



Chulalongkorn University
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การใช้วัสดุเชิงประกอบไบโโตะซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ

นางสาวปณิดา การสมวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Chulalongkorn University
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF CHITOSAN/MODIFIED MONTMORILLONITE COMPOSITE AS
REACTIVE DYE ADSORBENT

Miss Panida Kansomwan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้วัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนคัมอริล โลไนต์คัดแปร เป็นตัวดูดซับสีข้อมริแอกทีฟ
โดย	นางสาวปณิดา การสมวรรณ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทนา จิรธรรมนุกูล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

รองคณบดีฝ่ายบริหารรักษาการแทน
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธุ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์เสาวรัตน์ ช่วยจุลจิตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทนา จิรธรรมนุกูล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วนิดา จันทร์วิกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ จารุจินดา)



ปณิธา การสมวรณ : การใช้วัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็นตัวดูดซับ
สีย้อมรีแอกทีฟ. (UTILIZATION OF CHITOSAN/MODIFIED MONTMORILLONITE
COMPOSITE AS REACTIVE DYE ADSORBENT) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.
สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.นันทนา จิระธรรมนุกูล. 85 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสายโซ่ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กันจากปฏิกิริยาการไฮโดร-
ลิซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 15 โดยปริมาตร และใช้เวลาใน
การไฮโดรลิซิส 6 และ 24 ชั่วโมง ผลของการทำปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะได้ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุล
เฉลี่ยเชิงน้ำหนักแตกต่างกันที่ 480000, 130000, 69000 และ 14000 ตามลำดับ หลังจากนั้นนำสายโซ่
ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ มาทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ จากผลการทดลองพบว่าการแยก
ชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ แยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์
ได้ไม่มากนัก จึงได้มีการใช้สารออกตะเดซิลเอมีนมาช่วยในการดัดแปรร่วมกับสายโซ่ไคโตซานที่น้ำหนัก
โมเลกุลต่างๆ ผลการทดลองพบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและสายโซ่
ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลที่ 69000 สามารถแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ได้มากที่สุด นำเอามอนต์
มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและสายโซ่ไคโตซานน้ำหนักโมเลกุล 69000 มาผสม
กับไคโตซานในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เพื่อเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม
รีแอกทีฟ จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในเม็ดวัสดุเชิงประกอบ
ค่าความเป็นกรด-เบสในช่วง 4-6 และปริมาณของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสี
ย้อมรีแอกทีฟที่ดีขึ้น ส่วนผลการศึกษาไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วยเม็ดวัสดุ
เชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสอดคล้องกับทั้งสมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ภาควิชา วัสดุศาสตร์

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2551

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม



4972622123 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEY WORD: CHITOSAN/MODIFIED MONTMORILLONITE COMPOSITE/ REACTIVE DYE ADSORBENT

PANIDA KANSOMWAN : UTILIZATION OF CHITOSAN/MODIFIED MONTMORILLONITE COMPOSITE AS REACTIVE DYE ADSORBENT. THESIS PRINCIPAL ADVISOR : ASST.PROF.SIRIWAN KITTINAOVARAT,Ph.D, THESIS CO-ADVISOR : ASST. PROF. NANTANA JIRATUMNUKUL,Ph.D, 85 pp.

In this study, different molecular weights of chitosan were prepared by hydrolysis reaction with hydrogenperoxide 4% and 15 %(v/v) for 6 and 24 hours. Hydrolyzed chitosan with different molecular weights obtained from the hydrolysis reaction were 480000, 130000, 69000 and 140000 respectively. Hydrolyzed chitosan with different molecular weights were used to modify Montmorillonite (MMT). The results found that interlayer of modified MMT slightly increased. In addition, octadecylamine was used to enhance the interlayer separation of MMT. The results found that using octadecylamine and hydrolyzed chitosan at molecular weight 69000 imparted highest interlayer separation. As a result, modified MMT using octadecylamine and hydrolyzed chitosan at molecular weight 69000 was used to prepare chitosan/modified MMT composites with various ratios of chitosan and modified MMT. The composites were used as reactive dye adsorbents. The results showed that at pH of dye solution in range 4-6, increasing modified MMT ratio and amount of adsorbent improved the reactive dye adsorption efficiency. Moreover, the adsorption isotherm of dye adsorption followed both the Langmuir and Freundlich models.

Department : Materials Science

Student's signature :.....

Field of study: Applied Polymer Science and Textile Technology

Principal Advisor's signature :.....

Academic year : 2008

Co-Advisor's signature :.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ได้อย่างสมบูรณ์นั้น เนื่องจากได้รับคำแนะนำทางด้านวิชาการ ความเอื้อเฟื้อทางด้านเครื่องมือ วัสดุดิบ และสถานที่สำหรับการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งได้รับความช่วยเหลือ และการแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จาก ผู้ทรงคุณวุฒิในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าจึงใคร่ขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายนามดังนี้

1. ผศ.ดร. สิริวรรณ กิตติเนาวรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. นันทนา จิรธรรมนุกูล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

2. รศ. เสาวรจน์ ช่วยจุลจิตร์ ผศ.ดร. สิริรัตน์ จารุจินดา และ ดร. วนิตา จันทรวีภูล กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำด้านวิชาการและช่วยตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

4. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์มหาวិทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกระหว่างการทำงานวิจัย

5. บริษัท บรรวิชรไบโอ-ไลน์ บริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม และบริษัท ไตสตาร์ไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและวัสดุดิบในการวิจัย

6. ทูลอดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา พี่น้องและเพื่อนๆ ทุกคน ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี อีกทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้จนสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เป็นผลสำเร็จตามที่มุ่งหวังไว้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แร่ดินเหนียว (clay mineral).....	4
2.1.1. กลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite).....	5
2.1.2. กลุ่มเกาลินไนท์ (kaolinite).....	6
2.1.3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite).....	6
2.2 ดินเบนโตไนท์.....	8
2.3 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	8
2.4 ไคติน-ไคโตซาน (chitin-chitosan).....	11
2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคโตซาน.....	11
2.4.2 สมบัติของไคติน-ไคโตซาน.....	12
2.4.3 การศึกษาการเสื่อมสลายของไคติน-ไคโตซาน.....	14
2.4.4 การประยุกต์ใช้งานของไคติน-ไคโตซาน.....	16
2.5 สีย้อมและการจำแนกสีย้อม.....	18
2.5.1 การเกิดสีของสีย้อม.....	18
2.5.2 การจำแนกสีย้อม.....	19

บทที่

	หน้า
2.6 สีรีแอกทีฟ.....	22
2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม.....	24
2.8 การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม.....	25
2.8.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (Primary Treatment).....	25
2.8.2 การบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment).....	26
2.8.3 วิธีการกำจัดสีย้อม.....	26
2.9 การดูดซับ (adsorption).....	28
2.9.1 ลักษณะการดูดซับ.....	28
2.9.2 กลไกการดูดซับ.....	30
2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	30
2.10 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm).....	32
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.1.1 วัตถุประสงค์.....	37
3.1.2 สารเคมี.....	38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	38
3.4 การดำเนินงานการวิจัย.....	39
3.4.1 การไฮโดรไลซิสโคโตซานให้มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน.....	39
3.4.2 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซานน้ำหนักโมเลกุล ในช่วงต่างๆ กัน.....	39
3.4.3 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีน.....	42
3.4.4 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีน และโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน.....	42
3.4.5 การเตรียมเม็ดโคโตซาน.....	44

3.4.6 การเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปร.....	45
3.4.7 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมของ เม็ดวัสดุเชิงประกอบ.....	46
3.4.8 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสีย้อม.....	49
4. ผลและการอภิปรายผล.....	50
4.1 น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซาน.....	50
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction).....	52
4.2.1 ผลการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซานน้ำหนัก โมเลกุลที่แตกต่างกัน.....	52
4.2.2 ผลการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีน และโคโตซาน.....	53
4.2.3 ผลของน้ำหนักโมเลกุลโคโตซานที่มีต่อการแยกชั้นผลึกของ มอนต์มอริลโลไนต์.....	56
4.3 ลักษณะของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซาน และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร.....	57
4.3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Diameter) และความหนาแน่น (Density).....	57
4.3.2 พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของ รูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameter)	58
4.4 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ.....	60
4.4.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120.....	60
4.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของเม็ดโคโตซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร.....	61

บทที่

หน้า

4.4.3 อัตราส่วนของโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรของเม็ดวัสดุ เชิงประกอบที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม.....	62
4.4.4 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อประสิทธิภาพการ ดูดซับสีย้อม.....	63
4.4.5 อิทธิพลของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อประสิทธิภาพ การดูดซับสีย้อม.....	64
4.5 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟของเม็ดโคโคซาน และเม็ดวัสดุเชิงประกอบ.....	66
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
รายการอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	78
ภาคผนวก ง.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติต่างๆ ของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต.....	7
ตารางที่ 2.2	การจำแนกสีตามวิธีใช้ และแสดงคุณลักษณะของสีแต่ละชนิดโดยสรุป.....	19
ตารางที่ 2.3	ความสามารถของสีย้อมในการย้อมติดเส้นใยชนิดต่างๆ.....	21
ตารางที่ 2.4	การจำแนกชนิดของสีโดยวิธีการย้อม.....	21
ตารางที่ 2.5	การจำแนกข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงเคมีและการดูดซับเชิงฟิสิกส์.....	29
ตารางที่ 4.1	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (\bar{M}_w) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (\bar{M}_n) และการกระจายตัว (polydispersity) ของโคโตซานเริ่มต้นและภายหลังการไฮโดรไลซิสที่สภาวะต่างๆ กัน.....	50
ตารางที่ 4.2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ โคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในอัตราส่วนต่างๆ กัน.....	58
ตารางที่ 4.3	พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน.....	59
ตารางที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมรีเอกทีฟเรด 120 กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 534 นาโนเมตร.....	60
ตารางที่ 4.5	ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟลูนดิช จากการดูดซับสีรีเอกทีฟด้วยโคโตซานและวัสดุเชิงประกอบ.....	68

สารบัญภาพ

รูปประกอบ		หน้า
รูปที่ 2.1	ก) หน่วยแผนทิลิการูปสี่เหลี่ยม (silica tetrahedron).....	5
	ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า.....	5
รูปที่ 2.2	ก) หน่วยแผนอะลูมินาแปดเหลี่ยม (alumina octahedron).....	5
	ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า.....	5
รูปที่ 2.3	แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite).....	6
รูปที่ 2.4	แร่กาลินไนท์ (kaolinite).....	7
รูปที่ 2.5	แร่อิลไลท์ (Illite).....	7
รูปที่ 2.6	โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	9
รูปที่ 2.7	การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange).....	10
รูปที่ 2.8	การเกิดคอมพอสิตของเคลย์.....	10
รูปที่ 2.9	โครงสร้างทางเคมีของไคติน.....	11
รูปที่ 2.10	โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน.....	11
รูปที่ 2.11	โครงสร้างโดยทั่วไปของสรีแอกทีฟ.....	23
รูปที่ 2.12	ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm.....	33
รูปที่ 2.13	ลักษณะของ Freudlich adsorption isotherm.....	34
รูปที่ 3.1	โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
รูปที่ 3.2	เครื่อง Gel Permeation Chromatography.....	40
รูปที่ 3.3	เครื่องผสมความเร็วสูง (hi-speed mixer).....	40
รูปที่ 3.4	เครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge).....	41
รูปที่ 3.5	เครื่องทดสอบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน.....	41
รูปที่ 3.6	ขวดพิคโนมิเตอร์ (pycnometer).....	44
รูปที่ 3.7	เครื่อง Surface area and porosity analyzer.....	45
รูปที่ 3.8	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer).....	46
รูปที่ 3.9	เครื่องเขย่า (shaker).....	48
รูปที่ 4.1	ลักษณะภายนอกของไคโตซานเริ่มต้นและหลังปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสด้วย สภาวะต่างๆ กัน.....	51

รูปประกอบ	หน้า	
รูปที่ 4.2	<p>แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ตัดแปร, (b) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วย CTS_{initial}, (c) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วย CTS_{4%6h}, (d) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วย CTS_{4%24h} และ (e) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วย CTS_{15%24h}</p>	52
รูปที่ 4.3	<p>แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ตัดแปรและ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน (C₁₈H₃₉N)</p>	54
รูปที่ 4.4	<p>แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโคซานแบบชั้นตอนเดียว และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน และโคโคซานแบบ 2 ชั้นตอน</p>	55
รูปที่ 4.5	<p>แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ตัดแปร, (b) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{initial}, (c) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%6h}, (d) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%24h} และ (e) มอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{15%24h}</p>	56
รูปที่ 4.6	<p>ภาพถ่ายของ (ก) เม็ดโคโคซาน และ (ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซาน และมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรที่อัตราส่วน 50:50</p>	57
รูปที่ 4.7	<p>กราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120</p>	60
รูปที่ 4.8	<p>เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเฟรต 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดโคโคซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ตัดแปรและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม.....</p>	61

รูปประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.9	เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรต่างๆกันที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม.....	62
รูปที่ 4.10	ภาพถ่ายของ (ก) เม็ดไคโตซาน และ (ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50 ภายหลังจากการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120.....	63
รูปที่ 4.11	เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็น 50:50 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง.....	64
รูปที่ 4.12	เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเท่ากับ 50:50 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกันคือ 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม.....	65
รูปที่ 4.13	สมการการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ด้วยเม็ดไคโตซานตาม (ก) สมการของแลงเมียร์และ(ข)สมการของฟรุนดลิช.....	66
รูปที่ 4.14	สมการการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (ก) ตามสมการของแลงเมียร์ และ (ข) สมการของฟรุนดลิช	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองความต้องการการใช้เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่มที่เพิ่มมากขึ้น อุตสาหกรรม การฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมกลางน้ำของระบบอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ทำหน้าที่เปลี่ยนวัสดุสิ่งทอในรูปวัตถุดิบที่เป็นเส้นด้ายหรือผ้าดิบให้เป็นวัสดุสำเร็จที่สามารถนำไปจำหน่ายแก่ผู้บริโภคได้โดยตรง หรือจำหน่ายเป็นวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมปลายน้ำอย่าง อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูปและเครื่องนุ่งห่มอื่นๆ กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการทางเคมีที่อาศัยการปรับเปลี่ยนสมบัติของเส้นใยโดยการใส่สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมซึ่งอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อุตสาหกรรมฟอกย้อมจึงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความต้องการใช้น้ำปริมาณมากและท้ายสุดของกระบวนการจะปลดปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมออกมาเป็นจำนวนมากซึ่งสีย้อมก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำเนื่องจากทำให้แหล่งน้ำมีสีอันไม่พึงปรารถนาและทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

การบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสีย้อมมีอยู่หลายวิธีทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพ เช่น 1. การบำบัดทางกายภาพ ได้แก่ การกรอง (filtration) การดูดซับ (adsorption) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) 2. การบำบัดทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (precipitation) กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) กระบวนการรีดักชัน (reduction) 3. การบำบัดทางชีวภาพ ได้แก่ การย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ทั้งแบบใช้ออกซิเจนและไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งการบำบัดทางกายภาพด้วยวิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและราคาไม่แพง ตัวดูดซับ (adsorbent) ที่นำมาใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลากหลายชนิดเช่น ผงถ่านกัมมันต์ ซิลิกาเจล ซีโอไลท์ ซาน อ้อย แกลบ ใยฝ้าย เปลือกถั่วลิสง ไคตินและไคโตซาน ซึ่งในบรรดาตัวดูดซับเหล่านี้ไคโตซานซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไคตินได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม เนื่องจากไคตินเป็นสารชีวพอลิเมอร์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส

ไคโตซาน คือ สารชีวพอลิเมอร์อะซิติกกลูโคซามีนซึ่งพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปูและแกนปลาหมึก โดยมีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรงยาวจากการจับตัวกันของกรดอะมิโน ไคโตซานสามารถเป็นตัวตกตะกอนที่ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโน ($-NH_2$) อยู่จำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้โดยไนโตรเจนของหมู่อะมิโนจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ดังนั้นไคโตซานจึงเป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติ นอกจากนี้ไคโตซานยังไม่

ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์จึงถูกนำมาใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและเป็นตัวดูดซับในอุตสาหกรรมอาหารและยา สารอินทรีย์ โลหะหนัก และสีย้อม ซึ่งที่ผ่านมาทีมงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ไคโตซานสำหรับเป็นตัวดูดซับสีย้อมหลายชนิด เช่น สีดีสเพิร์ส (disperse dyes) สีไดเรกต์ (direct dyes) สีรีแอกทีฟ (reactive dyes) สีแวต (vat dyes) สีซัลเฟอร์ (sulphur dyes) และสีแนฟทอล (naphthol dyes) แต่อย่างไรก็ตามตัวดูดซับที่ดีควรมีพื้นที่ผิวมากและมีความเป็นรูพรุนสูงเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น จึงได้มีแนวคิดที่จะนำเอาสารที่มีอนุภาคขนาดเล็ก กระจายตัวได้ดี และมีความสามารถในการดูดซับสูงซึ่งก็คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการตัดแปรให้อยู่ในรูปของนาโนเคลย์มาทำการผสมกับไคโตซานเพื่อเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ให้อยู่ในรูปของนาโนเคลย์โดยใช้สายโซ่ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างๆ กันและเกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียม แล้วจึงนำเอานาโนเคลย์ตัดแปรที่ได้มาผสมกับไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผสมกับไคโตซาน ความเป็นกรด-เบส ปริมาณของตัวดูดซับ เวลาในการดูดซับ และศึกษาไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของการตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน และที่ตัดแปรด้วยเกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียมและไคโตซาน
2. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรสำหรับเป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟของวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรต่างๆ กัน
4. เพื่อศึกษาไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน โดยการไฮโดรลิซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลไคโตซาน เช่น ความเข้มข้น และ เวลาในการไฮโดรลิซิส

2. ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียมและโคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กันเพื่อศึกษาการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์
3. เตรียมวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ และไอโซเทิร์มของกระบวนการดูดซับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ ดัดแปรที่มีความเป็นรูพรุนสูง และมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟได้ดี
2. สามารถใช้วัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมเพื่อลดปัญหาการเกิดภาวะมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แร่ดินเหนียว (clay mineral)

แร่ดินเหนียว (ทรรศพร,2548) เป็นสารประกอบจำพวก ไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminum silicate) ซึ่งมีสมบัติไม่ละลายในกรด (acid) มีลักษณะที่บีบอัดได้ดี ยืดหยุ่น (elastic) เมื่อเปียก ยืดน้ำได้ดี (water retentive) และมีความเชื่อมแน่น (coherent) เมื่อแห้ง แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบแผ่น (sheet silicate) จัดอยู่ในพวก phyllosilicate ประกอบด้วยชั้น (layer) ของแร่ 2 ชนิด คือ แผ่นซิลิกา (silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (alumina sheet)

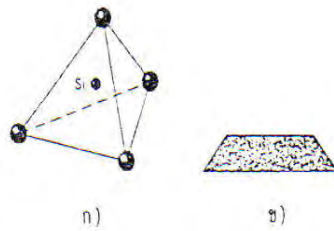
แผ่นซิลิกา (Silica sheet) เป็นรูปสี่เหลี่ยม (Tetrahedron) ประกอบด้วยอะตอมซิลิกอน 4 ด้าน มีอะตอมของธาตุออกซิเจน (oxygen atom) อยู่ที่จุดยอดระยะห่างเท่ากันและอะตอมของซิลิกา (silica atom) อยู่ภายในมีระยะห่างจากอะตอมออกซิเจนเท่ากัน หน่วยของแผ่นซิลิกาแสดงในรูปที่ 2.1 แผ่นซิลิกาแต่ละหน่วยจะรวมซ้อนกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (hexagonal unit) และเป็นโครงผลึกของแร่ (lattice of mineral)

ส่วนแผ่นอะลูมินา (alumina sheet) มีลักษณะเป็นแถวเรียงสองโดยมีอะตอมของอะลูมินาอยู่ตรงกลางรูปแปดเหลี่ยม (octahedron) ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนไฮดรอกซิล (-OH) ในแนวตั้งในแถวสลับกันตามลำดับ หน่วยของแผ่นอะลูมินาแสดงในรูปที่ 2.2

การศึกษาแร่ธาตุดินเหนียวในปัจจุบันจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ที่มีอัตราส่วนขยายสูง ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีดีทีเอ (Differential Thermal Analysis, DTA) และการวิเคราะห์ด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ซึ่งด้วยอุปกรณ์เครื่องมือที่ทันสมัยเหล่านี้ทำให้เราสามารถศึกษาแร่ธาตุดินเหนียวได้อย่างกว้างขวางมากขึ้น

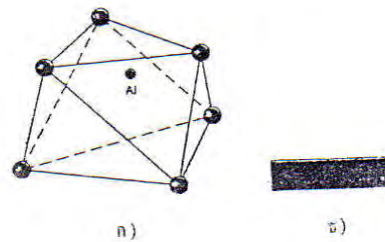
แร่ธาตุดินเหนียวสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ซึ่งจะแยกตามลักษณะโครงสร้างการจับตัว (lattice structure) ของแร่ธาตุประกอบด้วย

1. กลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)
2. กลุ่มกาอลินไนต์ (kaolinite)
3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite)



รูปที่ 2.1 ก) หน่วยแผ่นซิลิการูปสี่เหลี่ยม (silica tetrahedron)

ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า



รูปที่ 2.2 ก) หน่วยแผ่นอะลูมินาแปดเหลี่ยม (alumina octahedron)

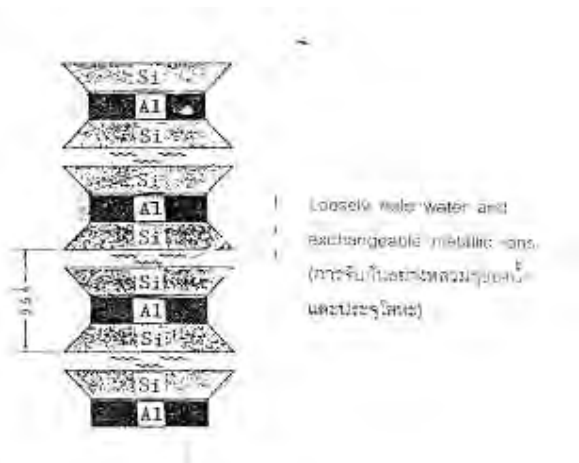
ข) สัญลักษณ์เทียบเท่า

2.1.1. กลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์มีสูตรเคมี คือ $(OH)_4Al_4Si_8Q_{20} \cdot nH_2O$ เป็นส่วนประกอบของแผ่นอะลูมินารูปแปดเหลี่ยมระหว่างแผ่นซิลิการูปสี่เหลี่ยม 2 แผ่นประกบกันแบบแซนวิช ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การจับตัวกันระหว่างแผ่นแร่ธาตุที่ค่อนข้างหลวมทำให้แร่ธาตุไม่อยู่ตัว (unstable) โดยเฉพาะเมื่อเปียกโดยมีลักษณะที่ดูดซับน้ำได้มาก หลังจากนั้นจะบวมตัว (swell) และขยายตัวได้มาก (expansion) ในทางตรงกันข้ามเมื่อแห้งจะหดตัวมากจะเห็นรอยแตกแยกอย่างชัดเจน

มอนต์มอริลโลไนต์ เกิดจากการผุกร่อนของแร่ธาตุเฟอร์โรแมกนีเซียม (Ferromagnesium mineral) หรือเรียกว่า เฟลเลอร์สเอิร์ท (Fellers earth) และจะมีแร่ธาตุย่อยอีก 2 ตัวคือ ไบเบเดลไลท์ (beidellite) และนอนไทรท์ (nontrite) จะมีส่วนผสมอยู่ในดินเป็นส่วนใหญ่ที่รู้จักกันแพร่หลาย คือดินเบนโตไนต์ (bentonite) ที่มีส่วนผสมหลักของมอนต์มอริลโลไนต์ มีคุณสมบัติพิเศษคือ จะบวมตัวได้หลายเท่าเมื่อนำมาผสมกับน้ำ มีค่าพิกัดเหลว (liquid limit) สูงกว่าร้อยละ 500 ทำให้มีสมบัติพิเศษที่นำมาใช้ในงานด้านวิศวกรรม เช่น ผสมน้ำนำไปอัด (grout) ในชั้นดินได้ฐานเขื่อนให้ที่บ้น้ำ นำมาผสมน้ำเป็นน้ำโคลนเจาะดิน (mud slurry) เจาะบ่อบาดาล เจาะบ่อน้ำมัน เจาะเสาเข็ม (bore pile) เป็นต้น

ซึ่งสมบัติพิเศษของน้ำโคลนเบนโตไนต์จะมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเล็กน้อยและจะเคลือบผนังบ่อดินหรือบ่อทรายไม่ให้น้ำซึมออกจากบ่อได้เร็ว สามารถหมุนเวียนน้ำโคลนกลับขึ้นมาใช้ใหม่ได้และน้ำโคลนจะทำให้เกิดแรงดันทดแทนดินที่ซูดออกไปจากหลุมดินผนังไม่ให้น้ำซึมเข้าในขณะที่ใช้เครื่องมือขุดเจาะลงไปสามารถทำงานได้ระดับน้ำโคลนได้ตามปกติ เทคนิคกรีดได้ด้วยวิธีเทได้น้ำ



รูปที่ 2.3 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite)

