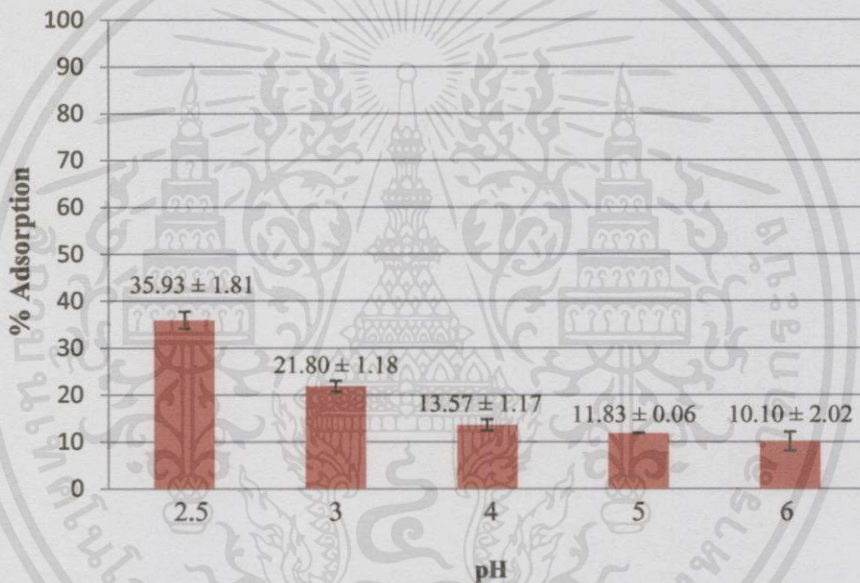
(ข) สเปกตรัมของขาน้อยหลังการดูดซับสีข้อม เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5

4.3.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5

จากการทดลองเพื่อหาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อชามย่อย 0.1 กรัมปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้ได้ค่า pH เป็น 2.5, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ จากนั้น นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเขย่าเสร็จนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที จากนั้น นำไปกรองลดความดันจนได้ส่วนที่ใสเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH ดังรูปที่ 4.3



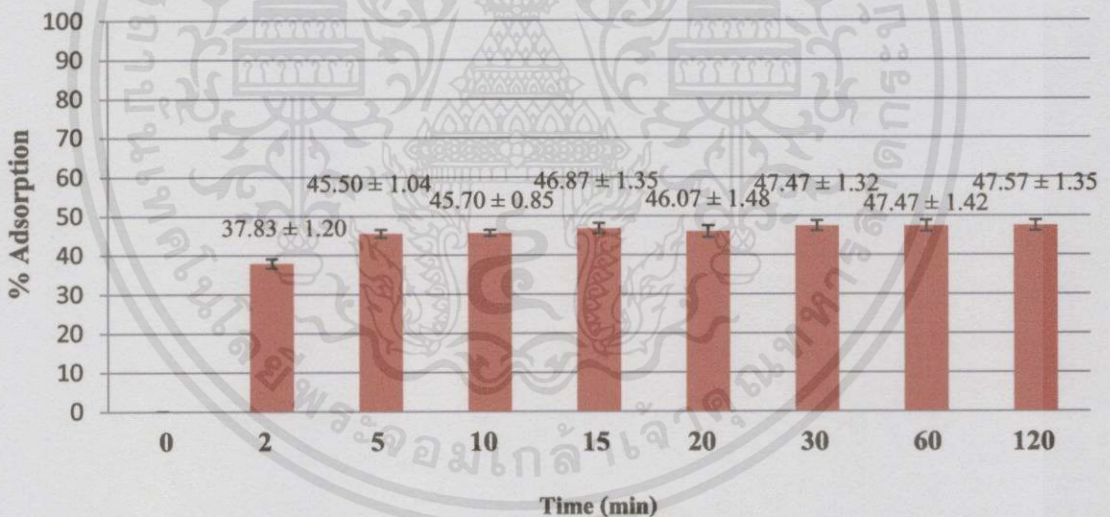
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH

จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 จะมีค่าการดูดซับสูงสุดที่ค่า pH เท่ากับ 2.5 โดยมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 35.93 % เนื่องจากในสภาวะกรดน้ำเสียนีมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) อยู่เป็นจำนวนมาก ประจุบวกของไฮโดรเจนไอออนเกิดการจับตัวได้ดีกับประจุลบของหมู่ไฮดรอกซี ($-OH$) ในเส้นใยเซลลูโลสของชามย่อย เมื่อน้ำเสียเริ่มเข้าสู่สภาวะเบส คือ ที่ pH 3, 4, 5 และ 6 ค่าการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 มีค่าลดลง เท่ากับ 21.80, 13.57, 11.83 และ 10.10 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่มีค่า pH สูงขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในน้ำเสียนีมีจำนวนลดลง จึงทำให้จับกับประจุลบของสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ได้น้อยลง ดังนั้นการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบจะสามารถดูดซับได้ดีในสภาวะกรด

