

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อมละลายน้ำได้ด้วยไลโคซานชนิดคัดแปร



นางสาวรัชณี ทรัพย์มากมี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

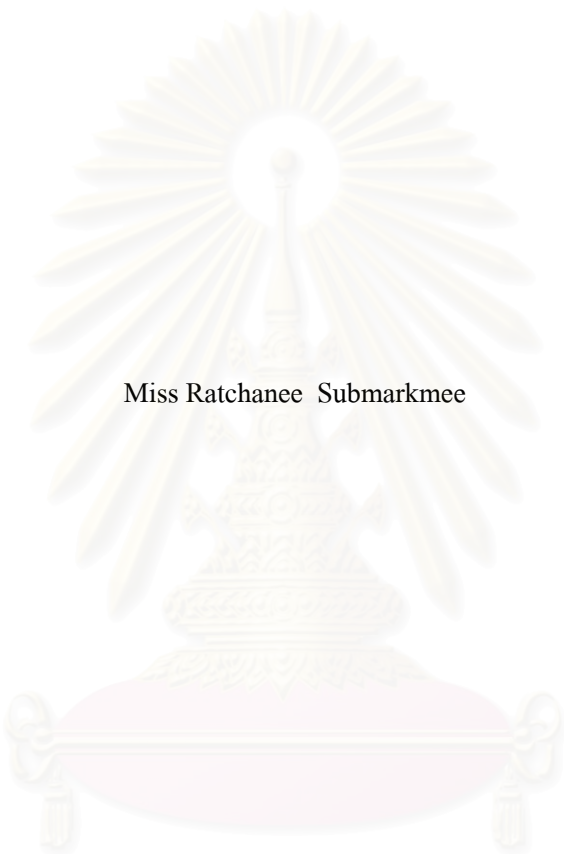
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-2186-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF WASTEWATER CONTAINING WATER-SOLUBLE DYE USING  
MODIFIED CHITOSAN



Miss Ratchanee Submarkmee

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

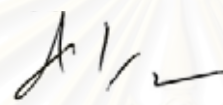
Academic Year 2005

ISBN 974-14-2186-9

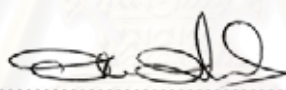
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีข้อมละลายน้ำได้ด้วยโคโตซานชนิดคัดแปร  
โดย                                              นางสาวรัชณี ทรัพย์มากมี  
สาขาวิชา                                      เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา                            ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ


---

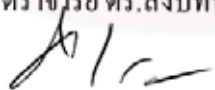
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

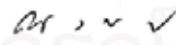
  
..... รองคณบดีฝ่ายบริหารรักษาราชการแทน  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชราพงษ์ วิทิตสานต์)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ผังวิวัฒน์)

รัชณี ทรัพย์มากมี : การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมละลายน้ำได้ด้วยไคโตซานชนิด  
ดัดแปร (TREATMENT OF WASTEWATER CONTAINING WATER-SOLUBLE DYE  
USING MODIFIED CHITOSAN) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี, จำนวน  
หน้า 94 หน้า. ISBN 974-14-2186-9.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของเม็ดไคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้ง  
แช่ขี้เถ้า ในการเลือกการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 โดยการทดลองแบ่ง  
เป็น 2 ส่วนคือ แบบกะและแบบต่อเนื่อง เม็ดไคโตซานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดคือเม็ดไคโตซานที่  
ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย และเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วย  
กลูตารัลดีไฮด์ จากการทดลองพบว่าปริมาณเม็ดไคโตซาน ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสีย  
สังเคราะห์สีย้อม ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด  
มีผลต่อการดูดซับสีย้อม โดยการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นและลดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม  
จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบนเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดเพิ่มขึ้น แต่หากเพิ่มความ  
เข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดมากเกินไปทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบนเม็ดไคโตซาน  
ทั้ง 2 ชนิดลดลง จากผลการศึกษาทางสมดุลในการดูดซับพบว่าสมดุลในการดูดซับสามารถอธิบาย  
ได้ด้วยสมการแลงเมียร์ นอกจากนี้ยังพบว่า การเลือกการดูดซับสีย้อมแต่ละประเภทออกจากสีย้อม  
ผสมสามารถทำได้โดยการเลือกการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ใช้เม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการ  
เชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายเป็นตัวดูดซับ และในการเลือกการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ใช้เม็ด  
ไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์เป็นตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ในการ  
สัมผัสตัวดูดซับก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้สามารถเลือกดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อม  
แอซิดบลู 129 ออกจากสีย้อมผสมได้ ซึ่งพบว่าเม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย  
เลือกดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้สูงถึง 1,250 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 7 และเม็ดไคโตซาน  
ที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์เลือกดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ได้สูงถึง  
3,333 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 7.

ภาควิชาเคมีเทคนิค  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2548

ลายมือชื่อนิสิต..... รัชณี ทรัพย์มากมี  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ผศ.ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี

## 4672383923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : SELECTIVE ADSORPTION / WATER-SOLUBLE DYE / CHITOSAN BEAD /  
CROSS-LINKED CHITOSAN BEAD / REACTIVE RED 120 / ACID BLUE 129

RATCHANEE SUBMARKMEE : TREATMENT OF WASTEWATER CONTAINING  
WATER-SOLUBLE DYE USING MODIFIED CHITOSAN. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. SANGOB TIP PONGSTABODEE, Ph.D., 94 pp. ISBN 974-14-2186-9.

The objective of thesis is to study ability of modified chitosan beads prepared from prawn shell in selective adsorption of Reactive Red 120 and Acid Blue 129. The experiment modes were preformed in batch and continuous. The beads used in this work were non-cross-linked chitosan beads and cross-linked chitosan beads with glutaraldehyde. From experimental results, it was found that dosage of adsorbent, initial dye concentration, pH of dye solution and concentration of potassium nitrate had a significant effect on adsorption capacity of dyestuff. Adsorption capacity increased with increasing in initial dye concentration and decreasing pH of dye solution. When adding much more potassium nitrate to synthesis wastewater of dyestuff, it was found that adsorption capacity was decreased. Equilibrium data fitted very well to the Langmuir model. In addition, it also found that a selective adsorption Reactive Red 120 from dye mixtures was achieved when using non-cross-linked chitosan beads. In case of selective adsorption Acid Blue 129 from dye mixtures, cross-linked chitosan beads with glutaraldehyde were employed. Furthermore, contact time had a significant effect on selective adsorption. From the experimental results, they elucidated that selective adsorption capacity of non-cross-linked chitosan beads for Reactive Red 120 adsorption was around 1,250 mg/g at pH 7 while the capacity of cross-linked chitosan beads with glutaraldehyde for selective Acid Blue 129 adsorption was around 3,333 mg/g at pH 7.

Department of Chemical Technology  
Field of study Chemical Technology  
Academic year 2005

Student's signature.....Ratchanee.....Submarkmee  
Advisor's signature.....Sangobtip.....Pongstabodee

## กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกดิฉันขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์อย่างสุดซึ้ง สำหรับคำแนะนำ ข้อเสนอแนะ คำติชม และกำลังใจดีๆ ที่มีให้กับดิฉันตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ดิฉันขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรหม ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ ผังวิวัฒน์ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค และภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยสนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และวิทยาลัยปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ รวมทั้งศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์

ขอบคุณคุณขวัญใจ สัจจาธรรม คุณทิพย์วิมล เกิดอ้อม และคุณโกวิท ปิยมังคลา สำหรับคำแนะนำและข้อเสนอแนะดีๆ สำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณสมชาย มีสาลี สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจดีๆ ที่มีให้ตลอดการทำวิจัย

ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งสำหรับคุณพ่อและคุณแม่ ตลอดจนน้องสาวและน้องชาย รวมไปถึงทุกๆ คนที่เกี่ยวข้องในการช่วยเหลือ สนับสนุน ให้ความรัก กำลังใจ ความเข้าใจ และคำแนะนำดีๆ ในการทำงานวิจัยฉบับนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 โครงสร้างของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	6
2.1.1 โครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	6
2.1.2 กระบวนการผลิตสิ่งทอ.....	8
2.2 แหล่งที่มาและคุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	9
2.2.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	9
2.2.2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	11
2.3 สีย้อม.....	17

บทที่	หน้า
2.3.1 การแบ่งประเภทของสีย้อม.....	17
2.3.1.1 สีย้อมประเภทละลายน้ำได้.....	17
2.3.1.2 สีย้อมประเภทละลายน้ำไม่ได้.....	17
2.3.2 สีย้อมแอซิด.....	18
2.3.3 สีย้อมรีแอคทีฟ.....	20
2.4 ลักษณะทั่วไปของไคโตซาน.....	22
2.4.1 คุณสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ของไคโตซาน.....	25
2.4.1.1 ความสามารถในการละลาย.....	25
2.4.1.2 ความหนืด.....	25
2.4.1.3 น้ำหนักโมเลกุล.....	26
2.4.1.4 ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล.....	26
2.4.1.5 โคแอกกูเลชัน.....	27
2.4.1.6 ความสามารถในการละลาย.....	27
2.5 การดูดซับ.....	27
2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ.....	28
2.5.2 ลักษณะการดูดซับ.....	28
2.5.3 กลไกของการดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ.....	30
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	30
2.5.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	32
2.6 การดูดซับแบบต่อเนื่อง.....	34
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	41
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	42
3.4.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม.....	42



บทที่	หน้า
3.4.2 การสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งแช่บ๊วยหรือกุ้งขาว.....	43
3.4.3 การเตรียมไคโตซานชนิดเม็ด.....	43
3.4.4 การเตรียมไคโตซานชนิดเม็ดที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วย กลูตารัลดีไฮด์.....	44
3.5 การทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง.....	45
3.5.1 การทดลองแบบกะ.....	46
3.5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเม็ดไคโตซานที่มีต่อการดูดซับสีข้อม...	46
3.5.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อมที่มีต่อการดูดซับ	46
3.5.1.3 ศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อการดูดซับสีข้อม.....	47
3.5.1.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกการดูดซับสีข้อมออกจากสีข้อม ผสมในระบบแบบกะ.....	47
3.5.1.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดที่มีต่อ การดูดซับสีข้อม.....	47
3.5.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง.....	48
4 ผลและการอภิปรายผล.....	49
4.1 คุณลักษณะของไคโตซาน.....	49
4.1.1 ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล.....	49
4.1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดไคโตซาน.....	50
4.1.3 พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดไคโตซาน.....	50
4.1.4 หมู่ฟังก์ชันของเม็ดไคโตซานวิเคราะห์ด้วยวิธีเครื่องฟลูออเรสเซนซ์- สฟอว์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี.....	52
4.1.5 น้ำหนักโมเลกุลของเม็ดไคโตซาน.....	54
4.2 ปริมาณของเม็ดไคโตซานต่อการดูดซับสีข้อม.....	55
4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม.....	56
4.4 ค่าพีเอช.....	59
4.5 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด.....	60
4.6 การเลือกการดูดซับสีข้อมออกจากสีข้อมผสม.....	61

บทที่	หน้า
4.7 สมดุลไอโซเทอม.....	63
4.8 อัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ภายในอนุภาค.....	64
4.9 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ.....	67
4.9.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ หนึ่ง.....	67
4.9.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ สอง.....	67
4.9.3 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ หนึ่งไม่แท้.....	67
4.9.4 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ สองไม่แท้.....	68
4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเม็ดไคโตซาน.....	71
4.11 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูอิดไรเซอร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี	73
4.12 การเลือกการดูดซับสีข้อมออกจากสีข้อมผสมในระบบแบบต่อเนื่อง.....	75
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	81
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก พื้นที่ผิวขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดไคโตซาน.....	87
ภาคผนวก ก ระดับการบวมน้ำ.....	87
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานของสีข้อมรีแอกทีฟเรด 120.....	88
ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานของสีข้อมแอสซิดบลู 129.....	89
ภาคผนวก ค บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล.....	90
ภาคผนวก ง เปอร์เซ็นต์การขจัดสีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอสซิดบลู 129.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	94

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	น้ำเสียที่ได้จากแต่ละขั้นตอนของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	9
2.2	คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ.....	12
2.3	คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	12
2.4	คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากสิ่งทอ.....	13
2.5	ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสี.....	14
2.6	ระดับความเป็นพิษต่อปลาของสีย้อม.....	14
2.7	ระดับของการคิดเน้นของสีย้อมต่างๆและการปนเปื้อนของสีย้อม.....	15
2.8	ค่ามาตรฐานของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ.....	16
2.9	จำแนกข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงฟิสิกส์และการดูดซับเชิงเคมี.....	29
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการทดลอง.....	41
4.1	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดโคโตะซานทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้จาก การทดลอง.....	50
4.2	พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของเม็ดโคโตะซานทั้ง 2 ชนิด.....	51
4.3	ค่าคงที่ของแลงเมียร์และพุนดิชไอโซเทอม.....	63
4.4	ค่าคงที่ของอัตราเร็วในการแพร่สีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคโคโตะซาน.....	66
4.5	แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง.....	69
4.6	แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้และอันดับที่สองไม่แท้...	70
4.7	การเปรียบเทียบปริมาณความจุการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับต่างๆ กับข้อมูล ที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้.....	78
ก1	พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดโคโตะซานทั้ง 2 ชนิด....	87
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และค่าการดูด กลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 536 นาโนเมตร.....	88
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมแอซิดบลู 129และค่าการดูดกลืนที่ ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 629 นาโนเมตร.....	89

ตารางที่	หน้า
ง1    เปอร์เซ็นต์การจัดซื้อรีแอกทีฟไฟรูด 120 และซื้อแอสซิดบลู 129 บนตัวดูด ษัษ NCB และ CCB โดยศึกษาป้งจ้ยต่างๆที่มีผลต่อการดูดษัษที่สภาวะ สมดุล.....	92
ง2    เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของการดูดษัษรีแอกทีฟไฟรูด 120 และซื้อ แอสซิดบลู 129 บนตัวดูดษัษ NCB และ CCB ที่ค่าพีเอชของน้ำเสี่ยสังเคราะห์ ษัษตั้งแต่ 3 ถึง 9.....	93



สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

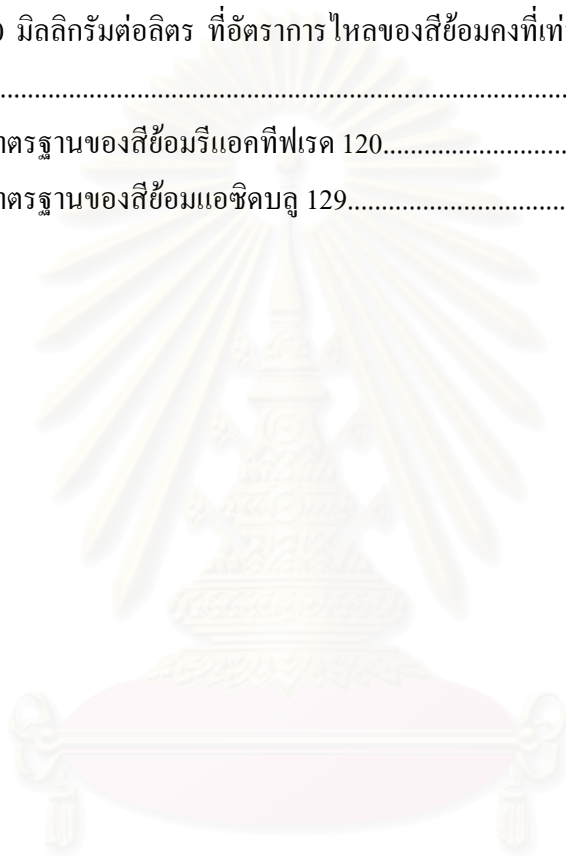
## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	วงจรถับสัญญาณของอุตสาหกรรมสิ่งทอ แสดงความต่อเนื่องตั้งแต่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และปลายน้ำ.....	7
2.2	กระบวนการผลิตสิ่งทอ.....	8
2.3	การดูดซับของสีไปยังบริเวณดูดซับของเส้นใย.....	19
2.4	โครงสร้างของโมเลกุลของสีย้อมแอซิด.....	19
2.5	โครงสร้างของโมเลกุลของสีย้อมรีแอคทีฟ.....	21
2.6	โครงสร้างของไคติน.....	23
2.7	โครงสร้างของไคโตซาน.....	24
2.8	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	24
2.9	การดูดซับด้วยอนุภาคของแข็งของตัวดูดซับ.....	27
2.10	เส้นโค้งเบอร์ทรูจในการดูดซับแบบคอลัมน์.....	35
3.1	โครงสร้างของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120.....	42
3.2	โครงสร้างของสีย้อมแอซิดบลู 129.....	43
3.3	ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับ.....	44
3.4	ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดไคโตซาน.....	45
4.1	เอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัม (NMR spectrum) ของไคโตซาน.....	49
4.2	ภาพถ่ายของเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากการทดลอง (ก) NCB (ข) CCB.....	50
4.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscopes ; SEM) ของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดก่อนการดูดซับสีย้อม (ก) NCB (ข) CCB... ..	51
4.4	FTIR Spectrum ของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดก่อนดูดซับสีย้อม (ก) NCB (ข) CCB.....	53
4.5	จีพีซีโครมาโทกราฟี (GPC Chromatography) ของไคโตซาน.....	54
4.6	ปริมาณเม็ดไคโตซานต่อเปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟ เรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิตร เวลาที่ใช้ในการสัมผัส ตัวดูดซับ 24 ชั่วโมง.....	56

รูปที่	หน้า
4.7 ปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมแตกต่างกัน บนตัวดูดซับ NCB จำนวน 2 กรัม (ก) สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (ข) สีย้อมแอซิดบลู 129.....	57
4.8 ปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมแตกต่างกัน บนตัวดูดซับ CCB จำนวน 2 กรัม (ก) สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (ข) สีย้อมแอซิดบลู 129.....	58
4.9 ค่าพีเอชต่อปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณ 2 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 24 ชั่วโมง.....	59
4.10 ผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตต่อปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร กรณีแรกใช้ NCB ปริมาณ 2 กรัมเป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 กรณีที่สองใช้ CCB ปริมาณ 2 กรัม เป็นตัวดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ.....	60
4.11 เปอร์เซนต์การจับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ออกจากสีย้อมผสมระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ NCB ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 1 ชั่วโมง.....	62
4.12 เปอร์เซนต์การจับสีย้อมแอซิดบลู 129 ออกจากสีย้อมผสมระหว่างสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ CCB ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 1 ชั่วโมง.....	62

รูปที่	หน้า
4.13 ปริมาณเม็ดไคโตซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมรีแอคทีฟ เรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าไปภายในอนุภาคของโมเลกุลเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (ก) NCB (ข) CCB.....	65
4.14 ปริมาณเม็ดไคโตซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าไปภายในอนุภาคของโมเลกุลเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (ก) NCB (ข) CCB.....	65
4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM images) ของ NCB (ก) ก่อนดูดซับสีย้อม (ข) หลังดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (ค) หลังดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129.....	71
4.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM images) ของ CCB (ก) ก่อนดูดซับสีย้อม (ข) หลังดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (ค) หลังดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129.....	72
4.17 กราฟ FTIR ของ NCB หลังจากดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเท่ากับ 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ.....	73
4.18 กราฟ FTIR ของ CCB หลังจากดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเท่ากับ 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ.....	74
4.19 เส้นโค้งเบอร์ครูจสำหรับการเลือกดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ NCB ออกจากสีย้อมผสมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 อัตราเร็วในการไหลคงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของเบดนิ่งเฉลี่ย (NCB) ประมาณ 7.3 เซนติเมตร.....	76
4.20 เส้นโค้งเบอร์ครูจสำหรับการเลือกดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ออกจากสีย้อมที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ที่หนึ่งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 อัตราเร็วในการไหลคงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของเบดนิ่งเฉลี่ย (CCB) ประมาณ 7.3 เซนติเมตร.....	76

รูปที่	หน้า
4.21 การเลือกจัดซื้อเมอร์แคทไฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์แก้ว 2 คอลัมน์ที่มีการเชื่อมต่อกัน ในระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของสีย้อมคงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที .....	77
ข1 กราฟมาตรฐานของสีย้อมเมอร์แคทไฟเรด 120.....	88
ข2 กราฟมาตรฐานของสีย้อมแอซิดบลู 129.....	89



