

การดูดซับสีรีแอกทีฟโดยใช้คอมพอสิตโคโตนาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REACTIVE DYE ADSORPTION USING CHITOSAN-POLYVINYL ALCOHOL COMPOSITES



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับสีรีแอกทีฟโดยใช้คอมพอสิตโคโตนาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
โดย	น.ส.วิสาข์ ไทรสุวรรณ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปตี)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ใหญ่ชีระนันท์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ ปัตร์ประกร)	

วิชาซ์ ไทรสุวรรณ : การดูดซับสีรีแอคทีฟโดยใช้คอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิล
แอลกอฮอล์. (REACTIVE DYE ADSORPTION USING CHITOSAN-POLYVINYL
ALCOHOL COMPOSITES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสังเคราะห์คอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิล
แอลกอฮอล์ (CS:PVA) โดยใช้สารเชื่อมขวาง เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) และกรดออกซาลิก
(OA) และการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนโดยใช้สาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) ใน
การกำจัดสีแอคทีฟเรด 120 ในน้ำ โดยตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิตด้วยเทคนิคฟลูออริเมตริ
ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ปรากฏการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต
เมื่อมีการเติมสารเชื่อมขวาง และเมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถ
รวมเข้ากันได้ดี และสัดส่วนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์พบว่า ผลของการดูดซับที่
สัดส่วนระหว่างไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บนคอมพอสิตและการเติมสารเชื่อมขวางส่งผล
ต่อการดูดซับโดยรวมและการกำจัดจะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการบวมตัวของคอมพอสิต การบวมตัวสูง
ทำให้เวลาในการเข้าสู่สมดุลได้เร็ว และประจุบนพื้นผิวเป็นศูนย์ของคอมพอสิต (PZC) พบว่าการ
กำจัดสีจะขึ้นอยู่กับประจุที่ผิวคอมพอสิตและประจุของสี สำหรับผลการศึกษาดังกล่าว พบว่า
คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS_0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีแอคทีฟเรด 120
เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิตที่ 0.5 กรัม และที่
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 120 นาที และมีร้อยละการ
กำจัดสี 100.0 เมื่อเวลาผ่านไป 480 นาที การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีสามารถกำจัดสีได้อย่าง
สมบูรณ์ และสามารถลดเวลาในการเข้าสู่สมดุลได้ที่ภาวะเป็นกลาง นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณคอม
พอสิตเป็นการเพิ่มพื้นผิวสัมผัสในการดูดซับ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่อุณหภูมิปกติ

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6172064823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Adsorption, Chitosan-polyvinyl alcohol composite, Reactive red 120
Wisa Saisuwan : REACTIVE DYE ADSORPTION USING CHITOSAN-POLYVINYL
ALCOHOL COMPOSITES. Advisor: Prof. NATTAYA PONGSTABODEE, Ph.D.

The objective of this research was to study the synthesis of chitosan-polyvinyl alcohol composites by using tetraethyl Orthosilicate (TEOS) and oxalic acid (OA) crosslink agents and 3-aminopropyl triethoxysilane (APTES) using grafting to reactive red 120 (RR 120) removal in water. The composites were characterized by mean of fourier transform infrared spectrometer (FTIR) appear functional group on composite has changed when adding the crosslinking agent. Morphology using scanning electron microscopy (SEM), chitosan and polyvinyl alcohol can combine well. The results of dye removal at ratio chitosan and polyvinyl alcohol in composite and ratio of crosslink agent affects the adsorption by depending on swelling behavior, the high swelling make fast equilibrium time. Point of zero charge (PZC) confirmed dye removal depends on surface charge of composite and dye charge. Factor affecting adsorption, 3CS:7PVA_1.5TEOS_0.5OA_0.1APTES composites, An initial concentration of RR 120 at 100 mg/L pH 7, the amount composite 0.5 g and 30 °C. The equilibrium at 120 min and dye removal 100.0% at 480 min, increase initial concentration RR 120 can be dye removal complete and fast equilibrium adsorption at medium conditions. In addition, an increase amount of composite is increasing the adsorption contact surface, and effective dye removal at normal temperatures

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิฎชีระนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรัตน์ ปัตร์ประกร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ “ทุนภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” ที่สนับสนุนทุนวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่คอยในความช่วยเหลือตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ และเป็นกำลังใจเสมอมา อีกทั้งยังสนับสนุนในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา



วิสาข์ ไทรสุวรรณ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสี.....	4
2.2 สีย้อม (Dyes).....	4
2.2.1 โครงสร้างของสีย้อม.....	5
2.2.2 ประเภทของสีย้อม.....	5
2.3 เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำ.....	7
2.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical Technology).....	7
2.3.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology).....	8

2.3.3 เทคโนโลยีชีวภาพ (Biological Technology)	9
2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process).....	10
2.4.1 กลไกการดูดซับ	12
2.4.2 วัสดุดูดซับ (Adsorbent).....	12
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	13
2.5 ไคโตซาน	15
2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน	16
2.5.2 การใช้ประโยชน์ไคโตซาน.....	17
2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	19
2.6.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	19
2.6.2 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	20
2.7 เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS).....	20
2.8 กรดออกซาลิก (Oxalic Acid, OA).....	21
2.9 การเชื่อมขวาง (Crosslink Agent).....	22
2.9.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical Crosslinking)	22
2.9.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical Crosslinking).....	24
2.10 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Isotherm Adsorption).....	25
2.10.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์	26
2.10.2 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช	27
2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption)	28
2.11.1 อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order)	28
2.11.2 อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order).....	29
2.12 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Thermodynamics).....	30
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	36
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.3 วิธีการเตรียมตัวคอมพอสิต	37
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโคโตะซาน	37
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	37
3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมคอมพอสิตโคโตะซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์	38
3.3.4 การเตรียมสารละลายสีรีแอคทีฟเรด 120	39
3.4 การทดลอง	39
3.4.1 การทดสอบการดูดซับ	39
3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคอมพอสิต	41
3.5.1 การบวมตัว	41
3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)	41
3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscopy, SEM)	41
3.5.4 การวิเคราะห์ผลรวมของประจุบนพื้นผิวคอมพอสิตเท่ากับศูนย์ (Point of Zero Charge, PZC)	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	43
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคอมพอสิต	44
4.1.1 การบวมตัว	44
4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต	48
4.1.3 ลักษณะสัณฐานของคอมพอสิต	55
4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120	60
4.2.1 สัดส่วนโคโตะซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	60

4.2.2 ปริมาณของสารเชื่อมขวาง	62
4.2.3 ผลของการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน.....	63
4.2.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและเวลาการดูดซับสรีแอกทีฟเรด 120	65
4.2.5 ผลของความเป็นกรด-ด่างของสีย้อม	67
4.2.6 ผลของปริมาณคอมพอสิต	69
4.2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสรีแอกทีฟเรด 120.....	71
4.2.8 ผลของการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม.....	78
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปตัดโพรงหรือช่องว่างภายในของถ่านกัมมันต์.....	8
รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ.....	12
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน.....	16
รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต.....	19
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต.....	21
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของกรดออกซาลิก.....	21
รูปที่ 2.7 ลักษณะการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด.....	22
รูปที่ 2.8 การเกิดสารเชื่อมขวางโดยการเติมพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์และไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}).....	23
รูปที่ 2.9 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล.....	23
รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์ตัวดูดซับระหว่างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่ความเป็นกรดต่ำ.....	24
รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA.....	24
รูปที่ 2.12 การกราฟต์มอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์.....	25
รูปที่ 4.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลหลังจากการผสมกับระหว่างไคโตซานกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	43
รูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต.....	49
รูปที่ 4.3 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก.....	51
รูปที่ 4.4 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกที่สัดส่วนต่าง ๆ.....	53

รูปที่ 4.5 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 ที่สารเชื่อมขวางด้วยเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก 1.5:0.5 และด้วย APTES ที่ปริมาณต่าง ๆ 54

รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวคอมพอสิตโดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ ก) คอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS ค) คอมพอสิต 5CS:5PVA_TEOS ง) คอมพอสิต 7CS:3PVA_TEOS และ จ) คอมพอสิต 9CS:1PVA_TEOS 56

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวคอมพอสิตที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.0TEOS:1.0OA ค) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ ง) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES 58

รูปที่ 4.8 แสดงผลรวมของประจุที่ผิวเท่ากับศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ ของคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES 59

รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 61

รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยใช้สัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิกเท่ากับ 1.5:0.5 1.0:1.0 และ 0.5:1.5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 63

รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES ปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน 0.05 0.1 0.3 และ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 64

รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 ต่าง ๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง 66

รูปที่ 4.13 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 3 5 7 และ 9 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 68

รูปที่ 4.14 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 3 ปริมาณคอมพอสิต 0.1 0.5 และ 0.9 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 70

รูปที่ 4.15 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที 72

รูปที่ 4.16 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 (RR 120) และ สีเมทิลีนบลู (MB) ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที..... 74

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี.....	11
ตารางที่ 3.1 แสดงการชื่อเรียกของคอมพอลิเมอร์ต่าง ๆ และสัญลักษณ์.....	38
ตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต.....	45
ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก.....	46
ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สัดส่วนของสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกต่าง ๆ.....	47
ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES ที่ปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนต่าง ๆ.....	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การเพิ่มสีลงในผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสวยงามให้กับสินค้าและเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าในการเลือกซื้อสินค้า ผู้ผลิตจึงมักต้องเพิ่มขั้นตอนการเติมสีหรือการปรับแต่งสีแก่ตัวสินค้า ในขั้นตอนการเติมสีมักถูกจัดเป็นขั้นตอนหนึ่งในการผลิต สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด เช่น สีรีแอคทีฟ (Reactive Dye) สีเอซิด (Acid Dye) สีเบสิก (Basic Dye) สีไตรงิรท์ (Direct Dye) สีแว้ต (Vat Dye) สีดีสเพอร์ส (Disperse Dye) เป็นต้น สีย้อมที่ใช้มักเป็นเม็ดสีซึ่งต้องใช้ตัวทำละลายเพื่อให้อยู่ในรูปสารแขวนลอย แต่ในบางอุตสาหกรรมจะใส่เม็ดสีเข้าไปในขั้นตอนการผลิตผลิตภัณฑ์โดยตรง อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะใช้ในรูปสารแขวนลอยหรือการใส่เม็ดสีเข้าไปโดยตรง เม็ดสีต่าง ๆ เหล่านี้ก็มีโอกาสที่จะปนเปื้อนต่อน้ำในกระบวนการผลิตหรือปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม ถ้าปล่อยน้ำที่ปนเปื้อนสีสู่ธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัดก่อนจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของมนุษย์ [1, 2] จึงจำเป็นต้องมีการกำจัดสีย้อมเหล่านี้ซึ่งมีหลากหลายวิธี

การบำบัดน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนสีย้อมมีหลายเทคนิค เช่น การตกตะกอนทางเคมีเป็นระบบที่ใช้สารเคมีในการบำบัดจำนวนมาก ข้อเสียของระบบนี้คือหลังจากการบำบัดแล้วทำให้เกิดกากตะกอนที่ต้องกำจัดในปริมาณที่มาก เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนมีราคาของตัวแลกเปลี่ยนไอออนค่อนข้างสูง ทำให้มีต้นทุนสูง ส่วนการดูดซับเป็นวิธีที่มีค่าต้นทุนต่ำ เป็นกระบวนการไม่ซับซ้อนแต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดที่สูง ตัวดูดซับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเฉพาะค่อนข้างมากและมีรูพรุนมาก แต่มีข้อจำกัดคืออาจมีราคาแพงและไม่คุ้มค่ากับการนำกลับมาใช้ใหม่ [3, 4] จึงได้มีการพัฒนาตัวดูดซับที่มีราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสูง ในที่นี้เลือกใช้ไคโตซานเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ให้เป็นตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ธรรมชาติ ไม่มีความเป็นพิษ สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจางและมีลักษณะเหนียวใส อีกทั้งมีประจุเป็นประจุบวก แต่ไคโตซานเองก็มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการดูดซับต้องมีสภาพแวดล้อมที่เฉพาะเจาะจง [5] และตัวไคโตซานเองมีความบวมน้ำสูงซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับลดลง

ในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะกับการใช้งานด้านการดูดซับสีรีแอคทีฟ โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับให้อยู่ในรูปคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เพื่อให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอคทีฟ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์คอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
- 1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟบนตัวดูดซับคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาค้นคว้า สืบค้นข้อมูล และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.2 วางแผนงานวิจัย เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์การทดลอง
- 1.3.3 สังเคราะห์คอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่สัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ
- 1.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟ
 - อัตราส่วนน้ำหนักของโคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 1:9 3:7 5:5 7:3 และ 9:1
 - อัตราส่วนน้ำหนักของสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อการดออกซาลิก 2.0:0.0 1.5:0.5 1.0:1.0 0.5:1.5 และ 0.0:2.0
 - ปริมาณหมู่ฟังก์ชันเอมีน 0.05-0.5 กรัม
 - ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 50-1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
 - ปริมาณของคอมพอสิต 0.1-0.9 กรัม
 - ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อม 3-9
 - เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 0-480 นาที
 - อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส
- 1.3.5 วิเคราะห์ความสามารถในการกำจัดสีรีแอกทีฟได้จากช่วงค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer ช่วงความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร
- 1.3.6 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิค
 - ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย Scanning Electron Microscopy
 - วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวตัวดูดซับด้วย FTIR Spectroscopy
 - วิเคราะห์ผลรวมของประจุบนพื้นผิวของคอมพอสิตเป็นศูนย์ (Point of Zero Charge)
 - การบวมตัว
- 1.3.7 วิเคราะห์ วิจัยและสรุปผลการทดลองพร้อมเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้คอมพิวเตอร์โคโตซาน-พอลิไวเนลแอลกอฮอล์ที่มีความสามารถในการเลือกดูดซับสีรีแอกทีฟ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปัญหาน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสี

น้ำเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตทั้งมนุษย์ สัตว์และพืช โดยเฉพาะมนุษย์ที่ได้มีการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ในหลายรูปแบบ เช่น การอุปโภค บริโภค การเกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ปริมาณการใช้น้ำเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรจนทำให้เกิดปัญหามลพิษต่าง ๆ และเริ่มทวีความรุนแรงมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยน้ำจากกระบวนการต่าง ๆ ที่มีการปนเปื้อนมากมายซึ่งแสดงในรูป ค่าบีโอดี (Biochemical oxygen demand; BOD) ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand; COD) ความเป็นกรด-ด่าง สารแขวนลอย กลิ่น และ สี เป็นต้น [6] สียอมเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำเป็นอย่างมากเนื่องจากในน้ำเสียที่ปล่อยจากกระบวนการประกอบไปด้วยสารเคมีต่าง ๆ เช่น สารช่วยในการกระจายสี สารปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง เกลือ สารออกซิไดซ์และสารอื่น ๆ ถึงแม้ว่าในแหล่งน้ำมีปริมาณของสียอมที่น้อยแต่ก็ยังสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าสียอมบางชนิดสามารถละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้จึงทำให้แหล่งน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลง มีกลิ่น และมีสี [7] ปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้แก่ อุณหภูมิสูง สียอมบางชนิดพบว่ามีความเป็นพิษหรือเป็นสารกัดกร่อน บางชนิดมีโครงสร้างทางเคมีเป็นอะโรมาติก (Aromatic Amine) ซึ่งยากต่อการย่อยสลาย และสียอมส่วนมากมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ เมื่อร่างกายได้รับสะสมเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคมะเร็ง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นน้ำที่ปล่อยจากกระบวนการในอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดสียอมก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ เพื่อให้มีคุณภาพตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้

2.2 สียอม (Dyes)

สียอม (Dyes) เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ที่ใช้ในการย้อมผ้า โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นเม็ดผงและเมื่อทำการผสมในน้ำจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอย สียอมนิยมใช้มากในอุตสาหกรรมย้อมผ้า เมื่อนำสียอมเข้าสู่กระบวนการย้อมแล้วโมเลกุลของสียอมจะซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยของผ้าทำให้เกิดพันธะไอออนิก (Ionic Bond) หรือพันธะโคเวเลนต์ (Covalent Bond) โครงสร้างทางโมเลกุลหรืออิเล็กทรอนิกส์ของสียอมมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมที่ต่างกันทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยพลังงานที่สายตามองเห็นอยู่ในช่วงความยาวคลื่นช่วง 400-700 นาโนเมตร [7] สียอมสามารถแบ่งได้หลายประเภทตามลักษณะการใช้งาน โดยประเภทของสีสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สียอมธรรมชาติและสียอมสังเคราะห์

สีย้อมธรรมชาติ (Natural Dyestuffs) เป็นสีที่ได้มาจากวัสดุธรรมชาติที่ได้จากพืช เช่น ใบไม้ ดอกไม้ ผลไม้ เปลือกไม้ เป็นต้น โดยในกระบวนการย้อมจะไม่มีสารเคมีมาเกี่ยวข้องทำให้ไม่สร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม และเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสามารถย่อยสลายได้ง่าย

สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic Dyestuffs) เป็นสีที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์จากสารเคมี เพื่อให้มีสมบัติตามที่ต้องการ เช่น เฉดสีที่หลากหลาย มีความสดใส คงทน และสามารถย้อมติดบนเส้นใยชนิดต่าง ๆ ได้อย่างง่ายดาย แต่ต้องใช้อย่างระมัดระวัง เนื่องจากมีส่วนผสมของสารพิษ เช่น สีเอโซและโลหะหนัก และเมื่อสลายตัวจะมีความเป็นพิษต่อผิวหนัง

2.2.1 โครงสร้างของสีย้อม [6]

โครงสร้างของสีย้อมมีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

โครโมฟอร์ (Chromophore) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงได้ทั้งในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และมีหมู่ไนโตรโซ (Nitroso Group) หมู่ไนโตร (Nitro Group) หมู่เอทิลีน (Ethylene Group) และหมู่อะโซ (Azo Group) อย่างน้อย 1 หมู่ ภายในโมเลกุลของสี

ออกโซโครม (Auxochrome) เป็นหมู่ฟังก์ชันที่อยู่ในโมเลกุลของสีที่มีผลต่อการเกิดสีในโครโมฟอร์ได้ดี โดยหมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสี ได้แก่ หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) และหมู่อะมิโน (Amino Group) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำให้สีย้อมสามารถละลายได้ดี

2.2.2 ประเภทของสีย้อม [8, 9]

ประเภทของสีย้อมสามารถแบ่งได้ตามโครงสร้างทางเคมี สมบัติ และวิธีการใช้งาน ซึ่งในอุตสาหกรรมได้มีการแบ่งประเภทของสีย้อมตามวิธีการใช้งาน 2 วิธี คือ การจำแนกตามโครงสร้างเคมีและจำแนกตามกรรมวิธีในการย้อม โดยสีย้อมสามารถแบ่งประเภทของสีย้อมตามวิธีการใช้งานได้เป็น 11 ประเภท

สีเบสิค (Basic Dyes) เป็นเกลือของต่างอินทรีย์ สามารถละลายน้ำได้ดีเกิดเป็นไอออนบวก หรือเรียกว่า สีแคทไอออน (Cationic Dyes) สีในกลุ่มนี้มีสีสดใส แต่ไม่มีความทนแสง สามารถเกาะติดเส้นใยพวกโปรตีนได้ดี แต่เกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้เพียงเล็กน้อยหรือไม่ติดเลย

สีแอซิด (Acid Dyes) เป็นสีย้อมที่มีประจุลบหรือเรียกว่า สีแอนไอออน (Anionic Dyes) สามารถย้อมติดเส้นใยโปรตีน และสามารถย้อมในน้ำที่มีความเป็นกรดได้ดี โดยการเติมกรด

เพื่อให้เส้นใยเกิดเป็นประจุบวก แต่สีย้อมบางชนิดจะย้อมที่ความเป็นด่าง ราคาค่อนข้างถูก มีความสว่างสดใส สามารถละลายได้ง่ายในน้ำร้อน ดูดซึมติดเส้นใยได้ดี ทนต่อแสงแดด และการซักฟอกในระดับปานกลางถึงดีมาก

สีไคเร็กท์ (Direct Dyes) ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซ (Azo) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งภายในโมเลกุลมีหมู่กรดซัลโฟนิคซึ่งทำให้สีละลายน้ำได้ดีเกิดเป็นประจุลบ สามารถย้อมติดบนเส้นใยฝ้ายและเส้นใยเซลลูโลสอื่น ๆ ได้ดี แต่เนื่องจากสีชนิดนี้มีการจัดเรียงตัวแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของเส้นใยและยึดจับด้วยพันธะไฮโดรเจนเท่านั้น ทำให้สีหลุดออกง่ายเมื่อทำการซักล้าง

สีดิสเพิร์ส (Disperse Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่สามารถกระจายตัวได้ดี เมื่อมีสารช่วยกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสม การกระจายตัวจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยเป็นละอองขนาดเล็กมากลอยตัวอยู่ในน้ำ โดยในการย้อมจะใช้สารพา (Carrier) เพื่อเร่งโมเลกุลของสีให้เข้าไปในเส้นใยโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง มีสมบัติทนต่อแสงและทนต่อการซักฟอกค่อนข้างดี และสีชนิดนี้เป็นสีที่ซีดง่ายหากถูกควันทันหรือกำซาบบางชนิด

สีรีแอคทีฟ (Reactive Dyes) สามารถละลายน้ำและย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด มีสมบัติเป็นประจุลบเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสและเชื่อมติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ในการละลายจะทำให้โมเลกุลของสีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใย และเมื่อเกิดปฏิกิริยาโมเลกุลของสีจะยึดติดเส้นใย ทำให้มีความคงทนต่อการซักล้าง

สีแว็ต (Vat Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์และตัวรีดิวซ์ ทำให้เกาะติดเส้นใยเซลลูโลสได้ดี หลังจากนั้นต้องทำการออกไซด์ด้วยออกซิเจนในอากาศด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือโพแทสเซียมไดโครเมตจึงกลับเป็นสารเดิม โดยสีชนิดนี้คงทนต่อการซักล้างและทนต่อแสงสีดีมาก

สีอะโซอิก (Azoic Dyes) เป็นสีที่ประกอบด้วยสารอะโซ (Azo) ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยในการย้อมจะต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอล (Phenol) และย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโพเนนท์จึงจะเกิดเป็นสี [10] สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เพราะสารประกอบฟีนอลเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน และมีความทนต่อการซัก ทนต่อความเป็นกรด-ด่างและแสงสว่าง

สีกำมะถัน (Sulphur Dyes) คือสีที่มีกำมะถันอยู่ในโมเลกุล ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ โดยในการย้อมต้องทำการรีดิวซ์ในสารละลายต่าง และเมื่อถูกออกซิไดซ์จะมีสีเกิดขึ้นทำให้ละลายในน้ำได้ โดยส่วนใหญ่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสให้สีค่อนข้างขม เช่น ดำ น้ำตาล น้ำเงิน เขียว เป็นต้น เมื่อนำมาย้อมผ้าจะทำให้มีความติดทนนานซึ่งเหมาะสำหรับย้อมผ้าที่ต้องใช้

บ่อยครั้ง และต้องทำความสะอาดอย่างรุนแรง แล้วยังสามารถทนเหงื่อ ความเป็นกรด-ด่าง และแสงสว่าง แต่ไม่ทนต่อการฟอกสีประเภทคลอรีน

สีออกซิเดชัน (Oxidation Dyes) เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ อาศัยปฏิกิริยาการตกตะกอนเกิดเป็นผลึกภายในเส้นใย สีประเภทนี้สามารถย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีเมื่อละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นด่างและเป็นสีที่ไม่มีควมสดใส

สีมอร์แดนต์ หรือโครม (Mordant or Chrome Dyes) เป็นสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากสีมอร์แดนต์หลายโมเลกุลจับกับโลหะทำให้สามารถละลายน้ำได้ และสามารถนำมาย้อมกับผ้าได้ง่าย ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยพอลิเอไมด์ได้ดี

สีอินเกรน (Ingrain Dyes) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

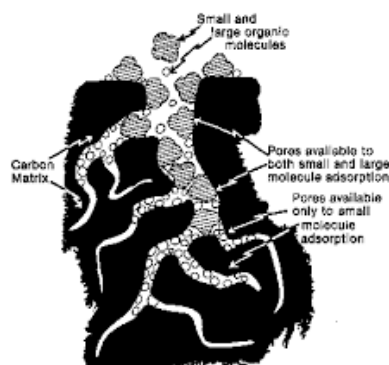
2.3 เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำ [11, 12]

เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ เทคโนโลยีการกำจัดสีทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ โดยแต่ละประเภทมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ทำให้ต้องมีการเลือกใช้ให้เหมาะสมสำหรับน้ำเสียในแต่ละอุตสาหกรรม

2.3.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical Technology)

การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูง สามารถดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีการปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ เนื่องจากตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) ซึ่งลักษณะรูพรุนจะแสดงดังรูปที่ 2.1 โมเลกุลของสารละลายเกาะอยู่รอบนอกของผิวหน้าตัวดูดซับหรือสัมผัสด้วยแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) จากนั้นโมเลกุลของสารละลายจะแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนจนเต็ม แต่เนื่องจากการยึดเกาะบนตัวดูดซับเป็นแรงแบบอ่อน ๆ เกิดสารตกค้างอยู่บนผิวหน้า ทำให้รูพรุนเกิดการอุดตันและเสื่อมสภาพ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งในการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่มีทุนต้นที่สูงมาก เนื่องจากต้องทำการเผาที่อุณหภูมิสูงและต้องกำจัดกาก ทำให้เทคนิคการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ไม่เป็นที่นิยมในการดูดซับสี



รูปที่ 2.1 รูปตัดโพรงหรือช่องว่างภายในของถ่านกัมมันต์ [13]

การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

การกรองด้วยเยื่อแผ่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่เนื่องจากอัลตราฟิวเตรชันไม่สามารถกรองโมเลกุลของสีออกจากน้ำได้ และการออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดโมเลกุลของสีที่มีขนาดใหญ่ โดยใช้แรงดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำที่มีโมเลกุลของสีผ่านตัวกรอง และนาโนฟิวเตรชัน มีขนาดรูพรุนของเยื่อที่เล็กทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้มากกว่าการออสโมซิสย้อนกลับ โดยทำการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงออกจากสารละลาย ซึ่งการกรองด้วยเยื่อแผ่นไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากแผ่นกรองเกิดการอุดตันทำให้ต้องมีการทำความสะอาดบ่อยครั้ง และทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