ในส่วนของแบลนด์ใช้น้ำกลั่นที่มี pH 2.5 แทนน้ำเสียดี้อยู่ที่ 5 เดิมตัวดูดซับลงไป เท่ากับการทดลอง ค่าการดูดซับมีค่า เท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีความเข้มข้นของดี้อยู่ และผลการทดลองของชุดควบคุม (Control) ใช้น้ำเสียดี้อยู่ที่มีความเข้มข้นของดี้อยู่ที่ 5 แบลนด์ 5 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่เติมตัวดูดซับขานอ้อยลงไป ค่าการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกับแบลนด์ เนื่องจากไม่เกิดการดูดซับเพราะไม่มีตัวดูดซับความเข้มข้นของดี้อยู่ที่สมดุล จึงเท่ากับที่เริ่มต้น

4.3.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับดี้อยู่ที่ 5

จากการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ปนเปื้อนดี้อยู่ที่ 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตรต่อขาน-อ้อย 0.1 กรัม ปรับ pH ที่ได้จากข้อ 4.3.1 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 และ 120 นาทีตามลำดับ จากนั้น นำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนต์ปีเตอร์ส ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมารองลดความดัน เพื่อนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดซับแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับ และระยะเวลาในการสัมผัสได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับของขานอ้อย

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าในช่วงเวลา 0-5 นาทีนั้น อัตราการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีจุดหักในช่วงเวลาที่ 2 นาที เมื่อเข้าสู่ช่วงเวลาที่ 10, 15 และ 20 นาที อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลที่ช่วงเวลา 30 นาที จากนั้นอัตราการดูดซับจะคงที่ ที่ช่วงเวลา 60 และ 120 นาที นั่นเป็นเพราะในช่วง 0-5 นาที พื้นที่ผิวภายในรูพรุนของขานอ้อยมีที่ว่างมากพอที่โมเลกุลของดี้อยู่จะแพร่เข้าไปได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเวลาผ่านไปที่ว่างในรูพรุนมีขนาดเล็กลง โมเลกุลของดี้อยู่แพร่เข้าไปในรูพรุนได้ช้าลง ส่งผลให้อัตราการดูดซับเกิดได้ช้าลงด้วยเช่นกัน

ในส่วนของแบลงค์ใช้น้ำกลั่นที่มี pH 2.5 แทนน้ำเสียที่ย้อมสังเคราะห์ เติมตัวดูดซับลงไป เท่ากับการทดลอง ค่าการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีความเข้มข้นของสีย้อม และผลการทดลองของชุดควบคุม (Control) ใช้น้ำเสียที่ย้อมที่มีความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่เติมตัวดูดซับขานอ้อยลงไป ค่าการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกับแบลงค์ เนื่องจากไม่เกิดการดูดซับ เพราะไม่มีตัวดูดซับความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล จึงเท่ากับที่เริ่มต้น

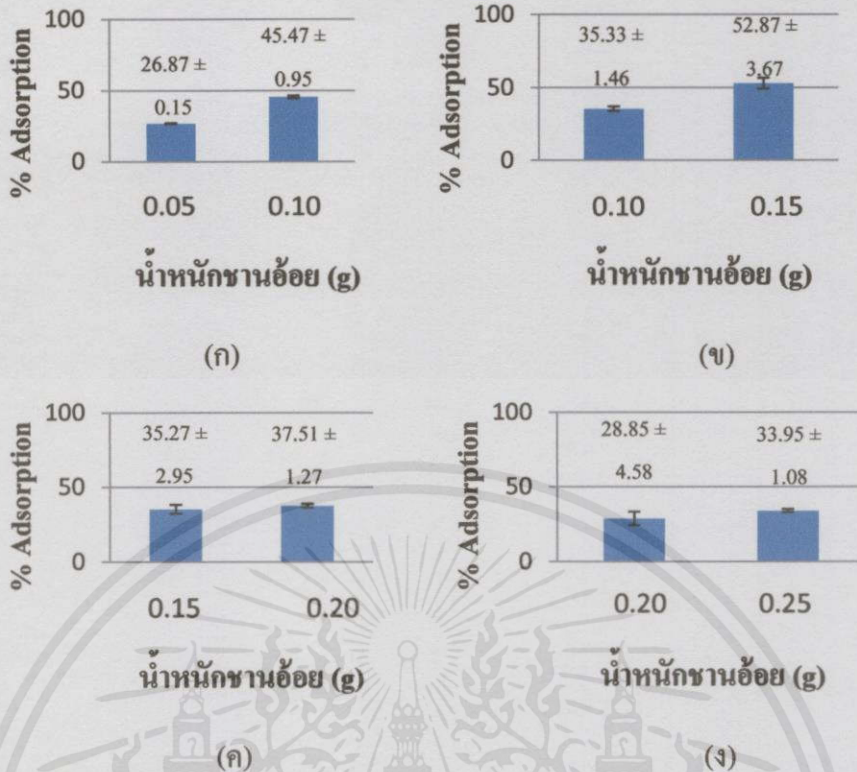
4.2.3 การศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน

จากการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน ทำได้โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์เป็นสีย้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ปริมาตร 25 มิลลิตรต่อขานอ้อย ดังตาราง

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (mg/L)	น้ำหนักรขานอ้อย (g)
50	0.05 และ 0.10
100	0.10 และ 0.15
150	0.15 และ 0.20
200	0.20 และ 0.25

ปรับ pH ที่ได้จากข้อ 4.3.1 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 4.3.2 จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนต์ติฟิส ที่ความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมารองลวดความดัน เพื่อนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับ และระยะเวลาในการสัมผัสได้ ดังรูปที่ 4.5 (ก), 4.5 (ข), 4.5 (ค) และ 4.5 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนักของชานอ้อยในน้ำเสียสีข้อมที่มีความเข้มข้น 50 mg/L

