

การศึกษาประสิทธิภาพของ CHI-MMT ในการดูดซับสีย้อม ACID YELLOW 17

STUDY ON ADSORPTION CAPACITY OF CHI-MMT ON

ACID YELLOW 17



นางสาวดวงรัตน์ อางคงหาญ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....108534  
วัน,เดือน,ปี.....-5 ก.ค. 2553

b.....1222325b  
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY ON ADSORPTION CAPACITY OF CHI-MMT ON**

**ACID YELLOW 17**



**MISS DUANGRUT ARTKONGHARN**

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

**IN INDUSTRIAL CHEMISTRY**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**ACADEMIC YEAR 2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาประสิทธิภาพของ CHI-MMT ในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17

Study on adsorption capacity of CHI-MMT on Acid Yellow 17

ชื่อนักศึกษา นางสาวดวงรัตน์ อัจจงหาญ

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ปุณณมา ศิริพันธ์โนน

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับ  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี  
อุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.วินิจิตร ชื่นชม	
ผศ.ดร.ชลลดา ถุดวิรุพห์	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	

  
.....  
(ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธีรักษ์)

ปฏิบัติหน้าที่ประธานสาขาวิชา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>หัวข้อโครงการพิเศษ</b>	การศึกษาประสิทธิภาพของ CHI-MMT ในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 Study on adsorption capacity of CHI-MMT on Acid Yellow 17
<b>ชื่อนักศึกษา</b>	นางสาวดวงรัตน์ อัจจงหาญ
<b>ปริญญา</b>	วิทยาศาสตรบัณฑิต
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม
<b>ปีการศึกษา</b>	2551
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	ผศ.ดร.ภัทธราช มนต์วิเศษ
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</b>	ผศ.ดร.ปฐมมา ศิริพันธ์โนน

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ CHI-MMT ในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของ CHI-MMT ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัสนในช่วง 15-180 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ในช่วง 50-1500 mg/l พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับของ CHI-MMT จะเพิ่มขึ้นและให้ค่าสูงสุดที่เวลา 60 นาที เป็น 70 mg/g เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 800 mg/l เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมมีค่าลดลง ในทางตรงข้ามความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ทำการศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้วกลับมาใช้ใหม่ โดยใช้เทคนิคการสกัด soxhlet โดยใช้ตัวทำละลาย คือ เมทานอลและน้ำกลั่น พบว่า ตัวทำละลายทั้งสองชนิดสามารถสกัดสีย้อมบางส่วนออกจาก CHI-MMT ได้โดยไม่มีผลทำให้โครงสร้างของ CHI-MMT เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เมื่อนำ CHI-MMT ที่ได้จากการสกัดมาทดสอบการดูดซับสีย้อมโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้น 800 mg/l และใช้ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที พบว่า CHI-MMT ที่ได้จากการสกัดด้วยเมทานอล จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมเป็น 14.8 mg/g ในขณะที่ CHI-MMT ที่ได้หลังจากการสกัดด้วยน้ำกลั่นมีค่าเท่ากับ 1.5 mg/g

<b>Title</b>	Study on adsorbtion capacity of CHI–MMT on Acid Yellow 17	
<b>Student</b>	Duangrut	Artkongharn
<b>Degree</b>	Bachelor of Science	
<b>Major</b>	Industrial Chemistry	
<b>Academic Year</b>	2008	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Pathavuth	Monvisade
<b>Co-Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Punnama	Siriphannon

### ABSTRACT

This research studied the adsorption efficiency of Acid Yellow 17 by CHI-MMT. Effects of various parameter on the adsorption time, that the adsorption time 15-18 min and the initial concentration of dye in the range of 50-1500 mg/l were studied. It was found that the adsorption capacity increased with an increasing of adsorption time. When using the initial concentration of 800 mg/l and adsorption time of 60 min, the highest adsorption capacity was obtained at 70 mg/g. When the initial concentration of Acid Yellow 17 increased, the removal percentage decreased but the adsorption capacity increased. In addition, the regeneration of CHI-MMT was preliminary studied by soxhlet extraction using methanol and distilled water as solvents. It was found that both solvents could partially extract Acid Yellow 17 from the CHI-MMT in which they caused no change in the CHI-MMT structure. The adsorption capacity of CHI-MMT obtained from the solvent extraction was investigated using the initial concentration of 800 mg/l and adsorption time of 60 min. It was found that the adsorption capacity of the CHI-MMT extracted with methanol was 14.8 mg/g while that extracted with distilled water was 1.5 mg/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำโครงการพิเศษจึงใคร่ขอขอบพระคุณที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธวุธ มนต์วิเศษ และ ผศ.ดร.ปุณณมา สิริพันธ์โนน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ฝ่ายธุรการ เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการห้องคอมพิวเตอร์ และแม่บ้าน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา-มารดาและพี่น้องในครอบครัวที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ขอขอบพระคุณ เพื่อน ๆ เคมีอุตสาหกรรม ชั้นปีที่ 4 ทุกคน และเพื่อนๆ คณะวิทยาศาสตร์ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

และนอกเหนือจากบุคคลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และให้กำลังใจมาตลอดการทำโครงการพิเศษนี้ ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ดวงรัตน์ อาจคงหาญ

ผู้จัดทำ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 เคลย์ (Clay)	3
2.1.1 ความหมายของ Clay	3
2.1.2. หน่วยที่สำคัญของผลึกของเคลย์	3
2.1.3 ชนิดของเคลย์	4
2.1.4 ค่า Cation exchange capacity (CEC) ของเคลย์	7
2.1.5 สมบัติทางกายภาพของเคลย์	8
2.1.6 เคลย์มอนต์มอริลโลไนต์กับเทคโนโลยีของนาโนเคลย์	9
2.2 ไคโตซาน (Chitosan)	10
2.2.1 ความหมายของไคโตซาน	10
2.2.2 แหล่งที่พบไคโตซาน	11
2.2.3 การผลิตไคติน-ไคโตซาน	12
2.2.4 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตไคโตซาน	12
2.2.5 คุณสมบัติของไคโตซาน	14
2.2.6 ไคโตซานกับความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7 การประยุกต์ใช้งานของไคโตซาน	16
2.3 ออแกโนเคลย์ (Organoclay)	18
2.3.1 ความหมายของออแกโนเคลย์	18
2.3.2 กลไกในการเกิดเป็นออแกโนเคลย์	19
2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของออแกโนเคลย์	19
2.4 สีย้อม (Dye stuffs)	20
2.4.1 ความหมายของสีย้อม	20
2.4.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม	20
2.4.3 สีย้อมชนิดแอซิดเอลโลว์ 17	23
2.4.4 การรวมตัวกันของสีย้อมกับเส้นใย	24
2.4.5 ความเป็นพิษของสีย้อม	24
2.4.6 การวัดสีย้อมในน้ำเสีย	25
2.4.7 ผลกระทบของสีย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม	25
2.5 การดูดซับ (Adsorption)	26
2.5.1 หลักการดูดซับ	26
2.5.2 ประเภทของการดูดซับ	26
2.5.3 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี	27
2.5.4 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ	28
2.5.5 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)	28
2.5.6 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium)	29
2.5.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ	33
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	38
3.3 วิธีการทดลอง	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัตถุคิบ CHI-MMT	39
3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17	39
3.3.3 การศึกษาเบื้องต้นในการ Regeneration CHI-MMT	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	42
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัตถุคิบ CHI-MMT	42
4.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	42
4.1.2 อินฟราเรดสเปกตรัมสเปกโตรสโคปี (FT-IR)	42
4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17	46
4.2.1 ผลของระยะเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ	46
4.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับ	47
4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ	49
4.3 การศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT กลับมาใช้ใหม่	54
4.3.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ CHI-MMT ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR	54
4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT ที่ผ่านการ regeneration	57
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	64
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	68
ภาคผนวก ง	69

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างๆ	46
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	48
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากการคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่เวลา 60 นาที	50
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลแสดงค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง, จากสมการของแลงเมียร์และสมการของฟรุนดลิช	52
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ผ่านการ regeneration โดยการ สกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่น	57
ตารางที่ ง1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสีย้อม Acid Yellow 17	66
ตารางที่ ง1 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับ สารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	69
ตารางที่ ง1 (ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับ สารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	69
ตารางที่ ง1 (ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับ สารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	70
ตารางที่ ง1 (ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับ สารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง	71
ตารางที่ ง2 ข้อมูลผลการทดลองใช้ CHI-MMT ที่ได้จากการสกัดด้วยเมทานอลและ น้ำกลั่น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เป็นเวลา 60 นาที	71

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silicatetrahdral)	4
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Aluminaoctahedral)	4
รูปที่ 2.3 แบบจำลองแสดงโครงสร้างพื้นฐานของเคโอลิไนท์ (1:1 type)	5
รูปที่ 2.4 แบบจำลองแสดงโครงสร้างพื้นฐานของแร่ดินเหนียวอนต์มอริลโลไนท์	6
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแร่อีลไลต์ (2:1 type)	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคติน	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน	10
รูปที่ 2.8 แสดงสูตรโครงสร้างโมเลกุลของแอสซิดยลโลว์ 17 (Acid Yellow 17)	24
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน	30
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอร์มแบบต่างๆ	33
รูปที่ 4.1 แผนภาพ XRD ของ CHI-MMT (a) ก่อนการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 และ (b) หลังการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17	43
รูปที่ 4.2 รูปผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR (a) CHI-MMT ก่อนการดูดซับ (b) ผงสีย้อม Acid Yellow 17 และ (c) CHI-MMT หลังการดูดซับ	45
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัด กับระยะเวลาในการสัมผัสเมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เท่ากับ 800 mg/l	47
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัด และปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที	49
รูปที่ 4.5a ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorbtion isotherm)	51
รูปที่ 4.5b ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorbtion isotherm)	51
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นหลังการดูดซับจากการทดลอง จากสมการฟรุนดิช และจากสมการแลงเมียร์	53
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT	54
รูปที่ 4.8 แผนภาพ XRD ของ CHI-MMT หลังการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่น เปรียบเทียบกับ CHI-MMT ก่อนการสกัด	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 สเปกตรัม FT-IR ของ (a) CHI-MMT ที่ดูดซับสีข้อมแล้ว (b) CHI-MMT หลังสกัดด้วยเมทานอล และ (c) CHI-MMT หลังสกัดด้วยน้ำกลั่น	56
รูปที่ ข1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายสี Acid Yellow 17	67



## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
MMT	มอนต์มอริลโลไนต์
CHI-MMT	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ ปรับปรุงด้วยไคโตซาน
%	เปอร์เซ็นต์
°C	องศาเซลเซียส
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg	มิลลิกรัม
g	กรัม
L	ลิตร
ml	มิลลิลิตร
pH	พีเอช
w/w	weight by weight
v/v	volume by volume
C <sub>0</sub>	ความเข้มข้นก่อนดูดซับ
C <sub>e</sub>	ความเข้มข้นหลังดูดซับ
q <sub>e</sub>	ความสามารถในการดูด ซับ
V	ปริมาตรของสารละลาย
W	น้ำหนักตัวดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ของประเทศซึ่งมีแนวโน้มที่จะมีการขยายตัวกว้างขึ้น ปริมาณการใช้น้ำสำหรับกระบวนการผลิตก็จะมากขึ้นตามไปด้วย มีผลก่อให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากที่มีสารเคมีและสารพิษต่างๆ ซึ่งบางชนิดเป็นสารเคมีที่ก่อให้เกิดโรคมะเร็งปนเปื้อนอยู่มากมาย เนื่องจากเทคโนโลยีปัจจุบันไม่สามารถใช้สีย้อมในการย้อมหรือพิมพ์ผ้าได้หมดร้อยเปอร์เซ็นต์ จึงทำให้มีสีย้อมบางส่วนเจือปนอยู่ในน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อีกทั้งยังอาจมีการละลายออกมาในขณะทำการซักล้าง เนื่องจากว่าน้ำทิ้งที่จะระบายออกนอกบริเวณโรงงานต้องได้มาตรฐานตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนดก่อนลงสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดสีย้อมในน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งการบำบัดน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมมีอยู่หลากหลายวิธีที่ให้ประสิทธิภาพดี เช่น การกรองด้วยแผ่นเยื่อเลือกผ่าน (Membrane Filtration) การบำบัดด้วยโอโซน (Ozone Treatment) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Coagulation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้มีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง จึงควรมีการนำเทคโนโลยีที่ง่ายและประหยัดมาใช้ นั่นก็คืออาจจะเป็นการนำวัสดุที่เหลือใช้ หาได้ง่าย และราคาถูกมาประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับ แต่ทั้งนี้ก็ควรที่จะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับที่ดีด้วย

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำเคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่มีลักษณะเด่นคือ มีโครงสร้างที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน ซึ่งชั้นผลึกเหล่านี้มีความยืดหยุ่นและมีความเป็นขี้ผึ้งหรือประจุและยังกำลังเป็นที่นิยมในการนำมาพัฒนาไปสู่เทคโนโลยีนาโนเคลย์อีกด้วย โดยการนำมอนต์มอริลโลไนต์มาทำการปรับปรุงด้วยไคโตซานซึ่งก็เป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายเช่นกัน เนื่องจากว่าไคโตซานนั้นเป็นผลิตผลจากเปลือกกุ้ง เปลือกปู ซึ่งประเทศไทยเราก็เป็นอันดับต้นๆ ในการส่งออกสินค้าจำพวกนี้อยู่แล้ว โดยงานวิจัยนี้จะนำแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซานแล้วนั้น มาทำการดูดซับสีย้อมชนิด Acid Yellow 17 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับที่สถานะต่างๆ กัน โดยผู้ทำการวิจัยมีความหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชุดนี้จะสามารถเป็นอีกหนึ่งตัวเลือกในวิธีการบำบัดสีย้อมที่มีประสิทธิภาพสูง และมีวิธีการที่สะดวก ง่าย ราคาถูก ซึ่งจะก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมอย่างยิ่ง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้เคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน โดยศึกษาถึงปัจจัยในเรื่องของระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ
2. เพื่อศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้วกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยแปรค่าระยะเวลาสัมผัสเป็น 15 30 60 90 120 150 และ 180 นาที
2. ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 50 100 300 500 800 1000 และ 1500 mg/l
3. ทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17
4. ทำการศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้ว กลับมาใช้ใหม่

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของเคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน
2. สามารถทำการพัฒนาเทคโนโลยีของนาโนเคลย์ในการกำจัดสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอได้
3. เป็นการนำเคลย์และไคโตซานซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีอยู่มากในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
4. เป็นทางเลือกในการเลือกตัวดูดซับเพื่อนำไปใช้บำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทออีกทางหนึ่ง
5. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนา ออกแบบ และขยายขนาด ระบบบำบัดน้ำเสียจริงในอนาคตต่อไป
6. เพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ใหม่ในการวิจัยพื้นฐานเกี่ยวกับการกำจัดสีย้อมโดยใช้เคลย์ชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงด้วยไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 เคลย์ (Clay) [1]

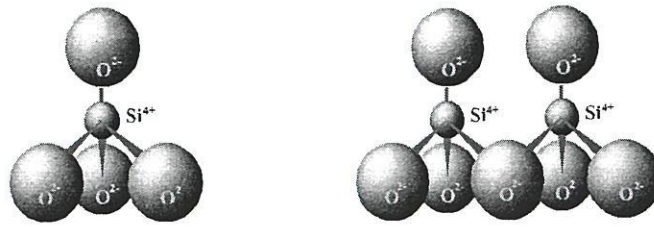
##### 2.1.1 ความหมายของ Clay

เคลย์ (Clay) หรือในความหมายของภาษาไทย หมายถึง ดินเหนียว ดินโคลน ประกอบด้วยแร่ธาตุหลากหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด องค์ประกอบที่สำคัญในดิน ได้แก่ สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และความชื้น ซึ่งในส่วนของสารที่มีอนุภาคขนาดเล็ก คือ ประมาณ 0.5-0.2 ไมครอน สามารถแขวนลอยได้ สารคอลลอยด์ในดินสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ คอลลอยด์ที่เป็นสารอินทรีย์ (Organic Colloid) คือส่วนที่เหลือจากเศษซากพืชซากสัตว์ที่ถูกย่อยสลายแล้ว ซึ่งจะทนทานต่อการสลายตัวหรือสลายตัวได้ช้ามาก เรียกสารอินทรีย์ในส่วนนี้ว่า “ฮิวมัส” (Humus) คอลลอยด์ประเภทที่สองคือ คอลลอยด์ที่เป็นสารอนินทรีย์ (Inorganic Colloid) จะได้จากการสลายตัวของแร่ธาตุ ซึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออนและอนุภาคต่างๆ ที่อาจตกผลึก หรือทำปฏิกิริยารวมตัวกันใหม่เป็นผลึกบางๆ ที่มีขนาดเล็ก เรียกว่า แร่ดินเหนียว (Clay Mineral) แร่ดินเหนียวที่สำคัญที่พบมากได้แก่ ซิลิเกตเคลย์ หรือ อะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งแร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งออกได้อีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับปริมาณชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ และชนิดของโครงสร้างผลึกหรืออัญรูป เป็นต้น

##### 2.1.2. หน่วยที่สำคัญของผลึกของเคลย์ มีดังนี้ [2]

###### 1. หน่วยของซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silicatetrahedral unit)

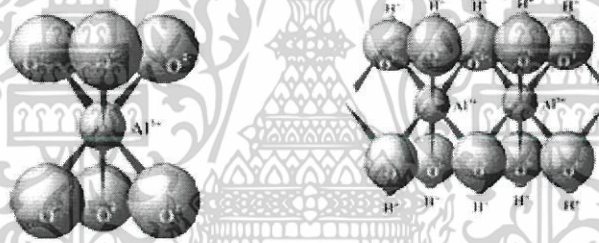
ซึ่งประกอบไปด้วยธาตุซิลิกา 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจน 4 อะตอม เกิดเป็นรูปทรงที่มีสี่ด้าน จึงเรียกว่าหน่วยของเตตระฮีดรอล (Tetrahedral unit) รูปทรงที่มีสี่ด้านนี้มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายรังผึ้ง กล่าวคือ จะเป็นแผ่นที่มีช่องรูปหกเหลี่ยมอยู่ทั่วไป เรียกว่าแผ่นของซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silicatetrahedral sheet) หรือเรียกสั้นๆว่า แผ่นซิลิกา (Silica sheet) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของซิลิกาเตตระฮีดรอล (Silicatetrahedral)

## 2.หน่วยของอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Aluminaoctahedral unit)

ประกอบไปด้วยธาตุอะลูมิเนียม 1 อะตอมอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยธาตุออกซิเจนหกอะตอม ทำให้เกิดเป็นรูปทรงที่มีแปดด้านขึ้น เรียกว่า แผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Aluminaoctahedral sheet) หรือเรียกสั้นๆ ได้ว่า แผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของอะลูมินาออกตะฮีดรอล (Aluminaoctahedral)