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เป็นที่ทราบกันดีว่าที่ผ่านมามอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยได้เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทั้งในแง่จำนวนของโรงงานอุตสาหกรรมและปริมาณการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นทั้งนี้เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคทั้งภายในประเทศและภายนอกประเทศ ซึ่งในกระบวนการผลิตจะต้องใช้น้ำเป็นจำนวนมากและท้ายที่สุดของกระบวนการผลิตแล้วก็จะมึน้ำเสียในปริมาณมากเช่นกัน ได้มีการสำรวจปริมาณการใช้สีย้อมทั้งหมดของอุตสาหกรรมสิ่งทอทั่วโลกพบว่ามึปริมาณมากกว่า  $10^7$  กิโลกรัมต่อปี และประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณทั้งหมดนี้ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Wong และคณะ, 2004) ซึ่งในประเทศไทย รายงานจากกระทรวงอุตสาหกรรมพบว่ามึโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ประมาณ 4645 แห่ง (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2000) ซึ่งในน้ำเสียเหล่านี้ประกอบไปด้วยสารมลพิษเป็นจำนวนมาก ธรรมชาติของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอจะประกอบไปด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก สารประกอบอินทรีย์ น้ำมันที่อยู่ในรูปของแข็ง น้ำมันหล่อลื่น และสีย้อม ซึ่งสีย้อมในปริมาณเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ทั้งหมดในน้ำเสียก็สามารถทำให้แหล่งน้ำนั้นมีสีอันไม่พึงปรารถนาและทำลายทัศนียภาพของแหล่งน้ำนั้นได้ ในประเทศไทยยังไม่มีการกำหนดปริมาณของสีย้อมในน้ำทิ้ง มีเพียงแต่ประกาศเตือนว่าน้ำทิ้งที่ปล่อยสู่แหล่งน้ำนั้นต้องไม่มีสีที่อยู่ในระดับที่ไม่น่าพึงพอใจ

สีย้อมไม่เพียงแต่จะก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำเท่านั้น แต่การจัดสีย้อมออกจากน้ำทิ้งก็เป็นเรื่องที่ยากเพราะว่าสีย้อมไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้นการจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งจึงนับว่าเป็นปัญหาสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นปฐมภูมิ และทุติยภูมิไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งได้ทั้งหมด ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นตติยภูมิจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำมาใช้ในการจัดสีย้อมก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียลงในท่อน้ำทิ้งหรือลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งถ้าไม่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีคุณภาพเพียงพอแล้วสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำ โดยจะทำให้การส่องผ่านของแสงลงไปใต้น้ำลดลง อีกทั้งยังเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ ปัจจุบันมึ

รายงานการวิจัยชี้ให้เห็นว่าสีย้อมบางประเภทเป็นสารก่อมะเร็งแก่มนุษย์ได้ เช่น สีย้อมที่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกเอมีน (Baughman และ Weber, 1994)

มีหลายเทคนิควิธีที่นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียก่อนจะปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ แต่วิธีการทางชีวภาพก็มีข้อจำกัดในการที่จะบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมประเภทละลายน้ำได้ ซึ่งข้อจำกัดนี้ได้แก่ สีย้อมไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และต้องใช้เวลาในการบำบัดนานมาก นี่เองเป็นเหตุผลที่ว่ากระบวนการดูดซับจึงเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก เป็นที่ทราบกันดีว่าตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารอินทรีย์คือ ผงถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อจำกัดคือ ผงถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพมักมีราคาแพง และไม่คุ้มค่าที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ (McKay, Prasad และ Mowli, 1986) จึงได้มีการคิดค้นหาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าและราคาถูกกว่าเพื่อมาใช้แทนผงถ่านกัมมันต์ เช่น ถ่านหิน ถ่านหินเลน ไม้ ดินเหนียวดูดซึมน้ำใช้เป็นแปรงโรยที่กรองและขจัดไขมันจากสิ่งทอ ดินเหนียวที่ผ่านการเผาไฟ ใยแก้ว ซิลิกาเจล ซีโอไลต์ ลิกนิน ดินเหนียวที่เกิดจากการสะสมของเถาภูเขาไฟ ชานอ้อย แกนของฝักข้าวโพด เปลือกมะพร้าว แกลบ ไคติน และไคโตซาน ซึ่งบรรดาตัวดูดซับเหล่านี้ ไคโตซานซึ่งเป็นอนุพันธ์ของไคติน ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อมเนื่องจากไคตินเป็นสารชีวพอลิเมอร์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในธรรมชาติรองจากเซลลูโลส อีกทั้งให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมโดยเฉพาะสีย้อมรีแอคทีฟได้ดีมาก (El-Geundi, 1997)

ไคโตซานคือสารชีวพอลิเมอร์อะซิติลกลูโคซามีน ซึ่งพบได้ในผนังเซลล์ของเชื้อราหรือเห็ด และราเมือก แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้วจะได้มาจากการกำจัดหมู่อะซิติลออกจากไคติน ซึ่งสกัดได้จากเปลือกกุ้ง เปลือกปู และแกนปลาหมึก ซึ่งมีอยู่มากมายในธรรมชาติ นอกจากนี้ไคโตซานไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ และถูกนำมาใช้ในขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและเป็นตัวดูดซับในอุตสาหกรรมอาหารและยา และอื่นๆ อีกมากมาย

ในกระบวนการย้อมสีมักใช้กรดอะซิติลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการย้อมสี จึงเป็นเหตุให้ค่าพีเอชของสารละลายในกระบวนการย้อมสีนั้นมีค่าเข้าสู่ภาวะความเป็นกรดคือมีค่าพีเอชประมาณ 3 ถึง 4 (Chiou, Ho และ Li, 2004) บางผลการวิจัยพบว่า การดูดซับสีย้อมประเภทรีแอคทีฟ แอซิด และไดเร็กต์บนไคโตซานในภาวะที่ค่าพีเอชเป็นกลางก็สามารถกระทำได้ (Wu และคณะ, 2000) เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า 5.5 ไคโตซานจะกลายสภาพจากของแข็งเป็นเจล ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นในภาวะที่เป็นกรดจึงเป็นข้อจำกัดในการใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับสีย้อม (Chiou, Ho และ Li, 2004)

ปัญหาดังกล่าวข้างต้นสามารถแก้ไขโดยการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (Cross-linking reagent) เพื่อช่วยให้ไลโคซานมีเสถียรภาพเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรด ไลโคซานที่มีการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายจะไม่ละลายเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรดที่มีค่าพีเอช 1-7 และช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โยชิดะและคณะ (Yoshida, Okamoto และ Kataoka, 1993) ใช้ดีนาคอล อีเอ็กซ์ 841 (Denacol EX 481) เป็นสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายและพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมแอซิดออเรนจ์ (Acid Orange II) โดยใช้ไลโคซานไฟเบอร์ที่มีการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายในสารละลายที่เป็นกรดที่มีค่าพีเอช 3 และ 4 นั้นมีค่าสูงมาก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นเทคนิควิธีที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมแอซิดโดยใช้ไลโคซานที่มีการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายเป็นตัวดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีย้อมที่ละลายน้ำได้บนไลโคซาน มักศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการดูดซับสีย้อมเท่านั้น (Chiou และ Li, 2003 ; Wu, Tseng และ Juang, 2000 ; Chiou, Ho และ Li, 2004 ; Ying Yu, Zhuang และ Wang, 2001) แต่ยังไม่มียานใดเลยที่คำนึงถึงการเลือกดูดซับสีย้อมที่ต้องการออกจากสีย้อมผสมโดยอาศัยไลโคซานเป็นตัวดูดซับ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นมูลเหตุจูงใจของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะศึกษาการเลือกการดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้บนเม็ดไลโคซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดไลโคซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB) สีย้อมที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้คือสีย้อมแอซิดบลู 129 (Acid Blue 129) และสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 (Reactive Red 120) เพราะเนื่องจากเป็นสีย้อมที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม (Robinson และคณะ, 2001 ; Pereira และคณะ, 2003)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

จุดประสงค์หลักในงานวิจัยนี้คือการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมประเภทละลายน้ำได้โดยการดูดซับบนเม็ดไลโคซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งแช่บ๊วย (หรือกุ้งขาว) วัตถุประสงค์ของงานวิจัยมีดังนี้

1. ต้องการศึกษากการดูดซับสีย้อมประเภทละลายน้ำได้ (สีย้อมแอซิด และสีย้อมรีแอคทีฟ) โดยใช้เม็ดไลโคซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดไลโคซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB) เป็นตัวดูดซับทั้งในระบบแบบกะและระบบแบบต่อเนื่อง
2. ต้องการศึกษาปัจจัยในการเลือกการดูดซับสีย้อมที่ต้องการออกจากสีย้อมผสม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB) ถูกนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ
2. สีย้อมประเภทแอนติและรีแอคทีฟถูกนำมาใช้ในการศึกษา
3. ศึกษาการดูดซับสีย้อมประเภทแอนติและรีแอคทีฟในระบบแบบกะและระบบแบบต่อเนื่อง
4. ศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดที่ระดับต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม

### 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

NCB (Non-cross-linked chitosan bead) คือ เม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์

CCB (Cross-linked chitosan bead) คือ เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมขึ้นไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมประเภทละลายน้ำได้ ทั้งในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง
2. สามารถเลือกการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 หรือสีย้อมแอนติบลู 129 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมผสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมไคโตซานจากเปลือกกุ้งแช่แข็งหรือเปลือกกุ้งขาว
2. การเตรียมเม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB)

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด 120 และแอซิดบลู 129 ได้แก่ชนิดของเม็ดโคโคซาน ปริมาณตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต และเวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ ในระบบแบบกะ
4. การศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกการดูดซับสี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ล้อแอซิดบลู 129 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ของสี่ล้อผสม ในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง

### 1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด 120 โดยใช้เม็ดโคโคซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดโคโคซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB) เป็นตัวดูดซับ ในระบบแบบกะ
2. ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับประสิทธิภาพในการดูดซับสี่ล้อแอซิดบลู 129 โดยใช้เม็ดโคโคซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (NCB) และเม็ดโคโคซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB) เป็นตัวดูดซับ ในระบบแบบกะ
3. ปัจจัยและประสิทธิภาพที่มีผลต่อการเลือกการดูดซับสี่ล้อรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ล้อแอซิดบลู 129 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สี่ล้อผสมในระบบแบบกะและนำผลที่ได้จากการทดลองไปประยุกต์ใช้กับระบบแบบต่อเนื่อง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

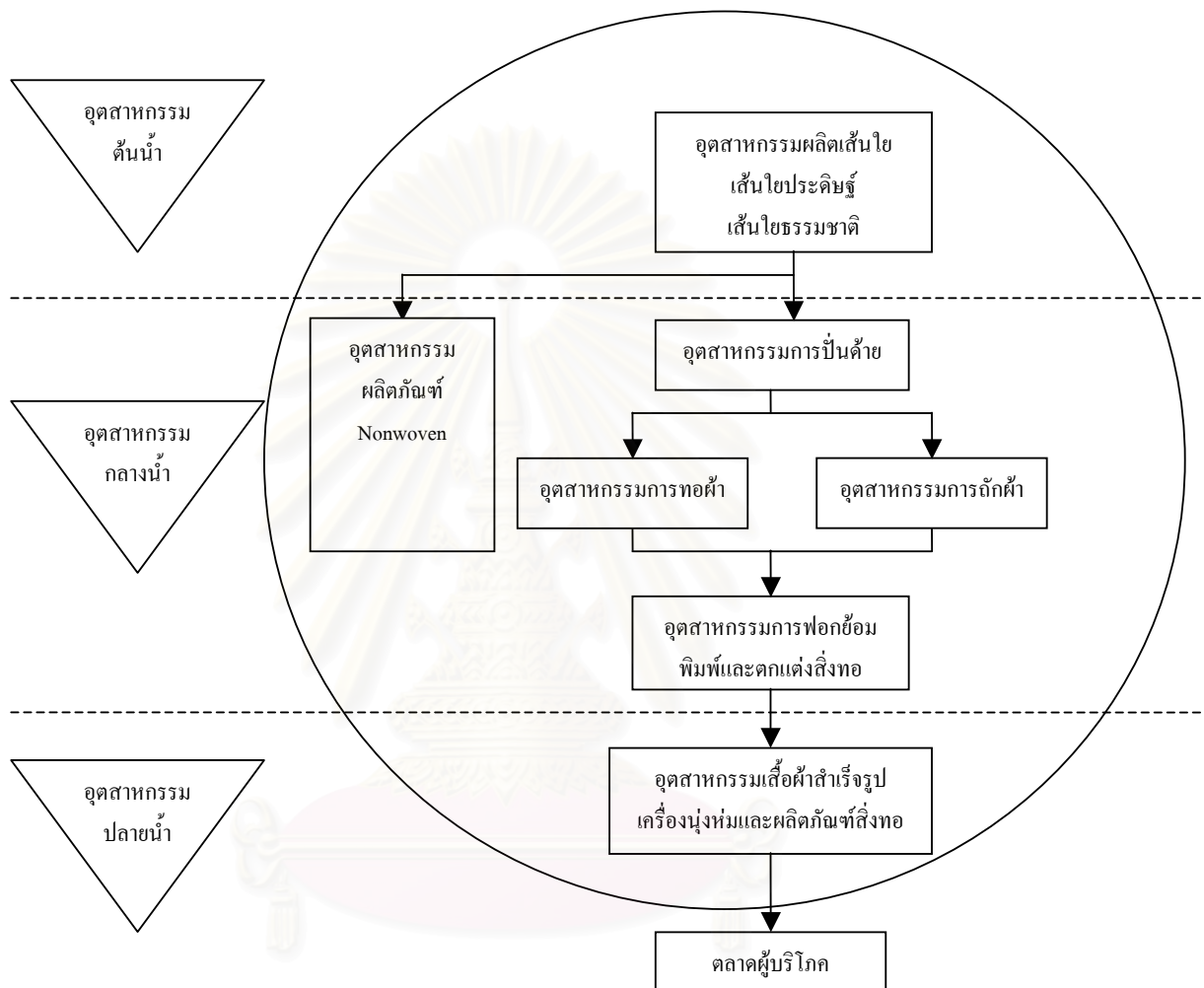
#### 2.1 โครงสร้างของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ปริมาณการใช้สีย้อมทั้งหมดของอุตสาหกรรมทั่วโลกนี้มีมากกว่า  $10^7$  กิโลกรัมต่อปี และประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณดังกล่าวมาจากอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ หรืออีกนัยหนึ่งประมาณ  $10^6$  กิโลกรัมต่อปีของสีได้ถูกปล่อยลงสู่น้ำลำคลองจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ (Wong และคณะ, 2004) สีที่ผู้ผลิตและผู้บริโภคต่างนิยมใช้เนื่องจากมีความคงทนและสะดวกรวดเร็วในการใช้งาน ได้แก่ สีย้อม ซึ่งยากแก่การสลายตัว ดังนั้นปัญหาการปนเปื้อนของสีย้อมในน้ำจึงนับเป็นปัญหาที่มีความสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก สีย้อมนิยมใช้กันในอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทอ หนังกวัก กระดาษ พลาสติก และอื่นๆ มีสาเหตุเพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค

2.1.1 โครงสร้างของอุตสาหกรรมสิ่งทอ (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2000) แบ่งได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ประกอบด้วย

1. อุตสาหกรรมต้นน้ำ คือ อุตสาหกรรมการผลิตเส้นใย
2. อุตสาหกรรมกลางน้ำ คือ นับตั้งแต่อุตสาหกรรมการปั่นด้าย การทอผ้า การถักผ้า และอุตสาหกรรมการฟอกย้อม พิมพ์และตกแต่งสำเร็จ นอกจากนี้ในเทคโนโลยีปัจจุบันยังเกิดมีอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์นอนวูฟเวน (Nonwoven) ซึ่งถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมกลางน้ำ เป็นการผลิตผ้าฝืนโดยตรงจากเส้นใยไม่ต้องผ่านขั้นตอนของการทำให้เป็นเส้นด้าย
3. อุตสาหกรรมปลายน้ำ คือ อุตสาหกรรมเสื้อผ้าสำเร็จรูป

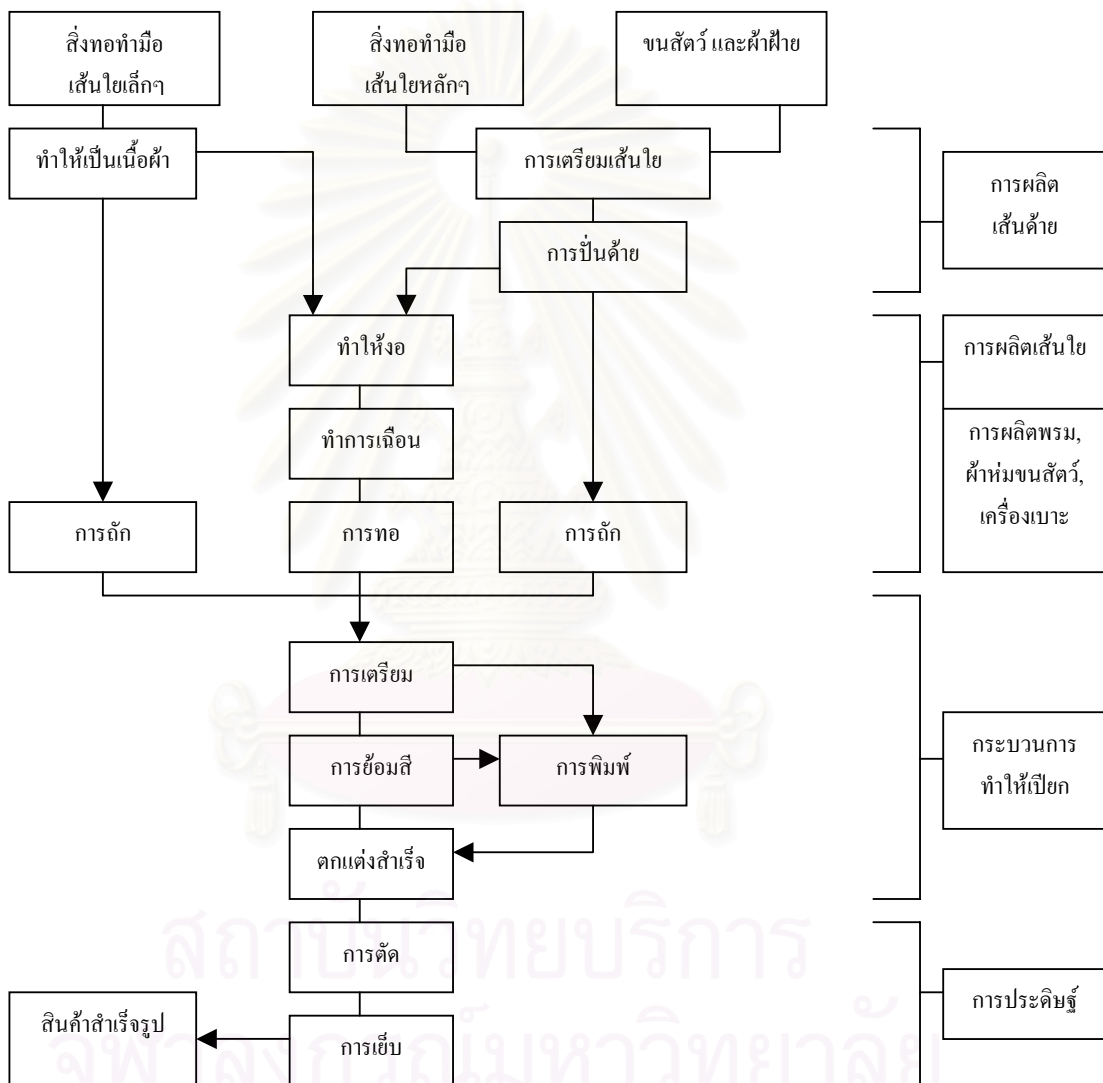
ในรูปที่ 2.1 แสดงระบบอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งหมด (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2000)



รูปที่ 2.1 วงจรทั้งระบบของอุตสาหกรรมสิ่งทอ แสดงความต่อเนื่องตั้งแต่ ต้นน้ำ กลางน้ำ และ ปลายน้ำ (วีระศักดิ์ อุคมกิจเดชา, 2000)

2.1.2 กระบวนการผลิตสิ่งทอ (Gohl, 1983)

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มีกระบวนการหลักๆ 4 ขั้นตอน ซึ่งจำแนกได้เป็น การผลิตด้ายดิบ การผลิตเส้นใย กระบวนการทำให้เปียก และการผลิตสิ่งทอและเสื้อผ้าสำเร็จรูป ในรูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการผลิตสิ่งทอ (Gohl, 1983)



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตสิ่งทอ (Gohl, 1983)