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนักของชานอ้อยในน้ำเสียสีข้อมที่มีความเข้มข้น 100 mg/L

(ค) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนักของชานอ้อยในน้ำเสียสีข้อมที่มีความเข้มข้น 150 mg/L

(ง) ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับน้ำหนักของชานอ้อยในน้ำเสียสีข้อมที่มีความเข้มข้น 200 mg/L

จากกราฟ 4.7 (ก) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของชานอ้อยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับจาก 0.05 กรัม เป็น 0.10 กรัม โดยมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 26.87 % และ 45.47 % ตามลำดับ จากกราฟ 4.7 (ข) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของชานอ้อยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับจาก 0.10 กรัม เป็น 0.15 กรัม โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 35.33 % และ 52.87 % ตามลำดับ จากกราฟ 4.7 (ค) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของชานอ้อยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับจาก 0.15 กรัม เป็น 0.20 กรัม โดยมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 35.27 % และ 37.51 % ตามลำดับ และจากกราฟ 4.7 (ง) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับของชานอ้อยที่

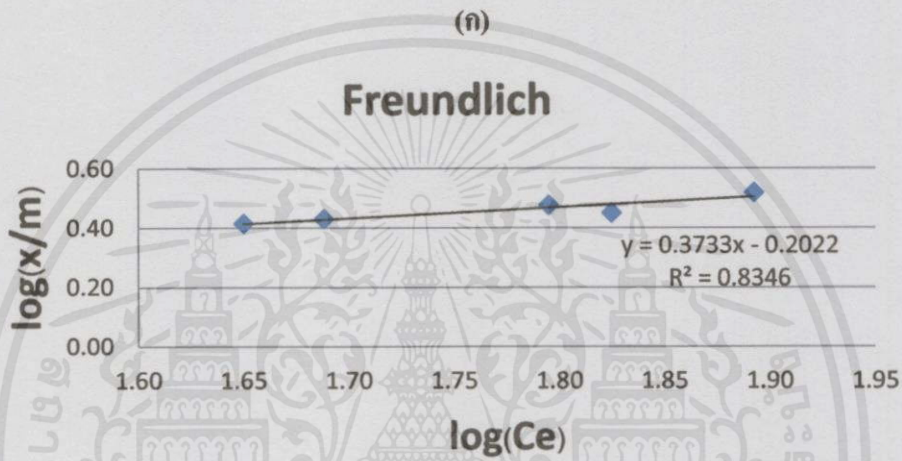
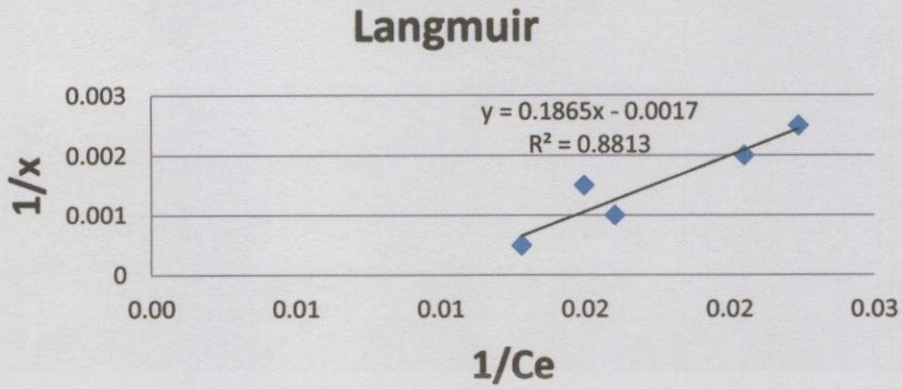
ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม เท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับจาก 0.20 กรัม เป็น 0.25 กรัม โดยมีค่าการดูดซับ เท่ากับ 28.85 % และ 33.95 % ตามลำดับ

ในส่วนของแบบลงค์ใช้น้ำกลั่นที่มี pH 2.5 แทนน้ำเสียดีย้อมสังเคราะห์เดิมตัวดูดซับลงไปเท่ากับการทดลอง ค่าการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากไม่มีความเข้มข้นของสีย้อม และผลการทดลองของชุดควบคุม (Control) ใช้น้ำเสียดีย้อมที่มีความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟ แบดส์ 5 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ไม่เติมตัวดูดซับขานอ้อยลงไป ค่าการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0 เช่นเดียวกับแบบลงค์ เนื่องจากไม่เกิดการดูดซับ เพราะไม่มีตัวดูดซับความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล จึงเท่ากับที่เริ่มต้น

ดังนั้น จากกราฟทั้ง 4 กราฟ สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วน w/v ของขานอ้อยประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีตัวดูดซับที่มากเกินพอ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อม ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าลดลง นั่นเป็นเพราะ เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสีย้อมมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีจำนวนมาก จึงทำให้โมเลกุลของสีย้อมเคลื่อนที่เบียดเสียดกันเข้าไปในรูพรุนส่งผลให้โมเลกุลสีย้อมเข้าไปในรูพรุนได้น้อยลง