### 2.1.3 ชนิดของเคลย์

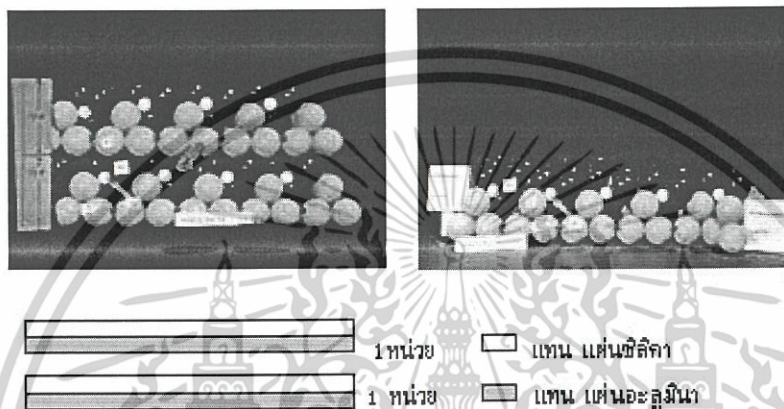
เคลย์ชนิดต่างๆ เกิดจากความแตกต่างกันที่การเรียงซ้อนทับของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา และการแลกเปลี่ยนการแทนที่ของซิลิกอน (Si) กับอะลูมิเนียม (Al) ดังนั้นเราสามารถแบ่งชนิดของเคลย์ได้ ดังนี้

#### 1.เคโอลิไนต์ (Kaolinite) หรือ ดินขาว

เคโอลิไนต์หรือดินขาวมีสูตรทั่วไปว่า  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  เป็นแร่ที่พบอยู่ในดินมากที่สุด มีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 1 แผ่น ประกบทับแผ่นของอะลูมินาอีก 1 แผ่น โดยที่มีซิลิกอนและอะลูมิเนียมร่วมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกัน ในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานรวมกันเข้าเป็นผลึกของแร่เคโอลิไนต์ ผลึกของแร่เคโอลิไนต์นี้มีลักษณะเป็นแผ่นแบนรูปหกเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Hexagonal shape) ที่มีขนาดเล็กมากๆ ตั้งแต่ 5 ไมครอน จนถึงระดับ 0.1 ไมครอน (1 micron หรือ micrometer เท่ากับ  $10^{-6}$  meter) และด้วยขนาดของผลึกที่เล็กมากๆ ประกอบกับการที่มีรูปร่างที่เป็นแผ่นแบน จึงทำให้แร่ดินชนิดนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่นเฉพาะตัว นำไปสู่การประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น ใช้เป็นสารเคลือบผิวกระดาษ ทำเครื่องปั้นดินเผาและใช้เป็นสารตัวเติม



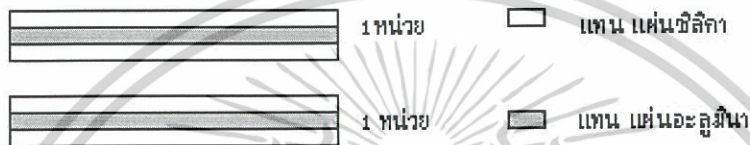
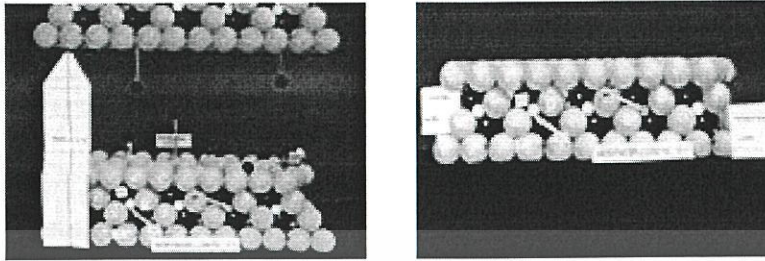
รูปที่ 2.3 แบบจำลองแสดง โครงสร้างพื้นฐานของเคโอลิไนท์ (1:1 type)

## 2.มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)[1,2]

แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เบนโทไนท์ หรือ เบนโทน (bentonite, bentone) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีทั่วไปว่า  $\text{Na}_{0.2}\text{Ca}_{0.1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}$  เป็นแร่ที่มีอยู่ในตระกูล phyllosilicate มีต้นกำเนิดมาจากฝุ่นภูเขาไฟ โดยจะพบมากในอเมริกาเหนือ จีน ญี่ปุ่น และฝรั่งเศส เป็นต้น

แรมมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะโครงสร้างเป็นชั้นผลึกที่เรียกว่า 2:1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นของ อะลูมินาออกตะฮีดรอลที่ถูกประกบอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของซิลิเกตเตตระฮีดรอล มีความหนา รวมของชั้นผลึก 2:1 ประมาณ 0.7-1.0 นาโนเมตร ในขณะที่ความยาวด้านข้างเป็นไมครอน มีประจุ ลัพธ์เป็นลบ ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนท์จึงมีความเป็นขั้ว และมักจะมีประจุบวกของแมกนีเซียม อะลูมิเนียม โซเดียม แคลเซียมและอื่นๆ เข้ามาแทรกอยู่ระหว่างชั้นผลึก เพื่อให้เกิดสมดุลของประจุ ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



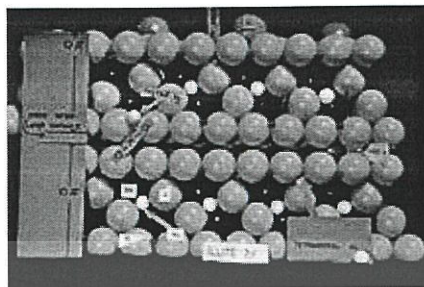
รูปที่ 2.4 แบบจำลองแสดงโครงสร้างพื้นฐานของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์

เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วของมอนต์มอริลโลไนต์ จึงทำให้แร่ดินชนิดนี้ชอบน้ำและดูดน้ำได้มาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพบว่าความหนาของชั้นผลึกสามารถขยายได้จนถึง 1.2 นาโนเมตร เมื่อมีความชื้น และด้วยคุณสมบัติพิเศษนี้ จึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นที่รู้จักกันดี รวมถึงการนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียม ที่สำคัญไปกว่านั้นคือ ใช้เป็นสารดูดซับในงานบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ

### 3. อิลไลต์ (Illite) หรือพวกไฮครัสไมท์ (Hydrus mica)

อิลไลต์มีองค์ประกอบของผลึกคล้ายกับมอนต์มอริลโลไนต์ จึงมีโครงสร้างของชั้นผลึกแบบ 2:1 แร่อิลไลต์ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งในแร่หิน ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ อยู่ระหว่างคุณสมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์และเคโอลิไนต์ แร่ชนิดนี้มีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ  $(K,H)Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot xH_2O$  จะเห็นได้ว่ามีโครงสร้างที่แตกต่างจากมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการที่มีอะลูมิเนียมเข้าแทนที่ซิลิกอนในแผ่นซิลิกา ทำให้ปริมาณประจุลบที่โครงสร้างมีอยู่น้อยกว่า ส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียม (K) ที่เข้ามาทำให้ประจุสมดุลนั้นน้อยกว่า ดังนั้นการขยายตัวและหดตัวของชั้นผลึกจะน้อย น้ำและประจุบวกอื่นๆ เข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างได้ยากกว่าแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานของแร่อิลไลต์ คือ การใช้เป็นสารหล่อลื่นและสารตัวเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของแร่ฮิลไลต์ (2:1 ไทป์)

#### 4.คลอไรต์ (Chlorite)

คลอไรต์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีประจุระหว่างชั้นเคลย์ที่ไม่ใช่กลุ่มPhyllosilicate เช่น ลิเทียม นิกเกิล เหล็ก แมงกานีส ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างชั้นเคลย์แตกต่างกันออกไป จึงส่งผลกระทบต่อสมบัติต่างๆ ของเคลย์ เคลย์กลุ่มนี้จึงไม่ค่อยได้ถูกกล่าวถึงและไม่นิยมนำไปใช้งานมากนัก

#### 2.1.4 ค่า Cation exchange capacity (CEC) ของเคลย์ [2]

ค่า Cation exchange capacity หรือ CEC คือความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของเคลย์ หมายถึง ผลรวมของประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดของดิน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมสมมูลต่อดินแห้ง 100 กรัม เมื่อวัดที่ pH=7 ปัจจัยที่มีผลต่อค่า CEC ที่สำคัญ คือ อิทธิพลของปริมาณและชนิดของอนุภาคดินเหนียว

#### อิทธิพลของปริมาณและชนิดของอนุภาคดินเหนียว

ดินเหนียวส่วนใหญ่เป็นคอลลอยด์และมีประจุลบ เมื่อดินมีอนุภาคของดินเหนียวมากขึ้น จะทำให้มีค่า CEC สูงขึ้นด้วย และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างดินเนื้อละเอียดกับดินเนื้อหยาบ พบว่าดินเนื้อละเอียดจะมีค่า CEC สูงกว่าดินเนื้อหยาบ ดังนั้นเราอาจประเมินค่า CEC ของดินโดยคร่าวๆ ได้จากปัจจัยดังต่อไปนี้

**1.เปอร์เซ็นต์ของดินเหนียว** กล่าวคือ เปอร์เซ็นต์ของดินเหนียวจะให้ค่า CEC แก่ดินประมาณ 0.5 มิลลิอิกวิวาเลนต์ ตัวอย่างเช่น ถ้าดินมีดินเหนียว 40 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่าจะมีค่า CEC อยู่ประมาณ  $40 \times 0.5 = 20$  มิลลิอิกวิวาเลนต์ต่อดิน 100 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.อิทธิพลของอินทรีย์วัตถุในดิน** เป็นที่ทราบกันดีว่าสารจำพวกอินทรีย์วัตถุ เป็นสารที่มีค่า CEC สูงที่สุดในบรรดาคอลลอยด์ด้วยกัน ดังนั้น ดินที่มีอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ดินนั้นมีค่า CEC สูงขึ้นด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าดินชั้นบนจะเป็นดินที่มีค่า CEC สูงกว่าดินชั้นล่าง

### **ประโยชน์และความสำคัญของค่า CEC ในดิน**

สำหรับค่า CEC ของดินในประเทศไทย จากผลการสำรวจพบว่า ดินเหนียวที่พบในประเทศไทยประเภทมอนต์มอริลโลไนท์จะค่า CEC สูงกว่าดินเหนียวประเภทเคโอลิไนต์และอิลไลต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีความสามารถในการดูดซับประจุบวกได้มากที่สุดนั่นเอง

ค่า CEC ในดินมีประโยชน์ทางการเกษตรอย่างมาก เพราะธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแคตไอออน จึงสามารถถูกดินยึดไว้ที่ผิวเคลือบไมเซลล์ของพืช พืชสามารถนำเอาแคตไอออนเหล่านี้มาใช้ในการเจริญเติบโตได้ โดยการใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมลงไปดิน โพแทสเซียมไอออนก็จะไปแทนที่ไฮโดรเจนและแคลเซียม ไอออนที่ยึดเกาะกับผิวเคลือบไมเซลล์ ดินก็จะไม่ขาดธาตุโพแทสเซียมไอออน แม้ว่าจะมีการชะล้างที่เกิดจากน้ำในการทำดินให้ร่วนซุยเพื่อให้เหมาะสำหรับการเพาะปลูกก็ตาม

นอกจากนี้แล้วสำหรับดินที่มีความเป็นกรด เราก็สามารถนำเอาความรู้เกี่ยวกับค่า CEC ไปปรับปรุงดินกรดได้ โดยการที่เราใส่พวกแคลเซียมไอออนลงไปดิน แคลเซียมไอออนจะไปแทนที่ไฮโดรเจนไอออนที่เกาะติดกับเคลือบไมเซลล์ให้หลุดออก ทำให้ความเป็นกรดในดินลดลง เนื่องจากความเป็นกรดขึ้นอยู่กับปริมาณของไฮโดรเจนไอออน

### **2.1.5 สมบัติทางกายภาพของเคลย์**

สมบัติทางกายภาพเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ใช้ในการกำหนดโครงสร้างของเคลย์ ซึ่งสมบัติทางกายภาพของเคลย์ประกอบด้วย

#### **1.พื้นที่ผิว (Surface area)**

เคลย์เป็นวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กมาก และเป็นแผ่นแบนและบาง จึงทำให้เคลย์มีพื้นที่ผิวสูง นอกจากนี้เคลย์ยังมีพื้นที่ผิวภายในระหว่างแผ่นผลึกของเคลย์ที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาคมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทรงกลมและทรงลูกบาศก์

#### **2.ความเหนียวและความอ่อนตัว (Cohesion and plasticity)**

ความเหนียว หมายถึง ความสามารถในการเกาะยึดกันไว้ระหว่างอนุภาคของดินเหนียว เมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม สามารถปั้นให้เป็นรูปต่างๆ ได้ จะเห็นได้ว่าความเหนียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความอ่อนตัวจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของดินเหนียวเป็นอย่างมาก กล่าวคือ ถ้าหากว่าดินเหนียวมีพื้นที่ผิวมาก น้ำก็สามารถเกาะยึดอยู่ได้มาก ทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกาะติดกันได้ดีและมีความอ่อนตัวดินเหนียวจึงเหนียวและเกาะติดมือ ทำให้การไหลพรวนลำบาก ตรงกันข้ามถ้าดินเหนียวมีพื้นที่ผิวดินเหนียวน้อย ถึงแม้ว่าจะมีความชื้นมากก็จะทำให้ดินเหนียวไม่สามารถเกาะติดกับดินเหนียวอนุภาคอื่นๆ ได้ดี ทำให้ดินมีสภาพร่วนซุย ไม่เหนียว และไหลพรวนดินได้ง่าย

### 3. การขยายตัวและการหดตัว (Swelling and shrinking)

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าเคลย์สามารถดูดซับน้ำไว้ได้ เนื่องจากเคลย์มีช่องว่างระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกัน ดังนั้นเมื่อน้ำเข้าไปอยู่ระหว่างช่องว่างนี้จะทำให้ดินเหนียวเปื่อยและเกิดการพองตัวหรือการขยายตัวและเมื่อน้ำในช่องว่างระหว่างแผ่นผลึกของดินเหนียวระเหยออกไป ก็จะทำให้ดินเหนียวเกิดการยุบตัวลงหรือเกิดการหดตัวนั่นเอง นอกจากนี้แล้ว ยังพบว่าน้ำหรือความชื้นที่เคลย์ได้รับส่งผลโดยตรงต่อค่าความถ่วงจำเพาะของเคลย์ด้วย

#### 2.1.6 เคลย์มอนต์มอริลโลไนต์กับเทคโนโลยีของนาโนเคลย์

ปัจจุบันแร่ดินเหนียวหรือเคลย์ สามารถถูกพัฒนาไปสู่เทคโนโลยีของนาโนเคลย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เคลย์ได้รับความสนใจและมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย ซึ่งเคลย์ที่สำคัญ ได้แก่กลุ่มเคลย์ที่มีจุดเด่นในเรื่องของโครงสร้างผลึกที่แผ่เป็นแผ่นหรือชั้นเรียงซ้อนกัน เพราะชั้นผลึกเหล่านี้จะมีความยึดหยุ่นและมีความเป็นขั้วหรือประจุ (Polarity) เราเรียกเคลย์กลุ่มนี้ว่า Smectite clay และเคลย์ที่ได้รับการพัฒนามากที่สุดในกลุ่มนี้คือ มอนต์มอริลโลไนต์

จากคุณสมบัติของมอนต์มอริลโลไนต์ไปแล้วข้างต้น ในหัวข้อที่ 2.1.3 (เรื่องชนิดของเคลย์) จะเห็นได้ว่า แร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ แต่เมื่อถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยการแทนที่ประจุต่างๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ จะได้แร่ดินเหนียวที่เรียกว่า โมดิฟายด์เคลย์ (Modified clay) หรือออร์กาโนเคลย์ (Organo clay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ เป็นเคลย์ที่มีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต แต่ขอบนอกของแผ่นซิลิเกตยังคงมีความเป็นขั้ว สามารถเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึกได้เมื่อมีความชื้น ทำให้ผลึกห่างกัน เกาะกันอย่างหลวมๆ เป็นอนุภาคนาโนเมตรของซิลิเกต (เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณนาโนเมตร) ที่มีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (Aspect ratio) สูงมากใน 2 มิติ

จากหลักการดังกล่าวข้างต้นนี้ จึงเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคนาโนเมตรจากธรรมชาติ จึงเรียกว่า “นาโนเคลย์” ซึ่งมีประโยชน์มากในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โลหะหนัก และสีย้อมผ้า เป็นต้น

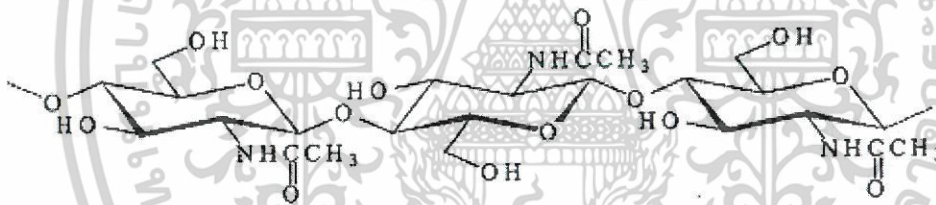
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ไคโตซาน (Chitosan)

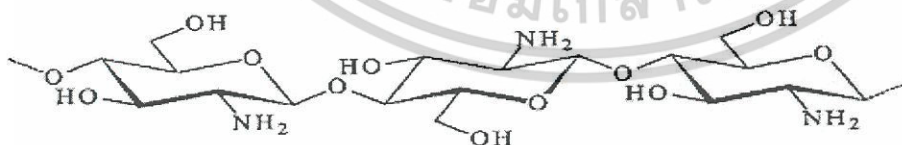
### 2.2.1 ความหมายของไคโตซาน [3]

ไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากไคติน ไคติน-ไคโตซาน จัดเป็นโคพอลิเมอร์ที่อยู่ร่วมกันในธรรมชาติ ทั้งนี้แล้วพบว่าไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส

ไคโตซานถูกค้นพบในปี ค.ศ.1894 โดย Hoppe-Seyler ซึ่งเขาได้ทำการทดลองโดยทำปฏิกิริยาระหว่างไคตินกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่เป็นของแข็ง โดยทำการหลอมต่างเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับไคตินที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และเรียกสารที่ได้จากปฏิกิริยานี้ว่า ไคโตซาน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ (derivative) ของไคติน ที่ได้จากการเอาหมู่อะซิติล (acetyl) ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ในไคติน ออกตั้งแต่ 50% ขึ้นไป ไคโตซานมีชื่อทางเคมีว่า poly [ $\beta$ -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucopyranose] แสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของไคติน



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยธรรมชาติแล้ว ไคโตซานจะไม่ละลายน้ำ แต่ไคโตซานจะละลายได้ดีเมื่อใช้กรดอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย สารละลายของไคโตซานจะมีความข้นเหนียว แต่ใส่กลายวันหรือพลาสติกใส ยึดหยุ่นได้เล็กน้อย จึงมีคุณสมบัติที่พร้อมจะทำให้เป็นรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าต้องการทำเป็นแผ่นหรือเยื่อต่างๆ เป็นเจล หรือรูปร่างเป็นเม็ด เกลลี่ เส้นใย สารเคลือบและคอลลอยด์ เป็นต้น