2.1.2. กลุ่มกาอลินไนท์ (kaolinite)

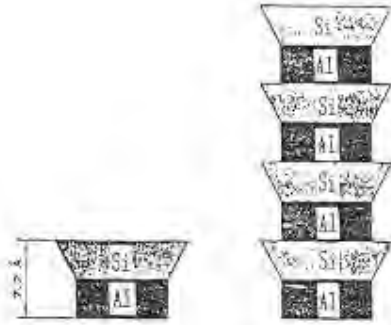
เกิดจากแผ่นซิลิกาสี่เหลี่ยมเดี่ยว (single tetrahedral silica) และแผ่นอะลูมินาแปดเหลี่ยมเดี่ยว (single octahedral alumina) ซึ่งจะเกิดซ้อนกันหลายชั้นไม่มีที่สิ้นสุดเกิดเป็นโครงผลึก (lattice) ของแร่ธาตุการจัดเรียงตัวของแร่ธาตุแสดงในรูปที่ 2.4 และมีสูตรเคมีเป็น $(\text{OH})_4\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{20} \cdot n\text{H}_2\text{O}$

กาอลินไนท์เกิดจากการผุกร่อนของ เฟลสปาร์ (felpar) สลับกับชั้นซิลิกอนอะลูมิเนียม และยังมีแร่ย่อยอีกคือ ดิกไคท์ (dickite) นาไคร์ (nacrite) และฮาลลอยไซต์ (halloysite) รูปหลอดแบน เกิดโดยมีดินเหนียวที่เกิดในที่ (Residual Clay) เป็นองค์ประกอบหลัก กาอลินไนท์มีภาวะคงตัวมาก มีสมบัติเป็นโครงสร้างเชื่อมแน่น (cohesive structure) สูงทำให้น้ำซึมเข้าไปได้ยากและไม่ขยายตัวเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ (saturate) ใช้เป็นวัสดุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา

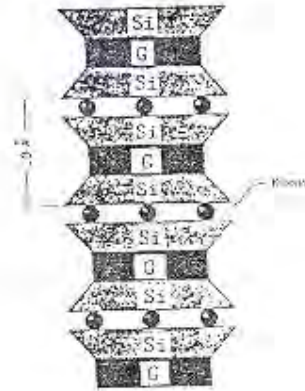
2.1.3. กลุ่มอิลไลต์ (Illite)

มีโครงสร้างคล้ายกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) แต่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกัน ซึ่งมีสูตรเป็น $(\text{OH})_4\text{K}_y(\text{Al}_4\text{Fe}_4\text{MG}_4)(\text{Si}_{8-y}\text{Al}_y)\text{O}_{20}$ ซึ่งค่าของ y จะแปรเปลี่ยนจาก 1-1.5 รูปลักษณะของอิลไลต์แสดงในรูปที่ 2.5 ส่วนประกอบพื้นฐานของอิลไลต์ประกอบด้วยแผ่นกิบไซต์รูปแปดเหลี่ยม

(gibbsite octahedron) ระหว่างแผ่นซิลิกาสี่เหลี่ยม (silica tetrahedron) 2 แผ่น มีสมบัติไม่เหมือนมอนต์มอริลโลไนต์ตรงที่ซึมซับน้ำได้ดีและมีขนาดเล็ก แต่อิลไลต์จะรวมกันเป็นขนาดใหญ่จึงสามารถซึมซับน้ำได้น้อยกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ สามารถขยายตัวได้น้อยกว่าโดยปกติอิลไลต์เกิดในลักษณะอนุภาคเป็นแผ่นแบน (flak) เล็กๆ ปนกับแร่ธาตุดินเหนียวและแร่ธาตุที่ไม่ใช่ดินเหนียว (Non Clay)



รูปที่ 2.4 แร่กาอลินไนท์ (kaolinite)



รูปที่ 2.5 แร่อิลไลต์ (Illite)

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต (ทรรศพร,2548)

คุณสมบัติต่างๆ	ชนิดของอนุภาคดินเหนียวพวกซิลิเกต		
	Monmorillonite	Kaolinite	Illite
ขนาดผลึก (micron)	0.01 – 1.0	0.1 – 5.0	0.1 – 2.0
รูปร่าง	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ	แผ่นบาง รูปหกเหลี่ยม	แผ่นบางมีขอบ ไม่สม่ำเสมอ
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	700 -800	5.0 – 20.0	
ความยืดหยุ่น ความเหนียว	สูง	ต่ำ	ปานกลาง
ความสามารถในการยึดและหดตัว	สูง	ต่ำ	ปานกลาง
ความสามารถในการแลกเปลี่ยน			
ประจุบวก (me/100 g)	80-100	3 – 15	15 – 40

2.2 ดินเบนโตไนต์

ดินเบนโตไนต์เป็นดินชนิดหนึ่งที่มีการนำมาใช้งานในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือใช้เป็นสารตัวเติมในการเพิ่มปริมาณเนื้อสาร ดินชนิดนี้ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลักและรองลงมาได้แก่ ซิลิกาอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ มอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ดินเบนโตไนต์มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ จากสมบัติของดินเบนโตไนต์นี้ทำให้เราสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นออร์กาโนเคลย์ (Organoclay) ที่ใช้เป็นสารตัวเติมลงไปในการประกอบพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามสมบัติของดินก็ยังคงแตกต่างกันไปในเรื่องของความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์

ดินเบนโตไนต์ที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มได้แก่

2.2.1 Natural Sodium Bentonite หรือ Sodium Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน Na^+

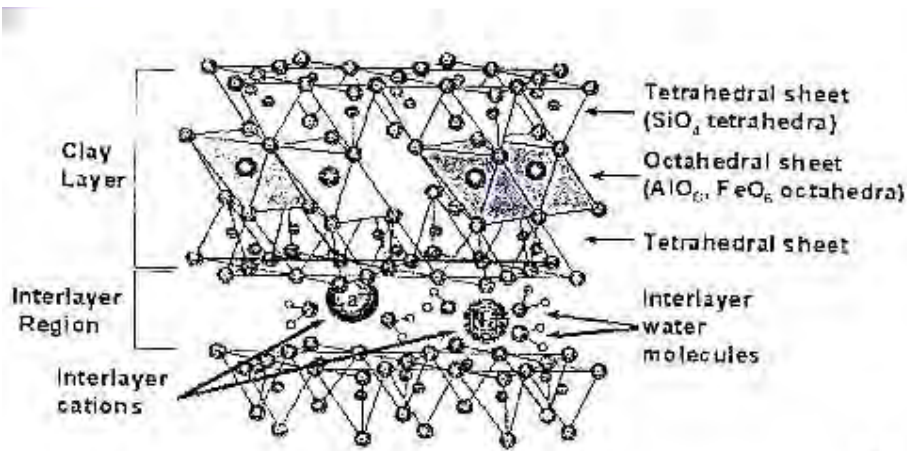
2.2.2 Natural Calcium Bentonite หรือ Calcium Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน Ca^{2+}

2.2.3 Sodium Activated Bentonite หรือ Sodium Activated Montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยนประจุจาก Ca^{2+} กลายเป็น Na^+

โซเดียมเบนโตไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถพองตัวได้มากถึง 15-20 เท่าจากปริมาตรเดิมมีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่นและกันการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลนและใช้ขุดยาหรือแนวของเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียมและแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโตไนต์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโตไนต์ ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมในการใช้เป็นสารฟอกสีหรือเป็นสารติเทอ์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้เป็นแอคติเวตเคลย์ (Activated Clay) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับไฮดาไฟโดยเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโตไนต์

2.3 แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

มอนต์มอริลโลไนต์ เป็นแร่ดินเหนียวที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน ซึ่งประกอบด้วยแผ่นอะลูมิเนียม โดยชั้นที่อยู่ตรงกลางจะเป็นชั้นของอะลูมินาที่ถูกประกบบนและล่างด้วยชั้นซิลิกาเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า 2:1 phyllosilicate แต่ละชั้นจะมีความบางมาก ซึ่งจะมีความหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตร และมีความยาวประมาณ 100 เท่า ทำให้มีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (aspect ratio) สูงเหมาะสมอย่างมากที่จะนำไปใช้เสริมแรงวัสดุพอลิเมอร์ ระหว่างชั้นจะมีช่องว่างขนาดเล็กเรียกว่า แกลเลอรี (gallery) ดังรูปที่ 2.6

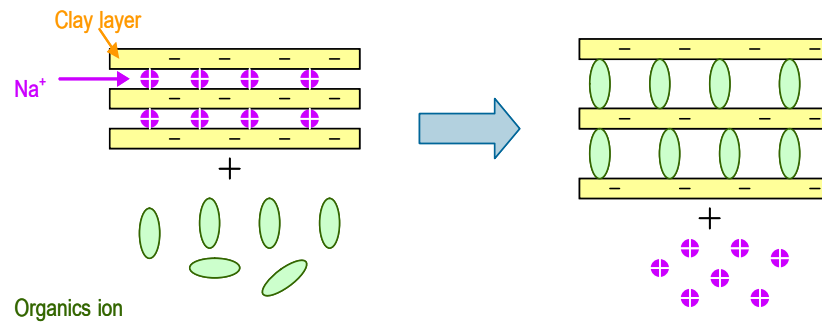


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

พื้นผิวของชั้นอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุลบแต่ชั้นเหล่านี้สามารถยึดเกาะกันได้ด้วยประจุบวก เช่น โซเดียมไอออน (Na^+) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งทำหน้าที่ยึดชั้นของดินที่มีประจุลบเอาไว้ด้วยกัน จึงทำให้ชั้นของดินยึดติดแน่น

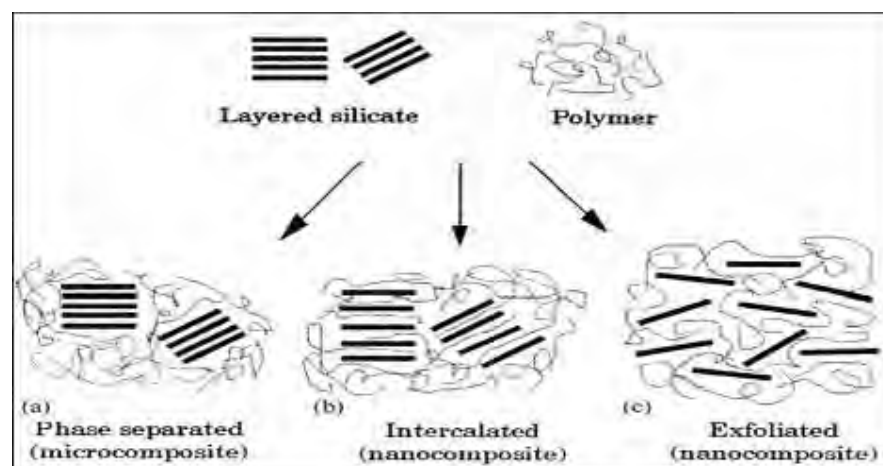
มอนต์มอริลโลไนต์ โดยธรรมชาติจะมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้ผสมและเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับพอลิเมอร์ได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ (modified montmorillonite) ก่อนที่จะนำไปผสมกับเข้ากับพอลิเมอร์ เพื่อที่จะทำให้ชั้นแผ่นโครงสร้างของเคลย์เกิดการแยกชั้นสามารถเข้าร่วมเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ได้ดียิ่งขึ้น

วิธีการที่ง่ายที่สุดในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ คือ การทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) โดยสารอินทรีย์ที่มีประจุบวก (organic cation) เช่น เกลือควอเทอร์นารีของอัลคิลแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) หรือเกลือฟอสโฟเนียม (phosphonium salt) ซึ่งสามารถเข้าแทนที่ประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นผลึกทำให้ได้มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เรียกว่า ออร์กาโนฟิลิกเคลย์ (organophilic clay) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ออร์กาโนเคลย์ (organoclay) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือมีความชอบสารอินทรีย์อยู่ด้านในระหว่างชั้นซิลิเกต และเกิดการขยายตัวของระยะห่างระหว่างชั้นผลึก ดังรูปที่ 2.7 ทำให้ชั้นผลึกแยกตัวห่างกันและมีการเกาะกันอย่างหลวมๆ กลายเป็นอนุภาคขนาดนาโนเมตรของซิลิเกต เพราะชั้นซิลิเกตแต่ละแผ่นมีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตรและมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความหนา (aspect ratio) สูงมากในสองมิติ หลักการนี้จึงเป็นกลไกสำคัญในการเตรียมอนุภาคขนาดนาโนเมตรจากธรรมชาติที่เรียกว่านาโนเคลย์ ซึ่งมีประโยชน์มากในงานบำบัดน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โลหะหนัก และสีย้อม



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

เมื่อมีการนำเอาเคลย์มาเตรียมเป็นคอมพอสิตกับพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะทำให้ได้คอมพอสิตของเคลย์ 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ 1. คอมพอสิตทั่วไป (microcomposite) ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์จะไม่แทรกสอดเข้าไประหว่างชั้นของซิลิเกต เฟสของชั้นซิลิเกตและเฟสของพอลิเมอร์จะมีการแยกกันอย่างชัดเจน 2. นาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอด (intercalated nanocomposite) ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแทรกสอดเข้าไปในระหว่างชั้นของซิลิเกต ทำให้ช่องว่างระหว่างชั้นของเคลย์ขยายออก แต่ยังไม่แยกออกจากกันชัดเจนชั้นของเคลย์ยังคงรักษาความเป็นระเบียบได้ดี 3. นาโนคอมพอสิตแบบแยกออกจากกัน (exfoliated nanocomposite) ซึ่งชั้นของซิลิเกตจะมีการแยกชั้นกันอย่างชัดเจนหรือเป็นอิสระต่อกันทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถแทรกสอดเข้าไประหว่างชั้นของเคลย์ได้ แต่อย่างไรก็ตามเป็นการยากที่จะทำให้เคลย์เกิดการแยกออกจากกันอย่างสมบูรณ์ในเนื้อพอลิเมอร์เนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตที่แข็งแรงระหว่างชั้นซิลิเกตและประจุบวกระหว่างชั้นเกลเลอรี

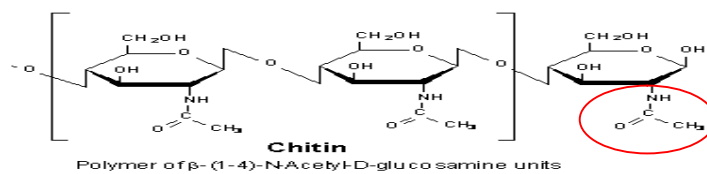


รูปที่ 2.8 การเกิดคอมพอสิตของเคลย์

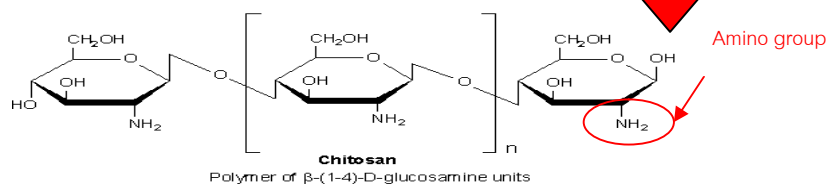
2.4 ไคติน-ไคโตซาน (chitin-chitosan)

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของไคโตซาน (ปิยรัตน์,2550)

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า poly-(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่อะซิทิล (deacetylation) ออกจากไคตินให้เหลือเป็นหมู่อะมิโน (-NH₂) อิสระที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งสูตรโครงสร้างทางเคมีของไคตินและไคโตซานแสดงไว้ในรูปที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของไคติน



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน

โดยทั่วไปถ้าหมู่อะซิทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 จะถูกเรียกว่าไคโตซานและถ้าหมู่อะซิทิลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 จะถูกเรียกว่า Fully deacetylated chitosan (Muzzarelli,1977) ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และไนไคโตซานร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่อะซิทิลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปริมาณไนโตรเจนจึงไม่แน่นอนและอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89 -8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซานจะเห็นว่าไคโตซานสามารถเกิดมีประจุบวกบนหมู่อะมิโนและอาจพิจารณาว่าเป็น พอลิเมอร์ที่มีประจุบวก (cationic polymer) สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ของไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับสารจำพวกสารอินทรีย์ รวมถึงพอลิคลอไรด์เตด ไบฟีไนต์ (polychlorinated biphenyl) โปรตีน และกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) รวมถึงไอออนของโลหะ เนื่องจากคุณสมบัติการดูดซับที่ดีไคโตซานจึงทำหน้าที่เป็นสารช่วยตกตะกอน (coagulant) ได้ดี นอกจากนี้ยังมีสมบัติการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด

เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก กรดแอสติก เป็นต้นและละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้มีการนำไคโตซานมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางมากกว่าไคติน

2.4.2 สมบัติของไคติน-ไคโตซาน

2.4.2.1 การละลาย (solubility)

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะกึ่งผลึก (semicrystalline) เนื่องจากมีโครงสร้างที่จับกันโดยพันธะไฮโดรเจน ด้วยสมบัติทางกายภาพนี้ทำให้ไคตินยากต่อการละลายในกรดเจือจาง หรือด่างเจือจาง และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ (organic solvent) ภายใต้ภาวะปกติ ความยากในการละลายของไคตินในตัวทำละลายต่างๆ มีผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันหนาแน่น มีพันธะเกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ต่างกัน หมู่ไฮดรอกซิล และหมู่แอมิโน แต่อย่างไรก็ตามไคตินสามารถละลายได้ใน กรดฟอร์มิก มีเทน กรดซัลโฟนิก และส่วนผสมของ 1,2 คลอโรเอเทน (1,2-dichloroethane) และไตรคลอโรอะซิติก (trichloroacetic) ในอัตราส่วน 35:36 แต่พวกตัวทำละลายเหล่านี้ให้สารพิษ หรือทำให้สมบัติของไคตินเปลี่ยนแปลงไป การกำจัดหมู่อะซิทิลใน ภาวะที่เป็นด่างเป็นการเปลี่ยนจากไคตินเป็นไคโตซาน จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้โครงสร้างของไคโตซานมีหมู่เอมิโนอิสระและมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น แต่โดยปกติไม่ละลายในน้ำที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และในการเตรียมเป็นสารละลายสามารถเตรียมในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง ได้แก่ กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติกได้ ซึ่งมีงานวิจัยว่าตัวทำละลายที่ดีของไคโตซานคือสารละลายกรดฟอร์มิกความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 0.2-100 โดยปริมาตร (Knorr,1991) นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถละลายได้ในสารละลายกรดไนตริกเจือจางและละลายได้เล็กน้อยในสารละลายกรดฟอสฟอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร เนื่องจากสารละลายกรดเหล่านี้ทำให้หมู่เอมิโนอิสระเปลี่ยนอยู่ในรูปหมู่เอมีนที่มีประจุบวก (cationic amine group $,-NH_3^+$) แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายที่เป็นกลางหรือด่าง แต่ถ้านำไคโตซานมาบดแห้งกับกรดอินทรีย์จะได้ไคโตซานที่สามารถละลายน้ำได้ (water soluble chitosan) (Kupongsak,1995)

2.4.2.2 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แล้วแต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายพอลิเมอร์ให้ผลของความหนืดที่แตกต่างกัน

2.4.2.3 สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte properties)

โคโตซานเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ของแอนไฮโดรกลูโคซามีน (anhydroglucosamine) และเป็นสายพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีภาวะเป็นกรดมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 โคโตซานในสารละลายมีประจุเป็นบวก (positive charge) เนื่องจากโคโตซานเป็นพอลิเมอร์จึงมีความหนาแน่นของประจุบวกสูง ซึ่งในอุตสาหกรรมปัจจุบันสารจำพวกไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) โมเลกุลสูงหรือพวพอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่จะมีประจุเป็นลบ (polyanionic) แต่โคโตซานเป็นหนึ่งในพวพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก (cationic polyelectrolyte) จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้งานได้มากกว่า ประจุบวกของโคโตซานจึงจับตัวอย่างแน่นกับผิวของจุลินทรีย์ทำให้เกิดความเป็นกลาง ดังนั้นการจับกันของโคโตซานกับเซลล์จึงมีชีวิตจึงเป็นสมบัติที่สำคัญมากในการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์ (Hon, 1996)

2.4.2.4 น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)

ความยาวของสายโซ่โมเลกุลมีความสำคัญในการพิจารณาสมบัติของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ทั่วไปมีขนาดใหญ่แต่ไม่จำเป็นต้องมีความยาวเท่ากัน การนำโคโตซานไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มีความสัมพันธ์กับน้ำหนักโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่อะซิetyl ซึ่งส่งผลต่อกลไกการทำงาน และสมบัติทางเคมี เมื่อใช้โคโตซานในการผลิตฟิล์ม การผลิตเมมเบรน และเส้นใยต่างๆ น้ำหนักโมเลกุลสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อมซึ่งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโคติน คือ $1.03 \times 10^6 - 2.5 \times 10^6$ ดาลตันและน้ำหนักโมเลกุลของคาร์บอกซิเมทิลโคติน (carboxymethyl chitin) ประมาณ 1.33×10^6 ดาลตัน (Muzzarelli, 1977) โดยทั่วไปน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของโคโตซานที่มีร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิetylสูงที่สุดที่ได้จากกุ้งมีค่าประมาณ 440,000-500,000 กรัม/โมล และของปูมีค่าประมาณ 500,000-850,000 กรัม/โมล (เขาวภา, 2534)

2.4.2.5 ระดับการกำจัดหมู่อะซิetyl (degree of deacetylation)

การใช้ประโยชน์จากโคโตซานมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ ระดับการกำจัดหมู่อะซิetylซึ่งจะเป็นตัวบอกถึงคุณภาพของโคโตซาน ดังนั้นจึงมีการวัดระดับการกำจัดหมู่อะซิetylของโคโตซานเพื่อพิจารณาถึงการใช้งาน ซึ่งการวิเคราะห์มีหลายวิธี ได้แก่ อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Infrared spectroscopy ; IR) เซอคิวลาร์ไดโครลิซึม (Circular dichroism ; CD) การวิเคราะห์ธาตุ (Elemental analysis ; EA) การไตเตรต (Titration) และอัลตราไวโอเล็ตสเปกโตรสโกปี (First derivation ultraviolet spectroscopy) การศึกษาแบบ IR จะทำการวิเคราะห์ได้ยากและผลที่ได้มีแนวโน้มที่คลาดเคลื่อน การศึกษาแบบ CD มีข้อจำกัดในการละลายของผลิตภัณฑ์ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์สารพวกที่ไม่ละลายและพวก Highly acetylated polymeric compound ได้ วิธีการไตเตรตมีความยุ่งยากและใช้เวลานาน และผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค EA ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยเฉพาะถ้ามีการปนเปื้อนของ

ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง แต่วิธีการนี้ใช้ในการหาโคโตซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ร่วมของกลูโคซามีน ส่วนการตรวจสอบพวกลุ่มอะมิโนอิสระโดยการใส่ฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence) มีการตอบสนองเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคซามีนแบบไม่เป็นเส้นตรงและการวัดตัวอย่างอาจมีการ เจือจางขึ้นอยู่กับค่าที่ต้องการวัด (Miyoshi และคณะ, 1992)

2.4.3 การศึกษาการเสื่อมสลาย (degradation) ของโคติน-โคโตซาน (รัตน, 2544)

เป็นที่น่าสนใจว่าแม้ว่าการศึกษาโคติน-โคโตซาน ทั้งในรูปแบบการปรับโครงสร้างทางกายภาพ เช่น การเตรียมเป็นเจล หรือเมมเบรน การบดเป็นผง การเตรียมบีคส์ หรือ การปรับโครงสร้างทางเคมี เช่นการสังเคราะห์อนุพันธ์ต่างๆ จะได้รับความสนใจมากกว่า 3 ทศวรรษแล้วก็ตามแต่การประยุกต์ใช้โคติน-โคโตซานในระดับผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรมยังมีน้อย และยังคงได้รับความสนใจที่จะพัฒนาให้มีการนำมาใช้งานมากขึ้น

ประเด็นหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเกี่ยวกับโคติน-โคโตซาน คือ การเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง โดยทั่วไปจะอยู่ในระดับ 7 แสนดาลตัน หรือ ในระดับหนึ่งล้านดาลตัน ซึ่งนั่นก็หมายถึงข้อจำกัดในการนำโคติน-โคโตซานดังกล่าวมาพัฒนา โดยเฉพาะเมื่อคำนึงถึงการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีด้วยกระบวนการปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ในระยะหลังมีรายงานถึงการย่อยขนาดโมเลกุลของโคติน-โคโตซานลงในระดับโมเลกุลต่ำๆ และถึงระดับออลิโกเมอร์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในทางการแพทย์ เกษตรกรรม และอื่นๆ มากมาย การสลายของโคติน-โคโตซานสามารถทำได้โดยกระบวนการดังต่อไปนี้

2.4.3.1. การเสื่อมสลายโดยวิธีปฏิกิริยาเคมี (Chemical degradation)