4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับ ทำได้โดยใช้น้ำเสียดีย้อมสังเคราะห์ปนเปื้อนสีย้อมรีแอกทีฟ แบดส์ 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิตรต่อขานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 0.05 กรัม ปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้ตามข้อ 4.3.1 จากนั้น นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 4.3.2 เมื่อเขย่าเสร็จนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวส์ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำมารองถดความดัน เพื่อนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร เปลี่ยนน้ำหนักขานอ้อยจาก 0.05 กรัม เป็น 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 กรัม ตามลำดับ นำค่าที่ได้มาคำนวณ ไอโซเทอมทั้งแบบ Langmuir และ Freundlich ดังรูปที่ 4.7 (ก) และ 4.7 (ข)



รูปที่ 4.7 (ก) รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 แบบ Langmuir
 (ข) รูปแบบของไอโซเทอมการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 แบบ Freundlich

ตารางที่ 4.1 ค่า R^2 ไอโซแบบ Langmuir และ Freundlich ของชานอ้อย

ชนิดของสี่ข้อม	R^2 สมการ Langmuir	R^2 สมการ Freundlich
รีแอกทีฟ แบล็ค 5	0.8813	0.8346

จากตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 สมการของ Langmuir มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการของ Freundlich ดังนั้นการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 สอดคล้องกับแบบจำลอง Langmuir ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer)

จากการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ตามสมการแบบจำลองของ Langmuir สามารถแสดงเป็นสมการเส้นตรงได้ ดังนี้

สี่ข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 $y = 0.1865x - 0.0017$ $R^2 = 0.8813$

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ แบบลึค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โดยใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ นั่นคือชานอ้อย ผลการศึกษาทดลองทั้งหมดนั้นสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. ลักษณะพื้นผิวของชานอ้อยก่อนการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ จะขรุขระ และมีรูพรุนขนาดใหญ่มากกว่าชานอ้อยหลังการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ

2. หมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบของชานอ้อยทั้งก่อนการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ และหลังการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟเป็นหมู่ฟังก์ชันเดิม เนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ

3. จากการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ แบบลึค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โดยใช้ชานอ้อย พบว่าชานอ้อยดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ ได้ดีที่สุดที่ pH 2.5

4. จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ แบบลึค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โดยใช้ชานอ้อย พบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่ชานอ้อยดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ คือ ที่เวลา 30 นาที

5. เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีข้อมริแอกทีฟ แบบลึค 5 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง

6. การดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ แบบลึค 5 โดยใช้ชานอ้อยเป็นไปตามสมการแบบจำลองของ Langmuir มีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด เท่ากับ 55.33 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียอุตสาหกรรมจริง

5.2.2 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ ที่หลากหลาย โดยการสังเคราะห์น้ำเสียที่มีสีข้อมริแอกทีฟ รวมกันมากกว่า 1 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมฟอกย้อม. กรุงเทพฯ : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.

กรองกาญจน์ ภูระรัตน์ 2530. การศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดพาราควอทโดยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมีและการดูดซับด้วยถ่าน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โกมล เอี่ยมเสมอ 2541. ประสิทธิภาพในการกำจัดของเสียออร์แกนิคที่ฟนิกอะโซกระบวนกรเอชปีอาร์แบบแอนแอโรบิกซึ่งมีและไม่มีสารอาหารที่ส่งเสริมกระบวนการอีพีอาร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ขนิษฐา 2550.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1&read=true&count=true เข้าถึงเมื่อ 20 สิงหาคม 2557.

คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ 2557.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://www2.Diw.go.th/IStandard/Datafiles/IWC_CH1.pdf เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2557.

คู่มือการเพิ่มผลผลิต 2548. การปลูกอ้อยและวิธีเพิ่มผลผลิตให้ได้ 25-30 ต้นต่อไร่. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : โครงการสร้างเงินสร้างงาน. หน้า 15-21.

จันทนา ไพบูรณ์, ไสรดากรณ์ พิมลา, มัทรียา แหะเหยียบ และอนงค์ จีรภัทร์ 2555. การดูดซับสีเขียวเบสิกด้วยสาหร่ายสีเขียว *Spirogyra* sp. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 40(1) หน้า 242-243.

ชุติมา เสพธรรม 2543. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คูสิต เอื้ออำนวย, สุรินทร์นธ์ เรื่องสมบูรณ์ และจันทิมา ชั่งสิริพร 2554. การกำจัดสีข้อมจากน้ำเสียโดยใช้สาหร่ายเป็นตัวดูดซับ. งานวิจัยงบประมาณแผ่นดิน. สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ประสิทธิ์ชัย สุขสาร, วิษุข ชัยมุด, และสิริเชษฐ เครือเพ็ชร 2556. การดูดซับสังกะสีและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอปรับปรุงทางเคมี. วิทยานิพนธ์, สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

หน้า 15-21.

ปรีชา สุริยพันธ์ 2557.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก http://writer.dekd.com/ka_olin/story/viewlongc.php?id=443325&chapter=6 เข้าถึงเมื่อ 25 สิงหาคม 2557.

พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ และวิระวัฒน์ คลอวุฒิมันตร์ 2553. การดูดซับสีย้อมด้วยตัวดูดซับจากธรรมชาติ. *วิศวกรรมลาดกระบัง*. 27(4) เดือนธันวาคม 2553 หน้า 62-64.