### 2.2.2 แหล่งที่พบไคโตซาน

ในธรรมชาติเราพบไคติน-ไคโตซานมีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส โดยจะไม่พบเป็นโครงสร้างหลักเดี่ยวๆ ในสิ่งมีชีวิตแต่จะพบในรูปที่เป็นสารประกอบปะปนอยู่กับสารอื่นๆ เช่น อยู่ร่วมกับหินปูนหรือแคลเซียม และโปรตีนในรูปสารประกอบเชิงซ้อน แหล่งวัตถุดิบสำคัญที่สามารถพบไคติน-ไคโตซาน มีดังนี้

#### 1. พบในสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลัง ประเภทมีข้อปล้อง (Arthropods) ได้แก่

- หอนอนทะเล (Annelida)
- หอย (Mollusk)
- Coelentera
- Crustaceans
- กุ้งก้ามกราม (Lobster)
- กุ้ง (Shrimp)
- กุ้งนาง (Prawn)
- Krill
- ปู (crab)

#### 2. พบในแมลง (Insect) ได้แก่

- แมลงป่อง
- Brachiopods
- มด
- แมลงสาบ
- แมลงปีกแข็ง
- แมงมุม

#### 3. พบในจุลินทรีย์ (Microorganisms) ได้แก่

- สาหร่ายสีเขียว
- สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำตาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ยีสต์ ( $\beta$ -type)
- เชื้อรา (ผนังเซลล์)
- ก้านชูสปอร์ของ penicillium
- สปอร์
- Chytriciaceae
- Blastocladiaceae

### 2.2.3 การผลิตโคติน-โคโตซาน

กระบวนการผลิตโคติน มีขั้นตอนพื้นฐานอยู่ 3 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1** การแยกโปรตีน (deproteinization)
- ขั้นตอนที่ 2** การแยกแร่ธาตุ (demineralization) และ
- ขั้นตอนที่ 3** การแยกเม็ดสี (decoloration)

ซึ่งขั้นตอนที่ 1 และ 2 สามารถสลับลำดับก่อนหลังได้

การผลิตโคโตซานจากโคตินสามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมีและวิธีทางชีวภาพ ปฏิบัติการที่ใช้ในการผลิตโคโตซานจากโคตินในสถานะที่เป็นด่างเข้มข้น เรียกว่า ปฏิบัติการดีอะซีทิลเลชัน (Deacetylation) ผลจากการเกิดปฏิบัติการดีอะซีทิลเลชันจะทำให้หมู่อะซิทามาไมด์ (Acetamide group) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สองของวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) ของโคตินถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน (Amino group)

สำหรับการผลิตโคโตซานที่ต้องการให้มีค่าระดับของการเกิดดีอะซีทิลเลชันสูงๆ นั้น จำเป็นต้องทำปฏิบัติการในสถานะที่รุนแรง คือ เพิ่มความเข้มข้นหรือความแรงของด่างที่ใช้ และให้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิบัติการ หรืออาจจะเป็นการทำปฏิบัติการกับด่างซ้ำกันหลายๆ ครั้งก็ได้

คุณสมบัติที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพของโคติน-โคโตซาน ได้แก่ ลักษณะวัตถุขุ่น ความชื้น เถ้า โปรตีน ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล ความหนืด ภาคที่เหลือหลังการละลาย สารหนู(As) ตะกั่ว(Pb) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และกลิ่น

### 2.2.4 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตโคโตซาน

#### 1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิบัติการดีอะซีทิลเลชัน (Deacetylation)

การให้อุณหภูมิที่สูงในการทำปฏิบัติการดีอะซีทิลเลชัน จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์ของการดีอะซีทิลเลชันสูง กล่าวคือ มีจำนวนของหมู่อะซิทามาไมด์ในโคตินที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโนมากขึ้น แต่จะมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานที่ได้ลดต่ำลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของค่าที่ใช้

การเพิ่มขึ้นของระดับของการเกิดคีโตนจะขึ้นจะเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของปฏิกิริยา หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งคงที่ จากการทำปฏิกิริยาคีโตนเลขชั้น ไคตินในสารละลาย 50% โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าไคโตซานที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ของการเกิดคีโตนเท่ากับ 68% เมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น การเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ของการเกิดคีโตนจะเป็นไปอย่างช้าๆ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ของการเกิดคีโตนจะเท่ากับ 78% เมื่อทำปฏิกิริยาไปแล้ว 5 ชั่วโมง นอกจากนี้ เมื่อระยะเวลาของการทำปฏิกิริยานานขึ้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาดีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) ซึ่งมีผลทำให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของไคโตซานที่ได้ลดต่ำลง ในกรณีที่ต้องการผลิตไคโตซานให้มีความหนืดหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งนั่นก็คือต้องลดการเกิดปฏิกิริยาดีโพลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) จะสามารถทำได้โดยการลดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ลง แต่ถ้าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ำเกินไปหรือใช้ภาวะการผลิตที่ไม่รุนแรงพอ ก็อาจทำให้ไคโตซานที่ได้ไม่สามารถละลายในสารละลายกรดอินทรีย์ได้ เช่น กรดอะซิติก เป็นต้น

## 3. ภาวะที่ใช้ในการเตรียมไคตินจะมีผลต่อคุณภาพของไคโตซานที่ได้

วิธีการที่ใช้ในการสกัดแยก โปรตีนและแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ออกจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไคติน จะมีผลต่อคุณภาพของไคโตซานที่ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาคีโตนเลขชั้นและปฏิกิริยาดีโพลิเมอร์ไรเซชัน อาจเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการสกัดแยกดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็นการสกัดแยกโปรตีนโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือการสกัดแยกแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) โดยการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ต่างก็มีผลต่อค่าความหนืดของไคโตซานที่ผลิตได้ เนื่องจากพันธะไกลโคซิดิกในไคตินสามารถถูกสลายได้ในสารละลายกรดและสารละลายด่าง โดยเฉพาะเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายด้วย

## 4. บรรยากาศของแก๊สที่ใช้ในระหว่างการทำปฏิกิริยาคีโตนเลขชั้น

การทำปฏิกิริยาคีโตนเลขชั้นภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน จะทำให้ได้ไคโตซานที่มีค่าความหนืดสูงกว่าการทำปฏิกิริยาคีโตนเลขชั้นภายใต้บรรยากาศของอากาศปกติ ทั้งนี้เนื่องจากออกซิเจนสามารถทำปฏิกิริยากับพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic link) ที่เชื่อมระหว่างหน่วยย่อยต่างๆ ในไคติน ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานที่ได้ลดต่ำลง

## 5. อัตราส่วนของไคตินและสารละลายด่าง

อัตราส่วนของไคตินและสารละลายด่าง เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของไคโตซานที่ได้ โดยที่สารละลายด่างที่ใช้ควรจะมีปริมาณมากพอที่จะทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยากับไคตินได้อย่างทั่วถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของไคตินต่อสารละลายต่างที่สูงกว่า 1 ต่อ 10 จะไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาดีอะซิทธิเลชันของไคติน

## 6. ขนาดอนุภาคของไคติน

ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ จะทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการซึมผ่านของสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับส่วนที่อยู่ภายในของอนุภาค มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีอะซิทธิเลชันช้ากว่า และใช้ระยะเวลาานกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันสูงตามมา ดังนั้น ไคโตซานที่ได้จะมีความหนืดและน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง

### 2.2.5 คุณสมบัติของไคโตซาน

#### 1. สมบัติด้านการมีประจุ

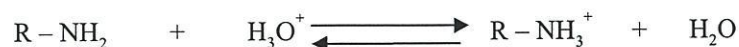
ไคโตซานมีสมบัติในความเป็นพอลิเมอร์สูง ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ตรง มีความเป็นขั้วที่พีเอชอยู่ในช่วงของความเป็นกรด มีความหนาแน่นของประจุสูง มีองค์ประกอบที่เป็นประจุลบ เช่น โปรตีน และพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีประจุลบ เป็นต้น ดังนั้นไคโตซานจึงมีความสามารถในการดูดซับกับไอออนของโลหะได้ดี เช่น เหล็ก ทองแดง แคลเซียม โปรท ตะกั่ว และโครเมียม เป็นต้น

#### 2. สมบัติด้านการละลาย

ไคโตซาน ไม่ละลายน้ำ ค้าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก เป็นต้น แต่ทั้งนี้แล้ว เราจำเป็นต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงปานกลางและมีการปั่นกวนด้วย

ไคโตซานค่อนข้างจะมีความจำเพาะต่อคุณสมบัติในด้านการละลายขั้นแรก เมื่ออยู่ในรูปเอมีนอิสระ ( $-NH_2$ ) ไคโตซานไม่สามารถละลายน้ำในสภาวะที่มีค่าพีเอชเป็นกลางได้ และในสภาวะที่มีค่าพีเอชเป็นกรดนั้น หมู่เอมีนอิสระ ( $-NH_2$ ) จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเอมีนที่มีประจุบวก ( $NH_3^+$ ) แทน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ ไคโตซานเมื่อค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไป คือ เมื่อไคโตซานอยู่ในสภาพที่เป็นกรด จะทำให้ไอออนของโลหะต้องแข่งขันกับไฮโดรเนียมไอออน ( $H_3O^+$ ) ในสภาวะที่มีความเป็นกรดมากขึ้น สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการ



เนื่องจากอะตอมของไนโตรเจนบน ไคโตซาน มีคุณสมบัติเสมือนเป็นพื้นที่สำหรับการเกิดโคออร์ดิเนชันกับโลหะ โดยไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ โดยที่อะตอมไนโตรเจนเป็นอะตอมจ่าย และโลหะไอออนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนคู่ของไคโตซาน สามารถแสดงปฏิกิริยาได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เราสามารถสรุปได้ว่า น้ำจะละลายในสภาวะที่มีความเป็นกรดมากๆ จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนคู่โคคเตียของอะตอมไนโตรเจน ซึ่งเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดพันธะโคออร์ดิเนชันกับโลหะลดน้อยลง ทั้งนี้เป็นเพราะ  $H_3O^+$  จะเกิดการแข่งขันทับกับการเกิดพันธะโคออร์ดิเนชันของโลหะไอออน จึงเป็นการลดประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะไอออนของไคโตซาน

### 3. สมบัติทางกายภาพ

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่มีความเป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีการทางชีวภาพ รวมทั้งสามารถนำไปใช้ในกิจกรรมชีวภาพได้ เช่น การเร่งรักษาบาดแผล การลดระดับคอเรสเตอรอลในเลือด และการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกัน เป็นต้น

### 4. สมบัติทางเคมี

ไคโตซานมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก คือประมาณ  $1 \times 10^5$  ถึง  $1.2 \times 10^6$  กรัมต่อโมล ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้นตอนของการผลิตไคโตซาน ไคโตซานเป็นสารพอลิเอมีน (Polyamine) สายตรงที่มีหมู่อะมิโนสะดวกพอที่จะใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี และการฟอร์มตัวให้อยู่ในรูปเกลือกกับกรด

เมื่อเทียบอนุพันธ์ของไคโตซานกับเซลลูโลสแล้ว พบว่ามีความแตกต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ไคโตซานเป็นสารที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ชนิด คือ หมู่อะมิโน และหมู่ไฮดรอกซิล

### 5. สมบัติในการสลายตัว

ไคโตซานสามารถเกิดการสลายตัวได้โดยการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ดังต่อไปนี้

- เกิด acid hydrolysis ได้ โดยการเกิดแบบสุ่ม (random) ทำให้ได้ Oligomer
- เกิด Alkaline degradation โดยเริ่มต้นจากปลายสายโซ่ของโมเลกุล เรียกว่า Peeling reaction
- เกิดการย่อยสลายโดยการสั่นโดยอาศัยการใช้คลื่นเสียง จะได้ Oligomer ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน
- เกิด Enzymic degradation เช่น เอ็นไซม์ Chitinase และเอ็นไซม์ Lysozyme
- เกิดการย่อยสลายทางความร้อน (Thermal degradation)

### 6. ค่าองศาการกำจัดหมู่อะซิทิล (Degree of deacetylation)

ค่าองศาการกำจัดหมู่อะซิทิล (degree of deacetylation) เป็นตัวบ่งชี้ว่าสารนั้นเป็นไคตินหรือไคโตซาน กล่าวคือ ถ้าค่าองศาการกำจัดหมู่อะซิทิลต่ำ สารนั้นจะแสดงสมบัติเด่นของไคติน และในทางตรงข้ามกัน ถ้าค่าองศาการกำจัดหมู่อะซิทิลสูง สารนั้นก็จะแสดงสมบัติเด่นของไคโตซานออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. ความหนืดของไคโตซาน

ความหนืดของไคโตซานขึ้นกับค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิล (Degree of deacetylation) น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วนั้น ความหนืดของไคโตซานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ขึ้นกับชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายพอลิเมอร์จะส่งผลต่อค่าความหนืดได้แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดอะซีติกเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น

## 8. ความสามารถในการตกตะกอน (Coagulation ability)

ไคโตซานเป็นตัวเหนียวใช้ในการสร้างตะกอนและช่วยในการตกตะกอนที่ดี (Flocculation and coagulation agent) เนื่องจากไคโตซานมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวก แล้วไปจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่นๆ หรือไม่ว่าจะเป็นการไปจับกับโลหะหนัก โดยที่ไนโตรเจนในหมู่อะมิโนจะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อใช้ในการสร้างพันธะเชิงซ้อนขึ้น หมู่อะมิโนในไคโตซานจะมีประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักได้ดีกว่าหมู่อะซีทิลในไคติน ดังนั้นไคโตซานที่มีค่าองศาการกำจัดหมู่อะซีทิลสูง จะมีความสามารถในการจับโลหะหนักได้ดีด้วย

### 2.2.6 ไคโตซานกับความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม [4]

ไคติน-ไคโตซาน เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีสมบัติพื้นฐานเข้ากับธรรมชาติได้ดี สามารถย่อยสลายได้ง่าย ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การที่ไคติน-ไคโตซานมีหมู่อะมิโนที่แสดงสมบัติพิเศษหลายประการที่ต่างจากเซลลูโลส เช่น การละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจาง การจับกับไอออนของโลหะได้ดี และการมีฤทธิ์ทางชีวภาพ เป็นต้น จากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ จึงทำให้วางใจได้ว่าจะไม่มีปัญหาในเรื่องของมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้ไคติน-ไคโตซานได้อย่างแน่นอน

### 2.2.7 การประยุกต์ใช้งานของไคโตซาน

#### 1. ด้านวัสดุทางการแพทย์และเภสัชกรรม

- ใช้รักษาเหงือกและฟัน
- รักษาแผลไฟไหม้หรือน้ำร้อนลวก
- รักษากระดูกอ่อน เอ็น และช่วยซ่อมแซมพวกเอ็นยึดอวัยวะต่างๆ
- เป็นสารยับยั้งเนื้องอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป็นสารที่ช่วยให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น
- ทำพลาสติก
- ทำน้ำตาเทียม
- ทำเส้นเลือดเทียม
- ทำคอนแทกเลนส์ตา
- ทำยาห้ามเลือด
- ทำไหมเย็บแผลที่ละลายน้ำได้
- เป็นสารช่วยควบคุมคอเรสเตอรอล
- เป็นสารช่วยควบคุมการออกฤทธิ์ของยา
- เป็นสารควบคุมการย่อยสลายของเอ็นไซม์

## 2.ด้านการบำบัดน้ำเสีย

- ไอออนของโลหะหนัก
- ใช้ในการตกตะกอนสารประเภทโปรตีน สีย้อมผ้า
- ใช้เป็นตัวกรองแทนกระดาษกรอง

## 3.ด้านอาหาร

- ใช้เป็นสารกันบูด
- ใช้เคลือบผิวผลไม้ ผัก เพื่อยืดอายุการรักษา
- ใช้ปรุงแต่งอาหารเพื่อให้อาหารมีความคงรูปและสี
- ใช้เป็นอาหารเสริมสุขภาพ

## 4.ด้านการเกษตร

- ใช้เป็นอาหารปลา
- ใช้เป็นสารเคลือบเมล็ดพันธุ์และใบ เพื่อป้องกัน โรคและแมลง
- ใช้ทำปุ๋ยทางการเกษตร
- ใช้เป็นสารควบคุมระบบการปลดปล่อยสารทางการเกษตร
- ใช้เป็นสารช่วยในการปรับปรุงจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ เช่น ในดิน น้ำ สัตว์ และลำไส้  
คน

## 5.ด้านเครื่องสำอาง (Cosmetic)

เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำและต่อต้านจุลินทรีย์ จึงมีการนำไคโตซานมาใช้เป็นสารเติมแต่งสารให้ความชุ่มชื้นและเป็นสารพื้นฐานในเครื่องสำอางหลายประเภท ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แป้งแต่งหน้า
- ผงขัดเล็บ
- ยาสีฟัน
- ครีม/โลชั่นบำรุงผิว
- โลชั่นกันแดดและเจลล้างหน้า
- เป็นสารผสมในแชมพูบำรุงผม
- เป็นสารเพิ่มโฟม
- เป็นตาข่ายคลุมผิวหนัง

#### 6.ด้านอุตสาหกรรมกระดาษ

- ใช้ปรับผิวหน้ากระดาษ
- ทำกระดาษอัดรูป
- ใช้ทำกระดาษก๊อปปี้แบบใช้ผงคาร์บอน

#### 7 ด้านเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology)

- เป็นสารห่อหุ้มเอนไซม์และเซลล์ด้วยเทคนิค Immobilization
- ใช้เป็นแผ่นเยื่อในการแยกโปรตีน
- สามารถขึ้นรูปเป็นแคปซูลเพื่อการเพาะเซลล์ได้
- เป็นตัวกลางสำหรับการแยกด้วยวิธีโครมาโตกราฟีแบบเจล
- ใช้ขึ้นรูปเป็นรูพรุนแบบฟองน้ำ
- ใช้ผลิตสารกตุโคซามีนและ โอลิโกเมอร์ของน้ำตาลต่างๆ
- ใช้ทำขั้วไฟฟ้าทางชีวภาพ เพื่อการวิเคราะห์และตรวจสอบสารต่างๆ

## 2.3 ออแกโนเคลย์ (Organoclay) [5,6]

### 2.3.1 ความหมายของออแกโนเคลย์

ออแกโนเคลย์ (Organoclay) หรือ ออแกโนฟิลิกเคลย์ (Organophilicclay) เป็นคำที่ใช้เรียกกลุ่มแร่ดินเหนียวที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างแล้ว โดยการนำกลุ่มแร่ดินเหนียวที่มีสมบัติพิเศษ คือ สามารถแสดงการขยายตัว (expandability) ได้สูงเมื่อได้รับความชื้นหรือ โมเลกุลของสารอินทรีย์เข้าไปในโครงสร้างและมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (cations exchange) ได้ดี เช่น กลุ่มแร่ดินเหนียวมอนต์มอริโลไนต์ซึ่งมีความเป็นขั้วหรือชอบน้ำ (hydrophilic) ถูกเปลี่ยนให้มีสมบัติไม่ชอบน้ำหรือชอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอินทรีย์ (organophilic) แทน โดยการแทนที่ประจุต่างๆ ด้วยประจุของสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงทำให้ออกแกโนเคลย์ที่เตรียมได้สามารถกระจายตัวได้ดีขึ้นในตัวทำละลายอินทรีย์