การสลายสภาพโดยวิธีการทางเคมีเป็นการสลายสภาพที่เกิดขึ้นง่าย เช่น โดยกรด (acid hydrolysis) เป็นการสลายสภาพสายโซ่โมเลกุลของโคโตซานแบบสุ่ม (random) ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือออลิโกเมอร์ขนาดต่างๆ และมอนอเมอร์ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ เช่น ชนิดของกรด เวลา อุณหภูมิ ชนิดของพันธะของสายโซ่โมเลกุล ชนิดของพอลิเมอร์ โดยโคตินจะสามารถต้านทานต่อการเสื่อมสลายโดยกรดได้ดีกว่าโคโตซาน ซึ่งกรดที่นำมาใช้ในการย่อยสลายโคโตซาน ได้แก่ กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก และกรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น การเสื่อมสลายโดยด่าง (alkaline degradation) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในกระบวนการนำโปรตีนออกจากโครงสร้างแข็ง (deproteinization) และการเปลี่ยนหมู่อะเซทาไมด์เป็นหมู่อะมิโน (deacetylation) การเสื่อมสลายของสายโซ่โมเลกุลของพอลิซัคคาไรด์ในด่างจะเริ่มจากปลายสุดของของสายโซ่โมเลกุลซึ่งอาจเรียกอีกอย่างว่า Peeling reaction

2.4.3.2. การเสื่อมสลายโดยการสั่นของคลื่นเสียง (Sonication degradation)

แม้ว่ากลไกของการตัดสายโซ่โมเลกุลยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ได้มีรายงานจากการวิจัยว่า มวลโมเลกุลของไคโตซานจะลดลงในขณะที่ระดับการกำจัดหมู่อะซิทิลไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อไคโตซานถูกกระตุ้นด้วยพลังงานการสั่นโดยคลื่นเสียง (Wang, 1990)

2.4.3.3. การเสื่อมสลายโดยเอนไซม์ (Enzymatic degradation)

การเสื่อมสลายโดยเอนไซม์มีข้อดีกว่าการใช้สารเคมี คือ มีความจำเพาะเจาะจงในตำแหน่งการสลายสภาพและจะได้โอลิโกเมอร์ที่เป็นระเบียบ ประกอบกับภาวะที่ใช้ก็ไม่รุนแรง แต่มีขั้นตอนการเตรียมที่ต้องเรียนรู้ซึ่งเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยสลายไคติน-ไคโตซาน ได้แก่ เอนไซม์ไคตินเนส (chitinase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสายโซ่ที่ตำแหน่งโมเลกุลของไคตินแบบสุ่ม (random) ตรงตำแหน่งพันธะ 1,4-linkage ได้แก่ N-acetyl-chitooligosaccharide (Aiba, 1993) เมื่อสายโซ่มีความเป็นไคตินมาก การย่อยสลายก็เด่นชัดและได้โอลิโกเมอร์ของไคโตซานที่เอนไซม์ไคตินเนสวางเว้นในการย่อยไว้ เอนไซม์ไคโตซานเนส (chitosanase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายสายโซ่ที่ตำแหน่งโมเลกุลของไคโตซานแบบสุ่มตรงตำแหน่งพันธะ 1,4-linkage ได้เป็น chitooligosaccharide นั่นคือย่อยสลายหน่วยที่เป็นไคโตซาน

2.4.3.4. การเสื่อมสลายโดยความร้อน (Thermal degradation)

ไคติน-ไคโตซานสามารถเสื่อมสลายได้ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากไคติน-ไคโตซานโดยทั่วไปจะดูดซับน้ำไว้ประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางความร้อนเราจะพบพีกแสดงการสูญเสียโมเลกุลของน้ำเกิดขึ้นเป็นช่วงกว้างตั้งแต่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส สำหรับการสลายตัวทางความร้อนจะทำให้เสียโครงสร้างของไคติน-ไคโตซานไปเลยจึงไม่เป็นประโยชน์ในการใช้เตรียมโอลิโกไคติน-ไคโตซานแต่อย่างไร โดยปกติแล้วไคตินและไคโตซานเสื่อมสลายที่อุณหภูมิประมาณ 275-300 และ 280-330 องศาเซลเซียสตามลำดับ

2.4.3.5. การเสื่อมสลายโดยวิธีการฉายรังสี (Radiation degradation)

การเสื่อมสลายโดยวิธีการฉายรังสีแม้ว่าจะมีความเฉพาะในด้านเครื่องมือและต้องเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านรังสีที่จะทำการเตรียมสารได้ แต่เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีที่เราสามารถใช้พลังงานปรมาณูในรูปแบบสันติวิธีที่เป็นประโยชน์ การเตรียมสารตัวอย่างทำได้ง่าย และหากต้องการผลิตโอลิโกเมอร์เป็นปริมาณมากๆ ในระยะเวลาอันสั้นก็สามารถทำได้ จากการวิจัยของกลุ่ม chirachanchai พบว่าการฉายรังสีสามารถลดปริมาณมวลโมเลกุล 75% ที่ปริมาณรังสี 25 กิโลเกรย์ โดยไม่ทำให้โครงสร้างของหน่วยไคตินและไคโตซานเปลี่ยนแปลง จึงถือเป็นแนวทางใหม่ที่น่าสนใจ

2.4.4 การประยุกต์ใช้งานของโคติน-โคโตซาน (รัตนา,2544)

เนื่องจากโคติน-โคโตซานมีความหลากหลายและโดดเด่นในทางเคมีโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีประจุลบ และสามารถเกิดการดูดซับไอออนของโลหะหนักด้วยกรรมวิธีเคมีเชิงซ้อน ทำให้มีการนำเอาโคติน -โคโตซานมาใช้ในด้านการจับและดูดซับเพื่อแยกสิ่งปฏิภูลต่างๆ ที่ละลายในน้ำเสีย โดยสามารถแยกตะกอนแล้วนำกลับมาใช้ประโยชน์ในทางอื่นๆ อีกได้ อาทิเช่น อาหารสัตว์ และปุ๋ยชีวภาพ เป็นต้น การประยุกต์ใช้สารโคติน-โคโตซานในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่างๆ อาจแบ่งได้ดังนี้

2.4.4.1 ด้านการเกษตร

ปัจจุบันนี้โคติน-โคโตซานมีบทบาทอย่างมากในด้านการนำไปใช้ทางการเกษตร เนื่องจากสมบัติที่เด่นของมันในการเป็นตัวกระตุ้นให้พืชสร้างสารป้องกัน ตัวมันเองขึ้นมาได้ (elicitor) และยังมีผลในการต้านทานเชื้อราบางชนิดที่ทำให้เกิดรากโคนเน่าในพืชได้ จึงมีการนำมาฉีดพ่นพืชผัก พืชดอก พืชผลและนาข้าว ซึ่งได้ผลในทางบวกทั้งสิ้น นอกจากนี้ใช้กับพืชแล้วเกษตรกรยังนำไปใช้ผสมในอาหารสัตว์ช่วยให้สัตว์เจริญเติบโตแข็งแรงมีสุขภาพดี มีภูมิต้านทานโรคที่มีสาเหตุจากจุลินทรีย์หลายชนิดได้ และยังนำไปใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เช่นการเลี้ยงกุ้ง ช่วยให้กุ้งลอกคราบได้ดีและมีสุขภาพแข็งแรง นอกจากนี้ยังใช้ในการปรับสภาพน้ำและสภาพดินในการเลี้ยงกุ้ง ปู ปลา ทำให้เริ่มมีการใช้โคติน-โคโตซานในการเกษตรและเริ่มเป็นที่รู้จักในกลุ่มเกษตรกร ถ้าหากเกษตรกรได้มีความเข้าใจและศึกษา มีข้อมูลที่ถูกต้องในการใช้โคติน-โคโตซานอย่างเหมาะสมจะเป็นการสร้างทางเลือกใหม่ให้เกษตรกรลดการใช้สารเคมีทางการเกษตรลงไปได้ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการลดมลภาวะและรักษาสิ่งแวดล้อม ลดการนำเข้าสารเคมีจากต่างประเทศที่นำไปสู่การลดต้นทุนการผลิตทางการเกษตรลงได้

2.4.4.2 ด้านอาหาร

ในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนโคติน-โคโตซาน เป็นสารที่ใช้เติมในอาหารและยาโดยเฉพาะในประเทศญี่ปุ่น ได้มีผลิตภัณฑ์อาหารที่ผสมโคติน-โคโตซาน เป็นจำนวนมากออกวางขายในท้องตลาดเป็นเวลานานแล้ว จากคุณสมบัติที่ต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด จึงมีการใช้โคติน-โคโตซานเป็นสารกันบูด สารปรุงแต่งเพื่อความคงรูปและคงสีในอาหารต่างๆ และสารเคลือบอาหารและผักผลไม้

2.4.4.3 ด้านการแพทย์และเภสัชกรรม

ปัจจุบันมีรายงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์สนับสนุน ถึงสมบัติในการลดสารไขมันบางชนิด เช่น คอเลสเตอรอล ซึ่งทำให้โคติน-โคโตซาน มีบทบาทในอาหารเสริมที่ใช้ลดไขมันและลดน้ำหนัก การใช้

เป็นผิวหนังเทียม การรักษาแผลไฟไหม้น้ำร้อนลวก การใช้ปลดปล่อยยา การรักษาเหงือกและฟัน การใช้รักษาและเสริมสร้างสุขภาพของกระดูกอ่อน การใช้เป็นสารหล่อลื่นในเยื่อเมือกตลอดจนเลนส์ตา การช่วยให้เลือดแข็งตัวเร็วขึ้น เป็นต้น

2.4.4.4 ด้านเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์บำรุงผิว

โคติน-โคโตซานมีสมบัติโดดเด่นในการกักน้ำและเป็นตาข่ายคลุมผิวหนัง ตลอดจนถึงด้านเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆได้ จึงใช้เป็นตัวสารเติมแต่ง และสารพื้นฐานของเครื่องสำอางค์หลายประเภท อาทิ เช่น ผสมแป้งทาหน้า ทั้งแบบแข็งและแป้งฝุ่น เพื่อความชุ่มชื้นและป้องกันเชื้อโรค เป็นส่วนประกอบของ แชมพู ครีม และสบู่ทุกรูปแบบผสมในโลชั่นสำหรับบำรุงผิวและเส้นผม

2.4.4.5 ด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ

ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพทางเศรษฐกิจของประเทศสูงมากในยุคปัจจุบัน การใช้โคติน-โคโตซานผสมในเส้นใยเพื่อพัฒนาเสื้อผ้าและสิ่งทอที่สามารถป้องกันและต้านทานเชื้อโรคได้ซึ่งถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่ในอนาคตอันใกล้นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสหรัฐอเมริกาได้วางนโยบายระดับชาติในด้านสิ่งทอที่ป้องกันการติดเชื้อได้เป็นเวลานานมาแล้ว และได้ดำเนินการมาตลอดเพื่อการเป็นผู้นำในเทคโนโลยีใหม่นี้ นอกจากนี้โคติน-โคโตซานยังมีสมบัติโดดเด่นในการเสริมสร้างความเหนียว และความแข็งแรงให้แก่เส้นใยและเยื่อกระดาษซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มคุณภาพให้แก่กระดาษ และพัฒนาผลิตภัณฑ์ชนิดพิเศษเพื่อใช้ในการพิมพ์ด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ทันสมัย

2.4.4.6 ด้านเทคโนโลยีทางชีวภาพ

จากสมบัติการเป็นเส้นใยและพลาสติกที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติของโคติน -โคโตซาน ทำให้โคติน-โคโตซานถูกนำมาใช้เพื่อทำเป็นสารหล่อหุ้มเอนไซม์ และเซลล์ต่างๆได้ด้วยเทคนิคอิมโมบิลไลเซชัน การใช้เป็นตัวแยกสารโดยวิธีโครมาโตกราฟี การใช้ทำชีวไฟฟ้าทางชีวภาพ เพื่อการวิเคราะห์และตรวจสอบสารต่างๆ นอกจากนี้จากลักษณะที่โดดเด่นเฉพาะตัวของโคติน-โคโตซานซึ่งสามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ ทำให้โคติน-โคโตซานถูกนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นเยื่อบาง เพื่อใช้ในการกรองแยกด้วยเทคนิคต่างๆ อาทิเช่น ไดอะไลซิส อัลตราฟิลเตรชัน นาโนฟิลเตรชัน และรีเวอร์สออสโมซิส เป็นต้น การใช้โคติน-โคโตซานยอมปราศจากสารตกค้างและสามารถย่อยสลายโดยธรรมชาติไปเป็นปุ๋ยให้กับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังปลดปล่อยพิษและสารที่แยกได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้ในด้านชีวภาพ การขึ้นรูปเป็นเม็ดโคติน-โคโตซานสามารถนำมาแยกสารชีวภาพ เช่น โปรตีน ซึ่งถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทั้งสารที่ถูกแยก และสารที่ใช้แยกจึงเป็นกระบวนการที่เกิดการหมุนเวียนทางชีวภาพ ซึ่งนำไปสู่การพิทักษ์รักษาคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาแบบยั่งยืน

2.4.4.7 ด้านการบำบัดน้ำเสียและทำน้ำบริสุทธิ์

ปัจจุบันในหลายประเทศที่มีกฎระเบียบและข้อจำกัดในการใช้สารเคมีเพื่อการบำบัดน้ำเสีย ได้เปลี่ยนมาใช้สารโคโคซานในการรวบรวมตะกอนและตกตะกอนแล้วตะกอนที่ได้ นั้นนำไปพัฒนาใช้เป็นอาหารสัตว์และปุ๋ยชีวภาพ โดยพิจารณาจากแหล่งของน้ำเสียเหล่านั้น อาทิเช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสัตว์น้ำซึ่งมีโปรตีนสูง สามารถใช้โคโคซานตกตะกอนได้เป็นอย่างดี จากนั้นตะกอนที่ได้ นำไปใช้ต่ออย่างมีประโยชน์ นอกจากนี้ในการทำน้ำสะอาดและบริสุทธิ์ เช่น การทำน้ำดื่ม น้ำที่ใช้ในการล้างผิวโลหะที่ต้องการความบริสุทธิ์สูง (super pure water) สามารถใช้โคโคซาน จับพวกธาตุตกค้าง ที่ละลายปนเปื้อนในปริมาณที่น้อย

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มจากการใช้โคโคซาน-โคโคซาน ออกมาสู่ตลาดมากมาย โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาทิเช่น สหรัฐอเมริกา ฝรั่งเศส ญี่ปุ่น เกาหลี ไต้หวัน เป็นต้น ทั้งนี้เพราะโคโคซานช่วยในการพิทักษ์สิ่งแวดล้อมไม่ก่อให้เกิดอันตราย ปราศจากสารพิษ และยังเป็นสิ่งที่ธรรมชาติได้สร้างสรร คีให้มีการหมุนเวียนในระบบนิเวศน์ของสิ่งแวดล้อม จึงเป็นผลิตภัณฑ์ธรรมชาติที่มีศักยภาพในการสร้างเทคโนโลยีใหม่ในศตวรรษที่จะมาถึงนี้อย่างแน่นอน

2.5 สีย้อมและการจำแนกสีย้อม

2.5.1 การเกิดสีของสีย้อม (มนตรี,2543)

สีที่ปรากฏออกมาทำให้สายตาคนปกติมองเห็นได้นั้นเกิดมาจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มอะตอมภายในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มของอะตอมเหล่านี้เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophores) ซึ่งได้แก่

- กลุ่มไนโตร (Nitro group) : - NO₂
- กลุ่มเอโซ (Azo group) : -N=N-
- กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group) : C=O
- อนุพันธ์แอมโมเนียมโมเนียม (Alkyl ammonium derivatives) : R-NH₃⁺

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบแอโรแมติก (Aromatic compound) โดยดูดกลืนแสงสีขาวไว้บางแถบแสงและปลดปล่อยออกมาบางแสงทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีที่แตกต่างกันออกไป สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังมีกลุ่มอะตอมอีกกลุ่มหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอมออกโซโครม (Auxochromes) ได้แก่ -OH, -NH₂, -NHR, -NR₂, -SO₃ และ -COOH

เพื่อให้สีย้อมยึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลสีที่ขาดกลุ่มอะตอมออกซิโครมจะขาดสมบัติในการยึดกับเส้นใยโมเลกุล กลุ่มอะตอมโครโมฟอร์ ออกซิโครม และโครโมเจนนี้เป็นส่วนสำคัญในการจำแนกกลุ่มของสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

2.5.2 การจำแนกสีย้อม

การจำแนกสีย้อมอาจพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่ละลายน้ำเรียกว่า สีย้อม (Dye) และชนิดที่ไม่ละลายน้ำเรียกว่า สารสี (pigment) เมื่อนำไปใช้จำเป็นต้องหาตัวทำละลายช่วยทำให้สีละลายน้ำซึ่งเมื่อละลายน้ำแล้วมีสมบัติเหมือนกับสีย้อมสามารถดูดซึมเข้าไปในเส้นใยได้ ทำให้การจำแนกกลุ่มสีแบบนี้ค่อนข้างสับสน

การจำแนกสีย้อมอีกวิธีหนึ่งคือ การจำแนกสีตามส่วนประกอบทางเคมีซึ่งมีความยุ่งยากมากสำหรับผู้ที่ไม่มีความรู้ทางด้านเคมี นอกจากนี้วิธีการจำแนกสีประเภทนี้ไม่เป็นที่นิยมมากนักเนื่องจาก สีย้อมบางชนิดมีโครงสร้างที่ยังไม่เป็นที่ชัดเจนทำให้การจำแนกสีวิธีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ แต่อย่างไรก็ตามการจำแนกสีโดยใช้สูตรโครงสร้างทางเคมีนี้เป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับผู้ที่มีความรู้ทางด้านเคมี และสำหรับสีย้อมที่ทราบสูตรโครงสร้างทางเคมีอย่างแน่นอน

การจำแนกสีสามารถแบ่งได้หลายประเภทแล้วแต่จะพิจารณา เช่น จำแนกชนิดสีตามวิธีใช้ แยกตามชนิดของสีโดยวิธีการย้อมดังแสดงในตารางที่ 2.2 , 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีตามวิธีใช้ และแสดงคุณลักษณะของสีแต่ละชนิดโดยสรุป (วีระศักดิ์,2544)

ประเภทสี	คำอธิบายทั่วไป	การใช้งาน	ความคงทน
สีเบสิก (basic or cationic)	สีสังเคราะห์ชนิดแรก(พ.ศ.2539) พื้นฐานเป็นสารอินทรีย์ละลายในกรดอินทรีย์ ละลายน้ำได้ ปัจจุบันมีใช้น้อยมาก มีหลายสีสิ้นและมีสีค่อนข้างสว่างสดใส	หากใช้ย้อมผ้าฝ้ายต้องมี mordant (โลหะออกไซด์) ช่วยสามารถใช้กับขนสัตว์ ไหม ไนลอน พอลิเอสเตอร์ อะคริลิก ใช้พิมพ์สีแบบไดเรกชันบนแอซีเทตและพิมพ์แบบดิสซาร์จบนฝ้าย	ไม่ทนต่อแสง ยกเว้นกับเส้นใยอะคริลิก
สีแอสิก (acid or anionic)	พัฒนามาจากสีเบสิกครอบคลุมได้ครบทุกชนิด สีกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก ดูดความชื้นได้ง่าย	มีใช้กับขนสัตว์ และไหม รวมทั้งแอซีเทต ไนลอน อะคริลิก มอดอะคริลิก สเปนเด็กซ์ เรยอนบางชนิด พอลิเอสเตอร์ และพอลิโพรพิลีน พิมพ์บนขนสัตว์ ไหม แอซีเทต	โดยทั่วไปทนต่อแสงได้ดี แต่ทนต่อการซักไม่ค่อยดี
สีอะโซอิก (azoic)	หรือที่รู้จักกันว่าเป็นอะโซอิกที่ไม่ละลายน้ำ สีที่ใช้มากคือ เหลืองแดง และดำ ให้สีสว่างสดใส	มักใช้กับผลิตภัณฑ์ฝ้าย ใช้มากในการพิมพ์สี เนื่องจากสีสามารถใช้ร่วมกับสีอื่นได้ดี	ทนต่อแสงแดดและการซักดีมาก

สีดิสเพอร์ส (disperse)	พัฒนาขึ้นมาสำหรับเส้นใยแอซีเทต (พ.ศ. 2465) ไม่ละลายน้ำ	ใช้กับเส้นใยแอซีเทต ไตรแอซีเทต ไนลอน พอลิเอสเตอร์ อะคริลิก มอดอะคริลิก โอลิฟินส์ เช่นเดียวกับเส้นใยเซลลูโลส ใช้กว้างขวางในเสื้อผ้า เครื่องนุ่งห่ม ผ้าที่ใช้ในการตกแต่งใช้ทั้งการย้อม และการพิมพ์	ทนต่อแสงแดด โดยขึ้นกับชนิดของเส้นใย
สีซัลเฟอร์ (sulfur)	เริ่มในปี พ.ศ. 2422 โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ครอบคลุมสีได้กว้าง ยกเว้นสีแดง สีที่ได้ไม่สว่าง	ส่วนใหญ่ใช้ย้อมผ้าฝ้ายหนัก ผ้าทอ ผ้าดิบ มีใช้ในการพิมพ์สีบ้างปัจจุบันมีจำหน่ายในรูปที่ทำให้ละลายในน้ำได้	คงทนต่อแสงแต่ทนทานสารซักฟอกประเภทคลอรีนได้ไม่ค่อยดีนัก
สีแวต (vat)	สังเคราะห์ได้ครั้งแรกในปีพ.ศ. 2422 ไม่ละลายน้ำ ย้อมในปฏิกิริยารีดักชัน จำนวนสีไม่ครบทุกสีแต่ก็มีมากเพียงพอ	เริ่มจากการใช้ย้อมผ้าฝ้ายเช่นเดียวกับขนสัตว์ เสื้อผ้าทำงาน เสื้อภายนอก ชุดกีฬา ใช้มากในงานพิมพ์สี	ทนต่อแสงได้ดีมากและทนต่ออากาศได้ดี
สีรีแอกทีฟ (reactive)	จำหน่ายครั้งแรกในปีพ.ศ. 2500 ทำการรวมตัวทางเคมีกับเส้นใยแตกต่างจากสีอื่นๆ ให้สีสว่างมากที่สุดต่อผ้าฝ้าย ละลายน้ำได้ดี	ใช้ย้อมผ้าฝ้าย ผ้าประดับที่ต้องการสีสดใสเกาะติดดีมาก ใช้ได้ดีทั้งกับการพิมพ์สี นอกนั้นยังใช้ได้กับ ขนสัตว์ ไหม ไนลอน อะคริลิก และเส้นด้ายผสม	ทนต่อแสงได้ดีมากแต่ถ้าย้อมกับไนลอนความคงทนลดลง ทนต่อการซักล้างได้ดีแต่อ่อนไหวต่อสารซักฟอกคลอรีน
ผงสี (pigment)	โดยทั่วไปเป็นสารสีประเภทสารอินทรีย์ทั้งหมด ไม่ละลายน้ำ จึงไม่สามารถยึดติดกับเส้นใยได้ ต้องใช้สารยึดเหนี่ยวพวกเรซิน และอบด้วยอุณหภูมิสูง มีทุกสีและให้สีสดใส	ใช้กับงานพิมพ์เป็นหลักบนผ้าฝ้ายรวมทั้งขนสัตว์ เรยอน แอซีเทต ไนลอน พอลิเอสเตอร์ และโอลิฟินส์	มีความคงทนสูง และความคงทนขึ้นกับตัวสารที่นำมาทำผงสี
สีไดเรกต์ (direct)	ใช้ย้อมจากน้ำละลายสีโดยตรง ไม่ต้องย้อมผ้าด้วยสารช่วยติดก่อนเหมือนกับสีตัวอื่นๆ	นิยมใช้ย้อมผ้าฝ้าย ไหม	ความคงทนสูง ทั้งต่อความร้อน กรดและด่าง
สีออกซิไดส์ (oxidation colorants)	ออกซิไดส์ด้วยสารเคมีที่เหมาะสมจะเกิดเป็นอะโรนินไม่ติดเยเซลลูโลส	ย้อมติดกับเยเซลลูโลส	มีความคงทนสูง

ตารางที่ 2.3 ความสามารถของสีย้อมในการย้อมติดเส้นใยชนิดต่างๆ (มณฑา,2541)

ชนิดสี	ชนิดเส้นใย					
	เซลลูโลส	โปรตีน	อะซิเตท	พอลิเอสเทอร์	ไนลอน	อะคริลิก
สีไดเรกซ์	√	-	-	-	-	-
สีเบสิค	-	√	-	-	√	√
สีกรด	-	√	-	-	√	√
สีกำมะถัน	√	-	-	-	-	-
สีรีแอกทีฟ	√	-	-	-	-	-
สีอะโซ	√	-	√	-	√	-
สีแวต	√	-	√	-	-	-
สีดิสเพิร์ส	-	-	√	√	√	√
สีเมทัล คอมเพลกซ์	-	√	-	-	√	-
สีมอร์แดนท์	-	√	-	-	-	-

ตารางที่ 2.4 การจำแนกชนิดของสีโดยวิธีการย้อม (อัจฉราพร,2520)