รัชนิษฐ์ รุกขชาติ 2557.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.navy.mi.th/science/BrithDay46/Brithdaydata/biology.htm> เข้าถึงเมื่อ 28 สิงหาคม 2557.

วนิดา อักษร 2555. เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. *ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. หน้า 183-184.

สุวรรณิ จรรยาพูน 2547. การกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำทิ้งโรงงานฟอกย้อมโดยใช้เศษผงเหล็ก. *รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาล 2557. *รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2556*. หน้า 11.

Abd El-Aziz A. Said, Aref A. M. Aly, Mohamed M. Abd El-Wahab, Soliman A. Soliman, Aly A. Abd El-Hafez, V. Helmey and Mohamed N. Goda 2013. Application of modified Bagasse as a Biosorbent for Reactive Dyes Removal from Industrial Wastewater. *Scientific Research*. Vol. 5, Page 1.

Johann F. Osma, Verónica Saravia, José L. Toca-Herrera and Susana Rodríguez Couto 2007. Sunflower seed shells : A novel and effective low-cost adsorbent for the removal of the diazo dye Reactive Black 5 from aqueous solution. *Journal Hazardous Materials*. Vol. 147, Pages : 901.

Karla Aparecida Guimarães Gusmão, Leandro Vinícius Alves Gurgel, Tânia Márcia Sacramento Melo and Laurent Frédéric Gil 2013. Adsorption studies of methylene blue and gentian violet on sugarcane Bagasse modified with EDTA dianhydride (EDTAD) in aqueous solutions : Kinetic and equilibrium aspects. *Journal of Environmental Management*. Vol. 118, Paeg : 135-143.

K. Santhy, and P. Selvapathy 2006. Removal of reactive dyes from wastewater by adsorption on coir pith activated carbon. *Bioresour Technol*. Vol. 97, Pages : 1329-1336.

M.A. Al-Ghouti, M.A.M. Khraisheh, S.J. Allen and M.N. Ahmad 2003. The Removal of Dyes from Textile Wastewater : A Study of the Physical Characteristics and Adsorption Mechanisms of Diatomaceous Earth. *Journal Enviromental Management*. Vol. 69, Pages : 229-238.

- Michael 2003.[ออนไลน์]. สืบค้นจากจาก <http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/f06pm/lect06.htm>. เข้าถึงเมื่อ 25 กันยายน 2557.
- Pradthana 2008.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>. เข้าถึงเมื่อ 29 สิงหาคม 2557.
- World dye variety 2014.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก <http://www.worlddyevariety.com/reactive-dyes/reactive-black-5.html>. เข้าถึงเมื่อ 25 กันยายน 2557.
- Yahya Hamzeh, Alireza Ashori, Elham Azadeh and Ali Abdul khani 2012. Removal of Acid Orange 7 and Remazol Black 5 reactive dyes from aqueous solutions using a novel biosorbent. **Materials Science and Engineering**. Vol. 32, Pages 1394-1400.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

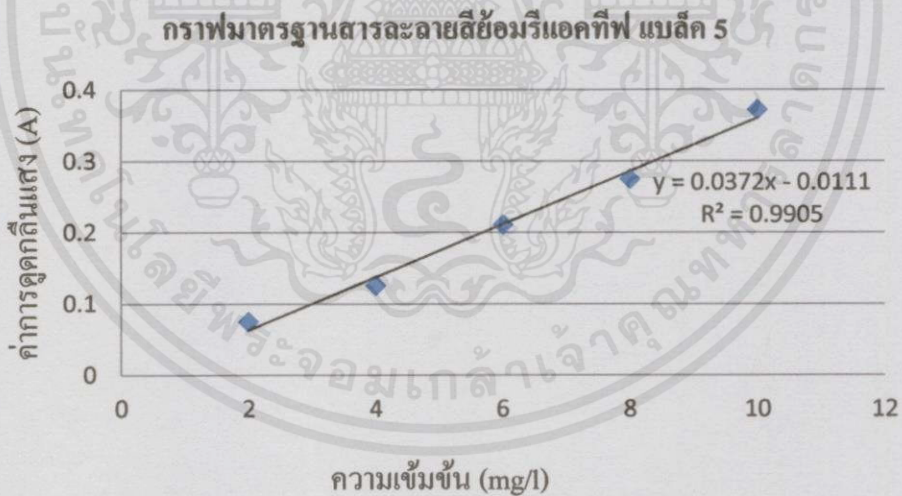
1. การเตรียมสารเคมี

1.1 การสร้างกราฟมาตรฐานสารละลายซีรียมรีแอคทีฟ แบล็ค 5

เตรียมสารละลายซีรียมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 ที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากนั้นนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร ได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในตาราง ข-1

ตารางที่ ก-1 ค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลายซีรียมรีแอคทีฟ แบล็ค 5 (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)
2	0.075
4	0.126
6	0.211
8	0.275
10	0.372