### 2.3.2 กลไกในการเกิดเป็นออกแกโนเคลย์

ออกแกโนเคลย์เกิดขึ้นได้โดยการปรับปรุงแร่เบนโทไนต์ด้วยเกลือสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก เช่น เกลือของควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ซึ่งจะไปทำการแลกเปลี่ยนกับไอออนของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) หรือแคลเซียม ( $\text{Ca}^+$ ) ที่อยู่บนแผ่นเคลย์ และจะไปเกาะอยู่กับอะตอมของธาตุคาร์บอนบนผิวเคลย์ หลังจากนั้นส่วนหนึ่งของผิวเคลย์จะถูกเคลือบด้วย amine ซึ่งผิวเคลย์ส่วนนี้จะมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หรือมีสมบัติในการอบสารอินทรีย์นั่นเอง

ส่วนประกอบหลักของออกแกโนเคลย์ คือ เบนโทไนต์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ามอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของแร่ภูเขาไฟ โดยธรรมชาติแล้วเบนโทไนต์สามารถดูดซับน้ำได้มาก แต่หลังจากการที่ได้รับการปรับปรุงด้วยสารอินทรีย์แล้ว พบว่าสามารถดูดซับน้ำได้เพียงเล็กน้อย แต่จะดูดซับน้ำมัน ไขมันสัตว์ และสารอื่นๆ ที่ละลายน้ำได้น้อย เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ได้มาก

จากการที่ออกแกโนเคลย์เข้าไปแทนที่น้ำ โดยการที่ควอเทอร์นารีเอมีนได้รับการกระตุ้นให้เกิดการขยายตัวในแนวตั้งฉากกับผิวเคลย์แทนการขยายตัวของน้ำ เป็นผลทำให้คลอไรด์ไอออน ( $\text{Cl}^-$ ) หรือโบรมีนไอออน ( $\text{Br}^-$ ) เกาะติดกับสายโซ่ของคาร์บอนได้อย่างหลวมๆ เพราะโซเดียมไอออนถูกแทนที่โดยไนโตรเจนไอออน และเกิดพันธะกับคลอไรด์ไอออน ดังนั้นเกลือโซเดียมจึงถูกชะล้างออกไป ผลสุดท้ายจะทำให้สารอินทรีย์ที่เราใช้ในการปรับปรุงผิวเคลย์ มีสภาพเป็นกลางหรืออยู่ในสภาพไม่มีขั้ว ซึ่งก็คือออกแกโนเคลย์ (Organoclay)

### 2.3.3 การประยุกต์ใช้งานของออกแกโนเคลย์

ปัจจุบันออกแกโนเคลย์ได้รับความสนใจและนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางตัวอย่างเช่น

- นำไปใช้ในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์
- ใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับความหนืดในอุตสาหกรรมสี
- ใช้เตรียมเป็นนาโนคอมโพสิตพอลิเมอร์ (polymer clay nanocomposites , PNC) เพื่อเพิ่มสมบัติด้านต่างๆ ให้กับพอลิเมอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สีย้อม (Dye stuffs) [7]

### 2.4.1 ความหมายของสีย้อม

สีย้อม (Dye stuffs) คือ สีชนิดหนึ่งที่ใช้ในการย้อมเส้นใยของผ้า ซึ่งอาจจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ก็ได้ สีย้อมมีลักษณะเป็นผลึกหรือผงละเอียด บางชนิดอาจละลายน้ำได้และบางชนิดจะละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ เมื่อนำสีย้อมไปใช้ในกระบวนการย้อม จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของเส้นใย โดยจะทำลายโครงสร้างผลึกของวัตถุนั้นชั่วคราว แล้วอาจเกิดพันธะไอออนิก (ionic bond) หรือพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) กับวัตถุที่ต้องการย้อมโดยตรงมนุษย์สามารถมองเห็นสีของสีย้อมที่ปรากฏออกมาได้ จากการที่มีการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมนั้น มีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานในช่วงสเปกตรัมต่างกัน พลังงานแสงที่สายตามองเห็นจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร กลุ่มอะตอมที่กล่าวนี้เรียกกันว่าโครโมฟอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)
2. กลุ่มเอโซ (Azo group)
3. กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)
4. กลุ่มไนโตร (Nitro group)
5. กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)
6. กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group)
7. กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur group)

กลุ่มอะตอมต่างๆเหล่านี้ จะเป็นตัวเพิ่มสีสันให้แก่สารประกอบอะโรมาติก โดยการดูดกลืนแถบสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีที่แตกต่างกันไป

### 2.4.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม

#### 1. การจำแนกประเภทของสีย้อมตามแหล่งที่มา สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ

1.1 สีย้อมธรรมชาติ (Natural dye stuffs) เป็นสีย้อมที่มาจากแหล่งธรรมชาติ โดยเฉพาะพืชและสัตว์ สีย้อมที่มาจากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ส่วนลำต้น ส่วนดอก ส่วนที่เป็นเปลือก ส่วนที่เป็นราก และส่วนที่เป็นใบ

#### ตัวอย่างสีย้อมธรรมชาติที่มาจากพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีคำ	จากลูกมะเกลือ รากชะพลู ใบสมอ เปลือกสมอ
สีเหลือง	จากหัวขมิ้น แก่นขนุน เนื้อไม้ไผ่
สีน้ำเงิน	จากต้นคราม
สีแดง	จากดอกกรรณิการ
สีแดง	จากรากต้นเข็ม รากขย ใบพงคำแฝด

### ตัวอย่างสีย้อมธรรมชาติที่มาจากสัตว์

สีม่วงแดง	จากตัวครั่ง
สีม่วง	จากหอยสังข์หนาม

1.2 สีย้อมสังเคราะห์ (Synthetic dye stuffs) เป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการต่างๆ ทางเคมี สีย้อมสังเคราะห์ถูกค้นพบโดยนายเปอร์คิน (W.H. Perkin) ชาวอังกฤษ

### ตัวอย่างสีย้อมสังเคราะห์

สีคำ	จากคาร์บอน
สีม่วง	จากเมธิลไวโอเลต
สีน้ำเงิน	จากเมธิลลีนบลู, โคบอลต์ออกไซด์
สีแดง	จากไอออนของเหล็กออกไซด์ (FeO)
สีเหลือง	จากแคดเมียมออกไซด์ (CdO)
สีขาว	จากเลดซัลเฟต (PbSO <sub>4</sub> )

## 2. การจำแนกประเภทของสีย้อมตามการนำไปใช้งาน

การจำแนกประเภทของสีย้อมโดยวิธีนี้เป็นที่นิยมมาก เพราะจะต้องมีการคำนึงถึงความคงทนของสีย้อมต่อการซัก ความคงทนต่อแสง และยังคงทนต่อความร้อนด้วย ซึ่งในโรงงานอุตสาหกรรมได้จำแนกสีย้อมตามวิธีการนำไปใช้งานออกเป็น 11 ประเภทด้วยกัน โดยสีย้อมแต่ละประเภทก็จะมีสูตรโครงสร้างทางเคมี สมบัติของสีย้อม ตลอดจนวิธีการใช้ที่แตกต่างกันออกไป

2.1 สีแอซิด (Acid dye or anionic dye) สีย้อมนี้เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุเป็นลบ สามารถละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถัน กลไกในการติดสีเกิดเป็นพันธะไอออนิก สีแอซิดเหมาะสำหรับใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดเจือจาง สีแอซิดบางตัวสามารถนำไปย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ได้ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ ไหม และอะคริลิก เป็นต้น วิธีการใช้สีแอซิด คือ นำสีย้อมที่เกิดจากสารประกอบอินทรีย์ไปละลายน้ำย้อมที่เป็นกรดหรือเป็นกลาง ข้อเสียของสีแอซิด คือ ไม่ทนต่อการซัก ไม่ทนเหงื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 **สีไดเรกต์ (Direct dye)** หรืออาจเรียกว่าสีย้อมฝ้าย สีชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเอโซ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีหมู่กรดซัลโฟนิกที่ทำให้ตัวสีสามารถละลายน้ำได้ มีประจุลบ นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส สีจะติดเส้นใยได้โดยการที่โมเลกุลของสีจะจัดเรียงตัวแทรกอยู่ในระหว่างโมเลกุลของเส้นใย และยึดจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ข้อเสียของสีไดเรกต์ คือ ตกง่าย ไม่ทนต่อการซักน้ำ แต่มีความทนต่อแสง

2.3 **สีเบสิก (Basic or cationic dye)** สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของกรดอินทรีย์ (organic base) เป็นสีที่ให้ประจุลบ สามารถละลายน้ำได้ นิยมใช้ในการย้อมเส้นใยโปรตีน ไนลอนและใยอะคริลิก ในขณะที่ย้อมนั้นโมเลกุลของสีส่วนที่มีประจุลบจะยึดจับกับโมเลกุลของเส้นใย ข้อดีของสีเบสิก คือ เป็นสีที่ติดทน แต่ไม่ควรใช้ย้อมเส้นใยธรรมชาติ เพราะจะไม่ทนต่อการซักและแสง

2.4 **สีดิสเพอร์ส (Disperse dye)** เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำแต่มีสมบัติกระจายได้ดี สามารถย้อมเส้นใยอะซิเตท เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ไนลอนและอะคริลิกได้ดี สำหรับการย้อมจะใช้สารพา (carrier) เพื่อช่วยเร่งอัตราการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใย หรือย้อมโดยใช้อุณหภูมิและความดันสูง สีดิสเพอร์สเป็นสีที่ทนแสงและการซักฟอกค่อนข้างดี แต่สีจะซีดถ้าถูกควั่นหรือแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สไนโตรออกไซด์ สีดิสเพอร์สแบ่งออกได้เป็นอีก 2 กลุ่ม โดยพิจารณาจากกลุ่มเคมีในตัวสีย้อม ได้แก่ สีย้อมเอโซ (azo dyes) และสีย้อมแอมมิโนแอนทราควิโนน (Amino anthraquinone) ซึ่งสีทั้ง 2 กลุ่มนี้ ประกอบด้วยอนุพันธ์ของเอทานอลามีน (Ethanalamine ;  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) หรืออนุพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

2.5 **สีรีแอกทีฟ (Reactive dye)** เป็นสีที่ละลายน้ำได้ มีประจุลบ เมื่ออยู่ในน้ำจะมีสมบัติเป็นด่าง สีย้อมชนิดนี้เหมาะกับการย้อมเส้นใยเซลลูโลสมากที่สุด โมเลกุลของสีจะยึดจับกับหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ของเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ในสถานะที่เป็นด่าง แล้วกลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สีรีแอกทีฟมีสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิสูง 70-75 องศาเซลเซียส และกลุ่มที่ย้อมติดที่อุณหภูมิต่ำ สีรีแอกทีฟมีลักษณะเด่น คือ ให้สีที่สดใสทุกสภาวะได้ในทุกสภาวะ

2.6 **สีอะโซอิก (Azoic dye)** สีชนิดนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ การที่สีจะก่อรูปเป็นเส้นใยได้จำเป็นต้องย้อมด้วยสารประกอบฟีนอลซึ่งละลายน้ำได้ก่อน ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้เกิดการรวมตัวเป็นสี (coupling) แล้วย้อมทับด้วยสารไดอะโซคอมโปเนนท์ จึงจะสามารถเกิดเป็นสีได้ สีอะโซอิกใช้ย้อมเส้นใยได้ทั้งเซลลูโลส ไนลอน หรืออะซิเตท สีอะโซอิกเป็นสีที่ทนต่อการซักแต่ไม่ทนต่อการขัดถู

2.7 **สีแวต (Vat dye)** เป็นสีที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการย้อมต้องเตรียมน้ำย้อมให้สีเร็วละลายน้ำ โดยให้ทำปฏิกิริยากับสารรีดิวส์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ สีแวตจะถูกรีดิวส์ให้กลายเป็น

เกลือ จึงจะสามารถซึมเข้าไปในเส้นใยได้ เมื่อนำผ้าไปผึ่งในอากาศ สีในเส้นใยจะถูกออกซิไดส์เป็นสี  
แฉ่ำ สีแฉ่ำมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ

สีอินดิโก (Indigoid) และสีแอนทราควินอยด์ (Antraquinoid)

2.8 สีมอร์แดนท์ หรือ โครม (*Mordant or chrome dye*) สีย้อมชนิดนี้ต้องใช้สารช่วยติดเข้าไป  
ช่วย เพื่อให้เกิดการติดสีบนเส้นใย สารช่วยติดที่ใช้ คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะ เช่น โครเมียม  
ดีบุก เหล็ก อะลูมิเนียม เป็นต้น สีมอร์แดนท์เป็นสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งเกิดจากการที่สีมอร์แดนท์  
หลายโมเลกุลจับกับโลหะแล้วละลายน้ำได้ จึงทำให้ย้อมได้ง่าย ซึ่งใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยโพลี  
เอไมต์ได้ดี

2.9 สีอินเกรน เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจากเกิดปฏิกิริยากับน้ำ สีย้อม  
ชนิดนี้ใช้สำหรับย้อมผ้าฝ้าย

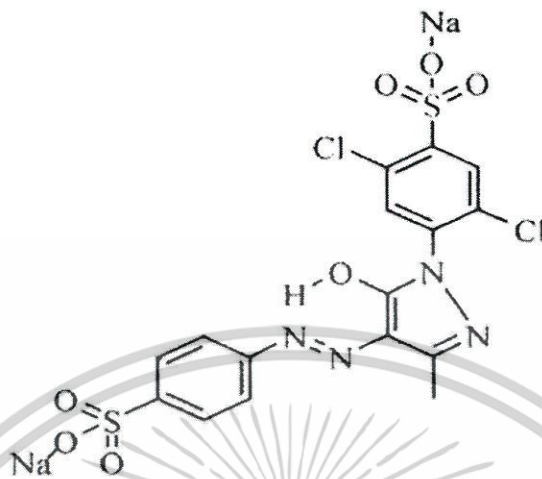
2.10 สีออกซิเดชั่น (*Oxidation dye*) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ โดยจะเกิดเป็นคอลลอยด์หลังจาก  
เกิดปฏิกิริยาในน้ำ สีจะติดแน่นโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาการตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย สีออกซิ  
เดชั่นใช้ย้อมผ้าฝ้ายและขนสัตว์

2.11 สีซัลเฟอร์ (*Sulfer dye*) เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อทำการย้อมต้องรีดิวส์เพื่อให้โมเลกุลอยู่  
ในสภาพที่ละลายน้ำได้ แต่สีซัลเฟอร์บางชนิดที่ผลิตออกมาจำหน่ายในรูปที่ถูกรีดิวส์จะสามารถละลาย  
น้ำได้ สีซัลเฟอร์นิยมนำมาย้อมผ้าฝ้าย สีจะติดทน และยังเป็นสีที่มีราคาถูก แต่สีซัลเฟอร์ที่อ่อนจะไม่ทน  
ต่อการซัก

#### 2.4.3 สีย้อมชนิดแอซิดเยลโลว์ 17

แอซิดเยลโลว์ 17 (*Acid Yellow 17*) มีชื่อทางเคมีว่า 2,5-Dichloro-4-[4,5-Dihydro-3-Methyl-5-  
Oxo-4-[(Sulfohenyl)Azo]-1H-Pyrazol-1-yl]-Benzenesulfonic Acid, Disodium Salt เป็นสีที่เกิดจาก  
สารประกอบอินทรีย์ มีประจุเป็นลบ สามารถละลายน้ำได้ เมื่อละลายน้ำแล้วจะเป็นสีเหลือง มีน้ำหนัก  
โมเลกุล 551.00 มีสูตรโมเลกุล  $C_{16}H_{10}Cl_2N_4Na_2O_7S_2$  และมีสูตรโครงสร้าง โมเลกุลดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงสูตร โครงสร้าง โมเลกุลของแอซิดเยลโลว์ 17 (Acid Yellow 17)

#### 2.4.4 การรวมตัวกันของสีย้อมกับเส้นใย

การนำสีย้อมมาใช้ให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ โดยจะต้องทำให้เกิดสถานะที่โมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติดได้เอง (Substantivity) กับเส้นใย แล้วเกิดพันธะยึดติดกันแน่น อาจจะกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่า มีอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด ที่ทำให้เกิดการดูดติดของสีย้อมบนเส้นใย คือ แรงไอออนิก (Ionic forces) แรงแวนเดอวาล์ว (Van der Waal's forces) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) กำลังแรงเหล่านี้มักไม่ทำหน้าที่เพียงลำพัง กล่าวคือ การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย ต้องประกอบไปด้วยแรงกระทำอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไป และในบางครั้งก็อาจเกิดแรงทั้งสี่ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะทำให้เกิดการยึดติดดีที่สุด ก็คือ แรงกระทำจากพันธะ โควาเลนต์

#### 2.4.5 ความเป็นพิษของสีย้อม

ความเป็นพิษของสีย้อมและมลพิษของสีย้อม โดยทั่วไปแล้วสีย้อมเป็นสารที่จัดได้ว่ามีความเป็นพิษต่ำ เนื่องจากไม่เคยพบว่ามีอัตราการตายหรือเจ็บป่วยของผู้ที่ทำงานในโรงงานฟอกย้อมที่สูงกว่าบุคคลในอาชีพอื่นแต่อย่างใด สีย้อมอาจเข้าสู่ร่างกายของผู้ใช้ได้ 3 ทาง คือ ทางจมูกโดยการสูดดม ทางผิวหนังโดยการสัมผัส และทางระบบทางเดินอาหาร โดยปนเปื้อนเข้าไปกับอาหารการกิน แต่ถึงอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีว่า สารวัตถุเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สีย้อม มีจำนวนไม่น้อยที่มีความเป็นพิษสูงมาก และมีอยู่หลายตัวที่เป็นสารก่อมะเร็ง เช่น 2-naphthylamine และ benzidine เป็นต้น

#### 2.4.6 การวัดสีย้อมในน้ำเสีย

วิธีการวัดสีมีหลายวิธี เช่น การเปรียบเทียบด้วยตาเปล่า การใช้เทคนิคทางสเปกโตรโฟโตเมตริก วิธี Tristimulus Filter และ ADMI Tristimulus Filter ทั้งนี้แล้ว วิธีการเปรียบเทียบด้วยตาเปล่านั้นสามารถใช้ได้กับตัวอย่างน้ำทั่วไป แต่ถ้าหากว่าเป็นน้ำที่ถูกปนเปื้อนด้วยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่อาจจะทำให้เกิดสีซึ่งไม่ปกติ ก็จะทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบสีด้วยตาเปล่าได้ จึงต้องใช้วิธีการทางเครื่องมือเข้ามาช่วยด้วย

การวัดสีย้อมในน้ำเสียแบ่งออกได้เป็น 7 วิธี ดังนี้

1. วิธีการเปรียบเทียบสีด้วยตาเปล่า
2. วิธีการเทียบมาตรฐานที่ย้อมให้เป็นสีอ้างอิง เช่น มาตรฐาน APHA , DIN
3. การวัดค่าเปอร์เซ็นต์ที่ทรานสมิตแดนซ์
4. การวัดค่าการดูดกลืนแสงหรือค่าแอบซอร์เบ้นซ์
5. การวัดด้วยการผสมแม่สีมาตรฐาน 3 สี
6. การวัดด้วยวิธีมาตรฐานในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI Tristimulus Filter Method)
7. การวัดด้วยวิธีแบบเอสยู (S.U. = Spece Unit)