วิธีการย้อม	ลักษณะที่ได้
การย้อมโดยตรง	กำลังการย้อมระหว่างสีและเส้นใยดีมาก การย้อมโดยตรงในน้ำซึ่งประกอบด้วยตัวสีและสารช่วยที่เหมาะสม ภาชนะน้ำย้อมจำแนกออกตามชนิดของสารช่วย ออกเป็น 3 ชนิด คือ กรด ต่างและเป็นกลาง สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีย้อมโดยตรง สีกรด สีเบสิค สีดิสเพิร์ส สีอะซิเตท ฯลฯ
การย้อมแบบต้องลดขนาดโมเลกุลสีก่อน	ตัวสีที่ไม่ละลายน้ำจะรวมตัวอยู่กับเส้นใยไม่ได้ เวลาต้องลดขนาดโมเลกุลของสีให้เล็กลงให้มากที่สุดก่อน (ละลาย) สารประกอบ leuco จะซึมเข้าไปภายในเส้นใยเวลาต้องแล้ว ออกซิไดส์คืนเป็นตัวสีเดิมที่ไม่ละลายน้ำได้แก่สีกำมะถัน
การย้อมโดยวิธีออกซิไดส์	ต้องย้อมเส้นใยด้วยสารออกซิไดส์ก่อนเพื่อให้สารนั้นทำปฏิกิริยาออกซิเดชันตัวสีกับเส้นใยให้เกิดเป็นสี สีในกลุ่มนี้ได้แก่ สีออกซิเดชัน สีแวตที่ละลายน้ำได้
การย้อมโดยการทำให้เกิดสี (developing)	ส่วนประกอบของสีแต่ละชนิดแยกกันย้อมทีละครั้ง การทำตกแต่งภายหลังให้เกิดเป็นสีไม่แต่เฉพาะจะใช้กับสีแนฟทาลเท่านั้น ใช้กับสีย้อมโดยตรงก็ได้ สีแนฟทาลและสีอะซิเตทที่ต้องย้อมทับล้วนรวมอยู่ในกลุ่มนี้
การย้อมที่ต้องทำให้สีติด	สารที่ใช้เป็นตัวสีติดกับเส้นใยเองไม่ได้ ต้องทำให้ติดโดยการย้อมทับหรือตกแต่งภายหลังย้อม ใช้สารเคมีช่วย ได้แก่ พิกเมนต์ชนิดต่างๆ
การย้อมโดยมีปฏิกิริยา	ตัวสีชนิดนี้ทำปฏิกิริยารวมตัวกับเส้นใยได้โดยพันธะโควาเลนต์ระหว่างตัวสีกับเส้นใยได้แก่ สีรีแอกทีฟ

2.6 สิริแอกทีฟ

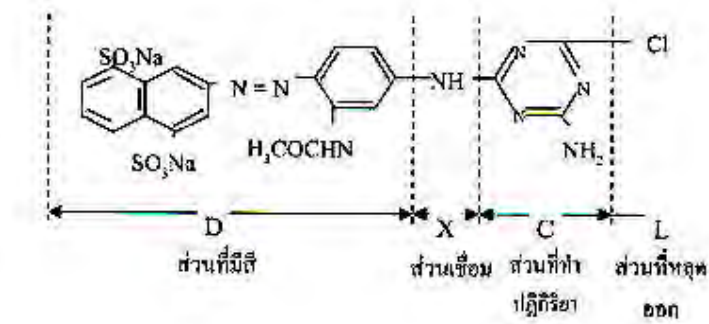
สิริแอกทีฟ เป็นสีย้อมที่สามารถทำปฏิกิริยาเกิดพันธะทางเคมีกับเส้นใยในภาวะที่เหมาะสม ก่อนที่จะมีการค้นพบสิริแอกทีฟ เมื่อปี ค.ศ. 1956 นั้น สีย้อมฝ้ายที่สำคัญมีเพียงสี ไโดเร็กซ์ สีแเวต และ สีอะโซอิคเท่านั้น สีย้อมทั้ง 3 ประเภทนี้ล้วนมีข้อจำกัดในการใช้งาน กล่าวคือ สีไโดเร็กซ์แม้ว่าจะใช้ง่าย ราคาถูก แต่ความคงทนต่อการซักยังไม่ดีพอ ส่วนสีแเวต นั้นแม้ว่าจะให้ฝ้าย้อมที่มีความคงทนดีเลิศ แต่ก็ มีราคาแพง และวิธีการย้อมก็ค่อนข้างยุ่งยาก อีกทั้งสีก็ค่อนข้าง จำกัดส่วนสีอะโซอิคนั้นก็มีย้อมสี เดิมยาก โดยเฉพาะในกรณีใช้สีผสม การค้นพบสิริแอกทีฟทำให้เราได้สีย้อมประเภทใหม่ที่ปราศจาก ข้อจำกัดต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น กล่าวคือ สิริแอกทีฟเป็นสีที่ย้อมง่าย และยังย้อมได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็น การย้อมแบบแช่ในอ่างย้อม แบบกึ่งต่อเนื่องหรือแบบต่อเนื่อง ทั้งยังให้ฝ้าย้อมที่มีความคงทนต่อการซัก สูง ได้สีที่มีความสว่างสดใสมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับสีไโดเร็กซ์หรือสีแเวต และยังมีสีสันท่างๆ ให้เลือก มาก ส่วนในด้านราคาก็ไม่แพงเกินไปจนเป็นที่ยอมรับกันว่า สิริแอกทีฟได้ทำให้ปริมาณการใช้สีย้อมฝ้าย ประเภทอื่นๆ ลดลง โดยเฉพาะสีแเวต ซึ่งในปัจจุบันสิริ แอกทีฟได้กลายเป็นสีย้อมฝ้ายที่มีความสำคัญ มากประเภทหนึ่ง (อัจฉราพร,2520)

สิริแอกทีฟ สามารถละลายน้ำได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในเส้นใยเซลลูโลส ได้พันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสีไโดเร็กซ์กับเส้นใยเซลลูโลส มาก จึงมีความคงทนต่อการซักดี โครงสร้างทางเคมีของสิริแอกทีฟประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน

1. สารหรือกลุ่มเคมี ที่ทำให้เกิดสี (Coloring substance or Chromophore) ใช้แทนด้วย ตัวอักษร “ D ”

2. ส่วนประกอบของกลุ่มไฮดรอกซิล หรือ อะมิโนโมเลกุล เป็นกลุ่มที่ทำปฏิกิริยา (reactive component) ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ R ”

ส่วนที่มีสีเท่านั้น มีลักษณะโครงสร้างคล้ายคลึงกับโมเลกุลของสีย้อมทั่วไป ส่วนใหญ่จะเป็น พวกสีอะโซ (Azo) แอนทราควิโนน (Antraquinone) และ ฟธาโลไซยาเอมีน (Phthalocyanine) สำหรับส่วนที่เป็นกลุ่มทำปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมกับส่วนที่มีสี (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ X ”) ส่วนที่เป็นโครงสร้างหลักของกลุ่มทำปฏิกิริยา (ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ C ”) และ ส่วนที่เป็นกลุ่มที่จะหลุดออกไป (Leaving group) ใช้แทนด้วยตัวอักษร “ L ”) เมื่อสีย้อมทำปฏิกิริยากับ เส้นใย ตัวอย่างสูตรโครงสร้างทางเคมีของสิริแอกทีฟแสดงให้เห็นเป็นส่วนประกอบต่างๆ ดังรูป 2.11 การ เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกลุ่ม X กลุ่ม C หรือกลุ่ม L จะทำให้ได้สิริแอกทีฟที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป มากมาย



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโดยทั่วไปของสีย้อมที่ฟ

สีย้อมที่ฟนอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเส้นใยเซลลูโลสแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียบางส่วนไป แต่อย่างไรก็ตามสีส่วนใหญ่ยังคงมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับเส้นใยด้วยเหตุผล 2 ประการคือ

1. อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสูงกว่าอัตราเร็วระหว่างสีกับน้ำมาก
2. มีความเป็นไปได้ที่สีจะกระจายตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับเส้นใยมากกว่าน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมของสีเข้าไปในเส้นใยขึ้นอยู่กับอิทธิพลที่สำคัญ คือ

1. การดูดซึม (influence of affinity) สีจะดูดซึมเส้นใยดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของส่วนโมเลกุลที่ให้สี ถ้าใช้สีที่มีโครงสร้างในการดูดซึมเส้นใยน้อย ก็จะได้สีที่ไม่ทนต่อการซักล้าง และขจัด แต่ถ้าสีที่เข้มแรงดึงดูดกับเส้นใยมาก การขจัดออกก็จะทำได้ยากตามไปด้วย ดังนั้นการดูดซึมของสีจึงมีความสำคัญมากในการเลือกใช้ตัวสีในแต่ละกระบวนการ

2. ปริมาณน้ำ (influence of liquor ratio) สีย้อมที่ฟนอกจากทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำด้วย โดยสีย้อมที่ฟที่ทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วเรียกว่า hydrolysed dye ซึ่งจะไม่สามารถทำปฏิกิริยากับเส้นใยอีก ทำให้สีย้อมติดเส้นใยลดลง ดังนั้นในการย้อมจึงต้องพยายามให้สีย้อมทำปฏิกิริยากับน้ำให้น้อยที่สุด ซึ่งสีย้อมที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้ว่องไวด้วย

3. อุณหภูมิ (effect of temperature) สีย้อมที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาสูงสามารถย้อมได้ที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีอย่างมากโดยปกติอุณหภูมิที่ใช้ในการย้อมจะแปรผันตามความว่องไวต่อปฏิกิริยาของกลุ่มทำปฏิกิริยา ดังนั้นในการย้อมจึงย้อมที่อุณหภูมิต่ำก่อนแล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิมากขึ้น

4. ปริมาณอิเล็กโทรไลต์ (effect of electrolyte concentration) เมื่อปริมาณอิเล็กโทรไลต์เพิ่มขึ้น ความสามารถของน้ำสีในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย (เซลลูโลส) จะเพิ่มมากขึ้นด้วย

5. ต่าง (effect of alkali) สีย้อมจะดูดซึมได้เร็วที่ค่าความเป็นกรด-ต่าง 10.3 แต่ถ้าในน้ำย้อมมีค่าความเป็นกรด-ต่างสูงกว่า 11 การดูดซึ่มก็จะลดลง และลดลงเรื่อยๆ เมื่อค่าความเป็นกรด-ต่างเพิ่มสูงขึ้น

6. เส้นใย (effect of fiber) เซลลูโลสต่างชนิดกันจะดูดซึ่มสีย้อมไม่เท่ากัน เช่น ฝ้ายชุบมันดูดซึ่มได้ดีกว่าฝ้ายธรรมดา ถ้ามีความหนาแน่นของเส้นใยสูงกว่าก็ดูดซึ่มได้น้อยลง

2.7 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อม

1) สารอินทรีย์ ทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (DO) ลดลง (ชนิดา,2543) ซึ่งมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำตายเนื่องจากขาดออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำไม่สามารถบำบัดตัวเองได้ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นจากการเกิดปฏิกิริยาไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งน้ำ ได้ สารอินทรีย์บางชนิดเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต มีผลทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และอาจเป็นอันตรายต่อมนุษย์ได้ ในบางกรณีที่ได้รับสารโดยตรงจากการบริโภคสัตว์ นอกจากนี้สารพิษยังอาจสะสมอยู่ในระบบนิเวศในกรณีที่สลายตัวได้ยาก

2) ค่าความเป็นกรด-ต่าง ทำให้น้ำเสียมีค่าความเป็นกรด-ต่าง สูง เมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยตรงแล้ว เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เพราะโดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตจะดำรงชีพอยู่ได้ในภาวะที่เป็นกลางในช่วงความเป็นกรด-ต่าง 6-9

3) อุณหภูมิของเสียที่สูง เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง

4) ของแข็งที่ละลายน้ำ (dissolved solids) อาจทำให้สัตว์น้ำเกิดโรคภัยแรงได้ และทำให้ไม่สามารถใช้น้ำให้เกิดประโยชน์ได้

5) สี (color) ทำให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่น่ามองของแหล่งน้ำ และทำให้ปริมาณแสงที่ส่องผ่านลงสู่แหล่งน้ำลดลง ส่งผลให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำลดลง

6) โลหะหนัก (heavy metal) ทำให้เกิดโรคภัยแรงในสัตว์น้ำและยังสะสมอยู่ในระบบนิเวศ ทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ต่างๆ รวมทั้งมนุษย์ด้วย

7) ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solid) ทำให้สารอินทรีย์ในแหล่งน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อตกตะกอนลงทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศสัตว์น้ำ และทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำ

2.8 การบำบัดน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม

การบำบัดน้ำเสียเป็นวิธีการลดปริมาณสารมลพิษที่ละลาย หรือกระจายตัวอยู่ในน้ำเสีย โดยการแยกหรือทำให้เกิดการสลายตัว การเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสม จำเป็นที่ต้องทราบถึงลักษณะสมบัติและองค์ประกอบของสารมลพิษที่ถูกทิ้งออกจากโรงงานอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542) การบำบัดน้ำเสียในโรงงานฟอกย้อมโดยทั่วไป มีระบบบำบัด 2 ขั้นตอน ได้แก่

2.8.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (Primary Treatment)

การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น เป็นการแยกเอาตะกอนแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย เช่น เศษผ้า และเศษเส้นด้าย นอกจากนี้ยังเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำให้เหมาะสมก่อนเข้าสู่ระบบทฤษฎีต่อไป ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นในอุตสาหกรรมฟอกย้อม ได้แก่

2.8.1.1 การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยตะแกรง ตะกอนแขวนลอยขนาดใหญ่ เช่นเศษผ้า เศษเส้นด้ายและเส้นใยต่าง ๆ การกำจัดของแข็งแขวน ลอยเหล่านี้ส่วนใหญ่ใช้ตะแกรง (screen) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ ตะแกรงหยาบ และตะแกรงละเอียด

2.8.1.2 การปรับสภาพสมดุล โรงงานฟอกย้อมมีขั้นตอนการผลิตต่างๆ ซึ่งน้ำเสียที่ออกมาจากแต่ละกระบวนการมีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกัน โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียทำงานได้ดีในภาวะที่มีอัตราการไหลและความเข้มข้นของน้ำเสียสม่ำเสมอ เพราะฉะนั้นการปรับสภาพสมดุลเป็นขั้นตอนที่จำเป็น เพื่อให้อัตราการไหลและความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ถึงปรับสภาพที่ใช้ในโรงงานฟอกย้อมทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำเสียเพราะน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการฟอกย้อม ส่วนใหญ่มีอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส ทำให้ระบบทฤษฎีที่เป็นระบบทางชีววิทยาทำงานได้ลดลง

2.8.1.3 การปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรดหรือด่าง มีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย ในระบบชีวภาพดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียให้มีภาวะเป็นกลาง ซึ่งมีความเหมาะสมในการบำบัดทางชีวภาพ โดยน้ำเสียจากการฟอกย้อมถูกส่งไปยังถังปรับ ความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งมีสารเคมีจำพวกกรดหรือด่างทำหน้าที่ปรับความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำเสียให้เป็นกลาง

2.8.2 การบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary Treatment)

ระบบบำบัดขั้นทุติยภูมิเป็นระบบบำบัดที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยมากเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ หรือเป็นระบบบำบัดทางเคมีแล้วตามด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพ สำหรับระบบบำบัดที่เหมาะสมและนิยมใช้กันมาก ได้แก่ ระบบบ่อปรับเสถียร ระบบสระเติมอากาศและระบบเอเอส

2.8.2.1 ระบบบ่อปรับเสถียร (stabilization pond) เป็นบ่อบำบัดน้ำเสียแบบอาศัยธรรมชาติ โดยใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน จุลินทรีย์ในบ่อจะมีทั้งจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนและจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน

2.8.2.2 ระบบสระเติมอากาศ (aeration lagoon) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่จุลินทรีย์ในสระเติมอากาศใช้ออกซิเจนจากเครื่องเติมอากาศชนิดจักรกล แตกต่างจากบ่อปรับเสถียรชนิดบ่อมีออกซิเจนที่ใช้ออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายเป็นหลัก

2.8.2.3 ระบบเอเอส (activated sludge) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วโดยอาศัยจุลินทรีย์จำนวนมากที่แขวนลอยอยู่ในถังอากาศ และต้องควบคุมความเข้มข้นของจุลินทรีย์ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยการย้อนกลับ ตะกอนจุลินทรีย์บางส่วนที่ตกตะกอนในถังตกตะกอนกลับเข้าสู่ถังเติมอากาศซึ่งแตกต่างจากระบบสระเติมอากาศที่ไม่มีการย้อน ตะกอนจุลินทรีย์กลับ ตะกอนจุลินทรีย์ส่วนเกินที่เกิดขึ้นถูกนำไปกำจัด เช่น ผ่านการย่อยสลาย หรือนำไปตากแห้ง น้ำใสส่วนบนที่ไหลล้นออกจากถังตกตะกอนซึ่งได้มาตรฐาน สามารถระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

2.8.3 วิธีการกำจัดสีย้อม (ปิยรัตน์, 2550)

ถึงแม้ว่าระบบบำบัดน้ำเสียที่กล่าวข้างต้นสามารถลดสารอินทรีย์ได้ แต่ไม่สามารถกำจัดสีย้อมในน้ำได้หมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการอื่นๆ มาใช้ในการกำจัดสีย้อม ได้แก่

2.8.3.1 การตกตะกอนด้วยสารเคมี (chemical coagulation) ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ ขั้นตอนเติมสารก่อนการจับก้อนเคมี (coagulant) เช่น สารส้ม ปูนขาว เกลือของเหล็ก สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น ผสมในน้ำเสีย ขั้นตอนที่ 2 การกวนอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดสภาพรวมตะกอน (flocculation) ซึ่งได้มีการเกาะกันระหว่างตะกอนเล็กๆ กับสารสร้างตะกอนจนได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้

2.8.3.2 คลอรีเนชัน (chlorination) เป็นวิธีการกำจัดสีโดยใช้คลอรีนเป็นสารออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ซึ่งมีอำนาจออกซิไดซ์สูงไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้ง ทำให้สีหายไปหรือลดปริมาณสีลง ปริมาณสีที่ลดลงขึ้นปริมาณและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ โดยคลอรีนที่ใช้ อยู่ในรูปของแก๊สคลอรีน สารประกอบไฮโปคลอไรท์ และคลอรีนไดออกไซด์

2.8.3.3 โอโซนเนชัน (ozonation) เป็นการกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้โอโซน (O_3) เป็นสารออกซิไดซ์ไปทำปฏิกิริยากับสีที่อยู่ในน้ำทิ้งเช่นเดียวกับการใช้คลอรีน แต่โอโซนมีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนเกือบ 1 เท่า การผลิตโอโซนกระทำผ่านอากาศแห้ง และออกซิเจนบริสุทธิ์ไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ อะตอมของออกซิเจนถูกบังคับให้ถูกจับตัวกันใหม่กลายเป็นโอโซน อากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัมหรือเท่ากับร้อยละ 1.4 โดยปริมาตร ถ้าใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศแห้งอาจได้โอโซนเพิ่มเป็น 60-90 กรัม/ลูกบาศก์เมตร โอโซนสามารถทำให้เป็นของเหลวได้แต่นิยมใช้ในรูปแก๊สมากกว่า โอโซนเป็นแก๊สพิษที่ก่อให้เกิดความระคายเคืองอย่างรุนแรง

2.8.3.4 การใช้เมมเบรน (membrane technology) เทคโนโลยีของการใช้เมมเบรนประกอบด้วยวิธีอัลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับวิธีอัลตราฟิลเตรชันมีหลักการการทำงานของระบบ คือ ใช้เมมเบรนรูพรุน พอลิเอทิลีนไธโธไลต์ หรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่างๆ และอัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันไม่เกิน 1,034 กิโลนิวตัน/ตารางเมตร เมมเบรนทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็กที่มีขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง 1×10^{-2} มิลลิเมตร ได้สำหรับกระบวนการออสโมซิสผันกลับสามารถแยกสารปนเปื้อนที่มีขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าวิธีอัลตราฟิลเตรชัน นิยมใช้ในการแยกเกลือที่ละลายน้ำได้กรองผ่านเมมเบรนเลือกผ่าน (semi permeable membrane) เมมเบรนที่นิยมใช้กันมากได้แก่ เซลลูโลส แอซิเตต และไนลอน วิธีที่นำมาใช้ปัจจุบัน ได้แก่ วิธีอัลตราฟิลเตรชัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการนำวัสดุกลับมาใหม่

2.8.3.5 ไฟฟ้าเคมี (electrochemical) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่ง แต่ใช้กันน้อยมากในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อม การบำบัดด้วยวิธีนี้มักถูกใช้เพื่อกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียอุตสาหกรรม ต่อมาได้มีการปรับปรุงเพื่อนำมากำจัด บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอย และสีในน้ำเสีย

2.8.3.6 การดูดซับ (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) การเกาะจับโมเลกุลบนผิวของสาร อาจเกิดขึ้นด้วยแรงกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาล (Van der waals) หรือด้วยแรงทางเคมีหรือทั้งสองอย่างรวมกัน สารดูดซับ มีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. ประเภทสารอินทรีย์ เช่นดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกระดูก (bone char) ซิลิกาแอมมอนด์ (activated silica) ฯลฯ สารเหล่านี้มีพื้นที่ผิว 50-200 ตารางเมตร/กรัม

2. ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) มีพื้นที่ผิวมากกว่าสารอินทรีย์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญคือ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม จึงจัดแยกไว้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ

3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ มีพื้นที่ผิว 300-500 ตารางเมตร/กรัม โดยทั่วไปกระบวนการดูดซับในกระบวนการกำจัดสีและกลิ่นในน้ำประปาและกระบวนการกำจัดสีในน้ำเสียนิยมใช้คาร์บอนกัมมันต์ ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับสูงตามไปด้วย

2.9 การดูดซับ (adsorption)

มีผู้ให้คำนิยามของการดูดซับไว้มากมาย เช่น การดูดซับเป็นการสะสมสารหรือวัสดุที่พื้นผิวระหว่างของแข็ง และของเหลว รวมถึงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายออกจากสารละลายไปอยู่บนผิวของของแข็ง แต่ไม่รวมถึงกระบวนการตกตะกอนที่พื้นผิว (Surface precipitation process) หรือกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization process) ซึ่งหากไม่สามารถระบุให้ชัดเจนว่ากลไกที่ทำให้ความเข้มข้นของสารหรือวัสดุในสารละลาย ตัวทำละลาย หรือพื้นผิวของแข็งลดลงไปนั้นเกิดจากการดูดซับ หรือการตกตะกอนที่พื้นผิว หรือกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน หรือกระบวนการอื่นๆ ที่เกิดขึ้นที่ผิวแล้วโดยทั่วไปใช้คำว่า Sorption (Danals, 1995)

การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย (Adsorbate) จากสถานะที่เป็นของเหลวไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง คือตัวดูดซับ (Adsorbent) ทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดัน (Driving force) หลัก 2 ชนิด คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย และความชอบหรือความดึงดูด (Affinity) ของตัวดูดซับที่มีต่อตัวถูกละลาย (วินัย, 2541)

พื้นที่ผิวของของแข็งที่สัมผัสกับสารละลายและมีแนวโน้มเกิดการสะสมโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิว เนื่องมาจากความไม่สมดุลของแรงที่ผิว (Surface force) เรียกว่าการดูดซับ (Eckenfelder, 1996)

2.9.1 ลักษณะการดูดซับ (Kenneth, 1992)

2.9.1.1 การดูดซับเชิงฟิสิกส์

การดูดซับเชิงฟิสิกส์เป็นผลเนื่องมาจากแรงภายในโมเลกุลที่ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์นั้นรวมไปถึงแรงวันเดอร์วาลส์ (van der waals force) ที่ประกอบไปด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ และแรงผลักรวมกันปฏิกิริยา ไดโพล-ไดโพล (dipole-dipole interaction) และจากปฏิกิริยาการแพร่ (dispersing interactions) และพันธะไฮโดรเจน

(hydrogen bonding) ปฏิกริยาไดโพล-ไดโพลเป็นผลมาจากสารประกอบที่มีขั้วดังนั้นประจุของมันเป็นผลมาจากการรวมตัวของพลังงานอิสระตัวที่ต่ำกว่า ปฏิกริยาการแพร่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของโมเลกุลในระบบ ถ้าโมเลกุลมาอยู่ชิดกันมากเกินไปจะเกิดแรงผลักร้อนซึ่งสามารถผลักโมเลกุลให้แยกจากกัน ส่วนพันธะไฮโดรเจนเป็นกรณีพิเศษของปฏิกริยาไดโพล -ไดโพลซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลมีบางส่วนที่เป็นประจุบวกจึงสามารถดึงดูดอะตอมอื่นหรือบางส่วนของโมเลกุลที่มีประจุลบได้ สำหรับในของเหลวแรงวันเดอร์วาลส์เป็นแรงขับเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับเป็นแรงแรก การดูดซับเชิงฟิสิกส์ คือปฏิกริยาผันกลับได้อย่างรวดเร็วรวมทั้งเกิดการดูดซับได้ทั้งแบบโมโนเลเยอร์และมัลติเลเยอร์ เพราะการดูดซับเชิงฟิสิกส์ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีพลังงานในการดูดซับต่ำและไม่เกิดในตำแหน่งเฉพาะ ความร้อนของการดูดซับสำหรับปฏิกริยาอยู่ที่ 40 ปีที่อยู่ต่อปอนด์ต่อโมลของตัวดูดซับ เมื่อแรงภายในโมเลกุลระหว่างโมเลกุลของสารเคมีในของเหลวและของแข็ง (ตัวดูดซับ) จะมีมากกว่าแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลว สารเคมีจะถูกดูดซับไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับ

