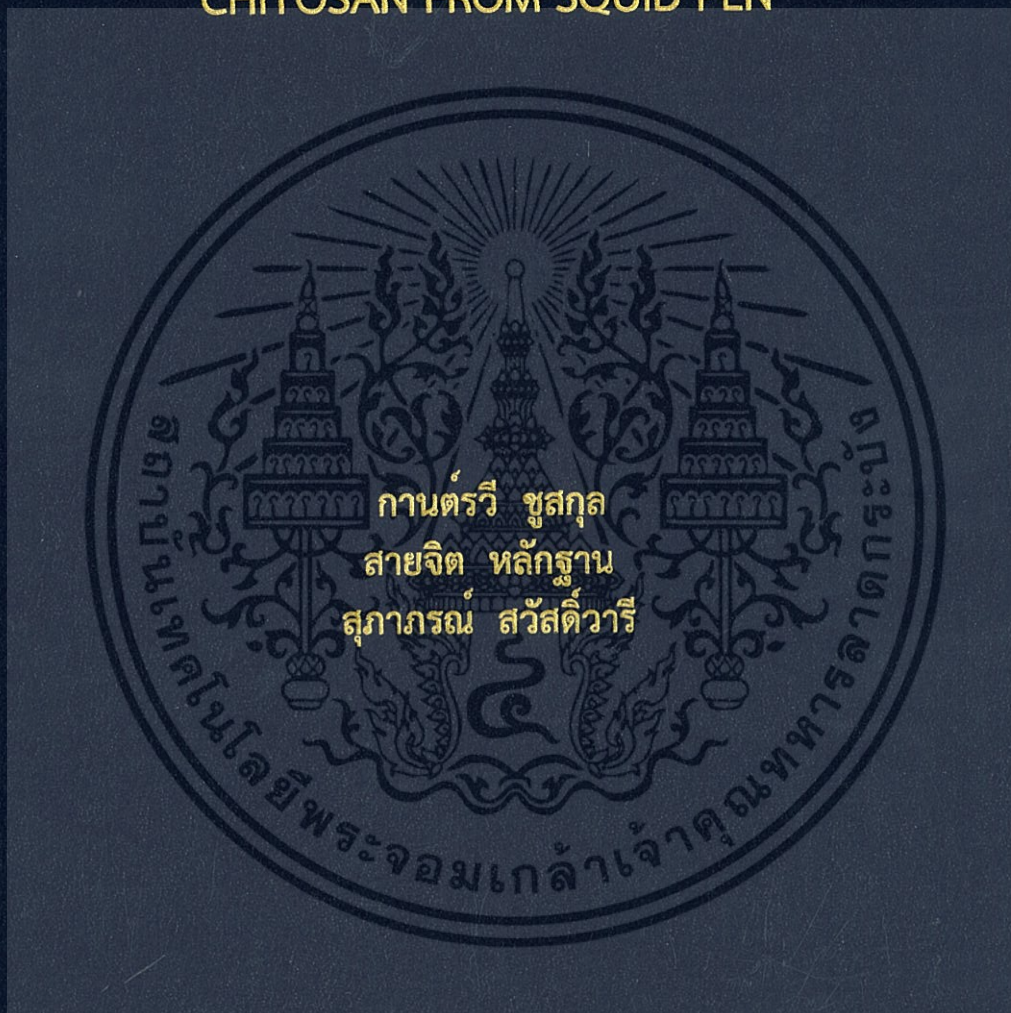


การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของ
REACTIVE BLUE 19 ด้วยแกนหมึกและไคโตซานจากแกนหมึก

PERFORMANCE COMPARISON OF ADSORPTION
REACTIVE BLUE 19 BY SQUID PEN AND
CHITOSAN FROM SQUID PEN



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม
REACTIVE BLUE 19 ด้วยแกนหมึกและไคโตซานจากแกนหมึก

PERFORMANCE COMPARISON OF ADSORPTION
REACTIVE BLUE 19 BY SQUID PEN AND
CHITOSAN FROM SQUID PEN



T149509

กานต์รวี ชูสกุล
สายจิต หลักฐาน
สุภาภรณ์ สวัสดิ์วารี

1288422A

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...149509
รับ เดือน.ปี...- 8 อ.ค. 2561

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE COMPARISON OF ADSORPTION
REACTIVE BLUE 19 BY SQUID PEN AND
CHITOSAN FROM SQUID PEN



Kanrawee Chusakul

Saijit Lakthan

Supaporn Sawatwaree

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

DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19
ด้วยแกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึก

ชื่อนักศึกษา นางสาวกานต์วี ชูสกุล รหัสนักศึกษา 56050668
นางสาวสายจิต หลักฐาน รหัสนักศึกษา 56050767
นางสาวสุภาภรณ์ สวัสดิ์วารี รหัสนักศึกษา 56050783

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ประธานกรรมการ	
ดร.ธิปชัย วัฒนวิจารณ์ กรรมการ	
ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ด้วยแกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึก
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกานต์รวี ชูสกุล รหัสนักศึกษา 56050668 นางสาวสายจิต หลักฐาน รหัสนักศึกษา 56050767 นางสาวสุภาภรณ์ สวัสดิ์วารี รหัสนักศึกษา 56050783
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม Reactive blue 19 ด้วยแกนหมึกและโคโตซานที่สกัดได้จากแกนหมึก ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากการอุปโภคบริโภคมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยทำการทดลองดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนสีย้อม ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ พบว่าแกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 99.65 และโคโตซานจากแกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 3 กรัม สามารถดูดซับสีย้อมได้ดีที่ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 11 โดยเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ลักษณะการดูดซับเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับร้อยละ 97.99

คำสำคัญ : การดูดซับ แกนหมึก โคโตซาน สีย้อม

Title	Performance Comparison of Adsorption Reactive Blue 19 by Squid pen and Chitosan from Squid pen
Students	Miss Kanrawee Chusakul Student ID 56050668 Miss Saijit Lakthan Student ID 56050767 Miss Supaporn Sawatwaree Student ID 56050783
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic year	2016
Advisor	Dr. Glinsukol Suwannarat

Abstract

This special project aimed to compare the performance of adsorption reactive blue 19 by Squid pen and Chitosan extracted from Squid pen, which are residual materials from consumption to get maximize benefits. Batch adsorption test with dyes contaminated wastewater with a concentration of 200 milligrams per liter for study the optimize conditions of dyes adsorption. From the experiment, Squid pen which size 35 mesh amount 0.5 grams can adsorb dyes for the best at the initial pH of wastewater with shaking speed 200 rpm for 30 min. The adsorption characteristics are according to Langmuir isotherm give the effective adsorption equals 99.65 percent, And Chitosan from Squid pen which size 35 mesh amount 3 grams can adsorb dyes for the best at pH 11 of wastewater with shaking speed 150 rpm for 90 min adsorption characteristics are according to Freundlich isotherm give the effective adsorption equals 97.99 percent.

Keyword : Adsorption, Chitosan, Reactive dye, Squid pen

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งอาจจะนับมากกว่าไม่หมด ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ดร.กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ คำชี้แนะในการศึกษาค้นคว้า ข้อแก้ไขในข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอน และให้กำลังใจในการดำเนินงานจนผ่านไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัวซึ่งเป็นกำลังแรงใจที่สำคัญยิ่ง

ขอขอบพระคุณบริษัท Thai Ambica Chemica Co.Ltd. ผู้ให้ความอนุเคราะห์สีย้อม Reactive blue 19 สำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบคุณพระคุณบริษัท TS Aqrtech Co.Ltd. ผู้ให้ความอนุเคราะห์โคโตะซานทางการค้า จำนวน 200 กรัม สำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณร้าน ลีนทะเล นายปอ ผู้ให้ความอนุเคราะห์แกนหมึก ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญ สำหรับทำโครงการพิเศษในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ธุรการ ตลอดจนแม่บ้าน ที่ให้ความช่วยเหลือและความอำนวยความสะดวกแก่คณะผู้จัดทำในทุกๆด้าน

ขอขอบคุณพระคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนผู้ที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จทุกท่าน

กานต์รวี ชูสกุล
สายจิต หลักฐาน
สุภาภรณ์ สวัสดิ์วารี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ	3
2.1.1 กระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ	3
2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ	7
2.1.3 กระบวนการกำจัดสีย้อม	8
2.1.4 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye).....	10
2.1.5 สีย้อมรีแอคทีฟพลู 19	10
2.2 หมึก	11
2.2.1 หมึกกล้วย	11
2.3 ไคตินและไคโตซาน.....	12
2.3.1 ไคติน (chitin).....	12
2.3.2 ไคโตซาน (Chitosan).....	13
2.3.3 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน	14
2.3.4 คุณสมบัติของไคโตซาน	14
2.3.5 การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน.....	16
2.4 การดูดซับ (Adsorption)	18
2.4.1 นิยาม และความสำคัญของกระบวนการดูดซับ.....	18
2.4.2 กลไกการดูดซับ	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 การจำแนกลักษณะการดูดซับ	20
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	22
2.4.5 สมดุลการดูดซับ	24
2.4.6 การวิเคราะห์การดูดซับ	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1 วัตถุประสงค์ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	37
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากแกนหมึก	37
3.2.2 การสกัดโคติน-โคโตซาน	37
3.2.3 การดูดซับ	38
3.2.4 การแปรค่าความเข้มข้นของสีในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI).....	41
3.2.5 การศึกษาความสามารถในการนำแกนหมึกปรับสภาพ และ โคโตซานจากแกนหมึกกลับมาใช้ใหม่ (คายซับ).....	42
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	44
4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของแกนหมึก	44
4.2 ผลการศึกษากำจัดโคโตซานจากแกนหมึก	46
4.2.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน	46
4.2.2 กระบวนการกำจัดแร่ธาตุ	47
4.2.3 กระบวนการกำจัดหมู่อะซิทิล	47
4.2.4 การละลายของโคโตซาน	48
4.2.5 การวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation, %DDA).....	48
4.2.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของโคโตซาน	49
4.3 ผลการศึกษาขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	51
4.4 ผลการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	53
4.5 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า.....	55
4.6 ผลการศึกษาเวลาในการแช่ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	57
4.7 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการแช่ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	59
4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้า	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 ผลการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ).....	65
4.10 ผลการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นสีย้อมในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI).....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	67
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	68
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก ภาพประกอบโครงงานพิเศษ.....	73
ภาคผนวก ข เทคนิคและเครื่องมือวิเคราะห์.....	76
ภาคผนวก ค การเตรียมสารเคมี.....	90
ภาคผนวก ง ตารางแสดงผลการทดลอง.....	92
ภาคผนวก จ สูตรการคำนวณ.....	108
ภาคผนวก ฉ มาตรฐานคุณภาพน้ำ.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมพอกย้อมสิ่งทอ	8
2.2 การจำแนกชั้นทางชีววิทยา	12
2.3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และ การดูดซับทางเคมี	21
3.1 โคออร์ดิเนตที่ต้องวัดในการวัดสีด้วยสเปคโตรโฟโตมิเตอร์	42
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกนหมึกเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence	46
4.2 ผลการกำจัดโปรตีน	46
4.3 ผลการกำจัดแร่ธาตุ	47
4.4 ผลผลิตโคติน	47
4.5 ผลการกำจัดหมู่อะซิทิล	48
4.6 ผลการละลายของโคโตซาน	48
4.7 ผลการกำจัดหมู่อะซิทิล	48
4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก	61
4.9 เปรียบเทียบไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich	62
4.10 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากแกนหมึก	63
4.11 เปรียบเทียบไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich	64
4.12 ผลการคายซับของแกนหมึก	65
4.13 ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในหน่วย ADMI	66
๗ 1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	86
๗ 1 การละลายของโคโตซาน	92
๗ 2 การศึกษาขนาดของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	94
๗ 3 การศึกษาขนาดของโคโตซานจากแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	95
๗ 4 การศึกษาปริมาณของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	96
๗ 5 การศึกษาปริมาณของโคโตซานจากแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า	97
๗ 6 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก	98
๗ 7 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซาน จากแกนหมึก	99
๗ 8 ผลการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก	100
๗ 9 ผลการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากแกนหมึก ...	101
๗ 10 ผลการศึกษาค่าความเร็วยอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง 11 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจาก แกนหมึก.....	103
ง 12 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก.....	104
ง 13 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากแกนหมึก.....	105
ง 14 ผลการศึกษาความสามารถในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ).....	106
ง 15 ผลการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นสีย้อมในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI)	107



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการพอกย้อมเส้นใยหรือเส้นด้าย	4
2.2 กระบวนการพอกย้อมผ้าถัก.....	5
2.3 กระบวนการพอกย้อมผ้าทอ	6
2.4 สูตรโครงสร้างสี Reactive Blue 19.....	10
2.5 Swordtip squid (<i>loligo edulis</i> Hoyle).....	11
2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน.....	13
2.7 แผนภูมิอย่างง่ายแสดงการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ	20
2.8 กราฟของ Langmuir isotherm.....	26
2.9 กราฟเชิงเส้นของ Langmuir isotherm.....	27
2.10 กราฟของ Freundlich isotherm.....	27
2.11 กราฟเชิงเส้นของ Freundlich isotherm.....	28
4.1 แกนหมึกกล้วย (<i>loligo edulis</i> Hoyle).....	44
4.2 แกนหมึกกล้วย (<i>loligo edulis</i> Hoyle) ขนาด 35 เมช	44
4.3 ลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวราบ	45
4.4 ลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวตัดขวาง	45
4.5 ลักษณะพื้นผิวของไคโตซาน.....	49
4.6 เปรียบเทียบ IR Spectra ของไคโตซานจากแกนหมึกและไคโตซานทางการค้า.....	50
4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึกขนาดต่างๆ	51
4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของไคโตซานขนาดต่างๆ	52
4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึกในปริมาณต่างๆ	53
4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของไคโตซานในปริมาณต่างๆ	54
4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆด้วยแกนหมึก	55
4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆด้วยไคโตซาน.....	56
4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆของแกนหมึก	57
4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆของไคโตซานจากแกนหมึก	58
4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็วรอบต่างๆของแกนหมึก	59
4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็วรอบต่างๆของไคโตซาน.....	60
4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆของแกนหมึก	61
4.18 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึก	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆของโคโตซาน	63
4.20 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้า	64
4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม	66
ก 1 IR Spectra ของโคโตซานทางการค้า	73
ก 2 IR Spectra ของโคโตซานจากแกนหมึก ครั้งที่ 1	73
ก 3 IR Spectra ของโคโตซานจากแกนหมึก ครั้งที่ 2	74
ก 4 IR Spectra ของโคโตซานจากแกนหมึก ครั้งที่ 3	74
ก 5 เปรียบเทียบ IR Spectra ของโคโตซานก่อนและหลังดูดซับสีย้อม	75
ก 6 เปรียบเทียบ IR Spectra ของแกนหมึกก่อนและหลังดูดซับสีย้อม	75
ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	77
ข 2 แสดงแผนภาพองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFs	79
ข 3 ลักษณะและองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFs ชนิด energy dispersion system	80
ข 4 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	82
ข 5 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM	83
ข 6 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	84
ข 7 Fourier Transform Infrared Spectrometer	85
ง 1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 1	94
ง 2 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 2	95
ง 3 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 3	96
ง 4 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 4	97
ง 5 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 5	98
ง 6 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 6	99
ง 7 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 7	100
ง 8 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 8	101
ง 9 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 9	102
ง 10 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 10	103
ง 11 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 11	104
ง 12 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 12	105
ง 13 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 13	106
ง 14 กราฟมาตรฐานสารละลาย Platinum-Cobalt	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

%DDA	Degree of deacetylation
%RSD	ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
%T	เปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน
λ	ความยาวคลื่น
λ_{\max}	ความยาวคลื่นสูงสุด
$^{\circ}\text{C}$	องศาเซลเซียส
ADMI	American Dye ManuFacturers Institute
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้น
C_2	ตำแหน่งของคาร์บอนตัวที่ 2
cm^{-1}	1/เซนติเมตร
DE	Intermediate Value
FT-IR	เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy
I_0	ความเข้มข้นของแสงเริ่มต้น
KJ/mol	หน่วยกิโลจูลต่อโมล
M	โมลาร์
mg/L	หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร
ml	หน่วยมิลลิลิตร
nm	หน่วยนาโนเมตร
PVA	Polyvinyl Alcohol
rpm	round per minute (รอบต่อนาที)
v/v	หน่วยปริมาตรต่อปริมาตร
w/v	หน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอและเครื่องนุ่งห่ม เป็นที่ต้องการและจำเป็นอย่างมากต่อประชากรบนโลก ทำให้ภาคอุตสาหกรรมต้องมีการพัฒนาเทคนิคทางด้านการผลิตเพื่อตอบสนองความต้องการของประชากร เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าต่อการลงทุนและผลกำไร แต่ในทางเดียวกันนั้น อุตสาหกรรมสิ่งทอได้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้น้ำ สีย้อม สารเคมี และพลังงาน (วีระศักดิ์, 2544) ซึ่งอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นได้ก่อให้เกิดขยะมูลฝอยและน้ำเสียจากกระบวนการผลิต เกิดเป็นปัญหาที่ยากต่อการควบคุม ถึงแม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจะมีระบบบำบัดน้ำเสียที่ดี แต่ยังคงมีปัญหาที่เกิดขึ้นจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ อันเนื่องมาจากการบำบัดนั้น ไม่สามารถลดการปนเปื้อนของน้ำเสียได้ทั้งหมด ทำให้แหล่งน้ำธรรมชาติที่รองรับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมได้รับผลกระทบ เช่น น้ำเน่าเสียจากปริมาณออกซิเจนในน้ำที่ลดลง และส่งผลกระทบต่อมา ยังสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ เช่น พืชและสัตว์ในแหล่งน้ำไม่สามารถดำรงชีวิตในน้ำเน่าเสียได้ และยังส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์อีกด้วย เช่น กลิ่นของน้ำเน่าเสียที่เกิดจากซากพืชและสัตว์ที่ตายในแหล่งน้ำ ซึ่งการบำบัดสีในน้ำเสียนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่ง่าย สะดวก และเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด ได้แก่ วิธีการดูดซับ โดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ตามท้องถิ่น สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ซึ่งการดูดซับเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด สามารถกำจัดสีจริงและสีที่ปรากฏได้เป็นอย่างดี และเป็นการพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งทางธรรมชาติเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ในปัจจุบันได้มีการนำสีรีแอคทีฟ (reactive dyes) มาใช้ในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสีรีแอคทีฟสามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยได้ สีรีแอคทีฟสามารถติดอยู่บนเส้นใยด้วยพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง ทนทานต่อการซักล้าง ด้วยจุดเด่นข้อนี้ทำให้สีรีแอคทีฟ เป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (กาวิ, 2554)

การเปรียบเทียบกระบวนการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ในครั้งนี้เลือกใช้แกนหมึกและไคโตซานที่สกัดจากแกนหมึกกล้วยมาเป็นตัวดูดซับ เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม และความคุ้มค่าในการเลือกวัสดุดูดซับ เนื่องจากไคโตซานเป็นสารประกอบทางชีวภาพที่สกัดได้จากเปลือกนอกแกนกลาง และปีกของสัตว์ในตระกูล Crustacean เช่น กุ้ง หอย ปู หมึก และแมลง เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำเอาวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีด้วยแกนหมึก และโคโตซานจากแกนหมึก
- 2) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีด้วยแกนหมึก และโคโตซานจากแกนหมึก
- 3) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสีด้วยแกนหมึก และโคโตซานจากแกนหมึก
- 4) เพื่อศึกษาการนำวัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติมาใช้ในการดูดซับสี
- 5) เพื่อศึกษาการนำแกนหมึก และโคโตซานจากแกนหมึกที่ผ่านการดูดซับแล้วกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของรีแอกทีฟบลู 19 ในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแกนหมึก และโคโตซานที่สกัดจากแกนหมึกกล้วย Swordtip squid (*loligo edulis* Hoyle) ดังนี้
 - 1.1) ขนาดของแกนหมึก และผงโคโตซาน 10, 20 และ 35 เมช
 - 1.2) ปริมาณของแกนหมึก 0.1, 0.25 และ 0.5 กรัม ต่อปริมาตรน้ำเสีย 50 ml
 - 1.3) ปริมาณของโคโตซาน 1, 2 และ 3 กรัม ต่อปริมาตรน้ำเสีย 50 ml
 - 1.4) ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 4, 7, 9, 10, 11 และ pH เริ่มต้น
 - 1.5) อัตราเร็วในการปั่นกวนที่ 100, 150, 200 และ 250 rpm
 - 1.6) เวลาในการปั่นกวน 5, 15, 30, 60 และ 90 นาที
- 2) ตรวจวัดความเข้มของสีด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เพื่อวัดหา λ_{\max} ได้ $\lambda_{\max} = 590 \text{ nm}$

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำวัสดุที่เหลือใช้จากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์
- 2) ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำแกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึกมาประยุกต์ในการดูดซับสีในน้ำเสียสังเคราะห์
- 3) ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีโดยใช้แกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึก
- 4) ทราบถึงประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับสีด้วยแกนหมึก และโคโตซานจากแกนหมึก

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

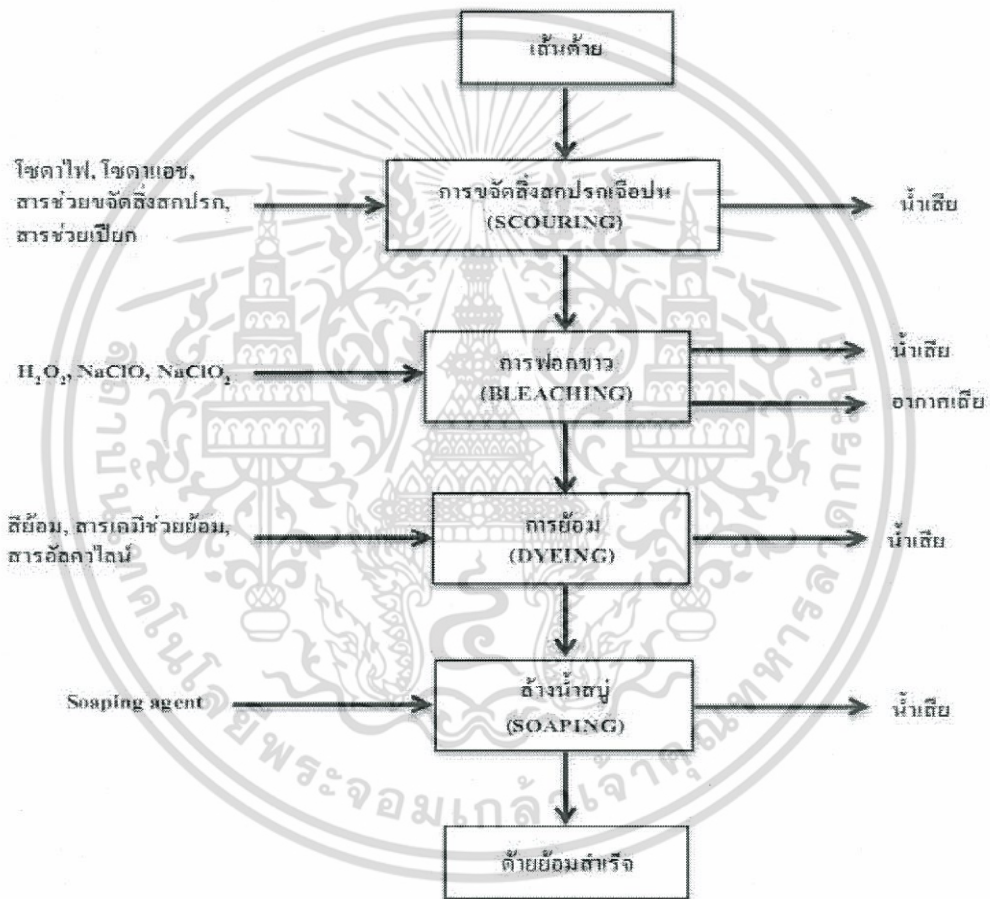
2.1.1 กระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมการย้อมครอบคลุมตั้งแต่การย้อมเส้นด้าย การย้อมผ้าฝัก และการย้อมผ้าทอ ในประเทศไทยขนาดของโรงงานมีความแตกต่างกันมาก โดยในขนาดเล็กและขนาดกลางมักเป็นลักษณะการรับจ้างย้อมผลิตภัณฑ์ที่มีราคาไม่สูง ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่เข้มงวดด้านคุณภาพ เพื่อผลิตสินค้าใช้ในประเทศและประเทศเพื่อนบ้านใกล้เคียง ในขณะที่โรงงานขนาดใหญ่มุ่งไปทางสินค้าที่มีคุณภาพ ทั้งเพื่อขายในประเทศและการส่งออกต่างประเทศ การย้อมนับเป็นการใช้วิชาการทั้งทางศิลป์และวิทยาศาสตร์ผสมผสานเข้าด้วยกัน การย้อมที่ดีต้องพยายามย้อมผ้าครั้งเดียวให้ได้คุณภาพของสีและความสม่ำเสมอตามความต้องการ ซึ่งนับได้ว่าเป็นกระบวนการที่ยากต่อการควบคุมเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพราะเป็นกระบวนการที่กว่าจะทราบว่าผลิตภัณฑ์ออกมามีหรือไม่ก็ต่อเมื่อขั้นตอนสุดท้ายหลังการย้อมออกมาแล้วเท่านั้น ดังนั้นหากมีปัญหาเกิดขึ้นในระหว่างการย้อมก็ก่อให้เกิดความสูญเสียในการย้อมครั้งนั้นทั้งหมด ความชำนาญของผู้ควบคุมจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องมีพื้นฐานความเข้าใจในการย้อมที่ถูกต้องและจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้ (วีระศักดิ์, 2544)

- ต้องมีความรู้และความเข้าใจในวัตถุดิบที่จะทำการย้อมว่าเป็นเส้นผ้าหรือผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำเร็จรูปเป็นผ้าทอ ฝัก หรือเป็นเส้นด้ายที่ทำจากเส้นใยอะไร โครงสร้างเป็นเช่นใด ต้องมีกระบวนการเตรียมผ้าก่อนการย้อมอย่างไรบ้างเพื่อให้แน่ใจในการกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อาจมีติดมากับผ้าหรือเส้นใยนั้นๆ
- ต้องมีความรู้และความเข้าใจในการเลือกใช้สีย้อมที่เหมาะสมกับชนิดของสี ความเข้ากันได้ของสีย้อมกับวัตถุดิบ ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถของสีย้อมที่ไปติดบนเส้นใยแต่ละชนิดไม่เท่ากัน และความคงทนภายหลังการย้อมก็ต่างกัน ดังนั้นการตัดสินใจเลือกใช้ชนิดของสีย้อมจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง
- ต้องมีความรู้และความเข้าใจในการควบคุมคุณภาพของน้ำทั้ง และการจัดการน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการฟอกย้อม
- ต้องมีความรู้และความเข้าใจในสมบัติของสารเคมีต่างๆที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม
- ต้องมีความรู้และความเข้าใจในหลักการของกระบวนการฟอกย้อม

1. กระบวนการฟอกย้อมเส้นใยหรือเส้นด้าย

วัตถุดิบ คือ เส้นใยหรือเส้นด้ายที่มีลักษณะเป็นม้วนด้ายหรือขดด้าย การย้อมเส้นใยหรือเส้นด้ายต้องทำให้สีซึมเข้าไปติดเส้นด้ายอย่างสม่ำเสมอ โดยทุกขั้นตอนจะทำในเครื่องย้อมเส้นใยหรือเส้นด้าย เริ่มตั้งแต่การขจัดสิ่งสกปรก การฟอกขาว การล้างก่อนการย้อม จากนั้นจึงผ่านกระบวนการย้อม และทำการล้างด้วยน้ำสบู่ แล้วจึงนำไปทำการตกแต่งเข้าเครื่องอบแห้ง และกรอด้วยกลับเข้าหลอดพลาสติกเพื่อเตรียมการจัดจำหน่าย แสดงดังรูป 2.1

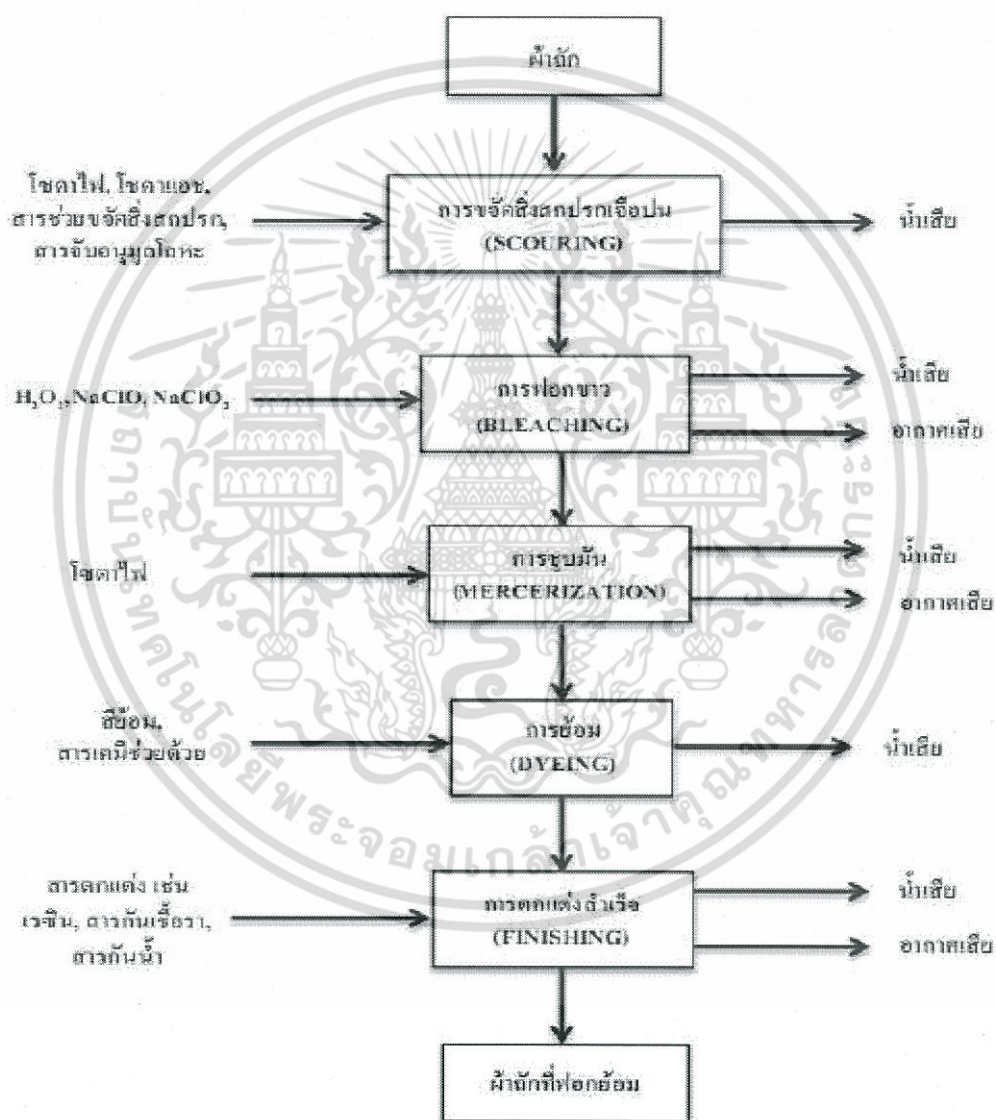


รูปที่ 2.1 กระบวนการฟอกย้อมเส้นใยหรือเส้นด้าย

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556 อ้างถึงใน สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

2. กระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้าย

วัตถุดิบ คือ ผ้าฝ้าย ซึ่งขั้นตอนแรก คือ การเตรียมผ้าก่อนการย้อมสี ด้วยการชุบมัน เพื่อให้ผ้าเกิดความมันเงา และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดสี จากนั้นจึงนำไปผ่าน กระบวนการย้อมสี โดยนำผ้าเข้าเครื่องย้อมแบบเจ็ท (Rapid Jet) ซึ่งในเครื่องจะมีการฟอก ผ้าให้ขาวขึ้น แล้วจึงย้อมสีได้ จากนั้นทำ การอบแห้งและตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนสุดท้าย แสดงดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการฟอกย้อมผ้าฝ้าย

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556 อ้างถึงใน สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ

วัตถุดิบ คือ ผ้าฝ้ายที่ทอเรียบร้อยแล้ว เป็นการย้อมสีผ้าทั้งผืนให้เป็นสีเดียวกัน โดยขั้นตอนการย้อมสีผ้าทอในขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมผ้าก่อนการย้อมสี เป็นขั้นตอนการนำผ้าเข้าเครื่องคลี่ผ้า การเผาขนก่อนที่จะนำไปเข้าเครื่องทำความสะอาดเพื่อทำการลอกแป้งและกำจัดสิ่งสกปรก แล้วจึงนำไปผ่านการฟอกขาวและซุบมัน จากนั้นนำผ้าเข้าเครื่องย้อมเพื่อย้อมสี แล้วนำไปอบแห้งและตกแต่งสำเร็จเป็นขั้นตอนสุดท้าย ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556

อ้างถึงใน คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ, 2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมสิ่งทอ

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

1) สารเคมีที่ใช้ในการขจัดสิ่งสกปรก

- โซดาไฟ (Sodium hydroxide : NaOH) ทำปฏิกิริยากับไขมันโดยเปลี่ยนไขมันเป็นสบู่ที่ละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังทำให้เส้นใยขยายตัว สิ่งสกปรกต่างๆ ถูกขจัดออกง่ายขึ้น ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ได้แก่ ความร้อน นอกจากนี้ต่างยังช่วยกำจัดสารอื่นๆ เช่น โปรตีน เพกทิน สารลงแป้งที่ตกค้าง และเกลือแร่ต่างๆ ให้ละลายหลุดออกมา
- น้ำสบู่ (Detergent) ทำหน้าที่กำจัดไขมันในลักษณะที่ทำให้เกิดอิมัลชัน (Emulsion) การกำจัดสิ่งสกปรกอื่นๆ ออกจากวัสดุรวมทั้งป้องกันมิให้ย้อนกลับไปติดบนวัสดุอีก น้ำสบู่แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ พวกไม่มีประจุไฟฟ้า พวกมีประจุลบ พวกมีประจุบวก และพวกมีทั้งประจุบวกและประจุลบ แต่ละกลุ่มจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ได้แก่ ความสามารถในการแทรกซึม ความสามารถในการซักล้าง ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน
- สารจับโลหะ (Complexing agent) เป็นพวกลิแกนด์ หรือคีเลต สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} และ Mn^{2+} เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะต่างปกติ ตะกอนไฮดรอกไซด์เหล่านี้มีผลเสียต่อการฟอกผ้าด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไอออนเหล่านี้นอกจากจะพบในน้ำแล้วยังพบว่ามาจากวัสดุ เช่น ฝ้าย เป็นต้น

2) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกขาว

- สารออกซิไดซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่นเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ สารประกอบเปอร์ออกไซด์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โซเดียมเปอร์ออกไซด์ (Na_2O_2) เป็นต้น สารประกอบไฮโปคลอไรท์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (NaClO) และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (Ca(OCl)_2) เป็นต้น สารประกอบคลอไรท์ เช่น โซเดียมคลอไรท์ (NaClO_2) เป็นต้น
- สารรีดิวซ์ เป็นสารที่ทำให้สารอื่น เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$) โซเดียมฟอร์มแมลดีไฮด์ซัลฟอกซิเลต ($\text{HCHOHSO}_2\text{Na}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 กระบวนการกำจัดสีย้อม

น้ำทิ้งอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นน้ำที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ชนิดต่างๆที่ก่อให้เกิดมลพิษแก่แหล่งน้ำ เนื่องจากอุตสาหกรรมประเภทนี้มีการใช้น้ำปริมาณมากและเป็นอุตสาหกรรมที่อาจสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยปัญหาใหญ่ที่พบ คือ การปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำทิ้ง ถึงแม้ว่าจะมีความเป็นพิษต่ำ แต่ก็สามารถทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำที่รองรับน้ำทิ้งเหล่านี้ได้ จึงต้องมีการกำจัดสีของน้ำทิ้งก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยส่วนมากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอเป็นน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมและสารเคมีจากกระบวนการผลิต ซึ่งเทคโนโลยีการบำบัดสีน้ำเสียในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอมีหลายวิธี ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment), กระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical) และ กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา (Biological Treatment) ระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอนิยมใช้ในการกำจัดสีที่ไม่สามารถกำจัดในระบบบำบัดด้วยการตกตะกอนทางเคมี หรือระบบบำบัดทางชีวภาพได้ และนิยมใช้เป็นระบบบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงาน คือ ระบบการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

การเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการบำบัดน้ำเสียของโรงงานแต่ละประเภทต้องคำนึงถึงลักษณะน้ำเสีย, ปริมาณน้ำเสีย, ประสิทธิภาพในการบำบัด และ ค่าใช้จ่าย โดยในทางปฏิบัติควรมีการนำน้ำเสียมาทดสอบก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ และเพื่อให้การบำบัดได้รับประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งเทคโนโลยีในการบำบัดต่างๆมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ

เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อด้อย
กระบวนการบำบัดทางกายภาพ		
การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	<ul style="list-style-type: none"> - มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง - กำจัดสีจริงและสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - การนำกลับมาใช้ใหม่จะต้องฟื้นฟูสภาพด้วยการเผาที่ความร้อนสูง มีค่าใช้จ่ายสูง - มีข้อจำกัดที่น้ำหนักโมเลกุลของสีที่ถูกดูดซับ
การกรองผ่านเยื่อกรองออสโมซิสย้อนกลับ	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้กำจัดไอออนสีย้อมและโมเลกุล ของสีย้อมที่มีขนาดใหญ่ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่สามารถใช้กับสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยประเภทฝ้ายได้ - เยื่อกรองอุดตันได้ง่าย

ตารางที่ 2.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอ (ต่อ)

เทคโนโลยีการบำบัด	ข้อดี	ข้อด้อย
การกรองผ่านเยื่อกรอง อัลตราฟิเตรชัน	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง - สามารถนำวัสดุ (PVA, โซดาไฟ, สีย้อมอินดิโก) กลับมาใช้ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง ไมโครฟิเตรชัน	- สามารถนำสีดีสเพอร์สที่ผ่าน กระบวนการกลับมาใช้ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
การกรองผ่านเยื่อกรอง นาโนฟิเตรชัน	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง - สามารถแยกสารอิเล็กทรอนิกส์ ออกมาและนำกลับมาใช้ใหม่ได้	- ค่าใช้จ่ายสูง
กระบวนการบำบัดทางเคมี		
การตกตะกอนเคมี	- มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง	- เกิดกากตะกอนในปริมาณ มาก ซึ่งยุ่งยากในการกำจัด
กระบวนการเฟ้นต้น	- กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ต้องควบคุมปัจจัยและสภาวะ ต่างๆในการบำบัด
การใช้โอโซน/ การออกซิเดชันด้วยโอโซน	- สามารถทำลายโมเลกุลของสี หมู โครโมฟอร์ที่เป็นพันธะคู่หรือ พันธะเดี่ยว	- สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า - ต้องควบคุมปัจจัยและสภาวะ ต่างๆในการบำบัด - อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิต เนื่องจากโอโซนว่องไวต่อการ เกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดสาร ก่อมะเร็ง
การใช้ไฟฟ้าเคมี	- สามารถใช้บำบัดน้ำเสียใน ปริมาณมากได้และใช้เวลาในการ ทำปฏิกิริยาน้อย - กำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ	- ต้องควบคุมปัจจัยและสภาวะ ต่างๆในการบำบัด
กระบวนการบำบัดทางชีววิทยา		
ระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน	- คุณภาพน้ำทิ้งได้มาตรฐาน	- อัตราเร็วในการกำจัดสีต่ำ
ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ ออกซิเจน	- ได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์จาก กระบวนการการบำบัด	- อาจเกิดสารพิษบางประเภท - ต้องมีระบบบำบัดรองรับ

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, (2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 สีรีแอคทีฟ (Reactive dye)

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นต่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ (OH) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสภาวะที่เป็นต่าง กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอคทีฟมี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง (70-75 °C) และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิปกติ สีรีแอคทีฟให้สีที่สดใสและติดทนในทุกสภาวะ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2556)

- คำอธิบายทั่วไป : จำหน่ายครั้งแรกในปี พ.ศ.2500 ทำการรวมตัวทางเคมีกับเส้นใยแตกต่างจากสีอื่นๆ ให้สีสว่างที่สุดต่อผ้า
- การใช้งาน : ใช้ย้อมผ้าฝ้าย ผ้าประดับที่ต้องการสีสด สีเกาะติดดีมาก ใช้ได้ทั้งกับการพิมพ์ นอกนั้นยังใช้ได้กับขนสัตว์ ไหม ไนลอน เส้นใยอะคริลิกและเส้นด้าย
- ความคงทน : ทนต่อแสงได้ดีมาก แต่ถ้าย้อมกับไนลอนความคงทนลดลง ทนต่อการซักล้างได้ดี แต่ต้องระวังต่อสารซักฟอกคลอรีน

2.1.5 สีรีแอคทีฟบลู 19 (ศูนย์ข้อมูลเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ, 2559)

CI Name : REACTIVE BLUE 19

สูตรทางเคมี : $C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$

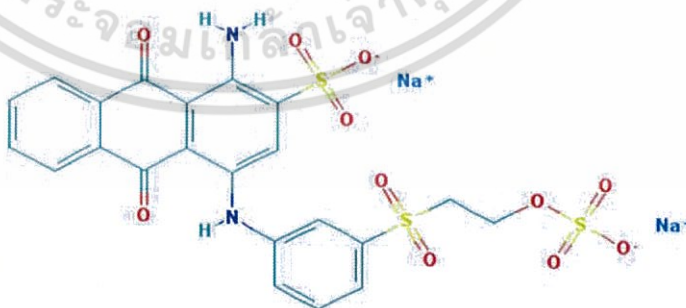
น้ำหนักโมเลกุล : 626.543779 g/mol

IUPAC Name : disodium;1-amino-9,10-dioxo-4-

[3-(2-sulfonatooxyethylsulfonyl)anilino]

anthracene-2-sulfonate

สูตรโครงสร้าง :



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างสี Reactive Blue 19

(National Center for Biotechnology Information, 2016)

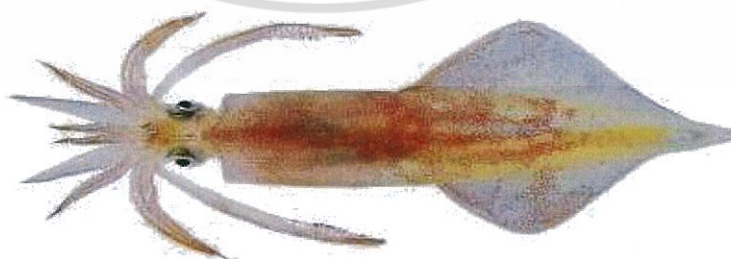
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 หมึก

หมึกเป็นสัตว์น้ำไม่มีกระดูกสันหลังจำพวกหอย อยู่ในไฟลัม Mollusca คลาส Cephalopoda มีพฤติกรรมว่องไวเหมือนปลา มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำ และมีระบบประสาทสัมผัสเทียบเท่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น ตาที่มีโครงสร้างและประสิทธิภาพใกล้เคียงกับมนุษย์ มีเส้นประสาทใหญ่กว่ามนุษย์ 50 เท่า (เทียบตามอัตราส่วน) ทำให้มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างรวดเร็ว จัดว่าเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่มีวิวัฒนาการมาสูงที่สุด หมึกเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ผสมพันธุ์แบบอาศัยเพศ วางไข่เพียงครั้งเดียวแล้วตาย (กรมประมง, 2559)

2.2.1 หมึกกล้วย

หมึกกล้วย (Squid) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Teuthida* นับเป็นหมึกที่มนุษย์คุ้นเคยมากที่สุดเป็นที่รู้จักมากที่สุด มีรูปร่างเรียวยาว ลำตัวกลม มีระยางค์เหมือนครีบเป็นรูปสามเหลี่ยมอยู่ทางด้านซ้ายและขวา มีหนวดทั้งหมด 10 หนวด และจะมีอยู่คู่หนึ่งที่ยาวกว่าหนวดอื่น ๆ ใช้สำหรับหยิบจับอาหาร เรียกว่าเป็นหนวดล่าเหยื่อ หรือหนวดจับ โดยหนวดอื่น ๆ นั้นจะใช้สำหรับช่วยเพื่อไม่ให้อาหารหลุดไป ก่อนที่จะกัดกินเข้าปาก ภายในลำตัวมีของแข็งลักษณะโปร่งใส เรียกว่า แขนงหมึก (Squid pen) ที่มีขนาดเล็กและบางกว่าลันทะเลที่เป็นแคลเซียมแข็งเช่นเดียวกับในกลุ่มหมึกกระดอง ซึ่งหมึกกล้วยเป็นหมึกที่มีพฤติกรรมอยู่รวมกันเป็นฝูงใหญ่ มักว่ายและหากินอยู่บริเวณกลางน้ำ จับสัตว์น้ำทั่วไปกินเป็นอาหาร แม้กระทั่งหมึกพวกเดียวกันเองก็ตาม การว่ายน้ำของหมึกกล้วยเป็นไปอย่างคล่องแคล่วและรวดเร็ว เนื่องจากมีท่อสำหรับดูดน้ำทะเลที่มีออกซิเจนเข้าไปใช้ในการหายใจ และใช้พ่นน้ำออกมาโดยใช้หลักการเดียวกับเครื่องยนต์เจ็ทซึ่งหากหมึกกล้วยพ่นน้ำออกจากท่อนี้ด้วยความแรง ก็สามารถจะเป็นแรงผลักดันในการเคลื่อนที่ให้ลำตัวพุ่งไปในทางตรงกันข้ามได้อย่างรวดเร็ว (วิกิมีเดีย, 2559)



รูปที่ 2.5 Swordtip squid (*loligo edulis* Hoyle)

ตารางที่ 2.2 การจำแนกชั้นทางชีววิทยา

Kingdom :	Animalia
Phylum :	Mollusca
Class :	Cephalopoda
Order :	Teuthida
Suborder :	Myopsina
Family :	Loliginidae
Genus :	Loligo
Subgenus	edulis

ที่มา : Wikimidia, (2559)

ลักษณะภายนอก : ลำตัวอวบ ยาวเรียวในเพศผู้ที่โตเต็มวัย มีสันตามแนวเส้นแบ่งหน้าท้อง มีครีบทรงขนมเปือกปูนขนาดประมาณ 70% ของลำตัวที่โตเต็มวัย ส่วนปลายของครีบเข้าหาลำตัวเล็กน้อยหนวดจับเมื่อขยายออกมีลักษณะคล้ายรูปใบหอก

การกระจายทางภูมิศาสตร์ : พบได้ทางตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิก, ทางเหนือของประเทศออสเตรเลีย, หมู่เกาะฟิลิปปินส์ และทางตอนเหนือของทะเลจีนใต้จนถึงใจกลางเมืองของประเทศญี่ปุ่น

แหล่งที่อยู่อาศัยและวงจรชีวิต : อยู่ในน้ำที่ความลึก 30-170 เมตร ซึ่งอุณหภูมิของน้ำลดลงตามระดับความลึก อพยพย้ายถิ่นฐานในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อนเพื่อวางไข่บนพื้นทรายที่รับความลึกประมาณ 30-40 เมตร

ขนาด : ในอ่งก่งขนาดลำตัวที่ใหญ่ที่สุดยาวประมาณ 30 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 0.5 กิโลกรัม ในพื้นที่อื่นๆ มีขนาดประมาณ 40 เซนติเมตร ขนาดปกติในทางการค้าอยู่ระหว่าง 15-20 เซนติเมตร (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016)

2.3 ไคตินและไคโตซาน

2.3.1 ไคติน (chitin)

ไคตินเป็นโพลีเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วยน้ำตาลหน่วยย่อย คือ N-acetyl-D-glucosamine มาเรียงต่อกัน เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกหอย ปู กุ้ง เปลือกของแมลง ผงเซลลูโลสของสาหร่าย ยีสต์ และเห็ดราที่พบว่ามีไคตินเป็นองค์ประกอบด้วยเช่นกัน และมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเซลลูโลสมากเพียงแต่แตกต่างกันในส่วนของหมู่ OH ที่ตำแหน่ง C₂ ในโมเลกุลของไคตินจะเป็นหมู่ acetylamino แทน ดังรูปที่ 2.5 ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีโครงสร้าง และสมบัติแตกต่างกันโดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของโพลีเมอร์ได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2559)

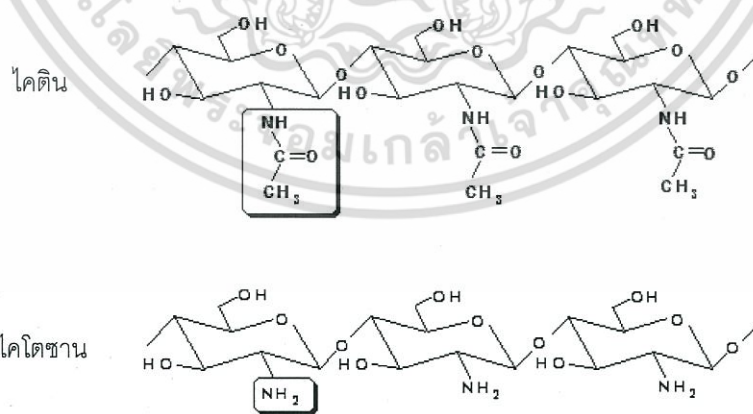
1.แบบอัลฟา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้ง และกระดองปู

2.แบบเบตา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกัน จึงจับกันได้ไม่ค่อย แข็งแรงมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก

3.แบบแกมมา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะที่ไม่แน่นอน (สวนทางกัน สลับทิศทางเดียวกัน) มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

2.3.2 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ตัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกเรียกว่า deacetylation คือ เปลี่ยนน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine เป็น glucosamine ที่ไม่เสถียร (unstable) มีความเป็นขั้วสูง (strong positive polarity) จึงทำให้ไคโตซานมีสมบัติพิเศษพร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว มีคุณสมบัติละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 2-3% ปกติแล้วไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine และ glucosamine อยู่ในสายโพลีเมอร์เดียวกันซึ่งระดับการกำจัดหมู่ acetyl (หรือเปอร์เซ็นต์การเกิด deacetylation, %DD) นี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซาน นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานก็มีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีสายยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น ดังนั้นการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้งเปอร์เซ็นต์การเกิด deacetylation และ น้ำหนักโมเลกุล (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2559)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

(นิรชา และคณะ, 2556 อ้างถึงใน ศูนย์ชีวภาพไคติน-ไคโตซาน, 2544)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 โครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซาน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรง มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลสแตกต่างกันตรงที่มีหมู่ acetylated amino ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 โครงสร้างของไคตินประกอบด้วยหน่วยซ้ำกันของ 2-acetamido-2-deoxy-D-glucose หรือ N-acetyl-D-glucose ชื่อทางเคมีของไคติน คือ Poly $\beta(1 \rightarrow 4)$ -2-amino-2-deoxy-D-glucose

ในธรรมชาติไคตินจะประกอบด้วยหน่วยที่มีหมู่ acetylated amino ประมาณ 84% ส่วนที่เหลืออีก 16% เป็นหน่วยที่กำจัดหมู่ acetyl ออกไป

สำหรับไคโตซานเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของไคติน โดยการกำจัดหมู่ acetyl โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของ $(1 \rightarrow 4)$ -2-amino-2-deoxy-D-glucose หรือ D-glucosamine โดยปกติไคโตซานจะประกอบด้วยหน่วยที่กำจัดหมู่ acetyl ออกแล้วต่อหน่วยที่ยังมีอยู่ acetyl อยู่ในอัตราส่วนประมาณ 80:20 ขึ้นกับแหล่งที่มาของไคตินและขั้นตอนการสังเคราะห์ไคโตซาน (สมนึก และคณะ, 2545)

2.3.4 คุณสมบัติของไคโตซาน (สมนึก และคณะ, 2545)

– คุณสมบัติการมีประจุของไคโตซาน

ไคโตซานมีสมบัติความเป็นพอลิเมอร์สูง มีความหนาแน่นของประจุสูง มีความสามารถในการจับกันเป็นกลุ่มได้ดีมาก รวมทั้งสามารถคีเลต(ดูดซับ)กับไอออนของโลหะได้ เช่น ไอออนเหล็ก, ทองแดง, แคลเซียม, พรอท, ตะกั่ว และโครเมียม เป็นต้น ส่วนสารกัมมันตรังสี เช่น ยูเรเนียม พลูโตเนียม เป็นต้น

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์สายตรงมีขั้วที่ pH เป็นกรด มีความหนาแน่นของประจุสูง มีองค์ประกอบที่เป็นประจุลบ เช่น โพรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุลบ เป็นต้น

– การละลาย

ไคโตซาน ไม่ละลายน้ำ ด่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ไคโตซานละลายได้ในกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่า pH น้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก สำหรับกรดอนินทรีย์ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริกและกรดฟอสฟอริก สามารถละลายไคโตซานได้ แต่ต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงปานกลางและมีการปั่นกวน

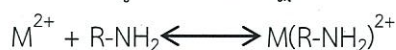
ไคโตซานค่อนข้างจะมีความจำเพาะต่อคุณสมบัติในด้านการละลายชั้นแรก เมื่ออยู่ในรูปเอมีนอิสระ ($-NH_2$) ไคโตซานไม่ละลายน้ำที่มี pH เป็นกลาง ส่วน pH เป็นกรดหมู่เอมีนเป็นอิสระ ($-NH_2$) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเอมีนที่มีประจุบวก (NH_3^+) (Filar และ Wirick, 1978)

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับไคโตซานเมื่อ pH เปลี่ยนแปลง ถ้าไคโตซานอยู่ในสภาพเป็นกรดซึ่งจะทำให้โลหะไอออนต้องแข่งขันกับไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ในสภาวะที่มีความเป็นกรดมากขึ้น อธิบายได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เนื่องจากอะตอมไนโตรเจนบนโคโตซานมีคุณสมบัติเหมือนพื้นที่สำหรับเกิดโคออดิเนชันกับโลหะโดยโคโตซานทำหน้าที่เป็นลิแกนด์โดยอะตอมไนโตรเจนเป็นอะตอมจ่าย และโลหะไอออนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนคู่โคโตซานดังปฏิกิริยา



สรุปที่สภาวะเป็นกรดมากๆของน้ำชะละลายทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมไนโตรเจนซึ่งเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดพันธะโคออร์ดิเนชันกับโลหะได้น้อยลงเพราะ H_2O^+ จะเกิดการแข่งชันกับการเกิดพันธะโคออร์ดิเนชันของโลหะไอออน จึงลดประสิทธิภาพการกำจัดโลหะไอออนโดยโคโตซาน

— คุณสมบัติทางกายภาพของโคโตซาน

โคโตซานไม่มีความเป็นพิษ และเป็นพอลิเมอร์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ รวมทั้งใช้ในกิจกรรมชีวภาพได้ โดยการเร่งรักษาบาดแผล ลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด และกระตุ้นภูมิคุ้มกัน

— คุณสมบัติทางเคมีของโคโตซาน

โคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากประมาณ $1 \times 10^5 - 1.2 \times 10^6$ กรัมต่อโมล ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิตของโคโตซาน เป็นสารพอลิเอมีน (Polyamine) สายตรง ซึ่งมีหมู่เอมีโนสะดวงพอที่จะใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการฟอร์มตัวอยู่ในรูปเกลือบกับกรดโคโตซานเมื่อเทียบกับอนุพันธ์ของเซลลูโลส ต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 องค์ประกอบของโคโตซานประกอบด้วยหมู่เอมีโน และหมู่ไฮดรอกซิล

— ค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation)

ค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation) เป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นโคตินหรือโคโตซาน เป็นพอลิเมอร์ ถ้าค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation) ต่ำ จะแสดงสมบัติของโคติน ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation) สูง จะแสดงคุณสมบัติของโคโตซาน

— ความหนืด

ขึ้นกับค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ โดยทั่วไปความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้และการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะมีผลความหนืดที่ต่างกัน เช่น ความหนืดของโคโตซานในกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง แต่ค่าความหนืดของโคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น

— ความสามารถในการตกตะกอน (Coagulation ability)

ไคโตซานเป็นตัวเหนียวน้ำในการสร้างตะกอนและช่วยในการตกตะกอนที่ดี (flocculation and coagulation agent) เนื่องจากมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่นๆ หรือจับกับโลหะหนักโดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนสร้างพันธะเชิงซ้อนขึ้น หมู่อะมิโนในไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่า หมู่อะซิทิล ในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มีค่าองศาการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of deacetylation) สูงจะมีความสามารถในการจับโลหะหนักได้สูงด้วย

— การสลายตัวของไคโตซาน

- เกิด acid hydrolysis ได้โดยเกิดแบบสุ่ม (random) ได้ oligomer
- Alkaline degradation โดยเริ่มต้นจากปลายสายโซ่ของโมเลกุล
- การย่อยสลายโดยการสั่นโดยใช้คลื่นเสียง จะได้ oligomer ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน
- Enzymic degradation เช่น เอนไซม์ Chitinase และเอนไซม์ Lysozyme
- การย่อยสลายทางไฟฟ้า (Thermal degradation)

2.3.5 การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน

ไคติน-ไคโตซานสามารถทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน โดยตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอย ในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นๆ และเมื่อใหญ่มากพอก็จะตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนจะทำงานคล้ายๆกันคือ จะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา ไคโตซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบได้ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อม กรดไขมันอิสระ คอเลสเตอรอล (ในร่างกาย) เข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้ว จะจับกับอิเล็กตรอนจากหมู่อะมิโนของไคโตซานทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า “พันธะเชิงซ้อน” ขึ้นมา และจากการทดลองพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซานจะสามารถจับกับโลหะหนักในน้ำได้ดีกว่าหมู่อะซิทิลของไคติน (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2559)

ไคโตซานจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

— อุตสาหกรรมอาหาร

ไคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด โดยมีกลไก คือ ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นของเซลล์ ในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนไคตินและไคโตซานให้เป็นสารที่ใช้เติมในอาหารโดยนำไปใช้เป็นสารกีดกัน สารช่วยรักษากลิ่น รส และสารให้ความข้นความหนืด ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสดหรือผลิตในรูปแบบฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

— ด้านอาหารเสริม

โคโคซานช่วยลดคอเลสเตอรอลและไขมันในเส้นเลือด โดยโคโคซานไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้หรือดูดซึมได้น้อยลง และคนไม่สามารถย่อยโคตินและโคโคซานได้ทั้งหมด จึงถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระโดยที่มีคอเลสเตอรอลและไขมันส่วนเกินตามออกมาด้วย แต่โคโคซานสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน (วิตามินเอ ดี อี เค) อาจทำให้ขาดวิตามินเหล่านี้ได้

— อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

โคโคซานถูกนำไปใช้ในเครื่องสำอางสำหรับผิวแห้งและเส้นผม โคโคซานมีประจุบวกทำให้มันสามารถเกาะกับประจุลบของผิวแห้งและเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำไปใช้ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้มัธธรรมชาติที่เรียกว่า กรดแอลฟาไฮดรอกซี (alpha hydroxyl acid; AHA) กรดพวกนี้จะกระตุ้นให้ผิวแห้งเก่าหลุดลอกเพื่อสร้างผิวใหม่ ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงเส้นผม โคโคซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสลวยไม่เสียหาย

— ทางการแพทย์

โคตินและโคโคซาน ได้รับความนิยมนเป็นอย่างมากในทางการแพทย์และเภสัชภัณฑ์ มีรายงานการวิจัยพบว่า โคตินและโคโคซานมีคุณสมบัติสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ (antioxidant activity) มีคุณสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางใสนำมาปิดรักษาบาดแผลผ่าตัด แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ช่วยป้องกันการติดเชื้อของแผล กระตุ้นให้มีการผลิตและสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษกว่าพลาสติกปิดแผลทั่วไป ใช้ผลิตหนังเทียม ผลิตยาลดไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้เป็นสารตัวกลางที่จะปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ ควบคุมคลอเรสเตอรอล ยับยั้งการเกิดมะเร็งด้านไวรัส และทำคอนแทคเลนส์ นอกจากนี้ทางการแพทย์มีรายงานการนำ N-acetyl-D-glucosamine ไปใช้รักษาไขข้อเสื่อม โดยอธิบายว่าข้อเสื่อมเกิดเนื่องจากการสึกกร่อนของเนื้อเยื่ออ่อนที่เคลือบอยู่ระหว่างข้อกระดูกซึ่ง glucosamine เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ proteoglycan และ matrix ของกระดูกอ่อน จึงช่วยทำให้เยื่อหุ้มกระดูกอ่อนหนาขึ้น เป็นต้น

— อุตสาหกรรมเภสัชกรรม

เนื่องจากโคโคซานมีคุณสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม และมีลักษณะเป็นเจลใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิวเพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตร และมีคุณสมบัติยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อโรคแก่พืชได้ด้วย

— อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย

โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร มีสารแขวนลอยสูง ไคโตซานมีประจุบวก สามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยก ไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักและจับสี (dye) ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

2.4.1 นิยาม และความสำคัญของกระบวนการดูดซับ

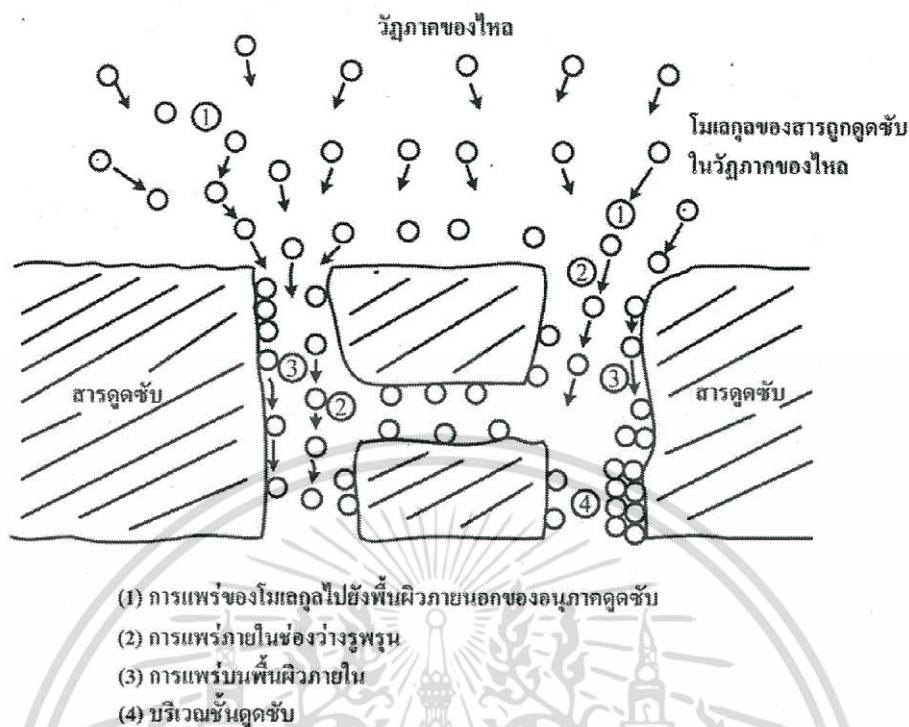
กระบวนการดูดซับสาร (adsorption process) เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการแยก (separation processes) ทางวิศวกรรมเคมีที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับกระบวนการแยกสารอื่นๆเช่น การกลั่น (distillation) การดูดกลืนแก๊ส (gas absorption) และการสกัดสาร (extraction) เป็นต้น กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ใล, ของเหลว) โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งจะเรียกว่าตัวถูกดูดซับ หรือสารถูกดูดซับ (adsorbate) โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นที่ผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ หรือสารดูดซับ (adsorbent) ทำให้ความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไหลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ โดยอาจเป็นแรงดูดอย่างอ่อนที่เรียกแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) หรืออาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงกว่า ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เนื่องจากการดูดซับสารเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) ดังนั้นคุณลักษณะเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดีซึ่งหมายถึงมีความสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อหน่วยปริมาตรได้มากจึงจำเป็นต้องมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุน ซึ่งประกอบด้วยรูพรุนที่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดต่างๆก็มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นเดียวกัน รูปที่ 2.6 แสดงภาพรวมของกระบวนการดูดซับสารซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการถ่ายโอนมวลสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งพื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาค (กระบวนการ (1)) ตามด้วยการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับซึ่งประกอบด้วย การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (pore diffusion) (กระบวนการ(2)) และการแพร่ไปบนพื้นที่ผิวภายในรูพรุน (surface diffusion) (กระบวนการ(3)) และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (adsorption sites) (กระบวนการ(4)) สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดในทิศทางตรงกันข้าม ได้แก่ การที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิวภายในของสารดูดซับจะเรียกว่า กระบวนการคายสาร (desorption process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่กระทำเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ ทำให้สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เรียกกระบวนการนี้ว่า “การคืนสภาพ” (adsorbent regeneration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระบวนการดูดซับแก๊ส การคายสารทำได้โดยวิธีลดความดันของระบบ หรือโดยการให้ความร้อนแก่ระบบ โดยใช้ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงได้โดยวิธีลดความดันของระบบ หรือโดยการให้ความร้อนแก่ระบบ โดยใช้ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูง ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สเฉื่อย หรือแก๊สผสมจากกระบวนการอื่น เป็นต้น (ชัยยศ, 2554)