2.3.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

การสร้างรวมตะกอนเป็นการรวมตะกอนหรือสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็ก (Colloid) ให้เกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่เพื่อให้ตกลงได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากสารแขวนลอยมีประจุลบทำให้ตะกอนไม่สามารถรวมตัวกันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับความเป็นกรด-ด่าง เพื่อทำลายประจุของสารแขวนลอยให้มีสภาพเป็นกลาง โดยทำการเติมสารเคมีเพื่อช่วยยึดให้สารแขวนลอยเกิดการรวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ โดยใช้สารส้ม (Aluminium Sulfate, Alum) ซึ่งมีสมบัติเป็นทั้งสารสร้างตะกอนและรวมตะกอน พบว่าที่ความเป็นกรด-ด่าง 5-7 มีประสิทธิภาพในการเกิดตะกอนได้ดี แต่ถ้ามีความเป็นกรดมากเกินไปจะเกิดกากตะกอน (Sludge) จำนวนมาก ทำให้ต้องมีการกำจัดต่อไป

กระบวนการเพนตัน (Fenton Process)

กระบวนการเพนตันเป็นการออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออนเกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (OH) ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (OH) ที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาเป็นตัวกลาง โดยอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูง ทำให้สามารถรับอิเล็กตรอนได้ดี ซึ่งถ้าตัวออกซิไดซ์ที่มีความแรงจะสามารถรับอิเล็กตรอนได้ง่ายมาก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก และเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง

กระบวนการโอโซนออกซิเดชัน (Ozone Oxidation)

โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรงและมีประสิทธิภาพในการทำละลายสีในน้ำได้สูงถึง 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจน สามารถทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโซ่ของสารอินทรีย์หรือสีได้ดี ทำให้พันธะของโมเลกุลที่เกิดสี (Chromophores) ที่มีสายโซ่ที่ยาวให้มีขนาดสั้นลงและเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกับโอโซนนานขึ้นทำให้การกำจัดสีมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เนื่องจากการใช้โอโซนเป็นสารที่ให้ออกซิเจนอย่างรุนแรง (Strongly Oxidizing Agent) เกิดปฏิกิริยากับสารบางชนิดในแหล่งน้ำทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง

2.3.3 เทคโนโลยีชีวภาพ (Biological Technology)

การดูดซับด้วยสาหร่าย (Algae Adsorption)

สาหร่ายสามารถกำจัดสีได้โดยการดูดซับภายใต้ภาวะที่มีแสง โดยทำการเปลี่ยนโมเลกุลสีเป็นโมเลกุลไม่มีสี โดยสาหร่ายที่นำมาดูดซับคือ สาหร่ายช่อพริกไทย (Caulerpa Letillifera) สามารถดูดซับสีเบสิคที่ปล่อยออกจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมได้ สมดุลของการดูดซับเป็นไปตามทั้งไอโซเทอรัมของแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm) และไอโซเทอรัมของฟรูนคลิคซ์ (Freundlich Isotherm) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับด้วยสาหร่ายจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอาหาร ปริมาณความเข้มของแสง ปริมาณความเข้มของเซลล์ตั้งต้น และความเป็นกรด-ด่าง [14]

การย่อยสลายด้วยเชื้อรา (Fungi decomposition)

การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้เชื้อราเป็นการสร้างเอนไซม์นอกเซลล์กลุ่มลิกนินโนไลติก (Ligninolytic Enzyme) ย่อยสลายเนื้อไม้โดยเฉพาะเห็ดราในกลุ่มเชื้อราขาวหรือเห็ดราขาวหรือเห็ดรา (White or Brown Rot Fungi) สามารถเจริญเติบโตได้ดีบนขอนไม้ ซึ่งในเนื้อไม้ประกอบด้วย ลิกนินเซลลูโลส ทำให้สามารถกำจัดสีในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษได้ [15] โดยปัจจัยที่มี

ผลต่อการเจริญเติบโตได้แก่ สารอาหาร ระดับความเข้มข้นของไนโตรเจนและคาร์บอน อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง สารยับยั้งจากกระบวนการแคทาไลซิสหรือไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ และไอออนโลหะ ได้แก่ แมงกานีส เป็นต้น ซึ่งวิธีนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากไม่สะดวกต่อการใช้งาน การเก็บรักษา รวมถึงการขนส่งค่อนข้างสูง

การย่อยสลายด้วยแบคทีเรีย (Bacteria decomposition)

การย่อยสลายสียด้วยแบคทีเรียสามารถลดสีได้หลายประเภท ซึ่งในการย่อยสลายสีรีแอกทีฟเกรด 2 โดยใช้กระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก พบว่าสามารถกำจัดสีได้ดี แบคทีเรียที่มีความสำคัญในการกำจัดสีมี 3 สกุล คือ *Pseudomonas* sp., *Proteus* sp. และ *Klebsiella* sp. [16] นอกจากนี้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Burkholderia Glumae* สามารถย่อยสลายสีรีแอกทีฟในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งกระบวนการบำบัดแบบไม่เติมอากาศให้ผลในการกำจัดสีได้ดีกว่าการบำบัดแบบเติมอากาศ โดยสามารถกำจัดสีในน้ำทิ้งได้ร้อยละ 76 ในเวลา 7 วัน [17] ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายคือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี สารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตรวมถึงความต้องการอากาศในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายสี

เทคนิคการบำบัดสีในน้ำมีหลายวิธี แต่เป็นที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่คือ กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) เนื่องจากกระบวนการดูดซับมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่สูง มีต้นทุนในการก่อสร้างต่ำ และเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้เลือกกระบวนการดูดซับมาใช้ในการดูดซับสีในน้ำ

2.4 กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับเป็นการกำจัดสารละลายอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกลิ่น สี ในสิ่งแวดล้อม โดยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารอินทรีย์มายังบริเวณพื้นผิวระหว่างผิวหน้าของสารอินทรีย์และผิวหน้าของตัวดูดซับ (Interface) ทำให้เกิดการสัมผัสกัน ซึ่งโมเลกุลของสารละลายอินทรีย์เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) [18]

โดยกระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) [19]

การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารละลายอินทรีย์และพื้นผิวของตัวดูดซับอย่างอ่อนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) ซึ่งเกิดแรงกระจาย (Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatics Force) ส่งผลให้เกิดการคายความร้อนค่อนข้างต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ทำให้การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) โดยสารละลายอินทรีย์จะถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับและถูกดูดซับบนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับในชั้นแรก ซึ่งจำนวนชั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับและจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของสารละลายอินทรีย์ การดูดซับทางกายภาพสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) เป็นการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดเป็นพันธะไอออนิก หรือเป็นการสร้างพันธะโคเวเลนต์ เกิดแรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงและมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพ สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง และมีความสัมพันธ์กับพลังงานการกระตุ้น (Activation Energy) ส่งผลให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) การดูดซับทางเคมีจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ และการดูดซับบนผิวหน้ามักเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

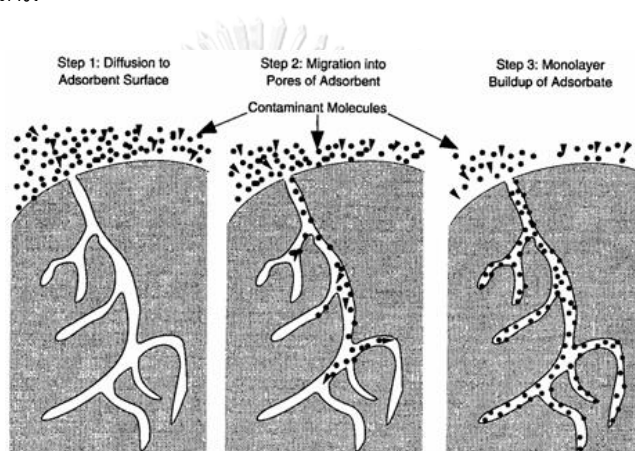
เมื่อทำการเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมีจะเห็นได้ว่าทั้งสองมีความแตกต่างอย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี [18]

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

2.4.1 กลไกการดูดซับ [20]

กลไกการดูดซับ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) เป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากสารละลายอินทรีย์มาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลของสารละลายอินทรีย์ในน้ำเคลื่อนที่ไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ เรียกว่าการแพร่ภายนอก (External Diffusion) จากนั้นจะทำการแพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ หรือการแพร่ภายใน (Interparticle Diffusion หรือ Pore Diffusion) เกิดการดูดซับเกาะติดบนผิวในรูพรุน ซึ่งการเกาะติดบนผิวทำให้เกิดแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ซึ่งในการกำจัดน้ำเสียจะพิจารณาจากการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี



รูปที่ 2.2 กลไกการดูดซับ [21]

2.4.2 วัสดุดูดซับ (Adsorbent) [6]

การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้ได้ตัวดูดซับที่มีความเป็นรูพรุนในปริมาณที่มาก โดยขนาดของรูพรุนสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ ไมโครพอร์รัส (Microporous) มีรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร เมโซพอร์รัส (Mesoporous) มีรูพรุนขนาดกลางอยู่ระหว่าง 2-50 นาโนเมตร และแมโครพอร์รัส (Macroporous) มีรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ยิ่งมีรูพรุนและพื้นที่ผิวมากทำให้สามารถดูดซับสารละลายอินทรีย์ในน้ำได้ดี รูพรุนขนาดไมโครพอร์รัสและเมโซพอร์รัสมีพื้นที่ผิวค่อนข้างมากเหมาะกับการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับสิ่งปนเปื้อนได้ดี และขนาดไมโครพอร์รัสเป็นขนาดที่เล็กเกินที่จะดูดซับโมเลกุลของสีได้ เนื่องจากโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่ทำให้ไม่สามารถ

แพร่กระจายเข้าสู่รูพรุนได้ ในขณะที่รูพรุนขนาดแมโครพอร์มีรูพรุนขนาดใหญ่พอที่จะแพร่เข้าได้ แต่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวการดูดซับน้อยเกินไป ทำให้สรุปได้ว่าขนาดรูพรุนที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม คือ ขนาดเมโซพอร์ส ยิ่งรูพรุนมีจำนวนมาก ทำให้สามารถดูดซับได้ดีและใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลลดลง

ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงและยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยต้องกำจัดความชื้นออก แต่ก็มีข้อจำกัดคือ การฟื้นฟูตัวดูดซับ (Regeneration) จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำ และมีราคาสูง ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่สามารถดูดซับได้ดี โดยใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและหาได้ง่ายเพื่อนำมาทดแทนการใช้ตัวดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในการดูดซับสีย้อมในน้ำเสีย

การดูดซับด้วยวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรม

วัสดุธรรมชาติสามารถช่วยลดต้นทุนและลดปริมาณของเหลือทิ้งได้เป็นอย่างดี โดยวัสดุที่นำมาใช้ได้แก่ ไม้ไผ่ กะลามะพร้าว ทะลายปาล์ม ชี้อ้อย ชานอ้อย เป็นต้น วัสดุเหล่านี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ จึงต้องนำไปปรับสภาพหรือกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) เกิดกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วตามด้วยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) ที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นและสามารถกำจัดองค์ประกอบอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอนออกได้ และการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) เป็นการใส่สารเคมีเข้าไปสลายสารปนเปื้อนในรูพรุนแล้วนำไปเผาโดยใช้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงถึง 400-1,000 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้กระตุ้น เช่น ซิงค์ (II) คลอไรด์ ($ZnCl_2$) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นต้น การกระตุ้นด้วยสารเคมีสามารถลดขนาดของรูพรุนเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) และเพิ่มปริมาณรูพรุน (Pore Volume) ได้ดีมาก ทำให้ตัวดูดซับที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้มีประสิทธิภาพในการดูดซับดี แต่มีข้อจำกัดคือ มีสารเคมีตกค้างจากขั้นตอนการล้างสารเคมีออกจากตัวดูดซับ

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [6]

ความสามารถในการดูดซับสีในน้ำด้วยวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยหลากหลาย ได้แก่ สมบัติของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ความเข้มข้นของสารละลาย ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ และอุณหภูมิ เป็นต้น

2.4.3.1 สมบัติของตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ

ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับและประจุของสี เมื่อละลายน้ำหรือการกระจายตัว โดยเฉพาะการดูดซับทางเคมี โดยสภาพประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในขณะนั้น ถ้าโมเลกุลสีมีประจุลบที่ความเป็นกรดต่ำจะสามารถถูกดูดซับได้ดี เนื่องจากพื้นผิวตัวดูดซับมีประจุบวกที่มาจากไฮโดรเจนไอออน (H^+) เกาะอยู่ในปริมาณมาก ทำให้สามารถดูดซับสีที่เป็นประจุลบได้เป็นอย่างดี และเมื่อปรับสภาพเป็นด่าง ผิวของตัวดูดซับเป็นประจุลบเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) สามารถดูดซับสีที่เป็นประจุบวกได้ดี ดังนั้นการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของสารละลายทำให้เหมาะสมกับโครงสร้างของสีจึงเป็นการช่วยทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีดีขึ้น

2.4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวล โดยสารละลายจะแพร่เข้าสู่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Film Diffusion) ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับในช่วงต้นมีค่าการดูดซับสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไป โมเลกุลในสารละลายแพร่เข้าสู่รูพรุน (Particle Diffusion) และเกิดการดูดซับบนผิวภายในรูพรุน ทำให้ในช่วงหลังการดูดซับช้าลง ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับในช่วงหลังเริ่มลดลงจนเข้าสู่สมดุล

2.4.3.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

การเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น โดยในช่วงแรกการดูดซับจะเกิดขึ้นเร็วมาก เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายและที่ว่างบนพื้นผิวของตัวดูดซับยังคงมีมาก หลังจากนั้นการดูดซับลดลงจนเข้าสู่สมดุลเนื่องจากที่ว่างบนพื้นผิวถูกดูดซับโมเลกุลสีไว้เต็มพื้นผิวตัวดูดซับ

2.4.3.4 ปริมาณของตัวดูดซับ

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและสารละลาย แต่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากน้ำหนักของสีย้อมต่อน้ำหนักของตัวดูดซับลดลง

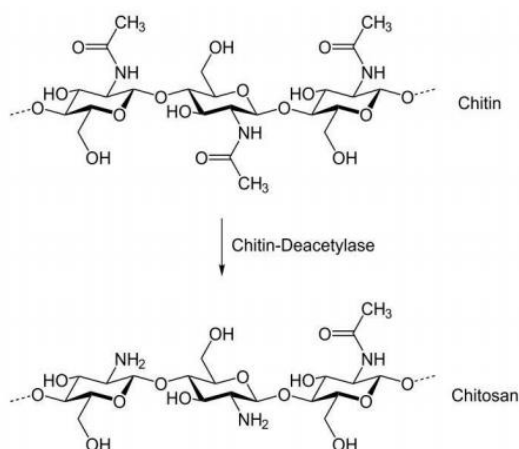
2.4.3.5 อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้อุณหภูมิของตัวดูดซับเคลื่อนที่ได้ดี ส่งผลให้โมเลกุลของสีแพร่กระจายผ่านตัวดูดซับไปยังบริเวณกระตุ้น (Active Site) ได้เร็วขึ้น แต่ในกระบวนการคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้การดูดซับลดลง เนื่องจากการละลายของสียอมเกิดขึ้นได้ดีทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสีและตัวดูดซับลดลง ปัจจัยของอุณหภูมิทำให้เกิดกระบวนการคายซับ (Desorption) เกิดปฏิกิริยาผันกลับ (Reversible Process)

ในงานวิจัยจึงได้เลือกวัสดุทางการเกษตรและอุตสาหกรรมมาทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับ เนื่องจากไม่มีความเป็นพิษและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยวัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวดูดซับคือ ไคโตซาน เนื่องจากวัสดุธรรมชาติ มีสมบัติในการดูดซับที่ดี สามารถหาได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ นอกจากนี้ยังต้องทำการปรับแต่งสมบัติของไคโตซานโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นเมื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ

2.5 ไคโตซาน

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ทางชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ โดยสกัดได้จากเปลือกนอกของสัตว์ทะเลจำพวก กุ้ง ปู และแครงหมึก ในพืช เช่น เห็ด เชื้อรา เป็นต้น สูตรทางเคมีคือ poly- β -(1 \rightarrow 4)-2-Amino-2-Deoxy-D-Glucopyranose] เป็นอนุพันธ์ของไคตินจากกระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติล (Deacetylation) ซึ่งโมเลกุลจาก เอ็น-อะซิทิล กลูโคซามีน (N-Acetyl Glucosamine) เกิดเป็นกลูโคซามีน (Glucosamine) เหลือเพียงหมู่อะมิโน (-NH₂) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 [22] และหมู่แอลกอฮอล์ (OH) แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ดี ไคโตซานสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดแอสติก เป็นต้น ส่งผลให้หมู่อะมิโนมีสมบัติเป็นประจุบวก [23] บนโครงสร้างของไคโตซานสามารถปฏิสัมพันธ์ (Interaction) กับประจุลบของสารประกอบอินทรีย์ เกิดเป็นประจุไฟฟ้าที่สภาพเป็นกลาง และนอกจากนี้ยังสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะหนัก โดยหมู่แอลกอฮอล์ (OH) เกิดพันธะกับโลหะหนักได้หลายชนิด เช่น โครเมียม (Chromium) เงิน (Silver) และทองแดง (Cadmium) เนื่องจากประจุบนสายโมเลกุลสามารถย่อยสลายเองได้ตามธรรมชาติโดยไม่ก่อให้เกิดการตกค้างและไม่ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม [24]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน [25]

น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานบ่งบอกได้ถึงความยาวของสายโซ่ซึ่งทำให้มีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายโซ่ยาวและมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ดังนั้นการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้งการกำจัดหมู่อะซีทิลและน้ำหนักโมเลกุล [26]

2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน [26]

2.5.1.1 การละลาย (Solubility)

ไคโตซานสามารถละลายได้ในสารละลายที่มีความเป็นกรดต่ำกว่า 6 โดยส่วนใหญ่ใช้กรดแอสซิดิก กระจายเข้าไปในตัวทำละลายทำให้หมู่ฟังก์ชันเอมีน (-NH₂) ถูกเติมโปรตอน (Protonated) เปลี่ยนเป็นหมู่เอมีนที่เป็นประจุบวก (-NH₃⁺) ซึ่งจะไม่สามารถละลายในน้ำที่มีสภาพเป็นกลาง และได้เป็นสารละลายที่มีความเหนียวใส

2.5.1.2 การกำจัดหรือลดหมู่อะซีทิล

จำนวนหมู่อะซีทิลบนสายโซ่เป็นการแบ่งแยกระหว่างไคตินและไคโตซาน เมื่อหมู่อะซีทิลบนสายโซ่มีค่ามากกว่า 60% เรียกว่าไคโตซาน การวิเคราะห์หาจำนวนหมู่อะซีทิลบนสายโซ่สามารถทำได้ด้วยเทคนิคการไทเทรตหรือใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีขั้นสูง

2.5.1.3 ความหนืด

ความหนืดจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระดับการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of Deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความแรงของไอออนในสารละลาย (Ionic Strength)

ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ ซึ่งความหนืดลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ส่วนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายจะให้ผลความหนืดเปลี่ยนแปลงที่ต่างกัน เช่น ความหนืดในกรดแอสติคเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าความเป็นกรดมาก

2.5.1.4 สมบัติของประจุบวก

ไคโตซานมีคุณสมบัติเป็น Linear Polyelectrolyte มีความหนาแน่นทางประจุสูง ใช้เป็นสารก่อการจับกลุ่ม (Flocculant) ที่มีประสิทธิภาพสูงได้เป็นอย่างดี สามารถยึดจับกับประจุลบและยังสามารถจับโลหะพวกไอออนของโลหะ (Chelates Metation) ได้ดี

2.5.2 การใช้ประโยชน์ไคโตซาน [27, 28]

ไคโตซานเป็นวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) ไม่มีความเป็นพิษ (Non-Phytotoxic) มีความปลอดภัยในการนำมาใช้กับมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งได้มีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

การเกษตร

ไคโตซานสามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ในดิน สามารถยึดเกาะกับพื้นผิวดินได้ดี ทนต่อการถูกชะล้าง ลดการระเหยของน้ำ อีกทั้งช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เชื้อรา และไวรัส ที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคในพืช ใช้เคลือบเพื่อควบคุมผลไม่ให้ความสดทำให้สามารถเก็บรักษาได้นาน นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในการผลิตกระดาษหรือถุง โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติไม่เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

อุตสาหกรรมอาหาร

ปัจจุบันไคโตซานมีการผลิตออกจำหน่ายอย่างแพร่หลายในรูปของอาหารเสริมเพื่อลดคอเลสเตอรอลและควบคุมน้ำหนัก ช่วยเสริมใยอาหารธรรมชาติในผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งเพิ่มความเหนียวให้กับผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ทำจากเนื้อสัตว์ สามารถถนอมอาหารโดยใช้เป็นฟิล์มห่อหุ้มอาหารซึ่งสามารถรับประทานได้โดยไม่เป็นอันตราย นำไปใช้ในเครื่องปรุงรสอาหาร และการทำเป็นภาชนะที่สามารถย่อยสลายได้

การบำบัดน้ำเสีย

มีการนำไคโตซานมาใช้สำหรับการตกตะกอนสารแขวนลอยและโลหะหนัก ในกระบวนการผลิตน้ำประปา พบว่าสามารถลดความขุ่น ปริมาณตะกอนแขวนลอย ตลอดจนค่าปริมาณออกซิเจน (Biologicals Oxygen Demand, BOD) และความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical

Oxygen Demand, COD) ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น และสามารถจับคาบไขมัน สี กระจกตาที่เกิดจากการฟอกย้อม ตักจับสารกัมมันตรังสีของน้ำจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ ใช้เป็นส่วนประกอบของแผ่นกรองแยกสารอันตรายออกจากน้ำเสีย และเป็นตัวจับไอออนโลหะในน้ำทิ้ง เช่น ไอออนของปรอท ทองแดง ตะกั่ว แคดเมียม เป็นต้น ซึ่งทำให้มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมสามารถทดแทนสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายได้

อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ไคโตซานสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เนื่องจากประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันเอมีนเรียงอยู่บนโครงสร้างซึ่งมีความว่องไวต่อการจับกับผิวหนังและเส้นผมที่ประกอบด้วยสารมิวโคโพลีแซ็กคาไรด์ (Mucopolysaccharides) โปรตีน และไขมันที่มีประจุลบได้เป็นอย่างดี โดยจะก่อตัวเป็นฟิล์มบาง ๆ พร้อมกับดูดซับความชื้นและไขมัน จึงช่วยรักษาความชุ่มชื้น ลดอาการระคายเคือง และความยืดหยุ่นให้แก่ผิวหนังและเส้นผม ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของสารไคโตซาน ได้แก่ ครีมและโลชั่นบำรุงผิว แชมพู โลชั่นบำรุงผม แป้งแต่งหน้า ยาทาเล็บ ยาสีฟัน และมอยส์เจอร์ไรเซอร์ เป็นต้น

อุตสาหกรรมเส้นใยและสิ่งทอ

ไคโตซานสามารถใช้ในการผลิตผ้าใยผสมยืดหยุ่นทนทาน ไม่หดตัวง่ายและมีความนุ่มนวลสูง ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น ฝ้ายนอนวูฟเวน (Nonwoven) ผ้าปิดแผลไหมละลาย เป็นต้น

การแพทย์และเภสัชกรรม

ไคโตซานมีความเข้ากันได้กับเซลล์ของร่างกายและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย ซึ่งได้มีการนำมาผลิตผิวหนังเทียมที่ย่อยสลายเองโดยไม่ต้องล้างออกสำหรับผู้ป่วยไฟไหม้ ใช้เป็นวัสดุปิดบาดแผลที่สลายโดยธรรมชาติ ผลิตเป็นไหมเย็บแผลที่สลายเองได้และไม่มีปฏิกิริยากับภูมิคุ้มกันของร่างกายมนุษย์ กระตุ้นการสร้างเซลล์ใหม่และป้องกันการติดเชื้อจึงช่วยให้บาดแผลหายเร็วขึ้น เป็นสารป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของเลือด (Blood Anticoagulant) และสารห้ามเลือด (Hemostatic) ผลิตเป็นยาต้านการเจริญเติบโตของเนื้องอก และใช้ในการเคลือบเม็ดยาให้มีความคงทนไม่แตกหักง่าย

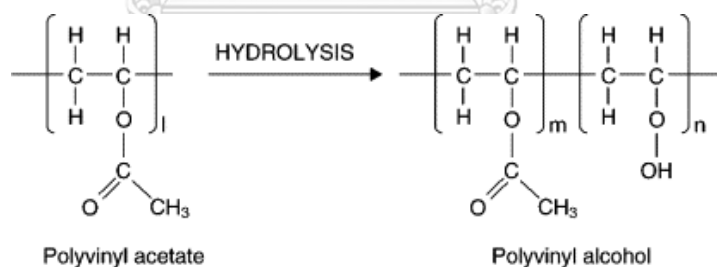
การดูดซับน้ำมัน

ไคโตซานเป็นวิธีที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากประจุบวก (Cationic Biopolymer) และหมู่เอมีนทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับน้ำมันได้ดี โดยอาศัยกลไก

การสะเทิน (Neutralize) ทำให้ประจุลบสูญเสียเสถียรภาพ และจากการศึกษาพบว่าไคโตซานในรูปแบบผง (Power) มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำมันไว้ที่ผิวของไคโตซานได้จริง โดยลักษณะพื้นผิวของไคโตซานก่อนดูดซับมีลักษณะเรียบและมีรูพรุนกระจายทั่วเป็นเนื้อเดียว ขณะที่พื้นผิวของไคโตซานหลังจากการดูดซับน้ำมันมีลักษณะขรุขระ และรูพรุนมีลักษณะเป็นแบบปล่องภูเขาไฟ (Craterlike Pores) ทำให้น้ำมันสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนของไคโตซานได้

2.6 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol: PVA) เป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ทนทานต่อแรงดึงและการฉีกขาด มีความทนทานต่อน้ำมัน ไขมันและสารละลายต่าง ๆ ได้ดี สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ด้วยวิธีชีวภาพโดยใช้แบคทีเรียในดิน จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [29] สามารถเกิดฟิล์มได้ดี ติดไฟได้คล้ายกระดาษ ยึดติดและทนต่อตัวทำละลายอินทรีย์ และยังต้านทานการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนได้ดี พอลิเมอร์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นผงสีขาวจนถึงครีม โดยสามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาการตัดแปลงโมเลกุลของพอลิไวนิลอะซิเตต (Polyvinyl acetate: PVAc) ในสภาวะเป็นกรดหรือด่าง แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีความเป็นด่างจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่า โดยการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการไฮโดรไลซิสแสดงดังรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปจะละลายพอลิไวนิลอะซิเตตในแอลกอฮอล์แล้วทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและให้ความร้อน จะได้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เกิดจากการตกตะกอนออกจากสารละลาย [23]



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยการไฮโดรไลซิสของพอลิไวนิลอะซิเตต [30]

2.6.1 สมบัติทั่วไปของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส (Degree of Hydrolysis) โดยระดับการไฮโดรไลซิสสูงจะมีความทนต่อแรงกระทำได้ดีกว่าระดับการไฮโดรไลซิสต่ำ และมีความเป็นผลึกสูง เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้ดี โดยที่ร้อยละ 80 สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายน้ำได้ดีมากเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการยืดตัว ความทนต่อการฉีกขาด ความสามารถในการอ่อนตัวดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงและสามารถต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดี

ความสามารถนี้จะเพิ่มขึ้นตามระดับการไฮโดรไลซิส ซึ่งระดับการไฮโดรไลซิสสูงจะมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูงด้วย สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายน้ำได้ โดยจะละลายอย่างช้า ๆ ในน้ำเย็น แต่จะละลายได้เร็วขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส [31] และไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์ และคีโตน เนื่องจากสภาพขั้วที่แตกต่าง แต่จะละลายในเอทิลีนไกลคอล และกลีเซอรอล [32]

2.6.2 การใช้งานของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [33]

การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้

2.6.2.1 อาศัยสมบัติการละลายในน้ำ

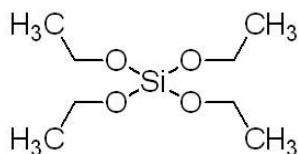
การละลายในน้ำช่วยทำให้ระบบอิมัลชันและระบบแขวนลอยต่าง ๆ มีความคงตัว ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive) สำหรับการทำกระดาษและไม้ ใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษซึ่งมีความใสเหนียว และทนต่อรอยขีดข่วนได้เป็นอย่างดี

2.6.2.2 ปฏิกริยาเคมีทำให้ไม่สามารถละลายน้ำ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายในน้ำสามารถดูดน้ำและความชื้นได้เป็นอย่างดี (ประมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) จึงใช้เป็นเส้นใยแทนฝ้ายได้ ผ้าที่ทำด้วยเส้นใยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สวมใส่สบาย ซักง่าย ทนทานต่อการสีหรือ และสามารถคงรูปได้เป็นอย่างดี มักใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 50,000-100,000 และระดับการไฮโดรไลซิส 98-99%

2.7 เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate, TEOS) [33]

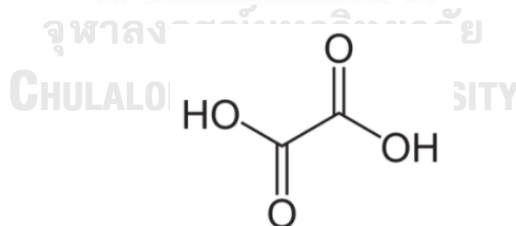
สารเชื่อมขวางที่นิยมถูกนำมาใช้งานโดยทั่วไปมีอยู่หลายชนิด เช่น พอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) กลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เจนิพิน (Genipin) อีพิคโลโรไฮดริน (Epihalohydrin) บอเรต (Borate) และ ไตรโพลีฟอสเฟต (Tripolyphosphate) ซึ่งมีความเป็นพิษและย่อยสลายได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับสารเชื่อมขวางประเภท อัลคอกซีไซเลน (Alkoxysilane) [34] โดยสารเชื่อมขวางชนิดนี้ไม่มีความเป็นพิษ มีความเข้ากันได้ทางธรรมชาติ สมบัติทางกายภาพมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถละลายได้ดีในน้ำ สูตรทางเคมี คือ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อทำการเติมลงไปในพอลิเมอร์เกิดพันธะโคเวเลนต์ขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดและเกิดแรงยึดติดระหว่างกันเพิ่มขึ้น จึงทำให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต [35]

2.8 กรดออกซาลิก (Oxalic Acid, OA)

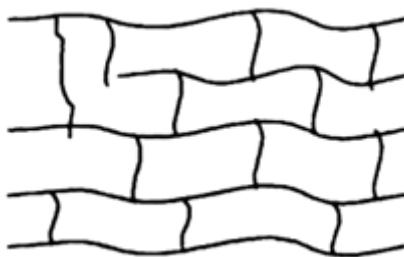
กรดออกซาลิก (Oxalic Acid) สูตรโมเลกุลคือ $C_2H_2O_4$ และมีโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีความเป็นกรดสูงกว่ากรดน้ำส้ม (Acetic acid) 10,000 เท่า เมื่ออยู่ในรูปของประจุเรียกว่า ออกซาเลต (Oxalate) [36] สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับธาตุอื่นทำให้ไม่ละลายน้ำ เช่น แคลเซียมออกซาเลต แมกนีเซียมออกซาเลต โซเดียมออกซาเลต และโพแทสเซียมออกซาเลต ลักษณะทางกายภาพของออกซาลิกเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น และไม่มีความเป็นพิษ วิธีการเตรียมสามารถเตรียมได้จากการออกซิไดซ์น้ำตาลกลูโคสด้วยกรดไนตริกโดยใช้วาเนเดียมเพนทอกไซด์ (Vanadium Pentoxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือในอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตในปริมาณที่มากจะใช้คาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันสูงจะได้โซเดียมออกซาเลต กรดออกซาลิกจะทำปฏิกิริยาให้สารประกอบกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic Acid) อื่น ๆ เช่น สารประกอบเอสเทอร์ (Dimethyl Oxalate) สารประกอบเอซิทคลอไรด์ (Oxalyl Chloride) เป็นต้น ซึ่งกรดออกซาลิกจะสร้างพันธะไอออนิกเชื่อมโยงระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลในพอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น [37]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของกรดออกซาลิก [36]

2.9 การเชื่อมขวาง (Crosslink Agent)

การเชื่อมขวางเป็นการสร้างพันธะเคมีที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กลายเป็นโครงร่างตาข่ายที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งลักษณะการเชื่อมขวางแสดงดังรูปที่ 2.7 การเชื่อมขวางจะช่วยปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ความเหนียว ความทนทานต่อสารเคมี และลดความสามารถในการละลายในน้ำ [38]



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์สองชนิด [39]

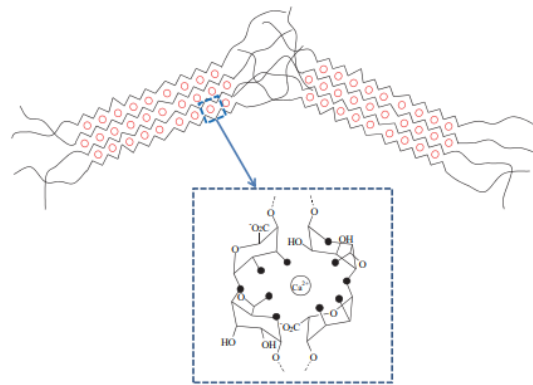
วิธีการเตรียมการเชื่อมขวางเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากต้องการให้ได้สมบัติตามที่ต้องการและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย โดยวิธีการเตรียมที่นิยมสามารถเตรียมได้หลายวิธีดังนี้

2.9.1 การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical Crosslinking) [40]

การเชื่อมขวางทางกายภาพได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการใช้งานที่สะดวก สามารถทำได้ง่ายโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวางในการเชื่อมสายโซ่พอลิเมอร์และสามารถประหยัดต้นทุนในการสังเคราะห์ตัวดูดซับได้ดี โดยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่

Ionic Interaction

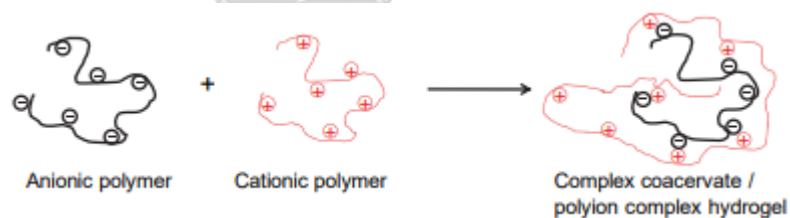
ในการเตรียมด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยการเกิดอันตรกิริยาแบบไอออนิกระหว่างหมู่ฟังก์ชันในสายโซ่พอลิเมอร์ เช่น การเตรียมโดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ลงในโพลีแมนนูโรเนท (Polymannuronate) เป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลที่เป็นประจุลบ ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างประจุบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบ เกิดเป็นไอออนิกพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดสารเชื่อมขวางโดยการเติมพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์และไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) [41]

Complex Coacervation

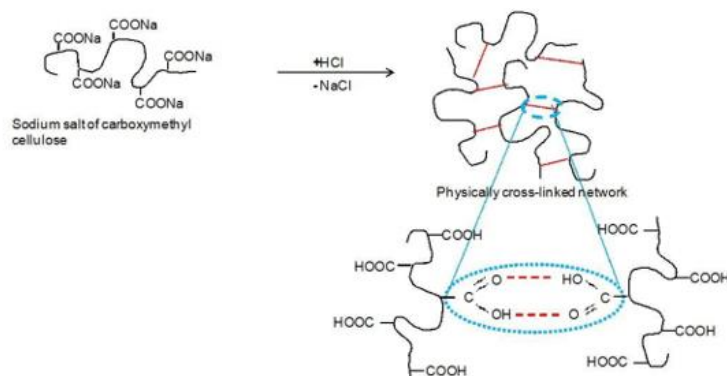
การเตรียมด้วยวิธีนี้สามารถทำได้โดยการนำพอลิเมอร์ที่เป็นประจุลบทำการเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นประจุบวก ดังรูปที่ 2.9 พอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมจะต้องมีประจุตรงข้ามและเมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย



รูปที่ 2.9 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล [41]

พันธะไฮโดรเจน (H-bond)

การเตรียมด้วยวิธีนี้สามารถทำได้โดยอาศัยการสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมระหว่างหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของตัวดูดซับ ในการเตรียมตัวดูดซับชนิดคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose) ดังรูปที่ 2.10 โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลของพอลิคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลส (Poly(Carboxy-Methyl Cellulose)) ด้วยการทำให้สารละลายมีความเป็นกรดโดยใช้กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกและเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยตัวเอง จนทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างกัน



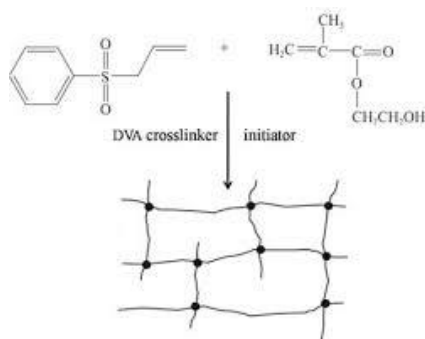
รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์ตัวดูดซับระหว่างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของคาร์บอกซิเมทิลเซลลูโลสที่
ความเป็นกรดต่ำ [42]

2.9.2 การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical Crosslinking)

วิธีการเชื่อมขวางทางเคมีเกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงภายในสายโซ่พอลิเมอร์ โดยอาศัยการเติมสารเคมีเป็นตัวกลางเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่เข้าด้วยกัน เกิดเป็นโครงร่างตาข่าย โดยสารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ ได้แก่ กลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde, GA) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene Glycol Dimethacrylate (EGDMA)) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเชื่อมขวางได้แบ่งออกเป็น 2 วิธีดังนี้

การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-linker)

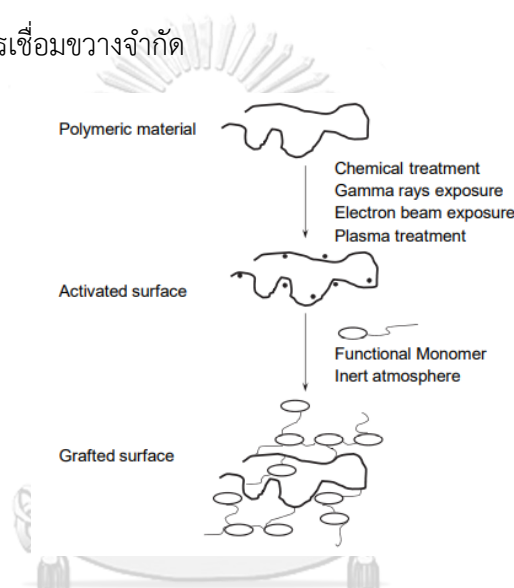
การเติมสารเชื่อมขวางอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้สายโซ่พอลิเมอร์เชื่อมต่อกัน โดยในการสังเคราะห์พอลิเมอร์รวมชนิดแอลิลฟีนิลอะคริลาไมด์และ 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทิลเมทาครีเลท (Allyl Phenyl Sulfone/Hydrophilic 2-Hydroxyethyl Methacrylate (APS-co-HEMA hydrogel)) โดยใช้สารเชื่อมขวางไดไวนิลเบนซีน (DVB) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA [40]

การกราฟต์ (Grafting)

การกราฟต์เป็นวิธีการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันบนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยใช้สารเชื่อมขวางหรือรังสีความร้อนเพื่อช่วยให้เกิดตำแหน่งว่องไว (Active Site) จากนั้นเข้าไปทำการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ เกิดการเชื่อมไขว้กันดังรูปที่ 2.12 ในการเตรียมการกราฟต์โคพอลิเมอร์ของไคโตซานและไดเมทิลอะมิโนเอทิลเมทาคริเลต (Chitosan-PDMAEMA) โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) เป็นสารเชื่อมขวาง เพื่อศึกษาปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อการเชื่อมขวาง พบว่าเมื่อปริมาณการใช้สารเชื่อมขวางมากขึ้น การเชื่อมขวางของโมเลกุลไคโตซานเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของสารเชื่อมขวางมากเกินไปจะไม่มีผลต่อการเชื่อมขวาง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันเอมีนของไคโตซานทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมขวางจำกัด



รูปที่ 2.12 การกราฟต์มอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์ [41]

2.10 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Isotherm Adsorption)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นความสัมพันธ์ในสภาวะสมดุล เกิดขึ้นระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ [43] และนำไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในน้ำ เป็นแกนนอนและปริมาณของตัวดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ซึ่งหาความสามารถในการดูดซับเมื่อเทียบกับชนิดสารดูดซับที่ดีที่สุด [44]

สำหรับไอโซเทิร์มของการดูดซับที่นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ได้แก่ ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich)

2.10.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์เป็นแบบง่ายที่สุด โดยมีข้อกำหนดที่ว่าพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันทั้งหมด (Homogeneous Adsorption Surface) และกลไกการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) โดยที่โมเลกุลของตัวดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน เนื่องจากปริมาณบนพื้นผิวดูดซับมีจำกัด ไม่สามารถย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกับตัวดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งจะถูกปกคลุมด้วยตัวดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจนตัวดูดซับถูกดูดซับจนอิ่มตัว [19]

จากการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ดังสมการ 2.1

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

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่ความเข้มข้นสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_m คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_L คือ ค่าคงที่ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์สามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.2

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

จากสมการที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรง โดย q_m สามารถหาได้จากจุดตัดแกนตั้งและความชันของเส้นตรงซึ่งเป็นค่า K_L

2.10.2 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิชสามารถใช้ได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมี ซึ่งอธิบายการดูดซับสารประกอบประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้หลายประเภท โดยพัฒนามาจากไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ ซึ่งลักษณะของไอโซเทิร์มชนิดนี้มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (Heterogeneous Adsorption Surface) เป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

เมื่อพิจารณาไอโซเทิร์มแบบฟรุนดลิชสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ดังสมการ 2.3

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

เมื่อ q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_F คือ ค่าคงที่ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบฟรุนดลิช (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

n คือ ค่าคงที่ทางพลังงานการดูดซับ

สมการไอโซเทิร์มแบบฟรุนดลิชสามารถจัดให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ 2.4

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

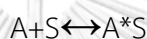
ค่าคงที่ n ในสมการฟรุนดลิชสามารถแบ่งได้ 3 กรณี เมื่อ $1/n$ เท่ากับ 1 ไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งเป็นไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง เมื่อ $1/n$ มีค่าน้อยกว่า 1 เป็น ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์เนื่องจากปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีจำกัด และเมื่อ $1/n$ มากกว่า 1 การดูดซับเกิดขึ้นทั้งแบบแลงเมียร์และเส้นตรง บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ [43]

2.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Kinetic Adsorption)

จลนพลศาสตร์การดูดซับสามารถอธิบายอัตราเร็วการดูดซับ โดยสมการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order) และอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order) สามารถอธิบายการดูดซับพื้นผิวของตัวดูดซับได้เป็นอย่างดี

2.11.1 อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-First Order) [45]

สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมสามารถอธิบายสมมติฐานการดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Interaction) ระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ เป็นลักษณะการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณอัตราเร็วการดูดซับโดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) S คือ ตัวดูดซับ (Adsorbent) และ A*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed Compound) โดยสมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมแสดงดังสมการ 2.5

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.5)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_t = t$ จะได้ดังสมการ 2.6

$$\ln \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right) = k_1 t \quad (2.6)$$

สมการอัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียมสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังสมการ 2.7

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

เมื่อ k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับหนึ่งเทียม (ลิตรต่ออนาที)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

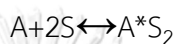
q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อทำเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้กราฟความชันเท่ากับ $k_1/2.303$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2.11.2 อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (Pseudo-Second Order)

สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมเป็นสมการที่อธิบายภายใต้การดูดซับที่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active Site) จากปฏิกิริยาการดูดซับดังนี้



สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมแสดงดังสมการ 2.8

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.8)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t = 0$ จนถึง $t = t$ และตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_t = t$ จะได้ดังสมการ 2.9

$$\ln \left(\frac{q_e}{q_e - q_t} \right) = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.9)$$

สมการอัตราการดูดซับอันดับสองเทียมสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นได้ดังสมการ 2.10

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

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับอันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม นาที)

q_e คือ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นสถานะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ความสามารถในการดูดซับที่ความเข้มข้นที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้กราฟความชันเท่ากับ $1/q_e$ และจะได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

2.12 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption Thermodynamics) [45]

กระบวนการดูดซับเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้ เนื่องจากสารที่ถูกดูดซับสามารถหลุดออกจากตัวดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล ซึ่งอธิบายด้วยหลักการของอุณหพลศาสตร์ ประกอบไปด้วย ค่าพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (ΔG°) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (ΔH°) และการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (ΔS°) สามารถอธิบายถึงประเภทของปฏิกิริยาและการเกิดขึ้นได้เอง ดังสมการ 2.11-2.13

$$K_C = \frac{C_{ae}}{C_e} \quad (2.11)$$

$$\Delta G^\circ = -RT \log K_C \quad (2.12)$$

$$\log K_C = \frac{\Delta S^\circ}{2.303R} - \frac{\Delta H^\circ}{2.303RT} \quad (2.13)$$

เมื่อ ΔG° คือ ค่าพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย (กิโลจูลต่อโมล)

ΔH° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (กิโลจูลต่อโมล)

ΔS° คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (กิโลจูลต่อโมล)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อโมลเคลวิน)

K_C คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ

C_{ae} คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ilgina และคณะ [46] ศึกษาการดูดซับสีย้อมในน้ำทิ้งเพื่อต้องการน้ำที่สะอาดและมีคุณภาพ โดยการสังเคราะห์ตัวดูดซับไฮโดรเจลประจุลบด้วยวิธีโคพอลิเมอร์ไฮเซนจาก Acrylamide หรือ 2-Hydroxyethyl Methacrylate เป็นโคมอนอเมอร์ผสมกับ *N*-tert-butylmaleamic acid เป็นมอนอเมอร์ประจุลบและทำการเติม *N*',*N*-methylenebisacrylamide เป็นตัวเชื่อมขวางโครงร่างวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างทางเคมีโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม เมทิลีนบลูและสีย้อมคริสตัลไวโอเลตบนไฮโดรเจล ผลของอัตราส่วนของโคมอนอเมอร์ ปริมาณของตัวดูดซับไฮโดรเจลและผลของอุณหภูมิ การฟื้นฟูตัวดูดซับไฮโดรเจล TBMAC-co-based มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมที่มีต้นทุนต่ำ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งและไฮโดรเจลยังแสดงให้เห็นถึงการเลือกดูดซับสีย้อมประจุบวกในสีย้อมที่มีการผสมกันของประจุบวกและประจุลบทำให้สามารถกำจัดสีย้อมที่เป็นอันตรายจากอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Mittal และคณะ [47] ศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับและแบบจำลองทางจลนศาสตร์จากการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนไทเทเนียมออกไซด์อนุภาคนาโนเคลือบบนตัวดูดซับไฮโดรเจลเป็นไฮโดรเจลนาโนคอมพอสิต สังเคราะห์ตัวดูดซับโดยการต่อเติมกิ่งของ Polyacrylamide บน gum ghatti และใช้ *N*',*N*-methylenebisacrylamide เป็นตัวเชื่อมขวางเป็นไฮโดรเจล (PAAm-g-Gg) และทำการเติมไทเทเนียมออกไซด์อนุภาคนาโนในปริมาณที่ต่างกันเข้าไปในไฮโดรเจลในช่วงการเกิดปฏิกิริยาการต่อเติมกิ่ง ซึ่งการโคพอลิเมอร์ไฮเซนของการต่อเติมกิ่งและรูปแบบของไฮโดรเจลนาโนคอมพอสิตยืนยันได้จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวตัวดูดซับ ศึกษาการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูแบบแบทช์พบว่าค่าการดูดซับมีค่าสูงซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิความแข็งแรงของไอออน และปริมาณของตัวดูดซับ พบว่ากระบวนการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูตามแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองเหมาะสมและไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ให้ค่าการดูดซับอยู่ที่ 1,305.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลของอุณหพลศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูบนพื้นผิวไฮโดรเจลนาโนคอมพอสิตสามารถเกิดขึ้นได้เองเป็นการดูดกลืนความร้อนและเป็นกระบวนการดูดซับทางกายภาพ แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลนาโนคอมพอสิตมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมประจุบวกมากกว่าสีย้อมประจุลบ และการดูดซับ-การคายดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ หารอบ จึงสรุปได้ว่าไฮโดรเจลนาโนคอมพอสิตมีศักยภาพในการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสารพิษด้วยสีย้อมประจุบวก

Nakhjiri และคณะ [48] ศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับไฮโดรเจลพอลิเมอร์โดยใช้ Acrylic acid (AA), Vinylphosphonic acid (VPA) และ *N*-maleyl chitosan เตรียมได้จากปฏิกิริยา Acylation ระหว่าง Maleic anhydride และไคโตซาน สังเคราะห์ได้ *N*-maleyl chitosan นำไปเชื่อมขวางบนไฮโดรเจล P(AA-co-VPA) นำมาใช้สำหรับการดูดซับสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตและสีย้อมเมทิลีนบลูจากสารละลาย ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและโครงสร้างการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ผลของตัวแปรการดูดซับสีย้อม เช่น ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณของตัวดูดซับ ไอโซเทิร์มของการดูดซับวิเคราะห์ได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิโดยใช้แบบจำลองของแลงเมียร์ ฟรุนดลิช เทมคิน และ เรดลิค-เพเทอร์ ซึ่งไอโซเทิร์มของเรดลิค-เพเทอร์เป็นค่าการดูดซับที่เหมาะสม สำหรับจลนศาสตร์ของการดูดซับวิเคราะห์ได้โดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง จลนศาสตร์อันดับสอง การแพร่กระจายในรูพรุน และการแพร่เข้าสู่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่สารละลายสีย้อม 20 30 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และจลนศาสตร์อันดับสองให้ค่าการดูดซับที่เหมาะสม ค่าการดูดซับสูงสุดของไฮโดรเจลพอลิเมอร์ในการกำจัดสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ตและสีย้อมเมทิลีนบลูที่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ที่ 64.56 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 66.89 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิศาสตร์ในกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาการดูดซับความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เอง อย่างไรก็ตาม การดูดซับ-การคายซับสำหรับตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้สี่รอบ

Jamnongkan และคณะ [49] ศึกษาการดูดซับโลหะทองแดง (II) บนไฮโดรเจลพอลิเมอร์โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมกับไคโตซานที่อัตราส่วนต่างกัน การดูดซับน้ำจากไฮโดรเจลพอลิเมอร์ตรวจสอบโดยการวัดอัตราการบวมของไฮโดรเจลพอลิเมอร์ พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไคโตซานเชื่อมขวางกันโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์และที่อัตราการบวมของไฮโดรเจลพอลิเมอร์ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/ไคโตซาน 100/0 มีอัตราการบวมที่สูงเมื่อเพิ่มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลายน้ำที่ดี นอกจากนี้ตัวดูดซับไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไคโตซานยังมีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง (II) ได้ ประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไฮโดรเจลพอลิเมอร์ ค่าการดูดซับสูงเมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานในโครงสร้างตาข่าย

Jaseela และคณะ [50] ศึกษาการสังเคราะห์นาโนคอมพอสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไทเทเนียมออกไซด์ในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและสีย้อมฟลูออเรสเซนต์ ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาได้จาก SEM คอมพอสิตของไทเทเนียมออกไซด์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดรูพรุนที่เล็กมาก นอกจากนี้ใน EDX spectra แสดงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และ ไทเทเนียม อย่างชัดเจน และเมื่อทดสอบการดูดซับสีย้อมสามารถกำจัดสีย้อมได้ถึง

ร้อยละ 97.1 ภายในเวลา 8 นาที และประจุพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นประจุบวกซึ่งทำให้สามารถเลือกดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูออกจากสีย้อมเมทิลอเรนจ์

Marrakchi และคณะ [51] การเชื่อมขวางคอมพอสิตไคโตซาน/เซฟิโไนด์ สามารถเตรียมได้จากดินเซฟิโไนด์และไคโตซานโดยใช้ Epichlorohydrin เป็นสารเชื่อมขวาง ในอัตราส่วนคอมพอสิตไคโตซานและดินเซฟิโไนด์ CS50SP50 เป็นตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูและรีแอกทีฟออเรนจ์ ผลของลักษณะสัณฐานวิทยาปรากฏว่าพื้นผิวของเซฟิโไนด์มีขนาดรูพรุนที่เล็กและมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และไคโตซานแสดงพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน เมื่อทำการเติมเซฟิโไนด์ลงบนไคโตซานพบว่าขนาดรูพรุนบนพื้นผิวมีขนาดที่กว้างมากขึ้น พื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะคล้ายรังผึ้ง คอมพอสิตถูกเลือกให้เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 0.2 กรัม ในสารละลายสีย้อม 100 มิลลิลิตร สามารถในการกำจัดสีย้อมเมทิลีนบลูประมาณ 41 มิลลิกรัมต่อกรัม และสีย้อมรีแอกทีฟออเรนจ์ประมาณ 191 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการทดลองพบว่าคอมพอสิตไคโตซาน/เซฟิโไนด์สำหรับใช้ในการดูดซับสีย้อมทั้งสองดี เป็นตัวดูดซับที่มีต้นทุนที่ต่ำในการกำจัดสีย้อมประจุบวก และสีย้อมรีแอกทีฟ