2.9.1.2 การดูดซับเชิงเคมี

การดูดซับเชิงเคมีคล้ายกับการดูดซับเชิงฟิสิกส์ คือขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน กลไกของการดูดซับเชิงเคมีมีความคล้ายคลึงกับการดูดซับเชิงฟิสิกส์ แต่มีความแข็งแรงมากก ว่า (เป็นเพราะพลังงานการดูดซับของพันธะเคมี) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับจะทำให้เกิดการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งอาจจะเป็นปฏิกริยาที่ผันกลับไม่ได้และมีพลังงานในการดูดซับสูง ความร้อนของการดูดซับเชิงเคมีมีค่ามากกว่าการดูดซับเชิงฟิสิกส์ คืออยู่ในช่วง 80-400 ปีที่อยู่ต่อปอนด์ต่อโมล การดูดซับเชิงเคมีเกี่ยวข้องกับบริเวณโมโนเลเยอร์เท่านั้นและบริเวณที่เกิดปฏิกริยาเป็นบริเวณที่มีความจำเพาะเจาะจง คือเกิดบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความจำเพาะเจาะจง หมู่ฟังก์ชันที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในสารประกอบอินทรีย์นั้นจะเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับเคมีและฟิสิกส์ ซึ่งความแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงเคมีและการดูดซับเชิงฟิสิกส์แสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การจำแนกข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงเคมีและการดูดซับเชิงฟิสิกส์ (Kenneth, 1992 and Alley, 2000)

การดูดซับเชิงฟิสิกส์	การดูดซับเชิงเคมี
1. ความร้อนของการดูดซับต่ำ (<2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)	1. ความร้อนของการดูดซับสูง (>2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)

2. ไม่มีความเฉพาะเจาะจง	2. มีความเฉพาะเจาะจงสูง
3. เป็นได้ทั้งโมโนเลเยอร์หรือมัลติเลเยอร์	3. เป็นโมโนเลเยอร์เท่านั้น
4. ไม่มีการแตกตัวของชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	4. อาจเกี่ยวข้องกับการแตกตัว
5. มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิค่าเท่านั้น	5. อาจเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างๆ
6. เกิดอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการกระตุ้น ผันกลับได้	6. เกิดการกระตุ้น อาจเกิดได้ช้า ผันกลับไม่ได้

2.9.2 กลไกการดูดซับ (Noll และคณะ, 1992 and Faust และคณะ, 1987)

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 Bulk transport เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุดโดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวต่างๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

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

ขั้นตอนที่ 3 Intrapartical transport เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายในซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน

2.9.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Said และคณะ, 1993)

2.9.3.1 ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนา มาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุน เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.9.3.2 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับคือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับที่มีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ

ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่า (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมถูกดูดซับได้มากกว่าตัวถูกดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

2.9.3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำๆ มีปริมาณไฮโดรเจนไอออนมากกว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างสูง ซึ่งมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเจนไอออนในสารละลาย แต่จะได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับและในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

2.9.3.4 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใดคือ ถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพ อุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วยเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้นและเพิ่มโอกาสที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

2.9.3.5 ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับขึ้นโมเลกุลตัวถูกดูดซับถูกดึงออกจากรู้น้ำก่อนแล้วไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า แต่ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารละลายที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวของตัวถูกดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่า ความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

2.9.3.6 ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่นการดูดซับกรดอินทรีย์โดยถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดแอสซิติค กรดโพธิอิก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาวมักมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับ

มากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่มีตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลใหญ่เนื่องจากสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่ดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย สัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถู กดูดซับบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินเรื่อยๆ มีการคายการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้นมาพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถู กดูดซับกับที่คายออกมาเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถู กดูดซับบนผิวของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง ภาวะที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ เป็นสมบัติจำเพาะของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถู กดูดซับ ตัวดูดซับ อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถู กดูดซับเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปใช้ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น (Faust and Aly, 1987)

2.10 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) (Faust and Aly, 1987)

ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ ($X/M = q_e$: มิลลิกรัมต่อกรัม) กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลือ อยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ (C_e : มิลลิกรัมต่อลิตร)

สมการที่ใช้การอธิบายไอโซเทิร์ม โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับคือ สมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดลิช

1. สมการแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) (ขจรศักดิ์, 2549)

สมมติฐานของสมการแลงเมียร์ คือ

- พลังงานที่ใช้มีลักษณะเหมือนกันทุกตำแหน่ง (uniform energies)
- โมเลกุลของอนุภาคถูกดูดซับแบบชั้นเดียวบนผิวของตัวดูดซับ (monolayer)
- พลังงานในการดูดซับมีค่าคงที่ (energy of adsorption is constant)
- อนุภาคไม่มีการย้ายตำแหน่ง (no migration)

สมการแลงเมียร์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$q_e = X_m b C_e / (1 + b C_e) \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

X_m = ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

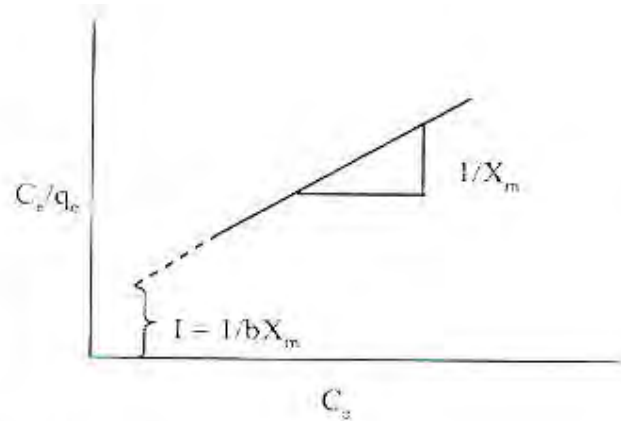
b = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการแลงเมียร์

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเมื่ออยู่ในภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

จากสมการ (2.1) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงตามสมการดังนี้

$$C_e / q_e = (1/bX_m) + (C_e/X_m) \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ C_e / q_e เป็นแกน y และ C_e เป็นแกน X ได้ค่าความชันเท่ากับ $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm (Sunstorm, 1997)

2. สมการฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm) (ขจรศักดิ์, 2549)

สมการฟรุนดลิช เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อมีการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอกการิทึม สมการที่ได้มีความเฉพาะเจาะจงกับกรณีอนุภาคจัดเรียงตัวหลายชั้นและแต่ละชั้นมีพลังงานแตกต่างกัน (heterogeneous surface energies) สามารถแสดงได้ดังสมการ (2.3)

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

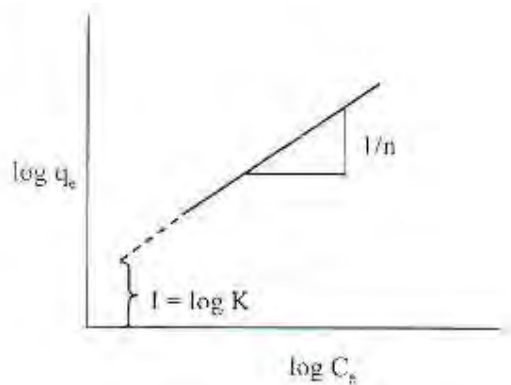
โดย K = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย

n = ค่าคงที่ของการดูดซับตามสมการฟรุนดลิช

จากสมการที่ (2.3) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเส้นตรงได้ดังสมการ (2.4)

$$\log q_e = \log K + (1/n) \log C_e \quad (2.4)$$

เมื่อนำค่า $\log q_e$ กับ $\log C_e$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q_e$ เป็นแกน y และ $\log C_e$ เป็นแกน x ได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ แสดงดังรูปที่ 2.13 เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อมีความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับต่ำ และเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูง แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบขนานกับแกน x นั้นแสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงไม่แตกต่างกันนัก



รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm (Sunstorm, 1997)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์

ทรรศพพร พิศรูป (2005) ศึกษาการเตรียมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) ของมอนต์มอริลโลไนต์และแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) บนโมเลกุลของเกลืออัลคิลแอมโมเนียมของ dodecylamine (C12), hexadecylamine (C16) และ octadecylamine (C18) และมีการแปรเปลี่ยนปริมาณของอัลคิลเอมีนต่างๆ กัน คือ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมได้มีโครงสร้างแยกตัวแบบแทรกสอด (intercalated) และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักจะให้ค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกต (d-spacing) สูงที่สุด ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่าขนาดช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ความหนาแน่นของประจุ อัตราการแลกเปลี่ยนประจุ และความยาวของสายโซ่อัลคิลเอมีนที่เข้าไปแทรกอยู่ระหว่างชั้นของเคลย์

2.11.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับสีย้อมด้วยไคโตซาน

Wong, Y.C. และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสีย้อมแอซิด 5 ตัว ได้แก่ แอซิดกรีน 25(AG25) แอซิดออเรนจ์ 10(AO10) แอซิดออเรนจ์ 12(AO12) แอซิดเรด 18(AR18) และแอซิดเรด 73(AR73) โดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับที่สูงสุดเกิดขึ้นที่ชั้นโมโนเลเยอร์ของแอซิดกรีน 25(AG25) แอซิดออเรนจ์ 10(AO10) แอซิดออเรนจ์ 12(AO12) แอซิดเรด 18(AR18) และแอซิดเรด 73(AR73) มีค่าเท่ากับ 645.1, 922.9, 973.33, 693.2, และ 728.2 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับที่แตกต่างกันเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของสีย้อมและจำนวนของหมู่ซัลโฟเนตของสีย้อมแต่ละตัวที่ต่างกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าโมโนวาเลนซ์ (monovalence) และอนุภาคของสีย้อมที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีประสิทธิภาพการดูดซับของสีย้อมต่อไคโตซานเพิ่มขึ้นเพราะว่าโมเลกุลของสีย้อมสามารถแทรกผ่านโครงสร้างรูพรุนภายในโมเลกุลของไคโตซานได้มากขึ้น

จินตนา ชำนาญบุญธรรม (2000) ได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม 4 ชนิด ได้แก่ สีแอซิด สีรีแอกทีฟ สีเบสิก และสีไดเร็กต์บนตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เปลือกกุ้ง ไคติน และไคโตซาน พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดสามารถดูดซับสีแอซิด สีรีแอกทีฟ และสีไดเร็กต์ได้ดีในสารละลายกรดที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 หรือต่ำกว่าโดยไคโตซานดูดซับสีย้อมดังกล่าวได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและเปลือกกุ้ง ตรงข้ามกับสีเบสิกถูกดูดซับได้ดีในสารละลายด่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 10 หรือสูงกว่า

โดยเปลือกกุ้งสามารถดูดซับสีเบสิกได้ในปริมาณที่สูงกว่าไคตินและไคโตซานมาก ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ลดลงเมื่ออนุภาคของตัวดูดซับมีขนาดเพิ่มขึ้น ปริมาณของสีทุกชนิดที่ถูกดูดซับยกเว้นสีเบสิกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระดับการกำจัดหมู่อะซิทิล (degree of deacetylation) ของไคโตซานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการคายการดูดซับของสีย้อมที่ค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าสีย้อมสามารถคายการดูดซับได้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

2.11.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเชิงประกอบ

Chang, M.Y. และ Juang, R.S. (2004) เตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (composite beads) ของไคโตซานกับ activated clay เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความถ่วงจำเพาะของไคโตซานสำหรับใช้ดูดซับกรดอินทรีย์ 2 ชนิดคือ tannic acid และ humic acid และสีย้อม 2 ชนิดคือ methylene blue และ reactive dye RR222 ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับเปรียบเทียบกับ activated clay และเม็ดไคโตซาน พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของเม็ดวัสดุเชิงประกอบเทียบได้กับเม็ดไคโตซานแต่ดีกว่า activated clay มากและเมื่อใช้เม็ดวัสดุเชิงประกอบเป็นตัวดูดซับจะทำให้ไอโซเทิร์มการดูดซับของสารละลายทั้ง 4 ชนิดเหมาะสมกับสมการของฟรุนดลิช (Freundlich equation) มากขึ้น

Wang, L. และ Wang, A. (2007) ศึกษาลักษณะการดูดซับของสีย้อม Congo Red (CR) ลงบนวัสดุเชิงประกอบไคโตซาน/มอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมวัสดุเชิงประกอบจะแปรเปลี่ยนอัตราส่วนโมลของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ เป็น 1:5, 1:1 และ 5:1 ตามลำดับจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าที่อัตราส่วนโมลของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์เป็น 5:1 ทำให้ชั้น ซิลิเกตของเคลย์แยกตัวออกจากกันได้ดีเกิดเป็นวัสดุเชิงประกอบแบบ intercalated-exfoliated structure และมีขนาดของรูพรุนใหญ่ที่สุดคือ 11.8 nm ซึ่งเป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับสีย้อมดีขึ้น เมื่อทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม CR พบว่าเมื่อ 1. เพิ่มปริมาณอัตราส่วนโมลของไคโตซาน 2. ลดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายและ 3. เพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้น ในส่วนของไอโซเทิร์มการดูดซับนั้นเป็นไปตาม Langmuir monolayer model ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไคโตซานแล้ววัสดุเชิงประกอบจะมีความสามารถเกาะตัวกันได้ดีในสารละลายมากกว่า ราคาถูกกว่าและมีความสามารถในการดูดซับสูง

3.1.2 สารเคมี

1. Octadecylamine ($C_{18}H_{39}N$) จากบริษัท Fluka Chemika
2. Glacial acetic acid (CH_3COOH) จากบริษัท Mallinckrodt Baker
3. Hydrogen peroxide (H_2O_2) จากบริษัท Thai Peroxide
4. Sodium hydroxide (NaOH) จากบริษัท Ajax Finechem
5. Hydrochloric acid (HCl) จากบริษัท J.T. Baker
6. Ethanol (C_2H_5OH) จากบริษัท ZEN POINT

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ใบพัดปั่นกวน (stirrer)
2. ตู้อบให้ความร้อน (oven)
3. ขวดพิคโนมิเตอร์ (pycnometer)
4. ชุดกรอง (buchner, suction)
5. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
6. เครื่องชั่ง (analytical balance)
7. อุปกรณ์ให้ความร้อน (heater)
8. แม่เหล็กกวน (magnetic stirrer)
9. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
10. เครื่องเขย่า (shaker)
11. เครื่องผสมความเร็วสูง (hi-speed mixer)
12. เครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (centrifuge)
13. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer) : 0-100 องศาเซลเซียส
14. ตะแกรงร่อน (sieve) : ขนาด 200 เมช

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. Gel Permeation Chromatography (GPC) : Water รุ่น water 600E
2. เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction, XRD) : Bruker AXS รุ่น D8
3. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) : analytikjena รุ่น specord S100
4. Surface Area and Porosity Analyzer : Quantachrome รุ่น Autosorb-1

3.4 การดำเนินงานการวิจัย

3.4.1 การไฮโดรลิซิสโคโตซานให้น้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน

1. เตรียมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร จำนวน 100 กรัม นำเกล็ดโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง (Mw : 480k) จำนวน 5 กรัม ใส่ลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมไว้ (อัตราส่วนโคโตซานต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็น 1 : 20 กรัม) ปั่นกวนด้วยใบพัดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 400 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

2. เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตรแล้ว ปั่นกวนด้วยใบพัดที่ความเร็วรอบเท่ากับ 400 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานหลังการไฮโดรลิซิส จะได้โคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน โดยจะใช้สัญลักษณ์แทนดังนี้

- $CTS_{initial}$ แทนโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง (น้ำหนักโมเลกุลเริ่มต้น)
- $CTS_{4\% 6h}$ แทนโคโตซานที่ทำการไฮโดรลิซิสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร
- $CTS_{4\% 24h}$ แทนโคโตซานที่ทำการไฮโดรลิซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยปริมาตร
- $CTS_{15\% 24h}$ แทนโคโตซานที่ทำการไฮโดรลิซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร

3. กรองเกล็ดโคโตซานที่ได้แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีภาวะเป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

4. วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลโคโตซานที่ผ่านการไฮโดรลิซิสโดยเทคนิค Gel Permeation Chromatography ดังแสดงในรูป 3.2

3.4.2 การตัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน

1. ละลายโคโตซานจำนวน 2 กรัมในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 1 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจนโคโตซานละลายหมด

2. นำมอนต์มอริลโลไนต์ 2.5 กรัมมาปั่นกวนในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรเพื่อให้เกิดการกระจายตัว

3. เทสารละลายโคโตซานลงใน มอนต์มอริลโลไนต์ แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (hi-speed mixer) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. นำสารผสมไปเหวี่ยงด้วยเครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อทำการแยกตะกอนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วบดให้ละเอียดจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช

5. โคโตซานที่นำมาดัดแปรด้วยวิธีดังกล่าวในขั้นตอนที่ 1 ประกอบด้วย $CTS_{initial}$, $CTS_{4\% 6h}$, $CTS_{4\% 24h}$ และ $CTS_{15\% 24h}$ ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 เครื่อง Gel Permeation Chromatography



รูปที่ 3.3 เครื่องผสมความเร็วสูง (hi-speed mixer)



รูปที่ 3.4 เครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง (Centrifuge)

6. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ดังแสดงในรูป 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

3.4.3 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีน

1. ละลายสารออกตะเดซิลเอมีนจำนวน 1 กรัมในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 1 มิลลิลิตรลงในสารละลายพร้อมให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที
2. นำมอนต์มอริลโลไนต์ 2.5 กรัมมาปั่นกวนในน้ำกลั่น 70 มิลลิลิตรเพื่อให้เกิดการกระจายตัว
3. เทสารละลายออกตะเดซิลเอมีนลงในมอนต์มอริลโลไนต์ แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำสารผสมไปกรองเพื่อทำการแยกตะกอนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรออกมาล้าง ด้วยน้ำกลั่นจนมีภาวะเป็นกลาง นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วอบไล่ละเอียดจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช
5. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ด้วย ออกตะเดซิลเอมีน โดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

3.4.4 การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน

การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีนี้ได้ทำการศึกษาเป็น 2 วิธีดังนี้

- แบบวิธีที่ 1 ดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานแบบขั้นตอนเดียวกัน

(in situ modification)

1. ละลายสารออกตะเดซิลเอมีนจำนวน 1 กรัมในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 0.5 มิลลิลิตรลงในสารละลายพร้อมให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสปั่นกวนเป็นเวลา 20 นาที
2. ละลายโคโตซานจำนวน 1 กรัมในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 0.5 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจนโคโตซานละลายหมด
3. นำมอนต์มอริลโลไนต์ 2.5 กรัมมาปั่นกวนในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตรเพื่อให้เกิดการกระจายตัว
4. เทผสมสารละลายโคโตซาน และสารละลายออกตะเดซิลเอมีนลงในมอนต์มอริลโลไนต์ แล้วปั่นกวนด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำสารผสมไปเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง (centrifuge) เพื่อทำการแยกตะกอนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วอบไล่ละเอียดจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช

6. ไคโตซานที่นำมาดัดแปรด้วยวิธีดังกล่าวในขั้นตอนที่ 2 ประกอบด้วย CTS_{initial} , CTS_{4% 6h} , CTS_{4% 24h} และ CTS_{15% 24h} ตามลำดับ

7. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอดัลโมลกุลไคโตซานดัดแปรด้วยวิธีดังกล่าวโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

- แบบวิธีที่ 2 ดัดแปรมอดัลโมลกุลไคโตซานด้วยออกตะเดซิลเอมีนและไคโตซานแบบ 2 ขั้นตอน (2-step modification)

1. ละลายสารออกตะเดซิลเอมีนจำนวน 1 กรัมในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 0.5 มิลลิลิตรลงในสารละลายพร้อมให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที

2. ละลายไคโตซานจำนวน 1 กรัมในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 0.5 มิลลิลิตร บ่มด้วยแท่งแม่เหล็กจนไคโตซานละลายหมด

3. นำมอดัลโมลกุลไคโตซาน 2.5 กรัมมาบ่มในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตรเพื่อให้เกิดการกระจายตัว

4. เทสารละลายออกตะเดซิลเอมีนลงในมอดัลโมลกุลไคโตซาน แล้วบ่มด้วยเครื่องผสมความเร็วสูงที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 1/2 ชั่วโมง หลังจากนั้นเทสารละลายไคโตซานลงในสารละลายผสมไปแล้วบ่มต่อจนครบเวลา 1 ชั่วโมง

5. นำสารผสมไปเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง (Centrifuge) เพื่อทำการแยกตะกอนของมอดัลโมลกุลไคโตซานที่ดัดแปรออกมาล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบไล่ละอองจากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช

6. ไคโตซานที่นำมาดัดแปรด้วยวิธีดังกล่าวในขั้นตอนที่ 2 ประกอบด้วย CTS_{initial} , CTS_{4% 6h} , CTS_{4% 24h} และ CTS_{15% 24h} ตามลำดับ

7. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอดัลโมลกุลไคโตซานดัดแปรด้วยวิธีดังกล่าวโดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

เปรียบเทียบผลการแยกชั้นผลึกมอดัลโมลกุลไคโตซานที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและไคโตซานแบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอน แล้วเลือกวิธีที่มีผลการแยกชั้นผลึกมอดัลโมลกุลไคโตซานได้ดีกว่ามาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.4.5 การเตรียมเม็ดโคโคซาน

1. ละลายโคโคซานน้ำหนักโมเลกุลสูง ($CTS_{initial}$) จำนวน 2 กรัมในสารละลาย 50 มิลลิลิตรของกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร แล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจนโคโคซานละลายหมด
2. เทสารละลายโคโคซานลงในกรวยแยก ค่อยๆ หยดสารละลายโคโคซานลงในสารละลายผสมระหว่างไซเตียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 8% โดยน้ำหนัก) กับเอทานอลในอัตราส่วน 90:10 มิลลิลิตร
3. กรองเม็ดโคโคซานที่ได้แล้วล้างให้มีภาวะเป็นกลาง เก็บเม็ดโคโคซานไว้ในน้ำกลั่นก่อนนำไปใช้งาน
4. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดโคโคซานที่เตรียมได้แล้วหาค่าเฉลี่ย
5. หาความหนาแน่นของเม็ดโคโคซานที่เตรียมได้โดยใช้ขวด พิคโนมิเตอร์ (pycnometer) ขนาด 50 มิลลิลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของเม็ดโคโคซานแสดงดังสมการที่ 3.1

$$\text{Density} = \frac{W_1 - W_0}{(W_3 - W_0) - (W_2 - W_1)} \dots\dots\dots 3.1$$

- เมื่อ
- W_0 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์
 - W_1 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ + เม็ดโคโคซาน
 - W_2 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ + เม็ดโคโคซาน + น้ำ
 - W_3 = น้ำหนักของขวดพิกโนมิเตอร์ + น้ำ



รูปที่ 3.6 ขวดพิกโนมิเตอร์ (pycnometer)

6. วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของเม็ดโคโตซานที่เตรียมได้ในภาวะแห้งด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer ดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่อง Surface area and porosity analyzer

3.4.6 การเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

1. ผสมโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง ($CTS_{initial}$) และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยผลการแยกชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์มากที่สุดในอัตราส่วนโคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร เท่ากับ 90:10 , 70:30 และ 50:50 จำนวน 2 กรัมในสารละลาย 50 มิลลิลิตรของกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตรแล้วปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กจนโคโตซานละลายหมดและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรกระจายตัวในสารละลายเป็นอย่างดี

2. เทสารละลายลงในกรวยแยกค่อยๆ หยดสารละลายผสมลงในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้น 8% โดยน้ำหนัก) กับเอทานอลในอัตราส่วน 90:10 มิลลิลิตร

3. กรองเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ได้แล้วล้างให้มีภาวะเป็นกลาง เก็บเม็ดวัสดุเชิงประกอบไว้ในน้ำกลั่นก่อนนำไปใช้งาน

4. วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและหาความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ด้วยขวดพีคโนมิเตอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร

5. วิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ในภาวะแห้งด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer

3.4.7 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

3.4.7.1 เตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อม

1. เตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) ดังแสดงในรูป 3.8 วัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 534 นาโนเมตร การดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมที่เตรียมได้ควรอยู่ในช่วง 0 -1 ได้



รูปที่ 3.8 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer)

3. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120

3.4.7.2 การทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีของเม็ดโคโตะซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตะซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตะซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

1. เตรียมน้ำสีย้อมสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร

2. นำ 1 กรัมของเม็ดโคโคซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายของสีย้อม

3. นำขวดรูปชมพู่พร้อมสารละลายใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) ดังแสดงในรูป 3.9 เขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บน้ำสีย้อมตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมที่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) ทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มคงที่ (แสดงว่าเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ)

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เป็นจำนวน 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.4.7.3 การศึกษาอัตราส่วนของโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

1. เตรียมน้ำสีย้อมสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร

2. นำ 1 กรัมของเม็ดโคโคซานหรือเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากการใช้อัตราส่วนโคโคซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร เท่ากับ 90:10, 70:30 และ 50:50 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายของสีย้อม

3. นำขวดรูปชมพู่พร้อมสารละลายใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) เขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บน้ำสีย้อมตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมที่ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) ทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มคงที่ (แสดงว่าเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ)

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เป็นจำนวน 5 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

5. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ดีที่สุด เพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.9 เครื่องเขย่า (shaker)

3.4.7.4 การศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อม

1. เตรียมน้ำสีข้อมสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็น 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ
2. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่เลือกจากข้อ 3.4.7.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 1 กรัม
3. นำขวดรูปชมพู่พร้อมสารละลายใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บน้ำสีข้อมตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) เมื่อเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ
4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เป็นจำนวน 5 ครั้ง
5. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดูดซับสีข้อมเพื่อนำมาใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