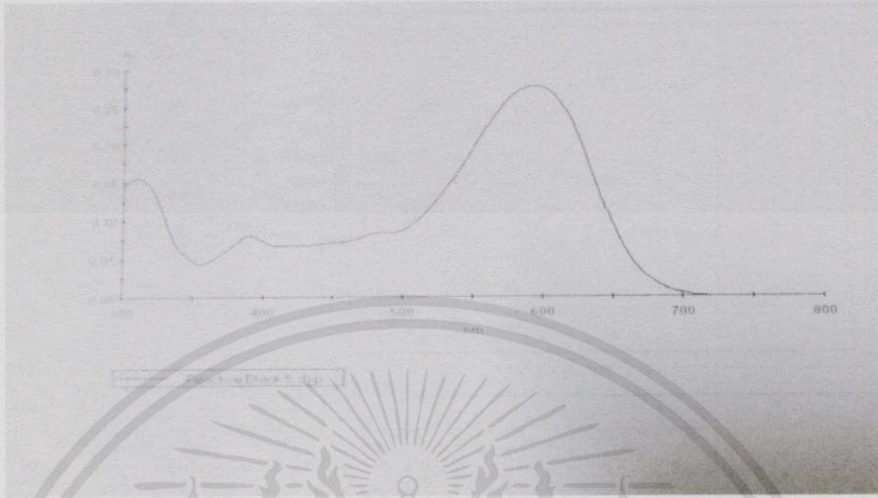


รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานสารละลายซีรียมรีแอคทีฟ แบล็ค 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 การหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของลีส้อยมรีแอกทีฟ แบล็ค 5

เตรียมลีส้อยมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปเจือจาง 100 เท่า แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 595 นาโนเมตร

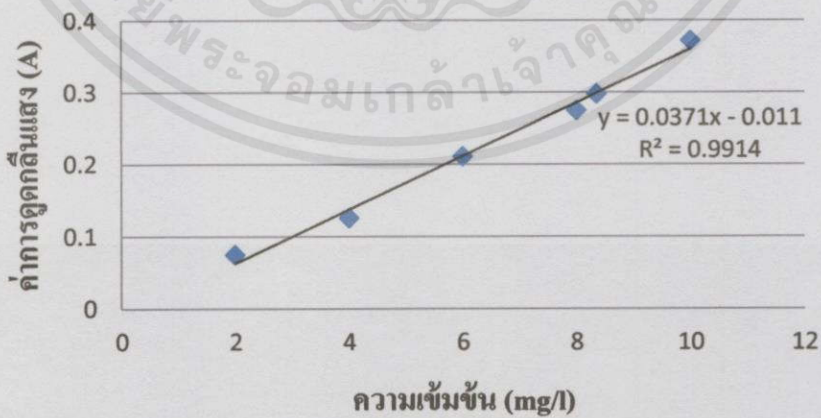


รูปที่ ก-2 การสแกนหาความยาวคลื่นเด่น

ตารางที่ ก-2 ค่าการดูดกลืนแสง

ความเข้มข้นของลีส้อยม (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)
8.35	0.298

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของลีส้อยมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 (mg/l) กับค่าการดูดกลืนแสง (A)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก-3 กราฟการหาค่าความเข้มข้นที่แน่นอนของลีส้อยมรีแอกทีฟ แบล็ค 5
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 การศึกษาหาค่า pH ที่เหมาะสม

pH	C _e (mg/L)				% Adsorption	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
2.5	62.40	66.00	63.80	64.07	35.93	1.81
3	77.90	79.50	77.20	78.20	21.80	1.18
4	86.20	87.70	85.40	86.43	13.57	1.17
5	88.20	88.10	88.20	88.17	11.83	0.06
6	89.10	92.20	88.40	89.90	10.10	2.02

ตารางที่ ข-2 การศึกษาหาเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

Contact Time	C _e (mg/L)				% Adsorption	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	100.00	100.00	100.00	100.00	0	0
2	62.10	63.40	61.00	62.17	37.83	1.20
5	54.00	53.80	55.70	54.50	45.50	1.04
10	55.20	54.20	53.50	54.30	45.70	0.85
15	51.80	53.10	54.50	53.13	46.87	1.35
20	55.20	52.30	54.30	53.93	46.07	1.48
30	51.10	52.80	53.70	52.53	47.47	1.32
60	52.80	53.80	51.00	52.53	47.47	1.42
120	53.80	51.10	52.40	52.43	47.57	1.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 การศึกษาหาค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่อัตราส่วน w/v ต่างกัน

ความเข้มข้น (mg/L)	น้ำหนัก ชานอ้อย (g)	C ₀ (mg/L)				% Adsorption	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
50	0.05	36.60	36.40	36.70	36.57	26.87	0.15
50	0.10	28.20	27.30	26.30	27.27	45.47	0.95
100	0.10	64.20	63.50	66.30	64.67	35.33	1.46
100	0.15	42.90	49.20	49.30	47.13	52.87	3.67
150	0.15	99.50	93.80	98.00	97.10	35.27	2.95
150	0.20	94.20	94.70	92.30	93.73	37.51	1.27
200	0.20	141.30	138.30	147.30	142.30	28.85	4.58
200	0.25	133.00	130.90	132.40	132.10	33.95	1.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 การหาไอโซเทอมแบบ Langmuir

x (mg/g)	Ce (mg/L)	1/x	1/Ce
2000.00	78.07	0.0005	0.01
1000.00	62.37	0.0010	0.02
666.67	66.80	0.0015	0.01
500.00	48.77	0.0020	0.02
400.00	44.67	0.0025	0.02