เนื่องจากในการใช้งานจริง กระบวนการดูดซับสารจะถูกจำกัดด้วยความจุของสารดูดซับ กล่าวคือ เมื่อสารดูดซับถูกใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง และเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) จะต้องทำการคืนสภาพให้กับสารดูดซับเป็นระยะๆ เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ เป็นการประหยัดใช้สารดูดซับ ด้วยเหตุนี้ ในระยะต้นของการประยุกต์กระบวนการดูดซับมาใช้ในกระบวนการแยกสาร จึงไม่ค่อยได้รับความนิยมมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกนำมาทำงานร่วมกับกระบวนการแยกสารประเภทอื่น ตัวอย่าง เช่น กระบวนการกลั่น ซึ่งทำงานแบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีความยุ่งยากในการสังเคราะห์การดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ ให้มีสมบัติในการดูดซับที่คงที่สม่ำเสมอ เนื่องจากสารดูดซับส่วนใหญ่จะถูกสังเคราะห์จากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น ชีวมวล ถ่านหิน หรือแร่ธาตุ ดังนั้นการออกแบบ และการทำงานของระบบดูดซับสารในระดับอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นค่อนข้างสูง เพื่อรับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆดังกล่าว อย่างไรก็ตามได้มีการพัฒนาการของวิธีสังเคราะห์สารดูดซับประเภทต่างๆ ที่มีความหลากหลายของสมบัติการดูดซับ ตลอดจนมีความเฉพาะเจาะจงต่อสารดูดซับมากขึ้น ทำให้สามารถเลือกใช้สารดูดซับที่เหมาะสมต่อการใช้งานเฉพาะอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ ทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไก ตลอดจนพลศาสตร์ของการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวทำให้กระบวนการดูดซับสารมีบทบาท และทวีความสำคัญเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและถูกประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการแยกสาร และกระบวนการทำบริสุทธิ์ในระดับอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การลดความชื้นของแก๊สผสม การกำจัดไอของตัวทำละลายอินทรีย์ การดูดความชื้นจากบรรจุภัณฑ์ การแยกออกซิเจน และไนโตรเจน จากอากาศ ตลอดจนการกำจัดมลพิษต่างๆออกจากน้ำ และอากาศ เป็นต้น (ชัยยศ, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แผนภูมิอย่างง่ายแสดงการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ (ชัยยศ, 2554)

2.4.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 Bulk transport เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 Film transport เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แพร่ไปที่ผิวหน้าของสารดูดซับ ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวชั้นตอนหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 3 Intraparticle transport เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายในซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน (กฤษณะ, 2559)

2.4.3 การจำแนกลักษณะการดูดซับ

ระบบดูดซับสารสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูด ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ โดยแบ่งได้เป็นสองประเภทได้แก่

ก. ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

ข. ระบบดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการดูดซับทางกายภาพนั้น แรงดึงดูดจะค่อนข้างอ่อน และเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่การดูดซับทางเคมีนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นผิวของสารดูดซับ ดังนั้นแรงดึงดูดทางเคมีจึงมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับทางกายภาพ และยังมีสภาพจำเพาะ (spccificity) ของสารดูดซับต่อสารที่จะถูกดูดซับมากกว่าอีกด้วย เนื่องจากการดูดซับที่มีการสร้างพันธะเคมี ระบบดูดซับทางเคมีจึงมีการดูดซับที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเท่านั้น (monolayer adsorption) อนึ่งโดยทั่วไปแล้วการประยุกต์ใช้ระบบดูดซับสารเพื่อการแยก และการทำบริสุทธิ์ในกระบวนการต่างๆจะใช้หลักการของการดูดซับทางกายภาพเป็นหลัก เนื่องจากสามารถดูดซับโมเลกุลของสารได้หลายชั้น (multilayer adsorption) ทำให้มีค่าความจุต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่สูงกว่า และที่สำคัญการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ทำให้สามารถนำสารดูดซับที่ใช้งานจนอิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ (ชัยยศ, 2554)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และ การดูดซับทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่งๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจงสูง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิด ขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ถึงแม้ว่าจะเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และ การดูดซับทางเคมี (ต่อ)

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
6.สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7.อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

ที่มา : ชัยยศ, (2554)

2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000)

1.ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำที่ความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3.ค่า pH

ค่า pH มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่า pH ต่ำๆ มีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่า pH สูง ซึ่งมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่า pH ต่ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งถูกดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่า pH สูง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดความสามารถในการเข้าจับหรือดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับระบบเป็นประเภทใด คือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสู่สัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับถูกดึงดูดออกก่อนแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ด้อยมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า แต่ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด เกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุผลนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กัน อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับกรดฟอร์มิก กรดแอสติก กรดโพรพอนิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น (Solmaz และคณะ, 2000 และ Sharma และคณะ, 1993) นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วยโดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้นแต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมากสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูพรุนมักถูกดูดซับได้มากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าสู่รูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่ดูดซับมีอยู่น้อยเนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

การศึกษาขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เป็นการศึกษาหาขั้นตอนที่ปฏิกิริยาเกิดช้าที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการดูดซับจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกเป็น Bulk transport ซึ่งเป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ในเนื้อสารละลายที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) ดังนั้นเมื่อมีการกวนสารละลายหรือให้ความเร็วแก่ระบบ ให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ขั้นตอน Bulk transport ไม่ใช่ขั้นกำหนด

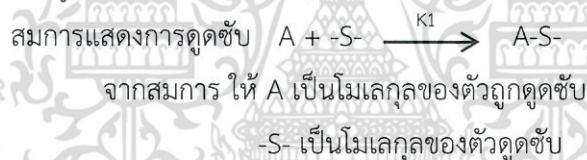
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นในงานวิจัยส่วนใหญ่มักทำการศึกษากลไกการเคลื่อนย้ายมวลในชั้น Film transport และ Intraparticle diffusion เพื่อให้ทราบว่า มีขั้นตอนใดเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ ควรสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับถูกดูดซับบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวดูดซับกับรากที่สองของเวลา โดยเลือกช่วงเวลาที่ความชันของกราฟต่ำสุดมาทำการศึกษาค้นหาขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

2.4.5 สมดุลการดูดซับ

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไป ในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้มข้นเท่ากับ C_0 ในช่วงเริ่มต้นโมเลกุลของตัวถูกดูดซับบางส่วนไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับ จนเมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น และในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกดูดซับบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะถูกคายออกมา โดยอัตราการคายซับจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุลและในสภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและจำนวนโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่คายออกมามีปริมาณคงที่

กระบวนการดูดซับ



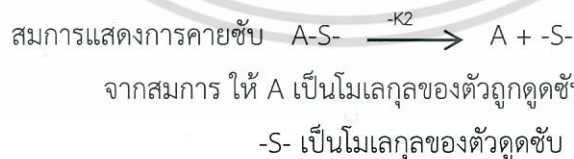
$$\text{การคำนวณอัตราการดูดซับ } r_1 = k_1[C](q-1)$$

ให้ r_1 แทนอัตราการดูดซับ

k_1 แทนค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$(1-q)$ แทนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับ

กระบวนการคายซับ



$$\text{การคำนวณอัตราการคายซับ } r_2 = k_2(q)$$

ให้ r_2 แทนอัตราการคายซับ

k_2 แทนค่าคงที่อัตราการคายซับ

q แทนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

ที่สภาวะสมดุล

$$r_1 = r_2$$

$$k_1[C](q-1) = k_2(q)$$

$$q/(q-1) = k_1/k_2[C]$$

$$q/(q-1) = K[C]$$

$$q = K[C]/1 + K[C]$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่สมดุลการดูดซับ



ที่สภาวะสมดุล $K = \frac{q}{C}$

เมื่อ q = โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ

W = น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ ในหน่วยน้ำหนัก

V = ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวดูดซับละลายอยู่ในหน่วย
ปริมาตร

C = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ = ปริมาณตัวถูกดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$\text{จะได้ว่า } qW = V(C_0 - C)$$

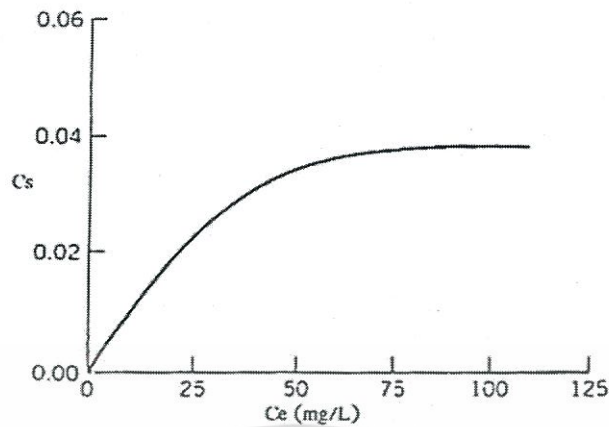
2.4.6 การวิเคราะห์การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่จากเฟสหนึ่งไปยังขอบเขตของเฟสอื่นๆ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับ ตัวถูกดูดซับ และสารละลาย โดยมีแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ได้แก่ แรงดึงดูดทางไฟฟ้า, แรงแวนเดอร์วาลส์, โควาเลนต์ และพันธะไฮโดรเจน (LaGrega, 2001)

ในการวิเคราะห์การดูดซับนิยมใช้วิธีของ Langmuir isotherm และ Freundlich isotherm

Langmuir isotherm

แบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่ว่า พื้นผิวของของแข็งมีตัวถูกดูดซับสะสมอยู่เพียงชั้นเดียว โดยกราฟของแบบจำลองนี้แสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 กราฟของ Langmuir isotherm (เกรียงศักดิ์, 2546 อ้างถึงใน Watt, 1997)

จากกราฟที่เฟสของเหลว (liquid phase) เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (sorbate) เพิ่มขึ้น แสดงว่าผิวของตัวดูดซับ (sorbent) ถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับในสัดส่วนที่มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายในเฟสของสารละลาย (solution phase) สูงขึ้น ตัวดูดซับจะอิ่มตัวอย่างสมบูรณ์ และในจุดที่ความเข้มข้นสูงกว่านี้จะไม่เกิดการดูดซับสารใดๆ อีก

สมการของ Langmuir isotherm

$$C_s = \frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1+bC_e}$$

เมื่อ C_s = มวลของตัวถูกดูดซับต่อมวลของตัวดูดซับ, (กรัม/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือสารละลาย ณ ภาวะสมดุล, (กรัม/ลูกบาศก์เมตร)

a = ค่าคงที่

b = ค่าสัมประสิทธิ์อิ้มตัว, (ลูกบาศก์เมตร/กรัม)

x = มวลของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ, (กรัม)

m = มวลของตัวดูดซับ, (กรัม)

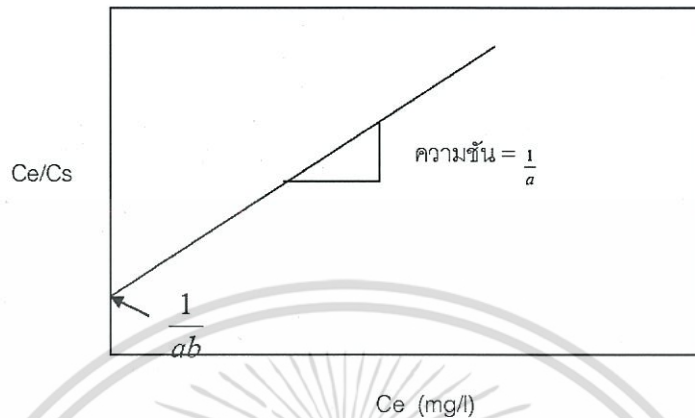
สามารถเขียนสมการเชิงเส้นของ Langmuir isotherm ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{C_s} = \frac{1}{ab} + \frac{C_e}{a}$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{C_s}$ กับ C_e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

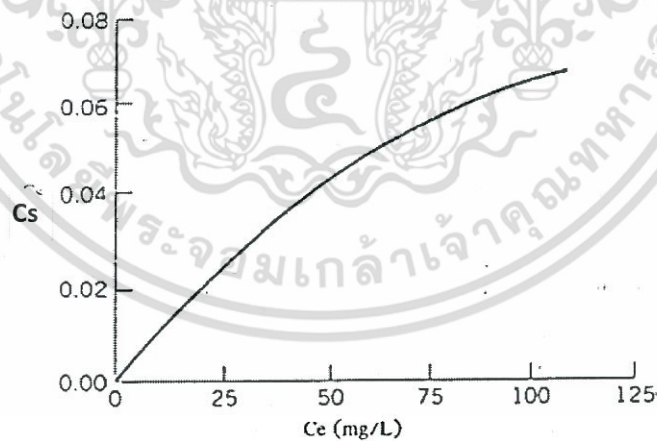
จะได้ ความชันของกราฟ = $\frac{1}{a}$ และ จุดตัดแกน $y = \frac{1}{ab}$ ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 2.9 กราฟเชิงเส้นของ Langmuir isotherm (เกรียงศักดิ์, 2546)

Freundlich isotherm

ลักษณะของแบบจำลองนี้ คือ การดูดซับยังจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวดูดซับ โดยกราฟของแบบจำลองนี้แสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 กราฟของ Freundlich isotherm (เกรียงศักดิ์, 2546 อ้างถึงใน Watt, 1997)

จากรูปจะเห็นได้ว่ามวลของตัวถูกดูดซับเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นเฟสของน้ำ (aqueous phase) ที่ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (sorbate) ต่ำๆและลดลง เมื่อตัวถูกดูดซับ (sorbate) สะสมบนผิวของตัวดูดซับ (sorbent) การดูดซับยังคงดำเนินต่อไป เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ (sorbate) ในเฟสของน้ำ (aqueous phase) แต่จะเพิ่มในสัดส่วนที่น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ Freundlich isotherm

$$C_s = \frac{x}{m} = K_F C_e^n$$

เมื่อ K_F = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของ Freundlich

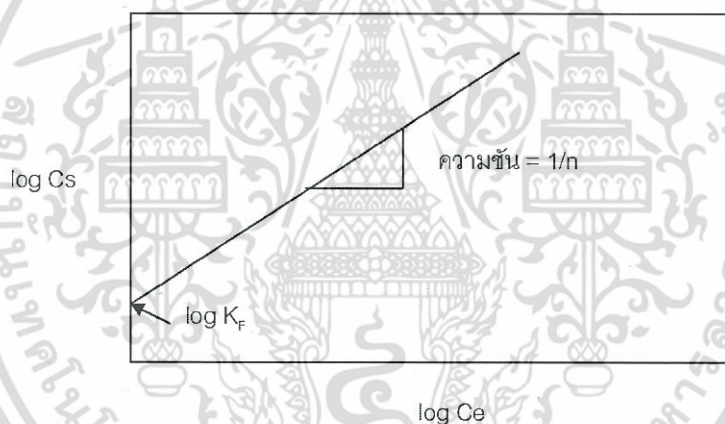
n = ค่าสัมประสิทธิ์จากการทดลอง

สามารถเขียนสมการของ Freundlich isotherm ในรูปลอการิทึมได้ดังนี้

$$\log C_s = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง C_s กับ C_e

จะได้กราฟเส้นตรง โดยหาค่า K_F ได้จาก $K_F = 10^{\text{y-intercept}}$ และความชัน = $\frac{1}{n}$



รูปที่ 2.11 กราฟเชิงเส้นของ Freundlich isotherm (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 กานดา และคณะ (2540) ได้ทำการศึกษาการใช้โคโตซานและผงถ่านกัมมันต์ดูดซับสี ย้อมผ้าโดยจากการทดลองใช้โคโตซานร่วมกับผงถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อดูซับสีย้อมผ้า พบว่าโคโตซานที่ผสมกับผงถ่านกัมมันต์ 3.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีดี ที่สุด โดยมีอัตราเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 1.3 ppm/hour จากนั้นจึงนำโคโตซานที่ผสมกับผงถ่านกัมมันต์ 3.0 เปอร์เซ็นต์ มาทำการทดลองหาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมต่อการดูดซับ พบว่าสารละลายสีย้อมผ้าที่มีสภาพเป็นกรดเหมาะสมที่สุดในการดูดซับสี ซึ่งจากการทดลองที่ pH 3 จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพ การดูดซับสีของโคโตซานผสมกับผงถ่านกัมมันต์ดี คือจะมีอัตราเร็วเริ่มต้นในการดูดซับสีเท่ากับ 8.6 ppm/hour และเพื่อเพิ่มปริมาณการใช้โคโตซานที่ผสมกับผงถ่านกัมมันต์หรือเพิ่มความเข้มข้น ของสารละลายสีย้อมผ้าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น

2.5.2 ชูติมา และพรพิมล (2544) ได้ทำการศึกษาการดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำ ชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้โคโคซาน ทองแดงและแคดเมียมถูกชะจากกากตะกอนที่ปนเปื้อน โลหะด้วยสารสกัดอีดีทีเอ 0.01 โมลาร์ ปรับ pH เป็น 6.0 นำมาเขย่า 300 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงและแคดเมียมมีค่า 65.78 และ 1.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและแคดเมียมโดยทำการแปรผัน pH ดังนี้คือ 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 พบว่า pH ที่เหมาะสมคือ 8 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง และแคดเมียมได้ 47.49 % และ 39.92 % ตามลำดับ ต่อมาทำการแปรผันปริมาณโคโคซานดังนี้ คือ 0.12, 0.24, 0.36, 0.48, 0.60 และ 0.72 กรัมพบว่า ปริมาณโคโคซานที่เหมาะสมคือ 0.48 กรัม ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงและแคดเมียมได้ 54.24 % และ 44.79 % ตามลำดับ ต่อมาแปรผันเวลาในการดูดซับดังนี้คือ 0, 3, 6, 12, 18, 24 และ 48 ชั่วโมง พบว่าเวลาที่เหมาะสม ในการดูดซับคือ 12 ชั่วโมง เมื่อทำการกำจัดทองแดงและแคดเมียมโดยใช้สภาวะที่เหมาะสม และทำการเขย่าพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงและแคดเมียมคือ 56.71 % และ 30.30 % ตามลำดับซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อเขย่าดีกว่าเมื่อไม่เขย่าและเมื่อแปรผันจำนวนรอบในการเติม โคโคซานเป็น 1, 2, 3 และ 4 รอบพบว่าจำนวนรอบที่เหมาะสมในการเติมโคโคซานคือ 4 รอบ ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงและแคดเมียมได้ 95.38 % และ 82.30 % ตามลำดับ

2.5.3 นริศรา และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีกโดย โครงการพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก เป็นตัวดูดซับซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบ batch เพื่อศึกษาสภาวะที่ เหมาะสมต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของกระดองหมีก พบว่า กระดองหมีกขนาด 100-200 เมช สามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีที่ค่า pH 7 โดยใช้อัตราเร็วในการปั่น กวนเท่ากับ 150 รอบ/นาที และใช้ระยะเวลาที่ใช้การสัมผัสเท่ากับ 1 ชั่วโมง ค่าคงที่ที่คำนวณจาก สมการการดูดซับแบบ Freundlich มีค่าเท่ากับ 2.235 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมกระดองหมีก และ

ในการทดสอบโดยใช้น้ำชะจากกองขยะที่มีแคดเมียมปนเปื้อน จากผลการบำบัดน้ำชะจากกองขยะ กระดองหมีก็สามารถกำจัดแคดเมียมปนเปื้อน จากผลการบำบัดน้ำชะจากกองกระดองหมีก็สามารถกำจัดแคดเมียมที่ปนเปื้อนได้ร้อยละ 74.28

2.5.4 สมนึก และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำทิ้งโดยใช้เปลือกปูและไคติน โดยโรงงานพิเศษเล่มนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำทิ้งโดยใช้เปลือกปูและไคตินเป็นวัสดุดูดซับ ไคตินที่ใช้ศึกษาได้จากการสกัดจากเปลือกปูซึ่งเป็นสารที่สามารถย่อยสลายได้ไม่ก่อให้เกิดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อม ในการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน ในการทดลองขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของเปลือกปูและไคตินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน, เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ขั้นที่สองเป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ pH โดยแปรค่าเป็น 3,5,7,9 และ 11 ตามลำดับ ระยะเวลาในการเขย่าแปรค่าเป็น 5,10,20 และ 30 นาที ตามลำดับ และความสามารถในการดูดซับน้ำมันในระดับความเข้มข้นต่างๆต่อตัวดูดซับ 1 กรัม แปรค่าเป็น 10,20,40,50 และ 60 กรัมต่อลิตร ขั้นที่สามเป็นการนำน้ำเสียจริงจากโรงอาหารคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มาทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับน้ำมันของเปลือกปูและไคตินโดยใช้น้ำเสียจริงและน้ำเสียที่ปรับสภาพตามค่าที่ได้จากการทดลองขั้นที่สอง นำทรายมาใช้เป็นตัวดูดซับด้วยโดยทำการทดลองเช่นเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำทิ้งจากการศึกษาพบว่า เปลือกปูมีความเป็นรูพรุนมากกว่าไคติน วัสดุดูดซับทั้งสองชนิดนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกัน องค์ประกอบส่วนใหญ่ของเปลือกปูนั้นจะประกอบไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตกับโปรตีน การหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า pH เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันของเปลือกปูที่ pH 5 ระยะเวลาในการเขย่า 10 นาที ส่วนไคตินมี pH เหมาะสมในการดูดซับน้ำมันที่ pH 9 ระยะเวลาในการเขย่า 10 นาที และความสามารถในการดูดซับน้ำมันต่อวัสดุดูดซับ 1 กรัม สามารถดูดซับน้ำมันได้โดยที่ยังคงความสามารถในการดูดซับสูงคือ 20 กรัมต่อลิตร ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันโดยใช้เปลือกปูและไคตินเท่ากับ 69.37% และ 64.08% ตามลำดับเปลือกปูมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันได้ดีกว่าไคติน ทั้งในน้ำเสียจริงและน้ำเสียที่มีการปรับสภาพตามค่าที่ได้จากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียจริงและน้ำเสียที่มีการปรับสภาพโดยใช้เปลือกปูเท่ากับ 86.30% และ 88.20% ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียจริงและน้ำเสียที่มีการปรับสภาพโดยใช้ไคตินเท่ากับ 52.19% และ 62.61% ตามลำดับ ส่วนทรายนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยมากเมื่อเทียบกับเปลือกปูและไคติน คือมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันในน้ำเสียจริงเท่ากับ 9.43%

2.5.5 ธัญลักษณ์ และคณะ (2556) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมมาลาโคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ โดยโรงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมาลาโคท์กรีนของตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากชาและทำการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในอัตราส่วน 3:1 (w/w) โดยเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมมาลาโคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ศึกษาประสิทธิภาพและไอโซเทอร์มของการดูดซับ รวมทั้งศึกษาความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่ผลิตได้มีคุณภาพทางกายภาพในการเป็นตัวดูดซับด้อยกว่าถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า แต่สำหรับความสามารถในการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้ามีค่าเท่ากับ 3.84 และ 3.97 mg/g ตามลำดับ ด้านค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้าเท่ากับ 93.99 และ 616.60 ตามลำดับนอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสีย้อมมาลาโคท์กรีน คือ pH 5, ระยะเวลาดูดซับ 180 นาที, ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม 50 mg/L และปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมมาลาโคท์กรีนด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้และถ่านกัมมันต์เพื่อการค้า พบว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับเท่ากับ 9.28 mg/g และ 9.84 mg/g ตามลำดับ ซึ่งจากการทดลองไอโซเทอร์มพบว่า กระบวนการดูดซับสอดคล้องตามสมการการดูดซับของ Langmuir Isotherm ($R^2 = 0.9128$) และสุดท้าย คือความสามารถในการนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้กลับมาใช้ใหม่ โดยเปรียบเทียบสารละลายคายซับ 2 ชนิด

2.5.6 นิรชา และคณะ (2558) ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดโคโคซานจากแกนหมึก โดยแกนหมึกที่เป็นกากของเหลือจากอุตสาหกรรมอาหารทะเลแช่แข็งได้ถูกนำมาสกัดโคโคซานโดยการแช่ในต่างเข้มข้น 50 % เรียกปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นโคโคซานนี้ว่าปฏิกิริยาดิวเอซิลเลชัน ที่สภาวะต่างๆดังนี้ อุณหภูมิ 40 °C, 60 °C และ 80 °C เวลา 24 ชม., 48 ชม. และ 72 ชม. และได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะทางเคมีและกายภาพ (% ไขมัน, ความหนืด, % การละลาย, % deacetylation) ระหว่างโคโคซานทางการค้ากับโคโคซานที่สกัดได้ในสภาวะต่างๆ พบว่า % Yield ของโคโคซานที่สภาวะ 40 °C เวลา 24 ชม. ได้ 9.01 % ในขณะที่อุณหภูมิ 80 °C เวลา 72 ชม. ได้ % Yield 29.46% การใช้อุณหภูมิสูงในการสกัด ทำให้ได้ % Yield ของโคโคซานมากกว่า เมื่อวิเคราะห์ปริมาณไขมันของโคโคซานที่สภาวะต่างๆพบว่า โคโคซานที่อุณหภูมิ 60 °C เวลา 48 และ 72 ชม. มีค่าน้อยที่สุดคือ 0.01% ในขณะที่ปริมาณไขมันโคโคซานทางการค้ามีอยู่ 0.91% การทดสอบค่าความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield viscometer พบว่าโคโคซานทางการค้ามีค่าความหนืด 3.5 cP ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับโคโคซานที่สภาวะ 40 °C เวลา 72 ชม. ที่มีค่าความหนืด 2503 cP และโคโคซานที่มีความหนืดใกล้เคียงกับโคโคซานทางการค้ามากที่สุดคือที่สภาวะ 80 °C เวลา 24 ชม. มีค่าความหนืดเท่ากับ 40 cP เมื่อวัด % การละลายพบว่า โคโคซานที่อุณหภูมิ 40 °C สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันมีความหนืดคล้ายเจล โคโคซานที่อุณหภูมิ 80 °C สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน มีความหนืดเล็กน้อย ใกล้เคียงกับสารละลายโคโคซานทางการค้ามากกว่า และ ลักษณะฟิสิกส์ทางเคมีของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคโตซานในแต่ละสภาวะ โดยใช้เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) พบว่าโคโตซานที่สภาวะอุณหภูมิ 40 °C 24 ชม. มีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึงกับโคโตซานทางการค้ามากที่สุด

2.5.7 Jolanta Kumirska และคณะ (2553) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีทางสเปกโทรสโคปีในการวิเคราะห์โครงสร้างของโคตินและโคโตซาน พบว่า โคตินเป็นพอลิเมอร์ทางธรรมชาติที่สำคัญเป็นอันดับสองของโลกและน้ำตาล N-deacetylated เป็นอนุพันธ์ของโคโตซาน โคตินได้รับการระบุว่าเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่มีความหลากหลายในการเลือกใช้ทั้งในด้านการแพทย์, การเกษตรและอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องด้วยสองเหตุผลหลัก คือ ประการที่หนึ่ง โคตินและโคโตซานมีลักษณะเฉพาะทางเคมี, คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และชีววิทยา และประการที่สอง วัตถุประสงค์หลักในการผลิตโคตินและโคโตซานมีอย่างไม่จำกัด พอลิเมอร์เหล่านี้แสดงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่แตกต่างกันอย่างแพร่หลายขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของโคตินและขั้นตอนการผลิตโคโตซาน หมู่ฟังก์ชันที่มีเป็นเช่นเดียวกับน้ำตาลพอลิแซคคาไรด์ตามธรรมชาติของโบโอพอลิเมอร์ ซึ่งช่วยทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนทางเคมีที่มีความหลากหลาย การอธิบายลักษณะทางเคมีและเคมีเชิงฟิสิกส์ของโคติน, โคโตซาน และอนุพันธ์ต่างๆ ต้องใช้เทคนิคสเปกโทรสโคปี ซึ่งการศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้วิธีสเปกโทรสโคปีสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างของสารเหล่านี้

2.5.8 Jooyeoun Jung และ Yanyun Zhao (2556) ได้ทำการศึกษาสภาพต่างหรือกรดที่เหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ความสามารถในการดูดซับความชื้น และปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทธิลของ β -โคตินที่สกัดจากแกนหมักยักษ์ พบว่าการศึกษาสภาพต่าง หรือกรดที่เหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างใน β -โคตินจากแกนหมัก และความสามารถในการดูดซับความชื้น และปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทธิล โดยการตรวจสอบและเปรียบเทียบกับ α -โคตินจากเปลือกกุ้ง ซึ่ง β -โคตินจะถูกแปรสภาพเป็น α -โคตินหลังจากทำปฏิกิริยากับสารละลาย 40 % โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือสารละลาย 40% ไฮโดรคลอริก 1-3 ชั่วโมง พบว่า α -โคตินที่สกัดโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงกว่า α -โคตินธรรมดา เนื่องจากเกิดการทำลายอณูรูป ในทางตรงกันข้าม α -โคตินที่สกัดโดยใช้ไฮโดรคลอริกมีการปรับเปลี่ยนอณูรูปเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับความชื้น ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ (ความน่าจะเป็น > 0.05) β -โคตินว่องไวต่อการกำจัดหมู่อะซิทธิลในสภาวะเบสมากกว่า α -โคติน, ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าในสภาวะต่างหรือกรด β -โคตินมีความว่องไวต่อตัวทำละลายสูง ซึ่งส่งผลให้ β -โคโตซานถูกนำไปใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติและสารต้านจุลชีพหรือใช้ในการเคลือบและทำแผ่นฟิล์มสำหรับเคลือบอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.9 Jooyeoun (2556) ได้ทำการศึกษาการพัฒนา β -โคโตซานจากแกนหมึก (gigas Dositicus) และโครงสร้าง, คุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์และชีวภาพ พบว่าการศึกษา β -โคติน/โคโตซานที่สกัดจากแกนหมึกที่นำกลับมาใช้ใหม่ในแง่ของคุณสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์, โครงสร้างพอลิเมอร์, ปฏิกริยาการกำจัดหมู่อะซิทิลและการสลายตัว และสารต้านอนุมูลอิสระและด้านเชื้อแบคทีเรีย โดยคุณสมบัติเหล่านี้ยังถูกนำมาเปรียบเทียบกับ α -โคติน/โคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้ง เนื่องจากองค์ประกอบแร่ธาตุต่ำ (<1%) และแรงค้ำวัดเล็กน้อยในแกนหมึก ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุและการกำจัดแรงค้ำวัดอาจถูกละเว้นเมื่อสกัด β -โคติน น้ำหนักโมเลกุล (MW) และปริมาณความชื้นในปฏิกริยาการกำจัดโปรตีนของ β -โคตินสูงกว่า α -โคตินอย่างมีนัยสำคัญ โครงสร้างผลึกของ β -โคติน โตเด่นกว่า α -โคตินซึ่งใน β -โคติน มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลน้อยกว่า α -โคติน พร้อมกับความเป็นผลึกต่ำ β -โคติน สามารถแปลงเป็นอัลฟาฟอร์มได้ซึ่งเป็นผลของการรักษาสภาพต่าง และ α -โคตินที่แปลงมาจาก β -โคติน มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นสูงกว่า α -โคตินธรรมดา ดังนั้นจึงต้องรักษาความว่องไวต่อปฏิกริยาที่สูงของ β -โคตินโดยวิธีการการทำลายอัญรูป วิธีการของ Kurita ใช้ NaOH เป็นตัวกำจัดหมู่อะซิทิลที่มีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ β -โคโตซานที่มีมวลโมเลกุลสูงและความหลากหลายของ DDA และเซลล์ulos อ่อนแอมมากกว่าไลโซไซม์ในการย่อยสลาย β -โคโตซานเพื่อให้ได้ β -โคโตซาน มวลโมเลกุลต่ำ และเพื่อให้ DDA ของ α และ β -โคโตซานคล้ายคลึงกัน ต้องใช้ NaOH ที่ความเข้มข้นต่ำและระยะเวลาในการทำปฏิกริยาที่สั้นเหมาะสมกับ β -โคตินมากกว่า α -โคติน นอกจากนี้ β -โคโตซาน ย่อยสลายเซลล์ulos ได้้น้อยกว่าแอลฟาโคโตซาน β -โคโตซานมวลโมเลกุลสูง (280-300 กิโลดาลตัน) มีค่าความเข้มข้นสูงสุดที่มีประสิทธิภาพ (EC50) ต่ำกว่าแอลฟาโคโตซานครึ่งหนึ่ง นั่นคือ สารต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าขึ้นอยู่กับกำจัดเรดิคอลของ DPPH และความสามารถในการรีดิวซ์ β -โคโตซาน 75% DDA / 31 กิโลดาลตันสามารถยับยั้งเชื้อ E. coli (ต่ำกว่า MIC) ได้สูงกว่า α -โคโตซาน 75% DDA / 31 กิโลดาลตัน ในทางตรงกันข้ามพบว่าใน α และ β -โคโตซาน 90% DDA / 74-76 กิโลดาลตัน ความแตกต่างนี้อาจเป็นผลกระทบมาจากคุณสมบัติโครงสร้างที่ต่างกันระหว่าง α -และ β -โคโตซานตามการจัดเรียงตัวของโคโตซานในสารละลายโคโตซานสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุในระดับพื้นผิวของโคโตซานกับเซลล์แบคทีเรียแกรมลบ ดังนั้นแกนหมึกสามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อสกัด β -โคติน/โคโตซานที่มีโครงสร้าง, กิจกรรมทางเคมีเชิงฟิสิกส์และชีวภาพที่เป็นประโยชน์ได้