## 2.2 แหล่งที่มาและคุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (langphasuk, 1997)

### 2.2.1 แหล่งที่มาของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (langphasuk, 1997)

จากกระบวนการผลิตสิ่งทอทั้ง 4 ขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1.2 พบว่าในขั้นตอนที่ 3 คือกระบวนการทำให้เปียก นั้นจะเกี่ยวข้องกับการย้อมสีและการพิมพ์ ซึ่งในขั้นตอนนี้เองจะต้องใช้น้ำ และสีย้อมในปริมาณมาก ดังนั้นจึงมีน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมจากกระบวนการนี้ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณมากเช่นเดียวกัน

ในแต่ละขั้นตอนนี้จะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและทางน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ในแต่ละกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการย้อมสีจะมีน้ำทิ้งที่ปนเปื้อนด้วยสีย้อมที่ปล่อยทิ้งออกมาจากภาชนะที่ใช้ในการย้อมสี ซึ่งในน้ำทิ้งเหล่านี้มีความเป็นพิษ และมีอันตรายแก่มนุษย์ ได้แก่ ไอออนของโลหะหนักที่เหลืออยู่ สารละลายกรด และสีย้อม

ตารางที่ 2.1 น้ำเสียที่ได้จากแต่ละขั้นตอนของโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Gohl, 1983)

กระบวนการ	มลพิษทางอากาศ	น้ำเสีย	ของเสียที่เหลือทิ้ง
การปั่นเส้นด้าย	เล็กน้อย หรือไม่มีอากาศเสียปล่อยออกมากระบวนการ	น้อย หรือไม่มีน้ำเสียปล่อยออกมาจากกระบวนการ	บรรจุภัณฑ์ที่เหลือทิ้ง ปริมาณเส้นด้ายและเส้นใยที่เหลือทิ้งจากการปั่นด้าย
การเดือน/การใช้ลงแปรง	VOCs	บีโอดี, ซีโอดี, โลหะและน้ำเสียจากการทำความสะอาด	ใยผ้าสำลี และด้ายที่เหลือทิ้งบรรจุภัณฑ์ที่เหลือทิ้ง ปริมาณแปรงที่ใช้
การกำจัดแปรง	VOCs จากไกลคอลลีเซอรัล และตัวทำละลายในการกำจัดแปรง	บีโอดีจากปริมาณน้ำที่ละลายน้ำได้ ปริมาณที่สังเคราะห์ได้ เช่น สารหล่อลื่น ยางฆ่าแมลง และสารประกอบของยาฆ่าเชื้อจุลินทรีย์	บรรจุภัณฑ์ที่เหลือทิ้ง ปริมาณเส้นด้ายและเส้นใยที่เหลือทิ้งจากวัสดุที่ใช้ในการเช็ดทำความสะอาดเช่น ผ้าชีวีว และตัวกรองของเสียที่ได้จากการทำความสะอาดและดูแลรักษาที่ประกอบด้วยตัวทำละลาย

กระบวนการ	มลพิษทางอากาศ	น้ำเสีย	ของเสียที่เหลือทิ้ง
การกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก	VOCs จากไกลคอลอีเธอร์และตัวทำละลายที่ใช้ในการกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก	ยาฆ่าเชื้อโรค และยาฆ่าแมลง ของเหลือจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผงซักฟอก ไขมัน น้ำมัน เพกติน ขี้ผึ้งสารหล่อลื่นที่ช่วยในการถักและการปั่น	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การฟอกขาว	เล็กน้อย หรือไม่มีอากาศเสียปล่อยออกมา	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ หรือสารอินทรีย์ที่มีความเสถียรที่มีค่าพีเอชสูง	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การเผาขน	แก๊สที่ปล่อยออกจากเตาเผาที่มีปริมาณเล็กน้อย	เล็กน้อย หรือไม่มีน้ำเสียปล่อยออกมา	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การทำเมอร์เซอไรส์	เล็กน้อย หรือไม่มีอากาศเสียปล่อยออกมา	ค่าพีเอชสูงๆ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การเซทด้วยความร้อน	เกิดการระเหยของสารในขณะสังเคราะห์เส้นใยที่ใช้ในการปั่นด้าย	เล็กน้อย หรือไม่มีน้ำเสียปล่อยออกมา	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การข้อมสี	VOCs	โลหะ เกลือ สารลดความตึงผิวสารอินทรีย์ที่มีพิษที่เป็นตัวช่วยในกระบวนการสารที่มีประจุบวก สี บีโอดี ซัลไฟด์ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่เป็นกรด และด่าง	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง
การพิมพ์	ตัวทำละลาย กรดอะซิติก จากการข้อมสีและการอบในตู้อบเชื้อ แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ปล่อยสู่บรรยากาศที่เป็นอนุภาค ฝุ่นละออง	ของแข็งแฉวนลอยจากการข้อม ยูเรีย ตัวทำละลาย สี โลหะ ความร้อน บีโอดี โฟม	เล็กน้อย หรือไม่มีของเสียเหลือทิ้ง

กระบวนการ	มลพิษทางอากาศ	น้ำเสีย	ของเสียที่เหลือทิ้ง
กระบวนการตกแต่งสำเร็จ	VOCs; สารปนเปื้อนในสารเคมีที่ซื้อเข้ามา เช่น โฟร์มาดีไฮด์ ไอระเหยที่ได้จากการเผาไหม้ของแก๊ส	บีโอดี ซีโอดี ของแข็ง แขนวลอยตัวทำลายที่เป็นพิษ	เส้นใยที่ขูดออกและสิ่งที่ทำให้สมบูรณ์ในการทำเป็นบรรจุภัณฑ์

### 2.2.2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Langphasuk, 1997 ; Gaeta และคณะ, 1991)

อุตสาหกรรมสิ่งทอเกี่ยวข้องกับการผลิตเส้นใยจากธรรมชาติและเส้นใยสังเคราะห์ ซึ่งมีกระบวนการผลิตหลายแบบทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

กระบวนการทำงานในอุตสาหกรรมสิ่งทอนับตั้งแต่การปั่นเส้นด้าย การถีด การกำจัดแป้ง การกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก การฟอกขาว การเผาขน การทำเมอร์เซอไรส์ การย้อมสี การพิมพ์ และกระบวนการตกแต่งสำเร็จ จะเห็นว่าทุกขั้นตอนยกเว้นขั้นตอนการถีดและขั้นตอนตกแต่งสำเร็จ ต้องใช้น้ำปริมาณมากในระหว่างกระบวนการ ดังนั้นจึงมีน้ำเสียปริมาณมากที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้

สาเหตุหลักของแหล่งที่มาของน้ำเสียมาจากกระบวนการผลิตสิ่งทอแบบเปียก ซึ่งเริ่มจากขั้นตอนการล้าง (การกำจัดไขมันและสิ่งสกปรก) และขั้นตอนการฟอกขาวของเส้นใยธรรมชาติและจากกระบวนการย้อมสีและขั้นตอนตกแต่งสำเร็จ ซึ่งต้องใช้เส้นใยและสีย้อมปริมาณมากในกระบวนการเริ่มแรกจนถึงกระบวนการสุดท้ายที่จะได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะให้น้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารเคมีที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีความหลากหลายจึงไม่เหมาะที่จะบำบัดน้ำเสียในโรงงานบำบัดน้ำเสียธรรมดา ดังตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ (Langphasuk, 1997 ; Gaeta และคณะ, 1991) แบ่งตามลักษณะของปัจจัยต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย และดังตารางที่ 2.3 แสดงคุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Callely และคณะ, 1997) แบ่งตามลักษณะของเส้นใยที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเสีย และดังตารางที่ 2.4 แสดงคุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากสิ่งทอ (Callely และคณะ, 1997) โดยแสดงแหล่งที่มาและปริมาณน้ำที่ใช้ทั้งหมดตลอดจนคุณลักษณะของน้ำเสียที่พบ

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ (Langphasuk, 1997 ; Gaeta และคณะ, 1991)

ปัจจัย	ค่าที่วัดได้ (ประเทศไทย) (Langphasuk, 1997)	ค่าที่วัดได้ (ต่างประเทศ) (Gaeta และคณะ, 1991)	หน่วย
อุณหภูมิ	ประมาณ 50	10-90	องศาเซลเซียส
สี	สูง	สังเกตเห็นได้	-
ค่าพีเอช	9-12	2-12	-
ซีโอดี	500-1200	80-4000	มิลลิกรัมต่อลิตร
บีโอดี	100-1000	50-2000	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอย	สูง	20-500	มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Callely และคณะ, 1997)

เส้นใย	สารไม่บริสุทธิ์			กระบวนการเคมี
	ต้นกำเนิด	องค์ประกอบหลัก	เปอร์เซ็นต์สูงสุด ของน้ำหนักเส้นใย	
ผ้าฝ้าย	ธรรมชาติ	ไขมันและขี้ผึ้ง	10	โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไบโซเดียมคาร์บอเนต และสารเคมีที่ใช้ฟอกสี
ขนสัตว์ดิบ	ธรรมชาติ	ไขมันสัตว์ ไขมัน ธรรมชาติจากขนแกะ และสารอินทรีย์	100	ไบโซเดียมคาร์บอเนต สบู่และผงซักฟอก
ขนสัตว์จากแหล่งอื่น	การปั่นธรรมชาติ	ไขมันสัตว์และน้ำมัน	10	ไบโซเดียมคาร์บอเนต และสบู่
หัตถกรรม	โรงงานอุตสาหกรรม	สารหล่อลื่น	2	ไบโซเดียมคาร์บอเนต และผงซักฟอก
ผ้าฝ้ายที่มีความหนืด เรยอน และ โพลีเอสเตอร์	การทอและถัก	แป้ง สารคัดแปร ไขมันจากแป้ง และ ไขมัน	5	เอนไซม์และกรด

เส้นใย	สารไม่บริสุทธิ์			กระบวนการเคมี
	ต้นกำเนิด	องค์ประกอบหลัก	เปอร์เซ็นต์สูงสุด ของน้ำหนักเส้นใย	
หัตถกรรมอื่นๆ	การทอและถัก	เซลลูลิน และ โพลี ไวนิลแอลกอฮอล์	5	ผงซักฟอก

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะที่สำคัญของน้ำเสียจากสิ่งทอ (Callely และคณะ, 1997)

แหล่งที่มา	ปริมาณน้ำที่ ใช้ทั้งหมด (ลิตรต่อ กิโลกรัม)	ค่าพีเอช	ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	บีไอดี (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)
ผ้าฝ้ายและ ผ้าทอ	60-500	8-12	500-2000	50-250	200-1000	100-500
ผ้าฝ้ายหรือ ผ้าทอมือ	60-500	6-9	200-2000	50-200	100-1000	50-500
หัตถกรรม และผ้าถัก	50-600	4-8	100-1000	20-100	100-1000	50-250
ผ้าขนสัตว์ และผ้าทอ	80-500	7-10	1000-5000	50-500	200-2000	100-1000

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นพบว่าน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสีนั้นเป็นปัญหาหลักที่ก่อให้เกิดมลพิษกับแหล่งน้ำอีกทั้งยังทำให้แหล่งน้ำนั้นมีสีอันไม่พึงประสงค์อีกด้วย ดังตารางที่ 2.5 แสดงความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสี (Callely และคณะ, 1997) จากตารางที่ 2.5 พบว่าในกระบวนการย้อมสีเส้นใยจำพวกผ้าฝ้าย ผ้าทอมือ และเซลลูโลสนั้นใช้สีย้อมประเภทต่างๆ ในการย้อมสี และมีสีย้อมประเภทรีแอคทีฟถูกปล่อยทิ้งออกมาหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการในปริมาณมากที่สุด (Callely และคณะ, 1997) นี่เป็นเหตุผลที่ว่าในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟโดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ

ตารางที่ 2.5 ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย้อมสี (Callely และคณะ, 1997)

เส้นใย	ประเภทของสีย้อม	สีย้อมที่ สูญเสียน้ำ (กรัมต่อ กิโลกรัม เส้นใย)	กระบวนการ การเคมี (กรัมต่อ กิโลกรัม เส้นใย)	ปริมาณน้ำที่ ใช้ทั้งหมด (ลิตรต่อ กิโลกรัม เส้นใย)	ความเข้มข้นที่ปล่อยออกมา (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
					สีย้อม	กระบวนการ การเคมี
ผ้าฝ้าย ผ้าทอมือ เซลลูโลส	ไดเรกต์	1-5	0	40-150	10-50	1000-3000
	รีแอคทีฟ	3-20	200-500	50-250	30-200	1500-3000
	แวต	1-5	50-200	20-80	20-100	1000-2500
	ซัลเฟอร์	1-10	100-500	50-250	10-100	1000-3000
ผ้าขนสัตว์	กรด ก่อนขึ้นรูปโลหะ	0.5-2.5	100-250	50-250	5-50	1000-2000
ไนลอน	กรด ก่อนขึ้นรูปโลหะ	0.5-2.5	20-100	30-200	5-50	250-1000
โพลีเอสเตอร์	ทำให้กระจาย	1-5	50-200	50-200	10-50	500-1500

ในตารางที่ 2.6 แสดงระดับความเป็นพิษต่อปลาของสีย้อม (Easton, 1995) ซึ่งถ้ามีสัดส่วนของสีย้อมในแหล่งน้ำมากก็จะเป็นพิษต่อปลาและสัตว์น้ำอื่นๆ มากยิ่งขึ้น (ค่า  $LC_{50}^a$  ยิ่งสูง)

ตารางที่ 2.6 ระดับความเป็นพิษต่อปลาของสีย้อม (Easton, 1995)

ค่า $LC_{50}^a$ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สัดส่วนของสีย้อม(เปอร์เซ็นต์)
<1	2
1-10	10
10-100	27
100-500	31
>500	38

ปัจจัยสำคัญอีกอย่างหนึ่งในการหาปริมาณสีย้อมที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมคือระดับการติดแน่นของสารตั้งต้น (Degree of fixation) ดังแสดงในตารางที่ 2.7 แสดงประมาณระดับของการติดแน่นของสีย้อมต่างๆและการปนเปื้อนของสีย้อม (Cooper, 1995) ซึ่งจากตารางที่ 2.7 พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียสีย้อมประเภทรีแอคทีฟมีค่ามากที่สุดคือ 10-50 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือสีย้อมแอซิดคือ 5-20 เปอร์เซ็นต์ และนี่เป็นเหตุผลที่งานวิจัยฉบับนี้เลือกศึกษาการดูดซับสีย้อมประเภทรีแอคทีฟและแอซิด

ตารางที่ 2.7 ระดับของการติดแน่นของสีย้อมต่างๆและการปนเปื้อนของสีย้อม (Cooper, 1995)

ประเภทของสีย้อม	เส้นใย	ระดับการติดแน่น (%)	เปอร์เซ็นต์การสูญเสียปล่อยออก (%)
แอซิด	โพลีเอไมด์	80-95	5-20
เบสิก	อะคริลิก	95-100	0-5
ไดเรกต์	เซลลูโลส	70-95	5-30
ดิสเพิร์ส	โพลีเอสเตอร์	90-100	0-10
โลหะเชิงซ้อน	ขนสัตว์	90-98	2-10
รีแอคทีฟ	เซลลูโลส	50-90	10-50
ซัลเฟอร์	เซลลูโลส	60-90	10-40
แวต	เซลลูโลส	80-95	5-20

ในประเทศไทยนั้นยังไม่มีข้อกำหนดค่ามาตรฐานของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นตัวเลขที่แน่นอน เพียงแต่กำหนดว่าระดับสีย้อมที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำต้องไม่มีสีอันไม่พึงประสงค์ (กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 1996) ดังตารางที่ 2.8 แสดงค่ามาตรฐานของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ

ตารางที่ 2.8 ค่ามาตรฐานของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ (ที่มา : กระทรวง  
วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 1996)

ตัวแปร	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าพีเอช (pH)	5.5-9.0
2. ปริมาณของแข็งที่ละลายในน้ำได้ทั้งหมด (TDS)	ไม่ควรเกิน 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่ควรเกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. อุณหภูมิ	ไม่ควรเกิน 40 องศาเซลเซียส
5. สีหรือกลิ่น	อยู่ในระดับที่ไม่สามารถสังเกตได้
6. ชัลไฟด์ เช่น ไฮโดรเจนชัลไฟด์	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. ไซยาไนด์ เช่น ไฮโดรเจนไซยาไนด์	ไม่ควรเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
8. ฟอรัมาลิน	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
9. ฟีนอล	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
10. ไขมัน น้ำมัน และน้ำมันหล่อลื่น	ไม่ควรเกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
11. คลอรีนอิสระ	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
12. ยามาแมลง	ไม่มี
13. บีโอดี (BOD)	ไม่ควรเกิน 60 มิลลิกรัมต่อลิตร
14. ปริมาณไนโตรเจนที่มีทั้งหมด (TKN)	ไม่ควรเกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
15. ซีโอดี (COD)	ไม่ควรเกิน 600 มิลลิกรัมต่อลิตร
16. โลหะหนัก	
สังกะสี (Zn)	ไม่ควรเกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะวาเลนซ์โครเมียม	ไม่ควรเกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรวาเลนซ์โครเมียม	ไม่ควรเกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
คอปเปอร์ (Cu)	ไม่ควรเกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cd)	ไม่ควรเกิน 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Ba)	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (Pb)	ไม่ควรเกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
นิกเกิล (Ni)	ไม่ควรเกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
แมงกานีส (Mn)	ไม่ควรเกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร



## 2.3 สีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยทั่วไปสังเคราะห์มาจากสารประกอบอินทรีย์ การแบ่งประเภทของสีย้อมมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในงานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงวิธีการแบ่งด้วยความสามารถในการละลายน้ำของสีย้อม ซึ่งแบ่งได้เป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้และสีย้อมที่ไม่ละลายในน้ำ (Amornsri, 2003)

### 2.3.1 การแบ่งประเภทของสีย้อม (Amornsri, 2003)

แบ่งตามความสามารถในการละลายน้ำของสีย้อมได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 2.3.1.1 สีย้อมประเภทละลายน้ำได้ (Water soluble dyes)

สีย้อมประเภทละลายน้ำได้จะเกิดการแตกตัวเมื่อละลายน้ำได้ โดยสีย้อมที่อยู่ในรูปเกลือโซเดียมเมื่อละลายน้ำแล้วจะให้ประจุลบ ได้แก่ สีย้อมแอซิด (Acid dye) สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye) และสีย้อมไดเรกต์ (Direct dye) แต่ถ้าเมื่อละลายน้ำแล้วเกิดการแตกตัวให้ประจุบวก ได้แก่ สีย้อมเบสิก (Basic dye)

โมเลกุลสีย้อมสามารถทำให้เกิดสีได้ ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ และประกอบไปด้วยกลุ่มธาตุน้อยที่สุดหนึ่งตัวเรียกว่าโครโมฟอร์และออกโซโครม โดยทั่วไปแล้วโครโมฟอร์ (chromophore) จะทำหน้าที่ทำให้โมเลกุลของสีมีสีซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัว ขณะที่ออกโซโครม (auxochrome) จะทำหน้าที่ทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีสีเข้มขึ้นซึ่งจะทำให้สีย้อมสามารถละลายน้ำได้มากขึ้นและช่วยพัฒนาให้สีมีความว่องไวในการย้อมหรือพิมพ์สีลงบนเส้นใย

โมเลกุลของสีย้อมทั้งหมดประกอบด้วยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติก หมู่ฟังก์ชันของสีย้อมรีแอคทีฟที่พบมากที่สุดคือหมู่อะโซ (-N=N-)

#### 2.3.1.2 สีย้อมประเภทละลายน้ำไม่ได้ (Water insoluble dyes)

สีย้อมที่ไม่ละลายในน้ำแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

1. สีย้อมที่ละลายในสารตั้งต้น เช่น สีย้อมดิสเพิร์ส (Disperse dye) และสีย้อมที่ละลายได้ในตัวทำละลาย (Solvent-soluble dyes)
2. สีย้อมที่ละลายได้ชั่วคราว เช่น สีย้อมแวต (Vat dye) และสีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dye)
3. สีย้อมพอลิคอนเดนเซชัน (Poly condensation dye)
4. สีย้อมที่อยู่ภายในเส้นใย (Dyes formed within the fiber)
5. รงควัตถุ (Pigment)

ซึ่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นนิยมใช้สีย้อมประเภทละลายน้ำได้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สีย้อมรีแอคทีฟเรคเป็นสีย้อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมากที่สุดในอุตสาหกรรม รองลงมาก็คือสีย้อมแอซิด (Callely และคณะ, 1997 ; Robinson และคณะ, 2001 ; Pereira และคณะ, 2003)