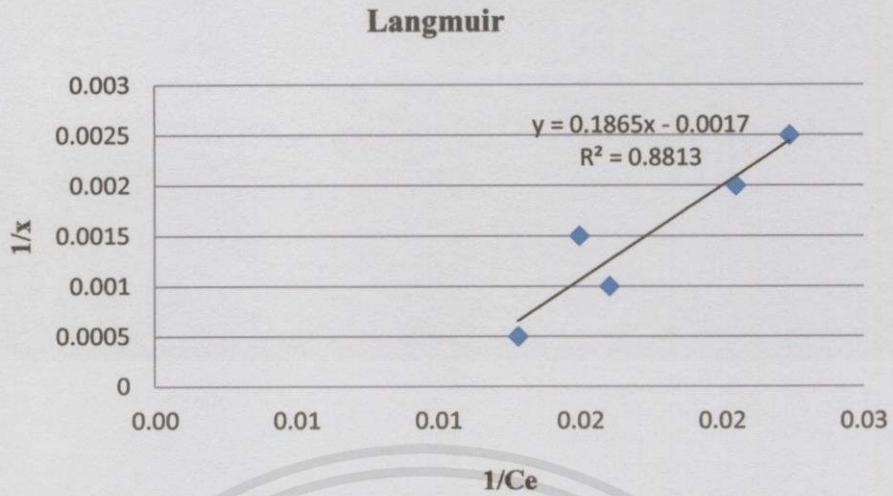
ตารางที่ ค-2 การหาไอโซเทอมแบบ Freundlich

x/m (mg/g)	Ce (mg/L)	Log (x/m)	Log (Ce)
2000.00	78.07	3.3010	1.89
1000.00	62.37	3.0000	1.79
666.67	66.80	2.8239	1.82
500.00	48.77	2.6990	1.69
400.00	44.67	2.6021	1.65

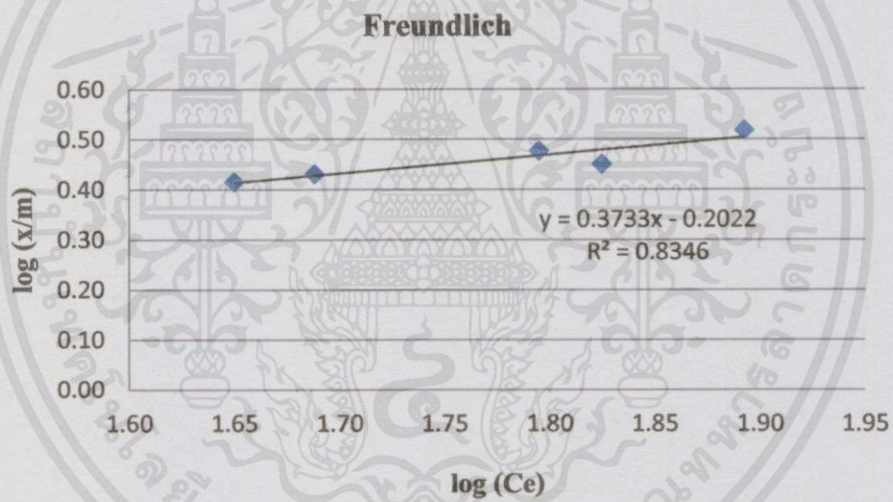
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง-1 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของชานอ้อย



รูปที่ ง-2 กราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของชานอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-1 ขานอ้อย



รูปที่ จ-2 ขานอ้อยที่ผ่านการล้างแล้ว

การเตรียมขานอ้อยนำขานอ้อยจากภาพ ข-1 มาล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปตากแดด ตัดขานอ้อยให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปบดละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงขนาด 35 mesh จากนั้นด้วยน้ำกลั่นจนน้ำล้างมี pH เท่ากับ 5 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำใส่ถุงซิปล็อคเพื่อเก็บไว้ในเคซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-1 ผงสีรีแอกทีฟ (Reactive Black 5)
เกรควิเคราะห์ บริษัทวินนิแม็กซ์อุตสาหกรรม จำกัด

รูปที่ ฉ-2 น้ำกลั่นที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ



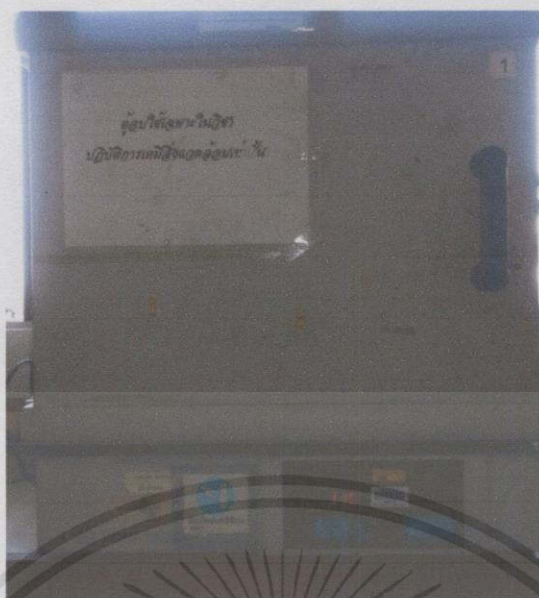
รูปที่ ฉ-3 ปรับค่า pH ให้มีค่า เท่ากับ 2.5 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 นอร์มอล และ
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1 นอร์มอล ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter)
รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-1 ตู้อบ (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert
ใช้อบขานอ้อยที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อเตรียมขานอ้อยสำหรับการทดลอง