2.5.10 Hoang Ngoc Cuong และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาการเตรียมและลักษณะของ β -โคติน ความบริสุทธิ์สูงจากแกนหมึก พบว่าแกนหมึกที่ถูกสกัดโดยสารละลาย NaOH ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในการกำจัดโปรตีนและแร่ธาตุ การศึกษานี้เป็นการเตรียม β -โคติน น้ำหนักโมเลกุลสูง ($8.5 \pm 0.1 \times 10^3$ kDa), ปริมาณโปรตีนต่ำ (0.63 ± 0.02 WT.%) และมีปริมาณแร่ธาตุเล็กน้อย วิธีนี้หลีกเลี่ยงวิธีทั่วไปในการกำจัดแร่ธาตุจากกุ้งปูดโดยใช้ HCl ความบริสุทธิ์ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

β -โคติน ถูกวัดโดย NMR และ FTIR นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลึกของ β -โคตินสามารถอธิบายลักษณะได้โดย SEM และ XRD β -โคตินที่มีสายโซ่ยาวและมีความบริสุทธิ์สูงเหมาะสำหรับการผลิต β -โคโตซานในปริมาณมาก สำหรับการใช้งานในด้านต่างๆอย่างมีศักยภาพ

2.5.11 Hassan (2558) ทำการศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอคทีฟจากน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เส้นใยปอที่เคลือบด้วยโคโตซานในกรดอะคริลิกโดยการฉายรังสีแกมมา ซึ่งเส้นใยปอจะถูกเคลือบ ด้วยโคโตซานในกรดอะคริลิกโดยเทคนิคการฉายรังสีแกมมา โคโตซานที่ถูกตรึงอยู่กับเส้นใยปอจะถูกใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟ ซึ่งสามารถตรวจสอบลักษณะเฉพาะของเส้นใยปอที่ได้รับการปรับสภาพได้โดยใช้เทคนิค FT-IR, SEM และ XRD วิเคราะห์ความคงทนต่อความร้อนโดยใช้เทคนิค TGA และสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เช่น ค่า pH และระยะเวลาในการสัมผัส พบว่าการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นในช่วงค่า pH ต่ำ และเพิ่มขึ้นระยะเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นโดยไม่ผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

2.5.12 Bilal และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาการใช้เม็ดบีดโคโตซานในการตรึงแมงกานีสเปอร์ออกไซด์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการลดความเป็นพิษและกำจัดสีของน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นสาเหตุของการเกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงและเป็นภัยคุกคามร้ายแรงต่อระบบนิเวศ การตรึงเอนไซม์จึงมีความสำคัญในฐานะตัวแทนการบำบัดทางชีวภาพที่มีศักยภาพ ในการศึกษาแมงกานีสเปอร์ออกไซด์จะถูกตรึงบนเม็ดบีดกลูตาอัลดีไฮด์แอคติเวเตดโคโตซานและถูกนำไปใช้ในการย่อยสลายและการล้างพิษของสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ ประสิทธิภาพของเม็ดบีดโคโตซานที่ตรึงแมงกานีสเปอร์ออกไซด์เอาไว้ถูกประเมินจากการกำจัดสีในการปรับปรุงคุณภาพน้ำและการลดความเป็นพิษ โดยสามารถกำจัดสีได้สูงสุด 97.31% และสามารถลดค่า COD, TOC และ BOD ได้ถึง 82.40%, 78.30% และ 91.7% ตามลำดับ ความเป็นพิษของน้ำทิ้งที่ได้รับการบำบัดทางชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญและความยาวราก, จำนวนราก และดัชนีแสดงการเพิ่มจำนวนเซลล์เมลานอยด์ของหอมหัวใหญ่เพิ่มขึ้น 38.46%, 43.47% และ 41.83% ตามลำดับ ในขณะที่อาร์ทีเมียหรือไรน้ำเค็มมีอัตราการตายลดลงถึง 63.64% ฤทธิ์ก่อกลายพันธุ์ของสายพันธ์ TA98 และ TA100 ลดลงถึง 73.44% และ 75.43% ตามลำดับ เม็ดบีดโคโตซานที่ตรึงแมงกานีสเปอร์ออกไซด์เอาไว้ยังคงรักษาสภาพเดิมได้ถึง 60% หลังจากผ่านกระบวนการกำจัดสี 10 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีเยี่ยมในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยวิธีทางชีวภาพและสามารถนำมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพความเป็นพิษในน้ำเสียได้ การตรวจสอบน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการด้วยการหาปริมาณโดยชีววิธีเป็นข้อเสนอแนะในการประเมินประสิทธิภาพของวิธีการบำบัดทางชีวภาพเพื่อการปล่อยน้ำทิ้งลงในแหล่งน้ำธรรมชาติอย่างปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.13 Yue-cheng Lin และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาการจัดเตรียมและคุณสมบัติการดูดซับไอออนทองแดงของ ไทโอเซมิคาบาไซด์ ไคโตซานจากแกนหมึก โดยเตรียมไคโตซานด้วยการกำจัดหมู่อะซิทิลของไคตินจากแกนหมึกในสภาวะเบส กลุ่มไทโอเซมิคาบาไซด์ถูกนำไปเชื่อมกับไคโตซานด้วยพอมัลติไฮด์ และการสังเคราะห์ไทโอเซมิคาบาไซด์ ไคโตซาน (TSFCS) ที่ระดับการแทนที่ต่างๆ (DS) ซึ่งค่า DS ของ TSFCS คำนวณได้จากการวิเคราะห์ธาตุเป็น 0.19, 0.36 และ 0.63 โครงสร้างของ TSFCS ได้รับการยืนยันโดยการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค FTIR, XRD, TGA และ SEM ความจุการดูดซับ ไอออนทองแดงของ TSFCS แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่า DS และ pH (ช่วงค่า pH 2.2-5.8) ความจุการดูดซับไอออนทองแดงสูงสุดของ TSFCS ทั้งสามตัวอย่างมีค่าสูงถึง 134.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 3.6 แต่ไคโตซานที่แสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการดูดซับที่ pH นี้ โดยกระบวนการดูดซับ ไอออนทองแดงที่สภาวะสมดุลบน TSFCS ได้รับการสอดคล้องกับไอโซเทอร์มของ Langmuir มากกว่า Freundlich $Cu(II)$ ไอออนทองแดงที่ถูกดูดซับโดย TSFCS สามารถหลุดออกมาได้โดยใช้สารละลายไดโซเดียมอีดีทีเอ 0.01 โมลาร์ และความสามารถในการดูดซับเกินกว่า 80% หลังจากการดูด-คายซ้ำ 5 ครั้ง TSFCS แสดงศักยภาพที่ดีในการกำจัดโลหะหนักเนื่องจากความจุการดูดซับสูงที่ค่า pH ต่ำ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 วัตถุดิบ

3.1.1.1 แขนหมีกกล้วย

3.1.1.2 ไคโตซานทางการค้า ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท TS Agritech Co.Ltd.

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 4.0% เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen Co.Ltd.

3.1.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 50.0% เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen Co.Ltd.

3.1.2.3 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1.0 M เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen Co.Ltd.

3.1.2.4 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) 10% เกรตวิเคราะห์ บริษัท Carlo Ergen Co.Ltd.

3.1.2.5 สีย้อมผ้า Ambifix Blue VR (Reactive blue 19) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Thai Ambica Chemicals Co. Ltd.

3.1.3 อุปกรณ์

3.1.3.1 การสกัดไคติน-ไคโตซาน

3.1.3.1.1 เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น MR Hei-Tec ยี่ห้อ Heidolph

3.1.3.1.2 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) รุ่น UN 55 ยี่ห้อ Memmert

3.1.3.1.3 เครื่องชั่งทศนิยม 1 ตำแหน่ง รุ่น TR-6101 ยี่ห้อ Denver และ
ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204/01 ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.1.3.1.4 เครื่องบด

3.1.3.1.5 ตะแกรงคัดขนาด

3.1.3.1.6 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2 การดูดซับ

- 3.1.3.2.1 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer รุ่น Genesis 10s ยี่ห้อ Thermo Scientific
- 3.1.3.2.2 เครื่องวัด pH (pH meter) รุ่น UB-10 ยี่ห้อ Denver
- 3.1.3.2.3 เครื่องเขย่าสาร (Shaker) รุ่น SHO-1D ยี่ห้อ Wisc
- 3.1.3.2.4 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- 3.1.3.2.5 กระดาษกรองเบอร์ 42 Whatman

3.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากแกนหมึก

- 1) นำแกนหมึกกล้วยมาล้างน้ำให้สะอาด
- 2) แช่สารละลาย 10% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) นาน 1 ชั่วโมง
- 3) นำไปอบที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง
- 4) นำไปบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่องบด
- 5) ร่อนให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ โดยใช้ตะแกรงคัดขนาด 10, 20 และ 35 เมช
- 6) ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสซิเคเตอร์

3.2.2 การสกัดไคติน-ไคโตซาน (นิรชา, 2558)

- 1) การเตรียมตัวอย่างแกนหมึกกล้วย
 - 1.1) นำแกนหมึกกล้วยมาล้างน้ำให้สะอาด
 - 1.2) นำไปอบที่อุณหภูมิ $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้ง
 - 1.3) นำไปบดให้ให้มีขนาดเล็กลงโดยใช้เครื่องบด
 - 1.4) ทิ้งไว้ให้เย็นในเดสซิเคเตอร์
- 2) การกำจัดโปรตีน (Deproteination)
 - 2.1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaHO) เข้มข้น 4.0%
 - 2.2) แช่แกนหมึกกล้วยที่ได้จากขั้นตอนที่ 1) ในอัตราส่วน 1:10 ที่อุณหภูมิ $91.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง
 - 2.3) นำแกนหมึกกล้วยที่ได้จากขั้นตอนที่ 2.2) ล้างน้ำกลั่นจนเป็นกลาง
 - 2.4) นำแกนหมึกกล้วยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ จนแห้ง
- 3) การกำจัดแร่ธาตุ (Demineralization)
 - 3.1) เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 1.0 M
 - 3.2) นำแกนหมึกกล้วยที่ได้จากขั้นตอนที่ 2) แช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วน 1:10 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.3) นำโคตินที่ได้ล้างน้ำกลั่นจนเป็นกลาง
- 3.4) นำโคตินที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนแห้ง
- 4) การเปลี่ยนโคตินเป็นโคโตซาน
 - 1) นำโคตินที่ได้จากข้อ 3) แผลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 50% ที่อุณหภูมิ 90 °C โดยใช้เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
 - 2) นำโคโตซานที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่นจนเป็นกลาง
 - 3) นำโคโตซานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C จนแห้ง
- 5) การทดสอบการละลาย
 - 1) ชั่งโคโตซาน 1 กรัม ละลายในกรดแอสติก 0.5 % (w/v) 100 ml
 - 2) นำไปเขย่าที่ความเร็ว 100 rpm เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
 - 3) กรองโคโตซานที่ไม่ละลายออก แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งกากน้ำหนักโคโตซานที่ไม่ละลาย
 - 6) การวิเคราะห์การกำจัดหมู่อะซิetyl (Degree of Deacetylation, %DDA)

นำโคโตซานที่สกัดได้จากข้อที่ 4) มาวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่อะซิetyl โดยใช้วิธีการของ Sabnis และ Block (1997) ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ที่ช่วงคลื่นความถี่ 4,000 – 400 cm^{-1} สามารถคำนวณค่า %DDA ได้จากสมการของ Baxter โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงที่ A_{1655} และ A_{3450}

3.2.3 การดูดซับ

1. การดูดซับโดยใช้แกนหมึกปรับสภาพ

1.1 ศึกษาขนาดของแกนหมึกปรับสภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) นำแกนหมึกปรับสภาพขนาด 10, 20 และ 35 เมช ที่ได้จากข้อ 3.2.1 ปริมาณ 2 กรัม ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH 7
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

1.2 ศึกษาปริมาณของแกนหมึกปรับสภาพที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งแกนหมึกปรับสภาพโดยใช้ขนาดที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองข้อ 1.1 ปริมาณ 0.1, 0.25 และ 0.5 กรัม ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร pH 7
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

1.3 ศึกษา pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งแกนหมึกปรับสภาพตามปริมาณที่ได้จากข้อ 1.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ pH 4, 7, 10 และ pH ของน้ำเสียเริ่มต้น
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

1.4 ศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) เตรียมแกนหมึกปรับสภาพตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.3 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 5, 15 และ 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

1.5 ศึกษาความเร็วรอบในการเขย่าที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งแกนหมึกปรับสภาพตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
ปรับค่า pH ให้เหมาะสมตามที่ได้จากข้อ 1.3
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 100, 150 และ 200 rpm โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.4
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

1.6 ศึกษาค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึกปรับสภาพ

- 1) ชั่งแกนหมึกปรับสภาพตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200, 500 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ให้เหมาะสมตามที่ได้จากข้อ 1.3
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.5 โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.4
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

2. การดูดซับโดยใช้โคโตซานจากแกนหมึก

2.1 ศึกษาขนาดของโคโตซานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ร่อนโคโตซานที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2.2 ข้อที่ 4) ให้มีขนาด 10, 20 และ 35 เมช
- 2) นำโคโตซานขนาดต่างๆ 2 กรัม ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับ pH 7
- 3) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 4) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 5) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

2.2 ศึกษาปริมาณของโคโตซานที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งโคโตซาน 1, 2 และ 3 กรัม จากขนาดที่ได้จากข้อ 2.1 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ให้เป็น 7
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

2.3 ศึกษา pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งโคโตซานตามปริมาณที่ได้จากข้อ 2.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่ pH 7, 9, 11 และ pH เริ่มต้น
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ศึกษาระยะเวลาที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) เตรียมโคโตซานตามสภาวะที่ได้จากข้อ 2.3 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 rpm เป็นเวลา 30, 60 และ 90 นาที
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

2.5 ศึกษาอัตราเร็วในการปั่นเหวี่ยงที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมผ้า

- 1) ชั่งโคโตซานตามปริมาณที่ได้จากข้อ 2.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มี pH ตามที่ได้จากข้อ 2.3 มีความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 150, 200 และ 250 rpm ใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.4
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

2.6 ศึกษาค่าไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยโคโตซานจากแกนหมึก

- 1) ชั่งโคโตซานตามปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.2 ใส่ลงในน้ำที่ปนเปื้อนสีย้อมที่มีความเข้มข้น 200, 500 และ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ให้เหมาะสมตามที่ได้จากข้อ 2.3
- 2) นำไปเขย่าที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.5 โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 2.4
- 3) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
- 4) นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm

3.2.4 การแปรค่าความเข้มข้นของสีในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์ที่มีความเข้มข้นสี 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, และ 500 หน่วยสี โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์เข้มข้น 500 หน่วยสีมา 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 และ 5.0 ml ใส่หลอดเนสเลอร์ขนาด 50 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 50 ml
- 2) วัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%T) แต่ละความยาวคลื่น ดังตารางที่ 3.1
- 3) นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้มาวัดค่าทรานส์มิตแดนซ์ (%T) แต่ละความยาวคลื่นเหมือนสารละลายมาตรฐานแพลตตินัม-โคบอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำค่าที่ได้ไปหาค่าสีในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 โคออร์ดิเนตที่ต้องวัดในการวัดสีด้วยสเปคโตรโฟโตมิเตอร์

Ordinate No.	X	Y	Z
	Wavelength (nm)		
1	435.5	489.5	422.2
2	461.2	515.2	432.0
3	544.3	529.8	438.6
4	564.1	541.4	444.4
5	577.4	551.8	450.1
6	588.7	561.9	455.9
7	599.6	572.5	462.0
8	610.9	584.8	468.7
9	624.2	600.8	477.7
10	645.9	627.3	495.2
แฟคเตอร์คูณที่ใช้	0.09806	0.1	0.11814

ที่มา : กรองแก้ว และคณะ, (2557)

3.2.5 การศึกษาความสามารถในการนำแกนหมึกปรับสภาพ และ โคโตะซานจากแกนหมึกกลับมาใช้ใหม่ (คายซ์)

- 1) การคายซ์แกนหมึกปรับสภาพ
 - 1.1) ชั่งแกนหมึกปรับสภาพที่ผ่านการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.2.3 ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml
 - 1.2) เติมน้ำละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 50 ml ใส่ขวดรูปชมพู่
 - 1.3) นำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 90 นาที
 - 1.4) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
 - 1.5) นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของรีแอคทีฟลู 19 ที่อยู่ในสารละลาย โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer
 - 1.6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ พร้อมเตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์เป็นชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

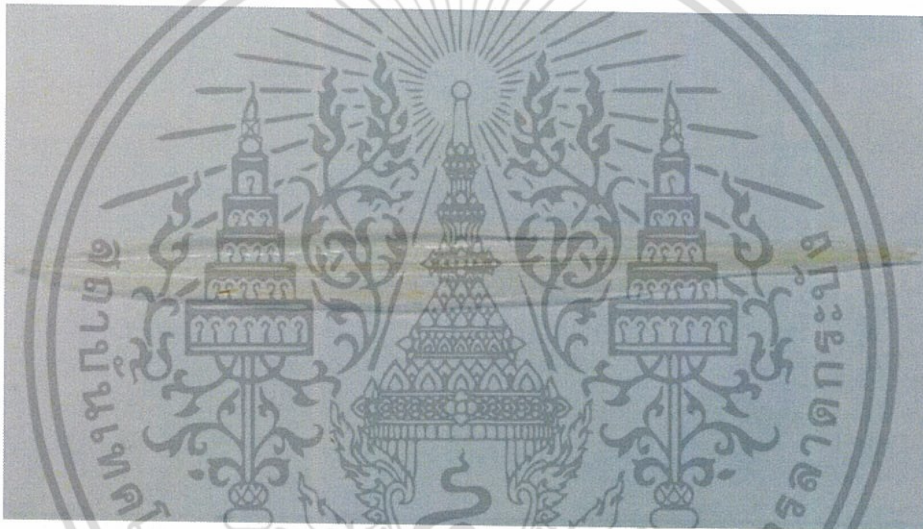
- 1.7) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นน้ำกลั่น 50 ml พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม
 - 1.8) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนจากน้ำกลั่นเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ 50 ml และเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม
- 2) การคายซับโคโตซานจากแกนหมึก
- 2.1) ซังโคโตซานที่ผ่านการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.2.3 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 ml 1 กรัม
 - 2.2) เติมน้ำกลั่นโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 50 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่
 - 2.3) นำเข้าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 250 rpm เป็นเวลา 90 นาที
 - 2.4) กรองด้วยเครื่องกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42
 - 2.5) นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของรีแอกทีฟลู 19 ที่อยู่ในสารละลาย โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 nm ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer
 - 2.6) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-5 อีก 2 ซ้ำ พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม
 - 2.7) ทำการทดลองซ้ำข้อ 1-6 อีก 3 ซ้ำ แต่เปลี่ยนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลาร์ เป็นน้ำกลั่น 50 ml พร้อมเตรียมน้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม

บทที่ 4

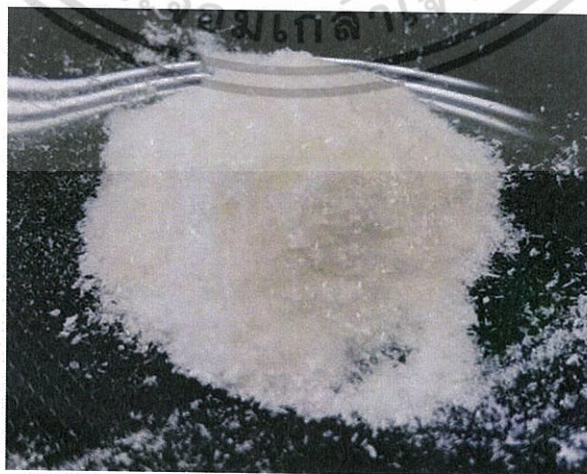
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบของแกนหมึก

แกนหมึกมีลักษณะดังรูป 4.1 เมื่อนำมาแช่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10% เพื่อทำความสะอาดและทำให้แห้ง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด แล้วนำมาร้อนผ่านตระแกรงขนาด 35 เมช ดังรูป 4.2 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)



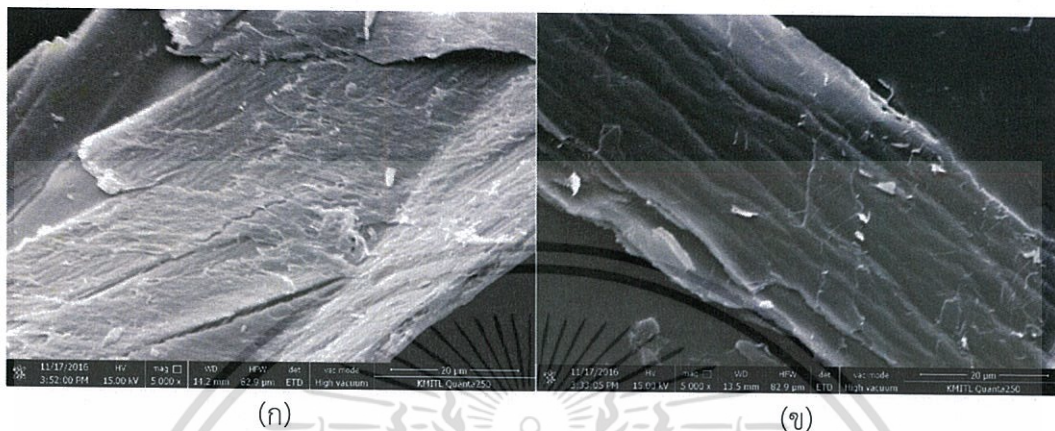
รูปที่ 4.1 แกนหมึกกล้วย (*loligo edulis* Hoyle)



รูปที่ 4.2 แกนหมึกกล้วย (*loligo edulis* Hoyle) ขนาด 35 เมช

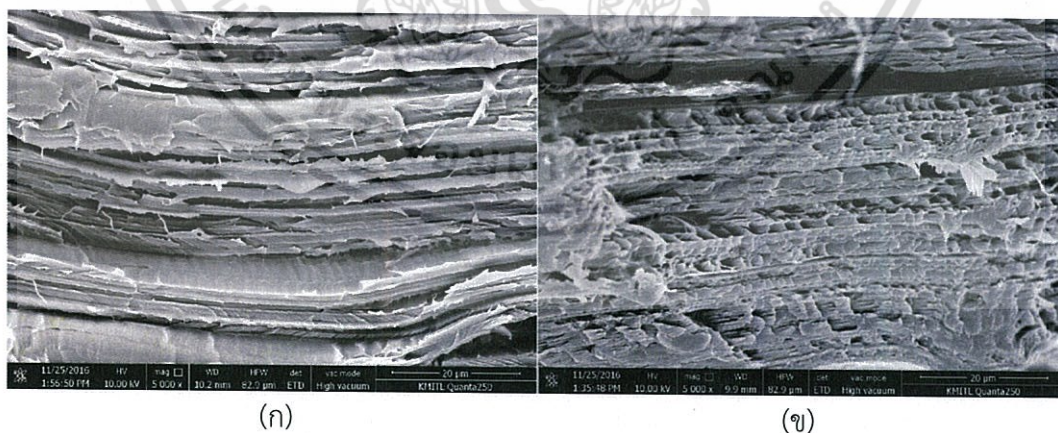
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวราบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าแกนหมึกมีพื้นผิวในแนวราบค่อนข้างเรียบ และไม่สามารถมองเห็นรูพรุนได้ ดังแสดงในรูป 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวราบ (ก = แกนหมึกปกติ, ข = แกนหมึกแช่ H_2O_2)

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าแกนหมึกปกติมีลักษณะเป็นชั้นและมีช่องว่างระหว่างชั้นเพียงเล็กน้อย ส่วนแกนหมึกที่แช่สารละลาย H_2O_2 มีลักษณะเป็นชั้นและมีช่องว่างระหว่างชั้นคล้ายกระดาษลัง แสดงดังรูป 4.4



รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวของแกนหมึกในแนวตัดขวาง (ก = แกนหมึกปกติ, ข = แกนหมึกแช่ H_2O_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแกนหมึกด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าแกนหมึกมีองค์ประกอบทางเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าแกนหมึกมีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแกนหมึกเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence

สารประกอบ	ปริมาณ (%)
SO ₃	56.00
MgO	14.20
Cl	14.00
CuO	6.86
Fe ₂ O ₃	6.80
Cr ₂ O ₃	5.27

4.2 ผลการศึกษาการสกัดโคโตนจากแกนหมึก

จากการศึกษาการสกัดโคโตนจากแกนหมึกเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่การทดลองในสภาวะต่างๆ ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการสกัดโคโตนจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้ง โดยแสดงผลการทดลองในกระบวนการต่างๆ ดังนี้

4.2.1) กระบวนการกำจัดโปรตีน

จากการศึกษาการสกัดโคโตนจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้งในขั้นตอนการกำจัดโปรตีน โดยซึ่งแกนหมึก 200.00, 300.00 และ 376.30 กรัม สามารถกำจัดโปรตีนได้ร้อยละ 63.35, 65.67 และ 62.66 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการกำจัดโปรตีน

ครั้งที่	น้ำหนักแกนหมึกที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนักแกนหมึกหลังกำจัดโปรตีน (กรัม)	ปริมาณโปรตีน (%)
1	200.00	73.30	63.35
2	300.00	103.00	65.67
3	376.30	140.50	62.66

4.2.2) กระบวนการกำจัดแร่ธาตุ

จากการศึกษาการสกัดโคโคซานจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้งในขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุโดยใช้แกนหมึกที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดโปรตีน 73.30, 103.00 และ 140.50 กรัม สามารถกำจัดแร่ธาตุได้ร้อยละ 63.35, 1.94 และ 62.66 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการกำจัดแร่ธาตุ

ครั้งที่	น้ำหนักแกนหมึก ที่ผ่านการกำจัดโปรตีน (กรัม)	น้ำหนักแกนหมึก หลังกำจัดแร่ธาตุ (กรัม)	ปริมาณ แร่ธาตุ (%)
1	73.30	72.14	1.58
2	103.00	101.00	1.94
3	140.50	124.40	11.46

ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการกำจัดแร่ธาตุแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโคโคตินจากแกนหมึก สามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของโคโคตินที่ได้จากกระบวนการกำจัดแร่ธาตุทั้ง 3 ครั้ง โดยมีน้ำหนักแกนหมึกเริ่มต้น 200.00, 300.00 และ 376.30 กรัม ได้เท่ากับร้อยละ 36.07, 33.67 และ 66.94 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลผลิตโคโคติน

ครั้งที่	น้ำหนักแกนหมึกที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนักโคโคติน (กรัม)	ผลผลิตโคโคติน (%)
1	200.00	72.14	36.07
2	300.00	101.00	33.67
3	376.30	124.40	66.94

4.2.3) กระบวนการกำจัดหมู่เอซิติล

จากการศึกษาการสกัดโคโคซานจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้งในขั้นตอนการกำจัดหมู่เอซิติลโดยใช้โคโคตินที่ได้จากขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ 72.14, 101.00 และ 140.5 กรัม สามารถผลิตโคโคซานได้ร้อยละ 26.13, 25.05 และ 29.67 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการกำจัดหมู่อะซิทิล

ครั้งที่	น้ำหนักโคตินที่ใช้ (กรัม)	น้ำหนักโคตินโตซาน (กรัม)	ผลผลิตโคตินโตซาน (%)
1	72.14	53.29	26.13
2	101.00	75.70	25.05
3	140.50	98.80	29.67

4.2.4) การละลายของโคตินโตซาน

จากการศึกษาการสกัดโคตินโตซานจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้ง เมื่อทำการทดสอบการละลาย เปรียบเทียบกับโคตินโตซานทางการค้า โดยใช้โคตินโตซานปริมาณ 1 กรัม ได้ผลการละลายเท่ากับร้อยละ 96.32, 85.74, 46.93 และ 98.46 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการละลายของโคตินโตซาน

ครั้งที่	น้ำหนักโคตินโตซาน ก่อนละลาย (กรัม)	น้ำหนักโคตินโตซาน ที่ไม่ละลาย (กรัม)	ร้อยละการ ละลาย (%)
1	1.00	0.0368	96.32
2	1.00	0.1426	85.74
3	1.00	0.5307	46.93
โคตินโตซานทางการค้า	1.00	0.0154	98.46

4.2.5) การวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of Deacetylation, %DDA)

จากการศึกษาการสกัดโคตินโตซานจากแกนหมึกจำนวน 3 ครั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลโดยใช้เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เปรียบเทียบกับโคตินโตซานทางการค้าได้ผลกำจัดหมู่อะซิทิลเท่ากับร้อยละ 93.63, 94.04, 88.63 และ 92.88 ตามลำดับ ดังแสดงผลในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการกำจัดหมู่อะซิทิล

ครั้งที่	$A_{1655} (A.cm^{-1})$	$A_{3450} (A.cm^{-1})$	DDA (%)
1	97.5854	640.2074	93.63
2	66.8362	487.2738	94.04
3	98.4121	288.2297	88.63
โคตินโตซานทางการค้า	66.3720	366.9457	92.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6) การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของไคโตซาน

เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของไคโตซานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า พบว่าไคโตซานจากแกนหมึกมีพื้นผิวในแนวราบค่อนข้างเรียบ และไม่สามารถมองเห็นรูพรุนได้ ดังแสดงในรูป 4.6



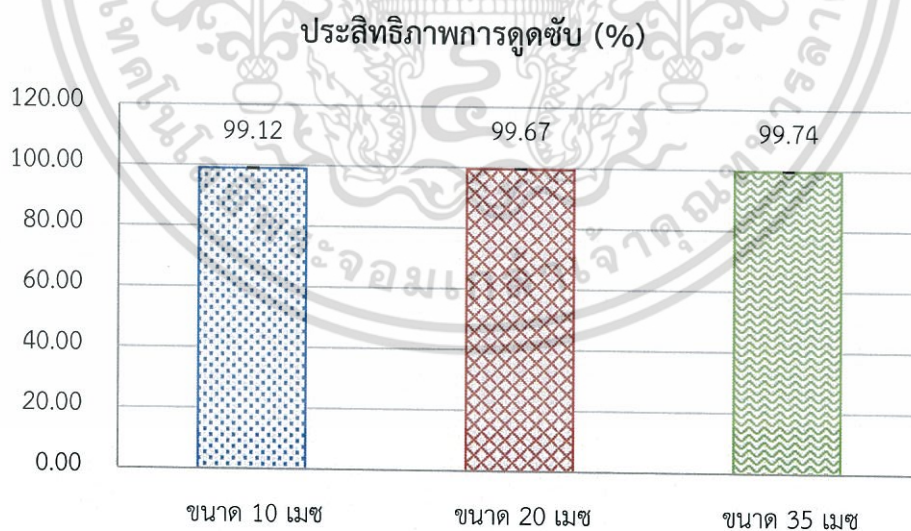
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของไคโตซาน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไคโตซานที่สกัดจากแกนหมึกเปรียบเทียบกับไคโตซานทางการค้าด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) พบว่าสเปกตรัมของไคโตซานที่สกัดจากแกนหมึกทั้ง 3 ครั้งประกอบด้วยสเปกตรัมของ O-H Stretching ที่ช่วงความถี่ $3650-3600\text{ cm}^{-1}$, C-H Stretching, ที่ช่วงความถี่ $3000-2850\text{ cm}^{-1}$, N-H bending ที่ช่วงความถี่ $1640-1550\text{ cm}^{-1}$, C-O Stretching และ ที่ช่วงความถี่ $1000-1150\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งมีความใกล้เคียงกับไคโตซานทางการค้าดังแสดงในรูป 4.7 และสอดคล้องกับสูตรโครงสร้างของไคโตซานดังรูป 2.6

4.3 ผลการศึกษาขนาดของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

4.3.1) ขนาดของแกนหมึก

จากการศึกษาขนาดของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปรียบเทียบขนาดของแกนหมึกขนาด 10, 20 และ 35 เมช ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แกนหมึก 10, 20 และ 35 เมช มีค่าเป็นร้อยละ 99.12, 99.67 และ 99.74 ตามลำดับ พบว่าแกนหมึกขนาด 35 เมช ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับขนาดอื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึก ของนริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าตัวดูดซับขนาดเล็กสามารถดูดซับได้ดีกว่าขนาดใหญ่ จากผลการทดลองจึงเลือกใช้แกนหมึกขนาด 35 เมช ในการทดลองต่อไป เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับนั้นได้แกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณมากที่สุด

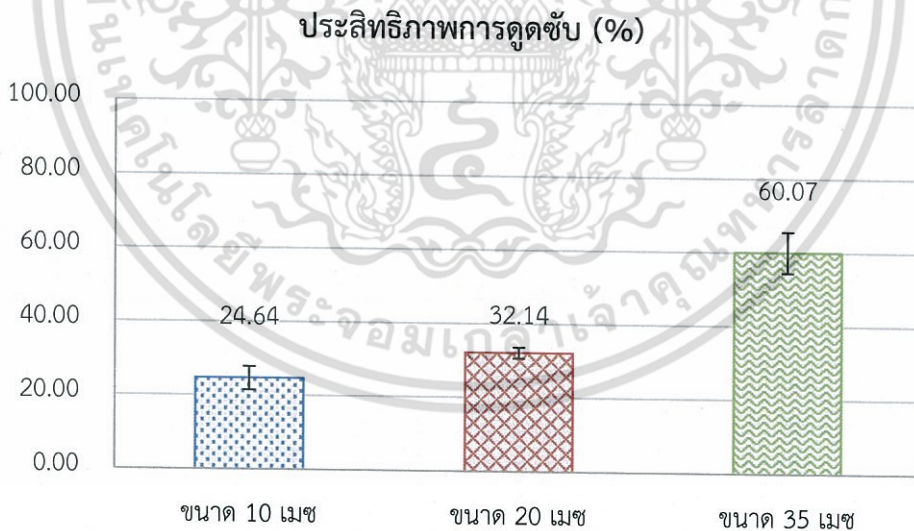


รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึกขนาดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1) ขนาดของไคโตซานจากแกนหมึก

จากการศึกษาขนาดของไคโตซานที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปรียบเทียบขนาดของไคโตซาน 10, 20 และ 35 เมช ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไคโตซาน ขนาด 10, 20 และ 35 เมช มีค่าเป็นร้อยละ 24.64, 32.14, และ 60.07 ตามลำดับ พบว่าไคโตซาน ขนาด 35 เมช ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับขนาด อื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็ก จึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุล ตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึก ของ นริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าตัวดูดซับขนาดเล็กสามารถดูดซับได้ดีกว่าขนาดใหญ่ จากผลการ ทดลองจึงเลือกใช้ไคโตซานจากแกนหมึกขนาด 35 เมช ในการทดลองต่อไป เนื่องจากในขั้นตอนการ เตรียมตัวดูดซับนั้นได้ไคโตซานจากแกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณมากที่สุด

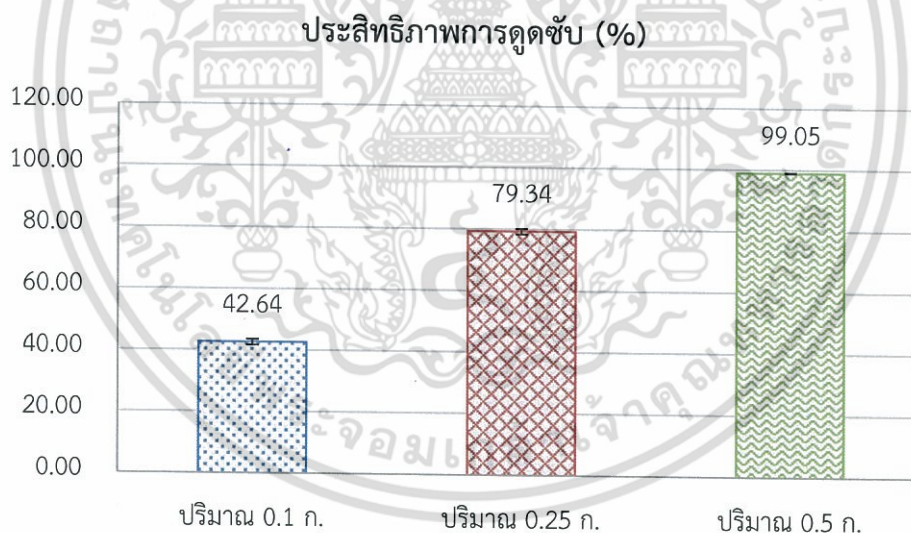


รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของไคโตซานขนาดต่างๆ

4.4 ผลการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

4.4.1) ปริมาณของแกนหมึก

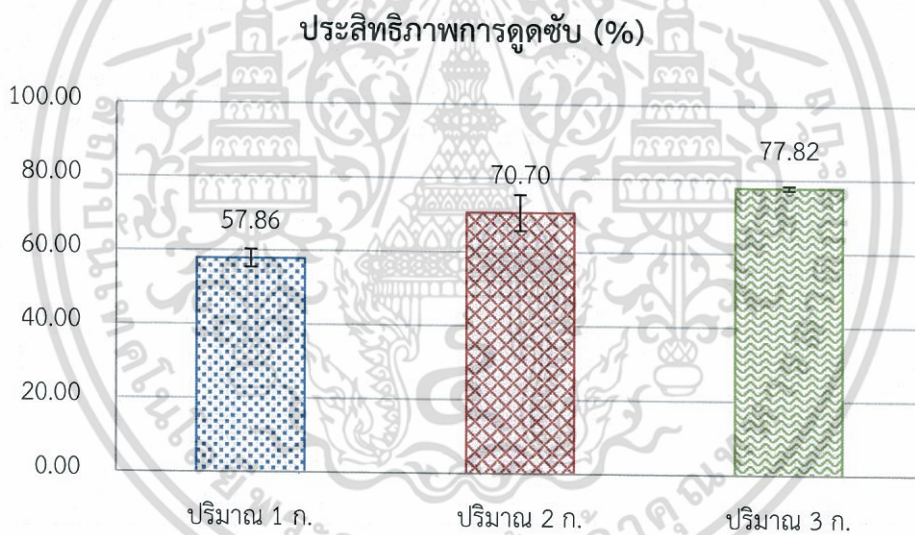
จากการศึกษาปริมาณของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปรียบเทียบปริมาณของแกนหมึก 0.10, 0.25 และ 0.50 กรัม ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้แกนหมึก 0.10, 0.25 และ 0.50 กรัม มีค่าเป็นร้อยละ 42.64, 79.34 และ 99.05 ตามลำดับ พบว่าแกนหมึกปริมาณ 0.50 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณอื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการกำจัดสีย้อมมาลาโคทกรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ของธัญลักษณ์และคณะ, (2556) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จากผลการทดลองจึงเลือกใช้แกนหมึกปริมาณ 0.50 กรัม ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึกในปริมาณต่างๆ

4.4.2) ปริมาณของไคโตซานจากแกนหมึก

จากการศึกษาปริมาณของไคโตซานที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการเปรียบเทียบปริมาณของไคโตซาน 1, 2 และ 3 กรัม ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ไคโตซาน 1, 2 และ 3 กรัม มีค่าเป็นร้อยละ 57.86, 70.70 และ 77.82 ตามลำดับ พบว่าไคโตซานปริมาณ 3 กรัม ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณอื่นๆที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ ปริมาณพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการกำจัดสีย้อมมาลาโคทกรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ ของธัญลักษณ์และคณะ, (2556) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับ จากผลการทดลองจึงเลือกใช้ไคโตซานจากแกนหมึกปริมาณ 3 กรัม ในการทดลองต่อไป

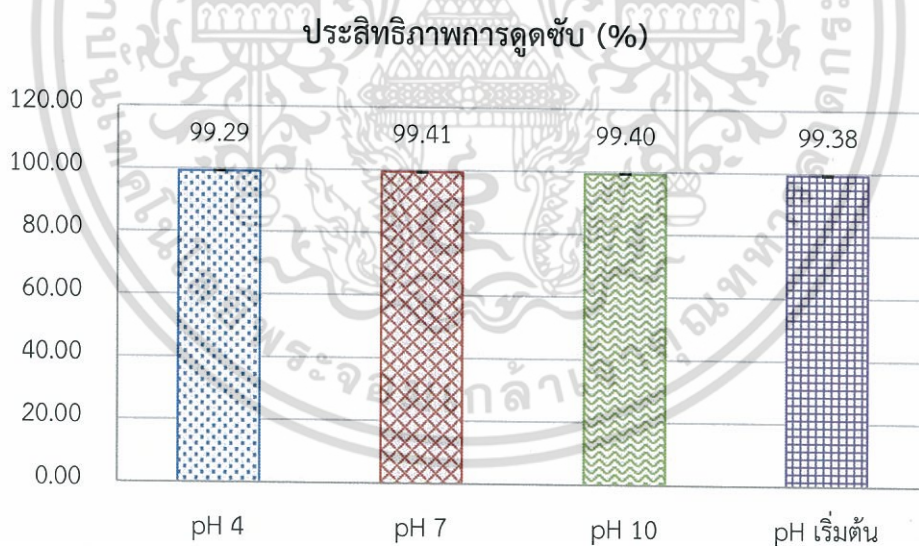


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ของไคโตซานในปริมาณต่างๆ

4.5 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

4.5.1) ดูดซับด้วยแกนหมึก

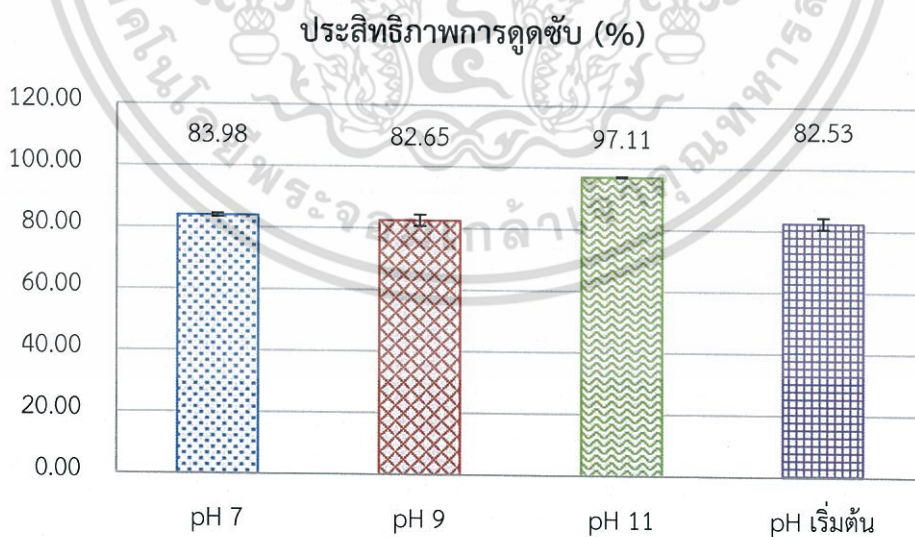
จากการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 4, 7, 10 และค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (8.50) ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH 4, 7, 10 และค่า pH เริ่มต้นมีค่าเป็นร้อยละ 99.29, 99.41, 99.40 และ 99.38 ตามลำดับ พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH เท่ากับ 7 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับค่า pH 4, 10 และค่า pH เริ่มต้นในทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากแกนหมึกมีโครงสร้างเป็นเส้นใย และมีหน่วยย่อยเป็นไคตินซึ่งไม่มีประจุ (Yang และคณะ, 2014) ปฏิกิริยาการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้ดีในทุกค่า pH เนื่องจากแกนหมึกมีรูพรุนภายในโครงสร้างจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึก ของนริศรา และคณะ, (2545) ที่กล่าวว่ากระดองหมึกให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดที่สภาวะ pH เป็นกลาง จากผลการทดลองจึงเลือกใช้ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆ ของแกนหมึก

4.5.2) ดูดซับด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

จากการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไคโตซานจากแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 7, 9, 11 และค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ (7.73) การทดลองนี้ ไม่ทำการศึกษาในสภาวะที่ pH เป็นกรด เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติที่สามารถละลายในสภาวะกรด ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH 7, 9, 11 และค่า pH เริ่มต้นมีค่าเป็นร้อยละ 83.98, 82.65, 97.11 และ 82.53 ตามลำดับ พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่า pH เท่ากับ 11 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด โดยแตกต่างกันมีนัยสำคัญกับค่า pH 7, 9 และค่า pH เริ่มต้นในทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากไคโตซานจากแกนหมึกมีประจุเป็นบวก และสีรีแอคทีฟมีประจุเป็นลบ ดังนั้นปฏิกิริยาการดูดซับควรเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่ค่า pH ต่ำ ประสิทธิภาพในการดูดซับควรมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการศึกษาที่ได้นั้น ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวว่า ในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับเป็นบวก ถ้าสารละลายมีค่า pH สูง ความสามารถในการดูดซับจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากที่ค่า pH สูง (สภาวะต่าง) ไฮดรอกไซด์ไอออนมีปริมาณเพิ่มขึ้น เกิดการดูดซับระหว่างตัวดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮดรอกไซด์ไอออนในสารละลาย ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000) จากผลการทดลองจึงเลือกใช้ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 11 ในการทดลองต่อไป



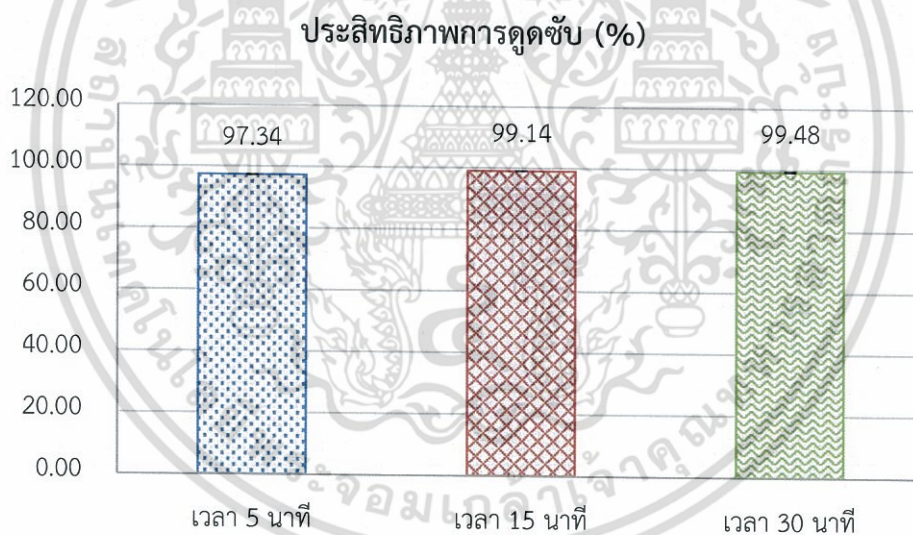
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่า pH ต่างๆ ของไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

4.6.1) ดูดซับด้วยแกนหมึก

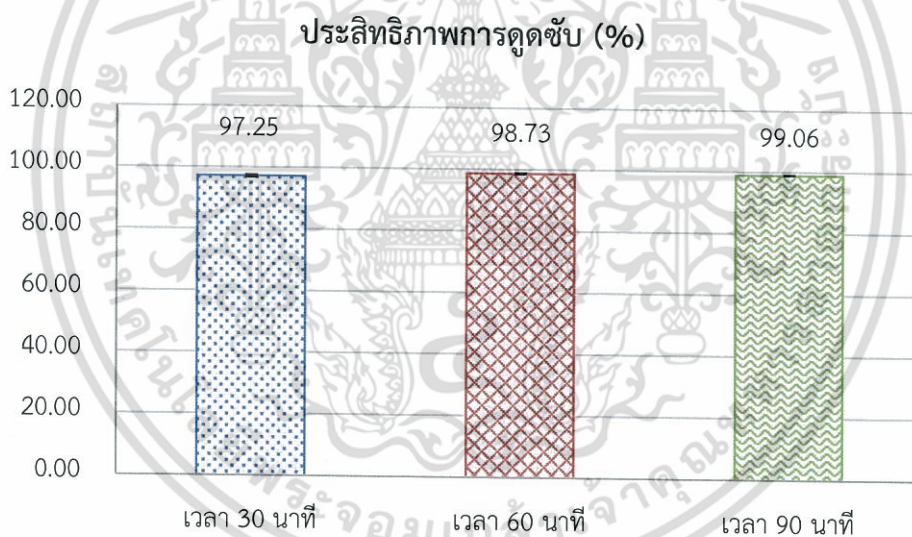
จากการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบเวลา 5, 15 และ 30 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลา 5, 15 และ 30 นาที มีค่าเป็นร้อยละ 97.34, 99.06, 99.14 และ 99.48 ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 30 นาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเวลาอื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งจากการคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่ของสีย้อมจากสารละลายมายังผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น (วิรัชรอง, 2559) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึกของ นริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจึงเลือกใช้เวลาในการเขย่าที่ 30 นาที ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ ของแกนหมึก

4.6.2) ดูดซับด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

จากการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไคโตซานจากแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบเวลา 30, 60 และ 90 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่เวลา 30, 60 และ 90 นาที มีค่าเป็นร้อยละ 97.25, 98.73 และ 99.06 ตามลำดับ พบว่าที่เวลา 90 นาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับเวลาอื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งจากการคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมพบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการแพร่ของสีย้อมจากสารละลายมายังผิวของตัวดูดซับได้มากขึ้น (วิรัชรอง, 2559) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึกของ นริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจึงเลือกใช้เวลาในการเขย่าที่ 90 นาที ในการทดลองต่อไป

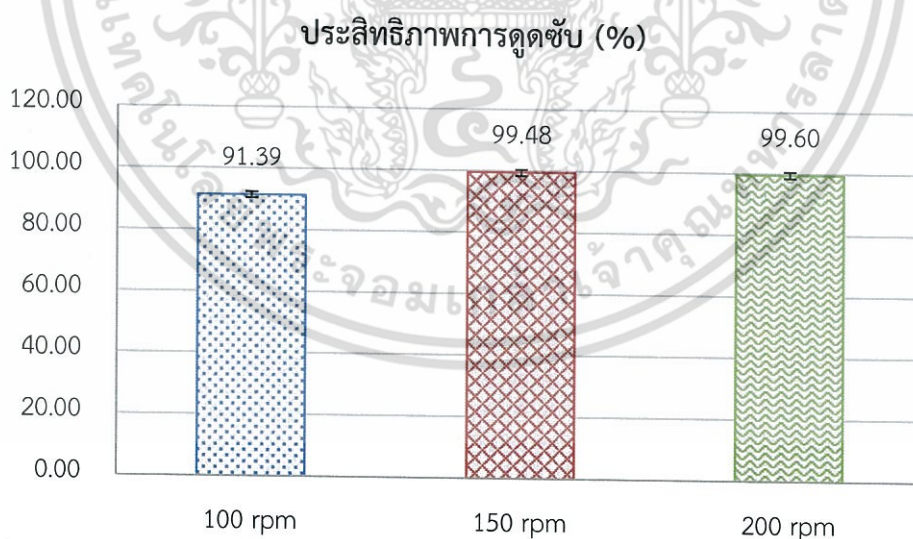


รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ ของไคโตซาน

4.7 ผลการศึกษาความเร็รรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

4.7.1) ดูดซับด้วยแกนหมึก

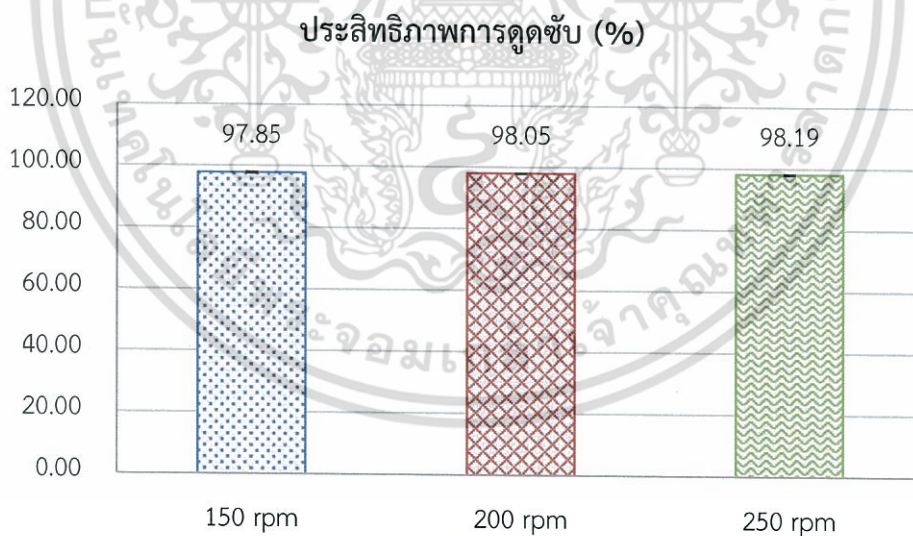
จากการศึกษาความเร็รรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบความเร็ว 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็ว 100, 150 และ 200 รอบต่อนาที มีค่าเป็นร้อยละ 91.39, 99.48 และ 99.60 ตามลำดับ พบว่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับความเร็วรอบอื่นๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าที่ความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึกของ นริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็รรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจึงเลือกใช้ความเร็รรอบในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็รรอบต่างๆ ของแกนหมึก

4.7.2) ดูดซับด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

จากการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยไคโตซานจากแกนหมึก โดยการเปรียบเทียบความเร็ว 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูป 4.18 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็ว 150, 200 และ 250 รอบต่อนาที มีค่าเป็นร้อยละ 97.85, 98.05 และ 98.19 ตามลำดับ พบว่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าได้สูงที่สุด แต่ไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญกับความเร็ว 200 และ 150 รอบต่อนาทีในทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ फिल्मน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำที่ความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง (ชัยยศ, 2554 อ้างถึงใน Said และคณะ, 1993 และ Solmaz และคณะ, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้กระดองหมึกของ นริศราและคณะ, (2545) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบในการเขย่าเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองจึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเร็วรอบต่างๆ ของไคโตซาน

4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้า

4.8.1) ดูดซับด้วยแกนหมึก

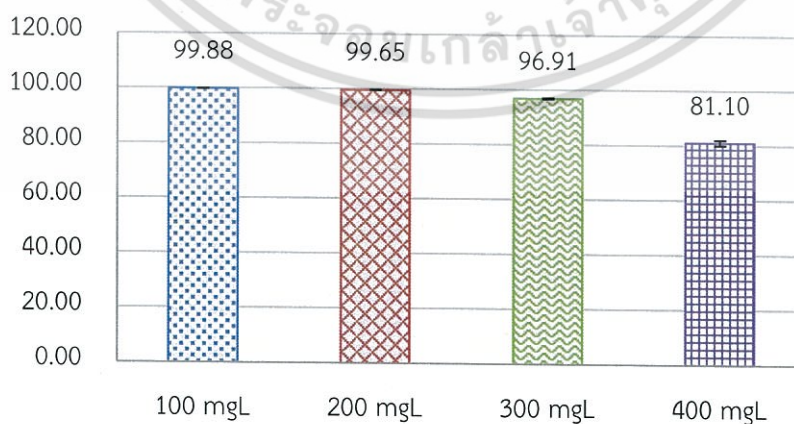
จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมผ้าโดยใช้แกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 100, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้าย หรือค่า C_e (mg/L)	Log C_e	Q_e (mg/g)	Log Q_e	C_e/Q_e	ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อม (%)
100	0.25	-0.61	9.98	1.00	1.24	99.88
200	0.71	-0.15	19.93	1.30	1.78	99.65
300	6.17	0.79	29.38	1.47	10.50	96.91
400	37.80	1.58	36.22	1.56	52.18	81.10

จากการศึกษาโดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 100, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ผลเป็นร้อยละ 99.88, 99.65, 96.91 และ 81.10 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.12

ประสิทธิภาพการดูดซับ (%)



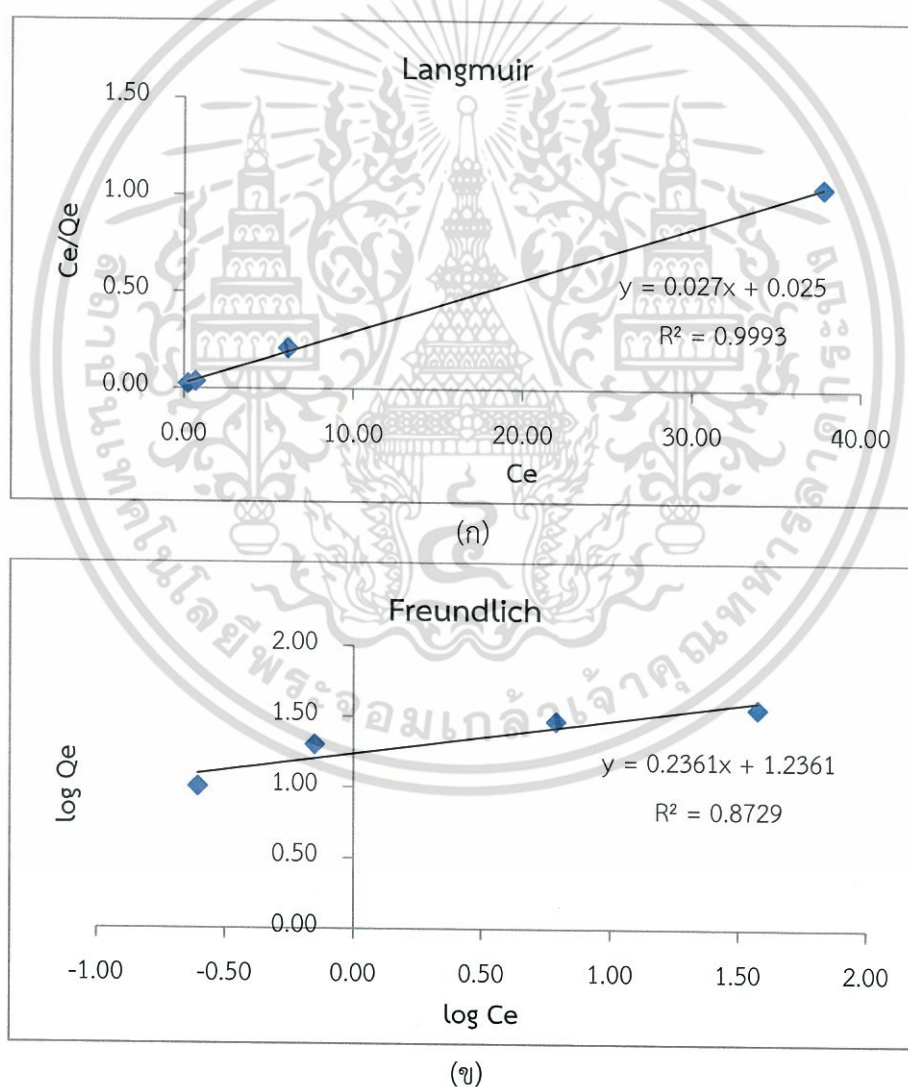
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแกนหมึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich

Langmuir	Fruendlich
$Ce/Qe = 0.027(Ce) + 0.025$	$\text{Log } Qe = 0.2361 \log Ce + 1.2361$
$R^2 = 0.9993$	$R^2 = 0.8729$
$a = 37.037$	$K_F = 17.223$
$b = 1.080$	$n = 4.235$

จากค่า R^2 ของ Langmuir และ Freundlich สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของแกนหมึก เป็นไปตามสมการของไอโซเทอร์มของ Langmuir ดังแสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้า

ในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึก (ก = Langmuir Isotherm, ข = Freundlich Isotherm)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้งานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

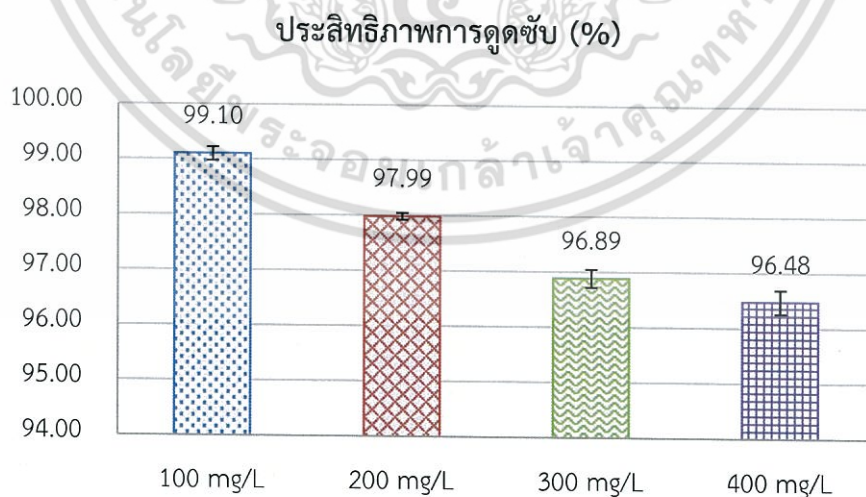
4.8.2) ดูดซับด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมผ้าโดยใช้ไคโตซานจากแกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 3 กรัมในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 100, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 11 โดยทำการเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/L)	ความเข้มข้นสุดท้าย หรือค่า Ce (mg/L)	Log Ce	Qe (mg/g)	Log Qe	Ce/Qe	ประสิทธิภาพ การกำจัดสีย้อม (%)
100	1.79	0.25	1.64	0.21	1.09	99.10
200	4.03	0.61	3.27	0.51	1.23	97.99
300	6.23	0.79	4.90	0.69	1.27	96.89
400	7.01	0.85	6.55	0.82	1.07	96.48

จากการศึกษาโดยทำการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เป็น 100, 200, 300 และ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ผลเป็นร้อยละ 99.10, 97.99, 96.89 และ 96.48 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.19



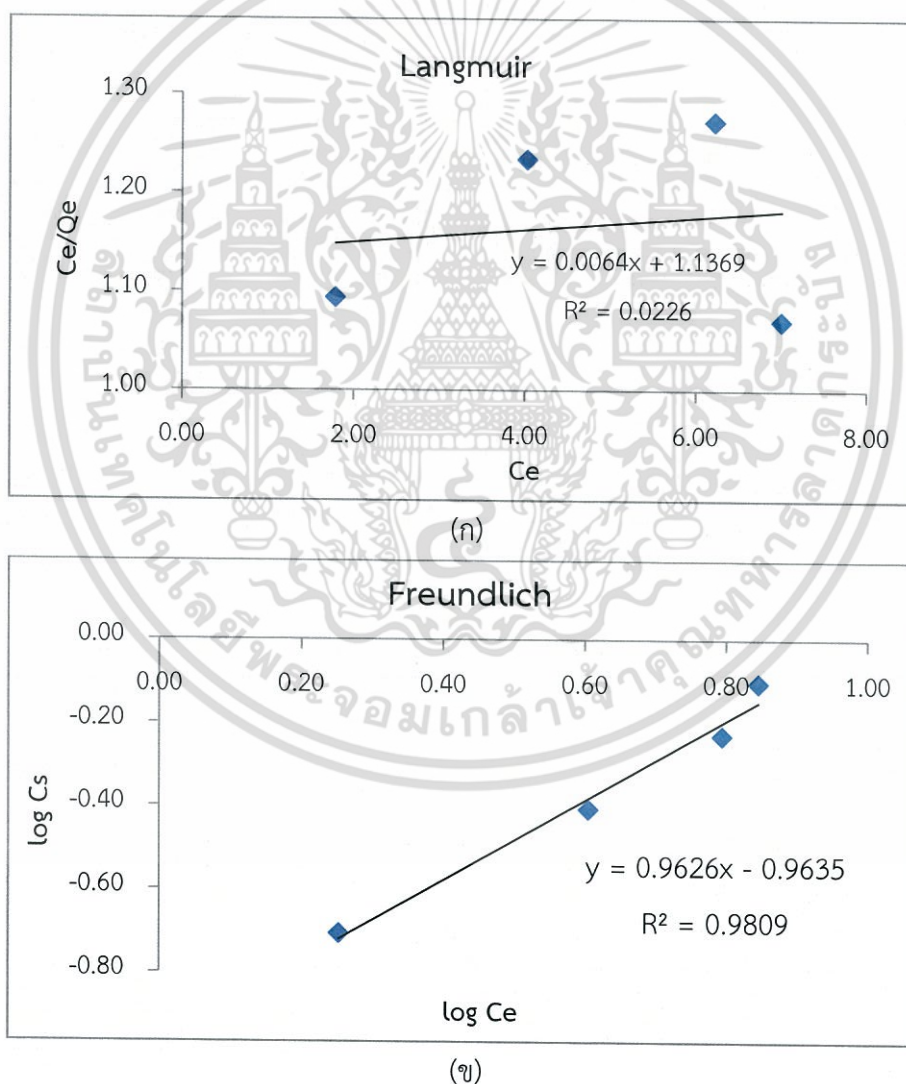
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของแกนหมึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบไอโซเทอร์มของ Langmuir และ Freundlich