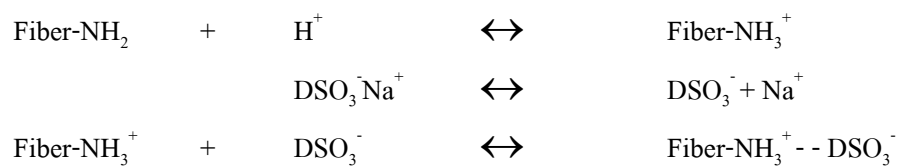
### 2.3.2 สีย้อมแอซิด (Acid dye)

สีย้อมแอซิดเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำและแตกตัวให้สารประกอบที่มีประจุลบ สีย้อมประเภทนี้มักใช้ในการย้อมสีพวกไนลอน ผ้าขนสัตว์ และเส้นใยพอลิเมอร์ธรรมชาติอื่นๆ สีย้อมประเภทนี้มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอยู่ที่ประมาณ 300-500 กรัมต่อโมล (Cooper, 1978 ; Smith, 2003)

โมเลกุลของสีย้อมแอซิดจะให้สีอยู่ในช่วงกว้างที่ประกอบไปด้วยระบบโครโมโฟนิค (chromophonic system) ซึ่งเป็น โครงสร้างพื้นฐานของแอนทราควิน โนน (anthraquinone) อะโซ (azo) ไตรเอริลมีเทน (triarylmethane) และอะซีน (azine) โมเลกุลของสีย้อมแอซิดทั้งหมดจะมีลักษณะเฉพาะที่เหมือนกัน กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อมีอะตอมอย่างน้อย 1 หมู่ที่จะละลายเข้าไปในน้ำซึ่งจะให้สารประกอบที่เกิดขึ้นแต่ก็ไม่เสมอไป เกลือโซเดียมของหมู่กรดซัลโฟนิค ( $-SO_3Na$ ) เป็น โครงสร้างหลักของโครงสร้างสีย้อมประเภทแอซิด (Ingamells, 1993)

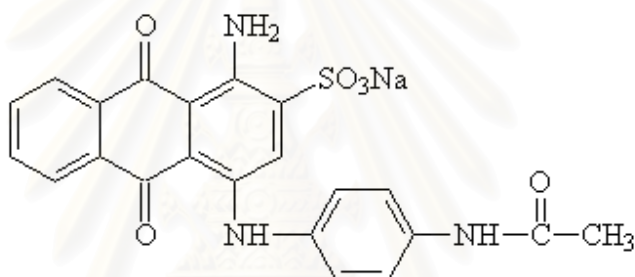
สีย้อมแอซิดจะนำไปใช้ในกระบวนการแบบกะที่มีค่าพีเอชในช่วง 3-7 ซึ่งสีย้อมประเภทนี้ละลายน้ำได้มาก ทำให้ง่ายต่อการทำความสะอาดเครื่องจักรและไม่ต้องใช้สารเคมีมากนัก (Smith, 2003)

ที่เรียกว่าสีแอซิดนั้นเป็นเพราะสีพวกนี้มักถูกนำมาใช้ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ซึ่งเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเส้นใยที่มนุษย์ทอมีอ เส้นใยสังเคราะห์ ไนลอน และเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ เช่นผ้าขนสัตว์ ผ้าไหม เส้นใยอะคริลิก และหนังฟอก โมเลกุลของสีแอซิดจัดอยู่ในประเภทไอออนลบ (anion) โดยทั่วไปแล้วประกอบไปด้วยเกลือโซเดียมของหมู่ซัลโฟนิค ( $-SO_3Na$ ) การดูดซับของสีย้อมแอซิดบนเส้นใยเป็นผลมาจากไอออนหรือสะพานเกลือระหว่างโมเลกุลของสีและเส้นใยพอลิเมอร์ ตำแหน่งบนเส้นใยโดยมากแล้วจะเป็นหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ซึ่งจะแตกตัวให้โปรตอนเป็นผลให้หมู่ฟังก์ชันนี้สามารถดูดซับโมเลกุลของสีย้อมแอซิดได้ การดูดซับสีไปยังบริเวณดูดซับของเส้นใยแสดงดังรูปที่ 2.3 พบว่าในสภาวะที่เป็นกรดมีความจำเป็นต่อการเชื่อมต่อนของเส้นใยกับโมเลกุลของสีเข้าด้วยกัน และในรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของสีย้อมแอซิดซึ่งใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอ



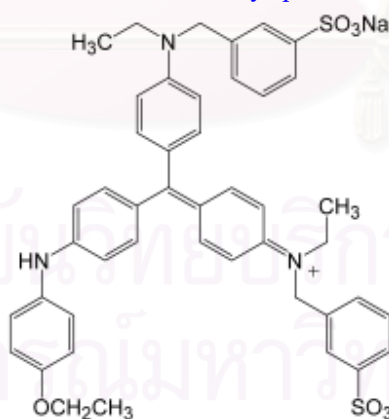
โดยที่ Fiber-NH<sub>2</sub> คือ เส้นใยพอลิเมอร์  
 Fiber-NH<sub>3</sub><sup>+</sup> คือ เส้นใยพอลิเมอร์ที่อยู่ในรูปที่แตกตัวให้อิออนบวก  
 DSO<sub>3</sub><sup>-</sup>Na<sup>+</sup> คือ โมเลกุลของสี  
 DSO<sub>3</sub><sup>-</sup> คือ โมเลกุลของไอออนลบของสี

รูปที่ 2.3 การดูดซับของสีไปยังบริเวณดูดซับของเส้นใย



(ก) สีข้อมแอซิดบลู 40

(ที่มา : [www.usca.edu/chemistry/spectra/acidbl40.gif](http://www.usca.edu/chemistry/spectra/acidbl40.gif))



(ข) สีข้อมแอซิดบลู 83

(ที่มา : [www.serva.de/products/data/35051.gif](http://www.serva.de/products/data/35051.gif))

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโมเลกุลของสีข้อมแอซิด (ก) สีข้อมแอซิดบลู 40 (ข) สีข้อมแอซิดบลู 83

### 2.3.3 สีย้อมรีแอคทีฟ (Reactive dye)

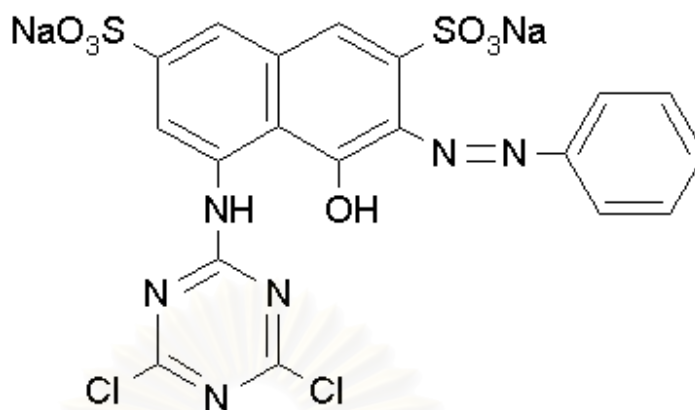
ในบรรดาประเภทของสีย้อมทั้งหมด สีย้อมรีแอคทีฟได้รับความนิยมและถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทออย่างกว้างขวางมากกว่า 30 ปีที่ผ่านมา สีย้อมประเภทนี้มีข้อพิเศคือมีช่วงเฉดสีที่กว้าง และมีสีที่สว่าง รวมทั้งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา แต่ก็นับเป็นสีย้อมที่ก่อให้เกิดมลพิษมากที่สุดในบรรดาสีย้อมทั้งหมด เนื่องจากมีปริมาณเกลือมากและประสิทธิภาพในการย้อมสีไม่ดีพอ จึงทำให้การย้อมติดสีกับเส้นใยในระบบแบบกะใช้ประโยชน์เพียง 1.5 ถึง 2 ส่วนใน 3 ส่วนของสีย้อม ส่วนสีย้อมที่เหลือจึงถูกปล่อยทิ้งไปกับน้ำทิ้ง (Smith, 2003)

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่ละลายน้ำและมีประจุลบ ส่วนมากแล้วจะใช้สำหรับการย้อมสีพวกเส้นใยเซลลูโลส เช่น ผ้าฝ้าย และเรยอน แต่บางครั้งอาจใช้กับผ้าขนสัตว์ ผ้าไหม ผ้าไนลอน และหนังฟอก

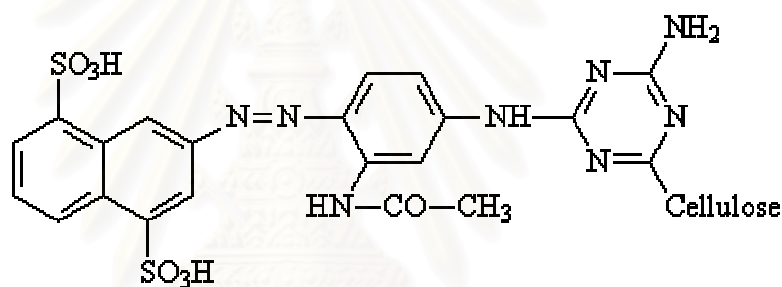
โครงสร้างของสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วย 3 ส่วนคือ

1. โครโมฟอร์ (Chromophore) คือ หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้เกิดสี
2. หมู่รีแอคทีฟ (Reactive group) โดยปกติคือวงแหวนเฮเทอโรไซคลิกของคาร์บอนกับไนโตรเจน (heterocyclic carbon-nitrogen ring system)
3. หมู่ที่หลุดออกไปได้ (Leaving group) คือ บางส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน ซึ่งทั่วไปคือสารประกอบฮาโลเจน (halogen)

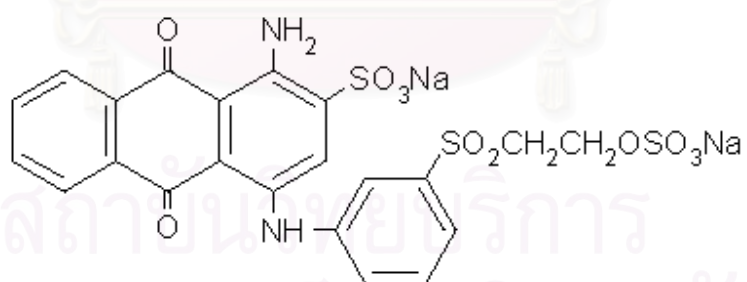
ตัวอย่างของโครงสร้างของสีย้อมรีแอคทีฟดังแสดงในรูปที่ 2.5



(ก) สีย้อมรีแอกทีฟเรด 2

(ที่มา : [w3.uniroma1.it/.../limage/404365\\_17804-49-8.png](http://w3.uniroma1.it/.../limage/404365_17804-49-8.png))

(ข) สีย้อมรีแอกทีฟเฮลโล่ 86

(ที่มา : [www.iontosorb.cz/yellow\\_86.gif](http://www.iontosorb.cz/yellow_86.gif))

(ค) สีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

(ที่มา : [www.pburch.net/dyeing/ramazol\\_blue19.gif](http://www.pburch.net/dyeing/ramazol_blue19.gif))**รูปที่ 2.5** โครงสร้างของโมเลกุลของสีย้อมรีแอกทีฟ

(ก) สีย้อมรีแอกทีฟเรด 2 (ข) สีย้อมรีแอกทีฟเฮลโล่ 86 (ค) สีย้อมรีแอกทีฟบลู 19

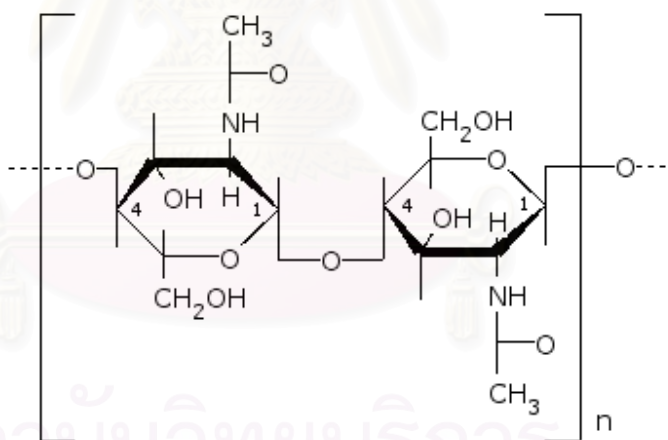
## 2.4 ลักษณะทั่วไปของไคโตซาน

ไคตินคือพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบในธรรมชาติที่ประกอบด้วยลักษณะเฉพาะตัว ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Braconnot ในปี ค.ศ.1823 คำว่า “ไคติน” มาจากคำว่า “ไคตอน” ในภาษากรีก มีความหมายว่า เปลือก (Foster และ Webber, 1960 ; Shahidi และคณะ, 1999) ไคตินเป็นสารชีวพอลิเมอร์ที่พบมากมายในธรรมชาติเป็นอันดับที่สองรองจากเซลลูโลส (Muzzarelli, 1997) ซึ่งพบในองค์ประกอบของเซลล์เชื้อรา สาหร่ายทะเล โพรโตซัว หนอนปล้อง หอย ปลาหมึก และพวกอาร์โทรพอด ไคตินจะพบมากในผนังเซลล์ของเปลือกพวกอาร์โทรพอด ได้แก่เปลือกปู เปลือกกุ้งฝอย และเปลือกกุ้งก้ามกราม โครงสร้างของไคตินจะเป็นโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงและยาวของพอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งจะคล้ายคลึงกับโมเลกุลของเซลลูโลส หน่วยโมโนเมอร์ในไคติน คือเอ็นอะซิติลกลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) หรือสองอะซิติลไมโดสองดีออกซีดีกลูโคส (2-acetamido-2-deoxy-D-glucose) หน่วยโมโนเมอร์เหล่านี้จะเชื่อมโยงด้วยเบต้าหนึ่งสี่สองอะซิติลไมโดสองดีออกซีดีกลูโคส ( $\beta(1,4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose(C_8H_{13}NO_5)_n$ )

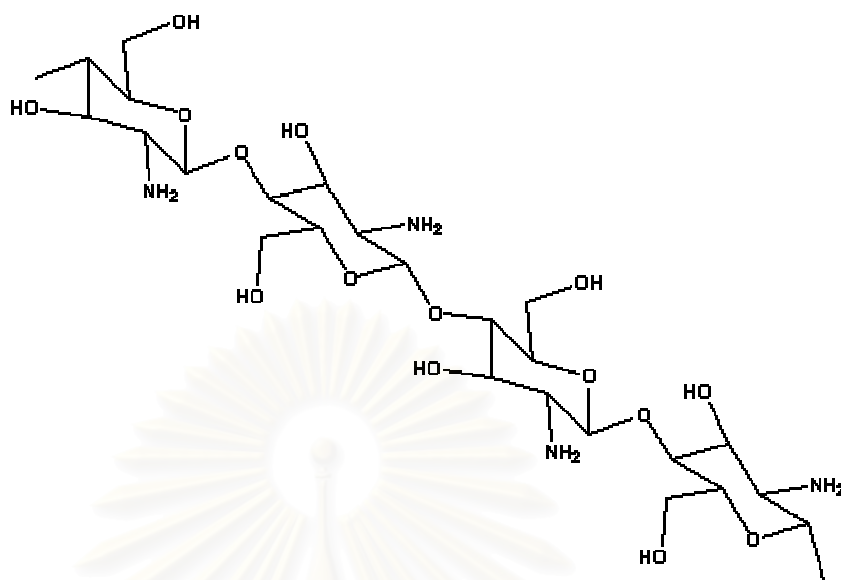
โดยทั่วไปไคตินแบ่งเป็นสามประเภทตามลักษณะ โครงสร้างโมเลกุลที่ต่างกัน ได้แก่ เบต้าไคติน ซึ่งพบมากในเปลือกปูและเปลือกกุ้งฝอย ซึ่งจะมีโมเลกุลเป็นแบบขนาน ส่วนอัลฟาไคติน พบมากในเปลือกหอยและแกนปลาหมึก มีโครงสร้างเป็นแบบไม่ใช้แบบขนาน และแกมมาไคติน จะมีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบและจะพบได้ยากในธรรมชาติ โดยส่วนมากการเตรียมไคตินจากแหล่งธรรมชาติพบว่ามี 3 ขั้นตอน ซึ่งได้แก่ การกำจัดโปรตีนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือเอนไซม์โปรตีเอส (enzyme protease) ตามด้วยการกำจัดเกลือแร่ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และสุดท้ายคือการกำจัดสีด้วยแอลกอฮอล์หรืออีเทอร์ ตามลำดับ ไคตินจะไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย เช่นน้ำ กรดเจ็อง สารละลายด่างเข้มข้นและเจ็อง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดฟอร์มิก และเอ็นเอ็นไดเมทิลอะซิตาเอไมด์ลิเทียมคลอไรด์ (N,N-Dimethylacetamide lithium chloride ; DMAc-LiCl) น้ำหนักโมเลกุลของไคตินมีมากกว่า  $1 \times 10^6$  ขึ้นไป และมีประมาณ 200 – 4,000 อนุกรมพอลิเมอร์ ในรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของไคติน

ไคโตซานคืออนุพันธ์ของไคติน ซึ่งพบโดยบังเอิญโดย Rouget ในปีค.ศ.1859 โดยการต้มไคตินให้เดือดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (Chiou และ Li, 1992) ซึ่งจะทำให้หมู่อะซิตาไมโน (-NHCOCH<sub>3</sub>) เปลี่ยนไปเป็นหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) โดยการกำจัดหมู่อะซิติลอิสระ (-COCH<sub>3</sub>) ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า “กระบวนการเอ็นดีอะซิติลเลชัน” (N-Deacetylation process) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ

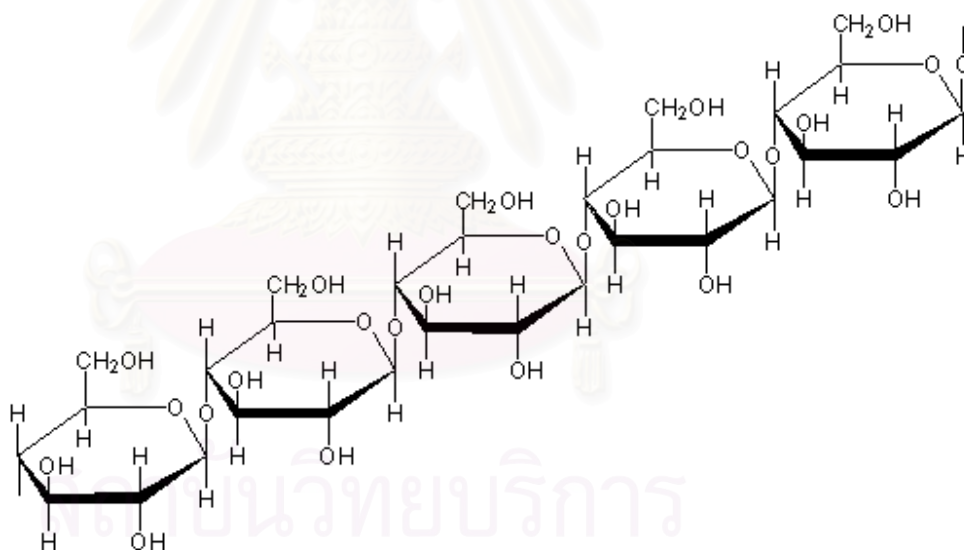
หน่วยโมเลกุลของไคติน โมโนเมอร์ของไคโตซานคือ ดีกลูโคซามีน (D-glucosamine) หรือสองอะมิโนสองดีออกซีดีกลูโคส (2-amino-2-deoxy-D-glucose) ซึ่งระดับการกำจัดหมู่เอซิดสามารถบอกปริมาณของหมู่เอมิโนที่เกิดขึ้นทั้งหมด หมู่เอมิโนเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญของไคโตซานที่นำมาใช้ประโยชน์ ยกตัวอย่างเช่น หมู่เอมิโนสามารถแตกตัวให้โปรตอนไปอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ( $-NH_3^+$ ) ซึ่งเป็นผลให้มีการเปลี่ยนแปลงไคโตซานไปเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุเป็นบวก ไคโตซานสามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 6 ซึ่งส่วนมากจะใช้กรดอะซิติก (acetic acid) และกรดฟอร์มิก (formic acid) และกรดอนินทรีย์บางตัวในอุณหภูมิปานกลาง เช่นกรดไนตริก (nitric acid) กรดไฮเพอคลอไรด์ (hyperchloride acid) กรดเพอคลอไรด์ (perchloride acid) และกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) แต่ไคโตซานไม่สามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างทั้งหมด ในรูปที่ 2.7 แสดงโครงสร้างของไคโตซาน และในรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของไคติน (ที่มา : [upload.wikimedia.org/.../commons/a/a1/chitin.png](http://upload.wikimedia.org/.../commons/a/a1/chitin.png))