Thomas และคณะ [52] ทำการศึกษาการสังเคราะห์คอมพอสิตไคโตซานโดยใช้กรดแอซิดิกและเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (Tetraethylorthosilicate, TEOS) โดยใช้ซิลิกาเป็นสารเชื่อมขวางด้วยวิธีโซล-เจล (Sol-Gel) ในการดูดซับเมทิลีนบลู โดยทำการสังเคราะห์แบบชั้นเดียวเพื่อให้ได้คอมพอสิตไคโตซาน ที่สภาวะความเป็นกรดต่างต่างกัน โดยทำการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (FTIR) การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) เพื่อยืนยันการมีอยู่ของสารประกอบ เมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิตกรดแอซิดิก-ไคโตซาน (AA-CHI), เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต-ไคโตซาน (TEOS-CHI) กรดแอซิดิก-เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต-ไคโตซาน (AA-TEOS-CHI) และแอซิดิก-ไคโตซาน-เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (AA-CHI-TEOS) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 40 ชั่วโมง ร้อยละการดูดซับลดลงที่สภาวะเป็นกรด และพบว่าคอมพอสิต AA-CHI มีร้อยละการดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 82 ในทางตรงกันข้าม ร้อยละการดูดซับที่สภาวะเป็นกลางมีประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงกว่าที่สภาวะเป็นกรด และเมื่อทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองเชิงทวีกำลัง (Exponential Model) พบว่า ค่า R-Squared ของคอมพอสิต AA-CHI ที่ความเป็นกรดต่าง 2.6 และที่ 7.2 การดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลูยังคงมีค่าคงที่ กลไกการดูดซับสามารถอธิบายได้จากแบบจำลอง Korsmeyer-Peppas และ Hixson-Crowell พบว่าคอมพอสิตได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างหรือพื้นที่ผิวในการดูดซับสีย้อมเมทิลีนบลู จากการคำนวณแบบจำลอง Hixson-Crowell ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือค่าสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson)

มีค่ามากกว่า 0.5 แสดงให้เห็นว่าคอมพอสิต AA-CHI และ AA-TEOS-CHI มีความไวต่อความเป็นกรด ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้งานทางชีวการแพทย์ได้เป็นอย่างดี

Muhammad และคณะ [53] ศึกษาการเตรียมโคโตซาน (CS) /พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) แบบเม็ดบีต (Beads) โดยใช้เตตระเอธิลอร์โธไซเลน (TEOS) เป็นสารเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความไวในการดูดซับและเพื่อเพิ่มเสถียรภาพทางเคมีและเชิงกลได้ ศึกษาความสามารถในการละลายทางเคมี และพฤติกรรมการบวมของเม็ดบีต โดยเฉพาะที่ความเป็นกรด วิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับด้วย อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการกำจัดไอออนของ ทองแดง (Cu^{2+}) ออกจากน้ำเสีย ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะ และเวลาในการดูดซับ พบว่าจลนศาสตร์การดูดซับเป็นแบบจำลองการแพร่กระจายระหว่างอนุภาค ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบแลงเมียร์สามารถกำจัด ไอออนของโลหะสูงสุด 224.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 313 เคลวิน อุณหพลศาสตร์พบว่าสามารถเกิดขึ้นได้เองและปฏิกิริยาการดูดซับเป็นแบบการดูดความร้อน

Tetyana และคณะ [54] ได้ศึกษาการเตรียมโคโตซานและเตตระเอธิลอร์โธไซเลน (TEOS) ด้วยวิธีโซล-เจลกลายเป็นนาโนคอมพอสิตโคโตซาน-ซิลิกา สามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (DTA) การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจนและไนโตรเจน (CHN) วิเคราะห์ อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์ธาตุ และสารประกอบ (FTIR) การดูดซับออกไซด์ของวานาเดียม (Vanadium, V) โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo) และโครเมียม (Chromium, Cr) ออกจากสารละลาย โดยใช้กลูตาราลดีไฮด์ เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าสามารถดูดซับไอออนของวานาเดียม 9.9 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่สภาวะเป็นกลาง โมลิบดีนัม 121.0 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่สภาวะความเป็นกรด 2.5 และ 37.4 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่สภาวะเป็นกลาง และโครเมียม 35.2 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์คอมพอสิตสามารถกำจัดไอออนของโลหะได้ภายใน 1 วัน

Fadzallah และคณะ [55] ศึกษาปฏิกิริยาระหว่างไอออนโคโตซาน-กรดออกซาลิก ด้วยวิธี เมมเบรนอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการเติมกรดออกซาลิก (OA) ที่ปริมาณ 10-15% โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยา ไอออนิก ระหว่างโคโตซานและกรดออกซาลิกในอิเล็กโทรไลต์ที่มีปริมาณของกรดออกซาลิกต่างกัน ลักษณะสัณฐานวิทยาสามารถอธิบายได้จากการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (FTIR) ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1,400-1,800 เซนติเมตร-1 ความสามารถในการเกิดไอออนของอิเล็กโทรไลต์พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ OA สูงถึง 40% โดยน้ำหนัก (OA40) เมมเบรนมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของ OA ทำให้สามารถเชื่อมโยงกับไอออนของโคโตซานจนหมด จากการวิเคราะห์การ

เส้นโค้งเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าไคโตซาน-กรดออกซาลิกที่ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก เป็นออสัญฐานมากที่สุดโดยมีระดับความเป็นผลึกเพียง 13% การวิเคราะห์ทางความร้อน (TGA) แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนที่มีกรดออกซาลิก 10-40% โดยน้ำหนัก มีความคงตัวและรักษาสภาพได้ถึง 168 องศาเซลเซียส

John และคณะ [56] ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการเชื่อมขวางไคโตซาน/กรดออกซาลิก(ChOxb) ดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 195 ในน้ำเสีย วิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวได้จากอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ N_2 Adsorption/Desorption วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันพื้นที่ผิวด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) ระหว่างหมู่อะมิโนที่มีประจุบวกของไคโตซานและไอออนของออกซาลेट (ความเข้มข้นลดลงและการเปลี่ยนแปลงเป็นแถบอะมิโน (II)) พบว่ามีร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 195 สูงสุด 90.6 ที่ความเป็นกรด 4 (ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร) ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (Q_m) 110.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเป็นไอโซเทิร์มแบบ Redlich-Peterson สามารถอธิบายความสามารถในการดูดซับดี อุณหพลศาสตร์ของการดูดซับพบว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ดี แบบจำลองการแพร่กระจายสามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ได้ดีที่สุด แสดงให้เห็นว่ากลไกการแพร่กระจายและการดูดซับบนพื้นผิวสามารถทำงานได้พร้อมกัน ดังนั้น ChOxb ไฮโดรเจล มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 195 ด้วยการเชื่อมขวางพันธะไอออนิกของไคโตซานและกรดออกซาลิก สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับและปรับปรุงพื้นผิวของไฮโดรเจลได้เป็นอย่างดี

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.1.1 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เช่น บีกเกอร์ ขวดวัดปริมาตร ขวดรูปชมพู่ แท่งแก้ว คนสาร
- 3.1.2 กระจกใส
- 3.1.3 ภาตสำหรับขึ้นรูปตัวดูดซับ
- 3.1.4 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (Analytical Balance) ยี่ห้อ Precisa รุ่น XT 220A
- 3.1.5 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7
- 3.1.6 ไมโครปิเปต (Micropipette) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Labpipette
- 3.1.7 เครื่องเขย่าสารแบบวงกลม (Orbital Shaker) ยี่ห้อ Biosan รุ่น PSU-10i
- 3.1.8 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบเขย่าได้ (Water Bath and Shaker) ยี่ห้อ GFL รุ่น GFL 1083
- 3.1.9 ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot Air Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UE200
- 3.1.10 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter) ยี่ห้อ Eutech รุ่น PC2700
- 3.1.11 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ Jasco รุ่น V-530
- 3.1.12 เครื่องวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR) ยี่ห้อ Thermo Fisher Scientific รุ่น Nicolet iS5
- 3.1.13 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น JEOL JSM-IT-500HR

3.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- 3.2.1 สีรีแอคทีฟเรด 120 (Reactive Red 120) Grade AR จากบริษัท Sigma-Aldrich
- 3.2.2 สีเมทิลีนบลู (Methylene Blue) Grade Laboratory Reagent จากบริษัท Kemaus
- 3.2.3 สีเมทิล ออเรนจ์ (Methyl Orange) Grade AR จากบริษัท Kemaus
- 3.2.4 สีโรดามีน บี (Rhodamine B) Practical Grade จากบริษัท Himedia
- 3.2.5 กรดออกซาลิก (Oxalic Acid) Grade AR จากบริษัท Ajax Finechem

- 3.2.6 เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (Tetraethyl Orthosilicate) Grade GC จากบริษัท Aldrich chemistry
- 3.2.7 กรดแอสติก (Acetic Acid) Grade AR จากบริษัท Quality Reagent Chemical
- 3.2.8 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane) Technical Grade จากบริษัท Aldrich Chemistry
- 3.2.9 ไคโตซานแบบแผ่น (Chitosan) ร้อยละการกำจัดหมู่อะซิทิล (%DD) มากกว่า 95% จากบริษัท S.Y.K.Enterprise
- 3.2.10 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ระดับการไฮโดรไลซิสมากกว่า 98% จากบริษัท BDH Medical Supply co.,Ltd.
- 3.2.11 ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ความเข้มข้น 37% Grade AR จากบริษัท Carlo erba
- 3.2.12 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) Grade AR จากบริษัท Quality Reagent Chemical
- 3.2.13 กรดไนตริก (Nitric Acid) ความเข้มข้น 65% Grade AR จากบริษัท Quality Reagent Chemical
- 3.2.14 โพแทสเซียมไนเตรต (Potassium Nitrate) Grade AR จากบริษัท Carlo erba

3.3 วิธีการเตรียมตัวคอมพอลิต

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายไคโตซาน

ละลายไคโตซานในสารละลายกรดแอสติกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ปริมาตร 125 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นที่ออกแบบไว้ จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer) ที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อจะได้สารละลายไคโตซานที่มีลักษณะเป็นของเหลวเหนียวใส

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ให้ได้ความเข้มข้นที่ออกแบบไว้ จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีลักษณะของเหลวสีเหลืองใส

3.3.3 ขั้นตอนการเตรียมคอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ทำการผสมสารละลายโคโตนและสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ตามสัดส่วนที่ออกแบบ จากนั้นทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการเทสารละลายที่ได้ลงบนกระดาษไขเพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มแล้วนำไปอบให้แห้งเป็นแผ่นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้คอมพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแข็งบางสีเหลืองใสและมีพื้นผิวที่เรียบ จากนั้นนำมาตัดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมให้มีขนาดที่ขนาด 0.5x0.5 เซนติเมตร กรณีการเชื่อมขวาง จะทำการหยดสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิกตามสัดส่วนที่กำหนด และกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้สารละลายที่มีลักษณะเหนียวข้น แล้วค่อยนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มตามที่กล่าวข้างต้น กรณีการกราฟหมู่ฟังก์ชันเอมีน เติม 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (3-Aminopropyltriethoxysilane) ลงไปในสารละลายที่เติมสารเชื่อมขวางแล้ว ทำการกวนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก กวนอย่างช้า ๆ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จะได้สารละลายที่มีลักษณะเหนียวข้นสีเหลือง แล้วค่อยนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มตามที่กล่าวข้างต้น

ตารางที่ 3.1 แสดงการชื่อเรียกของคอมพอลิเมอร์ต่าง ๆ และสัญลักษณ์

ชื่อคอมพอลิเมอร์	สัญลักษณ์
สัดส่วนคอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต	CS:PVA_TEOS
สัดส่วนคอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก	CS:PVA_OA
คอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก	3CS:7PVA_TEOS:OA
คอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก 1.5:0.5 ในการกราฟหมู่ฟังก์ชันเอมีน	3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES

3.3.4 การเตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟเรด 120

ทำการชั่งน้ำหนักสีรีแอกทีฟเรด 120 ตามความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นทำการละลายสีรีแอกทีฟเรด 120 โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร

3.4 การทดลอง

3.4.1 การทดสอบการดูดซับ

3.4.1.1 เทสารละลายสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่เตรียมจากขั้นตอน 3.3.4 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.4.1.2 นำคอมพอสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ในข้อ 3.3.1 ไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมากรองน้ำออก

3.4.1.3 นำคอมพอสิตสังเคราะห์ปริมาณตามที่ออกแบบใส่ลงในขวดรูปชมพู่แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าสารที่ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.4.1.4 ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายสีรีแอกทีฟเรด 120 ทั้งก่อนและหลังการดูดซับปริมาตร 5 มิลลิลิตร ตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้

3.4.1.5 นำตัวอย่างที่ได้จากการเก็บตามช่วงเวลาต่าง ๆ วิเคราะห์ความเข้มข้นของสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่เหลืออยู่โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ที่ช่วงความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร

3.4.1.6 นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์มาคำนวณร้อยละการกำจัดสีย้อมดังสมการ 3.1

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

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.4.1.7 คำนวณความสามารถในการดูดซับสารละลาย (Adsorption Capacity) ดังสมการ 3.2

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (3.2)$$

เมื่อ q_t คือ ความสามารถในการดูดซับสารละลายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V คือ ปริมาตรของสารละลายที่มีสารถูกดูดซับอยู่ (มิลลิลิตร)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

3.4.1.8 ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ โดยให้ตัวแปรอื่นคงที่ แล้วทำซ้ำตามที่กล่าวข้างต้น

สำหรับตัวแปรและช่วงของตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาผลต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 โดยกระบวนการดูดซับ มีดังนี้

- อัตราส่วนน้ำหนักของไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ 1:9 3:7 5:5 7:3 และ 9:1
- อัตราส่วนน้ำหนักของสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก 2.0:0.0 1.5:0.5 1.0:1.0 0.5:1.5 และ 0.0:2.0
- ปริมาณหมู่ฟังก์ชันเอมีน 0.05 0.10 0.30 และ 0.50 กรัม
- ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 50 100 300 500 700 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ปริมาณของคอมพอสิต 0.1 0.5 และ 0.9 กรัม
- ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีย้อม 3 5 7 และ 9
- เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 15 30 45 60 90 120 180 24 300 360 420 และ 480 นาที
- อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส

3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคอมพอสิต

3.5.1 การบวมตัว

การวิเคราะห์การบวมตัวของคอมพอสิตสามารถทำได้โดยเตรียมคอมพอสิตที่ได้จากการสังเคราะห์ตามปริมาณที่ต้องการนำไปแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองน้ำออก จะได้คอมพอสิตที่มีลักษณะเปียก นำคอมพอสิตที่ได้คำนวณหาค่าการบวมตัวของคอมพอสิตจากสมการ 3.3

$$\%P_S = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ P_S คือ ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต

W_i คือ น้ำหนักของคอมพอสิตแห้ง (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักของคอมพอสิตหลังจากการแช่น้ำ (กรัม)

3.5.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FTIR)

การศึกษามูฟุงก์ชันของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เริ่มต้นวิเคราะห์โดยการตัดสารตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยวางลงบนแท่นวางตัวอย่างที่สะอาด จากนั้นจึงหมุนให้หัวเพชรกดลงบนตัวอย่างให้แนบสนิทแล้ววิเคราะห์ตั้งแต่ความยาวคลื่น 500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ หลังจากใช้โปรแกรมเพื่อคำนวณด้วยสมการฟูเรียร์จะเกิดเป็นรูปแบบการรายงานผลที่พล็อตระหว่างร้อยละการส่องผ่านแสง (% Transmittance) เทียบกับความถี่ (Wavenumber, cm⁻¹)

3.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscopy, SEM)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยมีหลักการทำงานคือ ลำแสงอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปยังบนผิวของวัตถุแล้วแสดงเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ โดยนำตัวอย่างที่วิเคราะห์วางบนแท่นวางตัวอย่าง (Aluminum Stubs) ที่ผ่านการเคลือบด้วยทอง 99.9% บนพื้นผิวโดยใช้แก๊สอาร์กอนเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของทองที่เคลือบผิวตัวอย่าง การวิเคราะห์ตัวอย่างลักษณะทางสัณฐานวิทยาในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope รุ่น JEOL JSM-IT-500HR

3.5.4 การวิเคราะห์ผลรวมของประจุบนพื้นผิวคอมพอสิตเท่ากับศูนย์ (Point of Zero Charge, PZC)

นำคอมพอสิตโคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 0.2 กรัม แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองตัวดูดซับออกจากน้ำกลั่น และทำการเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไนเตรดที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ทำการกวนอย่างต่อเนื่องแล้วปรับค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 3 5 7 9 และ 11 โดยใช้สารละลายกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง วัดความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังจากการเขย่าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (pH) กับความแตกต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายและเริ่มต้น (ΔpH)

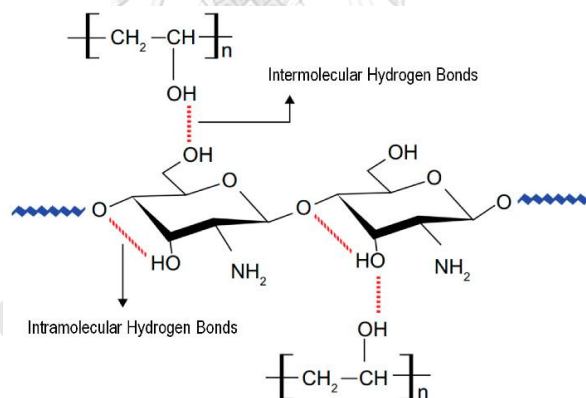


บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวเกี่ยวกับผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยได้แบ่งออกเป็น การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับคอมพอสิต อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาต่าง ๆ ด้วยคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวาง 2 ชนิด ได้แก่ เตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิก และศึกษาการกราฟต์หมู่ฟังก์ชัน เอมีนบนคอมพอสิต มีรายละเอียดดังนี้

ในงานวิจัยจึงได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยทำการผสมกันระหว่างไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลไคโตซานกับโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังรูปที่ 4.1 และเมื่อนำตัวดูดซับไปทำการแช่ในน้ำพบว่าตัวดูดซับไม่สามารถคงสภาพความเป็นแผ่นไว้ได้ เนื่องจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติในการละลายในน้ำได้ดีจึงสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและลดความสามารถในการละลายในน้ำ โดยได้ทำการเติมสารเชื่อมขวางระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง



รูปที่ 4.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและภายในโมเลกุลหลังจากการผสมกับระหว่างไคโตซานกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [57]

ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้มีการนำสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิกมาใช้สำหรับการเชื่อมขวางไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อทำให้คอมพอสิตมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและมีกลไกเชิงกลที่ดี อีกทั้งสารทั้งสองเป็นสารเชื่อมขวางที่ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษทำให้คอมพอสิตมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของคอมพอสิต

4.1.1 การบวมตัว

ศึกษาการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต (CS:PVA_TEOS) โดยมีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.1

จากตาราง พบว่าไคโตซาน (1:0) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (0:1) มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตเท่ากับ 830 และ 248 ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า ไคโตซานมีร้อยละการบวมตัวสูงเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติการอุ้มน้ำได้ดี [27] และเมื่อนำมาผสมเกิดเป็นคอมพอสิตพบว่า การเพิ่มปริมาณไคโตซานที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงสุดเท่ากับ 1,296 เป็นผลมาจากเมื่อนำคอมพอสิตไปแช่ในน้ำจนเกิดการอิมมersionแล้ว หมูไฮดรอกซิลและหมู่เอมีนที่มีสภาพความเป็นขั้วสูงในโครงสร้างของคอมพอสิตทำให้สามารถเกิดแรงระหว่างโมเลกุลกับน้ำ [58] และเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำเข้าสู่ตัวคอมพอสิต ทำให้คอมพอสิตมีการบวมตัว มีความยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ ดังนั้นพฤติกรรมการบวมได้รับอิทธิพลมาจากหมูไฮดรอกซิล เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันในการดูดซับน้ำ และเพิ่มความชอบน้ำให้กับคอมพอสิต [59] และจากการทดลองเมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานจนถึง 9CS:1PVA_TEOS ลักษณะทางกายภาพเมื่อผ่านการดูดซับทำให้คอมพอสิตไม่สามารถคงสภาพของแผ่น เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมขวางไม่เพียงพอ และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บนคอมพอสิตที่มีความชอบน้ำสร้างพันธะกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็ก ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง

ตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอรโธซิลิเกต

สัดส่วนไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CS:PVA_TEOS)	ร้อยละการบวมของคอมพอสิต (%P _s)
1:0	830
0:1	248
1:9	896
3:7	1,296
5:5	893
7:3	842
9:1	744

ศึกษาการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก (CS:PVA_OA) โดยร้อยละการบวมของคอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.2

จากตารางพบว่า พบว่าไคโตซาน (1:0) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (0:1) มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตเท่ากับ 830 และ 248 ตามลำดับ และเมื่อได้ทำการผสมระหว่างไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่คอมพอสิต 1CS:9PVA_OA พบว่าร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตเท่ากับ 168 โดยหากเปรียบเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะพบว่าการบวมตัวของคอมพอสิตน้อยกว่าเป็นผลมาจากกรดออกซาลิกได้เข้าไปทำการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ทำให้การบวมตัวของคอมพอสิตน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานบนคอมพอสิตจนถึง 7CS:3PVA_OA มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงสุดอยู่ที่ 318 เป็นผลมาจากการเติมสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกได้เข้าไปสร้างพันธะกับหมู่อะมิโนของไคโตซานและหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บนคอมพอสิตบางส่วน [60] ทำให้ยังคงเหลือหมู่ไฮดรอกซิลที่มีความชอบน้ำ หากเพิ่มปริมาณไคโตซานจนถึงคอมพอสิต 9CS:1PVA_OA พบว่าร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตลดลง เนื่องจากที่สัดส่วนนี้บนคอมพอสิตมีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์น้อย สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลบนคอมพอสิต ดังนั้นทำให้เกิดข้อจำกัดในการเคลื่อนตัวของสายโซ่ [61] ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง

เมื่อทำการเปรียบเทียบสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) และสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก (OA) พบว่า สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกสามารถเชื่อมขวางได้ทั้งหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีน ทำให้สายโซ่ของไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีตำแหน่งการเชื่อมขวางกันได้มากกว่าในกรณีของสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต จึงทำให้เกิดการบวมตัวน้อยกว่า นอกจากนี้การเติมสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตเป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลจะทำปฏิกิริยาพันธะทางไฟฟ้าสถิตเพิ่มขึ้นระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ [62] ทำให้สามารถเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำเข้าสู่คอมพอสิต และคอมพอสิตที่ทำการเชื่อมขวางด้วยเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตจะมีความนุ่มและง่ายต่อการแตกของรูปทรงง่ายกว่าคอมพอสิตที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกรดออกซาลิก จึงจะใช้สารเชื่อมขวางผสมระหว่างเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิก โดยเลือกใช้คอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 เพราะให้ค่าการบวมตัวสูงสุดเมื่อเชื่อมขวางด้วยสารเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก

สัดส่วนไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CS:PVA_OA)	ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต (%P _r)
1:0	830
0:1	248
1:9	168
3:7	225
5:5	316
7:3	318
9:1	258

ศึกษาการบวมตัวของคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยใช้สัดส่วนของสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกต่าง ๆ มีร้อยละการบวมของคอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางพบว่า คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA มีร้อยละการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 485 หากเพิ่มปริมาณกรดออกซาลิกจนถึง 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA มีร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 336 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS (2:0) ที่มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตที่ 1,296 พบว่าการบวมตัวของคอมพอสิตลดลงเมื่อมีการเพิ่มสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก เนื่องจากกรดออกซาลิกได้ทำการเชื่อมขวางหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และโคโตซาน ส่งผลให้โครงสร้างบนคอมพอสิตมีความหนาแน่นมากขึ้น ทำให้ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตลดลง [63]

และเมื่อนำคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA ทำการกราฟต์ APTES ที่ปริมาณต่าง ๆ ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยการเพิ่มปริมาณ APTES ที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.05APTES มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตอยู่ที่ 325 ซึ่งหากเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5:0.5OA พบว่าร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตลดลงเมื่อกราฟต์ APTES เนื่องจากเป็นการกราฟต์บนหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของคอมพอสิต ซึ่งเป็นการลดความชอบน้ำบนคอมพอสิต ทำให้ร้อยละการบวมลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณการกราฟต์ APTES จนถึงที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.5APTES ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงถึง 660 อาจเป็นเพราะการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนทำให้พื้นผิวบนคอมพอสิตมีความอ่อนลง [64] ดังนั้นปริมาณในการกราฟต์ APTES ส่งผลต่อการบวมตัวของคอมพอสิต

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สัดส่วนของสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกต่าง ๆ

สัดส่วนของสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก	ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต (%P _r)
2:0	1,283
1.5:0.5	485
1.0:1.0	427
0.5:1.5	336
0:2	225

ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES ที่ปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนต่าง ๆ

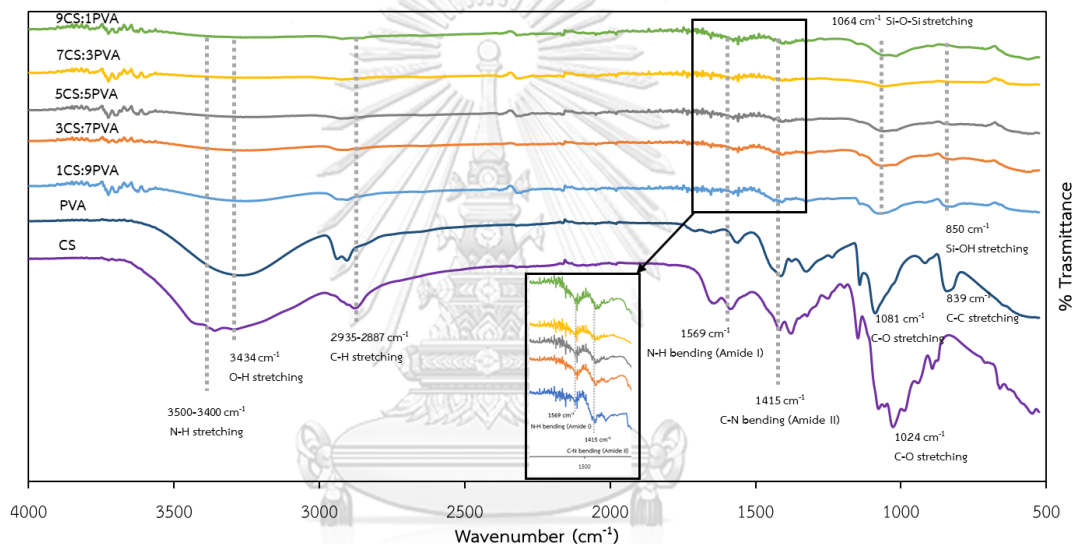
ปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน (กรัม)	ร้อยละการบวมตัวของคอมพอลิเมอร์ (%P _s)
0	485
0.05	325
0.1	352
0.3	447
0.5	660

4.1.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนคอมพอลิเมอร์

หมู่ฟังก์ชันบนคอมพอลิเมอร์โคโคซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่างๆ (CS:PVA) โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัมอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด 500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ แสดงผลดังรูปที่ 4.2

ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมของโคโคซาน (CS) จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ [65, 66] ตามลำดับ และหมู่ฟังก์ชัน C-O Stretching ที่ความถี่ 1,024 เซนติเมตร⁻¹ [67] และสเปกตรัมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,200 เซนติเมตร⁻¹ C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-O Stretching ที่ความถี่ 1,081 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน C-C Stretching ที่ความถี่ 839 เซนติเมตร⁻¹ [68] เมื่อทำการผสมระหว่างโคโคซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ พบว่าคอมพอลิเมอร์ 1CS:9PVA_TEOS ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ ความสูงของพีคลดลง เนื่องจากเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏอยู่ในทั้งโครงสร้างของโคโคซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดการเชื่อมขวางโดยสารเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต และจะปรากฏพีคหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching ที่ความถี่ 1,064

เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching ที่ความถี่ 850 เซนติเมตร⁻¹ [69] และในคอมพอสิต จะปรากฏความสูงของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของโคโตซานบน คอมพอสิต ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซานบนคอมพอสิตมากขึ้นจนถึงคอมพอสิต 9CS:1PVA_TEOs จะ ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II ชัดเจน แต่ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล ลดลง และจะเห็นว่าที่พีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching ความสูงลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตซาน แสดงว่าการเติมสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตสามารถเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโคโตซาน และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากไปทำปฏิกิริยาหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโคโตซานและพอลิไวนิล แอลกอฮอล์



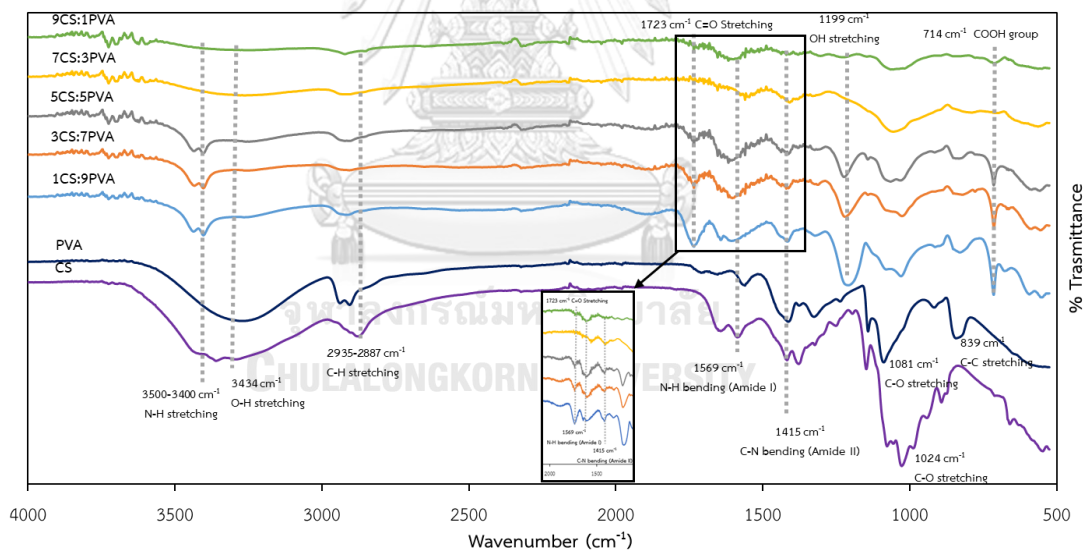
รูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอลิเมอร์โคโตน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ (CS:PVA) โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด 500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ แสดงผลดังรูปที่ 4.3

ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมของโคโตน (CS) จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ [65, 66] ตามลำดับ และหมู่ฟังก์ชัน C-O Stretching ที่ความถี่ 1,024 เซนติเมตร⁻¹ [67] และสเปกตรัมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) จะปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,200 เซนติเมตร⁻¹ C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-O Stretching ที่ความถี่ 1,081 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน C-C Stretching ที่ความถี่ 839 เซนติเมตร⁻¹ [68] เมื่อทำการผสมระหว่างโคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ พบว่าคอมพอลิเมอร์ 1CS:9PVA_OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันเอมีนในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ อย่างชัดเจน แต่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ปรากฏอยู่ในทั้งโครงสร้างของโคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดการเชื่อมขวางระหว่างกัน และมีความสัมพันธ์กับสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก โดยปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O stretching) ที่ความถี่ 1,723 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน -OH stretching ที่ความถี่ 1,199 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน COOH group ที่ความถี่ 714 เซนติเมตร⁻¹ [55] โดยหมู่คาร์บอนิลของกรดออกซาลิกที่ความถี่ 1,723 เซนติเมตร⁻¹ ทำการเชื่อมขวางกับหมู่ไฮดรอกซิล ความสูงของพีคหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลลดลง และในคอมพอลิเมอร์จะปรากฏความสูงของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของโคโตนบนคอมพอลิเมอร์ และเมื่อเพิ่มปริมาณโคโตนจนถึงคอมพอลิเมอร์ 5CS:5PVA_OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II สูงขึ้น แต่ความสูงของหมู่คาร์บอนิลลดลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางกับหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโคโตนและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในช่วงความถี่ 3,500-3,200 เซนติเมตร⁻¹ และเมื่อเพิ่มปริมาณของโคโตนจนถึงที่สัดส่วนคอมพอลิเมอร์ 7CS:3PVA_OA และ 9CS:1PVA_OA ความสูงของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II ลดลง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพีคหมู่ฟังก์ชัน COOH group ที่ความถี่ 714 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการเติมสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกเกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ฟังก์ชันเอมีน (N-H stretching) ที่ช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ ของโคโตนและหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของ

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งเมื่อลดปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ความสูงของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลลดลง ทำให้กรดออกซาลิกไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยตัวเอง [56] ทำให้ปรากฏพีคของกรดออกซาลิกและหมู่ฟังก์ชันเอมีนลดลง

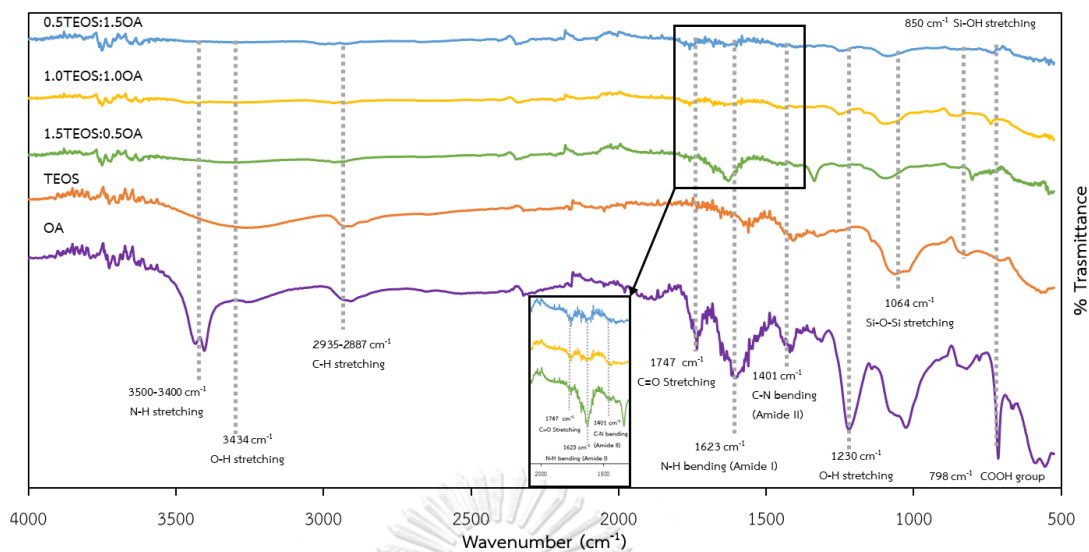
เมื่อเปรียบเทียบคอมพอสิตที่สัดส่วนส่วนเดียวกัน โดยสารเชื่อมขวางทั้ง 2 ชนิด พบว่าคอมพอสิต 1CS:PVA_TEOS ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่ช่วงความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching ที่ความถี่ 1,064 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching ที่ความถี่ 914 เซนติเมตร⁻¹ และคอมพอสิต 1CS:9PVA_OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งจะปรากฏหมู่ฟังก์ชันเอมีนได้ชัดเจนกว่าที่คอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS แสดงให้เห็นว่าสารเชื่อมขวางทั้งสองได้ไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต



รูปที่ 4.3 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกที่สัดส่วนต่าง ๆ (TEOS:OA) ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด 500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ แสดงผลดังรูปที่ 4.4

ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมของคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching ที่ความถี่ 1,064 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching ที่ความถี่ 850 เซนติเมตร⁻¹ และคอมพอสิต 3CS:7PVA_OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ และหมู่ฟังก์ชัน C-O Stretching ที่ความถี่ 1,024 เซนติเมตร⁻¹ โดยเมื่อผสมสารเชื่อมขวางที่สัดส่วนต่าง ๆ พบว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลลดลง เมื่อเทียบกับคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนสารเชื่อมขวางของเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต จะเกิดพีคของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching และหมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching สูง ซึ่งเป็นการเพิ่มความชอบน้ำ ทำให้สามารถดูดซับสีได้ดี และปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II น้อยกว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_OA เนื่องจากกรดออกซาลิกได้เข้าไปทำการเชื่อมขวางกับหมู่เอมีนบนคอมพอสิต และเมื่อเพิ่มสัดส่วนของกรดออกซาลิกที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลและพีคของหมู่ฟังก์ชัน Amide I และ Amide II ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลสูง แสดงว่าสัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกสามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างโคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เนื่องจากสารเชื่อมขวางทั้งสองไปทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันเอมีนและหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของโคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

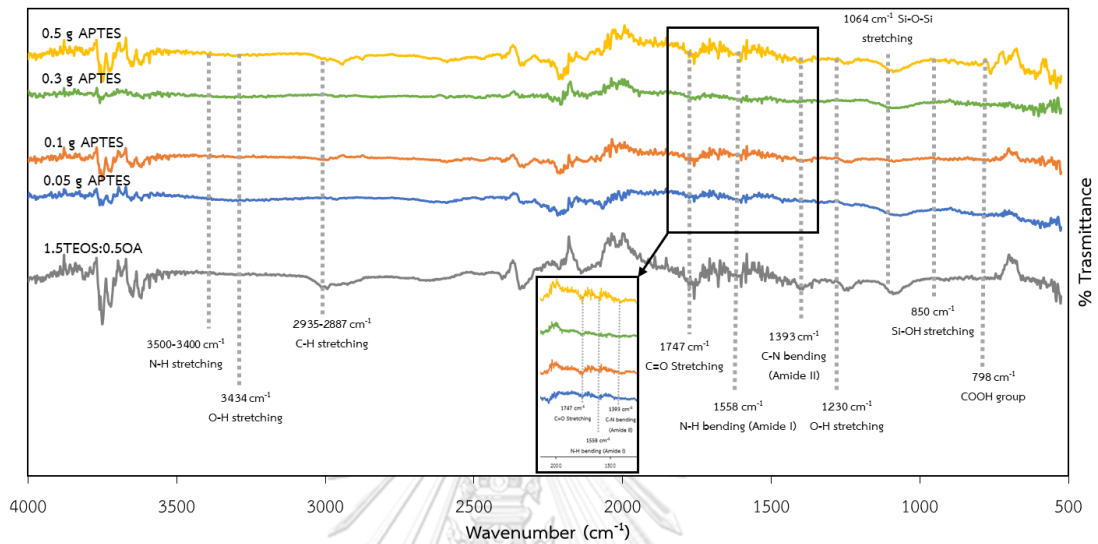


รูปที่ 4.4 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกที่สัดส่วนต่าง ๆ

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และกราฟต์ด้วย APTES ด้วยเทคนิคฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พิจารณาแสงในช่วงอินฟราเรด 500-4,000 เซนติเมตร⁻¹ แสดงผลดังรูปที่ 4.5

ผลการศึกษาพบว่าสเปกตรัมของคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนี้ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 3,434 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Stretching ในช่วงความถี่ 3,500-3,400 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน C-H Stretching ในช่วงความถี่ 2,935-2,887 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C=O stretching) ที่ความถี่ 1,723 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน N-H Bending (Amide I) และ C-N Bending (Amide II) ที่ความถี่ 1,569 และ 1,415 เซนติเมตร⁻¹ ตามลำดับ หมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching ที่ความถี่ 1,064 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน O-H Stretching ที่ความถี่ 1,199 เซนติเมตร⁻¹ หมู่ฟังก์ชัน Si-OH Stretching ที่ความถี่ 850 เซนติเมตร⁻¹ และหมู่ฟังก์ชัน COOH group ที่ความถี่ 714 เซนติเมตร⁻¹ เมื่อทำการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนบนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.05APTES ปรากฏหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลลดลง ซึ่งเกิดจากการเชื่อมขวางระหว่างไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และเกิดการกราฟต์ด้วยสาร APTES ซึ่งเป็นกราฟต์ลงบนหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนคอมพอสิต เกิดพีคความสูงของหมู่ฟังก์ชันเอมีนชัดเจน และจะเกิดการซ้อนทับกับพีคของหมู่ฟังก์ชันเอมีนของไคโตซานในช่วงความถี่ 1,623-1,393 เซนติเมตร⁻¹ [65, 66] บนคอมพอสิต และปรากฏหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching สูงขึ้น และเมื่อเพิ่ม

ปริมาณสาร APTES จนถึงคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5:TEOS:0.5OA_0.5APTES ปรากฏหมู่ฟังก์ชันเอมีนและหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si Stretching สูง ดังนั้นการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยสาร APTES เป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอมีนบนคอมพอสิตเพื่อทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับ

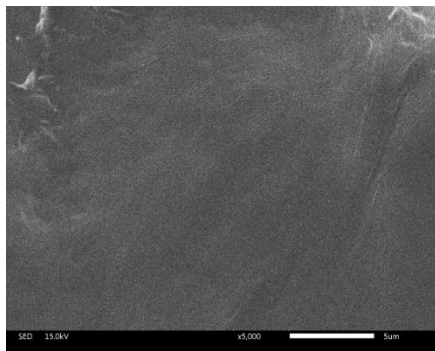


รูปที่ 4.5 แสดง FTIR สเปกตรัมของคอมพอสิตโคโคซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วน 3:7 ที่สารเชื่อมขวางด้วยเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก 1.5:0.5 และด้วย APTES ที่ปริมาณต่าง ๆ

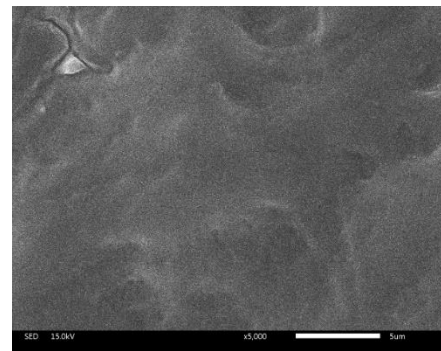
4.1.3 ลักษณะสัณฐานของคอมพอสิต

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CS:PVA) ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงผลดังรูปที่ 4.6

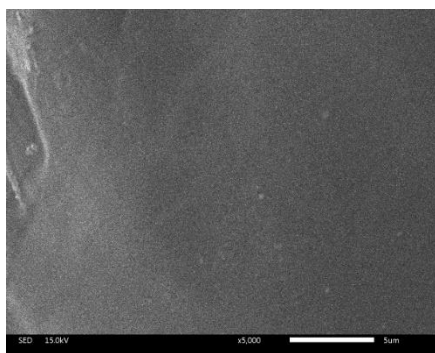
จากลักษณะรูปร่างสัณฐานของคอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS (รูปที่ 4.6ก) พบว่าพื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะราบเรียบ ไม่มีความเป็นรูพรุน แสดงถึงการผสมระหว่างไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดการกระจายตัวได้ดี และในการเติมสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลบนคอมพอสิต ทำให้พื้นที่ผิวบนคอมพอสิตเกิดเป็นช่องว่างที่มาก [70] และหากเพิ่มปริมาณไคโตซานจนถึงคอมพอสิต 9CS:1PVA_TEOS (รูปที่ 4.6จ) พบว่าพื้นผิวคอมพอสิตมีลักษณะราบเรียบและไม่มีรูพรุนเช่นกัน ซึ่งในการเพิ่มปริมาณไคโตซานที่สัดส่วนนี้มีการกระจายได้ดี และจากรูปพบว่าที่ทุกสัดส่วนมีลักษณะพื้นผิวคอมพอสิตเป็นเนินสูงเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการหดตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในระหว่างการทำแห้ง [71] ดังนั้นการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของคอมพอสิตโดยภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสามารถยืนยันได้ว่าคอมพอสิตที่ทุกสัดส่วนเกิดการเชื่อมขวางระหว่างกัน



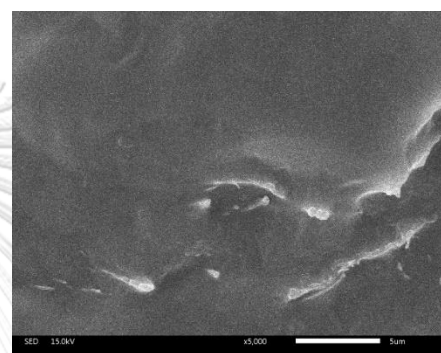
(ก)



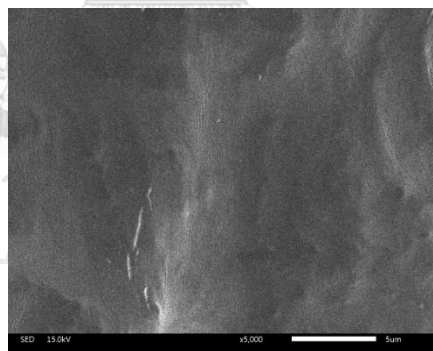
(ข)



(ค)



(ง)

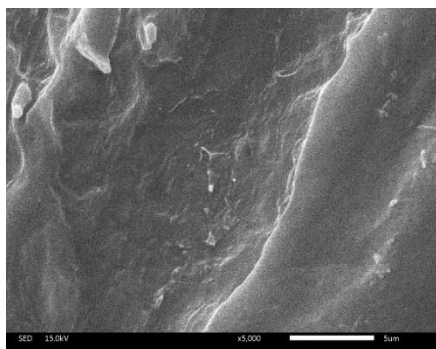


(จ)

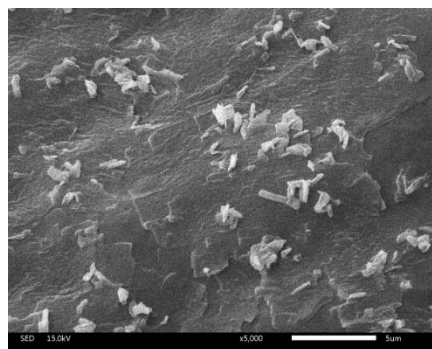
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวคอมพอสิตโดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ ก) คอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS ค) คอมพอสิต 5CS:5PVA_TEOS ง) คอมพอสิต 7CS:3PVA_TEOS และ จ) คอมพอสิต 9CS:1PVA_TEOS

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานของคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 5000 เท่า แสดงผลดังรูปที่ 4.7

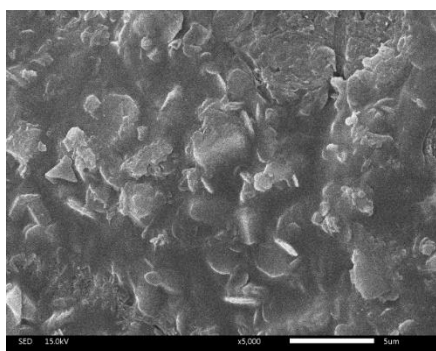
จากลักษณะรูปร่างสัณฐานของคอมพอสิต 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA (รูปที่ 4.7 ก.) พบว่าพื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะเรียบแต่ไม่มีความเป็นรูพรุน แต่มีลักษณะขรุขระเป็นริ้วคลื่น เนื่องจากการหดตัวของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ระหว่างการทำให้แห้ง ซึ่งพื้นผิวคอมพอสิตมีลักษณะราบเรียบ เนื่องจากการเติมปริมาณสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกเกิดการสร้างพันธะกับหมู่เอมีน และหมู่ไฮดรอกซิลทำให้โครงสร้างของคอมพอสิตมีการจัดตัวกันอย่างเป็นระเบียบ และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.0TEOS:1.0OA (รูปที่ 4.7 ข.) พบว่าพื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะเรียบ ไม่มีความเป็นรูพรุน และมีความเป็นกระจุกขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เป็นผลมาจากสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกได้ทำการเชื่อมขวางกับหมู่เอมีนของไคโตซานด้วยตัวเองทำให้พื้นผิวมีความเป็นกระจุก และเมื่อลดปริมาณสารเชื่อมขวางกรดออกซาลิกจนถึงที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA (รูปที่ 4.7 ค.) พบว่าพื้นผิวคอมพอสิตมีลักษณะเรียบ ไม่มีรูพรุน มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยมีความเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากการเชื่อมขวางในโครงสร้างของคอมพอสิตไม่มีความเป็นระเบียบ เกิดการเชื่อมขวางทั้งหมู่เอมีนและหมู่ไฮดรอกซิลบนคอมพอสิต ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการเติมสัดส่วนสารเชื่อมขวางบนคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA ส่งผลต่อพื้นผิวของคอมพอสิต และเป็นการปรับปรุงพื้นผิวของคอมพอสิต [72] ซึ่งปริมาณสารเชื่อมขวางมีความสำคัญต่อการกำหนดคอมพอสิตให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดี สำหรับคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES (รูปที่ 4.7 ง.) พบว่าพื้นผิวของคอมพอสิตมีลักษณะเรียบ และมีการต่อกันเป็นชั้น ๆ ซึ่งทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ โดยในการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนเป็นการต่อกิ่งให้กับพื้นผิวของคอมพอสิต [73] เพื่อที่จะให้หมู่ฟังก์ชันเอมีนที่ยื่นออกมาสามารถดูดซับได้ดี โดยการกราฟต์เป็นการเพิ่มตำแหน่งว่องไว (Active site) ในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสเพื่อให้สามารถดูดซับได้ดี [74, 75] ดังนั้นการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนช่วยในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเชิงกล เช่น ช่วยในการยึดตัวของคอมพอสิตได้ดี



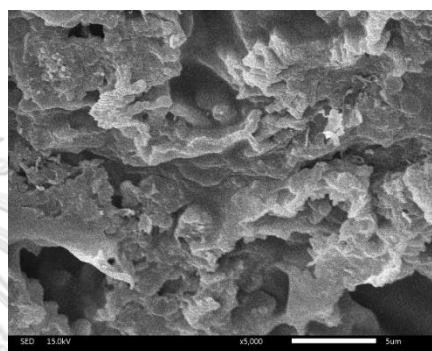
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM บนพื้นผิวคอมพอสิตที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของ ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.0TEOS:1.0OA ค) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ ง) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

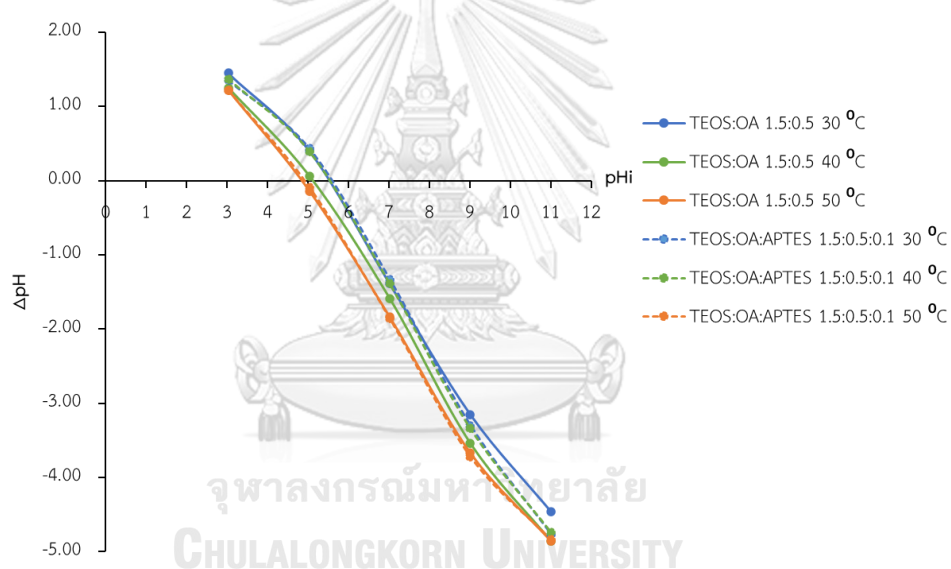
4.1.4 การวิเคราะห์ผลรวมของประจุที่ผิวคอมพอสิตเท่ากับศูนย์

การวิเคราะห์ผลรวมของประจุบนที่ผิวคอมพอสิตเท่ากับศูนย์ที่ภาวะความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ด้วยเทคนิค Salt Addition [76] แสดงดังรูปที่ 4.8

เมื่อทำการปรับความเป็นกรด-ด่าง จาก 3 เป็น 11 พบว่า ผลต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายและเริ่มต้น (ΔpH) มีการเปลี่ยนจากค่าบวกผ่านศูนย์สู่ค่าลบ ณ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่แสดง ΔpH เท่ากับศูนย์ นั่นคือค่าผลรวมของประจุที่ผิวของคอมพอสิตมีค่าเป็นศูนย์ ประจุที่ผิวของคอมพอสิตเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.5 และ 5.4 สำหรับคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ตามลำดับ เมื่อ ΔpH มีค่ามากกว่า pH_{PZC} สามารถอธิบายได้ว่าพื้นผิวของคอมพอสิตเป็นประจุบวก เนื่องจาก

โปรตอน (H^+) สร้างพันธะกับหมู่เอมีนของโคโตซานเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีนที่มีประจุบวก ($-NH_3^+$) ทำให้คอมพอสิตสามารถดูดซับสารที่เป็นประจุลบได้เป็นอย่างดี ในทางตรงกันข้าม ΔpH น้อยกว่า pH_{PZC} พื้นผิวของคอมพอสิตเป็นประจุลบ เนื่องจากหมู่เอมีนบนคอมพอสิตไม่เกิดการโปรโตเนต ($-NH^+$) ส่งผลให้ประจุบวกบนคอมพอสิตลดลง ทำให้ไม่สามารถดูดซับสารที่เป็นประจุลบได้ [77] โดยในความเป็นจริงแล้วคอมพอสิตที่มีการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน (APTES) จะมีความเป็นประจุบวกมากขึ้น เนื่องจากหมู่เอมีนจะปรับเปลี่ยนประจุบนพื้นผิวคอมพอสิตให้คอมพอสิตมีความเป็นประจุบวกมากขึ้น

ความสามารถในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 มีความเกี่ยวข้องกับประจุที่ผิวบนคอมพอสิต เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุ [78] จับกับประจุตรงข้ามได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่เป็นประจุลบบนคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในภาวะเป็นกรดได้ดี [2]



รูปที่ 4.8 แสดงผลรวมของประจุที่ผิวเท่ากับศูนย์ที่ความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ ของคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES

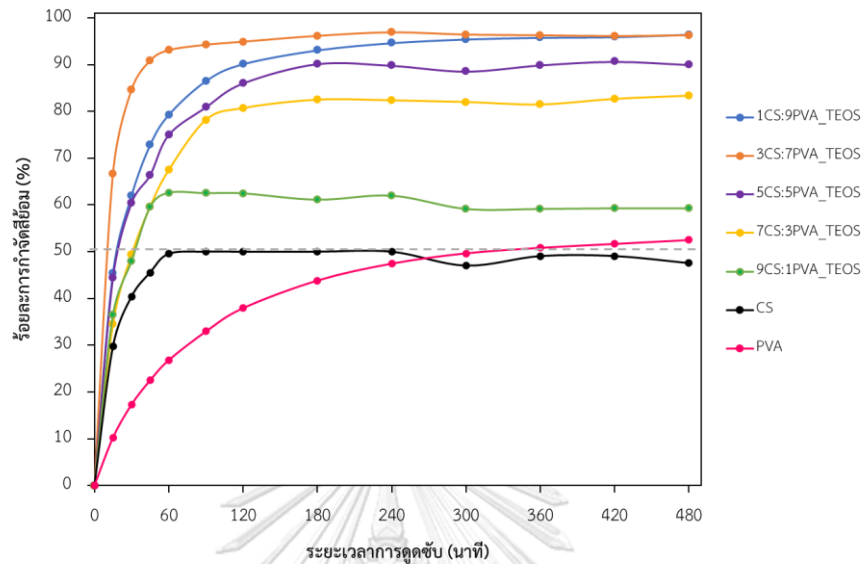
4.2 ผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120

4.2.1 สัดส่วนไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ศึกษาคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวาง เตตระเอธิลออร์โธซิลิเกต ที่มีผลต่อร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 (RR120) ในช่วงเวลา ตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่างของสีเท่ากับ 7 แสดงผลดังรูปที่ 4.9

จากผลการทดลอง พบว่าไคโตซาน (CS) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 เท่ากับ 47.5 และ 52.5 ตามลำดับ โดยจากรูปจะสังเกตเห็นว่า พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีสูงกว่าไคโตซาน แต่ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนาน และไคโตซานใช้เวลาในการดูดซับได้เร็วแต่เมื่อเข้าสู่สมดุลประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากในการทดลองไคโตซานไม่สามารถคงสภาพความเป็นแผ่นไว้ได้ ดังนั้นจึงได้ทำการผสมคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกตสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 เท่ากับร้อยละ 96.5 96.3 85.6 83.8 และ 59.2 สำหรับคอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS 3CS:7PVA_TEOS 5CS:5PVA_TEOS 7CS:3PVA_TEOS และ 9CS:1PVA_TEOS ตามลำดับ ภายในเวลา 480 นาที จะเห็นว่าคอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS และ 3CS:7PVA_TEOS ต่างมีความสามารถในการกำจัดพอ ๆ กัน ดังนั้นจึงพิจารณาเวลาในการเข้าสู่สมดุลและเวลาที่ใช้ในการดูดซับ พบว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS ใช้เวลาเข้าสู่สมดุลได้เร็วที่สุดที่ 60 นาที และภายในเวลา 10 นาที มีร้อยละการดูดซับสูงถึง 50 (T_{50}) ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็วกว่าคอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS ที่ใช้เวลาในการดูดซับนานถึง 17 นาที โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับสีขึ้นอยู่กับร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตและผลรวมของประจุที่ผิวคอมพอสิตเป็นศูนย์ (Point of Zero charge, PZC) โดยการบวมตัวของคอมพอสิตแสดงดังตารางที่ 4.1 ที่คอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตเท่ากับ 896 แต่มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 6.8 ซึ่งหากเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงสุดเท่ากับ 1,296 และมีประจุที่ผิวคอมพอสิตเป็นศูนย์เท่ากับ 6.3 แสดงให้เห็นว่าการบวมตัวของคอมพอสิตสูงซึ่งเมื่อนำมาดูดซับสีทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง เนื่องจากการบวมตัวของคอมพอสิตจะเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำเข้าสู่ตัวดูดซับและทำให้เหนี่ยวนำโมเลกุลของสีเข้าสู่รูพรุน [78] และเมื่อเปรียบเทียบกับคอมพอสิต 5CS:5PVA_TEOS 7CS:3PVA_TEOS และ 9CS:1PVA_TEOS มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 6.1 6.0 และ 5.8 ตามลำดับ จะพบว่าการเพิ่มปริมาณไคโตซานทำให้ประจุบวกบนผิวคอมพอสิตน้อยลง และการบวมตัวของคอมพอสิตลดลงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่าการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรต 120 มีความเกี่ยวข้องกับการบวมตัวของคอมพอสิต และ

จะขึ้นอยู่กับประจุบนพื้นผิวของคอมพอสิต ซึ่งหากการบวมตัวของคอมพอสิตและประจุที่ผิวมากการดูดซับจะเกิดได้ดี

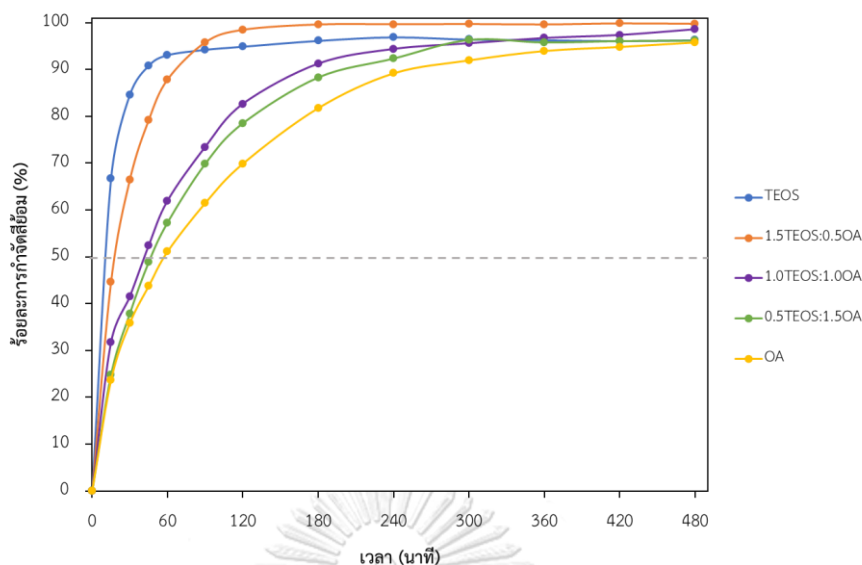


รูปที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟ 120 บนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ในเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.2 ปริมาณของสารเชื่อมขวาง

ศึกษาคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยการผสมระหว่างสารเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิก (TEOS:OA) เท่ากับ 1.5:0.5 1.0:1.0 และ 0.5:1.5 ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ความเป็นกรด-ด่างของสีเท่ากับ 7 มีร้อยละการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 แสดงผลดังรูปที่ 4.10

จากรูป พบว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100.0 98.6 และ 96.1 สำหรับ 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA 3CS:7PVA_1.0TEOS:1.0OA และ 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA ตามลำดับ ภายในเวลา 480 นาที ในการผสมสารเชื่อมขวางส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ เนื่องจากสารเชื่อมกรดออกซาลิกสร้างพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิลทำให้การเหนี่ยวนำโมเลกุลของสีข้างลง เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดออกซาลิกมากขึ้นจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนาน ซึ่งมีความสอดคล้องกับร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตดังตารางที่ 4.3 หากเปรียบเทียบคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูง และภายในเวลา 10 นาที มีร้อยละการดูดซับสูงถึง 50 (T_{50}) ซึ่งคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA มีร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงที่สุด และเข้าสู่สมดุลได้เร็วเมื่อเทียบกับคอมพอสิตที่สัดส่วนอื่น ๆ และเป็นผลมาจากประจุที่ผิวของคอมพอสิต โดยการวิเคราะห์ผลรวมของประจุที่ผิวคอมพอสิตเป็นศูนย์ (Point of Zero charge, PZC) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของคอมพอสิตเท่ากับ 5.5 ซึ่งมีความเป็นประจุบวมมากกว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.0TEOS:1.0OA และ 3CS:7PVA_0.5TEOS:1.5OA ที่มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 3.7 และ 3.1 ตามลำดับ ทำให้คอมพอสิตที่มีสัดส่วนของกรดออกซาลิกสามารถดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่เป็นประจุลบได้เป็นอย่างดี แต่หากเปรียบเทียบคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS มีประจุที่ผิวเป็นศูนย์เท่ากับ 6.3 ซึ่งมีความเป็นประจุบวมมากกว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA แต่มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเวลาผ่านไป 480 นาที ซึ่งเกิดจากหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120



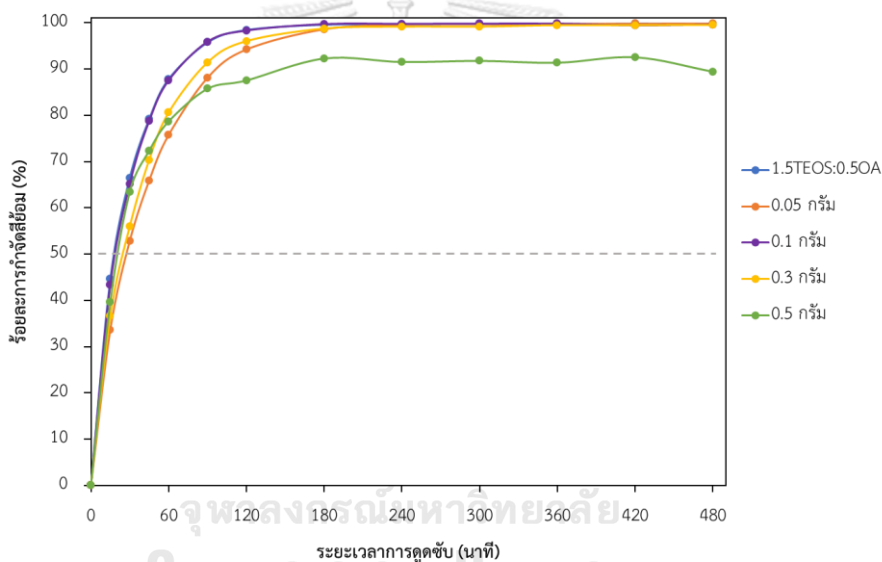
รูปที่ 4.10 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยใช้สัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกตและกรดออกซาลิกเท่ากับ 1.5:0.5 1.0:1.0 และ 0.5:1.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.3 ผลของการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน

ศึกษาปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนโดยใช้สาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไฮโดรเจน (APTES) บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES ในช่วงเวลาดังแต่ 0 ถึง 480 นาที ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 เมื่อทำการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีน แสดงผลดังรูปที่ 4.11

จากรูปพบว่า ปริมาณการกราฟต์หมู่เอมีนที่ 0.05 0.1 0.3 และ 0.5 กรัม มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100.0 100.0 99.5 และ 89.42 ตามลำดับ ภายในเวลา 480 นาที เมื่อเพิ่มปริมาณการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5_0.1APTES การดูดซับเข้าสู่สมดุลได้เร็วและมีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นการเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันเอมีนสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของคอมพอสิตได้ดี เนื่องจากการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วย APTES จะเกิดการไฮโดรไลซิสโดยหมู่อัลคอกซี (Alkoxy Group) กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เกิดเป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) ทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอกซิลและหมู่ไฮดรอกซิลอยู่บนพื้นผิวคอมพอสิต ทำให้จำนวนหมู่

เอมีนบนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวคอมพอสิตเป็นประจุบวก และเมื่อเพิ่มปริมาณการกราฟต์ หมู่ฟังก์ชันเอมีนจนถึงคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5_0.5APTES ประสิทธิภาพการกำจัด สีรีแอกทีฟเรด 120 ลดลง สาเหตุเกิดจากการย่อยสลายของหมู่เอมีนในน้ำเกิดการควั่นและพอลิ เมอไรเซชันด้วยตนเอง เกิดหมู่ไซล๊อกเซน (Si-O-Si) [74] ทำให้ไม่เกิดการยึดติดกันระหว่างหมู่เอมีน กับพื้นผิวของคอมพอสิต ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 ลดลง และทำให้เกิด การอุดตันบนผิวคอมพอสิตทำให้ไปขัดขวางการเข้าถึงโมเลกุลของสีไปยังตำแหน่งว่องไว (Active Site) โดยการเพิ่มปริมาณหมู่เอมีนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิตได้ดีเมื่อมีการเพิ่มปริมาณหมู่เอมีนที่เหมาะสม ดังนั้นในงานวิจัยได้ศึกษาปริมาณการกราฟต์หมู่ เอมีนที่ 0.1 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120

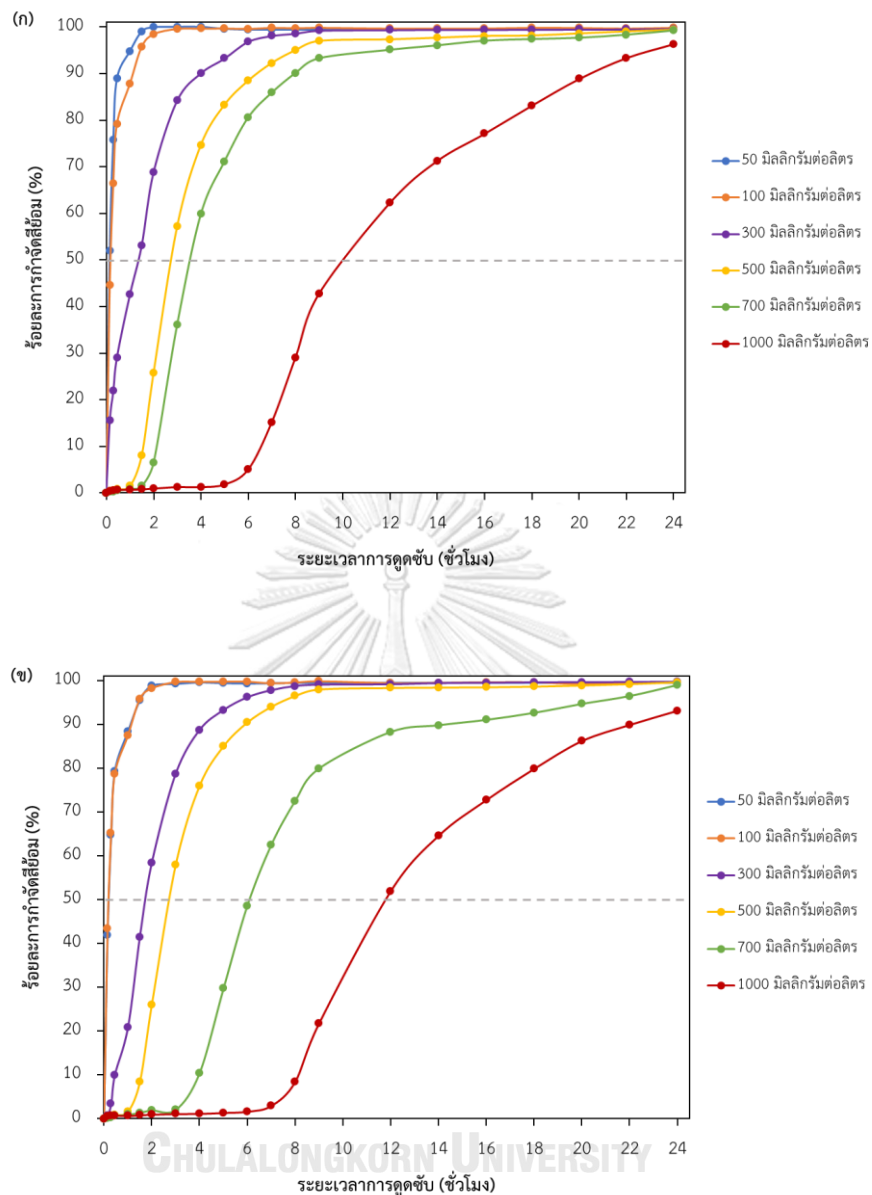


รูปที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_APTES ปริมาณการกราฟต์หมู่เอมีน 0.05 0.1 0.3 และ 0.5 กรัม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความ เป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วง เวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นและเวลาการดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นบนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของซีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 50 100 300 500 700 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง และความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 มีร้อยละการดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120 แสดงผลดังรูปที่ 4.12ก และ 4.12ข ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12ก คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้น มีร้อยละการกำจัดซีรีแอกทีฟเรด 120 ได้มากกว่า 90 พบว่าความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดสูงถึง 100.0 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 100.0 เช่นกัน จะเห็นได้ว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ช่วงเวลาเริ่มต้นการดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120 เกิดขึ้นได้เร็ว เป็นผลมาจากบริเวณพื้นผิวของคอมพอสิตมีมากทำให้โมเลกุลของซีแพร่เข้าสู่รูพรุนและเกิดการดูดซับบนพื้นผิวภายในรูพรุน และเมื่อช่องว่างของคอมพอสิตดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120 ได้เต็มทำให้การดูดซับช่วงหลังเริ่มช้าลงจนเข้าสู่สมดุล [49] ในขณะที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ดังรูปที่ 4.12ข มีร้อยละการกำจัดซีรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 100.0 100.0 99.7 99.6 99.0 และ 93.1 ตามลำดับ ภายในเวลา 24 ชั่วโมง เป็นที่สังเกตว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการดูดซับใกล้เคียงกัน และเมื่อเวลาผ่านไป 480 นาที ความสามารถในการดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120 น้อยกว่าคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA เนื่องจากการกราฟต์หมู่เอมีน (-NH₂) เป็นการกราฟต์เข้าไปยังหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนพื้นผิวคอมพอสิต ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลเป็นตัวเหนี่ยวนำน้ำที่มีโมเลกุลของซีเข้าสู่รูพรุนลดลง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 300 500 700 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลนาน เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของซีรีแอกทีฟเรด 120 และบริเวณพื้นที่ผิวของคอมพอสิต ดังนั้นความเข้มข้นที่มากขึ้น โมเลกุลซีแพร่เข้าไปที่ผิวของคอมพอสิตได้มากขึ้น [6] และข้อสังเกตอีกอย่างหนึ่งคือ การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นทำให้คอมพอสิตทั้งสองมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีรีแอกทีฟเรด 120 ได้มากกว่าร้อยละ 90 ภายใน 24 ชั่วโมง ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของซีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการดูดซับซีรีแอกทีฟเรด 120

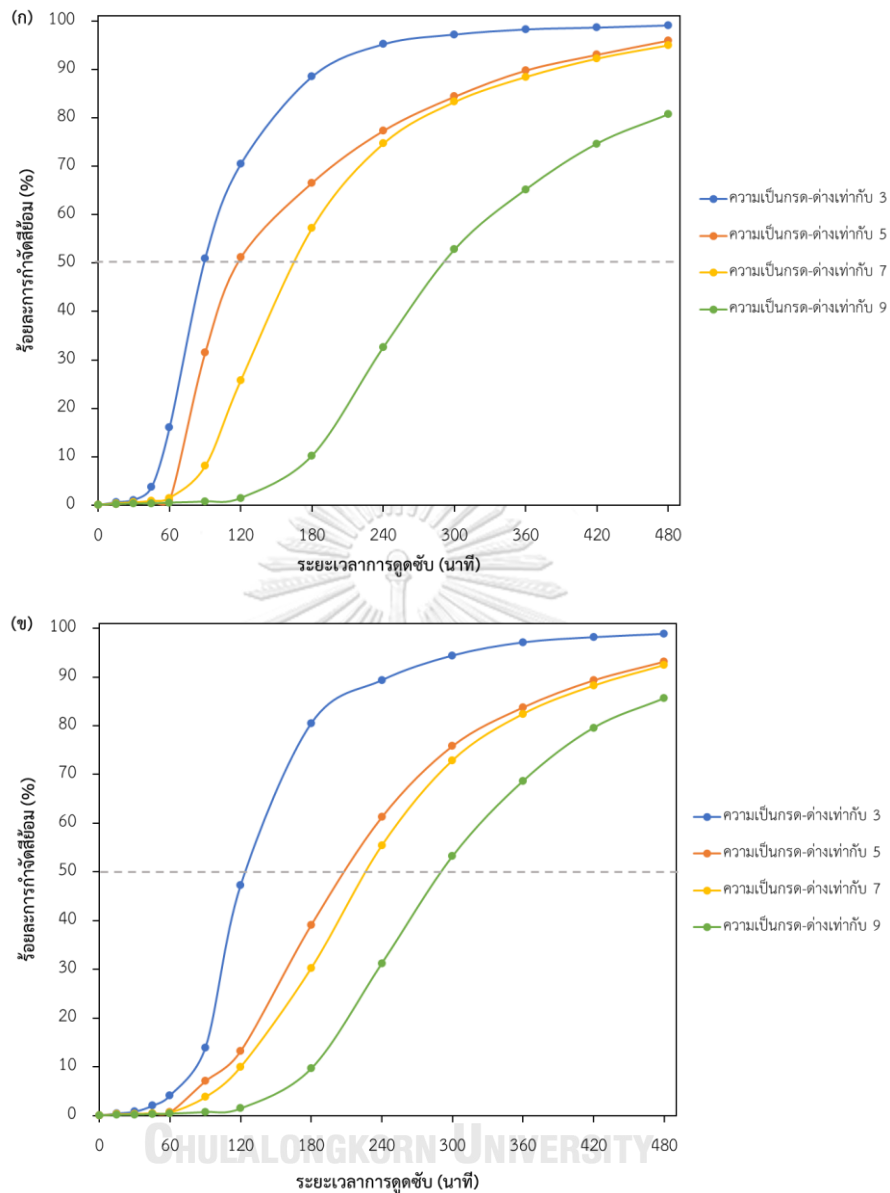


รูปที่ 4.12 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 ต่าง ๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง

4.2.5 ผลของความเป็นกรด-ต่างของสีย้อม

ผลของความเป็นกรด-ต่างบนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที โดยศึกษาที่ภาวะความเป็นกรด-ต่างที่ 3 5 7 และ 9 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีร้อยละการกำจัดสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 แสดงผลดังรูปที่ 4.13ก และ 4.13ข ตามลำดับ

คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA ดังรูป 4.13ก ความเป็นกรด-ต่าง 3 5 7 และ 9 มีร้อยละการกำจัดสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 เท่ากับ 100.0 93.6 90.1 และ 80.7 ตามลำดับ ภายในเวลา 480 นาที และจากรูปที่ 4.13ข คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES พบว่าร้อยละการกำจัดสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 เท่ากับ 98.8 93.1 92.4 และ 85.6 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าคอมพอสิตทั้งสองมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 ที่ภาวะเป็นกรดได้ดีกว่าภาวะเป็นด่าง เนื่องจากกรดได้เข้าไปทำลายหมู่เอมีนของไคโตซานบนคอมพอสิตเปลี่ยนเป็นหมู่เอมีนที่มีประจุบวก ($-NH_3^+$) โดยโปรตอนของกรดได้เข้าไปยังตำแหน่งว่องไว (Active Site) บนพื้นผิวคอมพอสิตส่งผลให้ประจุบนพื้นผิวคอมพอสิตสร้างพันธะกับโมเลกุลของสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 ที่เป็นหมู่ซัลโฟเนต ($-SO_3^-$) ได้ในปริมาณมาก และการเพิ่มความเป็นกรดทำให้สามารถดูดซับในช่วงเวลาที่ไม่เกิดการดูดซับและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 บนคอมพอสิตสูง ในขณะที่ภาวะเป็นด่าง หมู่เอมีนของไคโตซานไม่เกิดการโปรตอนเนตในรูปของประจุลบ ($-NH$) เนื่องจากเกิดแรงผลักกันระหว่างโมเลกุลของสีและพื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120 ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาการปรับค่าความเป็นกรด-ต่างเท่ากับ 3 ในการดูดซับสีย้อมแอคทีฟเฟรด 120

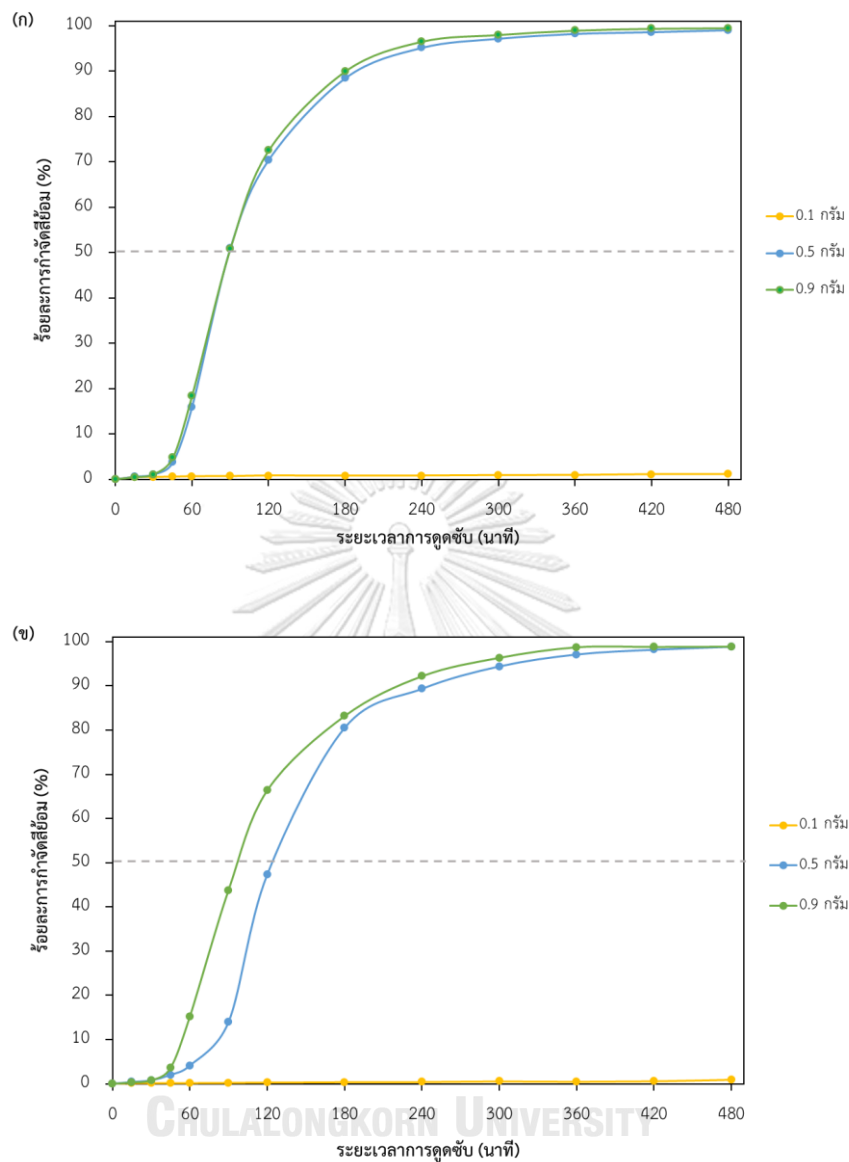


รูปที่ 4.13 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 5 7 และ 9 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.6 ผลของปริมาณคอมพอลสิต