Langmuir	Fruendlich
$C_e/Q_e = 0.0064(C_e) + 1.1369$	$\text{Log } Q_e = 0.9626 (\text{Log } C_e) - 0.0427$
$R^2 = 0.0226$	$R^2 = 0.9809$
$a = 156.250$	$K_F = 0.906$
$b = 5.62 \times 10^{-3}$	$n = 1.039$

จากค่า R^2 ของ Langmuir และ Freundlich สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมของไคโตซานจากแกนหมึก เป็นไปตามสมการของไอโซเทอร์มของ Freundlich ดังแสดงในรูป 4.14



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับสีย้อมผ้า

ในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึก (ก = Langmuir Isotherm, ข = Freundlich Isotherm) ด้านการคำนวณค่าเอกสารเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจหรือเชิงคณิตศาสตร์ที่ค่อนข้างยากไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ)

4.9.1) แแกนหมึก

จากการศึกษาความสามารถในการนำแแกนหมึกกลับมาใช้ใหม่ด้วยสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ได้ผลการทดลองจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 590 นาโนเมตร และความเข้มข้นในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 0.0027 และ 0.00 ตามลำดับ พบว่าแแกนหมึกมีประสิทธิภาพในการคายซับต่ำ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

4.9.2) ไคโตซานจากแแกนหมึก

จากการศึกษาความสามารถในการนำไคโตซานจากแแกนหมึกกลับมาใช้ใหม่ ด้วยน้ำกลั่นและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติที่สามารถละลายได้ในสภาวะที่เป็นกรดจึงไม่ทำการทดลองในสภาวะกรด ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่าไคโตซานจากแแกนหมึกสามารถคายซับในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ดีกว่าน้ำกลั่น แต่ยังมีประสิทธิภาพในการคายซับต่ำ จึงไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ตารางที่ 4.12 ผลการคายซับของแแกนหมึก

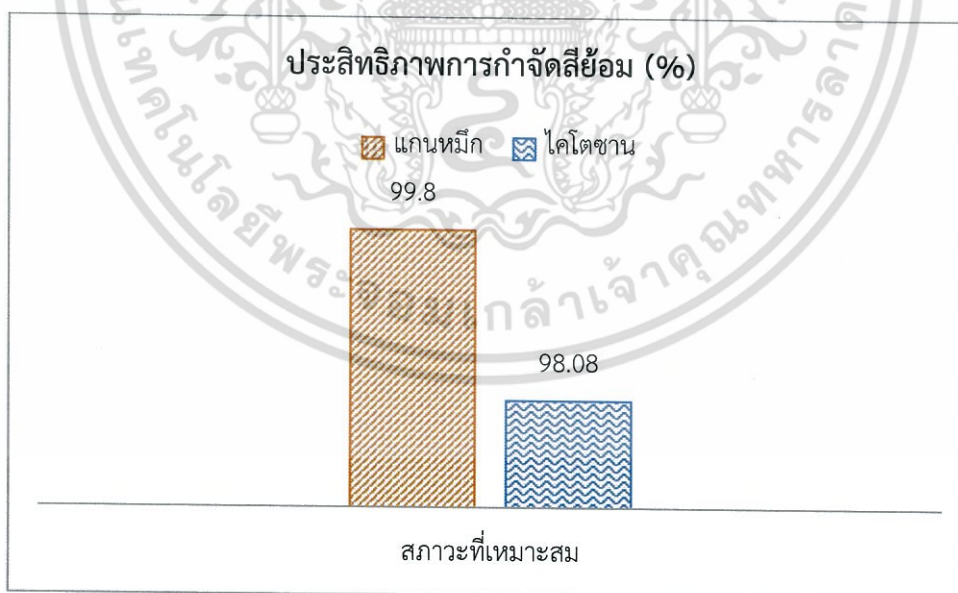
สารละลาย	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น(mg/L)
น้ำกลั่น	0.0063	0.29
NaOH	0.0123	0.83

4.10 ผลการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นสีย้อมในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

จากผลการทดลองการกำจัดสีย้อมผ้าโดยใช้แกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึกในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีย้อมผ้า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่สภาวะเหมาะสมเมื่อนำน้ำตัวอย่างก่อนและหลังการดูดซับด้วยแกนหมึกและโคโตซานจากแกนหมึกมาแปรค่าความเข้มข้นเป็นหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI) ได้ค่าความเข้มข้นแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมผ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ของแกนหมึกและโคโตซานเท่ากับร้อยละ 99.80 และ 98.08 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.21 จากผลการทดลองที่ได้สามารถสรุปได้ว่าที่สภาวะเหมาะสมแกนหมึกมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูงกว่าโคโตซานจากแกนหมึก

ตารางที่ 4.13 ค่าความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในหน่วย ADMI

น้ำเสียสังเคราะห์	ความเข้มข้น (ADMI)
ก่อนดูดซับ	5979.89
หลังดูดซับด้วยแกนหมึก	5.76
หลังดูดซับด้วยโคโตซาน	114.94



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่สภาวะเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ในน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยแกนหมึก คือ แกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ที่ pH เริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพ 99.8% และสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยโคโตซานจากแกนหมึก คือ โคโตซานจากแกนหมึกขนาด 35 เมช ปริมาณ 3 กรัม ที่ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 11 เขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 90 นาที มีประสิทธิภาพ 98.08% โดยการดูดซับของแกนหมึกเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir ในขณะที่การดูดซับของโคโตซานจากแกนหมึกเป็นไปตามไอโซเทอร์มการดูดซับของ Freundlich ซึ่งตัวดูดซับทั้งสองชนิดไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ (ไม่คายซับ)

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่าแกนหมึกมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม Reactive Blue 19 ในน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร สูงกว่าโคโตซานจากแกนหมึก และเมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมในการเลือกใช้แกนหมึกหรือโคโตซานจากแกนหมึกเป็นวัสดุดูดซับ โดยพิจารณาจาก ราคา ปริมาณสารเคมี พลังงาน และเวลา พบว่าการเลือกใช้แกนหมึกเป็นวัสดุดูดซับนั้นมีความเหมาะสมมากกว่าการเลือกใช้โคโตซานจากแกนหมึก เนื่องจากสามารถประหยัดงบประมาณในการซื้อสารเคมี ใช้สารเคมีและพลังงานในปริมาณที่น้อยกว่า และประหยัดเวลามากกว่า ซึ่งถือเป็นการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งจากการอุปโภคบริโภคมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแท้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 สามารถนำโคโตซานที่ผลิตได้จากแกนหมึกไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆได้

5.2.2 การศึกษาในครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำการทดลอง การนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงยังไม่เหมาะสม ควรมีการปรับปรุงการทดลอง และมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

5.2.3 ควรทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับร่วมกับการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อประกอบการวิเคราะห์และจำแนกลักษณะการดูดซับได้อย่างถูกต้อง

5.2.4 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสี Reactive blue 19 ควรเลือกศึกษาในช่วงค่า pH ที่กว้างมากขึ้น เพื่อประกอบการวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกับทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2556. คู่มือแนวทางการจัดการสีน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: www.diw.go.th/hawk/job/1_8.pdf. วันที่สืบค้น 06/09/2559.
- กฤษณะ จิรสารสวัสดิ์. 2559. “การศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับโลหะหนักจากน้ำทิ้งของห้องปฏิบัติการของเปลือกไข่และกากกาแฟร่วมกับระบบชั้นกรองหลายชั้น.” วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- กานดา ใจดี, ชัยวัฒน์ ศุภมิตรกฤษณา และพัชรี ศรีเมือง. 2540. “การใช้ไคโตซานและผงถ่านกัมมันต์ดูดซับสีย้อมผ้า.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กาวี ศรีกุลกิจ. 2554. การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยเซลลูโลส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการติดสีรีแอคทีฟ (reactive dyes). (ออนไลน์). แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th/th/search_sys/search_proj/detail.asp?proj_id=MT-S-40-POL-09-109-G&lang=1. วันที่สืบค้น 25/09/2559.
- ชัยยศ ตั้งสถิตกุลชัย. 2554. กระบวนการดูดซับสาร. นครราชสีมา: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์, ปริญญา รุ่งโรจน์กิจไพศาล และปวีณา จรัสโชติพิณิต. 2544. “การดูดซับตะกั่วโดยการพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชุดิมา สัมหนักดี และ พรพิมล พัดภู. 2544. “การดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธัญลักษณ์ ชูพันธ์, นาทยา โมรารวรรณ และนิโลบล อินทรฤทธิ์. 2556. “การกำจัดสีย้อมมาลาโคท์กรีนโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชาที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คอลไรต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นริศรา นพวารุมาศ, พัชรา เสริมตระกูล และวิชชุดา สุขสำอาง. 2545. “การศึกษาการดูดซับ แคดเมียมโดยใช้กระดองหมีก.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นริชา แก่นสม, และพรรณมณี ภัทรประทานพร. 2558. “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัด โคโคซานจากแกนหมีก.” สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2559. สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรท-ไฮโดร คอลลอยด์ และการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT6111/chapter4.html>. วันที่สืบค้น 31/08/2559.

มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2559. อินฟราเรด สเปกโตรสโคปี. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: e-book.ramkhammahong.ac.th/e-book/c/CM328/CM328-10.pdf. วันที่สืบค้น 09/12/2559.

แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2534. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนจำกัดโรงพิมพ์ชวนชม.

วิกิมีเดีย (ประเทศไทย). 2558. หมึกกล้วย. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://th.wikipedia.org/wiki/หมึกกล้วย>. วันที่สืบค้น 06/09/2559.

วิรังรอง แสงอรุณเลิศ. 2559. “การดูดซับสีย้อมผ้าด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกไข่และเปลือก หอยแครงโดยวิธีกระตุ้นทางเคมี.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์.

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2544. อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล. 2559. กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน. (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. วันที่สืบค้น 23/11/2559.

สมนึก นุสรณ์รัมย์, สุชาสินี วัฒนรัตน์ และอมรา ดาวโรสง. 2545. “การศึกษาประสิทธิภาพในการ ดูดซับน้ำมันในน้ำทิ้งโดยใช้เปลือกปูและไคติน.” ปรินูญานิพนธ์วิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สรารุช แหยมศิริ. 2554. “การตรวจหาอายุคราบโลหิตด้วย Fourier Transform Infrared spectroscopy.” ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. 2558. การกำหนดมาตรฐานเฉพาะประเภทอุตสาหกรรม. (ออนไลน์). แหล่งที่มา : <http://wqm.pcd.go.th/water/index.php/294-industryspecification>. วันที่สืบค้น 23/11/2559.
- Bilal Muhammad, Asgher Muhammad and Iqba Munawar. 2016. “Chitosan beads immobilized manganese peroxidase catalytic potential for detoxification and decolorization of textile effluent.” *International Journal of Biological Macromolecules*, 89 : 181-189.
- Fei-Chi Yang, Robert D. Peters, Hannah Dies และ Maikel C. Rheinstädter. 2014. “Hierarchical, self-similar structure in native squid pen.” *Soft Matter*. 10 : 5541-5549.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2016. **Squid**. (Online). แหล่งที่มา: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/ac479e/AC479E15.pdf>. วันที่สืบค้น 16/10/2559.
- Hassan, and Mahmoud S. 2015. “Removal of reactive dyes from textile wastewater by immobilized chitosan upon grafted Jute fibers with acrylic acid by gamma irradiation.” *Radiation Physics and Chemistry*. 115 : 55-61.
- Hoang Ngoc Cuonga, Nguyen Cong Minh, Nguyen Van Hoac และ Trang Si Trung. 2016. “Preparation and characterization of high purity beta-chitin from squid pens (*Loligo chenis*).” *International Journal of Biological Macromolecules*. 93 : 442-447.
- Jolanta Kumirska, Małgorzata Czerwicka และ Zbigniew Kaczyński. 2010. “Application of Spectroscopic Methods for Structural Analysis of Chitin and Chitosan.” *Marine Drugs*. 8 : 1567-1636.

- Jooyeoun Jung และ Yanyun Zhao. 2014. "Alkali- or acid-induced changes in structure, moisture absorption ability and deacetylating reaction of beta-chitin extracted from jumbo squid (*Dosidicus gigas*) pens." *Food Chem.* 152 : 355-362.
- Jooyeoun Jung. 2013. "New Development of β -Chitosan from Jumbo Squid Pens (*Dosidicus gigas*) and its Structural, Physicochemical, and Biological Properties." Doctor of Philosophy.
- National Center for Biotechnology Information. 2016. **Database Reative Blue 19.** (ออนไลน์). แหล่งที่มา: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/17409>. วันที่สืบค้น 06/09/2559.
- Wikimedia. 2016. **Loligo.** (Online). แหล่งที่มา: <https://en.wikipedia.org/wiki/Loligo>. วันที่สืบค้น 16/10/2559.
- Yue-cheng, Hong-peng Wanga และFaryal Gohara. 2016. "Preparation and copper ions adsorption properties of thiosemicarbazide chitosan from squid pens." *International Journal of Biological Macromolecules.* 95 : 476-783.

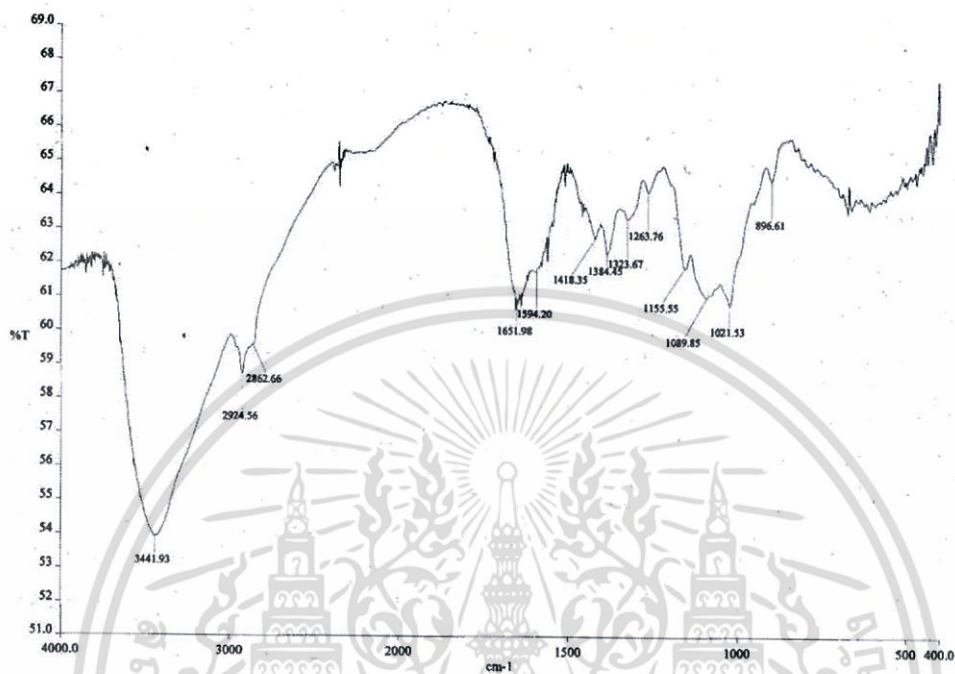


ภาคผนวก

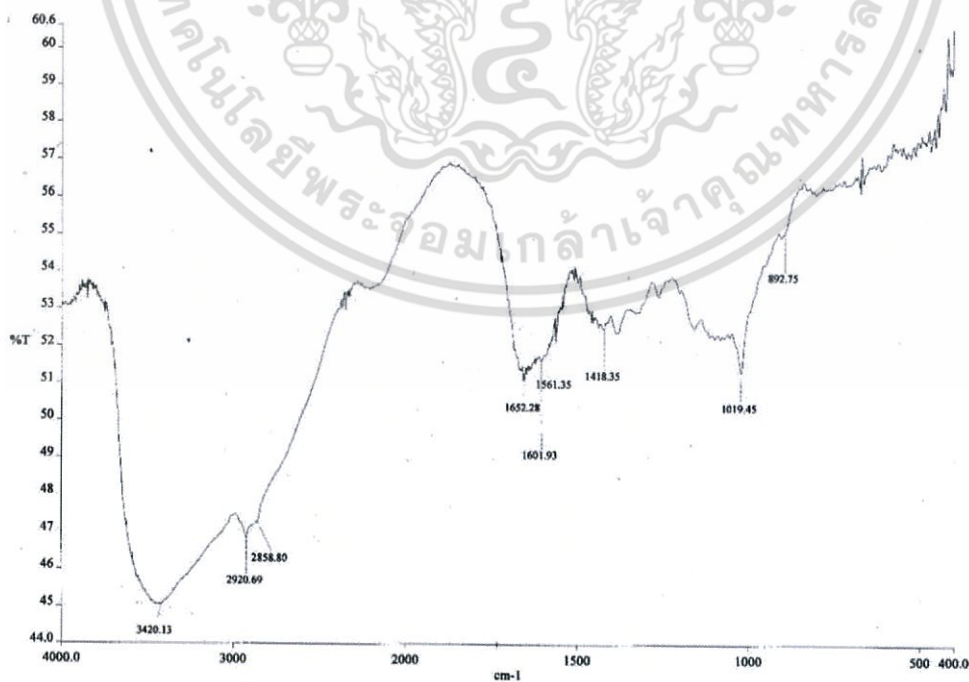
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาพประกอบโครงงานพิเศษ

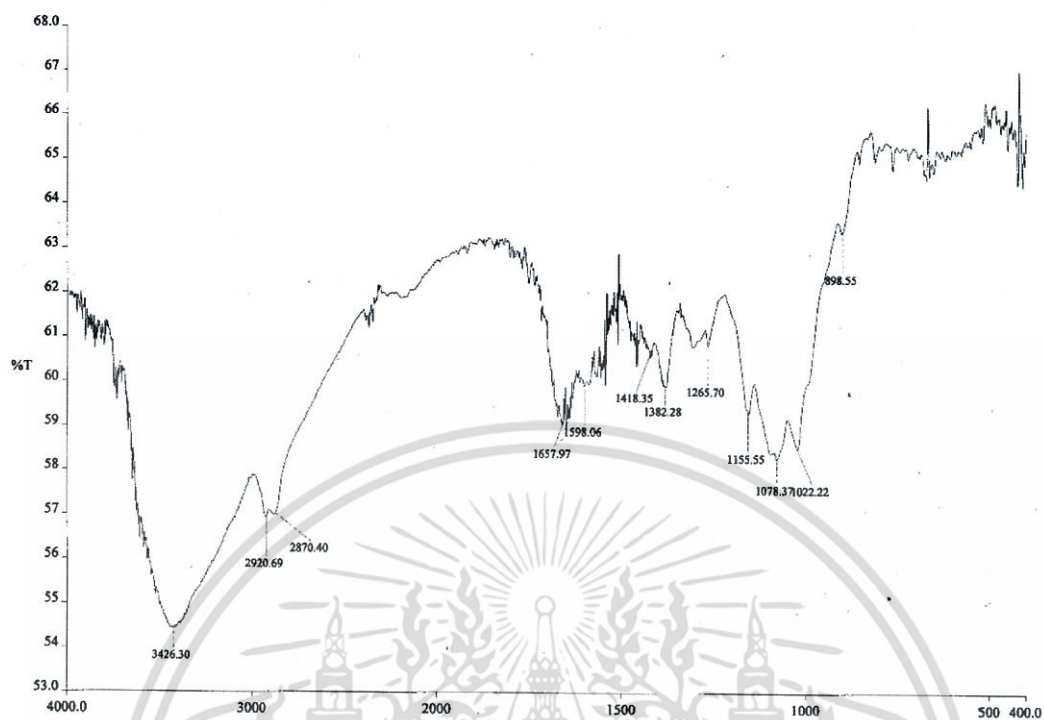


รูปที่ ก 1 IR Spectra ของโคโคชันทางการค้า

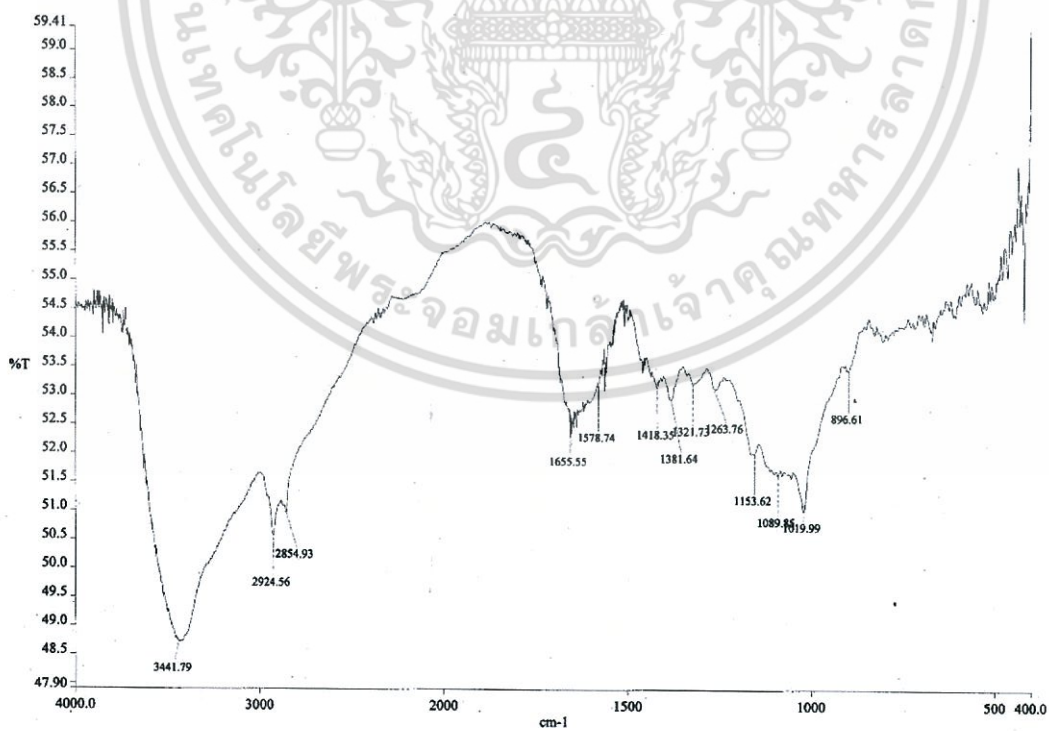


รูปที่ ก 2 IR Spectra ของโคโคชันจากแกนหมัก ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

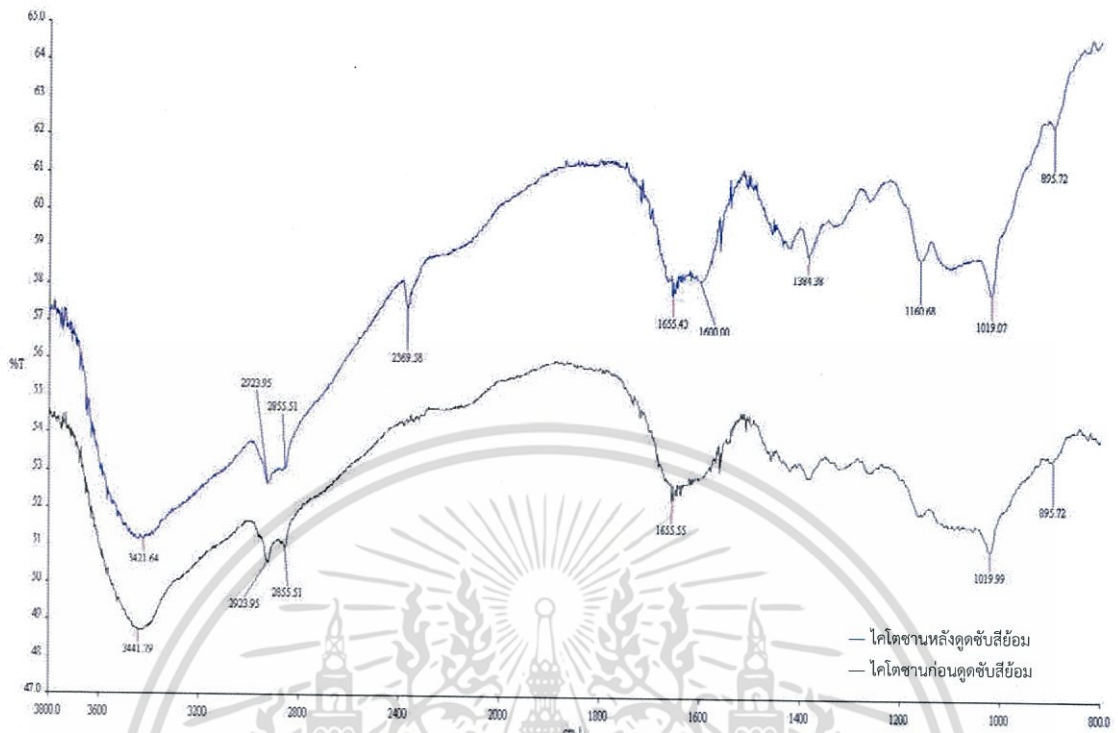


รูปที่ 3 IR Spectra ของโคโคชันจากแกนหมึก ครั้งที่ 2

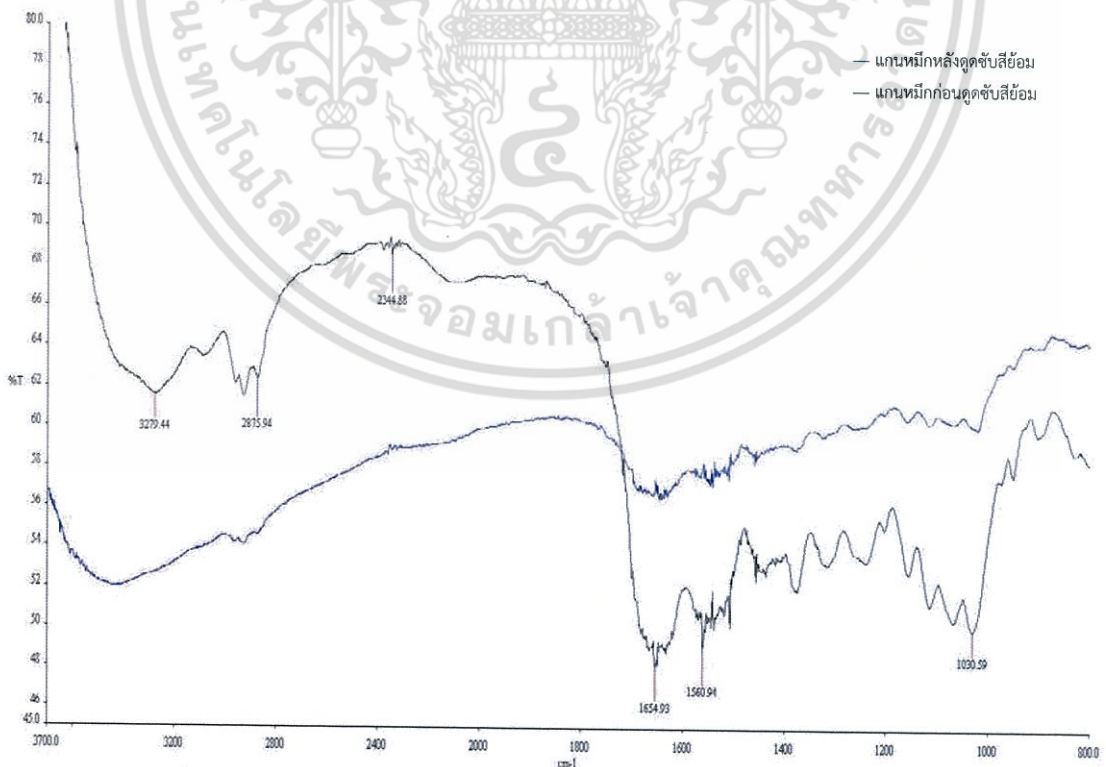


รูปที่ 4 IR Spectra ของโคโคชันจากแกนหมึก ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 เปรียบเทียบ IR Spectra ของโคโคเอนก่อนและหลังดูดซับสีย้อม



รูปที่ 6 เปรียบเทียบ IR Spectra ของแกนหมึกก่อนและหลังดูดซับสีย้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เทคนิคและเครื่องมือวิเคราะห์

1. ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ต และช่วงคลื่นแสงที่มองเห็นได้ ความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm สารที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis) ต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ ซึ่งสารประกอบดังกล่าวมักเป็นสารที่เรียกว่า “Chromophores” การเลือกความยาวคลื่นต้องเลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม เนื่องจากสารแต่ละชนิดจะมีการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ เมื่อนำค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของแสง (I_0) และค่าความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากถูกดูดกลืนแสง (I_1) มาคำนวณจะได้ค่าการดูดกลืน (Absorbance, A) ออกมา ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตัวอย่าง ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารตัวอย่างทำได้โดยเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงที่ λ_{max} โดยเทียบกับ blank จากนั้นสร้างกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนและค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง เรียกว่า กราฟมาตรฐาน (Calibration curve) ซึ่งเมื่อนำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากกราฟมาตรฐาน ก็จะสามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารตัวอย่างได้

ส่วนประกอบหลักของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ มีอยู่ 5 ส่วนดังนี้คือ

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) สำหรับความยาวคลื่นในช่วงอัลตราไวโอเล็ตจะใช้หลอดดีวเทอเรียม (deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งให้แสงในช่วง 185-375 nm ส่วนหลอดทังสเตน (tungsten filament lamp) จะให้ความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงแสงที่มองเห็นได้ คือตั้งแต่ 320-2500 nm

2. ส่วนเลือกความยาวคลื่น (wavelength selector) เป็นส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆ ความยาวคลื่น (polychromatic wavelength) ให้เป็นแถบแสงในช่วงแคบๆ หรือ เป็นความยาวคลื่นเดี่ยว (monochromatic wavelength) ปัจจุบันใช้โมโนโครเมเตอร์ (monochromater) แบบเกรตติง (grating) สะท้อนแสงซึ่งมีลักษณะเป็นร่องเล็กๆ ขนานกันจำนวนมาก แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะตกกระทบลงบนผิวหน้าของร่อง แล้วสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เฉพาะความยาวคลื่นที่เราเลือกเท่านั้นจึงจะผ่าน ช่องแสงออก (exit slit) ไปสู่สารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ส่วนที่วางสารตัวอย่างเพื่อวัด (Cell Compartment) เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบแล้วนำไปใส่ที่สำหรับวัด ซึ่งส่วนนี้จะมีฝาปิด เพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเข้าไปรบกวน และภาชนะใส่สาร (cell หรือ cuvette) ภาชนะใส่สารตัวอย่างสำหรับสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะเรียกว่า เซลล์หรือคิวเวทท์ (cuvette) มีหลายรูปแบบหลายขนาดขึ้นอยู่กับการใช้งาน หลักสำคัญในการเลือกใช้งานก็คือ เมื่อต้องการวัดในช่วงแสงอัลตราไวโอเล็ต ต้องใช้เซลล์ที่ทำจากควอตซ์ (quartz) เท่านั้น เนื่องจากเซลล์ที่ทำจากแก้วสามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ จึงใช้เซลล์แก้ววัดในช่วงแสงที่มองเห็นได้แทน นั่นหมายความว่าถ้าเราต้องการวัดสารในช่วงแสงที่มองเห็นได้ก็ควรจะใช้เซลล์ที่ทำจากแก้ว

4. ตัวตรวจจับสัญญาณ (detector) เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ ปัจจุบันเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ส่วนใหญ่ นิยมใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ชนิดคือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube; PMT) และ โฟโตไดโอดอาร์เรย์ (photodiode arrays; PDA)

5. ส่วนบันทึกและแปรผลสัญญาณ (recorder and processor) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณและแปรผลสัญญาณให้ออกมาในมาตราส่วนแบบล็อก (log scale)



รูปที่ ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (แมน, 2535)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เอกซ์-เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)