#### 2.4.7 ผลกระทบของสีย้อมที่มีต่อสิ่งแวดล้อม

สีย้อมเป็นสารที่ยากต่อการสลายตัวทางชีวภาพ แต่ความเป็นพิษต่อปลาค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ปัญหาของสีย้อมในน้ำที่ปัจจุบันนี้ได้อยู่ที่ความเป็นพิษของสีย้อม แต่อยู่ที่สีของน้ำทั้งเป็นสำคัญ เนื่องจากว่าสีย้อมเป็นสารที่มีสีเข้ม ดังนั้นแม้มีสีอยู่ในน้ำเพียงปริมาณเล็กน้อย ก็สามารถทำให้น้ำมีสีอันเป็นที่น่ารังเกียจของผู้พบเห็นได้ ดังนั้น จึงต้องมีการกำจัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่เกิดจากสีย้อมในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. ก่อให้เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีย้อมที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. สีย้อมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การผลิตออกซิเจนของพืชในน้ำลดลงอันเนื่องมาจากผลกระทบจากการที่พืชไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสัตว์น้ำ

5. ความเป็นพิษของตัวสีย้อมบางชนิดเป็นสารก่อมะเร็ง

ปัญหาของสีย้อมทั้งหมดข้างต้นส่งผลให้สถานะแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำ

## 2.5 การดูดซับ (Adsorption) [8,9]

### 2.5.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่อะตอมหรือ โมเลกุลของสารถูกยึดติดอยู่กับผิวของสารอีกตัวหนึ่ง สารที่ถูกยึดติดอยู่บริเวณผิวหน้าเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และสารที่ตัวถูกดูดซับไปเกาะอยู่ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการแยกสารหรือทำให้สารบริสุทธิ์ เนื่องจากมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น คาร์บอนไอดี คาร์ซีไอดี และยาฆ่าแมลง เป็นต้น

การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดี และเป็นระบบที่มีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเทียบกับระบบชีวภาพ คือ ต้องการพื้นที่น้อย และไม่มีกลิ่นที่รบกวน ปริมาณการดูดซับจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สมบัติทางเคมีของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ รวมทั้งพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับด้วย

### 2.5.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของ โมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับ โมเลกุลของตัวดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น ซึ่งแต่ละชั้นของ โมเลกุลจะติดอยู่บนชั้น โมเลกุลก่อนหน้านี้ โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย กล่าวคือ จำนวนชั้นของ โมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการดูดซับมีพลังงานที่ต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างตัวดูดซับและตัวที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของตัวที่ถูกดูดซับก็จะสามารถเกิดขึ้นได้มาก

## 2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างตัวที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับเกิดเป็นสารประกอบเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่ผันกลับได้นั้น (Reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีของสารประกอบใหม่ที่ผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ

ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อ โมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อ โมล

### 2.5.3 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ โดยจะมีค่าเท่ากับความร้อนของการสลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ว่าที่สำคัญในการพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (Multimolecule layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่ผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้

5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (Activation energy) ด้วย

#### 2.5.4 สารที่มีความสามารถในการดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิดด้วยกัน ซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอกติเวตเตดเชลิก  
กา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ สามารถจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด จึงทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

#### 2.5.5 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)

##### 1. กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

**1.1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion)** การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของตัวดูดซับมีช่องหรือรู โดยโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปถึงผิวหน้าตัวดูดซับ

**1.2 การแพร่ภายใน (Internal Diffusion)** เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าไปได้ถึงช่องว่างของตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

**1.3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction)** ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้น ความต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวจึงสามารถละเลยได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการจำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

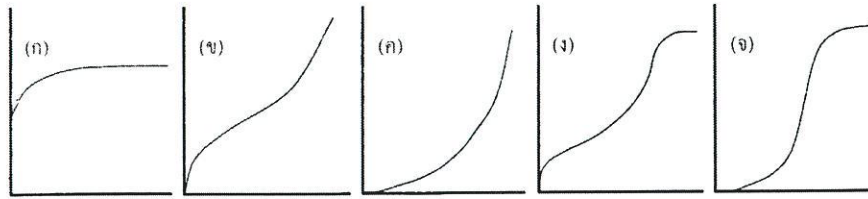
**2.1 การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport)** เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับไว้

**2.2 การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport)** เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม ซึ่งจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวชั้นตอนหนึ่ง

**2.3 การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport)** เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในชั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกันภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.5.6 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium) [10]

เราสามารถอธิบายปรากฏการณ์ของกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ว่า ณ จุดสมดุลของการดูดซับสมรรถนะของตัวดูดซับ (Adsorption Capacity) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm) ไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของตัวถูกละลายบนพื้นผิวของตัวดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับ มี 5 แบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งไอโซเทอมรูปที่ 2.9ก เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนในรูปที่ 2.9ข ถึงรูปที่ 2.9จ เป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน[17]

มีทฤษฎีหลากหลายมากที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีไหนที่จะอธิบายสมการ และกลไกการดูดซับได้อย่างถูกต้อง ซึ่งจะนำเสนอสมการทั่วไปดังนี้

• ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีสมมติฐานพื้นฐานที่ เรียกว่า **Ideal Localized Monolayer Model** ดังนี้

1. เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น
  2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับได้
  3. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
  4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน
- สมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ 2.1 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$C_e / X = \left(1/bX_m\right) + \left(C_e/X_m\right) \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } 1/X = (1/X_m) + (1/bX_m C_s) \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_s$  ข้อมูลสมดุลของการดูดซับดังแสดงรูปที่ 2.9 และเราสามารถหาค่าคงที่  $b$  และ  $X_m$  ได้จากความชันและจุดตัดกราฟ

### •ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบบีอีที (Brunauer-Emmett-Telle. BET Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มแบบนี้พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยมีสมมติฐาน ดังนี้

1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกๆ โมเลกุล
3. ทุกโมเลกุลมีพลังงานการดูดซับเท่ากัน
4. ชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบบีอีที แสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$X = \frac{(X_m B C_s) / (C_s - C_s) [1 + (B-1)(C_s/C_s)]}{\text{สมการที่ 2.4}}$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$C_s$  = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ 2.4 สามารถจัดเรียงเป็นแบบเชิงเส้นได้ ดังนี้

$$C_s / (C_s - C_s) = (1/X_m B) + (B-1) / (X_m B) (C_s / C_s) \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/(C_s - C_e)X$  กับ  $C_e/C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $(B-1)/(X_{\infty}B)$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/X_{\infty}B$  กราฟของสมการการดูดซับแบบบีอีที แสดงได้ดังในรูปที่ 2.9

### ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในกรณีที่มีการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว โดยมีสมการดังนี้

$$X/M = K C_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

เมื่อ  $X$  = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม  
 $M$  = น้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม  
 $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

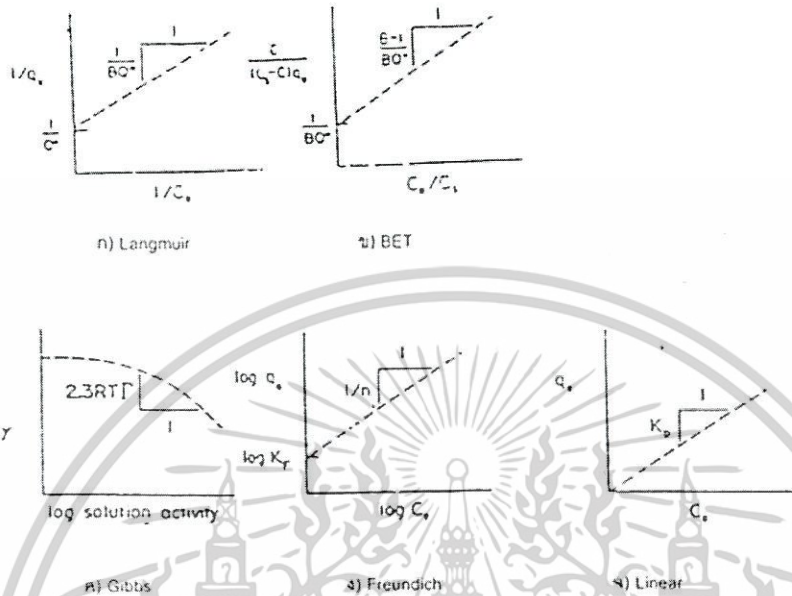
$$K, 1/n = \text{ค่าคงที่ของระบบ}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log(X/M) = \log K + (1/n)\log C_e \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log(X/M)$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความสามารถของการดูดซับที่ดี

สมการ Freundlich มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับสารละลายที่เจือจาง ปกติจะใช้กับการดูดซับสิ่งเจือปนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการ ไอโซเทอร์มแบบต่างๆ

### 2.5.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [11]

#### 1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับ เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ เมื่อตัวดูดซับนั้นไม่มีรูพรุนสำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนจะถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับนั้นก็จะมีอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

#### 2. ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbent)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับขนาดของโมเลกุลตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

### 3. อัตราเร็วในการผสม (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งภายในโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ โดยขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับอัตราเร็วในการผสมของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ น้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ก็จะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยในการกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

### 4. เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่จะใช้ต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

### 5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับได้ด้วย

### 6. อุณหภูมิ (Temperature)

ถ้าอุณหภูมิในระบบของการดูดซับเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถของการดูดซับจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จินตนา ชำนาญบุญธรรม [12]: ได้ทำการศึกษาการดูดซับของสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับของสีย้อม 4 ชนิดบนตัวดูดซับ 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ ไคโตซาน ไคตินและเปลือกกุ้ง พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีแอสิด สีรีแอกทีฟ และสีไคเร็คได้ดีในสารละลายกรดที่มีค่าพีเอช 5 หรือต่ำกว่า โดยไคโตซานจะดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและเปลือกกุ้ง ตรงข้ามกับสีเบสิกจะถูกดูดซับได้ดีในสารละลายด่างที่มีค่าพีเอช 10 หรือสูงกว่า โดยเปลือกกุ้งจะดูดซับสีเบสิกได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและไคโตซานมาก ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลา ที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่จะลดลงเมื่ออนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น ปริมาณของสีทุกชนิดที่ถูกดูดซับยกเว้นสีเบสิกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าองค์การกำจัดหมู่อะซิทธิลของไคโตซานเพิ่มขึ้น แรงปฏิกริยาระหว่างประจุเป็นแรงสำคัญที่สุดที่เกี่ยวข้องในการดูดซับของสีย้อมบนตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังศึกษาการคายการดูดซับของสีย้อมที่ค่าพีเอชและอุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าสีย้อมสามารถคายการดูดซับจากตัวดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 10 หรือสูงกว่า ยกเว้นสีเบสิกจะคายการดูดซับได้ดีในสารละลายที่มีค่าพีเอช 3 หรือต่ำกว่า

สีรีแอกทีฟจะคายการดูดซับได้น้อยที่สุด ในการกำจัดสีย้อมออกจากร่างน้ำทิ้งของโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอ ก็ให้ผลในทำนองเดียวกันกับการกำจัดสีย้อมออกจากสารละลาย ของสีย้อมที่สังเคราะห์ขึ้น ไคโตซานสามารถดูดซับสีแอสิด สีรีแอกทีฟ และสีไคเร็คได้ในปริมาณสูงสุดเกือบถึง 72% 61% และ 94% ตามลำดับ ส่วนเปลือกกุ้งสามารถดูดซับสีเบสิกจากร่างน้ำทิ้งได้ในปริมาณสูงถึง 43% ปริมาณสีย้อมที่กำจัดได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสีย้อมในน้ำทิ้ง

นางสาวราตรี ปิ่นทอง,นางสาวลักขณา ดันติจรรยารัตน์ ,นางสาวสุธาสนิ วงศ์ศรีวัฒนกุล [13] : ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมส่วนใหญ่ใช้วิธีการดูดซับด้วยการบอมน้ำมันตังซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานค่อนข้างสูง โครงการนี้ศึกษาการดูดซับสารละลายสีย้อม Methylene Blue และ Congo Red ด้วยต้นข้าวโพดและต้นมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย การทดลองแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาความสามารถในการดูดซับ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 °C พบว่าต้นข้าวโพดมีความสามารถในการดูดซับดีกว่าต้นมันสำปะหลัง และ Methylene Blue ถูกดูดซับได้ดีกว่า Congo Red ผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir isotherm การทดลองตอนที่ 2 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเร็วรอบในการปั่นกวน (350, 450 และ 500 rpm) ขนาดของตัวดูดซับ (Mesh number 20-60 และ 60-100) ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (100, 200 และ 300 ppm) และอุณหภูมิในการดูดซับ (25, 35 และ 45 °C) พบว่า ความเร็วรอบในการปั่นกวนและขนาดของตัวดูดซับมีผลน้อยมากต่อการดูดซับ อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย่อมเพิ่มขึ้นพบว่าอัตราการดูดซับและความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับสูงขึ้นอัตราการดูดซับจะสูงขึ้น และความสามารถในการดูดซับของดินมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับของดินข้าวโพดจะลดลง จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่าเป็นไปตามแบบจำลองการดูดซับอันดับสอง และค่า  $E_s$  ของ Methylene Blue จะต่ำกว่า Congo Red

รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์[14] : ได้ทำการศึกษากำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้ Montmorillonite Clay งานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวมาดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ มอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินในกลุ่ม ซีแมกไทต์ (Smectite) ที่มีลูมินา-ซิลิกาเป็นส่วนประกอบในลักษณะโครงสร้างซ้อนกันเป็นชั้นๆ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีคุณลักษณะเหมือนกับซีโอไลต์ กล่าวคือมีพื้นที่ผิวสูง จากคุณสมบัตินี้ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อให้เหมาะกับการดูดซับสารอินทรีย์ สามารถทำได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของสารอนินทรีย์ที่มีอยู่ในโครงสร้างตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารอินทรีย์ประเภท Quaternary Ammonium Compounds (QACs) ซึ่งบางครั้งจะเรียกสารประเภทนี้ว่า สารลดแรงดึงผิว ที่มีประจุบวก สารที่ใช้ได้แก่ tetramethylammoniumchloride hexadecyltrimethylammonium bromide ( $C_{19}H_{42}BrN$ ), tetradecyltrimethylammonium bromide ( $C_{17}H_{38}NBr$ ) และ benzyldimethylhexadecylammonium chloride ( $C_{25}H_{46}ClN$ ) ซึ่งจะมีความยาวของหมู่อัลคิลและขนาดโมเลกุลต่างกัน โดยทำการศึกษาความสามารถของมอนต์มอริลโลไนต์ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว ในการดูดซับสารอินทรีย์ 6 ชนิด คือ humic acid, methylene blue, methyl orange, naphthalene, phenol และ 3-monochlorophenol โดยทำการทดลองเป็นแบบกะ จากการทดลองพบว่า การดูดซับสารอินทรีย์จากน้ำโดยใช้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วได้แก่ TMA-clays, BDHDM-clays, HDTMA-clays และ TDMA-clays จะมีประสิทธิภาพดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งานจริง นอกจากนี้จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างและพื้นที่ผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวแล้ว พบว่ามีความสัมพันธ์กันระหว่างลักษณะทางกายภาพ และความสามารถในการดูดซับของมอนต์มอริลโลไนต์ชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภัทรารุช มนต์วิเศษ และปณณมา ศิริพันธ์โนน [15]: ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์โดยใช้ไคโตซาน(CHI-MMT) ซึ่งเตรียมโดยการปรับปรุงโครงสร้างโซเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ ( $\text{Na}^+$ -MMT) ด้วยสารละลายไคโตซานที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การแทรกตัวของไคโตซานเข้าสู่  $\text{Na}^+$ -MMT จะเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของ  $\text{Na}^+$  กับ  $-\text{NH}_3^+$  ของไคโตซาน เป็นผลทำให้ขนาดของ  $d_{001}$  ขยายจาก 1.42 nm ของ  $\text{Na}^+$ -MMT เป็น 2.21 nm ของ CHI-MMT จากการวิเคราะห์ CHI-MMT ด้วยเทคนิค TGA พบว่ามีปริมาณไคโตซานแทรกตัวอยู่ใน CHI-MMT ประมาณ 17 mass% การทดสอบความสามารถในการดูดซับสีของ CHI-MMT เมื่อเทียบกับ  $\text{Na}^+$ -MMT และไคโตซานโดยใช้สีย้อมต่างกัน 3 ชนิด คือ basic blue 9 (BB9), basic blue 6 (BB6) และ basic yellow 1 (BY1) พบว่า CHI-MMT แสดงความจุในการดูดซับสูงสุด คือ 46–49 mg/g เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเท่ากับ 500 mg/L ซึ่งเท่ากับว่าดูดซับสีย้อมไปทั้งหมด 92-99 % โดยน้ำหนักความสามารถในการดูดซับเบสิกของ CHI-MMT จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการดูดซับของ CHI-MMT ที่เพิ่มขึ้นสามารถให้เหตุผลได้ว่า เป็นเพราะการมีไคโตซานอยู่ใน MMT ซึ่งไคโตซานจะเข้าไปทำให้โครงสร้างรูพรุนของ CHI-MMT ขยายมากขึ้น ก่อให้เกิดการแทรกสอดของโมเลกุลขนาดใหญ่ของสีย้อม และเกิดแรงกระทำระหว่างประจุกับสีย้อมได้มาก ซึ่งผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า CHI-MMT มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับสีย้อมชนิดเบสิกได้ดี

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สี Acid Yellow 17 AR Grade บริษัท SIGMA-ALDRICH
2. มอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยโคลโคซาน(CHI-MMT) [16]
3. เมทานอล Commercial Grade บริษัท CARLO ERBA

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ขวดวัดปริมาตร ขนาด 100 250 และ 1000 ml
2. ขวดรูปชมพู่
3. ปีกเกอร์
4. ปิเปต
5. จานเพาะเชื้อ
6. เดซิเทเตอร์
7. ตู้อบสาร บริษัท FISHER SCIENTIFIC รุ่น Isotemp
8. เครื่อง UV-VIS spectrophotometer บริษัท SHIMAZU รุ่น 760
9. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง บริษัท DENVER INSTRUMENT COMPANY รุ่น TR 1601
10. เครื่องแช่เยือก บริษัท GALLENKAMP รุ่น Hetofrig CB60 VS
11. เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) บริษัท HETTICH รุ่น EBR 8s
12. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer, XRD) บริษัท BRUKER AG รุ่น D8 ADVANCE
13. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) บริษัท PERKIN ELMER รุ่น FT-IR Spectrum GX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัตถุคิบ CHI-MMT

##### 3.3.3.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)

นำวัตถุคิบ CHI-MMT ก่อนและหลังการดูดซับไปทดสอบด้วยเครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) โดยใช้สภาวะการทดลองดังนี้

ช่วงมุม 2- $\theta$ ที่ใช้วิเคราะห์	: 1°-25°
Step size	: 0.040°
Step time	: 5 วินาที