รูปที่ ข-2 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-3 เครื่องเขย่า (Shaker) รุ่น Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp
ใช้ในการเขย่า มีการควบคุมความเร็วรอบและเวลาเพื่อให้ขานอ้อยกับสีย้อมทำปฏิกิริยากัน แล้วโมเลกุลของสีย้อมเกิดการแทรกเข้าไปในรูพรุนของเส้นใยขานอ้อย



รูปที่ ข-4 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 ยี่ห้อ Sanyo
เครื่องปั่นเหวี่ยง มีการควบคุมความเร็วรอบ และเวลาที่ใช้ในการปั่นเหวี่ยง เพื่อให้ขานอ้อยกับสารละลายสีย้อมเกิดการแยกชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-5 เครื่องกรองสุญญากาศ (Suction pump) รุ่น Aspirator A-3s ยี่ห้อ Eylea เครื่องกรองสุญญากาศใช้กรองเอาสารละลายสีข้อม เพื่อไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยมีการเจือจางสารละลายสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5 ด้วยน้ำกลั่น ก่อนการนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง



รูปที่ ข-6 เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jenway

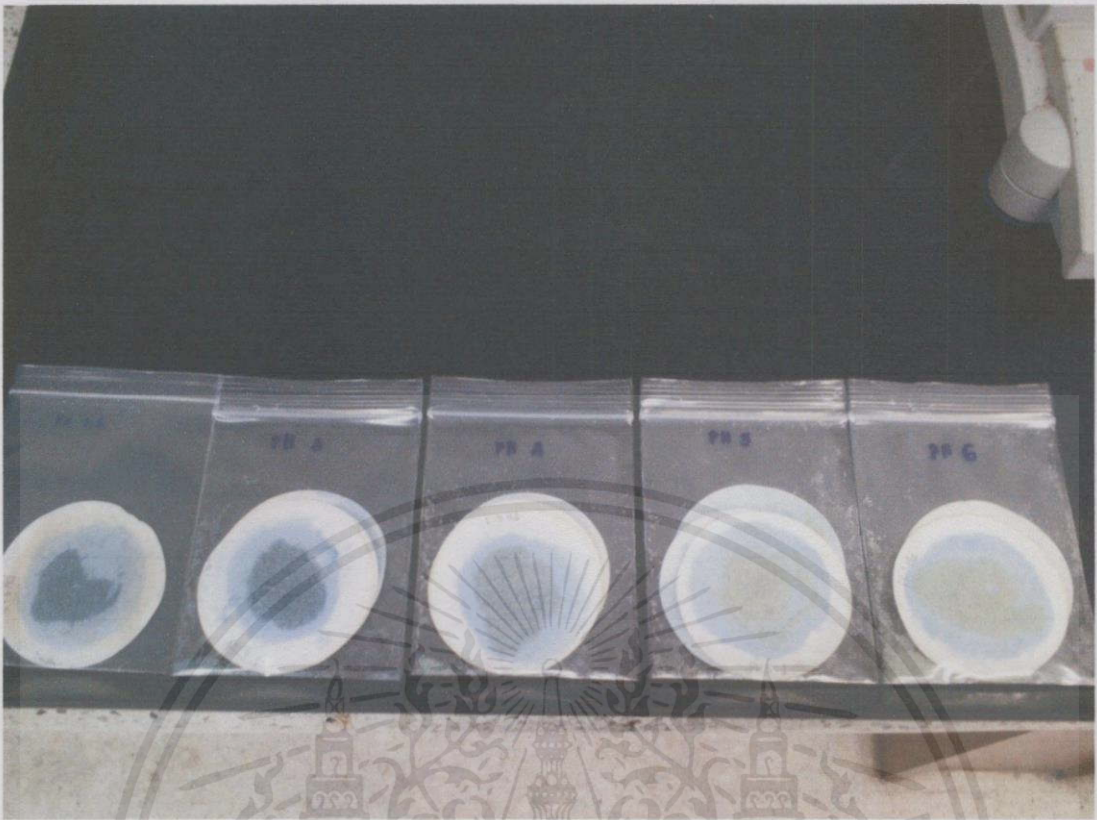
เครื่อง UV-visible spectrophotometer รุ่น 6405 ยี่ห้อ Jenway ใช้ในการสแกนหาความยาวคลื่นเด่นของสีข้อมรีแอกทีฟ แบล็ค 5, ใช้ทำกราฟมาตรฐาน และใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมของขานอ้อยในการดูดซับสีข้อมที่พารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ซ
ผลของชานอ้อยในการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟ
แบบลิก 5 ที่ค่า pH ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๗-1 การเปรียบเทียบการดูดซับสีของมีแอกทิฟ แบคทีเรีย 5 ของชานอ้อยที่ pH ต่างๆ

จากภาพ แสดงให้เห็นว่า ที่ค่า pH 2.5 ชานอ้อยที่ผ่านการทดลอง แล้วนำมากรองแบบลดความดันแล้ว ชานอ้อยจะมีสีเข้มมากที่สุด นั่นหมายความว่า ที่สภาวะนี้ชานอ้อยสามารถดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีของมีแอกทิฟ แบคทีเรีย 5 ได้ดีในสภาวะที่มีความเป็นกรด และการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีของมีแอกทิฟ แบคทีเรีย 5 จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีสภาวะเป็นเบส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้