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของไคโตซาน (ที่มา : [www.pslc.ws/.../kidsmac/sea/images/chitosan1.gif](http://www.pslc.ws/.../kidsmac/sea/images/chitosan1.gif))



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเซลลูโลส (ที่มา : [www.chemsoc.org/.../cfb/images/cellulose.gif](http://www.chemsoc.org/.../cfb/images/cellulose.gif))

ข้อแตกต่างระหว่างไคตินและไคโตซานคือระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (Degree of deacetylation) ซึ่งปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติลมักจะเกิดไม่สมบูรณ์ โดยทั่วไปไคโตซานมีระดับการกำจัดหมู่อะซิติลอยู่ในช่วงประมาณ 70-95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนไคตินมักจะมียระดับการกำจัดหมู่อะซิติลที่ต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และอีกประการหนึ่งคือไคตินจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า



7 เปอร์เซ็นต์ (ในโคตินประกอบด้วย อะซิติกกลูโคซามีน 82.5 เปอร์เซ็นต์ กลูโคซามีน 12.5 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์) แต่โคโตซานจะมีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่า 7 เปอร์เซ็นต์

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโคโตซาน เช่น ความหนืดและความสามารถในการละลาย ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างที่สำคัญสองประการ คือ ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก และมวลโมเลกุล

ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก หมายถึง เปอร์เซ็นต์ของหมู่อะมิโนอิสระที่มีอยู่ในสายพอลิแซคคาไรด์ สามารถหาได้โดยเทคนิคต่างๆ เช่น อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy) การไทเทรชัน (Titration) และ โครมาโทกราฟี (Chromatography) เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์มวลโมเลกุลสามารถใช้เทคนิคการวัดความหนืด (Viscometry) การวัดการกระเจิงแสง (Light scattering) และ โครมาโทกราฟี (Chromatography) โดยทั่วไปโคโตซานมักละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติกเจือจาง ในขณะที่โคตินจะไม่ละลายในน้ำหรือกรด และความหนืดของสารละลายโคโตซานจะเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล

#### 2.4.1 คุณสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ของโคโตซาน (โซคิริส เอ็มสอาด, 2545)

##### 2.4.1.1 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

โคโตซานไม่สามารถละลายในน้ำ สารละลายต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในสารละลายอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่มีค่าพีเอชของสารละลายน้อยกว่า 6 กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้มากที่สุดในการละลายโคโตซาน ตัวทำละลายกรดอินทรีย์เจือจางบางตัวเช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถนำมาใช้ในการเตรียมสารละลายโคโตซานแต่สามารถใช้ได้หลังจากการกวนและการทำให้สารละลายร้อนขึ้น

##### 2.4.1.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของโคโตซานนับเป็นปัจจัยหนึ่งที่ได้รับอิทธิพลมาจากปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ค่าความรุนแรงของไอออน ค่าพีเอช และอุณหภูมิ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์จะลดลง อย่างไรก็ตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในสารละลายพอลิเมอร์จะให้ค่าความหนืดของสารละลายแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ใช้ในการทำละลาย ถ้าใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำละลาย ค่าความหนืดของสารละลายโคโตซานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าพีเอชของสารละลาย ขณะที่เมื่อใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวทำละลาย ค่าความหนืดของสารละลายโคโตซานมีแนวโน้มลดลงเมื่อลดค่าพีเอชของสารละลาย ซึ่งชี้ให้เห็นว่าธรรมชาติของความหนืดของโคโตซานขึ้นอยู่กับระดับการแตกตัวเป็นไอออนหรือความรุนแรงของไอออน

### 2.4.1.3 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลใช้ในการหาค่าความหนืดและอัตราการย่อยสลาย น้ำหนักโมเลกุลของไคตินโดยเฉลี่ยมีค่าระหว่าง  $1.03 \times 10^6$  ถึง  $2.5 \times 10^6$  แต่ถ้าเกิดปฏิกิริยาเอ็นดีอะซิติกเลชัน (N-deacetylation) น้ำหนักของไคโตซานจะเหลือ  $1 \times 10^5$  ถึง  $5 \times 10^5$  (Kumar, 2000) ขณะที่ไคโตซานที่ใช้ทางการค้ามีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 100,000 – 1,200,000 ระหว่างกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรม สภาวะคร่าวๆ ที่จะนำไปสู่การย่อยสลายของไคโตซาน เช่น วิธีการของ Horowitz หลังจากผ่านการให้ความร้อนที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ความยาวของโซ่ไคโตซานจะเหลือเพียง 20 หน่วยเท่านั้น โดยทั่วไปปัจจัยเช่น การละลายของออกซิเจน อุณหภูมิสูง และแรงตึงเครียด เป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายของไคโตซาน

น้ำหนักโมเลกุลของไคตินและไคโตซานหาได้ด้วยวิธีการเหล่านี้เช่น Laser Light-Scattering Spectroscopy, Viscometry และ Gel Permeation Chromatography แต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือวิธี Gel Permeation Chromatography (Muzzarelli และ Peter, 1997)

### 2.4.1.4 ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (Degree of deacetylation : DD)

ระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) หรือเปอร์เซ็นต์ของหมู่อะซิติก (%DA) เป็นคุณลักษณะที่มีความสำคัญมากที่สุดของไคตินและไคโตซาน ระดับการกำจัดหมู่อะซิติกใช้ในการหาปริมาณหมู่อะมิโนอิสระที่มีอยู่ในไคโตซาน ส่วนเปอร์เซ็นต์ของหมู่อะซิติก คือ จำนวนหน่วยของกลูโคสไพราโนสที่มีอยู่ในไคติน ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้ในการหาคุณสมบัติเชิงฟิสิกส์และเคมีของไคตินและไคโตซาน เช่น ความสามารถในการละลาย การทำปฏิกิริยากับสารเคมี การย่อยสลายได้ด้วยวิธีชีวภาพ และการนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ต่างๆ (Goosen, 1997 ; Khor, 2001 และ Kumar, 2000) ทั้งไคตินและไคโตซานเป็น โคพอลิเมอร์ของ 2 โมโนเมอร์ระหว่าง ดีกลูโคซามีน (D-glucosamine) และเอ็นอะซิติกดีกลูโคซามีน (N-acetyl-D-glucosamine) เมื่ออัตราส่วนของโมโนเมอร์ตัวแรกสูงกว่าโมโนเมอร์ตัวที่สอง ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติกจะมีค่าสูง ซึ่งแสดงคุณสมบัติของไคโตซาน

วิธีที่ใช้ในการหาระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD) มีหลายวิธีได้แก่ การไทเทรต, Circular dichroism, อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Infrared (IR) Spectroscopy), High Performance Liquid Chromatography (HPLC), อัลตราไวโอเลตสเปกโตรสโคปี (Ultraviolet (UV) Spectroscopy) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy) แต่วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ อัลตราไวโอเลตสเปกโตรสโคปี (Ultraviolet (UV)

Spectroscopy) และนิวเคลียร์แมกนีติกเรโซแนนซ์สเปกโตรสโกปี ( $^1\text{H NMR}$ ) (Muzzarelli และ Peter, 1997)

#### 2.4.1.5 โคลแอกกูเลชัน (Coagulation Ability)

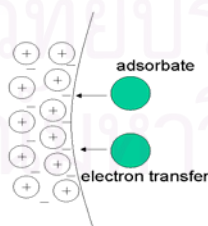
โคลโคซานเป็นสารที่ช่วยให้เกิดการโคลแอกกูเลชัน ซึ่งทำให้มีความหนาแน่นของหมู่อะมิโนสูงเป็นสาเหตุให้สามารถทำปฏิกิริยากับประจุลบของสารเช่น โปรตีน ของแข็ง สีย้อม และพอลิเมอร์ได้ อย่างไรก็ตามโคลโคซานจะประพฤติตัวแตกต่างจากไอออนของโลหะทรานสิชันอย่างสิ้นเชิง ในโตรเจนในหมู่อะมิโนของโมเลกุลโคลโคซานจะประพฤติตัวเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และเลือกจับกับไอออนโลหะได้

#### 2.4.1.6 ความสามารถในการละลาย (Solubility)

โคลโคซาน คือการกำจัดหมู่อะซิดิลออกจากโคติน จะไม่ละลายในด่างและตัวทำละลายอินทรีย์ แต่จะละลายในสารละลายกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เป็นต้น (Kumar, 2000)

### 2.5 การดูดซับ (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

การดูดซับคือกระบวนการถ่ายเทมวลซึ่งสามารถให้คำจำกัดความได้ว่าเป็นการสะสมของสารที่บริเวณผิวหน้าที่อยู่ระหว่าง 2 เฟส ได้แก่ ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง แก๊สกับของเหลว และแก๊สกับของแข็ง ในกระบวนการดูดซับโมเลกุลหรืออะตอมหรือไอออนในแก๊สหรือของเหลวจะแพร่เข้าไปยังพื้นผิวของของแข็ง ขณะที่พื้นระบบริเวณผิวหน้าของของแข็งหรือจะถูกครอบครองโดยแรงภายในโมเลกุลอ่อนๆ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับจะเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่สารที่เป็นของแข็งจะเรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การดูดซับด้วยอนุภาคของแข็งของตัวดูดซับ

(ที่มา : [www.uni-siegen.de/.../pcii/image/adsorption.GIF](http://www.uni-siegen.de/.../pcii/image/adsorption.GIF))

### 2.5.1 ทฤษฎีการดูดซับ (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

ระบบเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดซับในสารประกอบหลากหลายชนิดที่แข่งขันกันที่สภาวะสมดุล กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งในสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงแล้ว (steady-state) และสภาวะที่ยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ (unsteady-state) แรงขับเคลื่อนที่ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับคือแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและแรงผลักระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ แรงขับนี้สามารถเป็นได้ทั้งที่เกี่ยวเนื่องกับฟิสิกส์และเคมี ในการอธิบายส่วนสำคัญของการดูดซับ ซึ่งใช้ในการจำแนกแยกแยะระหว่างการดูดซับเชิงฟิสิกส์ซึ่งเกี่ยวข้องกับแรงภายในโมเลกุลอย่างอ่อนๆเท่านั้น ส่วนการดูดซับเชิงเคมีนั้นเกี่ยวข้องกับการสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ

### 2.5.2 ลักษณะการดูดซับ (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

#### ก. การดูดซับเชิงฟิสิกส์ (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

การดูดซับเชิงฟิสิกส์เป็นผลเนื่องมาจากแรงภายในโมเลกุลที่ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ แรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องกับฟิสิกส์นั้นรวมไปถึงแรงวันเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ที่ประกอบไปด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆและแรงผลัก ตลอดจนปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพล (Dipole-dipole interactions) และปฏิกิริยาจากการแพร่ (Dispersing interactions) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพลเป็นผลมาจากสารประกอบที่มีขั้ว ดังนั้นประจุของมันเป็นผลมาจากการรวมตัวของพลังงานอิสระตัวที่ต่ำกว่า ปฏิกิริยาจากการแพร่เป็นผลมาจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของโมเลกุลในระบบ ถ้าโมเลกุลมาอยู่ชิดกันมากเกินไปจะเกิดแรงผลักขึ้นซึ่งสามารถผลักโมเลกุลให้แยกจากกัน ส่วนพันธะไฮโดรเจนเป็นกรณีพิเศษของปฏิกิริยาไดโพล-ไดโพลซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลมีบางส่วนที่เป็นประจุบวก จึงสามารถดึงดูดอะตอมอื่นหรือบางส่วนของโมเลกุลที่มีประจุลบได้ สำหรับในของเหลว แรงวันเดอร์วาลส์เป็นแรงขับเชิงฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับเป็นแรงแรก การดูดซับเชิงฟิสิกส์คือปฏิกิริยาผันกลับได้อย่างรวดเร็วรวมทั้งเกิดการดูดซับได้ทั้งแบบโมโนเลเยอร์และมัลติเลเยอร์ เพราะการดูดซับเชิงฟิสิกส์ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีพลังงานในการดูดซับต่ำและไม่เกิดในตำแหน่งเฉพาะ ความร้อนของการดูดซับสำหรับปฏิกิริยาอยู่ที่ 40 บีที่ยุต่อปอนด์ต่อโมลของตัวถูกดูดซับ เมื่อแรงภายในโมเลกุลระหว่างโมเลกุลของสารเคมีในของเหลวและของแข็ง (ตัวดูดซับ) จะมีมากกว่าแรงระหว่างโมเลกุลของของเหลว สารเคมีจะถูกดูดซับไปยังผิวหน้าของตัวดูดซับ

### ข. การดูดซับเชิงเคมี (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

การดูดซับเชิงเคมีคล้ายกับการดูดซับเชิงฟิสิกส์ คือขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน กลไกของการดูดซับเชิงเคมีมีความคล้ายคลึงกับการดูดซับเชิงฟิสิกส์ แต่มีความแข็งแรงกว่า (เป็นเพราะพลังงานการดูดซับของพันธะเคมี) การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับจะทำให้เกิดการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งอาจจะเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับไม่ได้ และมีพลังงานการดูดซับสูง ความร้อนของการดูดซับเชิงเคมีมีค่ามากกว่าการดูดซับเชิงฟิสิกส์ คืออยู่ในช่วง 80-400 บีที่เยตอปอนด์ต่อโมล การดูดซับเชิงเคมีเกี่ยวข้องกับบริเวณ โมโนเลเยอร์เท่านั้น และบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเป็นบริเวณที่มีความจำเพาะเจาะจง คือเกิดบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความจำเพาะเจาะจง หมู่ฟังก์ชันที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในสารประกอบอินทรีย์นั้นจะเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับเคมีและฟิสิกส์ ในตารางที่ 2.9 แสดงข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงฟิสิกส์กับการดูดซับเชิงเคมี

ตารางที่ 2.9 จำแนกข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับเชิงฟิสิกส์และการดูดซับเชิงเคมี (Kenneth, 1992 ; Alley, 2000)

การดูดซับเชิงฟิสิกส์	การดูดซับเชิงเคมี
1. ความร้อนของการดูดซับต่ำ (<2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)	1. ความร้อนของการดูดซับสูง (>2 หรือ 3 เท่าของความร้อนแฝงของการระเหย)
2. ไม่มี ความจำเพาะเจาะจง	2. มีความจำเพาะเจาะจงสูง
3. เป็นได้ทั้งโมโนเลเยอร์หรือมัลติเลเยอร์	3. เป็นโมโนเลเยอร์เท่านั้น
4. ไม่มีการแตกตัวของชนิดของสารที่ถูกดูดซับ	4. อาจเกี่ยวข้องกับการแตกตัว
5. มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิต่ำเท่านั้น	5. อาจเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิกว้างๆ
6. เกิดอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดการกระตุ้น และผันกลับได้	6. เกิดการกระตุ้น อาจเกิดได้ช้า และผันกลับไม่ได้
7. ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตามอาจเกิดภาวะรังสีของแสงซึ่งมีการสั่นในระนาบเดียวเท่านั้นของตัวถูกดูดซับ	7. เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้า

### 2.5.3 กลไกของการดูดซับไปยังรูพรุนของตัวดูดซับ (McKay และคณะ, 1982)

สำหรับการดูดซับของตัวดูดซับหลายไปยังผิวของรูพรุนของตัวดูดซับมีอยู่ 4 ขั้นตอนดังนี้

1. การขนส่งสีย้อมจากสารละลายไปยังบริเวณผิวหน้าที่อยู่ด้านนอกของตัวดูดซับ
2. การเคลื่อนที่ของสีย้อมข้ามผิวหน้าที่อยู่ระหว่าง 2 เฟส และการดูดซับไปยังบริเวณผิวภายนอกของตัวดูดซับ
3. การเคลื่อนย้ายของโมเลกุลสีย้อมเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ
4. การทำปฏิกิริยาของโมเลกุลสีย้อมเกี่ยวกับบริเวณที่เหมาะสมบนพื้นผิวภายในรูพรุนและที่ว่างขนาดเล็กของตัวดูดซับ

### 2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### ก. ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Nature of the adsorption)

โครงสร้างของโคโคซานตั้งอยู่บนพื้นฐานของเซลล์ลูโลส และพื้นผิวของเซลล์ลูโลสที่สัมผัสกับน้ำจะเป็นประจุลบ สีย้อมส่วนมากจะแตกตัวให้อิออนในสารละลายกลายเป็นเกลือหรือกรดซัลโฟนิกหรือกรดคาร์บอกซิลิก ขณะที่ตัวอื่นประกอบด้วยหมู่ฟีนอลิก ตัวอย่างเช่น สีย้อมแอซิดบลู 25 จะแตกตัวให้ประจุลบที่ประกอบด้วย D<sup>-</sup> และประจุบวกของ Na<sup>+</sup> ส่วนสีย้อมเบสิกบลู 69 จะแตกตัวให้ประจุบวก ไอออนเหล่านี้จะดึงดูดดึงคู่ให้เข้าไปใกล้โครงสร้างของโคโคซาน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

**พื้นที่ผิว (Surface area)** เหตุผลสำคัญประการหนึ่งในการเลือกตัวดูดซับคือพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ดีจะต้องมีรูพรุนสูงมาก นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น พื้นที่ผิวส่วนมากของโคโคซานจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของโครงสร้างของรูพรุน คุณสมบัติของพื้นที่ผิวที่มีผลต่อการดูดซับคือการกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

**ขนาดการกระจายตัวของรูพรุน (Pore size distribution)** คือการวัดเปอร์เซ็นต์ของที่ว่างของอนุภาค โดยรูพรุนที่มีขนาดเล็ก (micropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 อังสตรอม รูพรุนที่มีขนาดกลาง (mesopores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 20 แต่ไม่ต่ำกว่า 500 อังสตรอม และรูพรุนที่มีขนาดใหญ่ (macropores) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 500 อังสตรอม โมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคตัวถูกดูดซับที่มีขนาดเล็กที่สุด (ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุล)

**โครงสร้างของรูพรุน (Pore structure)** โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ

#### **ข. ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Nature of the adsorbate)**

**ความสามารถในการละลาย (Solubility)** ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

**น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล (Weight and Molecular weight)** เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นถ้าโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

**ความมีขั้วของโมเลกุล (Polarity)** ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

#### **ค. สภาพแวดล้อม**

**อุณหภูมิของสารละลาย (Temperature)** เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้มากหรือน้อยจึงขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่ปฏิกิริยาดูดความร้อนความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยนั้น ไม่มีผลต่อการดูดซับ (Cestari และคณะ, 2004)

**ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม (pH)** ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับสีย้อมไปยังไคโตซานเพราะที่ค่าพีเอชต่ำ หมู่อะมิโนอิสระจะแตกตัวให้โปรตอนเป็นสาเหตุให้เกิดแรงดึงดูดกับสีย้อมที่มีประจุลบได้มากขึ้นเนื่องจากเกิดแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการดูดซับของสีย้อมได้ดีขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายลดลง (Chiou, Ho และ Li, 2004)

**อัตราเร็วในการเขย่า (Agitation)** การเพิ่มอัตราเร็วในการเขย่าจะทำให้ลดความหนาของชั้นการแพร่ที่โอบล้อมอนุภาคของตัวดูดซับ ทำให้โมเลกุลของสีย้อมสามารถผ่านชั้นฟิล์มและแทรกเข้าไปในตัวดูดซับได้ ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

**ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียดังเคราะห์สีย้อม (Initial dye concentration)** เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมบนโคโคซาน ทั้งนี้เป็นเพราะเป็นการเพิ่มแรงขับ (driving force) ของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น (concentration gradient) ซึ่งจะมีค่ามากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (Chiou, Ho และ Li, 2002)

**ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)** ในการศึกษาผลของอิเล็กโทรไลต์ต่อการดูดซับสีย้อมยังมีไม่มากนัก แต่ที่มีการศึกษาพบว่าอิเล็กโทรไลต์มักจะเป็นตัวยับยั้งการดูดซับสีย้อมบนตัวโคโคซาน (Karthikeyan และคณะ, 2004)

### 2.5.5 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption equilibrium and adsorption isotherm) (Chiou และ Li, 2002)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (liquid–solid adsorption) จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ จะมีการคายการดูดซับเกิดขึ้นพร้อมๆกัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นตามมาก็คือ อัตราการดูดซับและอัตราการคายตัวจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นคุณสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และค่าพีเอชของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอมของการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ ( $q_e$ ) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล ( $C_e$ ) ณ อุณหภูมิคงที่

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีที่ได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับคือสมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation) และสมการฟรุนดลิช (Freundlich Equation)