##### 3.3.3.2 อินฟราเรดสเปกตรัมสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

นำวัตถุคิบ CHI-MMT ก่อนและหลังการดูดซับไปทดสอบด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี โดยใช้ปลายช้อนโลหะตัก CHI-MMT เพียงเล็กน้อย ผสมกับ KBr บดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วเข้าเครื่องอัดเป็นเวลา 5 นาที หลังจากนั้นนำแผ่น CHI-MMT ที่ได้วางบนฐานที่ใช้สำหรับวัดแล้วนำเข้าเครื่องวัด ตั้งค่าการวัดด้วยระบบคอมพิวเตอร์ แล้วปริ้นท์ผลออกมา

### 3.3.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17

#### 3.3.2.1 การศึกษาผลของระยะเวลาต่อความสามารถในการดูดซับของ CHI-MMT

1. เตรียมสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่ความเข้มข้น 800 mg/L
2. ชั่ง CHI-MMT 0.5 g ลงในขวดรูปชมพู่
3. เติมสารละลายสี Acid Yellow 17 เข้มข้น 800 mg/L ที่เตรียมไว้แล้ว ปริมาตร 50 ml ลงใน CHI-MMT ที่ชั่งไว้
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ความเร็วรอบในการเขย่าเป็น 150 รอบต่อนาที
5. เมื่อเขย่าจนครบกำหนดเวลาแล้ว ทำการแยกเอา CHI-MMT ออกจากสารละลายสี Acid Yellow 17 ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที
6. นำสารละลายที่แยกส่วนของ CHI-MMT ออกแล้วไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่น 400 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าเป็น 30 60 90 120 150 และ 180 นาที

### 3.3.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อความสามารถในการดูดซับของ CHI-MMT

1. เตรียมสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่ความเข้มข้น 50 100 300 500 800 1000 และ 1500 mg/L
2. ชั่ง CHI-MMT 0.5 g ลงในขวดรูปชมพู่
3. เติมสารละลายสี Acid Yellow 17 เข้มข้น 50 mg/L ปริมาตร 50 ml ลงใน CHI-MMT ที่ชั่งไว้แล้ว
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ความเร็วรอบในการเขย่าเป็น 150 รอบต่อนาที
5. เมื่อเขย่าจนครบกำหนดเวลาแล้ว ทำการแยกเอา CHI-MMT ออกจากสารละลายสี Acid Yellow 17 ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที
6. นำสารละลายที่แยกส่วนของ CHI-MMT ออกแล้วไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่น 400 nm
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเป็น 100 300 500 800 1000 และ 1500 mg/L ตามลำดับ

### 3.3.3 การศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT กลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

1. ชั่ง CHI-MMT ที่ได้ทำการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 แล้ว 1 กรัม ลงในทิมเบิล
2. ตั้งชุดอุปกรณ์ soxhlet โดยใช้เมทานอลปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นตัวทำละลาย ให้ความร้อนที่อุณหภูมิรีฟลักซ์
3. หลังจากครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทิ้งไว้ให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง นำ CHI-MMT ที่ถูกสกัดด้วยตัวทำละลายแล้วไปอบให้แห้งในตู้อบ
4. ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยเปลี่ยนจากเมทานอลเป็นน้ำกลั่น
5. ชั่ง CHI-MMT ที่สกัดด้วยตัวทำละลายแล้ว อย่างละ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ใส่สารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เข้มข้น 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงไป
7. นำไปเขย่าเป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นทำการแยก CHI-MMT ออกจากสารละลาย โดยใช้เครื่องหมุนเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที
8. นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร
9. นำ CHI-MMT ส่วนที่เหลือจากการสกัดแต่ละตัวอย่าง ไปศึกษาโครงสร้างโดยใช้เทคนิค XRD และ FT-IR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์วัตถุ CHI-MMT

วัตถุ CHI-MMT ที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้า ถูกนำไปตรวจวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่ามีองค์ประกอบของโคลโตซานในโครงสร้างประมาณ 20% โดยน้ำหนัก [16] และนำไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR รายละเอียดดังแสดงในหัวข้อต่อไป

##### 4.1.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

รูปที่ 4.1 แสดงผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ CHI-MMT ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ด้วยเทคนิค XRD จากแผนภาพ XRD สามารถอธิบายได้ว่า CHI-MMT ที่ยังไม่ได้ทำการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 จะปรากฏพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ  $6.0$  องศา ซึ่งเป็นพีกจากระนาบ 001 ของ MMT ที่มีโคลโตซานแทรกตัวอยู่ และเมื่อนำไปคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ CHI-MMT จากสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

โดยที่

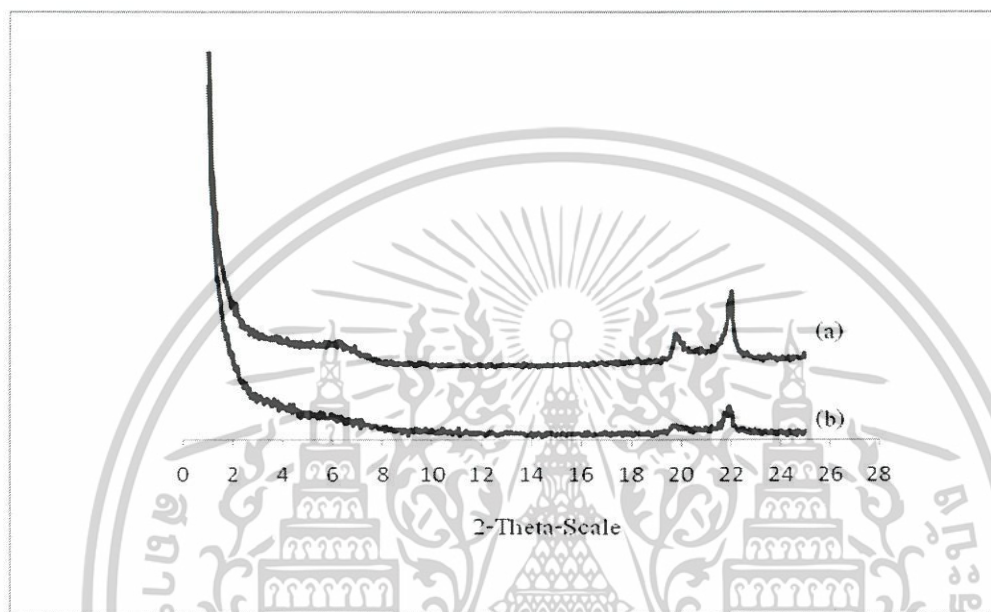
$\lambda$	=	ความยาวของคลื่นรังสีเอ็กซ์เท่ากับ $1.54 \text{ \AA}$
$\theta$	=	มุมตกกระทบ (องศา)
$d$	=	ระยะห่างระหว่างระนาบของ CHI-MMT
$n$	=	ค่าคงที่จำนวนเต็ม

จากการคำนวณพบว่าระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของวัตถุ CHI-MMT ก่อนการดูดซับ มีค่าเท่ากับ  $1.47$  นาโนเมตร [15]

ในขณะที่ CHI-MMT หลังการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 มีพีกของระนาบ 001 ปรากฏที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ไม่ต่างจาก CHI-MMT ก่อนการดูดซับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อ CHI-MMT ได้ดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เข้าไปในโครงสร้าง ไม่มีผลทำให้ระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHI-MMT เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดโมเลกุลของโคลโตซาน ดังนั้นเมื่อถูกดูดซับเข้าไป จึงไม่ส่งผลต่อระยะห่างระหว่างระนาบ 001 ของ CHI-MMT



รูปที่ 4.1 แผนภาพ XRD ของ CHI-MMT (a) ก่อนการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 และ (b) หลังการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17

#### 4.1.2 อินฟราเรดสเปกตรัมสเปกโตรสโกปี (FT-IR)

จากรูปที่ 4.2(a-c) แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของ CHI-MMT ก่อนและหลังการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 และผงสีย้อม Acid Yellow 17 พบว่า CHI-MMT ก่อนการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ปรากฏพีกที่สำคัญ ดังนี้  $\nu_{\max}$  :  $3623-3435\text{ cm}^{-1}$  (O-H stretching),  $2924\text{ cm}^{-1}$  (C-H stretching), และที่  $\nu$   $1546\text{ cm}^{-1}$  (N-H bending) ซึ่งเป็นสัญญาณของ  $\text{NH}_3^+$  ที่เกิดจากการที่  $\text{NH}_2$  ที่อยู่ในโครงสร้างของโคลโตซานได้รับโปรตอนในสภาวะกรดแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3^+$  เข้าไปอยู่ใน MMT แล้วทำให้เกิดอันตรกิริยาบนพื้นผิวของ MMT นอกจากนี้ยังพบพีกที่  $1638\text{ cm}^{-1}$ ,  $1088-1040\text{ cm}^{-1}$  (Si-O stretching),  $468\text{ cm}^{-1}$  (Si-O-Si bending) ของ MMT ด้วย

สำหรับผงสีย้อม Acid Yellow 17 ปรากฏพีกที่สำคัญ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\nu_{\max}$ : 1558  $\text{cm}^{-1}$  (N-H bending), 1199  $\text{cm}^{-1}$  (C-N stretching), 692, 711  $\text{cm}^{-1}$   
(C-Cl stretching), (C-N stretching)

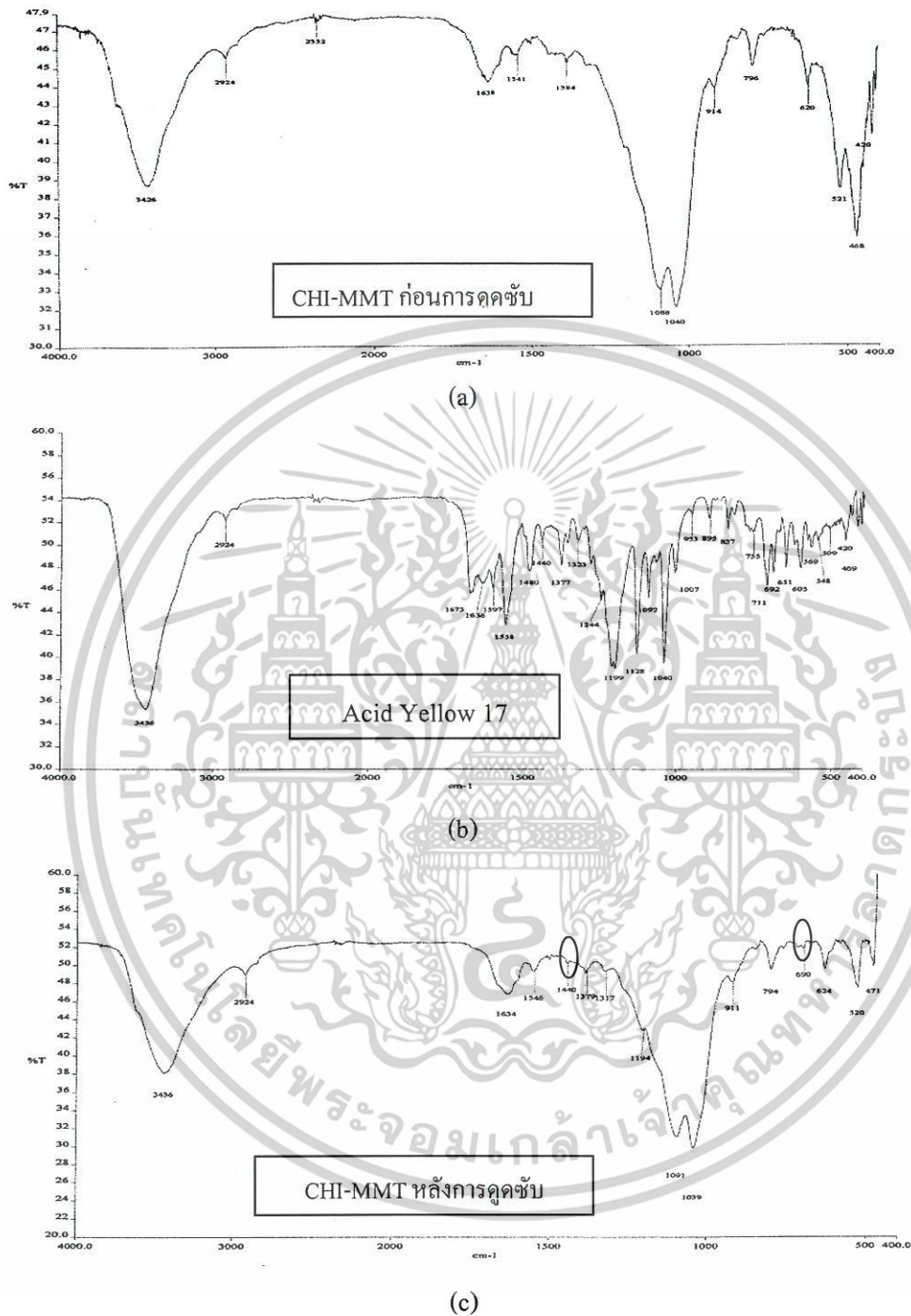
CHI-MMT หลังการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ปรากฏพีกที่สำคัญ ดังนี้

$\nu_{\max}$ : 3623-3435  $\text{cm}^{-1}$  (O-H stretching), 2924  $\text{cm}^{-1}$  (C-H stretching), 1546  $\text{cm}^{-1}$   
(N-H bending), 1039-1091  $\text{cm}^{-1}$  (Si-O stretching), 690  $\text{cm}^{-1}$  (C-Cl stretching),

จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า CHI-MMT ภายหลังจากการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 มีพีกสำคัญส่วนใหญ่ที่พบเป็นสัญญาณที่ซ้อนทับกันระหว่าง CHI-MMT และสีย้อม Acid Yellow 17 โดยมีสัญญาณที่ 690  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคลอรีน (C-Cl) ของโมเลกุลสีย้อม Acid Yellow 17 ซึ่งแสดงถึงการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR (a) CHI-MMT ก่อนการดูดซับ (b) ผงสีย้อม Acid Yellow 17 และ (c) CHI-MMT หลังการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17

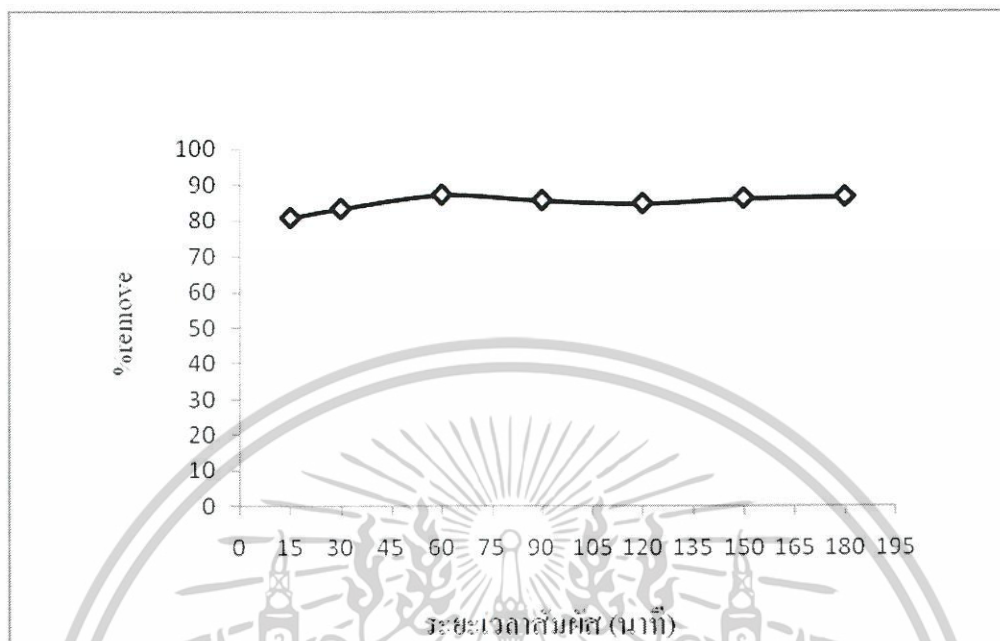
### 4.2.1 ผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ต่อความสามารถในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาที่มีต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT โดยในการทดลองนี้ได้แปรค่าระยะเวลาในการดูดซับเป็น 15 30 60 90 120 150 และ 180 นาที ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่ใช้เท่ากับ 800 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที และน้ำหนักของตัวดูดซับ CHI-MMT เท่ากับ 0.5 กรัม ตารางที่ 4.1 แสดงผลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างๆ และสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การกำจัด กับระยะเวลาสัมพัทธ์ได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ต่างๆ

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	ค่าการดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นหลัง การดูดซับ; $C_e$ (mg/l)	% การกำจัด	ความสามารถใน การดูดซับ; $q_e$ (mg/g)
15	0.199	153.9	80.8	64.6
30	0.178	133.9	83.3	66.6
60	0.133	103.1	87.1	69.7
90	0.149	115.4	85.6	68.5
120	0.158	122.3	84.7	67.8
150	0.143	110.8	86.2	68.8
180	0.139	107.7	86.5	69.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัด กับระยะเวลาในการสัมผัส เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เท่ากับ 800 mg/l

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.3 พบว่า CHI-MMT มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 ได้อย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นว่าค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดเท่ากับ 81% ในช่วง 15 นาทีแรก เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัส ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและความสามารถในการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสูงสุดเท่ากับ 87.1% คิดเป็นความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 69.7 mg/g และจากผลการทดลองแสดงว่า ที่เวลา 60 นาที เป็นระยะเวลาที่เพียงพอต่อการให้ CHI-MMT มีโอกาสได้สัมผัสกับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 อีก ทั้งยังเป็นเวลาที่มากพอที่สารละลายสีย้อมได้แพร่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซับ และเป็นจุดที่การดูดซับเข้าสู่สมดุล ซึ่งเป็นจุดที่ปริมาณการดูดซับและการแพร่ออกของสีย้อมมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเวลาที่เพิ่มมากขึ้นจึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับของ CHI-MMT ทำให้ค่าการดูดซับที่ได้มีค่าคงที่

#### 4.2.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ โดยการทดลองนี้ได้แปรค่าความเข้มข้นเป็น 50 100 300 500 800 1000 และ