3.4.7.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อม

1. เตรียมน้ำสีข้อมสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามภาวะที่ได้จากข้อ 3.4.7.4
2. นำเม็ดวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ได้จากข้อ 3.4.7.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ โดยแปรค่าปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เป็น 0.5, 1.0, 2.0 และ 3.0 กรัมตามลำดับ
3. นำขวดรูปชมพู่พร้อมสารละลายใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บน้ำสีข้อมตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นด้วยเครื่อง

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) ทุกๆ 1 ชั่วโมงจนกระทั่งปริมาณความเข้มข้นของสี ย้อมเริ่มคงที่

4. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 เป็นจำนวน 5 ครั้ง
5. วิเคราะห์หาปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ดูดซับสีย้อมไว้ได้มากที่สุดต่อกรัมของน้ำหนักเม็ด วัสดุเชิงประกอบที่ใช้

3.4.8 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับสีย้อม

เป็นการวิเคราะห์ระบบการดูดซับสีย้อมโดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษารูปแบบ สมการการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์ และสมการฟรุนดลิช โดยทำการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำสีย้อมสีรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60, 80, 100, 120 และ 140 มิลลิ- กรัมต่อลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ตามภาวะที่ได้ จากข้อ 3.4.7.4

2. ชั่งตัวดูดซับ (adsorbent) จำนวน 1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายสีย้อม

3. นำขวดรูปชมพู่พร้อมสารละลายใส่ลงในเครื่องเขย่า (shaker) เขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ ต่อนาทีที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเก็บน้ำสีย้อม ตัวอย่างไปวัดปริมาณความเข้มข้นด้วยเครื่อง สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS Spectrophotometer) เมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับ

4. ตัวดูดซับที่ใช้ในข้อ 2 ได้แก่ เม็ดไคโตซาน และเม็ดวัสดุเชิงประกอบสูตรที่ได้จากข้อ 3.4.7.3

5. นำค่าความเข้มข้นที่ได้มาคำนวณตามสมการของแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิช โดยใช้ สมการที่ 3.2 ในการหาค่า q_e

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)V}{m} \dots\dots\dots(3.2)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับเมื่อเข้าสู่สมดุล (mg/g)

C_i = ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมก่อนถูกดูดซับ (mg/L)

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมที่เหลือเมื่อเข้าสู่สมดุล (mg/L)

V = ปริมาตรสารละลายสีย้อม (L)

m = น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

4.1 น้ำหนักโมเลกุลของโคโตซาน

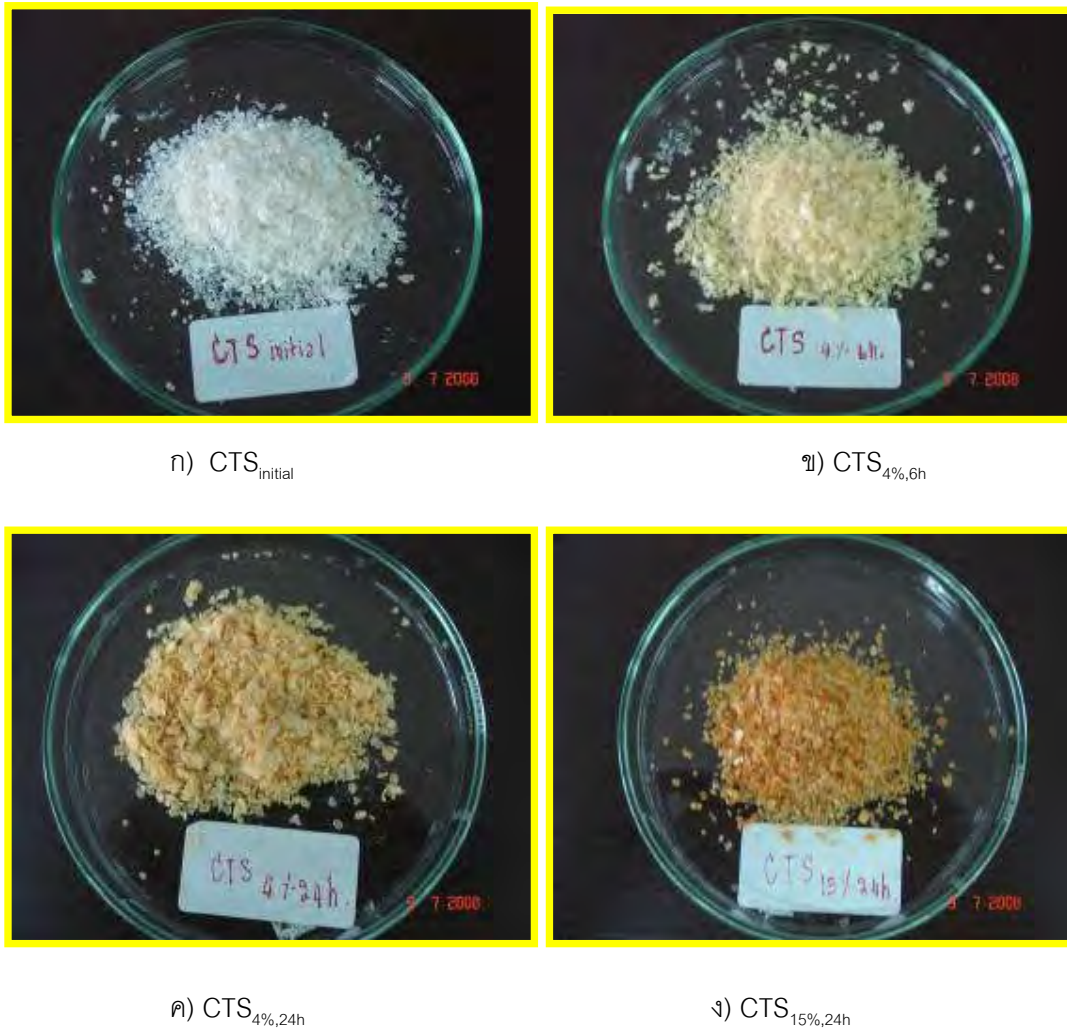
เมื่อนำโคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูง ($CTS_{initial}$) มาทำการไฮโดรลิซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ภาวะต่างๆ กันแล้วทำการวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลโคโตซานด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatography พบว่าที่ภาวะความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตรและใช้เวลาในการไฮโดรลิซิส 24 ชั่วโมง ($CTS_{15\%,24h}$) ได้โคโตซานที่มีค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (\overline{M}_n) และค่าการกระจายแบบผสม (polydispersity) ต่ำที่สุด คือ 14000 , 7900 และ 1.8 ตามลำดับดังแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w) น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (\overline{M}_n) และค่าการกระจายแบบผสม (polydispersity) ของโคโตซานตอนเริ่มต้น และภายหลังการไฮโดรลิซิสที่ภาวะต่างๆ กัน

ภาวะ	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w)	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (\overline{M}_n)	ค่าการกระจายแบบผสม (polydispersity)
$CTS_{initial}$	480,000	100,000	4.8
$CTS_{4\%,6h}$	130,000	29,000	4.5
$CTS_{4\%,24h}$	69,000	22,000	3.1
$CTS_{15\%,24h}$	14,000	7900	1.8

จากผลการทดลองในตาราง 4.1 พบว่าทั้งความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาในการไฮโดรลิซิสมีผลต่อน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซาน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบที่เวลาในการไฮโดรลิซิสเท่ากันคือ 24 ชั่วโมง ภาวะความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 15 โดยปริมาตรให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w) ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (\overline{M}_n) ที่ต่ำกว่า ภาวะความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ร้อยละ 4 โดยปริมาตร ทั้งนี้เพราะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงสามารถเกิดการย่อยสลายสายโซ่โคโตซานได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากันคือร้อยละ 4 โดยปริมาตร

แต่เวลาในการไฮโดรลิซิสต่างกันคือ 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง พบว่าการไฮโดรลิซิสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้ค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w) และค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงจำนวน (\overline{M}_n) ที่ต่ำกว่าเวลาในการไฮโดรลิซิส 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เพราะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสยาวนานกว่าทำให้เกิดการย่อยสลายสายโซ่โคโตซานได้มากกว่า ซึ่งลักษณะของโคโตซานตอนเริ่มต้นและหลังการทำปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสด้วยภาวะต่างๆ กันแสดงในรูป 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะภายนอกของโคโตซาน (ก) ตอนเริ่มต้นและ (ข-ง) หลังปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสด้วยภาวะต่างๆ กัน

จากภาพถ่ายลักษณะของโคโตซาน ตอนเริ่มต้นจะเห็นได้ว่าเป็นเกล็ดสีขาวเกาะตัวกันเป็นก้อน เมื่อผ่านการไฮโดรลิซิสด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดโคโตซานเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และมีสีเข้มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น

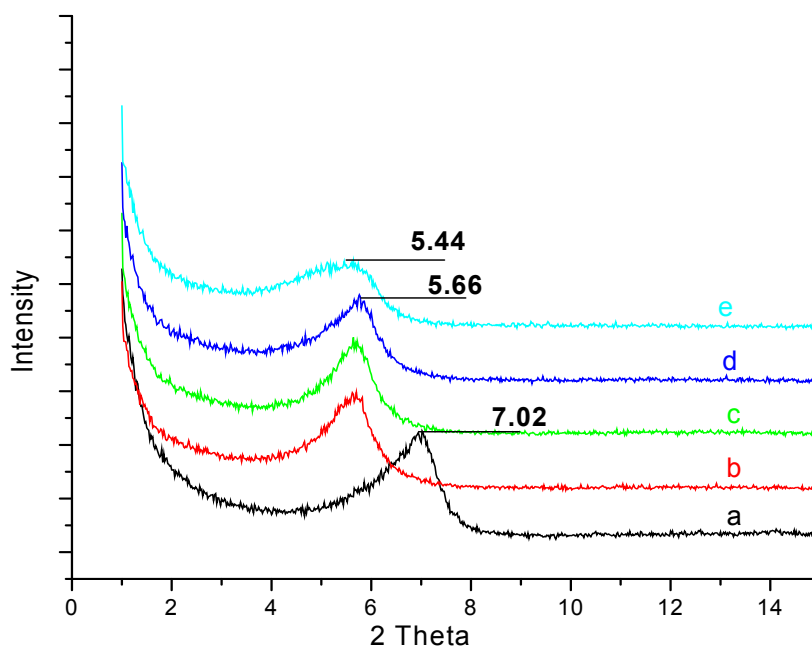
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมอดมอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction)

4.2.1 ผลการดัดแปรมอดมอริลโลไนต์ด้วยไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน

ขั้นตอนแรกได้ทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างของมอดมอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดช่องว่างหรือแกลเลอริระหว่างชั้นของแผ่นอะลูมิเนียมซิลิเกต (d-spacing) ซึ่งคำนวณจากองศาการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ได ของศาการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์จะวัดที่มุม 2θ ที่ปรากฏโดยอาศัยสมการของแบรอก (ทรรศพร, 2548)

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

ซึ่งผลการวิเคราะห์มอดมอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรและมอดมอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.2



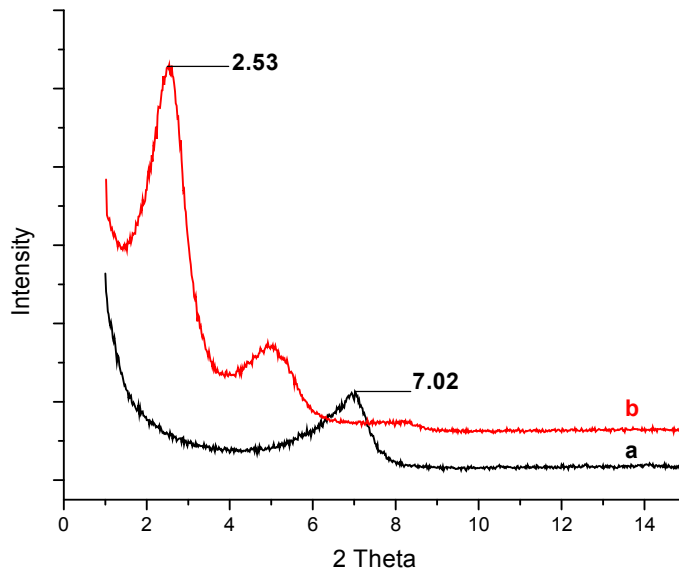
รูปที่ 4.2 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอดมอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร, (b) มอดมอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย $CTS_{initial}$, (c) มอดมอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย $CTS_{4\%6h}$, (d) มอดมอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย $CTS_{4\%24h}$ และ (e) มอดมอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย $CTS_{15\%24h}$

จากกราฟแสดงพีคการเบี่ยงเบนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร (กราฟ a) จะปรากฏพีค 2θ เท่ากับ 7.02 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 12.58 อังสตรอม เมื่อทำการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย $CTS_{initial}$, $CTS_{4\%6h}$ และ $CTS_{4\%24h}$ จะปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งเดียวกันเท่ากับ 5.66 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 15.62 อังสตรอม เท่ากันบ่งบอกว่าสายโซ่ของโคโตซานทั้ง 3 ช่วงน้ำหนักโมเลกุลสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ได้บางส่วนทำให้ช่องว่างเกิดการขยายตัวออก ซึ่งการเลื่อนตำแหน่งที่ปรากฏของพีค 2θ ไปยังมุม 2θ ที่ต่ำกว่าแสดงถึงการขยายตัวของแผ่นอะลูมิเนียมซิลิเกต ทำให้ชั้นผลึกห่างกันเกาะกันอย่างหลวมๆ เกิดเป็นโครงสร้างนาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอด (intercalated nanostructure) (S.F. Wang และคณะ, 2005) ส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วย $CTS_{15\%24h}$ (กราฟ e) จะปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งเท่ากับ 5.44 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 16.24 อังสตรอม ซึ่งมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย $CTS_{15\%24h}$ ให้ค่า d-spacing ที่สูงที่สุดเนื่องจากโคโตซาน $CTS_{15\%24h}$ มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักต่ำสุด ($M_w=14000$) จึงมีขนาดสายโซ่โมเลกุลที่สั้นที่สุดจึงสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างชั้นผลึกได้ดีทำให้ชั้นผลึกเกิดการแยกตัวออกได้มากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรก็ยังคงถือว่าการแยกตัวของชั้นผลึกไม่มากนัก จึงมีแนวคิดที่จะนำสารช่วยดัดแปรคือ ออกตะเดซิลเอมีน ($C_{18}H_{39}N$) เป็นเกลือควอเทอร์นารีของ อัลคิลแอมโมเนียม (quaternary ammonium salt) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์มาใช้ในการทดลองเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์

4.2.2 ผลการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซาน

การวิเคราะห์มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน ($C_{18}H_{39}N$) แสดงดังรูปที่ 4.3 จากกราฟแสดงพีคการเบี่ยงเบนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน (กราฟ b) จะปรากฏพีค 2θ เท่ากับ 2.53 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 34.88 อังสตรอม ซึ่งมากกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยโคโตซานทั้ง 4 ช่วงน้ำหนักโมเลกุลในขั้นตอนก่อนหน้านี้ เนื่องจากสายโซ่ของ ออกตะเดซิลเอมีน สั้นกว่าสายโซ่ของโคโตซานมากจึงทำให้สามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมซิลิเกตของมอนต์มอริลโลไนต์ได้ดีทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นผลึกได้ดีกว่าโคโตซาน จึงมีแนวคิดที่จะนำออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานมาใช้ร่วมกันในการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อให้เกิดการแยกชั้นผลึกได้ดียิ่งขึ้น โดยทำการศึกษาเป็น 2 วิธี คือ ดัดแปร

มอนต์มอริลโลไนต์ด้วย ออกตะเดซิลเอมีน และไคโตซานแบบขั้นตอนเดียว (in situ modification) และดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วย ออกตะเดซิลเอมีน และไคโตซานแบบ 2 ขั้นตอน (2-step modification) เพื่อเปรียบเทียบผลการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์

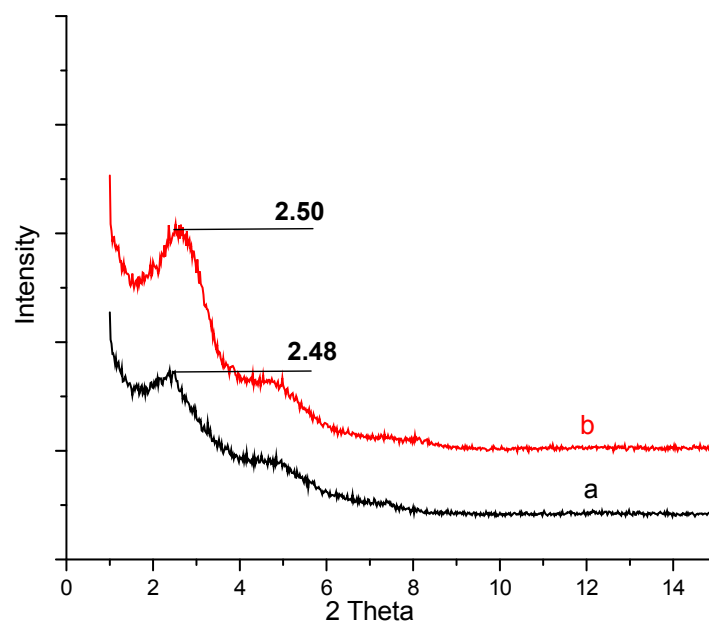


รูปที่ 4.3 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรและ(b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน ($C_{18}H_{39}N$)

ผลการเปรียบเทียบการแยกชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน และไคโตซานแบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอนด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันดังแสดงดังรูปที่ 4.4 จากกราฟแสดงพีคการเบี่ยงเบนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแบบขั้นตอนเดียวปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งเท่ากับ 2.48 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 35.58 อังสตรอม ส่วนพีคการเบี่ยงเบนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรแบบ 2 ขั้นตอนปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งเท่ากับ 2.50 และคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียม ซิลิเกตเท่ากับ 35.29 อังสตรอม ซึ่งค่าที่ได้นี้มีความใกล้เคียงกัน ซึ่งหมายถึงว่าทั้ง 2 วิธีสามารถแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ได้ในระดับเดียวกันแต่ได้ผลดีกว่าการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนหรือไคโตซานเพียงอย่างเดียว เนื่องจาก ออกตะเดซิลเอมีน

จะเข้าไปช่วยขยายช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตทำให้โคโตซานที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าสามารถแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างได้ดียิ่งขึ้น

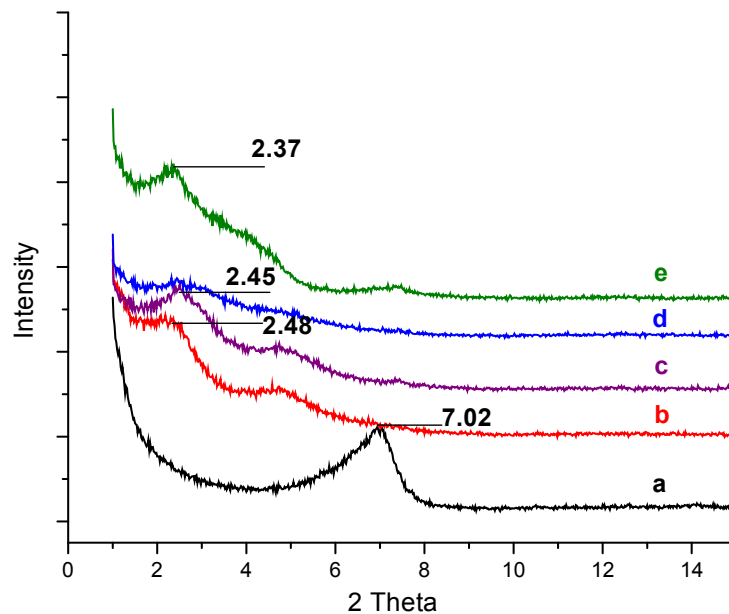
ซึ่งการเลื่อนตำแหน่งที่ปรากฏของพีค 2θ ไปยังมุม 2θ ที่ต่ำกว่าและพีคมีความกว้างมากขึ้น (intensity ลดลง) แสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตที่เกิดจากการซ้อนกันของชั้นผลึกลดลงเนื่องจากชั้นผลึกอยู่ห่างกันมาก เกิดเป็นโครงสร้างนาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอดถึงนาโนคอมพอสิตแบบแยกออกจากกัน (intercalated-exfoliated nanostructure) (S.F. Wang และคณะ, 2005) ดังนั้นจึงเลือกใช้การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานแบบชั้นตอนเดียว (in situ modification) มาใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกกว่า โดยโคโตซานที่นำมาใช้ในการศึกษาขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วย $CTS_{initial}$, $CTS_{4\% 6h}$, $CTS_{4\% 24h}$ และ $CTS_{15\% 24h}$



รูปที่ 4.4 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานแบบชั้นตอนเดียว และ (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและโคโตซานแบบ 2 ชั้นตอน

4.2.3 ผลของน้ำหนักโมเลกุลไคโตซานที่มีต่อการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์

ผลการแยกชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีนและไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันแบบขั้นตอนเดียว ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วย ออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{initial} (กราฟ b) และมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%6h} (กราฟ c) ปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกันคือ 2.48 และ 2.45 ตามลำดับ ซึ่งคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 35.58 และ 36.02 อังสตรอม แสดงถึงการขยายตัวของชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อเทียบกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ได้ดัดแปร (12.58 อังสตรอม) เกิดเป็นโครงสร้างนาโนคอมพอสิตแบบแทรกสอดถึงนาโนคอมพอสิตแบบแยกออกจากกัน (intercalated-exfoliated nanostructure) เนื่องจากออกตะเดซิลเอมีนและไคโตซานทั้ง 2 ช่วง น้ำหนักโมเลกุลสามารถแทรกเข้าไปในระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตได้ ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นผลึกมอนต์มอริลโลไนต์อย่างมาก



รูปที่ 4.5 แพทเทิร์นพีคการเบี่ยงเบนรังสีเอ็กซ์ของ (a) มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร, (b) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{initial}, (c) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%6h}, (d) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%24h} และ (e) มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{15%24h}

ในส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%24h} (กราฟ d) ไม่ปรากฏพีค 2θ เนื่องจากความเป็นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ถูกทำลายจนเกือบจะหมดไปแสดงการเกิดเป็นโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับนาโนคอมพอสิตแบบแยกออกจากกัน (nearly exfoliated nanostructure) ซึ่งถือเป็นมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสูตรที่มีผลการแยกตัวของชั้นผลึกมากที่สุด ซึ่งจะนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อนต่อไป แต่ในทางกลับกันและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{15%24h} (กราฟ e) กลับมีการปรากฏพีค 2θ ที่ตำแหน่ง 2.37 ซึ่งคำนวณค่าช่องว่างระหว่างชั้นอะลูมิเนียมซิลิเกตเท่ากับ 37.23 อังสตรอม และยังปรากฏพีคขนาดเล็กที่ตำแหน่งเดียวกับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรขึ้น แสดงถึงความเป็นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ อาจเนื่องมาจากไคโตซาน CTS_{15%24h} มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่สุด (\bar{M}_w : 14000) มีสายโซ่โมเลกุลสั้นจึงเกิดการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ออกได้ไม่สมบูรณ์

4.3 ลักษณะของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

4.3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Diameter) และความหนาแน่น (Density)

มอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรด้วยออกตะเดซิลเอมีน+CTS_{4%24h} จากขั้นตอนที่แล้วให้ผลการแยกชั้นของผลึกมากที่สุด จึงได้นำเอามอนต์มอริลโลไนต์ที่ดัดแปรดังกล่าวมาเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบกับไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูงในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ลักษณะของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากงานวิจัยแสดงในรูปที่ 4.6



ก) เม็ดไคโตซาน



ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของ (ก) เม็ดไคโตซาน และ (ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นเฉลี่ยของเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จากตารางจะพบว่าอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ใช้มากที่สุดคือ 50 เนื่องจากอัตราส่วนที่ 50:50 เป็นอัตราส่วนของโคโคซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสูงที่สุดที่สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบได้ ถ้าเพิ่มอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากขึ้นอีกจะทำให้อัตราส่วนของโคโคซานลดลงจนไม่สามารถห่อหุ้มอนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรไว้ได้ ในส่วนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ได้ขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลายผสมและลักษณะการแข็งตัวเมื่อหยดลงในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเอทานอล จึงทำให้มีรูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่แตกต่างกัน และในส่วนของความหนาแน่นจะพบว่ามีความมากกว่าน้ำซึ่งน้ำมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 จึงทำให้ทั้งเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบในทุกๆ อัตรา ส่วนจมน้ำ ทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในการบำบัดน้ำเสีย และจากผลการทดลองพบว่าความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความหนาแน่นของเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในอัตราส่วนที่ต่างกัน

อัตราส่วนโคโคซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (CTS : MMT)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)
100 : 0	5.23 ± 0.31	1.0129
90 : 10	5.87 ± 0.23	1.0203
70 : 30	6.51 ± 0.26	1.0255
50 : 50	5.29 ± 0.16	1.0301

4.3.2 พื้นที่ผิว (BET surface area) และขนาดของรูพรุนเฉลี่ย (Average pore diameter)

พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในอัตราส่วนที่ต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.3 โดยทำการทดสอบในภาวะแห้ง พบว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50 มีพื้นที่ผิวสูงกว่าเม็ดโคโคซานคือ 2.97 และ 2.63 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ จึงทำให้มีพื้นที่ในการเกิดการดูดซับ