### ก. สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

แบบจำลองการดูดซับแลงเมียร์เป็นจุดกำเนิดที่พัฒนามาจากการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งแบบจำลองนี้ขึ้นอยู่กับสมมุติฐานที่ว่าแรงภายใน โมเลกุลลดลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางและผลที่ตามมาใช้ทำนายการมีอยู่ของตัวถูกดูดซับอยู่บริเวณ โมโนเลเยอร์ที่ผิวด้านนอกของตัวดูดซับ สมการไอโซเทอมนี้สมมุติเพิ่มเติมว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันภายในตัวดูดซับ ซึ่งเหตุการณ์นี้สมมุติว่าสี่เหลี่ยมหนึ่ง โมเลกุลจะครอบครองพื้นที่หนึ่งพื้นที่และจะไม่มีการดูดซับเกิดขึ้นบริเวณนี้อีกต่อไป อย่างไรก็ตามสมการแลงเมียร์ตั้งอยู่บนพื้นฐานของโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวดูดซับ ขณะที่บริเวณที่เกิดการดูดซับนั้นเหมือนกันและมีพลังเท่ากัน (Mantell, 1951; Noll และคณะ, 1992 ; Ray, 1995)

แบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$q_e = \frac{QbC_e}{1+bC_e} \quad (2.1)$$

โดยที่  $q_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสถานะของแข็งที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$Q$  คือ ปริมาณสูงสุดของสี่เหลี่ยมต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของไคโตซานที่ครอบคลุมบริเวณชั้น โมโนเลเยอร์อย่างเต็มที่ซึ่งอยู่บนขอบเขตของผิวหน้าที่มีความเข้มข้นของสี่เหลี่ยมสูงที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของสี่เหลี่ยมที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$b$  คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับความชอบของบริเวณที่เกิดการดูดซับสี่เหลี่ยม (ลิตรต่อกรัม)

พล็อตกราฟระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  จะให้เส้นตรงของความชัน  $b$  และจุดตัดแกน  $y$  คือ  $1/Q$

สมการเส้นตรงของแลงเมียร์แสดงดังนี้

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

### ข. สมการฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

สมการฟรุนดลิชคือสมการที่ได้จากการทดลองที่ใช้อธิบายระบบที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity factor :  $1/n$ ) สมการฟรุนดลิชแสดงได้ดังนี้

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

โดยที่  $q_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสถานะของแข็งในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสถานะของเหลวในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$Q_f$  คือ ค่าคงที่ฟรุนดลิช (ลิตรต่อกรัม)

$1/n$  คือ ปัจจัยที่แสดงความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

เส้นตรงที่ได้จากสมการฟรุนดลิชได้มาจากการเทคลอการิทึมของสมการ (2.3) จะได้

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

การพล็อตกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะให้ค่าคงที่  $Q_f$  และค่า  $1/n$  ก็สามารถหาได้จากสมการ (2.4) ไอโซเทอมนี้แสดงว่าเป็นการดูดซับเชิงฟิสิกส์ และอธิบายว่าการดูดซับนี้เป็นแบบผันกลับได้และไม่ถูกจำกัดเกี่ยวกับการเกิดที่ชั้นโมโนเลเยอร์ สมการฟรุนดลิชใช้ทำนายความเข้มข้นของสีย้อมบนตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสีย้อมในของเหลวที่เพิ่มขึ้น (Mantell, 1951 ; Noll ; และคณะ, 1992 ; Ray, 1995 ; Chiou และ Li, 2002)

### 2.6 การดูดซับแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode)

ในการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวที่มีสารถูกละลายไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง

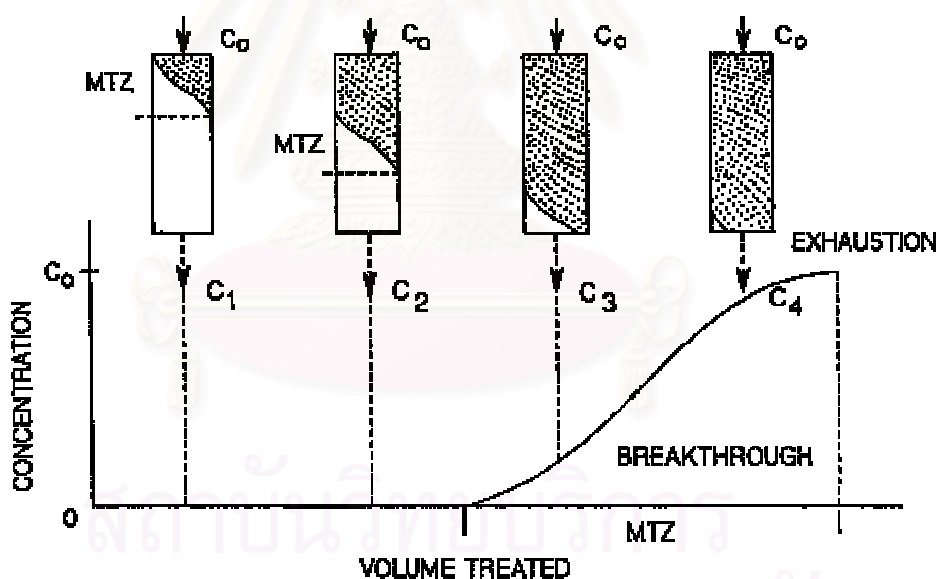
#### ก. ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

เมื่อน้ำที่มีสารที่ต้องการดูดซับปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ขอบเขตการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องและสารถูกละลายจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารถูกละลายที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึก

ของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของตัวถูกดูดซับ และลักษณะของการดูดซับ

#### ข. ลักษณะเบรคทรูจ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทรูจเป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างความเข้มข้นของสารในน้ำขาออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังรูปที่ 2.10 แสดงรูปทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทรูจ จากรูปที่ 2.10 เวลาเริ่มต้นตัวถูกดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เมื่อเวลา  $t=n_1$  น้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณตัวดูดซับต่ำ ตัวถูกดูดซับส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับในชั้นต้นๆ เมื่อของเหลวไหลผ่านปริมาณมากขึ้น เวลา  $t=n_2$  และ  $t=n_3$  ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณของตัวถูกดูดซับในน้ำขาออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งเวลา  $t=n_4$  ชั้นของตัวดูดซับใกล้หมดสภาพปริมาณของตัวถูกดูดซับในน้ำขาออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของตัวถูกดูดซับในน้ำขาเข้า



รูปที่ 2.10 เส้นโค้งเบรคทรูจในการดูดซับแบบคอลัมน์

(ที่มา : [www.activated-carbon.com/sol rec 3. html](http://www.activated-carbon.com/sol rec 3. html))

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cestari และคณะ (2004) ได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมที่มีประจุลบคือสีย้อมประเภทรีแอคทีฟ 3 สี ได้แก่สีเหลือง น้ำเงิน และแดง โดยใช้เม็ดโคลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (GA) เป็นตัวดูดซับที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเท่ากับ 2.0 พบว่าโครงสร้างทางเคมีของสีย้อม อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับมีผลต่อจลนศาสตร์ของการดูดซับ คือ การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เป็นสีเหลืองจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วง 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส แต่การดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เป็นสีน้ำเงินจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วง 25 ถึง 50 องศาเซลเซียส ส่วนการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟที่เป็นสีแดงจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วง 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส แต่การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในช่วง 45 ถึง 50 องศาเซลเซียส

ที่เป็นเช่นนี้เพราะสีเหลืองมีโครงสร้างโมเลกุลค่อนข้างเป็นเส้นตรงและมีสายโซ่คาร์บอนเล็กๆ ทำให้สีย้อมชนิดนี้สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของเม็ดโคลโตซานได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

ส่วนสีน้ำเงิน จากสูตร โครงสร้างมีหมู่ซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3^-$ ) และหมู่เอมีน ( $\text{NH}_2$ ) ซึ่งตำแหน่งทั้งสองนี้จะเกิดในสายโซ่เบนซีนเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้หมู่ซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3^-$ ) มีประสิทธิภาพต่ำในการดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับหมู่เอมีน ( $\text{NH}_3^+$ ) ของเม็ดโคลโตซาน และอีกอย่างสีน้ำเงินมีกิ่งก้านสาขามากกว่าสีเหลือง ดังนั้นทำให้สีน้ำเงินแพร่เข้าไปในรูพรุนของเม็ดโคลโตซานได้ยาก จากการทดลองพบว่าการดูดซับสีน้ำเงินเกิดขึ้นเพียงบริเวณผิวของเม็ดโคลโตซาน ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปริมาณการดูดซับจะลดลง ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงสีน้ำเงินจะเกิดการคายการดูดซับมากกว่าเกิดการดูดซับ

ส่วนสีแดงนั้น โครงสร้างโมเลกุลมีกิ่งก้านสาขามากที่สุดและพบว่ามีหมู่ซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3^-$ ) มากที่สุด ซึ่ง 2 ปัจจัยนี้ส่งผลต่อพฤติกรรมการดูดซับ โดยที่อุณหภูมิต่ำ (25-35 องศาเซลเซียส) การดูดซับจะเกิดขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (45-50 องศาเซลเซียส) จะเพิ่มการดูดซับเนื่องมาจากการแพร่ของสีย้อมเกิดขึ้นเนื่องจากรูพรุนจะขยายขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และประสิทธิภาพการแพร่ของสีย้อมสีแดงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณของหมู่ซัลโฟนิค ( $\text{SO}_3^-$ ) ในโมเลกุลของสีย้อม

Chiou และ Li (2002) ได้ศึกษาสมมูลและแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 189 (RR189) โดยใช้เม็ดโคลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยโครงร่างตาข่ายด้วยอิพิคลอโรไฮดรินเป็นตัวดูดซับ สมมูลไอโซเทอมที่ขนาดอนุภาคต่างๆกันคือ 2.3-2.5, 2.5-2.7 และ 3.5-3.8 มิลลิเมตร และจลนศาสตร์ของการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอัตราส่วนการเติมสารเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายได้ถูกนำมาศึกษา ข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่าแบบจำลอง

แลงเมียร์ในช่วงความเข้มข้นอิมตัวอยู่ในช่วง 0-1,800 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุดที่ขึ้น โมโนเลเยอร์อธิบายได้โดยแบบจำลองแลงเมียร์ซึ่งมีค่าสูงมากถึง 1936, 1686 และ 1642 กรัมต่อกิโลกรัมสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ที่ค่าพีเอช 3.0 และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายเท่ากับ 0.2 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองจลนศาสตร์ปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเชิงเคมีเป็นกลไกควบคุมการเกิดปฏิกิริยาแทนที่จะเป็นการถ่ายเทมวล จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อม และค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมมีผลอย่างมากต่อการดูดซับสีข้อม แต่อุณหภูมิและอัตราส่วนการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายมีผลน้อยต่อการดูดซับสีข้อม ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมจะเพิ่มการดูดซับสีข้อม แต่การลดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมจะเพิ่มการดูดซับสีข้อม พลังงานก่อกัมมันต์มีค่าเท่ากับ 43.0 กิโลจูลต่อโมลสำหรับการดูดซับสีข้อมโดยใช้เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายด้วยอิพิคลอโรไฮดรินเป็นตัวดูดซับที่ค่าพีเอช 3.0 และความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมเท่ากับ 3,768 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Wong และคณะ (2004) ศึกษาการดูดซับสีข้อมแอซิด 5 ตัว ได้แก่ แอซิดกรีน 25 (AG25) แอซิดออเรนจ์ 10 (AO10) แอซิดออเรนจ์ 12 (AO12) แอซิดเรด 18 (AR18) และแอซิดเรด 73 (AR73) โดยใช้ไคโตซานเป็นตัวดูดซับ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสูงที่สุดเกิดขึ้นที่ขึ้น โมโนเลเยอร์ของแอซิดกรีน 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 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการดูดซับที่แตกต่างกันเนื่องมาจากขนาดโมเลกุลของโมเลกุลของสีข้อมและจำนวนของหมู่ซัลโฟเนตของแต่ละสีข้อมที่แตกต่างกัน ซึ่งอธิบายได้ว่าโมโนวาเลนซ์ (monovalence) และอนุภาคของสีข้อมที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีประสิทธิภาพการดูดซับของสีข้อมต่อไคโตซานเพิ่มขึ้นเพราะว่าโมเลกุลของสีข้อมสามารถแทรกผ่านโครงสร้างรูพรุนภายในโมเลกุลของไคโตซานได้มากขึ้น

Wu และคณะ (2001) ศึกษาการดูดซับของสีข้อมรีแอคทีฟเรด 222 (RR 222) และคอปเปอร์ทูไอออน ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และการยับยั้งเอนไซม์กรดฟอสฟาเตส (acid phosphatase) โดยใช้เม็ดไคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งฝอยเป็นตัวดูดซับ พบว่าเม็ดไคโตซานมีการบวมสูงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไคโตซานเตรียมจากเปลือกกุ้งฝอยและนำไปเติมสารเชื่อมขวางที่ปริมาณแตกต่างกันของกลูตารัลดีไฮด์

หรือไกลออกซอล (100-80,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากการทดลองพบว่าปริมาณการดูดซับของตัวถูกดูดซับและประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์กรดฟอสฟาเตสโดยใช้ไคโตซานชนิดเม็ดที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายเป็นตัวดูดซับขึ้นอยู่กับระดับการเติมสารเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายคือเมื่อเพิ่มระดับการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายจะลดปริมาณการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 222 (RR 222) และคอปเปอร์ทูไอออน ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ไปยังไคโตซาน แต่เมื่อเพิ่มระดับการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายจะเพิ่มปริมาณการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 222 (RR 222) อัตราเร็วการเชื่อมขวางของไคโตซานด้วยกลูตารัลดีไฮด์อธิบายด้วยสมการปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้และสมดุลการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายอธิบายด้วยสมการฟรุนดลิช (ค่าคงที่  $k^2 = 10^{-4} - 10^{-5}$  กรัมต่อมิลลิกรัมนาที) ส่วนประสิทธิภาพในการยับยั้งเอนไซม์กรดฟอสฟาเตส (acid phosphatase) โดยใช้เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายเป็นตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น ถ้าความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการเชื่อมขวาง โครงร่างตาข่ายมีค่าสูงพอคือ มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนช่วงชีวิตของการยับยั้งเอนไซม์นี้มีมากกว่า 42 วันขึ้นไป จากการทดลองพบว่าเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยโครงร่างตาข่ายมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 222 (RR 222) และสามารถยับยั้งเอนไซม์กรดฟอสฟาเตส (acid phosphatase) ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

จินตนา ชำนาญบุญธรรม (2000) ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆต่อการดูดซับสีซีย้อมที่ละลายน้ำได้ 4 ประเภทคือแอซิด รีแอคทีฟ ไคเร็กซ์ และเบสิก ได้แก่ สีซีย้อมแอซิดเรด 360 (AR360) สีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 158 (RR158) สีซีย้อมไคเร็กซ์เรด 80 (DR80) และสีซีย้อมเบสิกเรด 24 (BR24) โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ ไคติน ไคโตซานและเปลือกกุ้งฝอย จากการทดลองพบว่าการดูดซับสีซีย้อมแอซิด รีแอคทีฟ และไคเร็กซ์ โดยใช้ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นกรดที่มีค่าพีเอชน้อยกว่า 5 โดยที่ไคโตซานจะดูดซับสีซีย้อมได้ดีกว่าไคตินและเปลือกกุ้งฝอย ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามการดูดซับสีซีย้อมเบสิกโดยใช้ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่ออยู่ในสารละลายที่เป็นด่างที่มีค่าพีเอชมากกว่า 10 ขณะที่การดูดซับสีซีย้อมเบสิกโดยใช้เปลือกกุ้งฝอยเป็นตัวดูดซับจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุด ปริมาณการดูดซับสีซีย้อมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการดูดซับแต่จะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาค ปริมาณสีซีย้อมที่ถูกดูดซับทั้งหมดยกเว้นสีซีย้อมเบสิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการกำจัดหมู่อะซิดิล แรงภายในของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนจะเป็นแรงหลักที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับสีซีย้อมไปยังตัวดูดซับ

ส่วนการคายการดูดซับศึกษาผลของค่าพีเอชและอุณหภูมิต่อการคายการดูดซับ พบว่าการคายการดูดซับของสีซีย้อมจากตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และ

ค่าพีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 10 ยกเว้นสี้อมเบสเกิดการคายการดูดซับจะมีค่าสูงที่ค่าพีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 ประสิทธิภาพในการคายการดูดซับจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้ตัวดูดซับทั้ง 3 ชนิดเป็นตัวดูดซับคือ สี้อมรีแอกทีฟ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ก. เปลือกกุ้งแช่บ๊วยหรือกุ้งขาว
- ข. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Analytical reagent) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรโครงสร้าง	บริษัท
กรดแอซติก	$\text{CH}_3\text{COOH}$	BHD
กรดไฮโดรคลอริก 37 %	HCl	CARLOERBA REAGENTS
โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	BHD
เอทานอล 99.7-100 %	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	BHD
กรดบอริก	$\text{H}_3\text{BO}_3$	Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
กรดซิตริก	$\text{HOC}(\text{COOH})(\text{CH}_2\text{COOH})_2$ $\cdot\text{H}_2\text{O}$	Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
ไตรโซเดียมฟอสเฟต	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	CARLOERBA REAGENTS
โปแตสเซียมไนเตรต	$\text{KNO}_3$	CARLOERBA REAGENTS
กลูตารัลดีไฮด์ 25 %	$\text{OHCC}_3\text{H}_6\text{CHO}$	Ajax Fine Chem
สี้อมรีแอคทีฟเรด 120	Azo dye (แสดงในรูปที่3.1)	Sigma
สี้อมแอซิคบลู 129	Azo dye (แสดงในรูปที่3.2)	Aldrich



### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น
ตู้อบ (Hot air oven)	TSF
แผ่นความร้อน (Hot plate)	SLR
เครื่องกวนปรับความเร็วรอบ (Motor stirrer)	RW20N
เครื่องชั่งน้ำหนัก (Analytical Balance)	AB204-S
เครื่องเขย่า (Shaker)	GFL3020
เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)	F-23
เพอริสตัลติกปั๊ม (Peristaltic pump)	77200-60
เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0-150 องศาเซลเซียส	-
เครื่องแก้วอื่นๆในห้องปฏิบัติการ	-

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการทดลอง

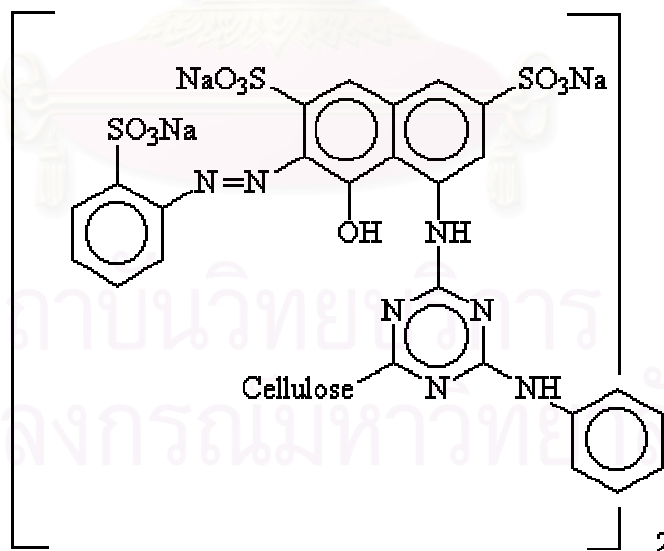
เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	รุ่น
Fourier Transform Infrared Spectroscopy	FT-IR 1760X
Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy	DTX300
Scanning Electron Microscope	JSM-5800LV
Zeta meter	System 3.0+
Surface area and porosity analyser	JJSM 6400
Gel Permeation Chromatography	-
UV/VIS Spectrophotometer	Photolab Spektral

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

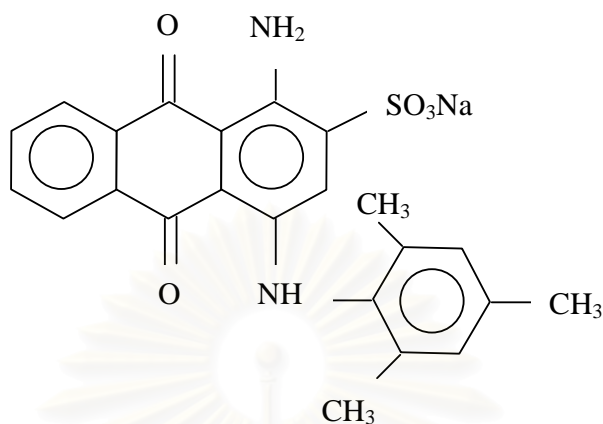
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการการสกัดไคโตซานจากเปลือกกุ้งแช่บ๊วยหรือกุ้งขาว และเตรียมเม็ดไคโตซานในรูปแบบต่างๆ (NCB และ CCB) จากนั้นทำการศึกษาปริมาณตัวดูดซับ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่มีผลต่อการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิดบลู 129 ในการทดลองแบบกะ และศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเลือกการดูดซับสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิดบลู 129 แต่ละชนิดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมผสมในระบบแบบกะและระบบแบบต่อเนื่อง การวัดความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมที่เหลือนำด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Ultraviolet (UV) Spectrophotometer) เป็นข้อมูลที่ได้จากค่าเฉลี่ยที่ทำการวัดจำนวน 2 ครั้ง