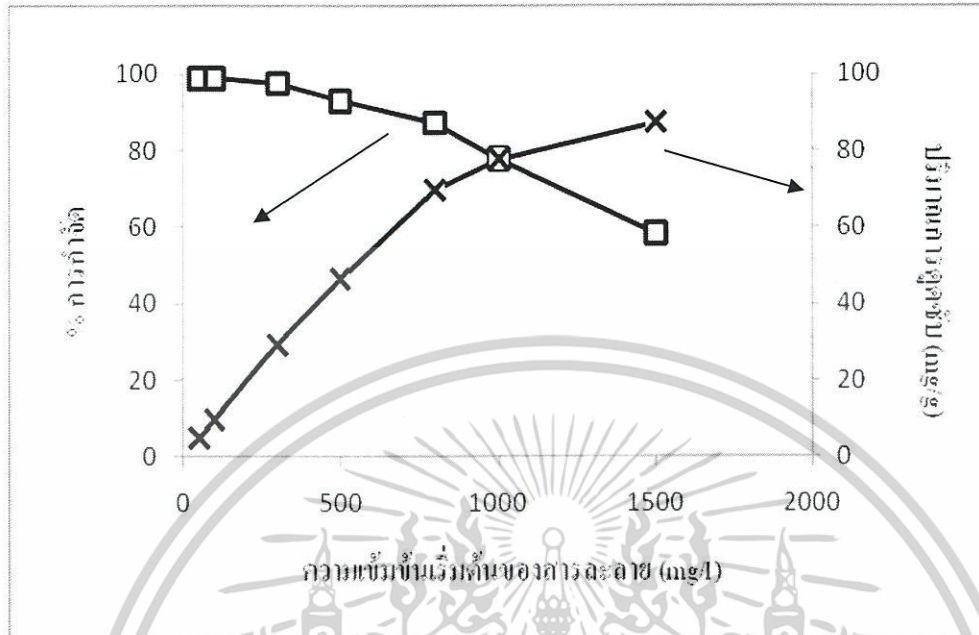
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1500 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ปริมาตรของสารละลายสียอมเท่ากับ 50 มิลลิตร ความเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที และน้ำหนักของตัวดูดซับ CHI-MMT เท่ากับ 0.5 กรัม ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และเมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสียอม Acid Yellow 17 ได้ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลการดูดซับสียอมของ CHI-MMT ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น(มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (mg/l)	% การกำจัด	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
50	0.009	0.6	98.7	4.9
100	0.017	1.2	98.8	9.9
300	0.102	7.8	97.4	29.2
500	0.464	35.6	92.9	46.4
800	0.133	103.1	87.1	69.7
1000	0.291	223.1	77.7	77.7
1500	0.816	626.9	58.2	87.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัด และปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เท่ากับ 50-500 mg/l ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ได้ มีค่ามากกว่า 90% และจะลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 800 1000 และ 1500 mg/l ในทางตรงข้ามเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ในช่วง 50-500 mg/l ปริมาณตัวดูดซับ CHI-MMT มีมากเกินพอ จึงสามารถดูดซับสีย้อมได้เกือบหมด โดยยังเหลือที่ว่างพอที่จะจับสีย้อมได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 800 1000 และ 1500 mg/l ปริมาณสีย้อมที่มีในระบบมีมากขึ้น จึงมีปริมาณสีย้อมที่ถูก CHI-MMT ดูดซับในปริมาณที่มากขึ้น เป็นผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณสีย้อมในระบบดังกล่าวมีค่ามากเกินพอ จะเป็นผลให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดมีค่าลดลง

#### 4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

จากการทดลองที่ 3.3.2 ซึ่งเป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้ CHI-MMT เป็นตัวดูดซับ เมื่อนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้มาทำการศึกษาไอโซเทอร์มการดูด

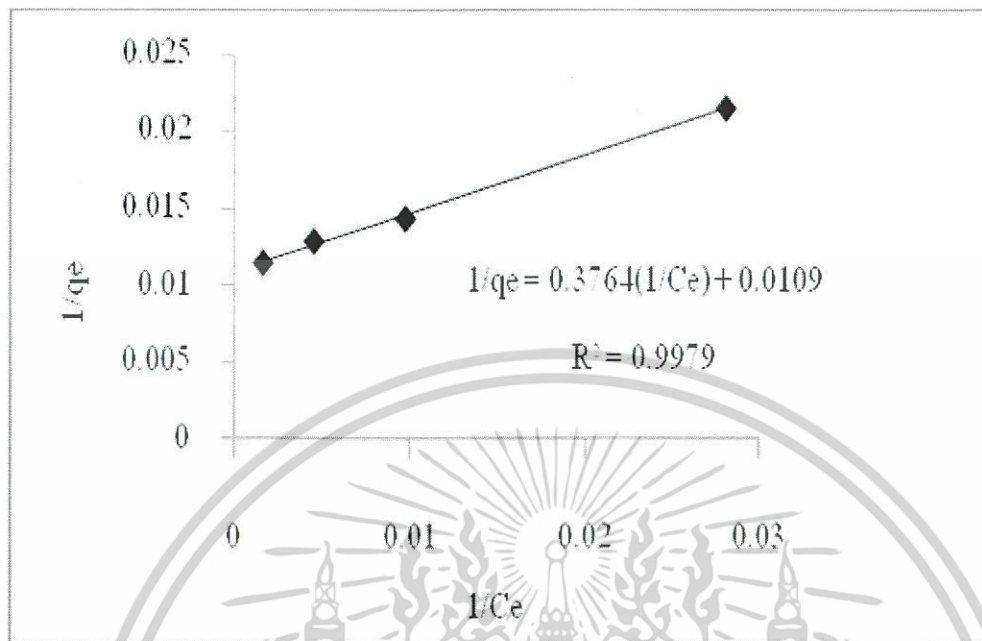
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซับ (Adsorption Isotherm) โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm) ค่าตัวแปรต่างๆ ที่นำมาใช้ แสดงดังตารางที่ 4.3 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ตามสมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดิช ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 4.5(a) และ (b) ตามลำดับ

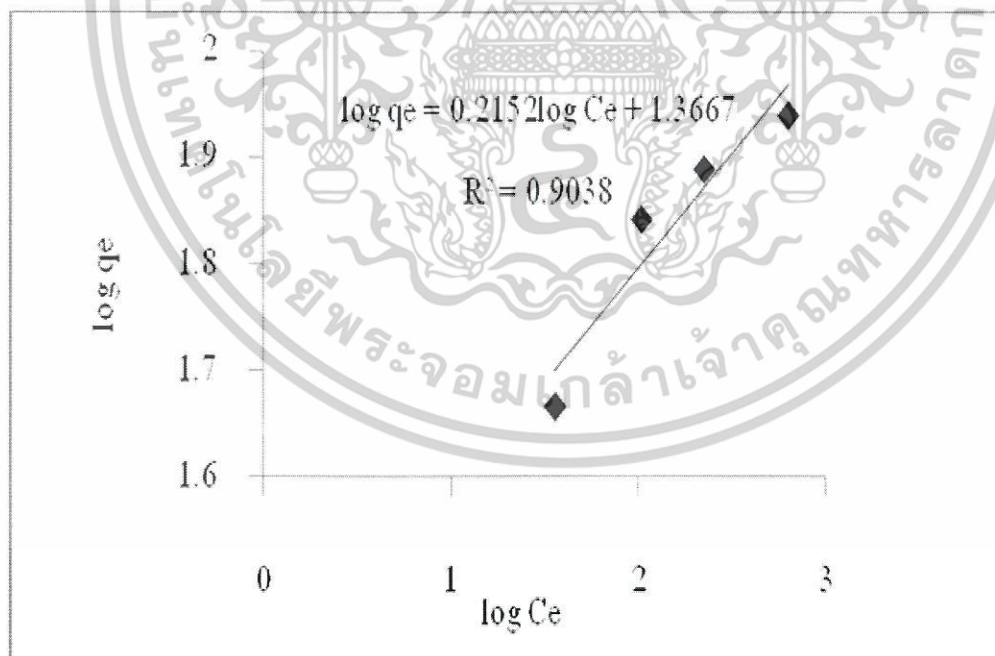
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลจากการคำนวณ(ภาคผนวก ก) ไอโซเทอร์มการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่เวลา 60 นาที

ความเข้มข้นก่อนการดูดซับ; $C_0$ (mg/l)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ; $C_e$ (mg/l)	ความสามารถในการดูดซับ; $q_e$ (mg/g)	$1/C_e$	$1/q_e$	$\log C_e$	$\log q_e$
500	35.6	46.4	0.028074	0.021533	1.551694	1.666892
800	103.1	69.7	0.009701	0.014349	2.013174	1.84317
1000	223.1	77.7	0.004483	0.012872	2.348461	1.890365
1500	626.9	87.3	0.001595	0.011453	2.797212	1.941064

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5a ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)



รูปที่ 4.5b ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Freundlich adsorption isotherm)

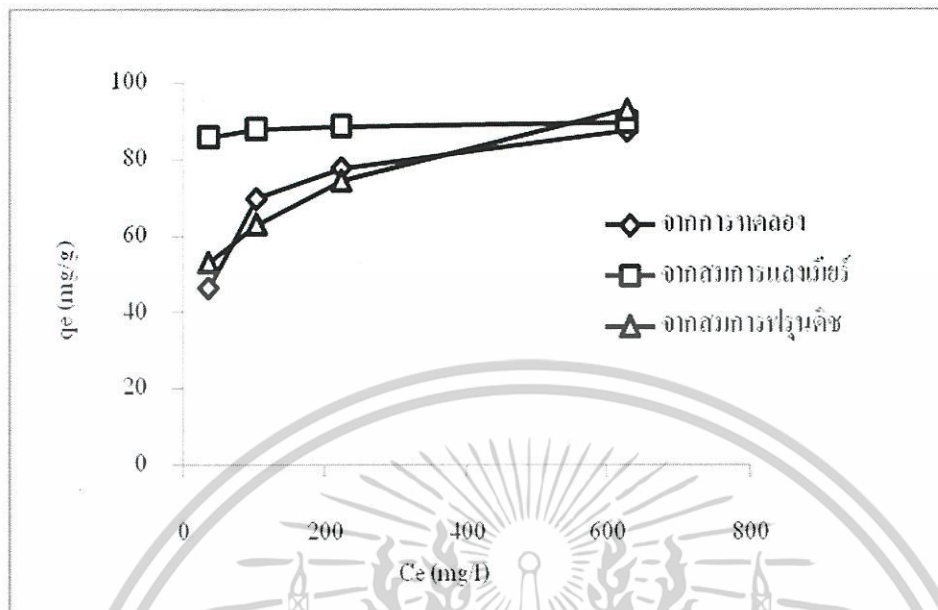
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5(a) และ (b) พบว่าค่า  $R^2$  ที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิชมีค่าเข้าใกล้หนึ่งทั้งคู่ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำสมการเส้นตรงที่ได้จากไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ ดังตารางที่ 4.4 นำค่าที่ได้มาเทียบกับค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับกับความเข้มข้นหลังการดูดซับ ดังรูปที่ 4.6 พบว่า CHI-MMT มีลักษณะการดูดซับสารละลายสี้อม Acid Yellow 17 ที่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลแสดงค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง, จากสมการของแลงเมียร์ และสมการของฟรุนดลิช

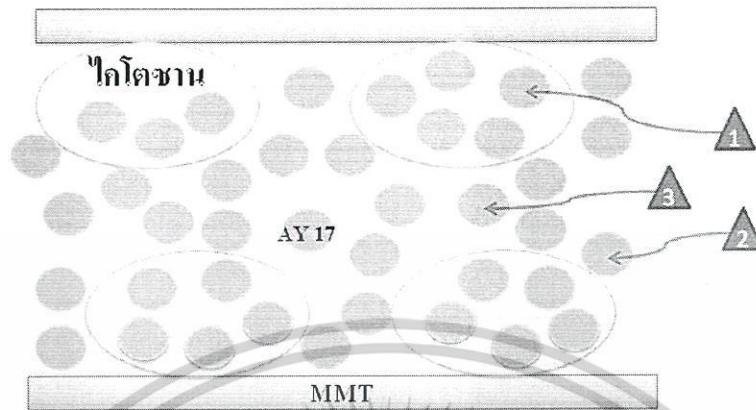
ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ (mg/l)	ความสามารถในการดูดซับจากการทดลอง (mg/g)	ความสามารถในการดูดซับจากสมการฟรุนดลิช (mg/g)	ความสามารถในการดูดซับจากสมการแลงเมียร์ (mg/g)
500	35.6	46.4	53.1	85.8
800	103.1	69.7	63.1	87.9
1000	223.1	77.7	74.5	88.7
1500	626.9	87.3	93.0	89.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการดูดซับ กับความเข้มข้นหลังการดูดซับจากการทดลอง จากสมการแลงเมียร์และจากสมการฟูรนต์ซ์

ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่า ตัวดูดซับ CHI-MMT มีลักษณะการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ตามลักษณะ ดังรูปที่ 4.7 การดูดซับลักษณะที่หนึ่ง คือ การที่สีย้อม Acid Yellow 17 ได้แทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของไคโตซานและเกิดอันตรกิริยาทางเคมีกับไคโตซานที่อยู่ระหว่างระนาบ 001 ของ MMT ในโครงสร้างของ CHI-MMT ลักษณะที่สอง คือการที่สีย้อม Acid Yellow 17 เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของไคโตซานที่แทรกตัวอยู่ระหว่างระนาบ 001 ของ MMT ในโครงสร้างของ CHI-MMT ด้วยพันธะอ่อนๆ และการดูดซับในลักษณะที่สาม คือการที่สีย้อม Acid Yellow 17 แทรกอยู่ระหว่างพื้นผิวของไคโตซานในโครงสร้างของ CHI-MMT ซึ่งเป็นการดูดซับทางกายภาพ ทั้งนี้การดูดซับของ CHI-MMT ส่วนใหญ่เป็นแบบลักษณะที่หนึ่งและสอง



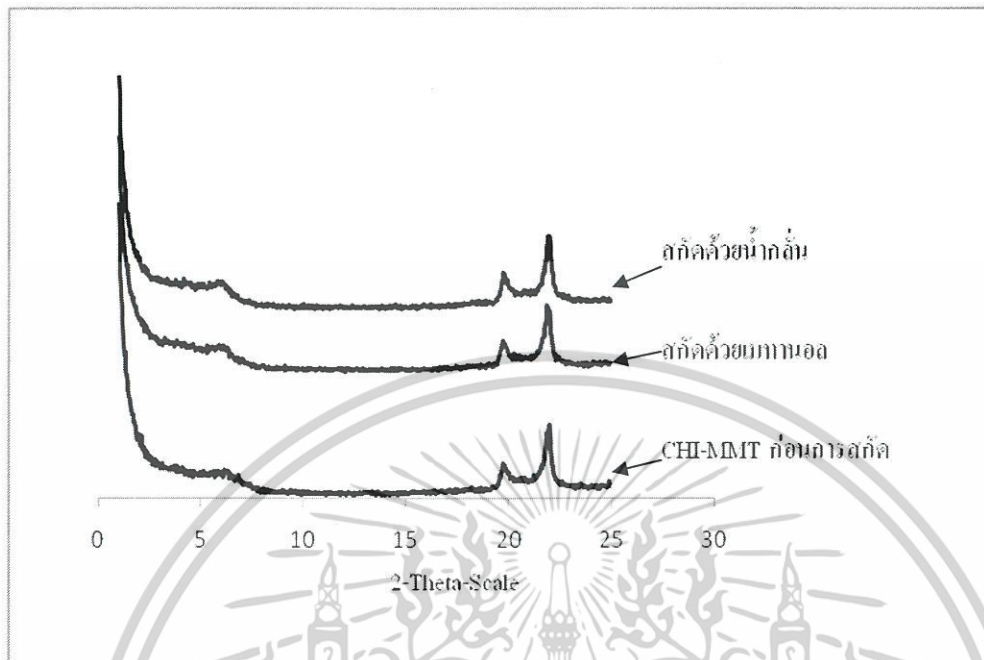
รูปที่ 4.7 แบบจำลองการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของCHI-MMT

### 4.3 การศึกษาเบื้องต้นในการนำ CHI-MMT กลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

#### 4.3.1 ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ CHI-MMT ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR

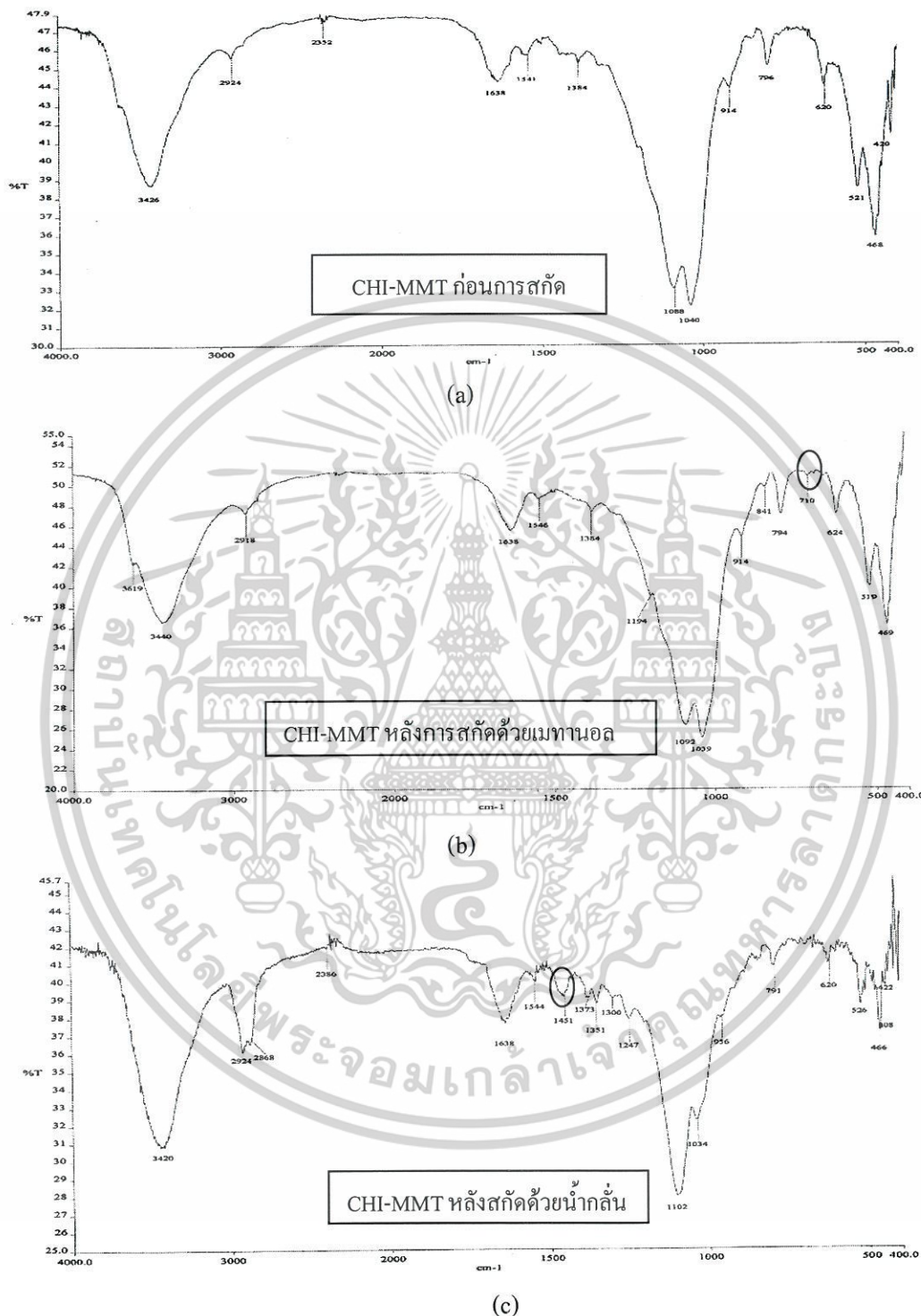
จากการทดลองทำการสกัดสีย้อมออกจาก CHI-MMT ด้วยเมทานอลเปรียบเทียบกับน้ำกลั่น โดยใช้ตัวทำละลายในการสกัด 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนัก CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้วเท่ากับ 1.0 กรัม