สี่ข้อมได้มากกว่า และในส่วนของขนาดรูพรุนโดยทั่วไปจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ 1.รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) คือเล็กกว่า 20 อังสตรอม 2. รูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) อยู่ในช่วง 20-500 อังสตรอม และ 3. รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) คือใหญ่กว่า 500 อังสตรอมหรือเรียกอีกอย่างว่า nonporous (จิตนา,2542) ซึ่งรูพรุนของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดพบว่าเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) อยู่ในช่วง 20-500 อังสตรอม

ขนาดของรูพรุนนั้นจะแปรผกผันกับพื้นที่ผิว ในการดูดซับคือ เมื่อตัวดูดซับนั้นมีรูพรุนขนาดเล็ก จะทำให้มีปริมาณของรูพรุนอยู่เยอะจึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูง แต่เมื่อ ตัวดูดซับนั้นมีรูพรุนขนาดใหญ่ จะมีปริมาณของรูพรุนน้อยจึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับต่ำกว่า ตัวอย่างเช่น ผงถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 15-25 อังสตรอมจัดอยู่ในกลุ่มรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) แต่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับถึง 600-1600 ตารางเมตรต่อกรัม (Air Pollution Engineering Manual., 1992) ในการทดลองนี้เม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยต่ำที่สุดคือ 34.37 อังสตรอมจึงทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามขนาดของรูพรุนที่ได้จากการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการเตรียมเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (CTS : MMT)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (อังสตรอม)
100 : 0	2.63	35.47
90 : 10	2.26	54.72
70 : 30	2.39	46.22
50 : 50	2.97	34.37

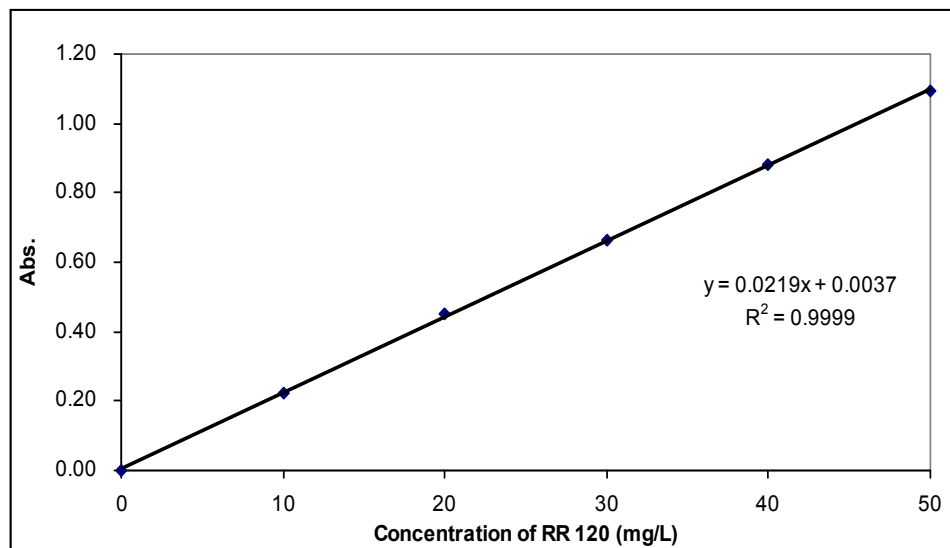
4.4 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

4.4.1 กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120

เมื่อทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ที่ความเข้มข้นเป็น 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 และนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารละลายสีย้อม ดังแสดงในรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 534 นาโนเมตร

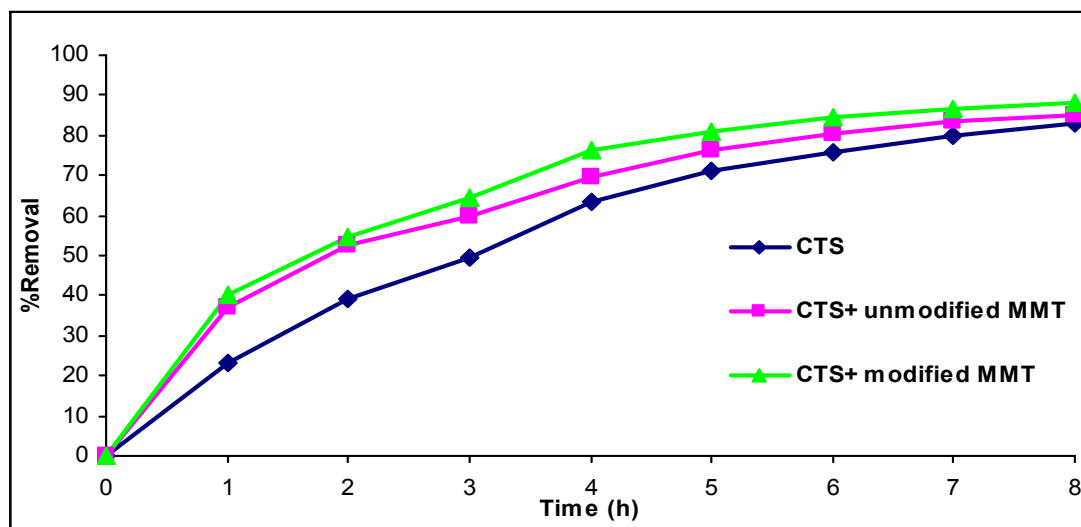
ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง (Abs.)
0	0.00
10	0.2212
20	0.4490
30	0.6651
40	0.8813
50	1.0964



รูปที่ 4.7 กราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120

4.4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของเม็ดโคโคซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร และเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ 1. เม็ดโคโคซาน 2. เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรอัตราส่วน 50:50 และ 3. เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรอัตราส่วน 50:50 ผลจากการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8

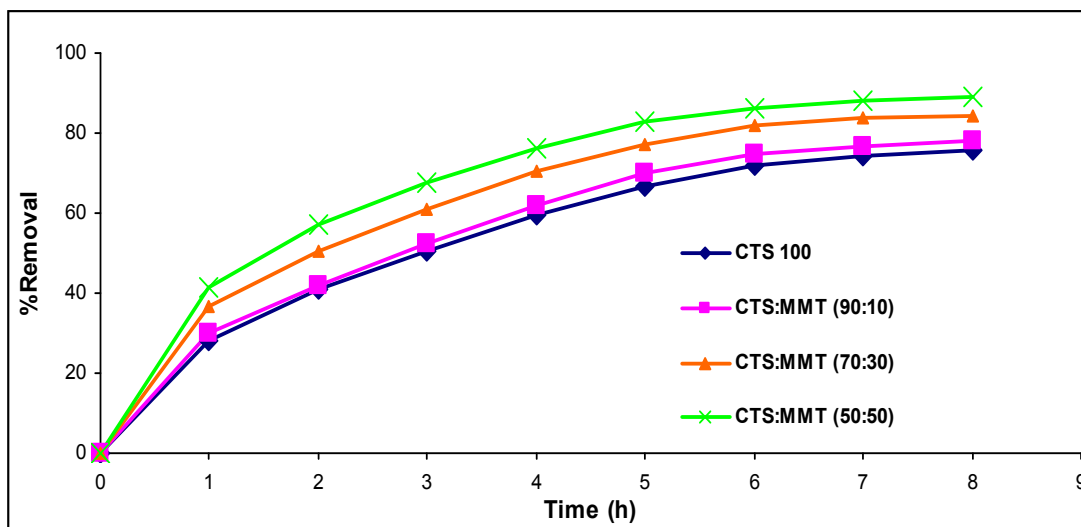


รูปที่ 4.8 เปรอ์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดโคโคซาน เม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

จากกราฟแสดงให้เห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานและมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปรและสุดท้ายคือเม็ดโคโคซานเพียงอย่างเดียว มีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมต่ำที่สุด แสดงว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟของโคโคซานได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ดัดแปร เพราะฉะนั้นในการทดลองขั้นตอนต่อไปจึงนำเอามอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่ได้มาผสมกับโคโคซานในอัตราส่วนต่างๆ กันเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบ เพื่อใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ

4.4.3 อัตราส่วนของไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานและ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าเม็ดวัสดุเชิงประกอบในทุกอัตราส่วนให้ค่า เปอร์เซ็นต์การขจัด (% Removal) สีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 สูงกว่าเม็ดไคโตซาน (CTS 100) และเปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร เนื่องจากตัวมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้ดีเมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรมากขึ้นจึงทำให้เม็ดวัสดุเชิงประกอบมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมได้ดีขึ้นตามลำดับ สังเกตได้ว่าอัตราส่วนไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร (CTS:MMT) เป็น 90:10 มีเปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมสูงกว่าเม็ดไคโตซานเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ CTS:MMT เป็น 50:50 จะทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อม สูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็น 50:50 เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาผลกระทบของค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณตัวดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมต่อไป



รูปที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม

จากการทดลองโดยทำการเก็บน้ำสีขุ่นไปวัดปริมาณความเข้มข้นที่เหลืออยู่ทุกๆ 1 ชั่วโมง พบว่าในช่วง 6 ชั่วโมงแรกเปอร์เซ็นต์การขจัดสีขุ่นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่หลังจาก 6 ชั่วโมงไปแล้ว แสดงถึงการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับสีขุ่นที่เหมาะสมคือ 6 ชั่วโมง

ซึ่งลักษณะของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ภายหลังจากดูดซับสีขุ่นจะเปลี่ยนจากเม็ดสีขาวไปเป็นเม็ดสีแดงดังแสดงดังรูปที่ 4.10 เนื่องจากอนุภาคของสีขุ่นมีแอกทีฟเรด 120 ถูกดูดซับอยู่ที่ผิว



ก) เม็ดไคโตซาน



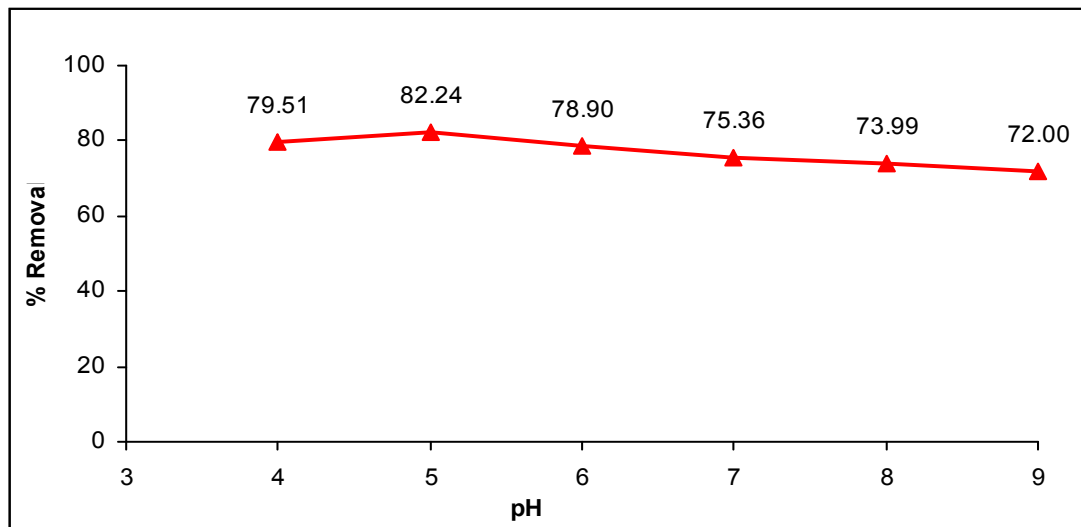
ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายของ (ก) เม็ดไคโตซาน และ (ข) เม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50 ภายหลังจากดูดซับสีขุ่นมีแอกทีฟเรด 120

4.4.4 อิทธิพลของค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีขุ่น

จากการทดลองหาภาวะความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีขุ่นมีแอกทีฟ พบว่าภาวะของสารละลายสีขุ่นที่เป็นกรดอ่อนๆ คืออยู่ในช่วงระหว่าง 4-6 จะทำให้เกิดการดูดซับสีขุ่นได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำหมู่เอมีโน ($-NH_2$) ของไคโตซานจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ($-NH_3^+$) การที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงนั้น เกิดจากแรงดึงดูดอิเล็กตรอนภายในระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับสีขุ่นที่มีประจุลบ (Chiou, M.S. และคณะ, 2002) แต่ที่ภาวะสารละลายสีขุ่นเป็นกรดมากขึ้น ($pH = 3$) พบว่าไม่เกิดการดูดซับและสารละลายมีความขุ่นเนื่องจากไคโตซานเกิดการละลายในภาวะเป็นกรด ทำให้เม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เป็นตัวดูดซับถูกทำลายไปบางส่วนจึงมีมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรหลุดออกมาผสมกับสารละลายสีขุ่น

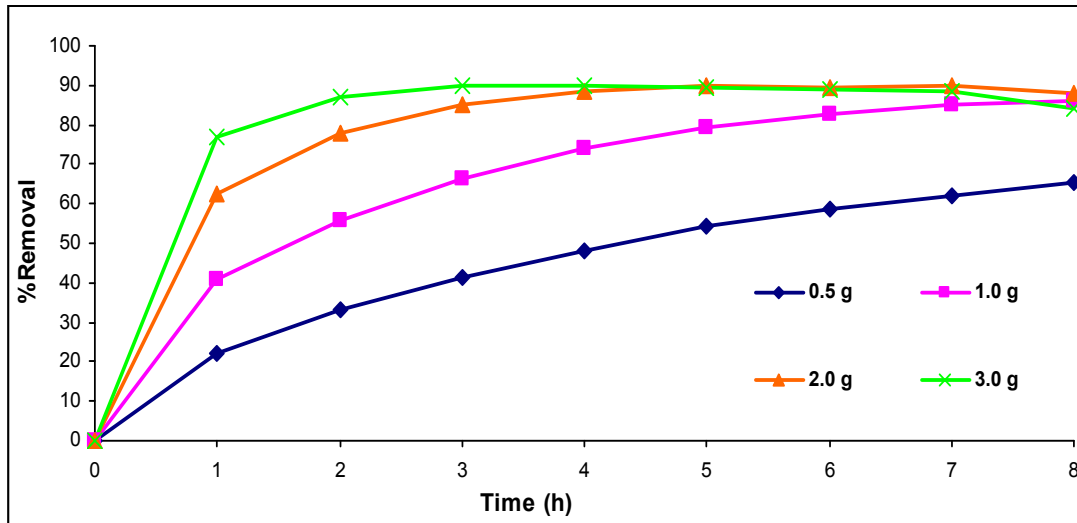
จากกราฟสังเกตได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำสีขุ่นเท่ากับ 5 จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การขจัดสีขุ่น (% Removal) ที่สูงที่สุดคือ ร้อยละ 82.24 ที่เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมงแต่ประสิทธิภาพการดูดซับสีขุ่นของวัสดุเชิงประกอบจะค่อยๆ ลงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสีขุ่นเท่ากับ 5 จึงเป็นภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีขุ่นรีแอกทีฟเรด 120 สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับและไอโซเทอรั่มของการดูดซับต่อไป



รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์การขจัดสีขุ่นรีแอกทีฟเรด 120 ต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็น 50:50 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีขุ่นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง

4.4.5 อิทธิพลของปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีขุ่น

จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีขุ่นเมื่อมีปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent) แตกต่างกัน พบว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับคือเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเท่ากับ 50:50 เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เปอร์เซนต์การขจัดสีขุ่น (% Removal) เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงชั่วโมงแรกๆ ของการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 4.12

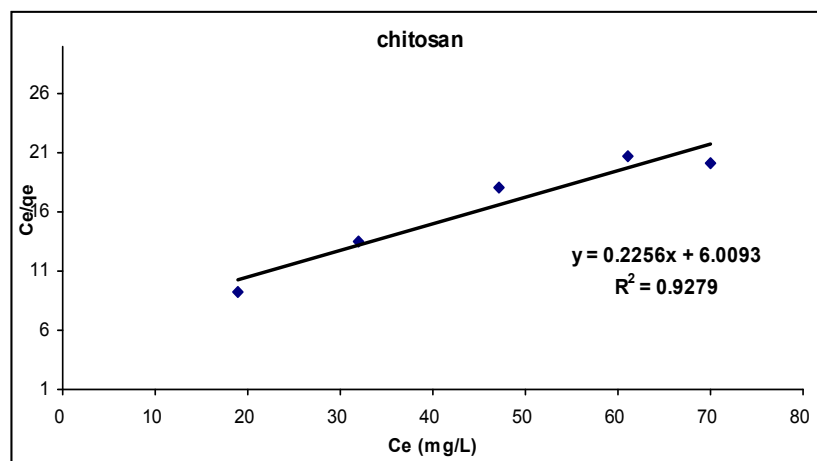


รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์การขจัดสีย้อม มริแอกทีฟเรด 120 ต่อเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเท่ากับ 50:50 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ปริมาตร 50 มิลลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับแตกต่างกันคือ 0.5 , 1 , 2 และ 3 กรัม

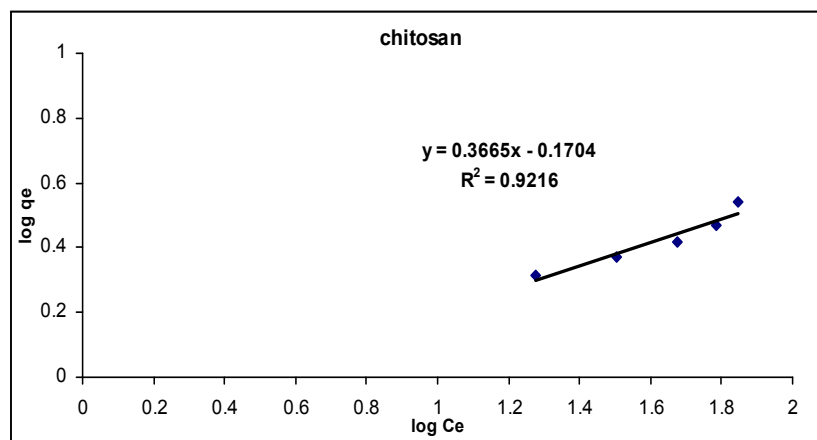
จากกราฟสังเกตได้ว่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อมที่เวลาในการดูดซับ 3 ชั่วโมง ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัมจะให้ค่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อม สูงที่สุดคือร้อยละ 89.94 สำหรับปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมให้ค่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อม คือร้อยละ 85.24 ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัมให้ค่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อม เป็นร้อยละ 66.32 และปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมจะให้ค่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อมต่ำที่สุดคือ ร้อยละ 41.51 ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดการดูดซับสีย้อมให้มากขึ้น แต่หลังจาก 3 ชั่วโมงไปแล้วจะพบว่าที่ปริมาณตัวดูดซับ 3 กรัมเริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับจึงทำให้ค่าเปอร์เซนต์การขจัดสีย้อมคงที่และมีการลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการคายการดูดซับ (desorption) เกิดขึ้น นอกจากนั้นยังสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุลของการดูดซับลดลง คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัมยังไม่เข้าสู่สมดุลเมื่อใช้เวลาในการดูดซับ 8 ชั่วโมง ปริมาณตัวดูดซับ 1, 2 และ 3 กรัม เริ่มเข้าสู่สมดุลการดูดซับเมื่อเวลาในการดูดซับเป็น 6, 4 และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับเวลาในการเข้าสู่สมดุลที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการศึกษาไอโซเทอริกการดูดซับในขั้นตอนต่อไป

4.5 ผลการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

จากการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อมรีแอกทีฟเป็น 60, 80, 100, 120, และ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 กรัม และเวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ระบบการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนตมอริลโลไนต์ดัดแปรที่อัตราส่วน 50:50 โดยอาศัยพื้นฐานทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษารูปแบบสมการการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช แสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14

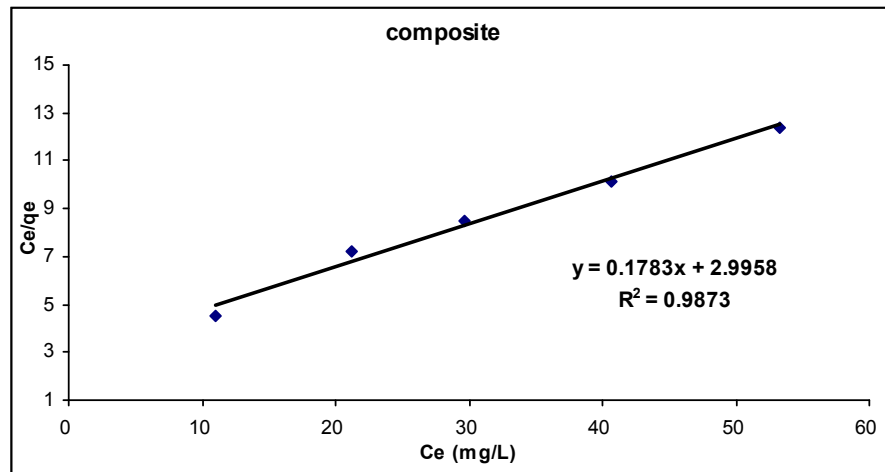


(ก)

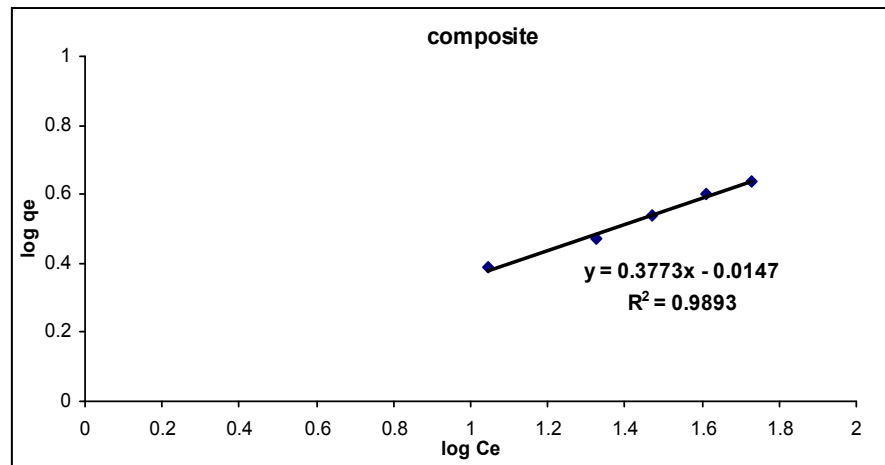


(ข)

รูปที่ 4.13 สมการการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ด้วยเม็ดโคโตซานตาม (ก) สมการของแลงเมียร์และ(ข) สมการของฟรุนดลิช



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 สมการการดูดซับสี่รีแอกทีฟเฟรด 120 ด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (ก) ตามสมการของแลงเมียร์ และ (ข) สมการของฟรูนดลิช

จากกราฟรูปที่ 4.13 และ 4.14 สามารถคำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (X_m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ค่าคงที่ของการดูดซับ (b) ตามสมการของแลงเมียร์ ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย (K) ค่าคงที่ของการดูดซับ (1/n) ตามสมการของฟรูนดลิช และค่า R^2 (correlation coefficient) ของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช จากการดูดซับสีย้อมที่ฟ เรด 120 ด้วยไคโตซาน และวัสดุเชิงประกอบ

ชนิดของตัวดูดซับ	สมการแลงเมียร์			สมการฟรุนดลิช		
	$C_e/q_e = (1/bX_m) + (C_e/X_m)$			$\log q_e = \log K + (1/n) \log C_e$		
	X_m (mg/g)	b	R^2	K	1/n	R^2
เม็ดไคโตซาน	4.4326	0.0375	0.9279	0.8433	0.3665	0.9216
เม็ดวัสดุเชิงประกอบ	5.6085	0.0595	0.9873	0.9854	0.3773	0.9893

ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายกลไกการดูดซับสีย้อมที่ภาวะสมดุลที่เกิดขึ้น โดยอาศัยไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ กับความเข้มข้นของสารหรือไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ (ปิยรัตน์,2550) และค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเบี่ยงเบนจากทฤษฎีมากน้อยเพียงใด ถ้าค่า R^2 มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าเป็นไปตามทฤษฎีนั้น (รัชนี,2548) จากข้อมูลที่ได้ในตารางที่ 4.5 พบว่าการดูดซับสีย้อมที่ฟเรด 120 ด้วยเม็ดไคโตซานสอดคล้องกับทั้งสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชเนื่องจากให้ค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกันคือ 0.9279 และ 0.9216 ตามลำดับ การดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟจึงสามารถเกิดได้ทั้งแบบชั้นเดียว (monolayer) และแบบหลายชั้น (multilayer) เนื่องจากเม็ดไคโตซานที่ใช้เป็นตัวดูดซับนั้นมีทั้งหมู่ฟังก์ชันคือ แอมโมเนียม ($-NH_3^+$) ซึ่งสามารถเกิดแรงดึงดูดทางเคมีกับสีย้อมได้และยังมีความเป็นรูพรุนที่ช่วยให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับตัวดูดซับอีกด้วย ในส่วนของการดูดซับสีย้อมด้วยวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรก็เป็นไปในทางเดียวกัน แต่มีความสอดคล้องกับทั้งสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิชมากกว่าไคโตซานเนื่องจากให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9873 และ 0.9893 ตามลำดับซึ่งใกล้เคียงกับ 1 มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับได้สูงสุด (X_m) ตามสมการของแลงเมียร์พบว่า เม็ดวัสดุเชิงประกอบสามารถดูดซับสีย้อมได้มากกว่าเม็ดไคโตซาน 1.1759 มิลลิกรัมต่อกรัมคิดเป็นร้อยละ 26.53 เมื่อมีอัตราส่วนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรในวัสดุเชิงประกอบเท่ากับ 50:50 จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรลงในไคโตซานเพื่อเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบสำหรับใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟนั้นสามารถลดปริมาณการใช้ไคโตซานลง เพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ และยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสาร ออกตะเดซิลเอมีน และไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุลในช่วงต่างๆ กัน เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์เป็นอนุภาคนาโนเมตร สำหรับนำไปเตรียมเป็นวัสดุเชิงประกอบกับไคโตซานน้ำหนักโมเลกุลสูงเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานหลังจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ขึ้นอยู่กับทั้งความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และเวลาที่ใช้ในการไฮโดรลิซิส ซึ่งไคโตซานที่ได้มีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยเชิงน้ำหนัก (\overline{M}_w) เท่ากับ 480000, 130000, 69000 และ 14000 ตามลำดับ
2. มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการดัดแปรด้วย ออกตะเดซิลเอมีน+ไคโตซาน ($\overline{M}_w = 69000$) แบบขั้นตอนเดียวให้ผลการแยกชั้นผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ออกได้มากที่สุดเกิดเป็นโครงสร้างที่ใกล้เคียงกับนาโนคอมพอสิตแบบแยกออกจากกัน (exfoliated nanostructure)
3. การเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรลงในไคโตซานเพื่อเตรียมเป็นเม็ดวัสดุเชิงประกอบไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ได้ดีกว่าไคโตซานเพียงอย่างเดียว
4. ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของไคโตซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร เมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรทำให้วัสดุเชิงประกอบสามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ได้มากขึ้น
5. ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 คือที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 5 และเมื่อปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่ใช้เป็นตัวดูดซับ เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 เพิ่มขึ้น ลดเวลาในการเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ
6. การดูดซับสีรีแอกทีฟเฟรด 120 ด้วยวัสดุเชิงประกอบไคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรสอดคล้องกับทั้งสมการแลงเมียร์และสมการฟรุนดลิช

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมสิ่งทอที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมชนิดต่างๆ มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับด้วยเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโคซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรที่เตรียมได้จากการทดลองนี้
2. วิเคราะห์ต้นทุนในการเตรียมเม็ดวัสดุเชิงประกอบ ด้วยวิธีการที่กล่าวมาว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ในการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. การกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากการย้อมผ้า. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงาน
พอกย้อม. หน้า 17-26. กรุงเทพมหานคร. 2542
- ขจรศักดิ์ โสภากาจารย์. โครงการสมรรถนะการบำบัดสีย้อมโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันและการดูดติด
ผิว. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2549
- จินตนา ชำนาญบุญธรรม. การดูดซับของสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542
- ชนิตา เสมรัตน์. ประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดย
ใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543
- ทรรศพร พิศรูป. การดัดแปรมอนต์มอริลโลไนต์สำหรับสารเคลือบผิวอะคริลิก. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548
- เบญจวรรณ สุทธิไชย. การบำบัดน้ำเสียสีย้อมประเภทละลายน้ำด้วยเกลือไคโตซานจากเปลือกกุ้ง.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547
- ปิยรัตน์ บำรุงสาลี. การย่อยสลายของไคโตซานในดินภายหลังจากการดูดซับสีย้อมแอซิดกรีน 25.
วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550
- มณฑา จันทร์เกตุเอี้ยด. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทร
วิโรฒประสานมิตร. 2541
- มนตรี รัตนวิจิตร, ชัชวาล งามศรี และสุพรรณิ บุญเรือง. การเตรียมผ้า การย้อม การพิมพ์และการตกแต่ง
สำเร็จ. คู่มือวิชาการสิ่งทอ. หน้า 241-242. กรุงเทพมหานคร. 2541
- เยาวภา ไหวพริบ. การผลิตไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชา
เทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534
- รัชนี ทรัพย์มากมี. การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมละลายน้ำได้ด้วยไคโตซานชนิดดัดแปร. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2548

รัตนารุจิรวินิช.การดูดซับสีข้อมประเภทยาลายน้ำได้บนไคตินและไคโตซาน. จุฬารวิจัย

20 (มีนาคม-เมษายน 2544): 18-21.

วินัย สมบูรณ์.การบำบัดโลหะหนักด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติ.รายงานสัมมนาระดับปริญญาเอก สาขาวิชา
เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี .หน้า

10-18.2541

วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา.อุตสาหกรรมสิ่งทอไทย.กรุงเทพมหานคร :โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย.2544

อัจฉราพร ไสละสูต และชีเวรุ วาตานาเบ.วิศวกรรมสิ่งทอ.สมาคมส่งเสริมความรู้ด้านเทคนิคระหว่าง

ประเทศ.2520

ภาษาอังกฤษ

Aiba, S. Int. Biological Macromolecul.15.(1993): 241-245

Alley, E.R. Water quality control handbook.New York : Mcgraw-Hill.,2000

Arica, M.Y. and Bayramoglu, G. Biosorption of Reactive Red-120 dye from aqueous
solution by native and modified fungus biomass preparations of *Lentinus sajor-*
caju.Hazardous Materials.149.(2007): 499-507

Chang, M.Y. and Juang, R.S. Adsorption of tannic acid, humic acid and dyes from water
using the composite of chitosan and activated clay. Colloid and Interface
Science.278.(2004): 18-25.

Chiou, M.S. and Li, H.Y. Equilibrium and Kinetic modeling of adsorption of reactive dye on
crosslinked chitosan beads. Hazardous Materials.B93.(2002): 233-248

Danals, S.L. Environmental Soil Chemistry.USA.Academic press.(1995): 99-139

Eckenfelder, W.W. Industrial Water Pollution Control 2nd ed. New York.CBI Publishing.(1996)
: 263-291

Faust, S.D. and Aly, O.M. Adsorption Process for Water Treatment.New York.
Butterworth.1987

Hon, D.N.S. Chitin and chitosan :Medical application in Polysaccharides in Medicinal
Application.New York.Marcel Dekker.(1996): 631-649

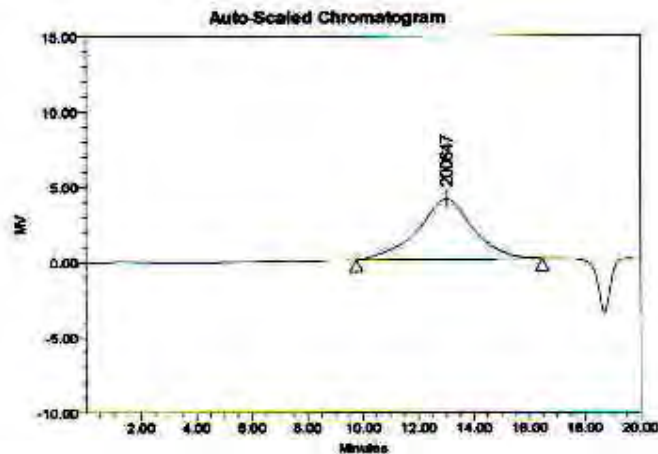
Kenneth, E.N. and Vassilios, G. Adsorption technology for air and water pollution
control.Lewis publisher.1992

- Knorr, D. Recovery and utilization of chitin and chitosan in food processing waste management. Food Technology.1.(1991): 114-122
- Kupongsak, S. Deacetylated chitin used as adsorbent in clarification of pineapple syrup production. Master's Thesis. Agriculture. Aquatic Systems and Engineering Program. Asian Institute of Technology. 1995
- Miyoshi, H., Shimura, K., and Kasuki, O. Characterization of some fungal chitosan. Bioscience Biotechnology and Biochemistry.56.(1992): 1901-1905
- Muzzarelli, R.A.A. Chitin. Great Britain. Pergamon Press.(1977): 309
- Noll, K.E., Gounaris, V. and Hou, W.S. Adsorption Technology for Air and Water Pollution control. United States. 1992
- Said, O.B., Shalmor, M.B. and Egila, L.N. A Note on the Binding of Nickel and Copper Ions by Cellulose Material. Bioresource Technology.43.(1993): 63-65
- Sunstorm, D.W. and Klei, H.B. Wastewater Treatment. England. Cliffs Prentice Hall. 1997
- Wang, L and Wang, A. Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite. Hazardous Materials.147.(2007): 979-985.
- Wang, S.F., Shen, L., Tong, Y.J., Chen, L., Phang, I.Y., Lim, P.Q. and Liu T.X. Biopolymer chitosan/montmorillonite nanocomposites: Preparation and characterization Polymer Degradation and stability.90.(2005): 123-131
- Wang, W. and Lin, W. Huaxue Tongbao.9.(1989): 41-44
- Wong, Y.C., Szeto, Y.S., Cheung, W.H. and McKay, G. Adsorption of acid dyes on chitosan-equilibrium isotherm analyses. Process Biochemistry.39.(2004): 693-702.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

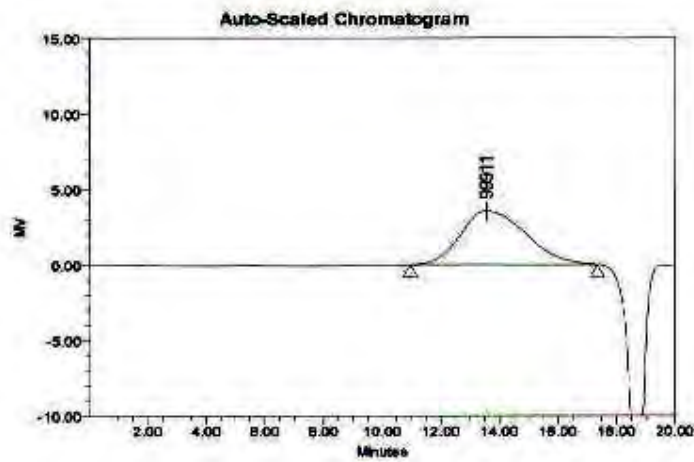
ผลการหาค่าน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของโคโตซานภายหลังการไฮโดรลิซิส
ด้วยเครื่อง Gel Permeation Chromatography



GPC Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	101348	482130	200647	1834190	3605826	4.757190

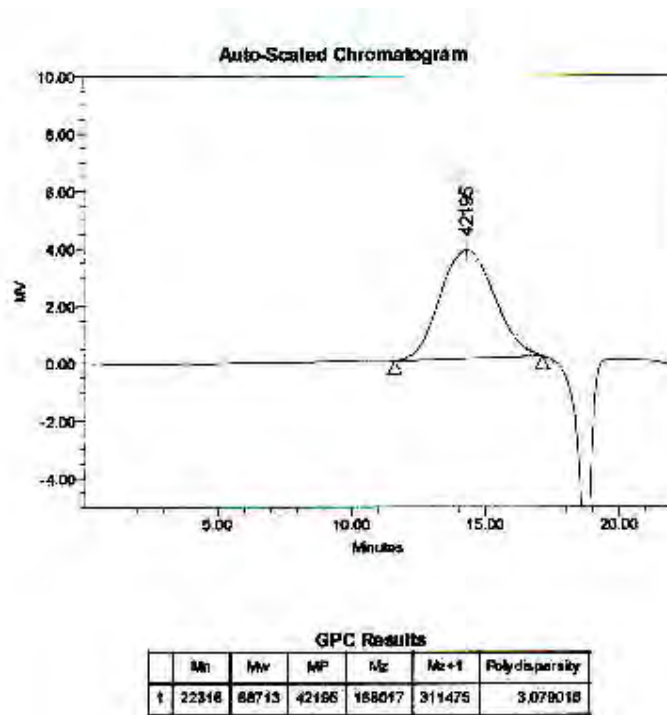
รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซาน (CTS_{initial})



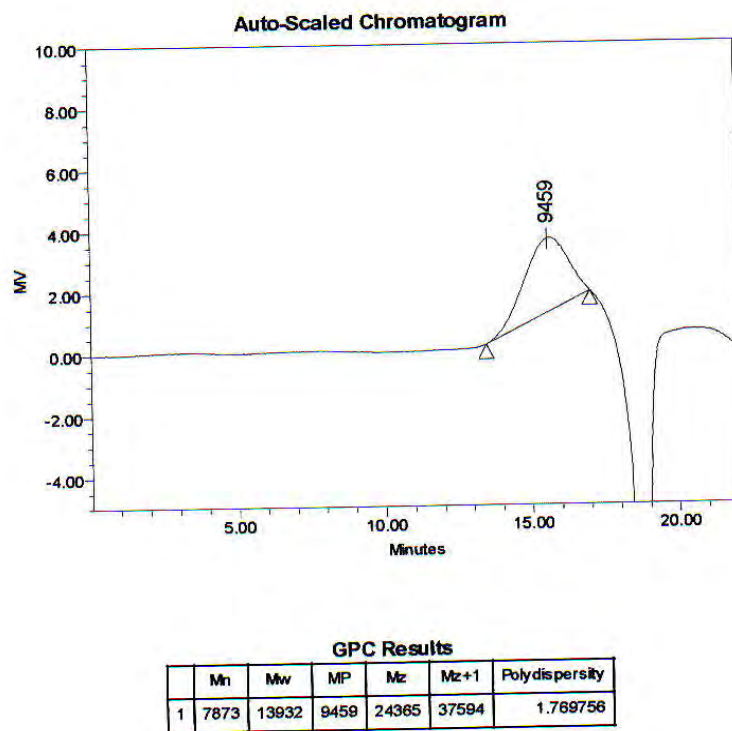
GPC Results

	Mn	Mw	MP	Mz	Mz+1	Polydispersity
1	29435	133617	98811	377498	740357	4.539360

รูปที่ ก.2 ผลการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซาน (CTS_{4%6h})



รูปที่ ก.3 ผลการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน (CTS_{4%}24h)



รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบน้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน (CTS_{15%}24h)

ภาคผนวก ข

คุณลักษณะของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบโคโตซานและมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปร

ตารางที่ ข.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

อัตราส่วน (CTS : MMT)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)					ค่าเฉลี่ย
100 : 0	5.55	5.55	5.10	5.10	4.85	5.23±0.31
90 : 10	5.90	5.70	6.20	5.60	5.95	5.87±0.23
70 : 30	6.90	6.60	6.25	6.30	6.50	6.51±0.26
50 : 50	5.20	5.25	5.50	5.10	5.40	5.29±0.16

ตารางที่ ข.2 ความหนาแน่นของเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

อัตราส่วน (CTS : MMT)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)					ค่าเฉลี่ย
100 : 0	1.0121	1.0132	1.0145	1.0128	1.0119	1.0129
90 : 10	1.0191	1.0210	1.0178	1.0242	1.0198	1.0203
70 : 30	1.0205	1.0287	1.0215	1.0324	1.0248	1.0255
50 : 50	1.0300	1.0284	1.0324	1.0344	1.0255	1.0301

ระดับการบวมน้ำ (Degree of swelling)

$$\text{Degree of swelling} = (W_{\text{wet bead}} - W_{\text{dry bead}}) / W_{\text{wet bead}} \times 100$$

เมื่อ $W_{\text{wet bead}}$ คือ น้ำหนักเปียกของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (กรัม)
 $W_{\text{dry bead}}$ คือ น้ำหนักแห้งของเม็ดโคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ (กรัม)

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรรูพรุนของเม็ดโคโคซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบ

รูปที่ ค.1 เม็ดโคโคซาน

Date: 09/11/2008		Page 1			
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19					
Sample ID	MMT : CTS (0 : 100)				
Description	RN 141/51				
Comments					
Sample Weight	0.5614 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	IC
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	13.0 hrs	Analysis Time	137.5 min
Cross Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	09/10/2008 2
NonIdeality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS891003.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.633E+00	m ² /g
Single Point BET.....	1.110E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	-7.517E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.522E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.906E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.593E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.081E+00	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	2.633E+00	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.624E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1638.5 Å at P/Po = 0.98814.....	2.335E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.551E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.649E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.551E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.649E-03	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.511E-03	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.657E-03	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.483E-04	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	2.564E-04	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	2.793E-04	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	3.547E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.215E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.311E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.215E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.311E+01	Å
DR Method Micro Pore Width	2.531E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.588E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.999E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 773.65 mm Hg
Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

รูปที่ ค.2 เม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของโคโตนานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรเป็น 90 : 10

Date: 09/11/2008		Page: 1			
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19					
Sample ID	NMT : CTS (10 : 90)				
Description	RN 141/51				
Comments					
Sample Weight	0.6086 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	13.0 hrs	Analysis Time	140.6 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	09/11/2008 07
Nonideality	6.580E-05	Equip Time	3	File Name	AS891101.RAW
Molecular Wt	29.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY					
SURFACE AREA DATA					
Multipoint BET.....	2.265E+00	m ² /g			
Single Point BET.....	1.257E+00	m ² /g			
Langmuir Surface Area.....	6.209E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.796E+00	m ² /g			
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.976E+00	m ² /g			
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.876E+00	m ² /g			
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.153E+00	m ² /g			
t-Method External Surface Area.....	2.265E+00	m ² /g			
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g			
DR Method Micro Pore Area.....	2.161E+00	m ² /g			
PORE VOLUME DATA					
Total Pore Volume for pores with Diameter less than 2047.3 Å at P/Po = 0.99054.....	3.098E-03	cc/g			
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	4.742E-03	cc/g			
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	4.260E-03	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	4.242E-03	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	4.260E-03	cc/g			
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	4.190E-03	cc/g			
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	4.255E-03	cc/g			
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g			
DR Method Micro Pore Volume.....	7.467E-04	cc/g			
RK Method Cumulative Pore Volume.....	3.176E-04	cc/g			
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.467E-04	cc/g			
PORE SIZE DATA					
Average Pore Diameter.....	5.472E+01	Å			
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.480E+01	Å			
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.319E+01	Å			
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.480E+01	Å			
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.319E+01	Å			
DR Method Micro Pore Width.....	2.424E+02	Å			
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å			
HK Method Pore Width (Mode).....	1.556E+01	Å			
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.914E+01	Å			
DATA REDUCTION PARAMETERS					
Thermal Transpiration : ON					
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å					
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm					
Last Po Acquired 768.98 mm Hg					
Additional Initialization Information Not Recorded.					
BJH/DH Moving Average Size : 1					

รูปที่ ค.3 เม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของโคโตนานต่อมอนต์มอริลไลไนต์ดัดแปรเป็น 70 : 30

Date: 09/11/2008		Page 1			
Quantachrome Corporation Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report Autosorb for Windows® Version 1.19					
Sample ID	MMT : CTS (30 : 70)				
Description	RN 141/51				
Comments					
Sample Weight	0.4913 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	12.0 hrs	Analysis Time	161.1 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	09/11/2008 10
Nonideality	6.580E-05	Equil Time	3	File Name	AS891102.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				
AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY					
SURFACE AREA DATA					
Multipoint BET.....	2.386E+00	m ² /g			
Single Point BET.....	1.257E+00	m ² /g			
Langmuir Surface Area.....	-3.598E+01	m ² /g			
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.681E+00	m ² /g			
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.511E+00	m ² /g			
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.779E+00	m ² /g			
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.715E+00	m ² /g			
t-Method External Surface Area.....	2.386E+00	m ² /g			
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g			
DR Method Micro Pore Area.....	2.674E+00	m ² /g			
PORE VOLUME DATA					
Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1980.9 Å at P/Po = 0.99022.....	2.757E-03	cc/g			
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.719E-03	cc/g			
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.986E-03	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.543E-03	cc/g			
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.695E-03	cc/g			
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.698E-03	cc/g			
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	4.007E-03	cc/g			
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g			
DR Method Micro Pore Volume.....	9.503E-04	cc/g			
NK Method Cumulative Pore Volume.....	3.108E-04	cc/g			
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.448E-04	cc/g			
PORE SIZE DATA					
Average Pore Diameter.....	4.622E+01	Å			
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.937E+01	Å			
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.812E+01	Å			
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	2.937E+01	Å			
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	1.812E+01	Å			
DR Method Micro Pore Width.....	2.809E+02	Å			
NK Method Pore Width (Mode).....	1.912E+01	Å			
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.617E+01	Å			
DATA REDUCTION PARAMETERS					
Thermal Transpiration : ON					
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å					
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm					
Last Po Acquired 769.49 mm Hg					
Additional Initialization Information Not Recorded.					
BJH/DH Moving Average Size : 1					

รูปที่ ค.4 เม็ดวัสดุเชิงประกอบที่มีอัตราส่วนของโคโคซานต่อมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรเป็น 50 : 50

Date: 09/11/2008

Page 1

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® Version 1.19

Sample ID	MMT : CTS (50 : 50)				
Description	RN 141/S1				
Comments					
Sample Weight	0.5217 g	Outgas Temp	100.0 °C	Operator	JC
Adsorbate	NITROGEN	Outgas Time	13.0 hrs	Analysis Time	129.7 min
Cross-Sec Area	16.2 Å ² /molecule	P/Po Toler	2	End of Run	09/11/2008 13
Nonideality	6.580E-05	Equal Time	3	File Name	AS891103.RAW
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Bath Temp.	77.35		
Station #	1				

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.967E+00	m ² /g
Single Point BET.....	1.251E+00	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	9.003E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.907E+00	m ² /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.079E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	2.990E+00	m ² /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.247E+00	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	2.967E+00	m ² /g
l-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	2.211E+00	m ² /g

PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Diameter less than 1976.3 Å at P/Po = 0.99029.....	2.550E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.491E-03	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.539E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.346E-03	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.158E-03	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.465E-03	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	3.554E-03	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	7.856E-04	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	2.927E-04	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	3.252E-04	cc/g

PORE SIZE DATA

Average Pore Diameter.....	3.437E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.958E+01	Å
BJH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.313E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Diameter (Mode).....	1.958E+01	Å
DH Method Desorption Pore Diameter (Mode).....	2.313E+01	Å
DH Method Micro Pore Width.....	2.580E+02	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.920E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.933E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	3.866E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : ON
Effective Molecule Diameter (D) 3.5400 Å
Effective Cell Stem Inner Diameter (d) 4.0000 mm
Last Po Acquired 764.40 mm Hg
Additional Initialization Information NOT Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

ภาคผนวก ง

เปอร์เซ็นต์การขจัด (% Removal) สีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120

$$\% \text{ Removal} = (C_i - C_f) / C_i \times 100$$

- เมื่อ C_i คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
 C_f คือ ความเข้มข้นสุดท้ายที่เวลาต่างๆ ของสารละลายสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ ง.1 ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

ชั่วโมง	CTS 100	CTS:MMT (90:10)	CTS:MMT (70:30)	CTS:MMT (50:50)
0	48.8359	49.3427	49.2449	49.3173
1	35.0067	34.572	31.3026	28.9748
2	28.7406	28.6555	24.4078	21.1734
3	24.2336	23.4569	19.2922	16.067
4	19.8632	18.6899	14.6254	11.8168
5	16.2397	14.7484	11.1954	8.5536
6	13.8181	12.3565	8.9751	6.6996
7	12.6058	11.5137	8.0432	5.8924
8	11.9243	10.8668	7.6951	5.4722

ตารางที่ ง.2 เปอร์เซ็นต์การขจัด (% Removal) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) ของเม็ดไคโตซานและเม็ดวัสดุเชิงประกอบที่อัตราส่วนต่างๆ กัน

ชั่วโมง	CTS 100	CTS:MMT (90:10)	CTS:MMT (70:30)	CTS:MMT (50:50)
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	28.3177	29.9349	36.4348	41.2482
2	41.1486	41.9256	50.4359	57.0670
3	50.3775	52.4613	60.8240	67.4212
4	59.3266	62.1223	70.3007	76.0392
5	66.7464	70.1103	77.2659	82.6560
6	71.7050	74.9578	81.7746	86.4153
7	74.1874	76.6658	83.6669	88.0521
8	75.5829	77.9769	84.3738	88.9041

ตารางที่ ง.3 ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อกรัม) ที่ลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) โดยใช้ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบต่างๆ กัน

ชั่วโมง	0.5 g	1.0 g	2.0 g	3.0 g
0	50.0841	50.4744	50.4815	50.4262
1	38.9370	29.8252	18.8389	11.5888
2	33.5875	22.3622	11.1827	6.5546
3	29.2902	16.996	7.4494	5.0701
4	25.9749	13.1942	5.8464	4.9838
5	22.9365	10.3436	5.1487	5.2745
6	20.7252	8.744	5.2214	5.5813
7	18.9348	7.5362	5.0187	5.8791
8	17.4018	7.1035	6.1399	8.001

ตารางที่ ง.4 เปอร์เซ็นต์การขจัด (% Removal) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ (ชั่วโมง) โดยใช้ ปริมาณเม็ดวัสดุเชิงประกอบต่างๆ กัน

ชั่วโมง	0.5 g	1.0 g	2.0 g	3.0 g
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	22.2568	40.91024	62.68158	77.0183
2	32.9378	55.69596	77.84792	87.0016
3	41.5180	66.32748	85.24331	89.9455
4	48.1374	73.85962	88.41873	90.11665
5	54.2040	79.50724	89.80082	89.54016
6	58.6192	82.67637	89.6568	88.93175
7	62.1940	85.06926	90.05834	88.34118
8	65.2548	85.92653	87.83733	84.13325

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปณิดา การสมวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2547 และได้เข้าทำงานในบริษัท เอ็นอีซี/โตคิน อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) ตำแหน่ง วิศวกรฝ่ายผลิต เป็นเวลา 1 ปี จึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อภาคปลายของปีการศึกษา 2549 และสำเร็จการศึกษาในภาคต้นของปีการศึกษา 2551 รวมระยะเวลาในการศึกษา 2 ปี