#### 3.4.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สี้อม

สี้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิดบลู 129 ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ น้ำเสียสังเคราะห์สี้อมถูกเตรียมขึ้นที่ความเข้มข้น 30 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โครงสร้างของสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิดบลู 129 แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสี้อมรีแอคทีฟเรด 120 (ที่มา : [www.iontosorb.cz/red.gif](http://www.iontosorb.cz/red.gif))



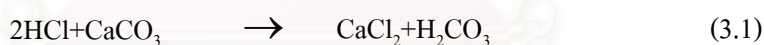
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของสีย้อมแอซิดบลู 129

#### 3.4.2 การสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งแช่แข็งหรือกุ้งขาว

การสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งแช่แข็งหรือกุ้งขาวในงานวิจัยนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. นำเปลือกกุ้งแช่แข็งหรือกุ้งขาวไปกำจัดเกลือแร่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นดังสมการที่ 3.1



2. นำเปลือกกุ้งที่ผ่านการกำจัดเกลือแร่แล้วมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ผลึกภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ คือ ไคติน

3. นำไคตินที่ได้มากำจัดสีและไขมันด้วยเอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์

4. จากนั้นนำไคตินที่ได้มาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลึกภัณฑ์สุดท้ายที่ได้ คือ เกล็ดไคโตซานหรือแผ่นไคโตซาน

#### 3.4.3 การเตรียมเม็ดไคโตซาน (Prepare non-cross-linked chitosan beads ; NCB)

1. นำเกล็ดไคโตซานหรือแผ่นไคโตซานที่เตรียมได้มาละลายกับสารละลายกรดอะซิติกเจือจาง 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วหยดลงในสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเอทานอล

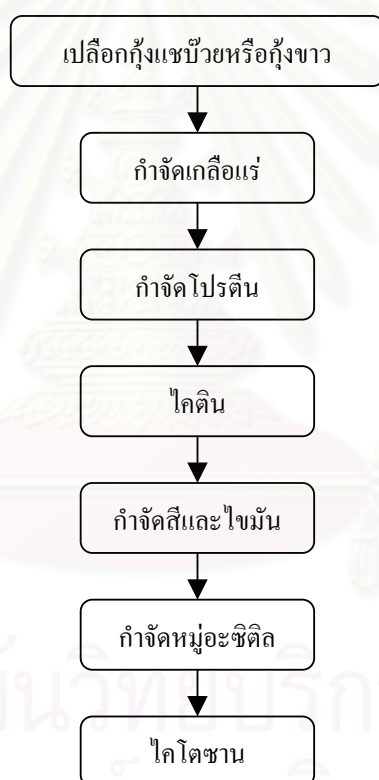
2. กรองเม็ดไคโตซานที่ได้ และเก็บเม็ดไคโตซานไว้ในน้ำกลั่นก่อนนำไปใช้งาน

### 3.4.4 การเตรียมไคโตซานชนิดเม็ดที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์

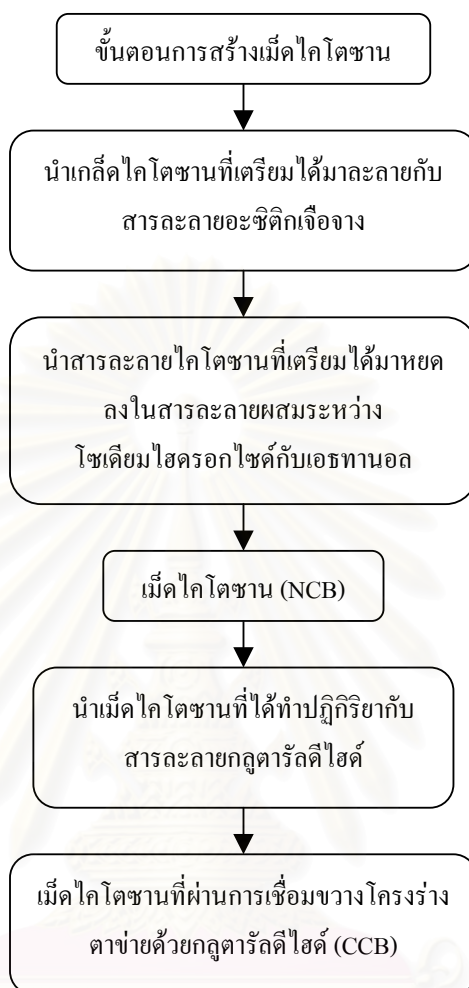
#### (Prepare Cross-linked chitosan beads ; CCB)

1. นำเม็ดไคโตซานปริมาณ 1 กรัม ที่เตรียมได้มาทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย คือ สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ปริมาตร 15 มิลลิลิตร
2. กรองเม็ดไคโตซานที่ได้ และเก็บไว้ในน้ำกลั่นก่อนนำมาใช้งาน

ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับแสดงในรูปที่ 3.3 และขั้นตอนในการเตรียมเม็ดไคโตซานแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับ



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด

### 3.5 การทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง (Batch and Continuous Mode)

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน คือ การทดลองแบบกะ และการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยในส่วนของ การทดลองแบบกะจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมสองชนิด คือ สีข้อมรีแอคทีฟเรด 120 (RR120) และสีข้อมแอสซิดบลู 129 (AB 129) และใช้เม็ดไคโตซาน 2 แบบ คือ เม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (Non-cross-linked chitosan beads ; NCB) และเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (Cross-linked chitosan beads ; CCB) ที่เตรียมได้ในขั้นตอนข้อที่ 3.4.2 ถึง 3.4.4 การทดลองแบบต่อเนื่องจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมผสมระหว่างสีข้อมรีแอคทีฟเรด 120 กับสีข้อมแอสซิดบลู 129 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีข้อม 100 มิลลิกรัม

ต่อลิตร โดยแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความสูงของเบดนิ่ง (Fixed bed) เฉลี่ยคงที่เท่ากับ 7.3 เซนติเมตรสำหรับ NCB และ CCB (ปริมาณเม็ดโคโคซาน 30 กรัม) ในส่วนของการศึกษาผลของความสูงของเบดนิ่งให้แปรค่าความสูงของเบดนิ่ง (ทั้ง NCB และ CCB) ที่อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เฉลี่ยคงที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อนาที

### 3.5.1 การทดลองแบบกะ (Batch Mode Experiment)

#### 3.5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเม็ดโคโคซานที่มีต่อการดูดซับสีย้อม

การศึกษานี้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเม็ดโคโคซานที่มีต่อการดูดซับในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิคบลู 129 ให้มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7 โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับค่าพีเอช แล้วจึงเติมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution) เพื่อให้ค่าพีเอชคงที่ตลอดการทดลอง
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และแอซิคบลู 129 ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที และนำเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ โดยแปรค่าปริมาณเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิดที่ใช้เป็น 0.25, 0.5, 1, 2 และ 3 กรัม ตามลำดับ
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมเพื่อนำไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์หาปริมาณเม็ดโคโคซานที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิคบลู 129 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง

#### 3.5.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่มีต่อการดูดซับ

การศึกษานี้ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และแอซิคบลู 129 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 30 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 7
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่สีย้อมที่เตรียมได้จากข้อ 1. ปริมาตร 50 มิลลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที นำเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ จำนวน 2 กรัมเท่าๆ กันของเม็ดโคโคซานแต่ละชนิด

3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมเพื่อนำไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสี่ข้อมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสี่ข้อมต่อการดูดซับสี่ข้อม
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง

### 3.5.1.3 ศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อการดูดซับสี่ข้อม

การศึกษอิทธิพลของค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และแอสซิบลู 129 ที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสี่ข้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปรับค่าพีเอชให้มีค่าตั้งแต่ 3 ถึง 9
2. นำน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และแอสซิบลู 129 ที่มีค่าพีเอชต่างๆ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที นำเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ จำนวน 2 กรัมเท่าๆ กันของเม็ดไคโตซานแต่ละชนิด
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมเพื่อนำไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสี่ข้อมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการเลือกการดูดซับสี่ข้อม
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง

### 3.5.1.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกการดูดซับสี่ข้อมออกจากสี่ข้อมผสมในระบบ

แบบกะ

1. เลือกปริมาณเม็ดไคโตซานที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1.1
2. เลือกความเข้มข้นเริ่มต้นของสี่ข้อมที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 3.5.1.2
3. เลือกค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเลือกการดูดซับที่ได้จากข้อ 3.5.1.3
4. ทำการทดลองเลือกการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ข้อมแอสซิบลู 129 ออกจากสี่ข้อมผสมในระบบแบบกะ

### 3.5.1.5 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตที่มีต่อการดูดซับสี่ข้อม

การศึกษอิทธิพลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไนเตรตในน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และแอสซิดบลู 129 ที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมให้มีค่าเท่ากับ 7 ที่มีโพแทสเซียมไนเตรดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กัน
2. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และแอสซิดบลู 129 ที่มีค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดต่าง ๆ กัน ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่า นำเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ จำนวน 2 กรัมเท่าๆ กันของเม็ดไคโตซานแต่ละชนิด
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมเพื่อนำไปวัดปริมาณความเข้มข้นของสีย้อมที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง

### 3.5.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode Experiment)

ในการทดลองเลือกการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอสซิดบลู 129 ออกจากสีย้อมผสมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระบบแบบต่อเนื่อง จะทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมผสมที่มีการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมต่อการเลือกการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิด โดยป้อนด้วยอัตราการไหลคงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านคอลัมน์แก้ว (Glass column) ที่มีความสูง 20 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ที่มีความเชื่อมต่อกัน ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมผสมมีลักษณะเคลื่อนที่ขึ้น (up flow) จากด้านล่างของคอลัมน์แก้ว และน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมผสมที่ผ่านการบำบัดด้วยเม็ดไคโตซานจะไหลออกทางด้านบนของคอลัมน์ โดยคอลัมน์ที่หนึ่งบรรจุเม็ดไคโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย ที่มีความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร (ปริมาณ 30 กรัม) เพื่อเลือกดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมที่ผ่านในคอลัมน์ที่หนึ่งต้องปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 7 ส่วนในคอลัมน์ที่สองบรรจุเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตาไรต์ไฮด์ ที่มีความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร (ปริมาณ 30 กรัม) เพื่อเลือกดูดซับสีย้อมแอสซิดบลู 129 โดยน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมที่ผ่านในคอลัมน์ที่สองต้องปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 9



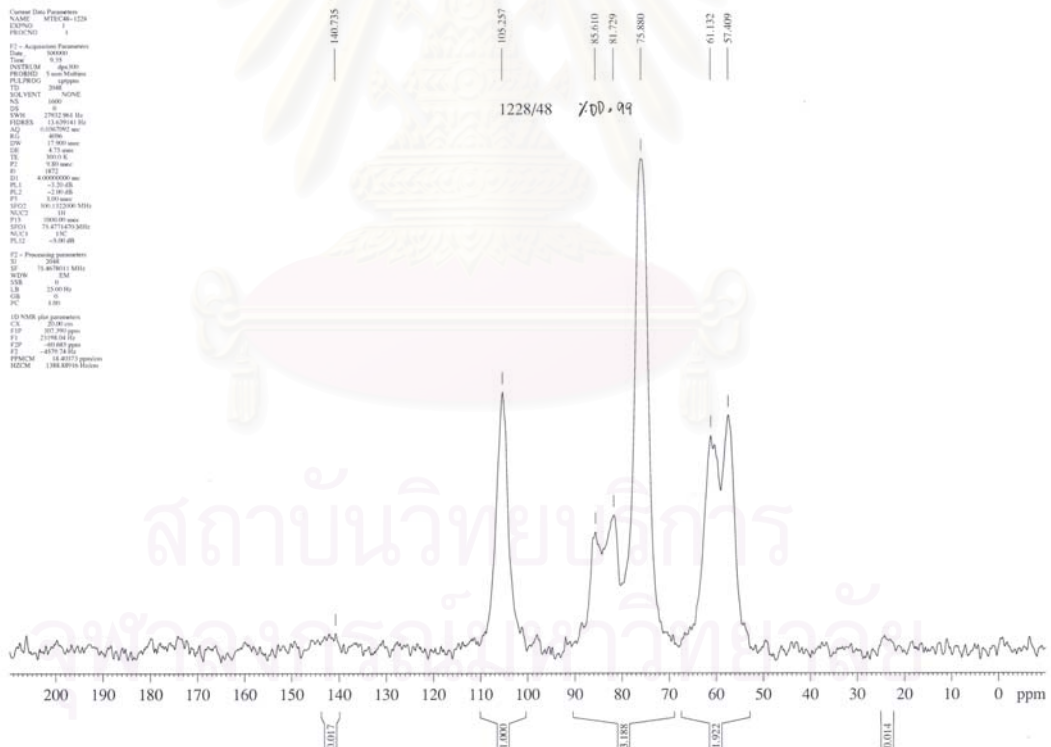
## บทที่ 4

### ผลและการอภิปรายผล

#### 4.1 คุณลักษณะของไคโตซาน

##### 4.1.1 ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (Degree of deacetylation ; %DD)

ระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานที่เตรียมขึ้นจากเปลือกกุ้งแช่แข็งหรือกุ้งขาวในงานวิจัยนี้วัดได้ด้วยเครื่องนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี (Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Spectroscopy) ดังรูปที่ 4.1 แสดงเอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัมของไคโตซาน พบว่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลของไคโตซานมีค่าเท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.1 เอ็นเอ็มอาร์สเปกตรัม (NMR spectrum) ของไคโตซาน

#### 4.1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดไลโคซาน (Diameter)

เม็ดไลโคซานทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้จากการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดไลโคซานทั้ง 2 ชนิดที่เตรียมได้จากการทดลอง

ชนิดของเม็ดไลโคซาน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
เม็ดไลโคซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (NCB)	$2.2 \pm 0.1$
เม็ดไลโคซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (CCB)	$2.3 \pm 0.1$



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของเม็ดไลโคซานที่เตรียมได้จากการทดลอง (ก) NCB (ข) CCB

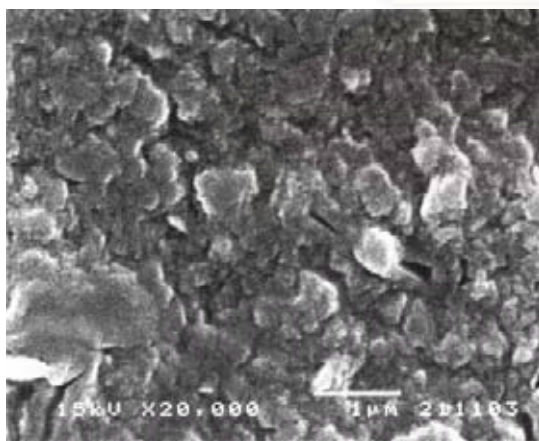
#### 4.1.3 พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดไลโคซาน (BET surface area, Pore size and Pore volume)

พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของเม็ดไลโคซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB แสดงในตารางที่ 4.2

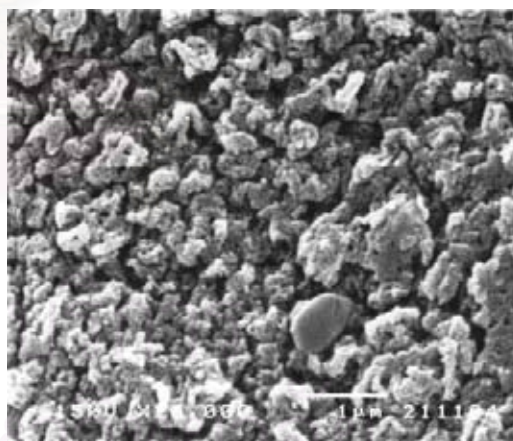
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของเม็ดไคโตซาน	BET surface area (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดของรูพรุน (อังสตรอม)
NCB	1.1524	47.6
CCB	0.3637	39.9

จากตารางที่ 4.2 พบว่า NCB มีพื้นที่ผิวของเม็ดไคโตซาน (BET surface area) สูงกว่า CCB เพราะว่าการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายของเม็ดไคโตซานจะเกิดปฏิกิริยาตรงพันธะของหมู่ไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde group ; -CHO) ของกลูคอสาร์ลดีไฮด์ กับหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ของไคโตซาน ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงของเม็ดไคโตซานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้สารเชื่อมขวางยังทำให้เม็ดไคโตซานมีความยืดหยุ่นน้อยลงและทนต่อแรงกดคั้นได้น้อยลงทำให้ไคโตซานมีความเปราะมากขึ้น (Hsien และ Rorrer, 1997) ซึ่งการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายลงไปทำปฏิกิริยากับไคโตซานจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากรูพรุน (Pore size) ขนาดใหญ่ (Macropore) ไปเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ซึ่งจะทำให้ขนาดรูพรุนของ CCB เล็กกว่าขนาดรูพรุนของ NCB และจะทำให้พื้นที่ผิวภายใน (BET surface area) ของเม็ดไคโตซาน CCB น้อยกว่า NCB



(ก)



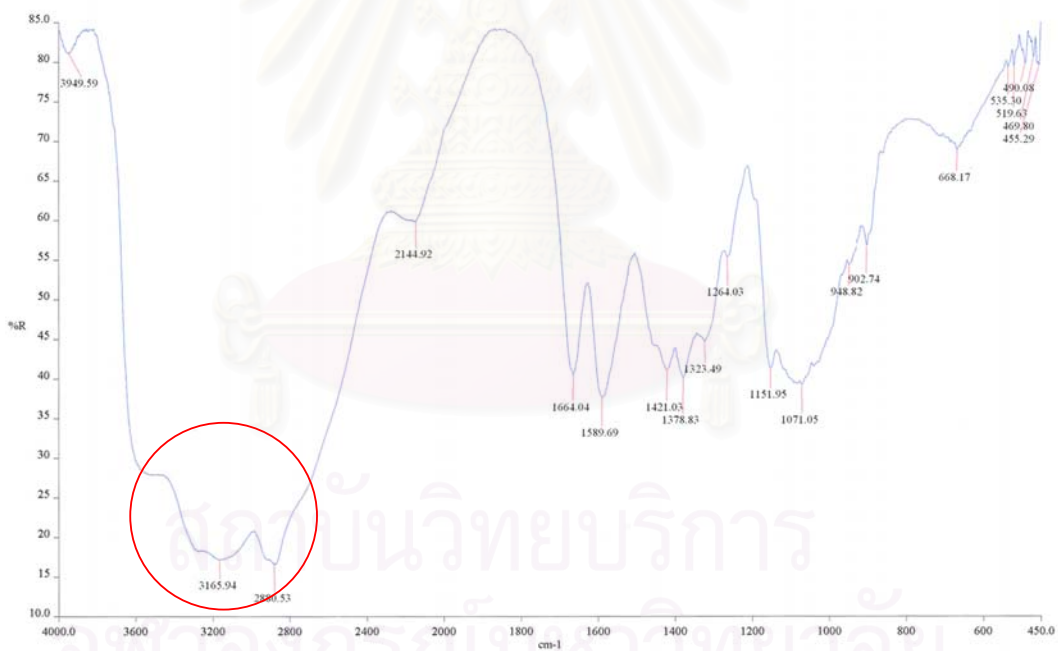
(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscopes ; SEM) ของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดก่อนการดูดซับสีข้อม (ก) NCB (ข) CCB