เมื่อนำ CHI-MMT หลังการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่นมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ ด้วยเทคนิค XRD และ FT-IR แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกับ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้ว(ก่อนการสกัด)จะ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9(a-c) ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 แผนภาพ XRD ของCHI-MMT หลังการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่นเปรียบเทียบกับCHI-MMT ก่อนการสกัด

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ดังรูปที่ 4.6 พบว่าพีคของระนาบ 001 ของ CHI-MMT ภายหลังจากการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่นไม่แตกต่างจากแผนภาพ XRD ของ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้ว (ก่อนการสกัด) ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การสกัดสีย้อมออกจาก CHI-MMT ด้วยเมทานอลและน้ำกลั่น ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ CHI-MMT



รูปที่ 4.9 สเปกตรา FT-IR ของ (a) CHI-MMT ที่ดูดซับสีเรียบร้อยแล้ว (b) CHI-MMT หลังสกัดด้วยเมทานอล และ (c) CHI-MMT หลังสกัดด้วยน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ดังรูปที่ 4.9(a-c) พบว่า CHI-MMT หลังสกัดด้วยเมทานอล ยังคงปรากฏพีกที่ตำแหน่ง  $710\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงเอกลักษณ์ของสีย้อม Acid Yellow 17 อยู่ในขณะที่ CHI-MMT หลังการสกัดด้วยน้ำกลั่น มีพีกที่ตำแหน่ง  $1451\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์ของสีย้อม Acid Yellow 17 เช่นกัน แต่สังเกตเห็นว่า จะมีปริมาณสีย้อมมากกว่า CHI-MMT หลังการดูดซับ (ก่อนการสกัด) ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในระหว่างที่ทำการสกัดด้วยน้ำกลั่นนั้น มี MMT บางส่วนที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงโครงสร้างด้วยไคโตซานหลุดออกมาระหว่างทำการสกัด ซึ่งสังเกตได้จากสารละลายที่อยู่ในขวดก้นกลมมีความขุ่นมากกว่าในตอนเริ่มต้นสกัด ในขณะที่สารละลายที่สกัดด้วยเมทานอลยังคงใสเหมือนในตอนเริ่มต้น

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การสกัดสีย้อมออกจาก CHI-MMT ด้วยเทคนิค soxhlet โดยใช้เมทานอลและน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ยังมีประสิทธิภาพในการ regeneration CHI-MMT ได้ไม่เพียงพอ

#### 4.3.2 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT ที่ผ่านการ regeneration

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ของ CHI-MMT ที่ผ่านการ regeneration ในการทดลองใช้ปริมาณตัวดูดซับ  $0.5\text{ g}$  ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 ที่ใช้คือ  $800\text{ mg/l}$  ปริมาตร  $50\text{ ml}$  ใช้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ  $60$  นาที และนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ  $150$  รอบต่อนาที ซึ่งข้อมูลผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการดูดซับสีย้อมของ CHI-MMT ที่ผ่านการ regeneration โดยการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่น

ระบบตัวทำละลายที่ใช้สกัด	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (mg/l)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)	ความเข้มข้นหลังการดูดซับ, $C_c$ (mg/l)	%การกำจัด	ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
เมทานอล	800	0.846	651.5	18.6	14.8
น้ำกลั่น	800	0.101	784.6	1.9	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่าการใช้เมทานอลในการสกัดสี้อมออกจาก CHI-MMT จะทำให้ได้ CHI-MMT ที่สามารถนำกลับมาใช้ในการดูดซับสารละลายสี้อม Acid Yellow 17 ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า CHI-MMT ที่สกัดด้วยน้ำกลั่น ซึ่งสังเกตได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดและความสามารถในการดูดซับที่มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากว่า ที่เวลาเท่ากัน จำนวนรอบในการสกัดด้วยเมทานอลนั้น จะมากกว่าการสกัดด้วยน้ำกลั่น เพราะจุดเดือดของน้ำกลั่นมีค่าสูงกว่าเมทานอล อีกทั้งน้ำกลั่นยังมีความเป็นขี้สูงกว่าเมทานอล ซึ่งทำให้น้ำกลั่นมีโอกาสเข้าไปถึง MMT บางส่วนที่ไม่ได้ถูกปรับปรุงโครงสร้างด้วยไคโตซานออกมา จึงทำให้ได้ CHI-MMT ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีน้อยกว่า

อย่างไรก็ตาม การ regenerate CHI-MMT ด้วยวิธีการข้างต้น ยังคงให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก เนื่องจากตัวทำละลายทั้งสอง สามารถสกัดสี้อมที่ดูดซับทางกายภาพและ/หรือ สี้อมที่เกิดอันตรกิริยาที่บริเวณพื้นผิวของไคโตซานที่แทรกตัวอยู่ระหว่างระนาบ 001 ของ MMT ในโครงสร้างของ CHI-MMT เท่านั้น แต่ไม่สามารถสกัดแยกสี้อมที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของไคโตซานได้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพของ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อมชนิด Acid Yellow 17 ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

- เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มจาก 15-180 นาที ความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสเป็น 60 นาที CHI-MMT มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 70 mg/g
- เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดสีย้อมจะมีค่าลดลง ในทางตรงข้าม ค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น
- CHI-MMT มีพฤติกรรมการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เป็นไปตามสมการไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการดูดซับแบบหลายชั้น กล่าวคือ มีทั้งการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ
- การสกัด CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อม Acid Yellow 17 แล้ว ด้วยเทคนิค soxhlet โดยใช้เมทานอลและน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลาย ตัวทำละลายทั้งสองชนิดสามารถสกัดสีย้อมบางส่วนออกจาก CHI-MMT ได้ โดยไม่มีผลทำให้โครงสร้างของ CHI-MMT เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้ CHI-MMT ที่ได้จากการสกัดด้วยเมทานอล จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับสารละลายสีย้อมสูงกว่า CHI-MMT ที่สกัดด้วยน้ำกลั่น

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 นอกจากการศึกษาถึงปัจจัยทางด้านระยะเวลาสัมผัส และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแล้ว ควรศึกษาถึงปัจจัยในเรื่องของอัตราเร็วในการปั่นกววน ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับด้วย

5.2.2 เนื่องจากสถานะน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ไม่ได้มีการปนเปื้อนเฉพาะสีย้อมเท่านั้น ดังนั้นควรนำ CHI-MMT ไปทดลองดูดซับสารปนเปื้อนอื่นๆ เช่น โลหะหนักจำพวกตะกั่ว แคดเมียม

5.2.3 สำหรับการนำ CHI-MMT ที่ดูดซับสีย้อมแล้วกลับมาใช้ใหม่นั้น อาจไม่คุ้มทุน เนื่องจากว่า CHI-MMT มีลักษณะการดูดซับสีย้อมทั้งแบบทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งไม่สามารถสกัดสีย้อมออกมาได้หมด จึงทำให้ได้ CHI-MMT ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] รัตนวรรณ มกรพันธุ์. 2549. เทคโนโลยีนาโนเคลย์/นาโนคอมพอสิต. หน้า 19-23
- [2] บุญเสนา เตียวบุญอุตรธรรม. 2547. **ปฐพีวิทยา**. คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [3] จิราภรณ์ เชาวลิต. คณะการแพทย์แผนตะวันออก มหาวิทยาลัยรังสิต
- [4] ปิยบุตร วานิชพงษ์พันธุ์. **สารไคตินและไคโตซาน**. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
- [5] [online] [www.netcomposite.com](http://www.netcomposite.com)
- [6] [online] [www.mineral.galleries.com/minerals/silicate/montmori/montmori.htm](http://www.mineral.galleries.com/minerals/silicate/montmori/montmori.htm)
- [7] อติศักดิ์ อัญชลิสังกาส. 2546. **การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอโดยการกรองด้วยทรายและการดูดซับด้วยเถ้าแกลบดำ**. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [8] เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2539. **การบำบัดน้ำเสีย**. มิตรนราการพิมพ์. หน้า 264-284
- [9] เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์. 2547. **วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่ม 5**. มหาวิทยาลัยรังสิต
- [10] นพรัตน์ พุทธสุวรรณ และคณะ. 2549. **การดูดซับสารละลายสีย้อมคองโกเรดด้วยถ่านกัมมันต์ในเบดนิ่ง** ปรินญาพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
- [11] สุจินต์ เอี่ยมปี. 2544. **การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมสีโดยกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์** ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [12] จินตนา ชำนาญมณูธรรม และคณะ. 2542. **การดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้น้ำไคตินและไคโตซาน** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [13] ราตรี ปิ่นทอง และคณะ. 2543. **การดูดซับสารละลายสีย้อมโดยใช้ถ่านข้าวโพดและถ่านมันสำปะหลัง** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [14] รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. 2544. **การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้หมอนต์มอริลโลไนต์** สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [15] Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon. **Chitosan intercalated montmorillonite: Preparation, characterization and cationic dye adsorption**. Applied Clay Science, Volume 42, Issues 3-4, January 2009, Pages 427-431

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [16] อมรรัตน์ สวัสดิมงคล. 2551. **การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตอะคริลิกแอซิดกับมอนต์มอริลไรนด์ดัดแปรด้วยไคโตซาน** วิทยานิพนธ์สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [17] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และ คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. **หลักการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำทางเคมี**. กรุงเทพฯ :สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 149-154, 2550.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การดัดแปรโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายไคโตซาน

#### ตอนที่ 1 การเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT)

1. เตรียม MMT และน้ำในอัตราส่วน โดยน้ำหนัก แล้วใช้เครื่องอัลตราโซนิกช่วยในการกระจายตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เทของผสมน้ำ-MMT ส่วนที่บวมน้ำลงในบีกเกอร์ นำไปอบที่อุณหภูมิ 80°C จนกว่า MMT จะแห้งดี แล้วนำไปบดให้ละเอียด

#### ตอนที่ 2 การเตรียมสารละลายไคโตซาน

1. นำไคโตซานมาละลายด้วยกรดอะซิติก (เข้มข้น 2%v/v) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างไคโตซาน: กรดอะซิติก เท่ากับ 1:50 โดยน้ำหนัก
2. ปรับ pH ของสารละลายไคโตซานให้เท่ากับ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10% w/v

#### ตอนที่ 3 การดัดแปรโครงสร้าง MMT

1. นำ MMT ที่เตรียมได้ในตอนที่ 1 มากระจายตัวในน้ำด้วยอัตราส่วน โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ป้อนสารละลายไคโตซานอย่างช้าๆ ลงในสารแขวนลอยในข้อ 1 ด้วยเครื่อง Peristaltic pump โดยใช้อัตราเร็วในการป้อนเท่ากับ 0.14 ml/min (CHI-MMT) โดยการผสมจะทำที่อุณหภูมิ 60 °C พร้อมทั้งใช้ใบพัดปั่นกวนที่ความเร็วเท่ากับ 350 รอบต่อนาที
3. ทำการแยก CHI-MMT ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge Machine)
4. ล้างผลิตภัณฑ์ (CHI-MMT) ที่ได้ด้วยน้ำกลั่น จนน้ำที่ล้างมีค่า pH ประมาณ 6-7 แล้วทำการแยก CHI-MMT ด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงอีกครั้ง
5. นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หรือจนกว่าตะกอนจะแห้งดี จากนั้นชั่งน้ำหนักหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำ CHI-MMT ที่ได้ไปบดให้ละเอียด คัดแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนขนาด 400 เมช แล้วเก็บใส่ขวดพลาสติกไว้ในเคซิเตอร์
7. นำ CHI-MMT ที่ได้ไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD FT-IR และ TGA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

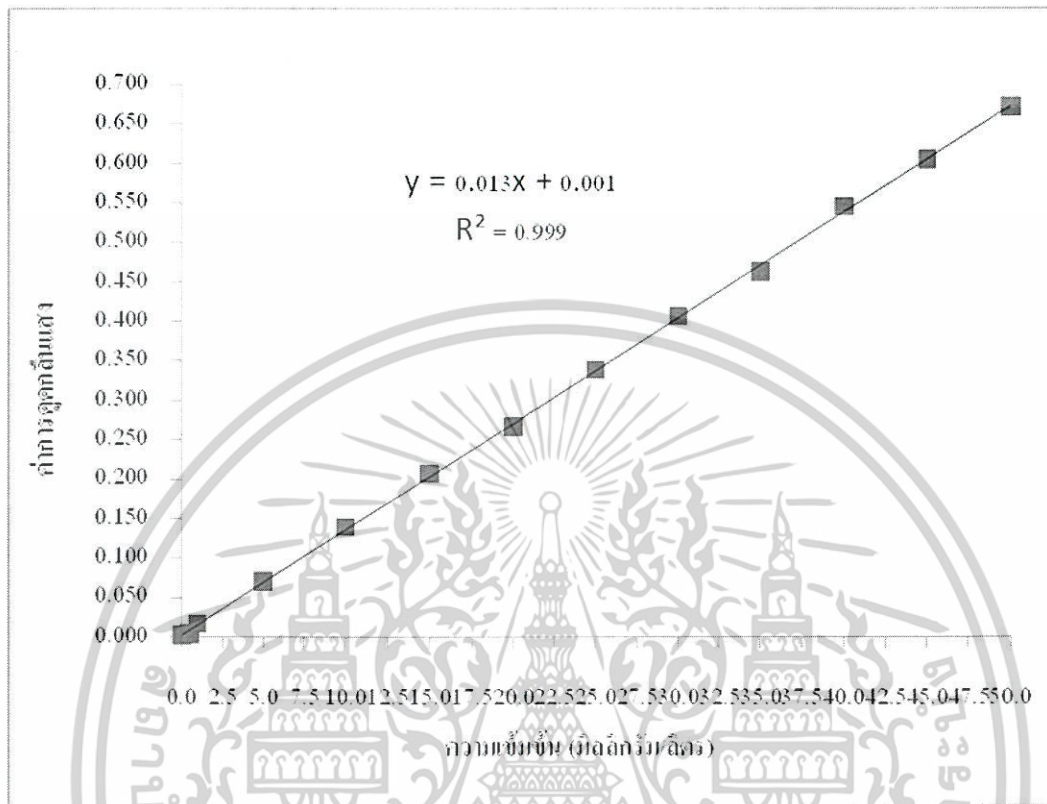
### การสร้างกราฟมาตรฐาน (Standard Calibration Curve)

1. เตรียมสารละลาย Acid Yellow 17 เข้มข้น 50 mg/L ด้วยการละลาย Acid Yellow 17 จำนวน 50 mg ในน้ำกลั่น 1000 ml
2. ทำการปรับสารละลาย Acid Yellow 17 ที่เตรียมได้ให้มีความเข้มข้น 0.05 0.1 0.5 1.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0 และ 45.0 mg/L ตามลำดับ
3. นำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่นเท่ากับ 400 nm

ตารางที่ ข1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่างๆ ของสีย้อม Acid Yellow 17

ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs)
0.05	0.002
0.10	0.002
0.50	0.004
1.00	0.017
5.00	0.070
10.00	0.139
15.00	0.207
20.00	0.266
25.00	0.338
30.00	0.406
35.00	0.462
40.00	0.545
45.00	0.604
50.00	0.671

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายยีสี่ Acid Yellow 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การคำนวณ

#### 1. การคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมหลังการดูดซับ

จากสมการที่ได้จากการสร้างกราฟมาตรฐาน

$$y = 0.013(x) + 0.001$$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสง  
 $x =$  ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมหลังการดูดซับ

#### 2. การคำนวณหา %การกำจัด

$$\% \text{การกำจัด} = (C_0 - C_e) / C_0 \times 100$$

เมื่อ  $C_0 =$  ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมก่อนการดูดซับ  
 $C_e =$  ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมหลังการดูดซับ

#### 3. การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับ

$$\text{ความสามารถในการดูดซับ} = [(C_0 - C_e) \times V] / 1000 \times M$$

เมื่อ  $C_0 =$  ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมก่อนการดูดซับ (mg/l)  
 $C_e =$  ความเข้มข้นของสารละลายที่ย้อมหลังการดูดซับ (mg/l)  
 $V =$  ปริมาตรของสารละลาย (ml)  
 $M =$  น้ำหนักของ CHI-MMT ที่ใช้ในการดูดซับ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ง1 ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	50				100			
	Abs	$C_c$ (mg/l)	$q_c$ (mg/g)	%remove	Abs	$C_c$ (mg/l)	$q_c$ (mg/g)	%remove
0	0	50	0	0	0	100	0	0
15	0.011	0.77	4.92	98.46	0.019	1.38	9.86	98.62
30	0.0096	0.66	4.93	98.68	0.018	1.31	9.87	98.69
60	0.0093	0.64	4.94	98.72	0.017	1.23	9.88	98.77

ตารางที่ ง1(ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	300				500			
	Abs	$C_c$ (mg/l)	$q_c$ (mg/g)	%remove	Abs	$C_c$ (mg/l)	$q_c$ (mg/g)	%remove
0	0	300	0	0	0	500	0	0
15	0.141	10.77	28.92	96.41	0.762	58.54	44.15	88.29
30	0.150	11.46	28.85	96.18	0.473	36.31	46.37	92.74
60	0.102	7.77	29.21	97.41	0.464	35.62	46.44	92.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1(ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)							
	800				1000			
	Abs	C <sub>e</sub> (mg/l)	q <sub>e</sub> (mg/g)	%remove	Abs	C <sub>e</sub> (mg/l)	q <sub>e</sub> (mg/g)	%remove
0	0	800	0	0	0	1000	0	0
15	0.199	153.85	64.62	80.77	0.310	237.70	76.23	76.23
30	0.173	133.85	66.62	83.27	0.295	226.15	77.39	77.39
60	0.133	103.08	69.96	87.12	0.291	223.08	77.69	77.69
90	0.149	115.38	68.46	85.58	0.360	276.15	72.39	72.39
120	0.158	122.31	67.77	84.71	0.380	291.54	70.85	70.85
150	0.143	110.77	68.92	86.15	n/a	n/a	n/a	n/a
180	0.139	107.69	69.23	86.54	n/a	n/a	n/a	n/a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ) ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองใช้ CHI-MMT ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 โดยใช้สภาวะที่อุณหภูมิห้อง

เวลา (นาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	1500			
	Abs	$C_e$ (mg/l)	$q_e$ (mg/g)	%remove
0	0	1500	0	0
15	0.772	593.08	90.69	60.46
30	0.803	616.92	88.31	58.87
60	0.816	626.92	87.31	58.21
90	0.824	633.08	86.69	57.79
120	0.926	711.54	78.85	52.52

ตารางที่ 2 ข้อมูลผลการทดลองใช้ CHI-MMT ที่ได้จากการสกัดด้วยเมทานอลและน้ำกลั่น ในการดูดซับสารละลายสีย้อม Acid Yellow 17 เป็นเวลา 60 นาที

ระบบตัว ทำละลาย ที่ใช้สกัด	ความเข้มข้น เริ่มต้นของ สารละลายสีย้อม (mg/l)	ค่าการ ดูดกลืนแสง (Abs)	ความเข้มข้นหลัง การดูดซับ, $C_e$ (mg/l)	%การกำจัด	ความสามารถ ในการดูดซับ (mg/g)
เมทานอล	800	0.846	651.5	18.6	14.8
น้ำกลั่น	800	0.101	784.6	1.9	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้