รังสีเอกซ์ (X-rays) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย W.C. Rontgen เมื่อปี ค.ศ. 1895 ซึ่งรังสีเอกซ์เป็นสเปกตรัมของการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงหนึ่ง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.1-100 อังสตรอม (Å) หรือ 0.01-10 nm แต่ที่ใช้ในทางเคมีวิเคราะห์จะอยู่ในช่วง 0.07-0.2 nm รังสีเอกซ์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์หลายๆ อย่าง ดังที่มีผู้ได้รับรางวัลโนเบลไปแล้วหลายท่าน ซึ่งล้วนแต่ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารทั้งสิ้น การเกิดอันตรกิริยาของรังสีเอกซ์กับสสารนั้นก่อให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ เช่น เกิดการเปล่งแสงบางชนิด (emission) การดูดกลืน (absorption) การกระเจิง (scattering) หรือเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) เป็นต้น ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นลักษณะเฉพาะ (characteristic) ของแต่ละสารที่เราสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้ดังนี้คือ

1. ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในสาร (elemental analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative)
2. ใช้ศึกษาหาโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี (chemical bonding)
3. ใช้ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก (crystal structure) หรือโมเลกุลของสารด้วยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

ซึ่งเทคนิค X-ray Spectroscopy (XRS) หรือ X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFS) เป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีแบบไม่ต้องทำลายตัวอย่าง สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆ ทีละธาตุ (sequential) หรือ วิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัย ช่วยทำให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย เพราะสามารถนำไปใช้วิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงระดับความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ trace analysis (ppm) ซึ่งวิเคราะห์ได้อย่างง่ายและรวดเร็ว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRFS นี้มีอยู่ 2 ระบบ

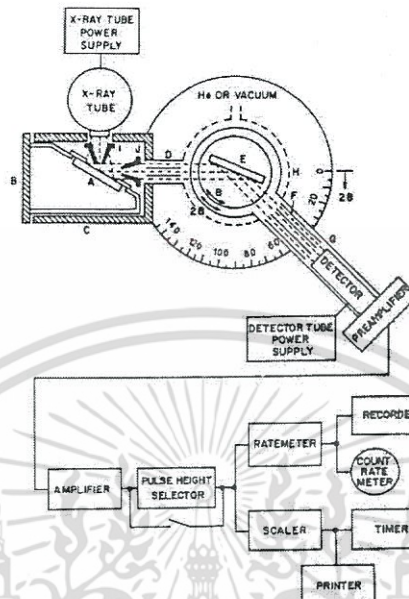
1. ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (wavelength dispersion system)
2. ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (KeV) (energy dispersion system)

หลักการเกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์

อาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุจึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณอิเล็กตรอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะและองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFS ชนิด wavelength dispersion system



รูปที่ ข 2 แสดงแผนภาพองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRFS (แมน, 2535)

(A)= sample (B และ C) = sample compartment (D, F, I และ J) = collimators

(E)= analyzing crystal (G)= detector (H)= goniometer

เครื่อง XRFS นั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1. X-Ray Generator ซึ่งประกอบด้วย
 - X-Ray tube
 - X-Ray power controller
 - High voltage transformer
 - X-Ray tube cooling unit
 - Filter
2. Spectrometer ประกอบด้วย
 - Sample compartment
 - Collimators
 - Analysing crystals
 - Goniometer
 - Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

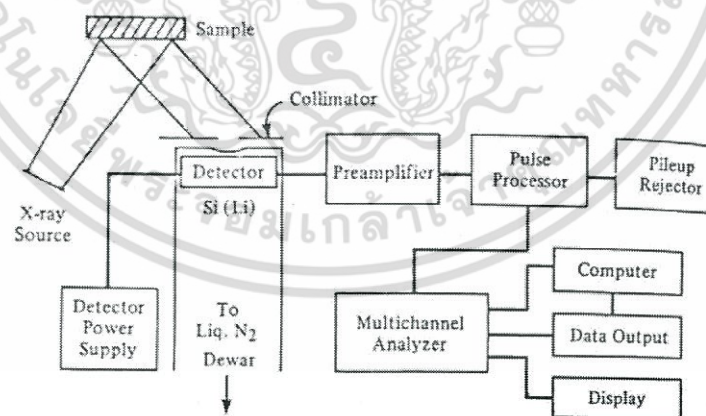
3. Data systems ประกอบด้วย

- Computer
- Printer
- Recorder

การวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRF ชนิด wavelength dispersion system มีหลักการดังนี้

ลำรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากเครื่อง X-Ray Generator จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่างเพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่างๆ ในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้นผ่านคอลลิเมเตอร์ (Collimators) เพื่อให้รังสีเอ็กซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ให้ไปกระทบกับ Analysing crystals ซึ่งอยู่ในสเปกโตรมิเตอร์ที่ทำให้เป็นสณญาณอากาศหรือความกดดันต่ำมาก Analysing crystals นี้จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอ็กซ์ออกไปให้มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน รังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน จะถูกวัดความเข้มหรือกำลัง (power) ด้วยการสแกน (scan) ของดิเทคเตอร์ สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูล แล้วถ่ายทอดออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่อง printer หรือ recorder จากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่างสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณได้

ลักษณะและองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRF ชนิด energy dispersion system



รูปที่ 3 ลักษณะและองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่อง XRF ชนิด energy dispersion system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRF ชนิด energy dispersion system มีหลักการดังนี้

เครื่อง เอกซ์-เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี ชนิดนี้จะมีระบบที่สามารถใช้ธาตุกัมมันตรังสีเป็นตัวที่ทำให้เกิด เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ได้ เราสามารถเลือกใช้ได้ตามต้องการ

องค์ประกอบของเครื่อง XRF ชนิดนี้ประกอบด้วย

1. หัววัดซึ่งเป็น Si (Li) หรือ Ge (Li)
2. Detector power supply
3. ระบบ cooling ซึ่งเป็นไนโตรเจนเหลวเพื่อใช้ทำให้ detector เย็น
4. แหล่งผลิตเอกซ์เรย์ (X-ray sources) ซึ่งอาจใช้ X-ray generator หรือ radioisotopes
5. Preamplifier หรือ Amplifier ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ใหญ่พอที่จะวัดได้ถูกต้อง
6. Multichannel analyzer (MCA) ซึ่งทำหน้าที่เก็บรวบรวมสัญญาณที่ได้จากดีเทคเตอร์ โดยมีการแยกขนาดของพลังงาน โดยพลังงานต่ำๆ จะอยู่ในช่อง (channel) ต่ำๆ แต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นก็จะถูกเก็บไว้ในช่องสูงขึ้น ซึ่งถ้านำสัญญาณที่เก็บรวบรวมได้มาเขียนกราฟระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้กับจำนวนช่องของเครื่อง MCA จะได้เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัม
7. Data system ซึ่งประกอบด้วย

Computer และ software เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องเก็บข้อมูลต่างๆ และผลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมี data analysis system ด้วย ซึ่งจะช่วยให้การวิเคราะห์ผลทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณสำเร็จได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง ง่ายต่อการวิเคราะห์มากขึ้น ผลการวิเคราะห์อาจพิมพ์ออกมาเป็นแบบต่างๆ กันได้โดยใช้ printer หรือ plotter ตามที่ต้องการ

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

เอ็ม วอน เอนเดนนี่ (M Von Andenne) สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเสร็จในปี ค.ศ. 1938 เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาพื้นผิวของตัวอย่างหรือผิวของเซลล์ โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาเช่น ลักษณะรูปร่างลดทลายเป็นผิวตัวอย่างตลอดจนขนาดของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพที่มีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ และสามารถศึกษาทั้งตัวอย่างทางชีวภาพและวัสดุศาสตร์อีกด้วย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นแบบปืนยิงอิเล็กตรอน ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนความยาวคลื่นประมาณ 0.05 อังสตรอม ผ่านเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าที่กำลังขยาย 200,000 - 500,000 เท่าหรือมากกว่า โดยขนาดของวัตถุที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นคือ 0.0004 ไมโครเมตร และไม่มีชีวิตเท่านั้น สภาวะในกล้องเป็นแบบสุญญากาศ มีระบบหล่อเย็นเนื่องจากเกิดความร้อนมาก ภาพที่ได้จะเป็นภาพปรากฏบนจอรับภาพเรืองแสง

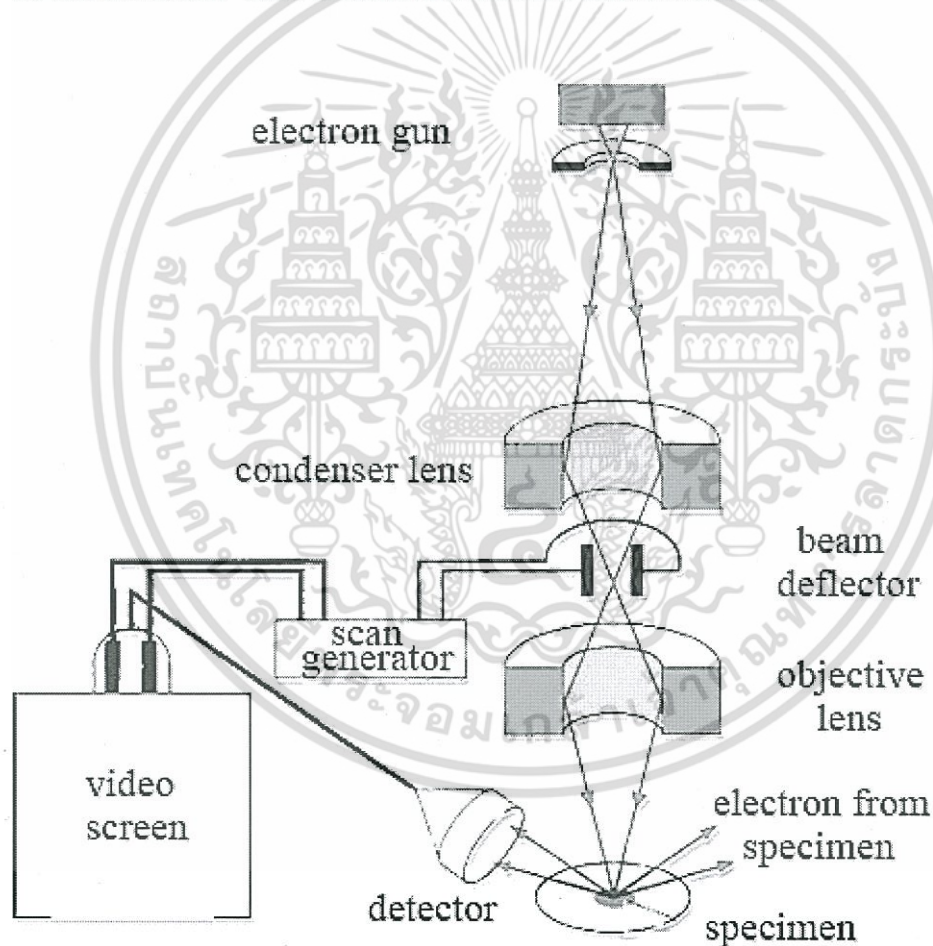


รูปที่ ข 4 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด
(Scanning Electron Microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทํางาน

จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไป และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอตทัศน์ได้เลย



รูปที่ ข 5 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

(สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) รุ่น SPECTRUM GX

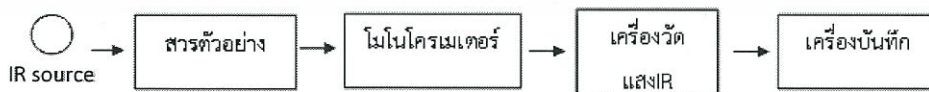
FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near Infrared ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$), Middle Infrared ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$), Far Infrared ($200-10 \text{ cm}^{-1}$) ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจาก รังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไปทำให้สามารถนำเทคนิคนี้ มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

ส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (แมน, 2535)

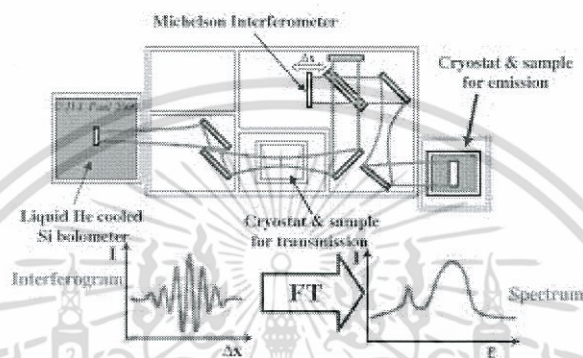
เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประกอบด้วย 5 ส่วน ดังนี้

1. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด (IR Source)
2. ช่องใส่ตัวอย่าง (Sampling area)
3. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)
4. เครื่องวัดแสงอินฟราเรด (IR Detector)
5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม (Recorder)



รูปที่ ข 6 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

โดยทั่วไปเครื่องมือทางสเปกโทรสโกปีนั้นมักจะใช้หลักการการกระจายแสง (dispersion) ของสเปกตรัมการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่สนใจเป็นตัวกำหนด โดย FT-IR มีหลักการทำงาน คล้ายกับ Dispersive infrared spectrophotometer แต่ใช้ interferometer แทน monochromator โดย FT-IR วัดความเข้มของแสง หรือกำลังของแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ กัน อย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกว่า Time-Domain Spectroscopy แล้วแปรผลออกมาด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์เรียกว่า Fourier transformation (สรวาฐ, 2554)



รูปที่ ข 7 Fourier Transform Infrared Spectrometer (สรวาฐ, 2554)

ข้อดี-ข้อเสียของการใช้เทคนิค Fourier Transform (แมน, 2535)

- ข้อดี**
1. ช่วยให้การวิเคราะห์หรือการวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างทำได้เร็ว
 2. ช่วยให้การแยกและความถูกต้องดีขึ้น เรียกว่า Conne's advantage
 3. ช่วยให้การวิเคราะห์ง่ายและสะดวกขึ้น
- ข้อเสีย**
1. เครื่องมือและค่าบำรุงรักษามีราคาแพง
 2. เครื่องต้องอยู่ในห้องที่ควบคุมความชื้นตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

cm ⁻¹	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm ⁻¹ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm ⁻¹ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm ⁻¹ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm ⁻¹ (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm ⁻¹ (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm ⁻¹ อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C≡N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีด
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีด
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข 1 ความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ (ต่อ)

cm ⁻¹	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1300-1150	CH ₂ -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเทอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3 ^o แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2 ^o แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1 ^o แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH ₂)
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R ₂ C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรไมด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ : s = ความเข้มสูง , vs = ความเข้มสูงมาก , m = ความเข้มปานกลาง , w = ความเข้มต่ำ , vw = ความเข้มต่ำมาก
sh = แหลมคม , b = กว้าง , vb = กว้างมาก , OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

ที่มา : มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2559

6. ADMI Tristimulus Filter Method

อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 55 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้ออกประกาศกฎกระทรวง ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ 3 มกราคม 2539 โดยมีผลบังคับใช้ตั้งแต่วันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539 เป็นต้นมา และผลจากการประกาศใช้มาตรฐานดังกล่าวได้มีเสียงสะท้อนถึงปัญหาและในทางปฏิบัติที่มีข้อจำกัดในการควบคุมมาตรฐานที่ไม่ชัดเจนมีการกำหนดให้สามารถผ่อนผันค่ามาตรฐานน้ำทิ้งได้ และไม่มีการกำหนดมาตรฐานควบคุมน้ำทิ้งจากเขตประกอบการอุตสาหกรรมอย่างชัดเจน

ในปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 สำนักจัดการคุณภาพน้ำได้ประกาศบังคับใช้มาตรฐานการระบายน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมฉบับใหม่ โดยปรับแก้ไขชื่อของประกาศเป็น “(ร่าง)ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม” และกำหนดมาตรฐานค่าสีใหม่จากเดิม “ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ” เป็น “ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ (ADMI :American Dye Manufacturers Institute)” รวมทั้งเพิ่มเติมข้อความ “ประกาศนี้ไม่ใช้บังคับกับแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งตามกฎหมายว่าด้วยการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติไว้เป็นการเฉพาะ” เพื่อให้สามารถออกกฎหมายการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งเฉพาะประเภทอุตสาหกรรมได้ในอนาคต (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2558)

ADMI สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ซึ่งเป็นเครื่องที่มีความละเอียดที่จะสามารถแยกแยะปริมาณสี เฉดสี และความเข้มข้นของสีได้อย่างง่ายดาย โดยอาศัยหลักการ การวัดค่าการดูดกลืนแสงหรือค่าการส่องผ่าน โดยต้องใช้ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร เพื่อตรวจจับปริมาณสีเฉดต่างๆ ที่จะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน วิธีนี้เป็นวิธีที่ขยายและเพิ่มเติมมาจาก Tristimulus Method โดยที่การวัดสีด้วยวิธีนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับเฉดสี มันเป็นวิธีการที่หาค่าสีโดยการใช้สมการสีของ Adums-Nickerson หมายความว่า การวัดสีด้วยวิธี ADMI เป็นการวัดความเบี่ยงเบนจากการไม่มีสี ตัวอย่างเช่น ถ้าเรานำสี ก และ ข มาละลายในน้ำโดยให้ความเข้มข้นที่มองด้วยตาเปล่ามีค่าเท่ากัน ค่าของสี ADMI ก็จะมีค่าเท่ากันด้วย ซึ่งสถาบันผู้ผลิตสีแห่งสหรัฐอเมริกา (American Dye Manufacturers Institute , ADMI) ได้นำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสีทำให้สีมีหน่วยเป็น ADMI

ADMI ถือเป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี เพื่อตรวจสอบการปนเปื้อนของสีย้อมและเม็ดสีในน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียจากกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอกระดาษ อาหาร พลาสติก และเครื่องสำอาง เนื่องจากกลุ่มอุตสาหกรรมเหล่านี้มีการใช้สีย้อมสังเคราะห์และเม็ดสีจำนวนมาก ซึ่งสีเหล่านี้อาจประกอบไปด้วยสารต่อต้านจุลินทรีย์และสารออกซิไดซ์ นอกจากนี้สีย้อมบางชนิด อาจก่อให้เกิดการระคายเคือง การกลายพันธุ์ และโรคมะเร็งในมนุษย์ได้

คุณลักษณะของสีสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

1. Hue คือ สีที่ตามองเห็นไม่ว่าจะเป็นสีเหลือง แดง น้ำเงิน เขียว หรืออื่นๆ
2. Chroma คือ เฉดสี แบ่งเป็นมืด/สว่างเช่น สีน้ำเงินเป็นสีในเฉดมืด และสีเหลืองเป็นสีที่สว่าง
3. Color Value คือ ปริมาณของสี (amount of color) แบ่งเป็นเข้ม/จาง (dark/light) ถ้ามีปริมาณเนื้อสีมาก ก็จะมีค่าเข้มสีมาก เป็นต้น

การวัดค่าสีในหน่วย ADMI ต่างจาก Platinum-Cobalt

การวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt จะวัดค่าสีเฉพาะหน่วยสีที่เป็นสีเหลือง (yellow) เท่านั้นซึ่งเหมาะสำหรับการวัดค่าสีในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติมักจะมีเฉดเป็นสีเหลืองถึงสีส้ม ในขณะที่การวัดค่าสีในหน่วย ADMI จะตรวจวัดปริมาณของสี (color value) ในทุกหน่วยสี ไม่เน้นที่สีใดสีหนึ่ง โดยการตรวจวัดจะเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน EPA เลขที่ 110.1

ภาคผนวก ค

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 10 % (V/V)

- 1.1 ตวงสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 40 % (m/m) 250 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 1.2 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 1.3 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 4 % (W/V)

- 2.1 ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40 กรัม ใส่บีกเกอร์
- 2.2 ละลายน้ำกลั่นในบีกเกอร์แล้วเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 2.3 ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันให้สารละลายเย็นลง
- 2.4 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 2.5 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 50 % (W/V)

- 3.1 ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 กรัม ใส่บีกเกอร์
- 3.2 ละลายน้ำกลั่นในบีกเกอร์แล้วเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 3.3 ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันให้สารละลายเย็นลง
- 3.4 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 3.5 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์

- 4.1 ตวงสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 96 % (HCl) 82 มิลลิลิตรลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 4.2 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 4.3 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

5. น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

- 5.1 ชั่งสีย้อมผ้า Ambifix Blue VR (Reactive blue 19) 200 มิลลิกรัม ลงในบีกเกอร์
- 5.2 ละลายน้ำกลั่นในบีกเกอร์แล้วเทลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 5.3 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 5.4 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

6. สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) ความเข้มข้น 0.5 % (V/V)

- 6.1 ปิเปตสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น (CH_3COOH) 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 6.2 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 6.3 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

7. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 0.5 % (V/V)

- 7.1 ปิเปตสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65 % (HNO_3) 7 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 7.2 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น
- 7.3 เขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ง 1 การละลายของโคโคซาน

● โคโคซานทางการค้า

โคโคซานทางการค้า			
% DDA	92.88		
ครั้งที่	1	2	3
น้ำหนักกระดาษกรอง (ก่อน)	0.3806 g.	0.3900 g.	0.3882 g.
น้ำหนักกระดาษกรอง (หลัง)	0.3965 g.	0.4056 g.	0.4030 g.
น้ำหนักโคโคซาน (ก่อน)	1 g.	1 g.	1 g.
น้ำหนักโคโคซาน (หลัง)	0.0159 g.	0.0156 g.	0.0148 g.
ค่าเฉลี่ย	0.0154		
% RSD	3.6844		
% การละลาย	98.46		

● โคโคซานจากแกนหมึกครั้งที่ 1

โคโคซานจากแกนหมึก 1			
% DDA	93.63		
ครั้งที่	1	2	3
น้ำหนักกระดาษกรอง (ก่อน)	0.3848 g.	0.3854 g.	0.3899 g.
น้ำหนักกระดาษกรอง (หลัง)	0.4210 g.	0.4226 g.	0.4269 g.
น้ำหนักโคโคซาน (ก่อน)	1 g.	1 g.	1 g.
น้ำหนักโคโคซาน (หลัง)	0.0362 g.	0.0372 g.	0.0370 g.
ค่าเฉลี่ย	0.0368		
% RSD	1.4379		
% การละลาย	96.32		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง 1 การละลายของโคโคซาน (ต่อ)

● โคโคซานจากแกนหมึกครั้งที่ 2

โคโคซานจากแกนหมึก 2			
% DDA	94.04		
ครั้งที่	1	2	3
น้ำหนักกระดาษกรอง (ก่อน)	0.3871 g.	0.3869 g.	0.3829 g.
น้ำหนักกระดาษกรอง (หลัง)	0.5278 g.	0.5272 g.	0.5296 g.
น้ำหนักโคโคซาน (ก่อน)	1 g.	1 g.	1 g.
น้ำหนักโคโคซาน (หลัง)	0.1407 g.	0.1403 g.	0.1467 g.
ค่าเฉลี่ย	0.1426		
% RSD	2.5147		
% การละลาย	85.74		

● โคโคซานจากแกนหมึกครั้งที่ 3

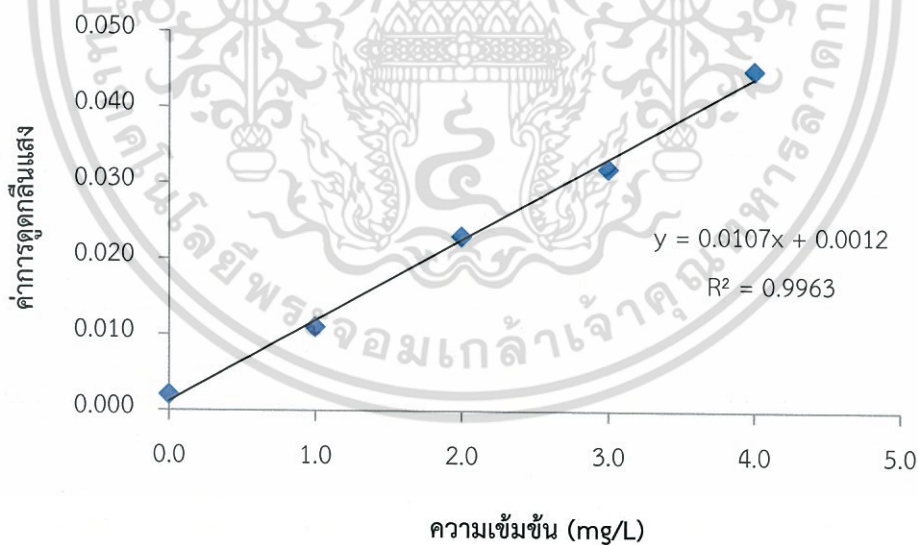
โคโคซานจากแกนหมึก 3			
% DDA	88.63		
ครั้งที่	1	2	3
น้ำหนักกระดาษกรอง (ก่อน)	0.3875 g.	0.3881 g.	0.3948 g.
น้ำหนักกระดาษกรอง (หลัง)	0.9709 g.	0.9026 g.	0.8891 g.
น้ำหนักโคโคซาน (ก่อน)	1 g.	1 g.	1 g.
น้ำหนักโคโคซาน (หลัง)	0.5843 g.	0.5145 g.	0.4943 g.
ค่าเฉลี่ย	0.5307		
% RSD	8.8021		
% การละลาย	46.93		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 การศึกษาขนาดของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

ขนาด (เมช)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
10	1	0.018	1.57	1.76	9.21	99.12
	2	0.021	1.85			
	3	0.021	1.85			
20	1	0.009	0.73	0.67	8.09	99.67
	2	0.008	0.64			
	3	0.008	0.64			
35	1	0.007	0.54	0.51	10.56	99.74
	2	0.007	0.54			
	3	0.006	0.45			

• กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



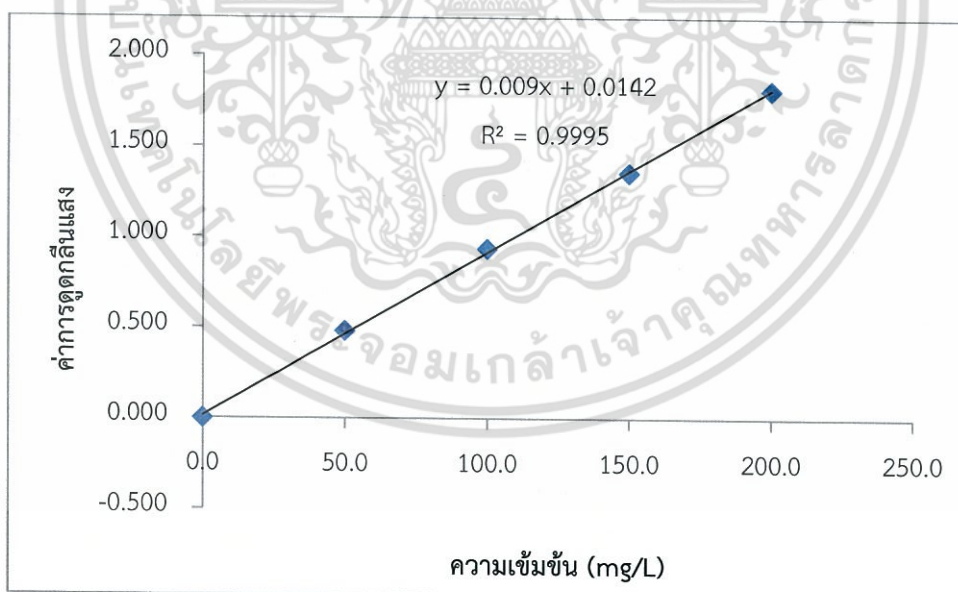
รูปที่ 1 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 การศึกษาขนาดของโคโตซานจากแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

ขนาด (เมช)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
10	1	1.338	147.09	150.72	2.09	24.64
	2	1.388	152.64			
	3	1.386	152.42			
20	1	1.224	134.42	135.72	1.08	32.14
	2	1.250	137.31			
	3	1.233	135.42			
35	1	0.788	85.98	79.87	6.97	60.07
	2	0.690	75.09			
	3	0.721	78.53			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



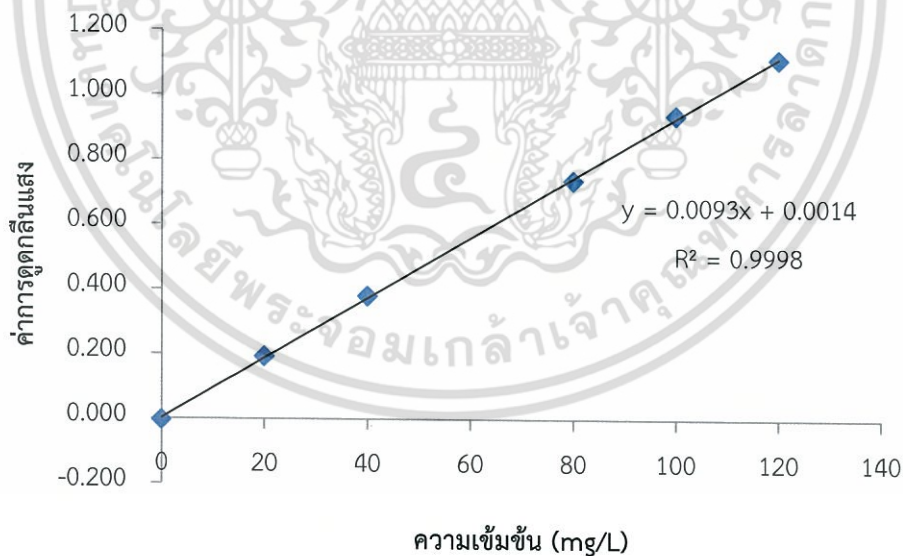
รูปที่ 2 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4 การศึกษาปริมาณของแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

ปริมาณ (เมช)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
0.1	1	1.069	114.80	114.72	0.85	42.64
	2	1.077	115.66			
	3	1.059	113.72			
0.25	1	0.380	40.71	41.32	2.12	79.34
	2	0.382	40.92			
	3	0.395	42.32			
0.5	1	0.019	1.89	1.89	5.68	99.05
	2	0.020	2.00			
	3	0.018	1.78			

- กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



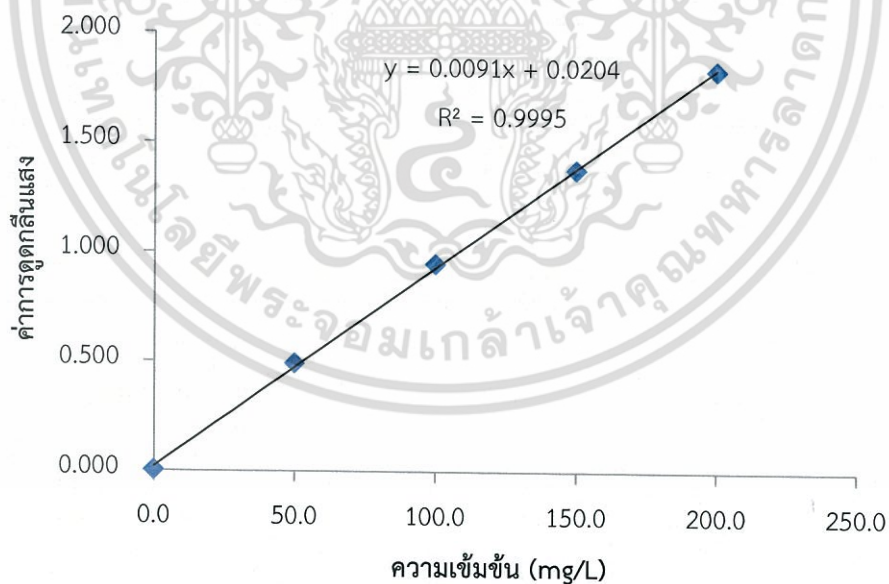
รูปที่ 3 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5 การศึกษาปริมาณของโคโตซานจากแกนหมึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้า

ปริมาณ (กรัม)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
1	1	0.806	86.33	84.28	2.88	57.86
	2	0.793	84.90			
	3	0.763	81.60			
2	1	0.573	60.73	58.60	8.30	70.70
	2	0.585	62.04			
	3	0.503	53.03			
3	1	0.429	44.90	44.35	1.38	77.82
	2	0.418	43.69			
	3	0.425	44.46			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