ปริมาณคอมพอลสิตที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาการดูดซับ ตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที บนคอมพอลสิตบนคอมพอลสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอลสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES โดยศึกษาปริมาณคอมพอลสิต 0.1 0.5 และ 0.9 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 แสดงผลดังรูปที่ 4.14ก และ 4.14ข ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.14ก ปริมาณคอมพอลสิตที่ 0.1 0.5 และ 0.9 กรัม ที่คอมพอลสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 1.1 100.0 และ 99.5 ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.14ข คอมพอลสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 เท่ากับ 1.0 98.8 และ 98.9 ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มปริมาณคอมพอลสิตที่ 0.9 กรัม สามารถใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลได้เร็ว เมื่อเทียบกับปริมาณคอมพอลสิต 0.5 กรัม และประสิทธิภาพในการดูดซับที่เวลา 480 นาที คอมพอลสิตทั้งสองมีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียง โดยการเพิ่มปริมาณคอมพอลสิตเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการสร้างพันธะกันระหว่างคอมพอลสิตและโมเลกุลของสีรีแอกทีฟเรด 120 เป็นผลทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง แต่ในการเพิ่มปริมาณคอมพอลสิตมากเกินไป ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เนื่องจากน้ำหนักของสีรีแอกทีฟเรด 120 ในสารละลายต่อน้ำหนักของคอมพอลสิตลดลง และคอมพอลสิตทั้งสองที่ปริมาณคอมพอลสิตที่ 0.1 กรัม มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยมาก ๆ เนื่องจากตำแหน่งว่องไวของคอมพอลสิตสัมผัสกับโมเลกุลของสีน้อยมาก เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ในช่วงเวลาการดูดซับ 480 นาที ที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากันและภาวะเดียวกัน พบว่าปริมาณคอมพอลสิตเพียง 0.5 กรัม สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120 ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาปริมาณคอมพอลสิต 0.5 กรัม ในการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120

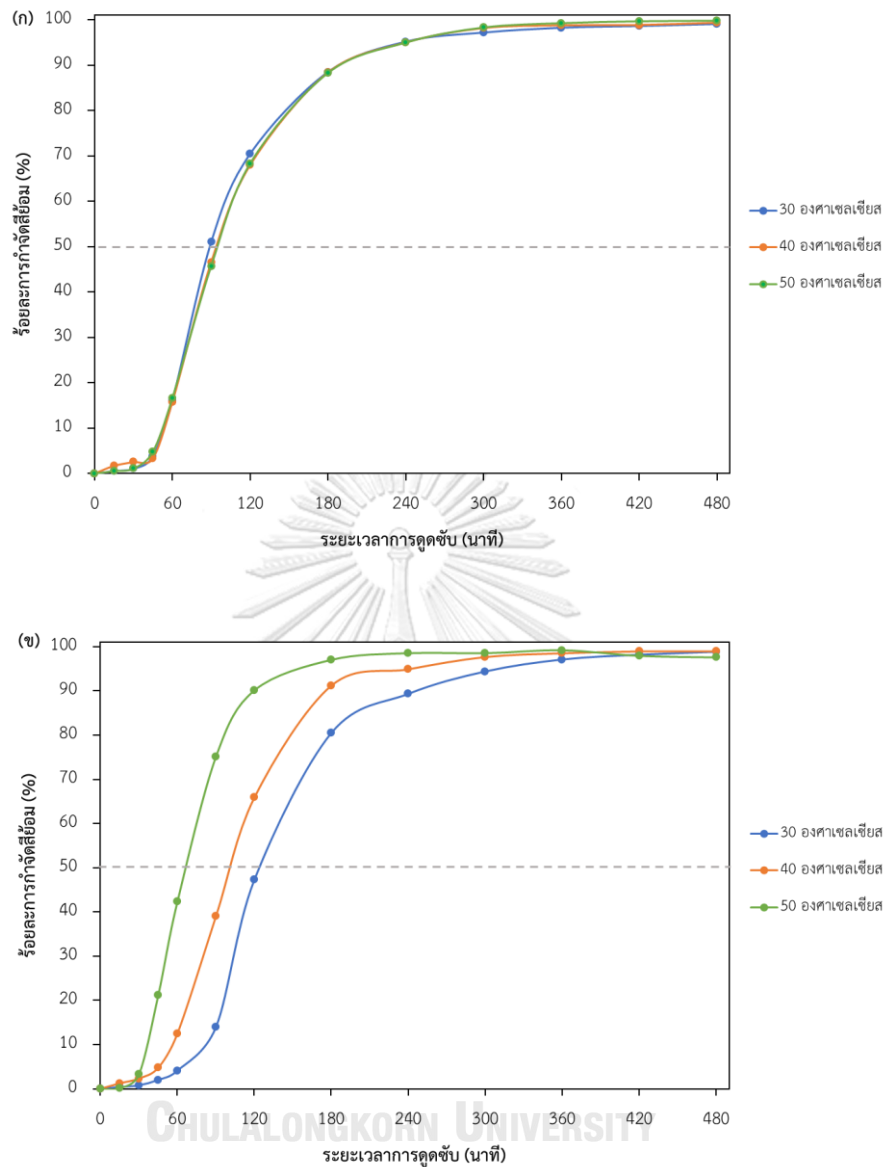


รูปที่ 4.14 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ปริมาณคอมพอสิต 0.1 0.5 และ 0.9 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสีรีแอกทีฟเฟรต 120

ผลของอุณหภูมิของสีรีแอกทีฟเฟรต 120 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ทำการศึกษาอุณหภูมิที่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 และปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 แสดงผลดังรูปที่ 4.15ก และ 4.15ข ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15ก คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA พบว่าที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 ได้ทั้งหมด 100.0 ภายในเวลา 480 นาที สังเกตได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิมิผลต่อการดูดซับเพียงเล็กน้อย ในขณะที่คอมพอสิตคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ดังรูปที่ 4.15ข มีร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 เท่ากับ 98.8 99.00 และ 97.6 ตามลำดับ ภายในเวลา 480 นาที โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรต 120 สูง และใช้เวลาเข้าสู่สมดุลเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคอมพอสิตและการกราฟต์หมู่เอมีนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเร่งจลนพลศาสตร์ของโมเลกุลของสาร APTES ในสถานะน้ำและปรับปรุงปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวคอมพอสิตและโมเลกุลของสาร APTES ทำให้คอมพอสิตที่มีการกราฟต์หมู่เอมีนมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้เร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 50 องศาเซลเซียส จะเป็นอันตรายต่อพันธะไฮโดรเจนระหว่างพื้นผิวของคอมพอสิตและสารที่ใช้ในการกราฟต์หมู่เอมีนหรือพันธะในโมเลกุล โดยการรวมกลุ่มกันของไฮดรอกซิล (Si-OH) ทำให้สามารถสร้างพันธะระหว่างหมู่ซิล็อกเซน (Si-O-Si) ได้มาก [74] ลักษณะการดูดซับสีบนคอมพอสิตที่มีการกราฟต์หมู่เอมีนจึงเป็นการดูดความร้อน (Endothermic Process) โดยการให้ความร้อนแก่สีรีแอกทีฟเฟรต 120 ส่งผลให้โมเลกุลของสีเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งว่างไวบนคอมพอสิตโดยอาศัยพลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้การดูดซับสีเกิดขึ้นได้ดี ดังนั้นคอมพอสิตที่มีการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรต 120 ได้

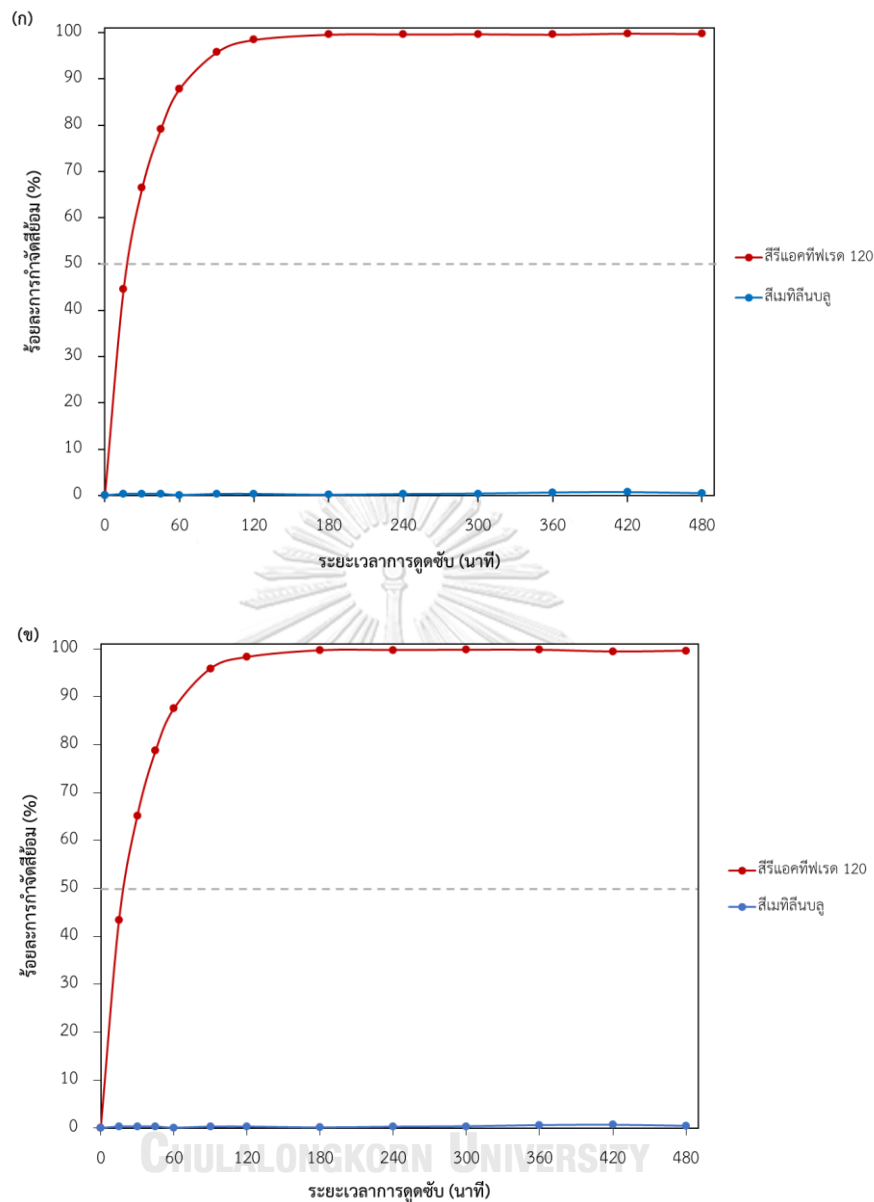


รูปที่ 4.15 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรด 120 ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟ 120 เท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

4.2.8 ผลของการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น

ศึกษาผลของการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น ๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ในช่วงเวลาการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที ที่อุณหภูมิห้อง บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และ คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES โดยชนิดสีที่ได้ทำการศึกษาได้แก่ สีรีแอกทีฟเรด 120 (RR 120) และ สีเมทิลินบลู (MB) มีร้อยละการกำจัดตั้งรูปที่ 4.16ก และรูปที่ 4.16ข ตามลำดับ จากรูปพบว่าภายในเวลา 480 นาที คอมพอสิตทั้งสองสามารถดูดซับสีได้เพียงแค่ สีรีแอกทีฟเรด 120 มีร้อยละในการดูดซับเท่ากับ 100.0 เนื่องจากเมื่อสีรีแอกทีฟเรด 120 ละลายในน้ำอยู่ในรูปของประจุลบและพื้นผิวของคอมพอสิตที่เป็นประจุบวกทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุของทั้งสองโมเลกุลเข้าหากัน ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดี ส่วนสีเมทิลินบลู ไม่เกิดการดูดซับ เนื่องจากเมื่อละลายในน้ำ โมเลกุลของสีเกิดเป็นประจุบวก ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุของโมเลกุลสีและประจุบนคอมพอสิต จึงสรุปได้ว่าคอมพอสิตมีความสามารถในการเลือกจับสีตามประจุได้





รูปที่ 4.16 แสดงร้อยละการกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120 (RR 120) และ สีเมทิลีนบลู (MB) ของ (ก) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES และ (ข) คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาณคอมพอสิต 0.5 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเวลา ตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวาง 2 ชนิด ได้แก่ เตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต (TEOS) และกรดออกซาลิก (OA) และศึกษาการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยสาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) ซึ่งตัวแปรที่ได้ทำการศึกษาในงานวิจัยคือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟเรด 120 ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณคอมพอสิต และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ โดยใช้เวลาในการดูดซับตั้งแต่ 0 ถึง 480 นาที

ผลของสัดส่วนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์พบว่า ปริมาณของไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์บนคอมพอสิตส่งผลต่อการดูดซับ โดยประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับการบวมตัวของคอมพอสิตและประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของคอมพอสิต ซึ่งร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตสูงทำให้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเกิดขึ้นเร็วและมีประสิทธิภาพในการดูดซับดี เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลทำหน้าที่เหนี่ยวนำโมเลกุลของสีจนเข้าสู่สมดุล และประจุที่ผิวของคอมพอสิตที่ทำหน้าที่ดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 โดยโมเลกุลของสีเข้าไปสร้างพันธะกับหมู่เอมีนที่เป็นประจุบวกบนคอมพอสิต ในการใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต พบว่าคอมพอสิต 1CS:9PVA_TEOS มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือ คอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS 5CS:5PVA_TEOS 7CS:7PVA_TEOS และ 9CS:1PVA_TEOS ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 จะขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันบนคอมพอสิต และประจุที่ผิวบนคอมพอสิต

ผลของสัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก พบว่าร้อยละการดูดซับสูงถึง 100.0 ที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA เป็นผลมาจากสารเชื่อมขวางทั้งสองทำปฏิกิริยากับหมู่เอมีนและหมู่ไฮดรอกซิลบนคอมพอสิต ทำให้โครงสร้างบนคอมพอสิตไม่มีความเป็นระเบียบ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานวิทยา ผลรวมของประจุที่ผิวเป็นศูนย์และการบวมตัวของคอมพอสิต ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของสารเชื่อมขวาง หากเพิ่มสัดส่วนของกรดออกซาลิกบนคอมพอสิต ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากกรดออกซาลิกได้สร้างพันธะกับหมู่เอมีนบนคอมพอสิตทำให้ความเป็นประจุบนพื้นผิวคอมพอสิตลดลง

ผลของการกราฟต์หมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยสาร 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) พบว่าการเพิ่มปริมาณหมู่เอมีนสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมคอมพอสิตได้ดี เนื่องจากการกราฟต์หมู่เอมีนเป็นการเพิ่มความเป็นประจุบวกบนพื้นผิวคอมพอสิต แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณการกราฟต์หมู่เอมีนมากเกินไป คอมพอสิตจะเกิดการอุดตันในรูพรุน ทำให้ไปขัดขวางการเข้าของโมเลกุลของสีรีแอกทีฟเรด 120 ไปยังตำแหน่งว่างไว้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลง

ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA และคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสี มีร้อยละการกำจัดสีมากกว่า 90 แต่ใช้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลนาน เนื่องจากเวลาในการเข้าสู่สมดุลจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของคอมพอสิตที่ใช้ในการดูดซับ ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่น้อยจะมีพื้นที่ผิวคอมพอสิตในการดูดซับมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีที่มาก

ผลของความเป็นกรด-ด่างของสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต ที่ภาวะกรดมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีกว่าที่ภาวะด่าง เนื่องจากโปรตอนของกรดได้เข้าไปยังตำแหน่งว่างไว้บนพื้นผิวคอมพอสิต ส่งผลให้พื้นผิวคอมพอสิตมีความเป็นประจุบวก ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลได้เร็วและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง ในขณะที่ภาวะด่างการดูดซับเข้าสู่สมดุลช้า เป็นผลมาจากแรงผลักระหว่างโมเลกุลของสีและคอมพอสิต เนื่องจากหมู่เอมีนไม่เกิดการโปรตอนในรูปของประจุลบ (-NH⁻) ดังนั้นคอมพอสิตทั้งสองมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ภาวะกรดได้ดี

ผลของปริมาณคอมพอสิตที่มีผลต่อการดูดซับสีรีแอกทีฟเรด 120 บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA พบว่าการเพิ่มปริมาณคอมพอสิตส่งผลต่อการกำจัดสีเพียงเล็กน้อย ในขณะที่คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES พบว่าการเพิ่มปริมาณคอมพอสิต การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลได้เร็ว เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการสร้างพันธะระหว่างคอมพอสิตและโมเลกุลของสีรีแอกทีฟเรด 120 และสังเกตได้ว่าที่ปริมาณคอมพอสิต 0.1 กรัม มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้อยมาก ๆ เป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของคอมพอสิตสัมผัสกับโมเลกุลของสีน้อยเกินไป ดังนั้นปริมาณคอมพอสิตส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 120

ผลของอุณหภูมิของสีรีแอกทีฟเรด 120 พบว่าการกราฟต์หมู่เอมีนบนคอมพอสิต เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ การดูดซับจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลได้เร็วและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง เป็นผลมาจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคอมพอสิตกับ 3-อะมิโนโพรพิลไตรเอทอกซีไซเลน (APTES) เพิ่มขึ้น การดูดซับสีจึงเป็นการดูดความร้อน (Endothermic Process) โดยอาศัย

พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิช่วยให้การดูดซับสีเกิดขึ้นได้ดี และหากเพิ่มอุณหภูมิมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อพันธะไฮโดรเจนของคอมพอลิเมอร์ ซึ่งทำให้การกำจัดสีลดลง

เมื่อนำไปศึกษาผลของการดูดซับสีย้อมชนิดอื่น ๆ พบว่าคอมพอลิเมอร์สามารถดูดซับสีรีแอคทีฟเรด 120 (RR120) ได้ เนื่องจากเมื่อทำการละลายในน้ำจะอยู่ในรูปของประจุลบ ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุบนคอมพอลิเมอร์และโมเลกุลของสี ดังนั้นคอมพอลิเมอร์มีความสามารถในการดูดซับสีโดยขึ้นอยู่กับประจุ

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการนำคอมพอลิเมอร์กลับมาใช้ซ้ำเพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ
- 5.2.2 ควรมีการส่งเสริมให้โรงงานนำการมาใช้โคโตะซานในการบำบัด เนื่องจากเป็นการลดปัญหาขยะที่เกิดจากเปลือกกุ้งในอุตสาหกรรมอาหารได้

บรรณานุกรม

- [1] Suttanan R., Piyamongkala K., Kinetics and thermodynamics of adsorption methylene blue by groundnut shell. Journal King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2008. 31(4): p. 751-763.
- [2] สุนิติ ไทยเจียมอารีย์, การแตกสลายสีย้อมโดยใช้ไทเทเนียมไดออกไซด์ภายใต้การส่องสว่างด้วยแสงอาทิตย์. วิทยานพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.
- [3] Arman Y., Rojkongsub R., Piyamonckala K., Adsorption methylene blue dye by chitosan flake: Equilibrium and applied to use for industrial factory. Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 2018. 28(4): p. 825-835.
- [4] Wang S., Zhu, Z.H., Effects of acidic treatment of activated carbons on dye adsorption. Journal of Dyes and Pigments, 2007. 75: p. 306-314
- [5] Sananmuang R., Cha-un N., Physical characteristics and adsorption properties for reactive dyes of char and activated carbon prepared from mangosteen peel and tamarind seed. Journal of Naresuan University, 2015. 15(1): p. 9-16
- [6] รวินิกา ศรีมูล, การบำบัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยกระบวนการดูดซับ. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2559. 44(3): p. 419-434.
- [7] ขนิษฐา, สีย้อมในอุตสาหกรรมฟอกย้อม. 2007.
http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=370&pageid=1&read=true&count=true. [20 กันยายน 2563]
- [8] ณรงค์ศิลป์ ฐูปพนม, เคมีของสีย้อมกับผลิตภัณฑ์หัตถกรรมไทย. วารสารสถาบันส่งเสริมการสอน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2531. 16(4): p. 9-12.
- [9] พิศมัย ลิขิตบรรณกร, คู่มือเทคโนโลยีสะอาดในอุตสาหกรรมสิ่งทอ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม, 2547. 1: p. 1-176.
- [10] มัณฑนา พงษ์ไทยพัฒน์, สีสำหรับย้อมผ้า. วารสารสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2533. 123: p. 20-23
- [11] วนิตา ชูอักษร, เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยบูรพา, 2012. 17(1): p. 181-191.
- [12] หนังสือสิ่งแวดล้อม, การวัดค่าสี ในหน่วย ADMI และเทคโนโลยีสำหรับการกำจัดสี. Energy

- and nateral minds, p. 33-35.
- [13] Bruce Seelig F.B, and Derickson R., Treatment Systems for Household Water Supplies Activated Carbon Filtration. Minnesota Extension Service, University of Minnesota, 2007. p. 1-7.
- [14] พิมพ์ จันทน์จาง, การกำจัดสีเบสด้วยกลไกการดูดซับทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [15] พิมพ์ชนก เต็งเจริญ, การกำจัดสีเบสด้วยกลไกการดูดซับทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [16] ฌาลิสา เนียมมณี, การกำจัดสีรีแอกทีฟเรด 2 ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยแบคทีเรียเด่น ในกระบวนการเอสปีอาร์แบบแอนแอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สหสาขาวิชา (วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542
- [17] วิหรานุช หลาง, ธนสิริ มีชัย และ วิชชุพร จันทร์ศรี, ความสามารถในการกำจัดสีย้อมผ้าประเภทรีแอกทีฟของ *Burkholderia glumae*, *Journa of Environment and Natural Resources*, 2551. 6: p. 66-81.
- [18] Pradthana, กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process). 2008.
<https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process>.
 [29 พฤศจิกายน 2563].
- [19] เสาวภา ไวยสุศรี, รายงานผลการวิจัย การกำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียโดยการดูดซับด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตและแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่. มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต, 2558.
- [20] สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, ระบบบำบัดน้ำเสีย: Wastewater Treatment System. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2549.
- [21] รศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศิวัชเดชาเทพ, หน่วยที่ 6 อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. วิศวกรรมศาสตร์ อุตสาหกรรม: การควบคุม, 2552. p. 1-50
- [22] ชมรมไคติน-ไคโตซาน, เรื่องน่ารู้ ไคติน-ไคโตซาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), 2544. p. 9-32.
- [23] รศ.ดร.ปิยฉัตร วัฒนชัย, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการ การพัฒนาแผ่นฟิล์มไคโตซานบรรจุคอลลาเจน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา, 2560.
- [24] วันวิสาข์ บูรณบริรักษ์, การศึกษาการขจัดสีย้อมผ้าประเภทรีแอกทีฟโดยใช้เทคนิคการดูดซับทางชีวภาพด้วยมวลชีวภาพ. คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

- [25] Martinez-Huitle C.A, Carlesi Jara C., Cerro-lopez M., Chitosan-modified glassy carbon electrodes: Electrochemical behavior as a function of the preparation method and pH. *Journal of Analytical Sciences and Spectroscopy*, 2015. 54(2): p. 53-64.
- [26] อภิวัฒน์ เกตุเนียม, คาร์บอกซีเมทิลไคโตซาร์ที่ผ่านการเชื่อมโยงตาข่ายด้วยไดไฮดรอกซีอะลานีนที่ละลายได้ในน้ำ: พฤติกรรมการบวมน้ำ. *คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยนครสวรรค์*, 2550. p. 1-32.
- [27] สุธิดา คงทอง, ไคติน-ไคโตซาน. *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมศึกษา*, 2552. 3(1): p. 1-7.
- [28] MakeWebEasy.com, ประโยชน์ของไคโตซาน. 2020. <https://www.healthfoodsnetwork.com/content>. [29 พฤศจิกายน 2563].
- [29] วรเวทย์ กาญจนานันท์, MakeWebEasy.com, ประโยชน์ของไคโตซาน. 2020. <https://www.healthfoodsnetwork.com/content>. [29 พฤศจิกายน 2563].
- [30] Farris S., Piergiovanni L., 14 - Emerging coating technologies for food and beverage packaging materials. *Journal of Emerging Food Packaging Technologies*, Woodhead Publishing, 2012. p. 274-302.
- [31] Hui B., Zhang, Y., Ye L., Preparation of PVA hydrogel beads and adsorption mechanism for advanced phosphate removal. *Journal of Chemical Engineering*, 2014. 235: p. 207-214.
- [32] ดารณี ชันเพ็ชรและ ปิยะนุช รสเครือ, การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (พีวีเอ)/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (โซเดียม-ซีเอ็มซี) สำหรับประยุกต์ใช้ในบรรจุภัณฑ์แอกทีฟ. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา ฉบับพิเศษ การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์วิจัย*, 2557. 6: p. 447-455.
- [33] ฉัญลักษณ์ ฉัญญะเจริญ, การศึกษาวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อประยุกต์ใช้งานสำหรับเทคโนโลยีทางการแพทย์. *วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 2560.
- [34] เพ็ญวิสาข์ พิสิฐฐศักดิ์, การใช้กระบวนการโซลเจลเพื่อเพิ่มสมบัติของสิ่งทอ: ฝ้ายสะท้อนน้ำและน้ำมัน. *Thai Journal of Science and Technology*, 2558. 4(1): p. 47-63.
- [35] Merck, Tetraethyl orthosilicate. 2020. <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/mm/800658?lang=en®ion=TH>. [12 ธันวาคม 2563].
- [36] Siamroommate, กรดออกซาลิก (Oxalic acid) การผลิต การใช้ประโยชน์ และพิษต่อร่างกาย. 2020. <https://siamroommate.com>. [12 ธันวาคม 2563].