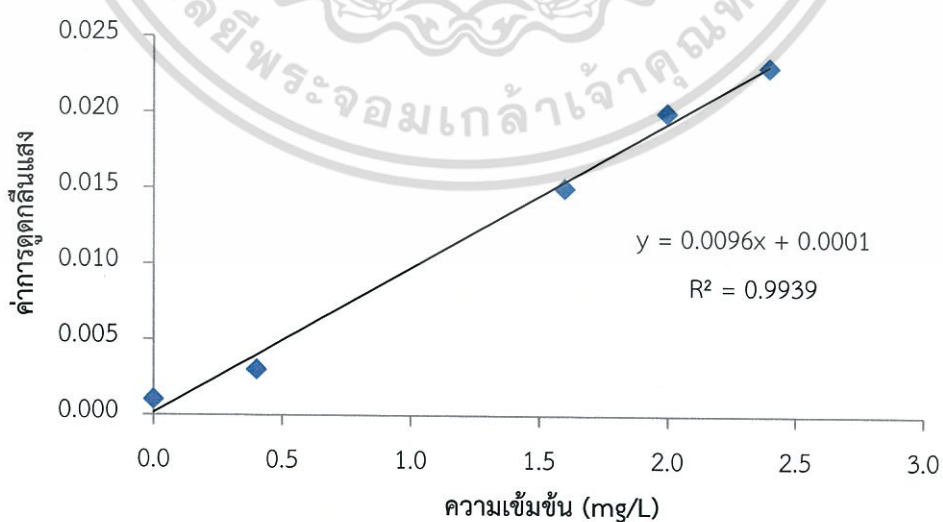
รูปที่ 4 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วย แกนหมึก

พีเอช	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
4	1	0.0140	1.45	1.41	4.62	99.29
	2	0.0140	1.45			
	3	0.0130	1.34			
7	1	0.0100	1.03	1.17	13.60	99.41
	2	0.0130	1.34			
	3	0.0110	1.14			
10	1	0.0120	1.24	1.20	4.99	99.40
	2	0.0110	1.14			
	3	0.0120	1.24			
เริ่มต้น	1	0.0140	1.45	1.24	16.81	99.38
	2	0.0100	1.03			
	3	0.0120	1.24			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



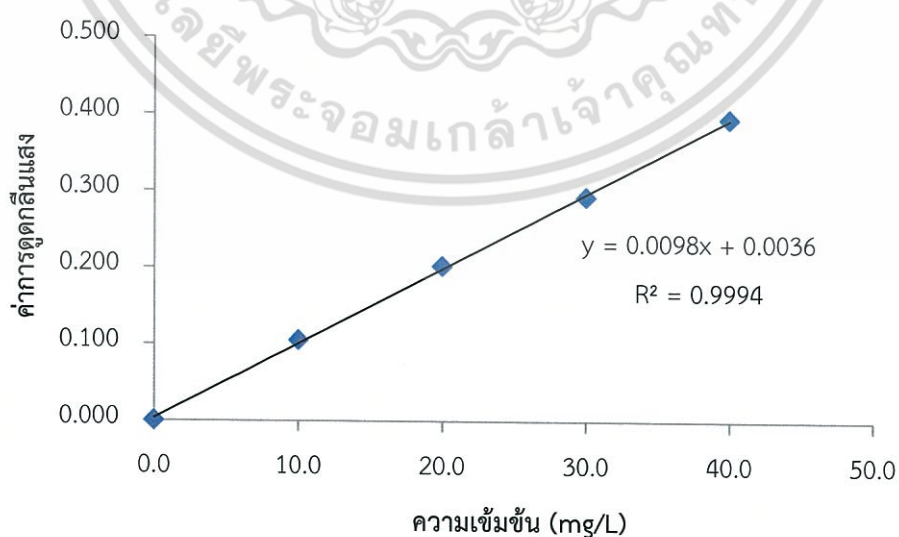
รูปที่ 5 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7 ผลการศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วย ไคโตซานจากแกนหมึก

พีเอช	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
7	1	0.322	32.49	32.05	1.63	83.98
	2	0.319	32.18			
	3	0.312	31.47			
9	1	0.364	36.78	34.70	5.23	82.65
	2	0.336	33.92			
	3	0.331	33.41			
11	1	0.062	5.96	5.79	3.67	97.11
	2	0.058	5.55			
	3	0.061	5.86			
เริ่มต้น	1	0.367	37.08	34.94	5.33	82.53
	2	0.334	33.71			
	3	0.337	34.02			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



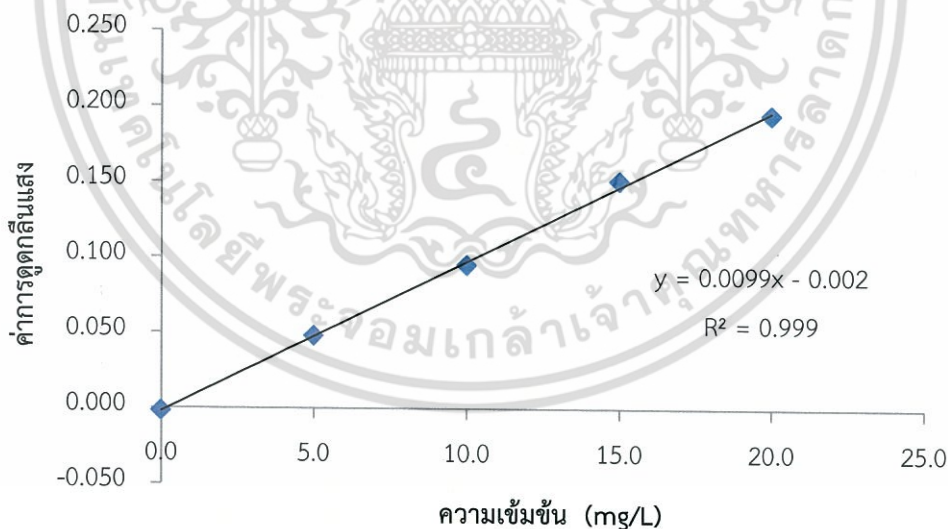
รูปที่ 6 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก

เวลา (นาที)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
5	1	0.051	5.35	5.32	1.10	97.34
	2	0.051	5.35			
	3	0.050	5.25			
15	1	0.015	1.72	1.72	0.00	99.14
	2	0.015	1.72			
	3	0.015	1.72			
30	1	0.007	0.91	1.04	11.17	99.48
	2	0.009	1.11			
	3	0.009	1.11			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



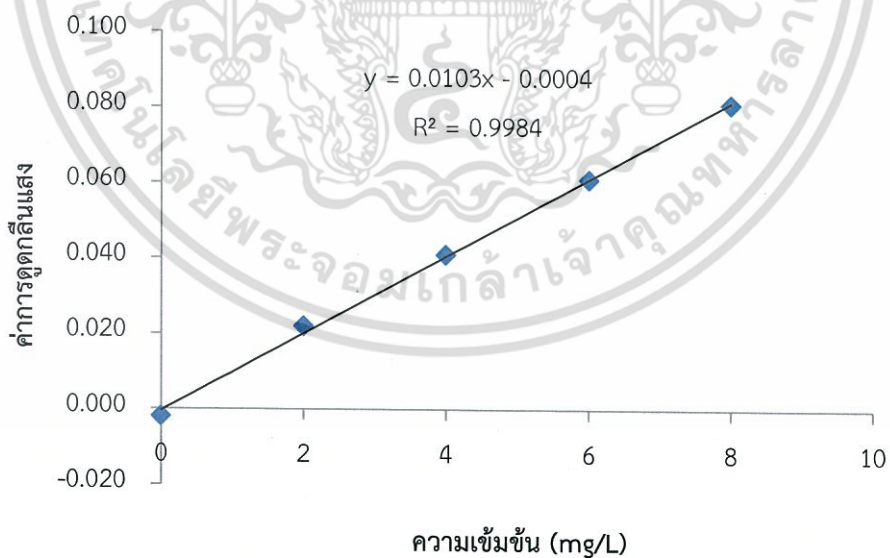
รูปที่ 7 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ผลการศึกษาเวลาในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

เวลา (นาท)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
30	1	0.056	5.48	5.51	6.91	97.25
	2	0.060	5.86			
	3	0.053	5.18			
60	1	0.025	2.47	2.53	7.99	98.73
	2	0.028	2.76			
	3	0.024	2.37			
90	1	0.018	1.79	1.88	5.15	99.06
	2	0.020	1.98			
	3	0.019	1.88			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



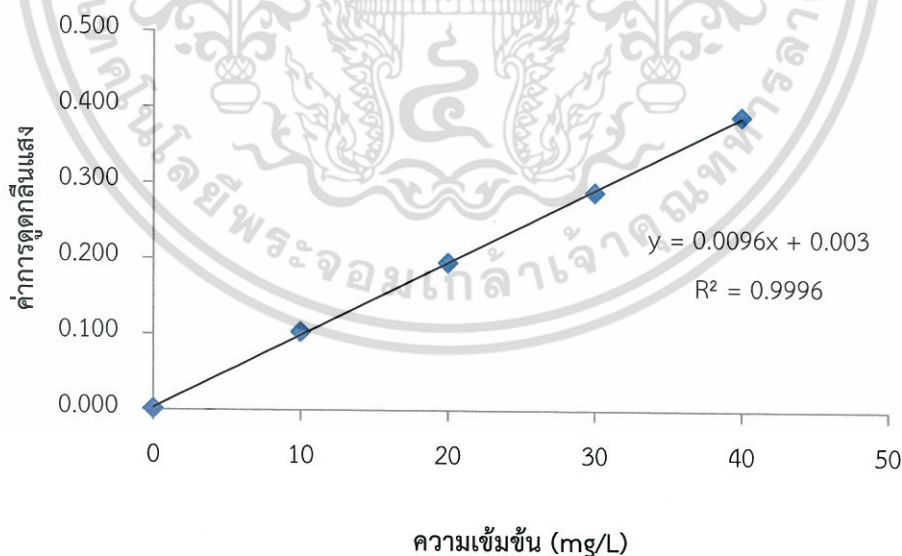
รูปที่ 8 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก

ความเร็ว (rpm)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
100	1	0.169	17.29	17.22	0.70	91.39
	2	0.167	17.08			
	3	0.169	17.29			
150	1	0.012	0.94	1.04	10.00	99.48
	2	0.013	1.04			
	3	0.014	1.15			
200	1	0.010	0.73	0.80	7.53	99.60
	2	0.011	0.83			
	3	0.011	0.83			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



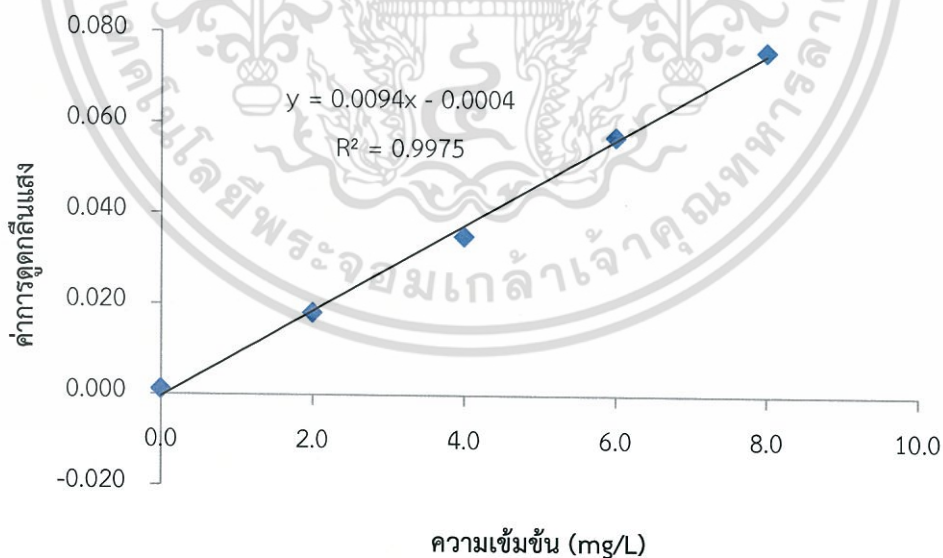
รูปที่ 9 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง 11 ผลการศึกษาความเร็วรอบในการเขย่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมผ้าด้วย ไคโตซานจากแกนหมึก

ความเร็ว (rpm)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
150	1	0.042	4.51	4.30	4.29	97.85
	2	0.039	4.19			
	3	0.039	4.19			
200	1	0.035	3.77	3.91	3.14	98.05
	2	0.037	3.98			
	3	0.037	3.38			
250	1	0.034	3.66	3.62	4.48	98.19
	2	0.032	3.45			
	3	0.035	3.77			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



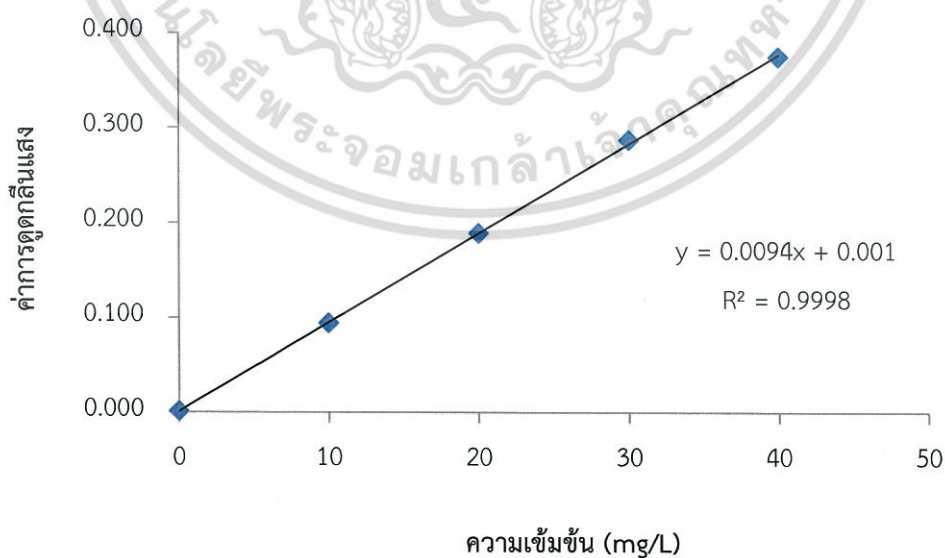
รูปที่ ง 10 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของดูดซับสีย้อมผ้าด้วยแกนหมึก

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
100	1	0.003	0.021	0.25	24.74	99.88
	2	0.003	0.021			
	3	0.004	0.032			
200	1	0.007	0.64	0.71	8.66	99.65
	2	0.008	0.74			
	3	0.008	0.74			
300	1	0.058	6.06	6.17	2.99	96.91
	2	0.061	6.38			
	3	0.058	6.06			
400	1	0.364	38.62	37.80	2.68	81.10
	2	0.359	38.09			
	3	0.346	36.70			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



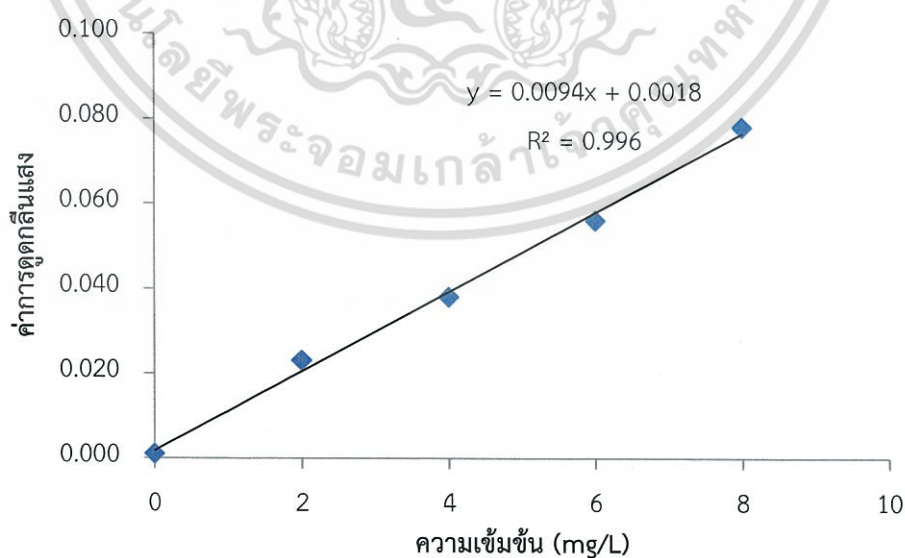
รูปที่ 11 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของดูดซับสีย้อมผ้าด้วยไคโตซานจากแกนหมึก

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ผลการทดลอง		ค่าเฉลี่ย	%RSD	%ประสิทธิภาพ
		ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)			
100	1	0.018	1.72	1.79	6.85	99.10
	2	0.018	1.72			
	3	0.020	1.94			
200	1	0.039	3.96	4.03	1.52	97.99
	2	0.040	4.06			
	3	0.040	4.06			
300	1	0.059	6.09	6.23	2.61	96.89
	2	0.062	6.40			
	3	0.060	6.19			
400	1	0.068	7.04	7.04	3.02	96.48
	2	0.070	7.26			
	3	0.066	6.83			

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



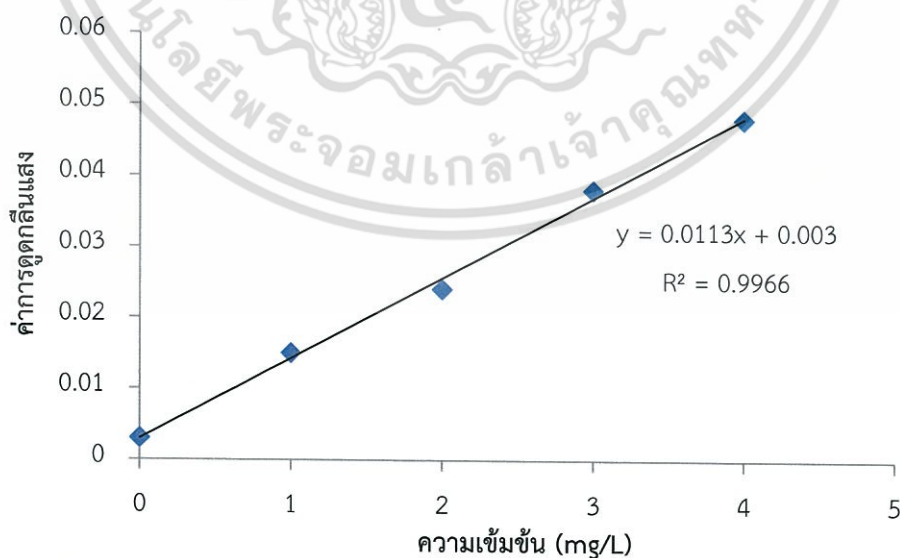
รูปที่ 12 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาความสามารถในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (การคายซับ)

แกนหมัก					
สารละลาย	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%RSD
น้ำกลั่น	1	0.003	0.00	0.00	0.00
	2	0.002	0.00		
	3	0.003	0.00		
ไคโตซานจากแกนหมัก					
สารละลาย	ครั้งที่	ค่าการดูดกลืนแสง	ความเข้มข้น (mg/L)	ค่าเฉลี่ย	%RSD
น้ำกลั่น	1	0.003	0.00	0.00	0.00
	2	0.002	0.00		
	3	0.003	0.00		
NaOH	1	0.013	0.88	0.86	5.77
	2	0.012	0.80		
	3	0.013	0.88		

● กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19



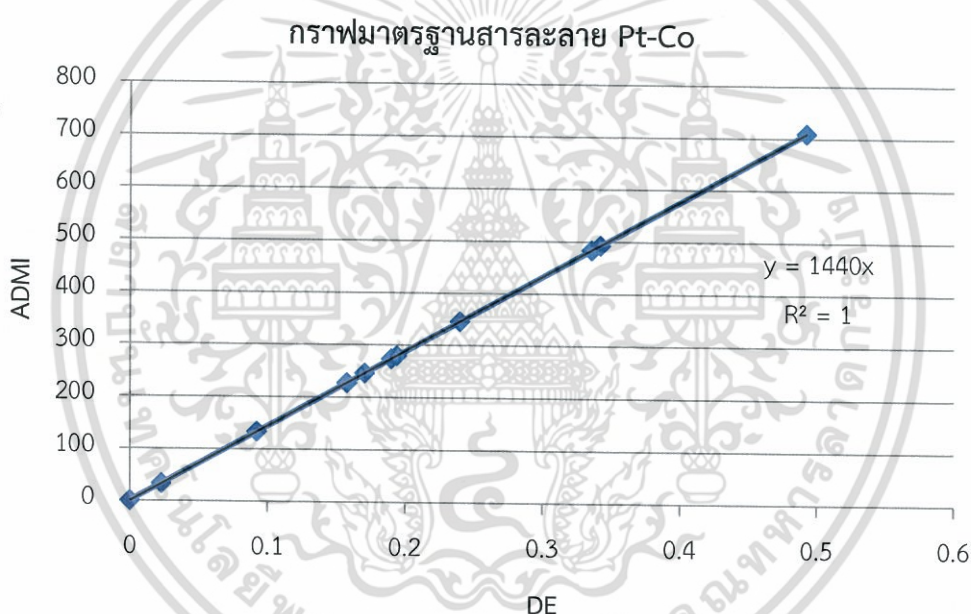
รูปที่ 13 กราฟมาตรฐานสารละลายสีย้อมผ้า Reactive Blue 19 ครั้งที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 15 ผลการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นสีย้อมในหน่วย American Dye Manufacturers Institute (ADMI)

สถานะของน้ำเสียสังเคราะห์	DE	ADMI
ก่อนดูดซับ (เจือจาง 100 เท่า)	0.0415	59.7988
ก่อนดูดซับ	4.1500	5976.00
หลังดูดซับด้วยแกนหมัก	0.0040	5.7600
หลังดูดซับด้วยไคโตซานจากแกนหมัก	0.0798	114.9409

● กราฟมาตรฐานสารละลาย Platinum-Cobalt



รูปที่ 14 กราฟมาตรฐานสารละลาย Platinum-Cobalt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
สูตรการคำนวณ

สูตร จ 1 การเตรียมสารเคมี

- การเตรียมสารละลาย

$$\frac{M \times mw \times 100}{\% \times D}$$

เมื่อ M = ความเข้มข้นสารละลายที่ต้องการเตรียม
mw = มวลโมเลกุลของสารละลาย
% = % ความเข้มข้นของสารละลาย
D = ความหนาแน่นของสารละลาย

- การเจือจางสารละลาย

$$C_1 V_1 = C_2 V_2$$

เมื่อ C₁ = ความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น
V₁ = ปริมาตรของสารละลายเริ่มต้น
C₂ = ความเข้มข้นสารละลายที่ต้องการเจือจาง
V₂ = ปริมาตรของสารละลายที่ต้องการเจือจาง

สูตร จ 2 การควบคุมคุณภาพ

- ค่าเฉลี่ย

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

เมื่อ \bar{x} = ค่าเฉลี่ย
 $\sum x_i$ = ผลรวมของผลการทดลองทุกซ้ำ
n = จำนวนซ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

เมื่อ SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 x_i = ผลการทดลองของแต่ละจำนวนซ้ำ
 \bar{x} = ค่าเฉลี่ย
 n = จำนวนซ้ำ

- ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์

$$\%RSD = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100$$

เมื่อ %RS = ร้อยละส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์
 SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
 \bar{x} = ค่าเฉลี่ย

สูตร จ 3 การคำนวณผลการทดลอง

- ร้อยละการกำจัดโปรตีน

$$\% \text{การกำจัดโปรตีน} = \frac{(\text{น้ำหนักแกมหมึกเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแกมหมึกหลังกำจัดโปรตีน})}{\text{น้ำหนักแกมหมึกเริ่มต้น}} \times 100$$

- ร้อยละการกำจัดแร่ธาตุ

$$\% \text{การกำจัดแร่ธาตุ} = \frac{(\text{น้ำหนักแกมหมึกเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแกมหมึกหลังกำจัดแร่ธาตุ})}{\text{น้ำหนักแกมหมึกเริ่มต้น}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ร้อยละผลผลิตไคติน

$$\%ผลผลิตไคติน = \frac{(\text{น้ำหนักแกนหมึกเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแกนหมึกหลังกำจัดแร่ธาตุ})}{\text{น้ำหนักแกนหมึกเริ่มต้น}} \times 100$$

- ร้อยละผลผลิตไคโตซาน

$$\%ผลผลิตไคโตซาน = \frac{(\text{น้ำหนักแกนหมึกเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักแกนหมึกหลังกำจัดหมู่อะซิทิล})}{\text{น้ำหนักแกนหมึกเริ่มต้น}} \times 100$$

- ร้อยละการละลายของไคโตซาน

$$\%การละลาย = \frac{(\text{น้ำหนักไคโตซานเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักไคโตซานหลังการละลาย})}{\text{น้ำหนักไคโตซานเริ่มต้น}} \times 100$$

- ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (%DDA)

$$\%DDA = 96.67 - \left[26.486 \times \frac{A_{1655}}{A_{3450}} \right]$$

เมื่อ A_{1655} = พื้นที่ใต้พีคที่เลขคลื่น 1655 นาโนเมตร

A_{3450} = พื้นที่ใต้พีคที่เลขคลื่น 3450 นาโนเมตร

- ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม

$$\%ประสิทธิภาพการกำจัดสีข้อม = \frac{(\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น} - \text{ความเข้มข้นที่เหลือ})}{\text{ความเข้มข้นเริ่มต้น}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

มาตรฐานคุณภาพน้ำ

ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม

โดยที่เป็นการสมควรปรับปรุงการกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น อาศัยอำนาจตามความในมาตรา 55 แห่งพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม โดยคำแนะนำของคณะกรรมการควบคุมมลพิษ และโดยความเห็นชอบของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ จึงออกประกาศไว้ ดังต่อไปนี้

ข้อ 1 ให้ยกเลิกประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2539

ข้อ 2 ให้ประกาศคณะกรรมการควบคุมมลพิษ เรื่อง กำหนดประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่อนุญาตให้ระบายน้ำทิ้งให้มีค่ามาตรฐานแตกต่างจากค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ใน ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2539 ยังคงมีผลใช้บังคับต่อไปจนกว่าจะมีการออกประกาศกำหนดมาตรฐาน ควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม เฉพาะประเภทฉบับใหม่

ข้อ 3 ในประกาศนี้ “โรงงานอุตสาหกรรม” หมายความว่า โรงงาน ตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน “นิคมอุตสาหกรรม” หมายความว่า นิคมอุตสาหกรรม ตามกฎหมายว่าด้วยการนิคมอุตสาหกรรม “เขตประกอบการอุตสาหกรรม” หมายความว่า เขตประกอบการอุตสาหกรรม ตามกฎหมาย ว่าด้วยโรงงาน หรือพื้นที่จัดสรรเพื่อการอุตสาหกรรมที่มีการจัดการระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือออกสู่สิ่งแวดล้อมร่วมกัน “น้ำทิ้ง” หมายความว่า น้ำที่เกิดจากการประกอบกิจการ น้ำจากการใช้น้ำของคนงาน หรือน้ำจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม หรือเขตประกอบการอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่ แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 4 กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรมไว้ ดังต่อไปนี้

- 4.1 ความเป็นกรดและด่าง pH ตั้งแต่ 5.5 ถึง 6.0 หน้า 18 เล่ม 133ตอนพิเศษ 129 ง ราชกิจจานุเบกษา 6 มิถุนายน 2559
- 4.2 อุณหภูมิ (Temperature) ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
- 4.3 สี (Color) ไม่เกิน 300 เอดีเอ็มไอ
- 4.4 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids หรือ TDS) มีค่าดังนี้
 - 4.4.1 กรณีระบายลงแหล่งน้ำ ต้องไม่เกิน 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.4.2 กรณีระบายลงแหล่งน้ำที่มีค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดเกินกว่า 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จะระบายได้ ต้องมีค่าเกินกว่าค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำนั้น ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.5 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids) ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.6 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 20 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.7 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.8 ซัลไฟด์ (Sulfide) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.9 ไฮยาไนต์ (Cyanides HCN) ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.10 น้ำมันและไขมัน (Fat Oil and Grease) ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.11 ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.12 สารประกอบฟีนอล (Phenols) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.13 คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.14 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ (Pesticide) ต้องตรวจไม่พบ
- 4.15 ทีเคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16 โลหะหนัก มีค่าดังนี้
 - 4.16.1 สังกะสี (Zn) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.16.2 โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium) ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.16.3 โครเมียมไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium) ไม่เกิน 0.78 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.16.4 สารหนู (As) ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.16.5 ทองแดง (Cu) ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - 4.16.6ปรอท (Hg) ไม่เกิน 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.16.7 แคดเมียม (Cd) ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16.8 แบเรียม (Ba) ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16.9 ซีลีเนียม (Se) ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16.10 ตะกั่ว (Pb) ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16.11 นิกเกิล (Ni) ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.16.12 แมงกานีส (Mn) ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 5 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และ เขตประกอบการอุตสาหกรรม ตามข้อ 4 ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

- 5.1 ความเป็นกรดและด่าง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ pH Meter ที่มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 0.1 หน่วย
- 5.2 อุณหภูมิ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง
- 5.3 สี ให้ใช้วิธีเอตีเอ็มไอ ADMI Method
- 5.4 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด ให้ใช้วิธีระเหยตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disk) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- 5.5 ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disk) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
- 5.6 บีโอดีให้ใช้วิธีบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วันติดต่อกัน และหาค่าออกซิเจนละลายด้วยวิธีไฮโดรไมดิฟิเคชัน (Azide Modification) หรือวิธีเมมเบรนอิเล็กโทรด (Membrane Electrode)
- 5.7 ซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลายโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate)
- 5.8 ซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method) หรือวิธีเมทิลีนบลู (Methylene Blue Method)
- 5.9 ไชยาไนต์ ให้ใช้การกลั่น (Distillation) และตรวจวัดด้วยวิธีเทียบสี (Colorimetric Method) หรือวิธี Flow Injection Analysis
- 5.10 น้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยเทคนิค Liquid - Liquid Extraction หรือ Soxhlet Extraction ด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
- 5.11 ฟอर्मัลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Colorimetric Method)
- 5.12 สารประกอบฟีนอล ให้ใช้การกลั่น (Distillation) และตรวจวัดด้วยวิธีเทียบสี (Colorimetric Method)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.13 คลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไตเตรท (Titrimetric Method) หรือวิธีเทียบสี (Colorimetric Method)

5.14 สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟิก (Gas Chromatographic Method)

5.15 ทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)

5.16 โลหะหนัก

5.16.1 สังกะสี ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิกเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (Acid digestion) และวัดหาปริมาณโลหะด้วยวิธีอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry : AAS) หรือวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma)

5.16.2 โครเมียม

(ก) โครเมียมทั้งหมด ให้ใช้วิธีย่อยสลายตัวอย่างด้วยกรด (Acid digestion) และวัดหาปริมาณโลหะด้วยวิธีอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry: AAS) หรือ วิธีอินดักทีฟลีคัพเพิลพลาสมา (Inductively Coupled Plasma)

(ข) โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Colorimetric Method) หรือวิธีสกัดและตรวจวัดด้วยวิธีอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (Atomic Absorption Spectrometry: AAS) หรือ วิธีสกัดและตรวจวัดด้วยวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma)

(ค) โครเมียมไตรวาเลนต์ ให้ใช้วิธีคำนวณจากค่าส่วนต่างของโครเมียม ทั้งหมดกับโครเมียมเฮกซะวาเลนต์

5.16.3 สารหนูและซีลีเนียมใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮโดรด์ เจนเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma)

5.16.4 ปรอท ให้ใช้วิธีโคลด์เวเปอร์อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโตรเมตรี (Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry) หรือวิธีโคลด์เวเปอร์อะตอมมิคฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโตรเมตรี (Cold Vapor Atomic Fluorescence Spectrometry) หรือวิธีอินดักทีฟลีคัพเพิล พลาสมา (Inductively Coupled Plasma)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 6 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ตามข้อ 5 ให้เป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียของสมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนด หรือตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษประกาศในราชกิจจานุเบกษา

ข้อ 7 การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งเพื่อการตรวจสอบมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ตามข้อ 4 ให้เป็นดังต่อไปนี้

7.1 จุดเก็บตัวอย่าง ให้เก็บในจุดระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อมหรือจุดอื่นที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรม และเขตประกอบการอุตสาหกรรม ในกรณีที่มีการระบายทิ้งหลายจุดให้เก็บทุกจุด

7.2 วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้ง ณ จุดเก็บตัวอย่างตาม 7.2 ให้เก็บแบบจ้วง (Grab Sample)

ข้อ 8 ประกาศนี้มิใช่บังคับกับแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีการกำหนดมาตรฐานควบคุม การระบายน้ำทิ้งตามกฎหมายว่าด้วยการส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติไว้เป็นการเฉพาะ

ข้อ 9 ประกาศนี้ให้ใช้บังคับเมื่อพ้นกำหนดหนึ่งปีนับจากแต่วันประกาศในราชกิจจานุเบกษา เป็นต้นไป ประกาศ ณ วันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2559 พลเอก สุรศักดิ์ กาญจนรัตน์ รัฐมนตรีว่าการกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