- [37] Essandoh M., Garcia R.A., Palochik V.L., Gayle M.R., Liang C., Simultaneous adsorption of acidic and basic dyes onto magnetized polypeptidylated-Hb composites. *Journal of Separation and Purification Technology*, 2021. 255(1): p. 1-7.
- [38] อภาววรรณ สท้านธรนิล, การเตรียมไฮโดรเจลจากการครอสลิงค์เมทิลไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส ร่วมกับกรดมาเลอิกโดยการฉายรังสีแกมมา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [39] พิระศักดิ์ เกาประเสริฐ, พอลิเมอร์จากแหล่งชีวภาพ: ทบทวนวรรณกรรม. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2556. 18(3): p. 536-547.
- [40] วารุณี ตานันต์และ สายันต์ แสงสุวรรณ, พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และ การประยุกต์ใช้. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 2557. 16(2): p. 63-81.
- [41] Ahmed E.M., Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. *Journal of Advanced Research*, 2015. 6(2): p. 105-121.
- [42] Madolia H., Preparation and Evaluation of Stomach Specific Ipn Hydrogels for Oral Drug Delivery: A Review. *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, 2013. 3(2): p. 131-140.
- [43] รวิินทร์ สุทธะนันท์ และ โกวิทย์ปิยะมั่งคลา, จลนศาสตร์และเทอร์โมเคมีการดูดซับเมทิลีนบลู โดยใช้แคลดัตต์แปร. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 2554. 21(2): p. 337-348.
- [44] ปราโมช เชี่ยวชาญ, การปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม ตอนที่ 2 กระบวนการดูดซับ. *วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ*, 2561. p. 1-6.
- [45] อติศักดิ์ ศิริรักษ์, การศึกษาตัวดูดซับราคาถูกลงจากเส้นใยธรรมชาติเหลือทิ้งเพื่อกำจัดสีคริสตัลไวโอเลต. วิทยาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2561.
- [46] Işın P., Ozay H., Ozay O., Selective adsorption of cationic dyes from colored noxious effluent using a novel N-tert-butylmaleamic acid based hydrogels. *Journal of Reactive and Functional Polymers*, 2019. 142: p. 189-198.
- [47] Mittal H., Ray S.S., A study on the adsorption of methylene blue onto gum ghatti/TiO₂ nanoparticles-based hydrogel nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016. 88: p. 66-80.
- [48] Nakhjiri M.T., Marabdi G.B., Poly(AA-co-VPA) hydrogel cross-linked with N-maleyl

- chitosan as dye adsorbent: Isotherms, kinetics and thermodynamic investigation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018. 117: p. 152-166.
- [49] Jamnongkan T.a.K.S., Towards novel adsorbents: The ratio of PVA/chitosan blended hydrogels on the copper (II) ion adsorption. *Journal of Energy Procedia* 2016. 89: p. 299-306.
- [50] Jaseela P.K., Garvasis J., Joseph A., Selective adsorption of methylene blue (MB) dye from aqueous mixture of MB and methyl orange (MO) using mesoporous titania (TiO₂)-polyvinyl alcohol (PVA) nanocomposite, *Journal of Molecular Liquids*, 2019. 286: p. 1-10.
- [51] Marrakchi F., Khanday W.A., Asif M., Hameed B.H., Cross-linked chitosan/sepiolite composite for the adsorption of methylene blue and reactive orange 16. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016. 93(PtA): p. 1231-1239.
- [52] Essel T.Y.A., Koomson A., Seniagya M.O., Cobbold G.P., Chitosan Composites Synthesized Using Acetic Acid and Tetraethylorthosilicate Respond Differently to Methylene Blue Adsorption. *Journal of Polymers (Basel)*, 2018. 10(5): p. 1-13.
- [53] Kamal M.A., Yasin T., Reinert L., Duclaux L., Adsorptive removal of copper (II) ions from aqueous solution by silane cross-linked chitosan/PVA/TEOS beads: kinetics and isotherms. *Journal of Desalination and Water Treatment*, 2014. 57(9): p. 4037- 4048.
- [54] Budnyak T.M., Pylypchuk I.V., Tertykh V.A., Yanovska E.S., Kolodynska D., Synthesis and adsorption properties of chitosan-silica nanocomposite prepared by sol-gel method. *Journal of Nanoscale Research Letters*, 2015. 87: p. 1-10.
- [55] Fadzallah I.A., Majid S.R., Careem M.A., Arof A.K., A study on ionic interactions in chitosan-oxalic acid polymer electrolyte membranes. *Journal of Membrane Science*, 2014. 463: p. 65-72.
- [56] Pérez-Calderón J., Santos M.V., Zaritzky N., Synthesis, characterization and application of cross-linked chitosan/oxalic acid hydrogels to improve azo dye (Reactive Red 195) adsorption. *Journal of Reactive and Functional Polymers*, 2020. 155: p.1-14.
- [57] Alhosseini S.N., Moztaarzadeh F., Mozafari M., Asgari S., Synthesis and

- characterization of electrospun polyvinyl alcohol nanofibrous scaffolds modified by blending with chitosan for neural tissue engineering. *International Journal of Nanomedicine*, 2012. 7: p. 25-34.
- [58] ธนิตา ตระกูลสุจริตโชค, พอลิเมอร์ชีวภาพโคไโตซาน/เจลาติน ที่มีสมบัติแม่เหล็กสำหรับเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณงบรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล มหาวิทยาลัยบูรพา, 2559. 68: p. 1-59.
- [59] ชาญยุทธ ศรีสุบิน, สารละลายไฮโดรเจล วัสดุดูดซับน้ำอัจฉริยะ. สำนักเทคโนโลยีชุมชน กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2557. p. 1-3.
- [60] Sulaiman N. A., Shaari N., Rahman N. A., Removal of CU (II) and Fe (II) ion Through Thin Film Composite (TFC) with Hybrid Membrane. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2016. 7: p. 16-29.
- [61] Ghosh, Arun; Ali, M., Studies on physicochemical characteristics of chitosan derivatives with dicarboxylic acids. *Journal of Materials Science*, 2011. 47(3): p. 1196-1204.
- [62] Hussain A., Negi S., Maitra J., Khan R., Rani A., Development of crosslinked chitosan membrane networks for uptake of copper and nickel metal ions. *Desalination and Water Treatment*, 2019. 146: p. 257-265.
- [63] Golla G., Subramanian K.S., The Green Synthesis of Chitosan based Super Adsorbent Polymer to Enhance Water Holding Capacity of Soil. *International Journal of Agricultural Science and Research*, 2019. 9(4): p. 107-117.
- [64] ZWang Y., Zou M., Gao K., Guo W., Effects of Surface Modification on the Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Bamboo-polypropylene composites. *Journal of BioResources*, 2020. 15(3): p. 6230-6243.
- [65] Rezvani M.A., Shaterian M., Aghmasheh M., Catalytic oxidative desulphurization of gasoline using amphiphilic polyoxometalate@polymer nanocomposite as an efficient, reusable, and green organic-inorganic hybrid catalyst. *Journal of Environmental Technology*, 2020. 41(10): p. 1219-1231.
- [66] Kumar S., Koh J., Physicochemical, optical and biological activity of chitosan-chromone derivative for biomedical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012. 13(5): p. 6102-6116.
- [67] Osuna Y., Gregorio-Jauregui K.M., Gaona-Lozano J.G., Ilyna A., Barriga-Castro E.D.,

- Saade H., López R.G., Chitosan-Coated Magnetic Nanoparticles with Low Chitosan Content Prepared in One-Step. *Journal of Nanomaterials*, 2012. p. 1-7.
- [68] Kharazmi A., Faraji N., Hussin R., Saion E., Yunus W.M., Behzad K., Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of ZnS-PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach. *Journal of Beilstein Nanotechnol*, 2015. 6: p. 529-536.
- [69] Shamsodin M., Fazli M., Nasiri M., Comparison Study of Paraquat Herbicide Adsorption by Xerogels: Application of Experimental Design. *Journal of Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2019. 38(s1): p.S128-S138.
- [70] Wahab N.Z.A., Nainggolan I., Nasution T.I., Derman M.N., Highly Response and Sensitivity Chitosan-Polyvinyl alcohol Based Hexanal Sensors. *MATEC Web of Conferences*, 2016. 78: p. 1-8.
- [71] EL-Hefian E.A., Yahaya A.H., The Preparation and Characterization of Chitosan / Poly (Vinyl Alcohol) Blended Films. *Journal of Chemistry*, 2010. 7(4): p. 1212-1219.
- [72] Nagarkar R., Patel J., Polyvinyl Alcohol: A Comprehensive Study. *Acta Scientific Pharmaceutical Sciences*, 2019. 3: p. 34-44.
- [73] Lima V.V.C., Dalla Nora F.B., Peres E.C., Reis G.S., Lima É.C., Oliveira M.L.S., Dotto G.L., Synthesis and characterization of biopolymers functionalized with APTES (3-aminopropyltriethoxysilane) for the adsorption of sunset yellow dye. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, (2019). 7(5): p. 1-11.
- [74] Vakili M., Rafatullah M., Salamatinia B., Ibrahim M.H., Abdullah A.Z., Elimination of reactive blue 4 from aqueous solutions using 3-aminopropyl triethoxysilane modified chitosan beads. *Journal of Carbohydrate Polymers*, 2015. 132: p. 89-96.
- [75] Vakili M., Amouzgar P., Cagnetta G., Wang B., Guo X., Mojiri A., Zeimaran E., Salamatinia B., Ultrasound-Assisted Preparation of Chitosan/Nano-Activated Carbon Composite Beads Aminated with (3-Aminopropyl) Triethoxysilane for Adsorption of Acetaminophen from Aqueous Solutions. *Journal of Polymers (Basel)*, 2019. 11(10): p. 1-12.
- [76] Mahmood T., Saddique M.T., Naeem A., Westerhoff P., Mustafa S., Alum A., Comparison of Different Methods for the Point of Zero Charge Determination of

- NiO. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011. 50(17): p. 10017-10023.
- [77] ยุพดี กุศลรัตน์กิติวงศ์, จลนศาสตร์และกลไกการดูดซับไอออนเงินโดยโคโตซานดัดแปรเรซิน: ผลความเป็นกรด-เบสของสารละลาย. *วารสารวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์*, 2550. p. 64-70.
- [78] Rehman T.U., Bibi S., Khan M., Shah L.A., Khan A., Ateeq M., Fabrication of stable superabsorbent hydrogels for successful removal of crystal violet from waste water. *RSC Advances*, 2019. 9(68): p. 40051-40061.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

การคำนวณอัตราส่วนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

น้ำหนักของไคโตซาน :

$$\frac{\text{สัดส่วนของไคโตซาน}}{10} \times \text{น้ำหนักรวมของคอมพอสิต (กรัม)} = \text{น้ำหนักไคโตซาน (กรัม)}$$

น้ำหนักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ :

$$\frac{\text{อัตราส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์}}{10} \times \text{น้ำหนักรวมของคอมพอสิต (กรัม)} = \text{น้ำหนักพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (กรัม)}$$

ตัวอย่าง: ต้องการเตรียมคอมพอสิตที่อัตราส่วน 1:9 ปริมาตร 5 กรัม สามารถคำนวณได้ดังนี้

น้ำหนักของไคโตซาน :

$$\frac{1}{10} \times 5 \text{ กรัม} = 0.5 \text{ กรัม}$$

น้ำหนักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ :

$$\frac{9}{10} \times 5 \text{ กรัม} = 4.5 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น คอมพอสิตที่อัตราส่วน 1:9 สามารถเตรียมได้โดยการชั่งน้ำหนักไคโตซานเท่ากับ 0.5 กรัม และ น้ำหนักของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากับ 4.5 กรัม

ภาคผนวก ข.

การคำนวณร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การคำนวณร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถทำได้ โดยการชั่งน้ำหนักคอมพอสิตที่ต้องการศึกษา นำไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองน้ำออก จะได้คอมพอสิตที่มีลักษณะเปื่อย ทำการชั่งน้ำหนักหลังแช่น้ำ โดยสามารถคำนวณร้อยละการบวมตัวได้ดังสมการ

$$\%P_s = \frac{W_f - W_i}{W_i} \times 100$$

เมื่อ P_s คือ ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต

W_i คือ น้ำหนักของคอมพอสิตแห้ง (กรัม)

W_f คือ น้ำหนักของคอมพอสิตหลังจากการแช่น้ำ (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต แสดงดังตารางที่ ข1

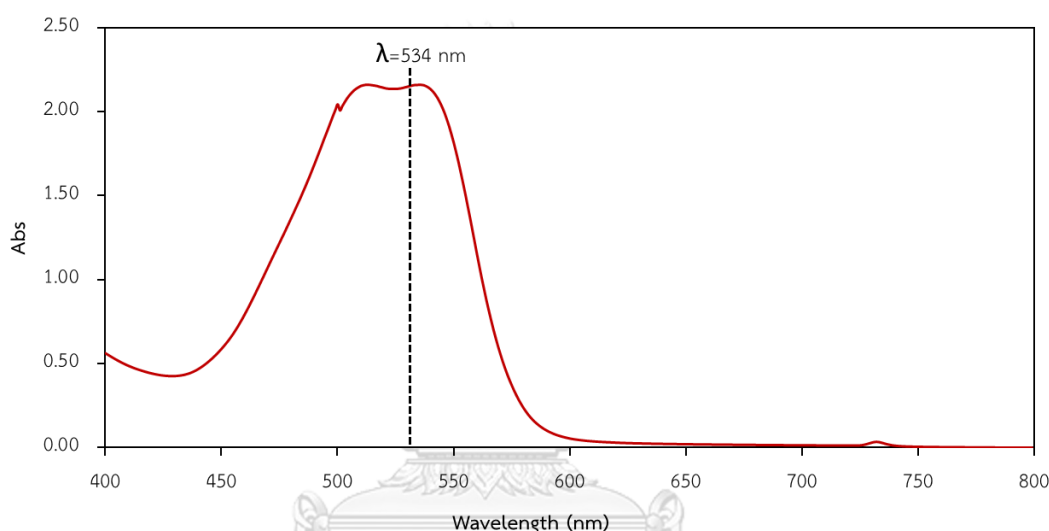
ตารางที่ ข1 แสดงร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิตไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลอร์โธซิลิเกต

สัดส่วนของไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	น้ำหนักของคอมพอสิตแห้ง (กรัม)	น้ำหนักของคอมพอสิตหลังจากการแช่น้ำ (กรัม)	ร้อยละการบวมตัวของคอมพอสิต (%)
1:9	0.5153	5.1354	$[(5.1354-0.5153)/ 0.5153] = 896.6$
3:7	0.5161	7.2096	$[(7.2096-0.5161)/ 0.5161] = 1,296.9$
5:5	0.5137	5.1043	$[(5.1043-0.5137)/ 0.5137] = 893.6$
7:3	0.5075	4.7851	$[(4.7851-0.5075)/ 0.5075] = 842.9$
9:1	0.5107	4.3109	$[(4.3109-0.5107)/ 0.5107] = 744.1$

ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงและคำนวณร้อยละการดูดซับสีรีแอคทีฟเรด 120

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสียอมโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis Spectroscopy) โดยศึกษาความสามารถในการดูดซับสียอมหลังการดูดซับที่ช่วงเวลาต่าง ๆ วัดการดูดกลืนแสงทุก ๆ 1 นาโนเมตร ที่ช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างค่าความยาวคลื่นกับค่าการดูดกลืนแสง เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการดูดกลืนแสงของสีรีแอคทีฟ ช่วงการดูดกลืนแสงดังรูปที่ ค1



รูปที่ ค1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสีรีแอคทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงความยาวคลื่นที่ 400 ถึง 800 นาโนเมตร

จากนั้นนำความเข้มข้นที่เวลาต่าง ๆ ของสารละลายมาวัดที่ช่วงความยาวคลื่น 534 นาโนเมตรคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายที่เวลาต่าง ๆ ได้จากกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ดังสมการ

$$A = \epsilon Cl$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

ϵ คือ ค่าคงที่ของการดูดกลืนแสง

l คือ ความกว้างของเซลล์

C คือ ความเข้มข้นของสีรีแอคทีฟเรด 120

และเมื่อคำนวณร้อยละการกำจัดสีรีแอคทีฟเรด 120 จากการดูดซับสามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{Dye Removal} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

เมื่อ Dye Removal คือ ร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรด 120

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_t คือ ความเข้มข้นของสีย้อมที่เวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการกำจัดสีรีแอกทีฟเฟรด 120 ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้คอมพอสิต 3CS:7PVA_1.5TEOS:0.5OA_0.1APTES แสดงดังตารางที่ ค1



ตารางที่ ค1 แสดงร้อยละการดูดซับสรีแอกทีฟเฟรด 120 ที่เวลาต่าง ๆ ที่คอมพอสิต

3CS:7PVA_1.5TEOS_0.5OA_0.1APTES

เวลา (นาทื)	ค่าการดูดกลืนแสง ของสรีแอกทีฟเฟรด 120 ที่เวลาต่าง ๆ	ความเข้มข้นของสรีแอก ทีฟเฟรด 120 ที่เวลาต่าง ๆ (กรัม)	ร้อยละการดูดซับสรีแอกทีฟเฟรด 120 ที่ เวลาต่าง ๆ (%)
0	2.202	$2.202/22.02 = 0.1000$	$[(0.1000-0.1000)/0.1000] = 00.0$
15	1.246	$1.246/22.02 = 0.0566$	$[(0.1000-0.0566)/0.1000] = 43.4$
30	0.767	$0.767/22.02 = 0.0348$	$[(0.1000-0.0348)/0.1000] = 65.1$
45	0.468	$0.468/22.02 = 0.0213$	$[(0.1000-0.0213)/0.1000] = 78.7$
60	0.275	$0.275/22.02 = 0.0125$	$[(0.1000-0.0125)/0.1000] = 87.5$
90	0.091	$0.091/22.02 = 0.0041$	$[(0.1000-0.0041)/0.1000] = 95.8$
120	0.038	$0.038/22.02 = 0.0017$	$[(0.1000-0.0017)/0.1000] = 98.2$
180	0.007	$0.007/22.02 = 0.0003$	$[(0.1000-0.0003)/0.1000] = 99.6$
240	0.006	$0.006/22.02 = 0.0003$	$[(0.1000-0.0003)/0.1000] = 100.0$
300	0.005	$0.005/22.02 = 0.0002$	$[(0.1000-0.0002)/0.1000] = 100.0$
360	0.005	$0.005/22.02 = 0.0002$	$[(0.1000-0.0002)/0.1000] = 100.0$
420	0.005	$0.005/22.02 = 0.0002$	$[(0.1000-0.0002)/0.1000] = 100.0$
480	0.009	$0.009/22.02 = 0.0004$	$[(0.1000-0.0004)/0.1000] = 100.0$

ภาคผนวก ง.

การวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์บนคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

การวิเคราะห์ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ สามารถเตรียมได้จากวิธี Salt Addition ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้โพแทสเซียมไนเตรด 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ปรับความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นด้วยการปั่นกววน จากนั้นทำการเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้ววัดความเป็นกรด-ด่างของสารละลายหลังการเขย่า คำนวณความแตกต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายดังสมการ

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_f - \text{pH}_i$$

เมื่อ ΔpH คือ ความแตกต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายและเริ่มต้น

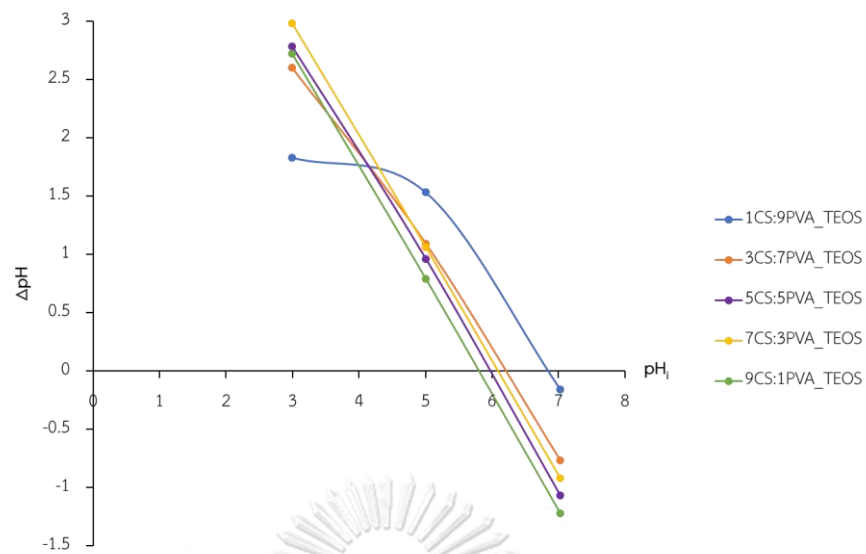
pH_i คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

pH_f คือ ค่าความเป็นกรด-ด่างหลังจากการเขย่า

ตัวอย่างการคำนวณประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่สารเชื่อมขวางต่าง ๆ ดังตารางที่ 1 ถึง 3

ตารางที่ ง1 แสดงการคำนวณประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ บนคอมพอลิเมอร์ไคโตซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอธิลออร์โธซิลิเกต

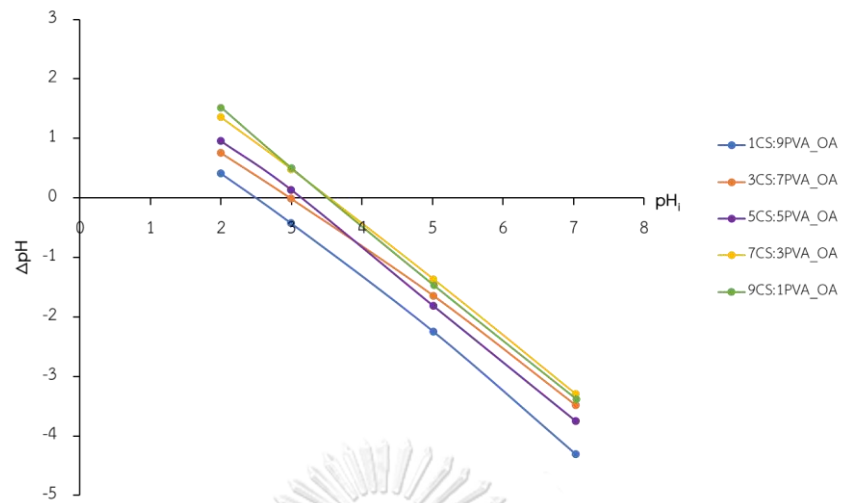
สัดส่วนของไคโตซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	ความเป็นกรด-ต่างเริ่มต้น (pH _i)	ความเป็นกรด-ต่างหลังจากการเขย่า (pH _f)	ผลต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ต่างสุดท้ายและเริ่มต้น (Δ pH)
1:9	3.00	4.83	4.83-3.00 = 1.83
	5.01	6.54	6.54-5.01 = 1.53
	7.03	6.87	6.87-7.03 = -0.16
3:7	3.00	5.60	5.60-3.00 = 2.60
	5.01	6.10	6.10-5.01 = 1.09
	7.03	6.26	6.26-7.03 = -0.77
5:5	3.00	5.78	5.78-3.00 = 2.72
	5.01	5.97	5.97-5.01 = 0.79
	7.03	5.96	5.96-7.03 = -1.22
7:3	3.00	5.98	5.98-3.00 = 1.83
	5.01	6.07	6.07-5.01 = 1.53
	7.03	6.11	6.11-7.03 = -0.16
9:1	3.00	5.72	4.72-3.00 = 2.72
	5.02	5.80	6.54-5.02 = 0.79
	7.04	5.81	5.81-7.04 = -1.22



รูปที่ ง1 แสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอสิตไคโตซาน-พอลิแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกต

ตารางที่ ๒ แสดงการคำนวณประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ต่างต่าง ๆ บนคอมพอลิเมอร์ โคลิโดซาน-พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก

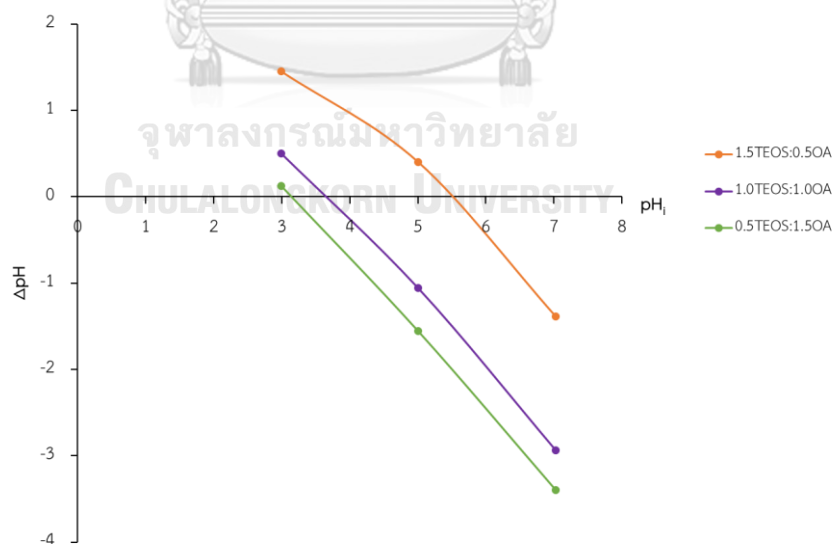
สัดส่วนของโคลิโดซานต่อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	ความเป็นกรด-ต่างเริ่มต้น (pH _i)	ความเป็นกรด-ต่างสุดท้าย (pH _f)	ผลต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ต่างสุดท้ายและเริ่มต้น (ΔpH)
1:9	2.01	2.42	2.57-2.01 = 0.41
	3.00	2.57	2.57-3.00 = -0.43
	5.02	2.77	2.77-5.02 = -2.25
	7.04	2.73	2.73-7.04 = -4.31
3:7	2.01	2.76	2.76-2.01 = 0.75
	3.00	2.98	2.98-3.00 = -0.02
	5.02	3.37	3.37-5.02 = -1.65
	7.04	3.55	3.55-7.04 = -3.49
5:5	2.01	2.96	2.96-2.01 = 0.95
	3.00	3.13	3.13-3.00 = 0.13
	5.02	3.20	3.30-5.02 = -1.82
	7.04	3.29	3.29-7.04 = -3.75
7:3	2.01	3.36	3.36-2.01 = 1.35
	3.00	3.48	3.48-3.00 = 0.48
	5.00	3.65	3.65-5.00 = 1.06
	7.00	3.74	3.74-7.00 = -0.92
9:1	2.01	3.53	3.53-2.01 = 1.52
	3.00	3.50	3.50-3.00 = 0.50
	5.00	3.55	3.55-5.00 = -1.47
	7.00	3.66	3.66-7.00 = -3.38



รูปที่ ง2 แสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอสิตโคโตซาน-พอลิแอลกอฮอล์ที่สัดส่วนต่าง ๆ โดยใช้สารเชื่อมขวางกรดออกซาลิก

ตารางที่ ง3 แสดงการคำนวณประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยใช้สัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกต่าง ๆ

สัดส่วนของสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิก	ความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น (pH _i)	ความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย (pH _f)	ผลต่างระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายและเริ่มต้น (ΔpH)
1.5:0.5	3.06	4.51	4.51-3.06 = 1.45
	5.03	5.43	5.43-5.03 = 0.40
	7.01	5.62	5.62-7.01 = -1.39
1.0:1.0	3.00	3.50	3.50-3.00 = 0.50
	5.00	3.96	3.96-5.00 = -1.06
	7.00	4.10	4.10-7.00 = -2.94
0.5:1.5	3.00	3.12	3.12-3.00 = 0.12
	5.00	3.46	3.46-5.00 = -1.56
	7.00	3.64	3.64-7.00 = -3.40



รูปที่ ง3 แสดงประจุที่ผิวเป็นศูนย์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่าง ๆ บนคอมพอสิต 3CS:7PVA_TEOS:OA โดยใช้สัดส่วนสารเชื่อมขวางเตตระเอซิลออร์โธซิลิเกตต่อกรดออกซาลิกต่าง ๆ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววิสาข์ ไทรสุวรรณ
วัน เดือน ปี เกิด	13 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ หลักสูตรวิศวกรรม ศาสตรบัณฑิต สำนักวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัย ลักษณ์
ที่อยู่ปัจจุบัน	10/2 หมู่ 5 ถนนดอนสัก-ขนอม ตำบลดอนสัก อำเภอดอนสัก จังหวัด สุราษฎร์ธานี 84220
ผลงานตีพิมพ์	SELECTIVE ADSORPTION REACTIVE DYE FROM THE COLORED WATER EFFLUENT USING CHITOSAN-POLYVINYL ALCOHOL FILM COMPOSITES. The 27th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemical, and Materials Technology. Online by Zoom Application, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand July 1st, 2021