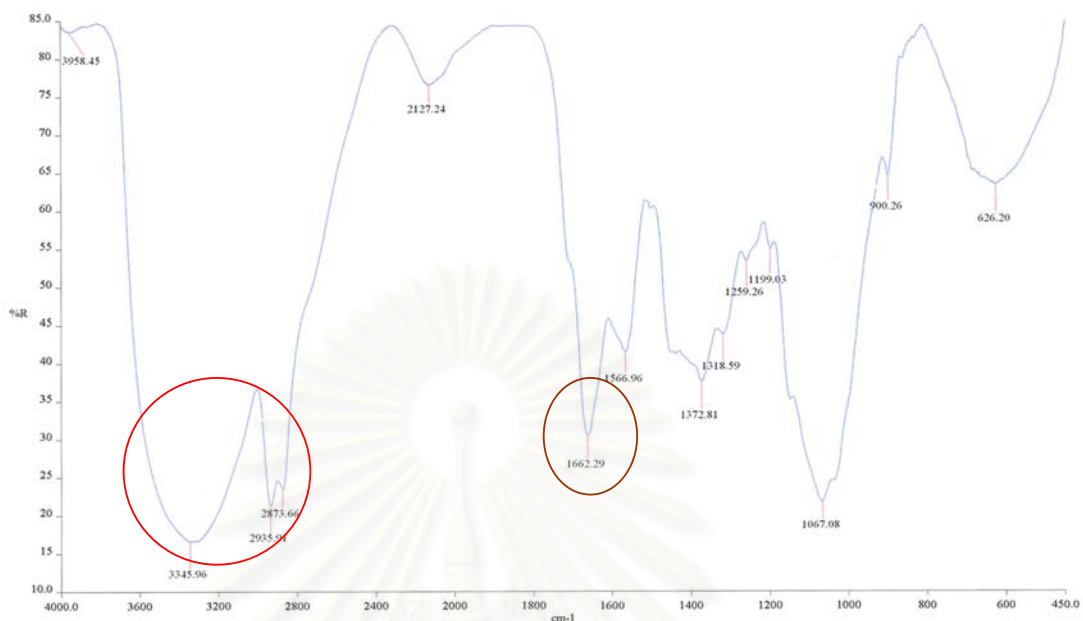
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า CCB มีลักษณะพื้นผิวที่มีรูพรุนต่ำกว่า NCB ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายของเม็ดโคโตะซานทำให้พันธะของหมู่ไดอัลดีไฮด์ (dialdehyde group ; -CHO) บนกลูตารัลดีไฮด์ และหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) บนโคโตะซานจะไปทำลายความแข็งแรงของเม็ดโคโตะซานลง ซึ่งอธิบายได้ว่าการเปลี่ยนแปลงจากรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) ไปเป็นรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) ทำให้พื้นที่ผิวภายในของเม็ดโคโตะซานลดลง (Hsien และ Rorrer, 1997)

#### 4.1.4 หมู่ฟังก์ชันของเม็ดโคโตะซานวิเคราะห์ด้วยวิธีเครื่องฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

หมู่ฟังก์ชันของเม็ดโคโตะซานที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) แปรผลข้อมูลโดยอ้างอิงจาก The Aldrich Library of FT-IR Spectra Edition II Volume 1, 2, 3. (Chuck Pouchert, 1997)



(ก)



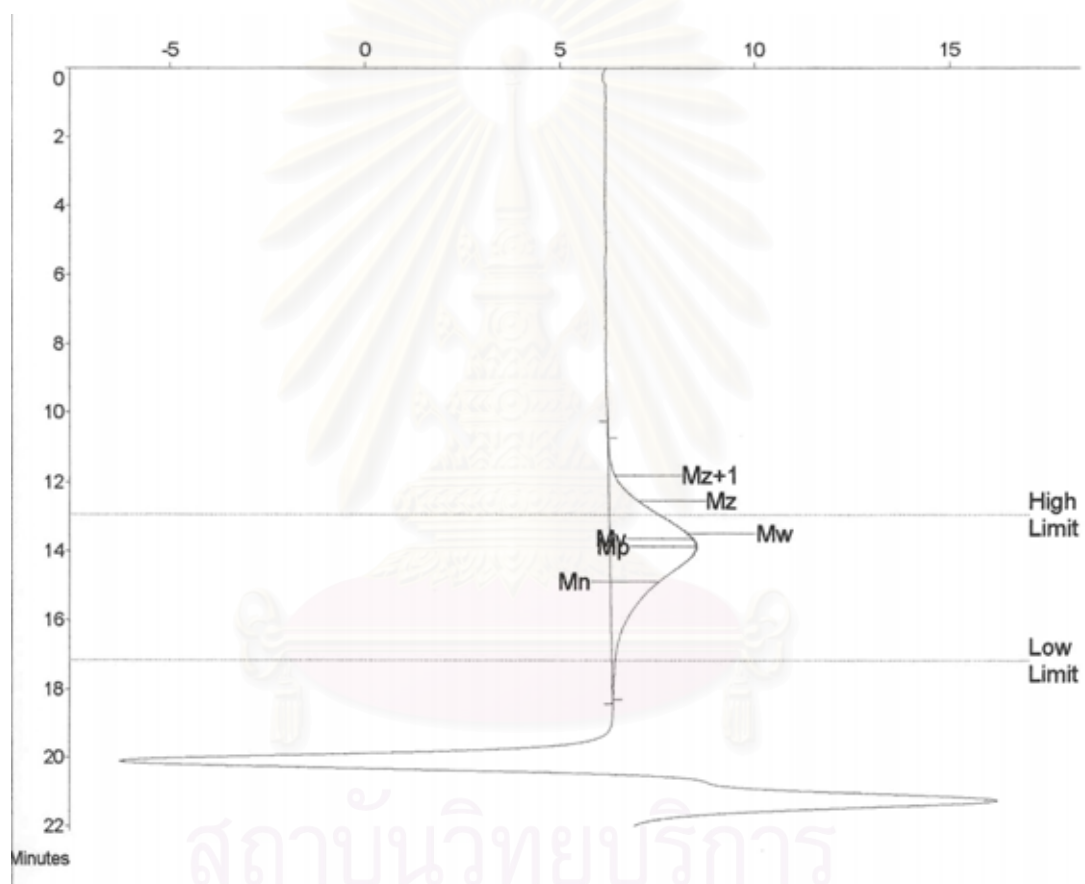
(ข)

รูปที่ 4.4 FTIR Spectrum ของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดก่อนดูดซับสีข้อม (ก) NCB (ข) CCB

จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (กลูตารัลดีไฮด์) ลงไปทำปฏิกิริยากับเม็ดไคโตซาน (Non-cross-linked chitosan beads : NCB) จะได้เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (Cross-linked chitosan beads : CCB) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเม็ดไคโตซานไปจากเดิม ดังจะเห็นจาก FTIR Spectrum ที่ความถี่  $1664.04\text{ cm}^{-1}$  สำหรับ NCB และที่ความถี่  $1662.29\text{ cm}^{-1}$  สำหรับ CCB เป็นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในกรณีของเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายด้วยกลูตารัลดีไฮด์ (Cross-linked chitosan beads : CCB) พิกของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group : C=O) จะสังเกตว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของพิกที่ความถี่ประมาณ  $1600\text{-}1650\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งถ้ามีการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่นี้แสดงว่ามีหมู่คาร์บอนิลของกลูตารัลดีไฮด์ปรากฏอยู่ แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย (crosslinking reaction) ได้เกิดขึ้นกับเม็ดไคโตซานแล้ว (Choong Jeon และ Wolfgang, 2003)

#### 4.1.5 น้ำหนักโมเลกุลของเม็ดไคโตซาน (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซาน วัดได้ด้วยเครื่องเจลเพอมีเอชัน โครมาโทกราฟี (Gel Permeation Chromatography) รูปที่ 4.5 แสดงจีพีซีโครมาโทกราฟีของไคโตซาน น้ำหนักโมเลกุลของไคโตซานมีค่าเท่ากับ 398,789



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.5 จีพีซีโครมาโทกราฟี (GPC Chromatography) ของไคโตซาน

#### 4.2 ปริมาณของเม็ดไคโตซานต่อการดูดซับสีข้อม

จากการทดลองในรูปที่ 4.6 พบว่า

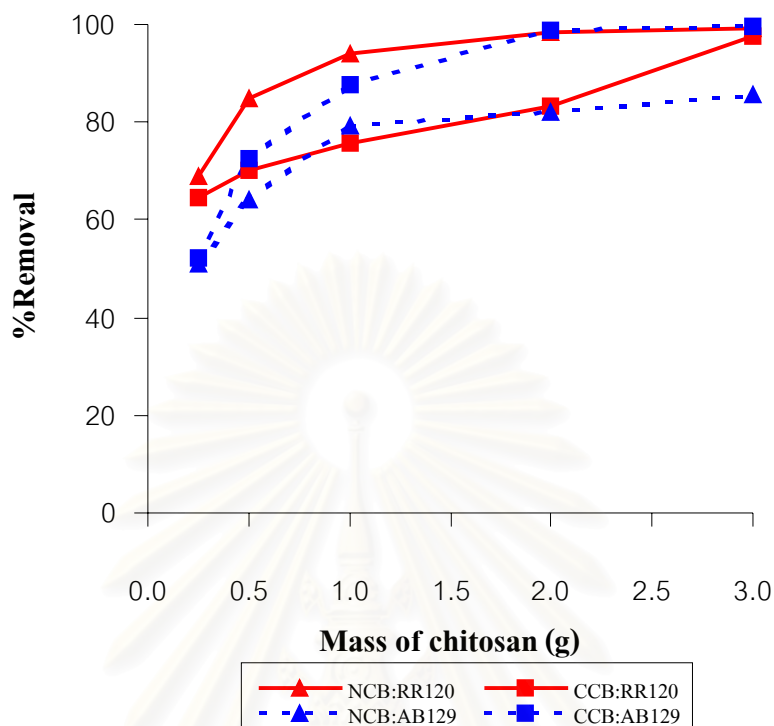
1. เปอร์เซ็นต์การขจัด (%Removal) น้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด (NCB และ CCB) ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการเพิ่มปริมาณเม็ดไคโตซานเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดการดูดซับสีข้อมให้มากขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Karthikeyan และคณะ, 2004 ถึงแม้จะใช้สีและตัวดูดซับต่างกัน

2. ความหนาแน่นในการดูดซับ (adsorption density) สีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเม็ดไคโตซานจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อลดปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (NCB และ CCB) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับน้อยกว่าจะมีปริมาณสีข้อมจำนวนมากว่าสัมผัสกับหนึ่งหน่วยของตัวดูดซับ ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chiou และคณะ, 2004 ถึงแม้จะใช้สีและตัวดูดซับต่างกัน

3. NCB จะดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้สูงกว่า CCB เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเม็ดไคโตซานที่ใช้ในปริมาณเท่าๆกัน

4. CCB จะดูดซับสีข้อมแอซิดบลู 129 ได้สูงกว่า NCB เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเม็ดไคโตซานที่ใช้ในปริมาณเท่าๆกัน

5. เมื่อใช้เม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB เป็นตัวดูดซับสีข้อมโดยใช้ในปริมาณ 0.25 และ 0.50 กรัม เปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 มีค่าน้อย เมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานเป็น 1, 2 และ 3 กรัม เปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณไคโตซานจาก 2 เป็น 3 กรัม และเวลาที่เข้าสู่สภาวะอิ่มตัวก็จะใช้น้อยลง อีกทั้งเปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 ก็ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการทดลองศึกษาปัจจัยตัวอื่นที่มีผลต่อการดูดซับสีข้อมในหัวข้อต่อไปจึงเลือกใช้เม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิดเป็นตัวดูดซับที่ปริมาณคงที่เท่ากับ 2 กรัม



รูปที่ 4.6 ปริมาณเม็ดไคโตซานต่อเปอร์เซ็นต์การขจัดน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 24 ชั่วโมง

#### 4.3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเม็ดไคโตซานทั้งสองชนิดจะให้ปริมาณความจุ (Adsorption capacity :  $q_e$ ) ในการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ได้แตกต่างกัน

จากกราฟของการดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB ซึ่งให้เห็นว่า การดูดซับเกิดขึ้นภายใน 225 นาทีแรก และกราฟที่ได้แบ่งได้เป็น 3 ส่วน (ขวัญใจ สัจจาธรรม, 2546) ได้แก่ ส่วนแรกเป็นบริเวณแรกที่กราฟเริ่มมีความชัน ซึ่งให้เห็นว่าเกิดการดูดซับของโมเลกุลของสีย้อมขึ้นอย่างทันทีทันใด ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดภายในของโมเลกุลของสีย้อมกับพื้นผิวของไคโตซาน ส่วนที่สองเป็นบริเวณที่ค่อยๆ เข้าสู่สมดุล ซึ่งให้เห็นว่าบริเวณพื้นผิวที่เกิดการดูดซับของไคโตซานเต็มไปด้วยโมเลกุลของสีย้อม และส่วนที่สามแสดงให้เห็นถึงส่วนที่เข้าสู่สมดุลอย่างเรียบร้อยแล้ว ซึ่งบริเวณนี้การดูดซับจะไม่เกิดขึ้นอีกแล้ว



เมื่อใช้ NCB เป็นตัวดูดซับ พบว่า

สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 90 นาที

หากใช้ดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 150 นาที

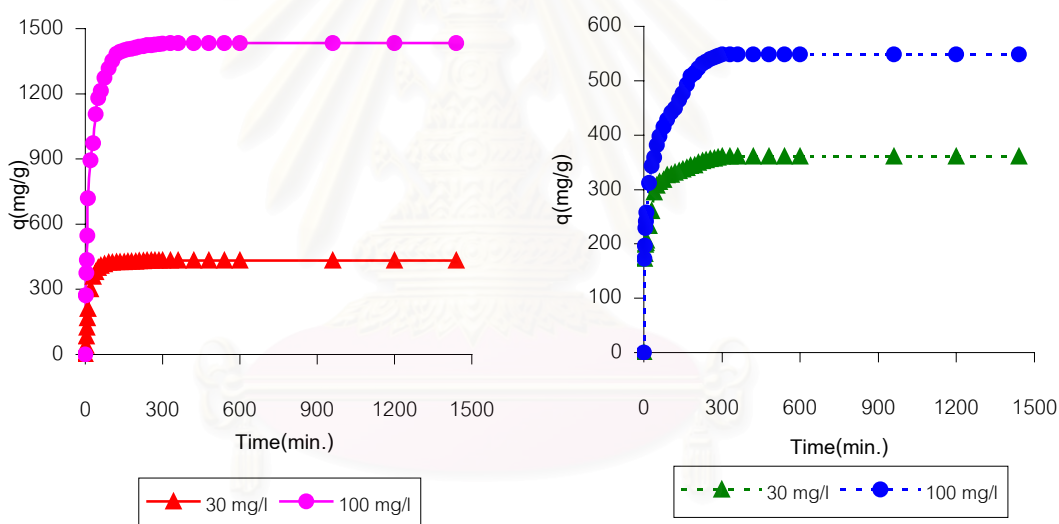
เมื่อใช้ CCB เป็นตัวดูดซับ พบว่า

สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 225 นาที

หากใช้ดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 จะใช้เวลาเข้าสู่สมดุล 195 นาที

เมื่อใช้ NCB เป็นตัวดูดซับจะดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้เร็วกว่าสีย้อมแอซิดบลู 129

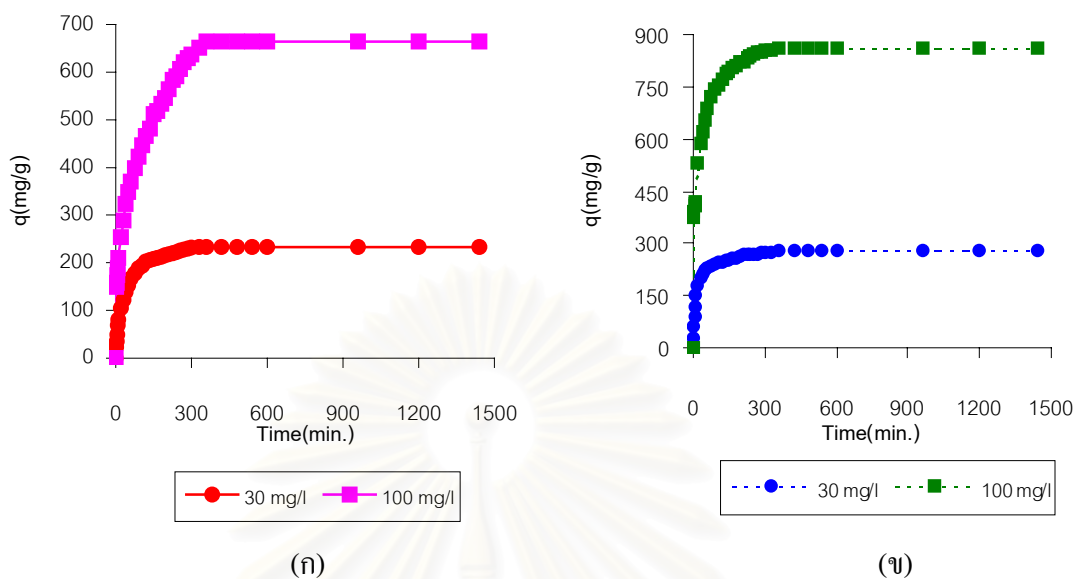
เมื่อใช้ CCB เป็นตัวดูดซับจะดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ได้เร็วกว่าสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120



(ก)

(ข)

**รูปที่ 4.7** ปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมแตกต่างกัน บนตัวดูดซับ NCB จำนวน 2 กรัม  
(ก) สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 (ข) สีย้อมแอซิดบลู 129



**รูปที่ 4.8** ปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมแตกต่างกัน บนตัวดูดซับ CCB จำนวน 2 กรัม (ก) สีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 (ข) สีย้อมแอซิดบลู 129

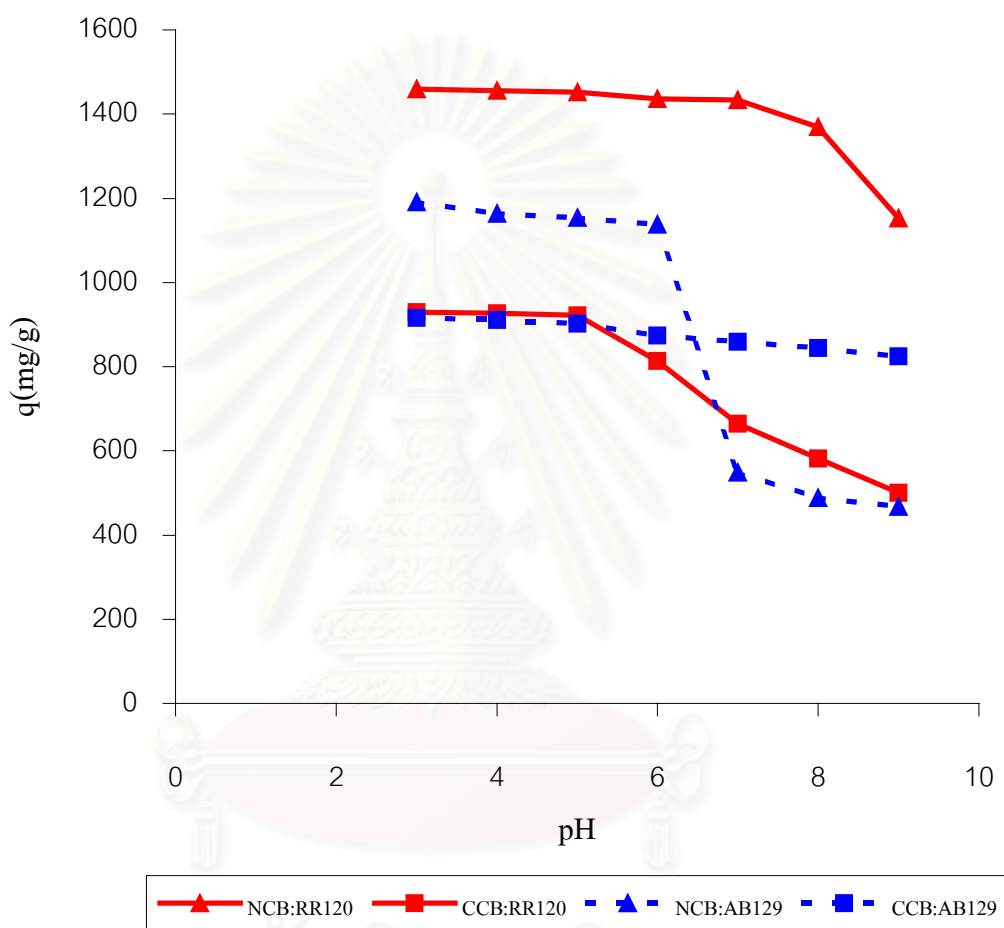
จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 จาก 30 เป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อม (adsorption capacity :  $q_e$ ) ทั้ง 2 ชนิด บนตัวดูดซับ NCB และ CCB จะเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ที่เป็นเช่นนี้เพราะเป็นการเพิ่มแรงขับ (driving force) ของความแตกต่างระหว่างความเข้มข้น (concentration gradient) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม (Chiou และ Li, 2002)

ดังนั้นจึงเลือกสภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตรในการศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อมต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 ค่าพีเอช

ผลของค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมต่อการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB แสดงในรูปที่ 4.9



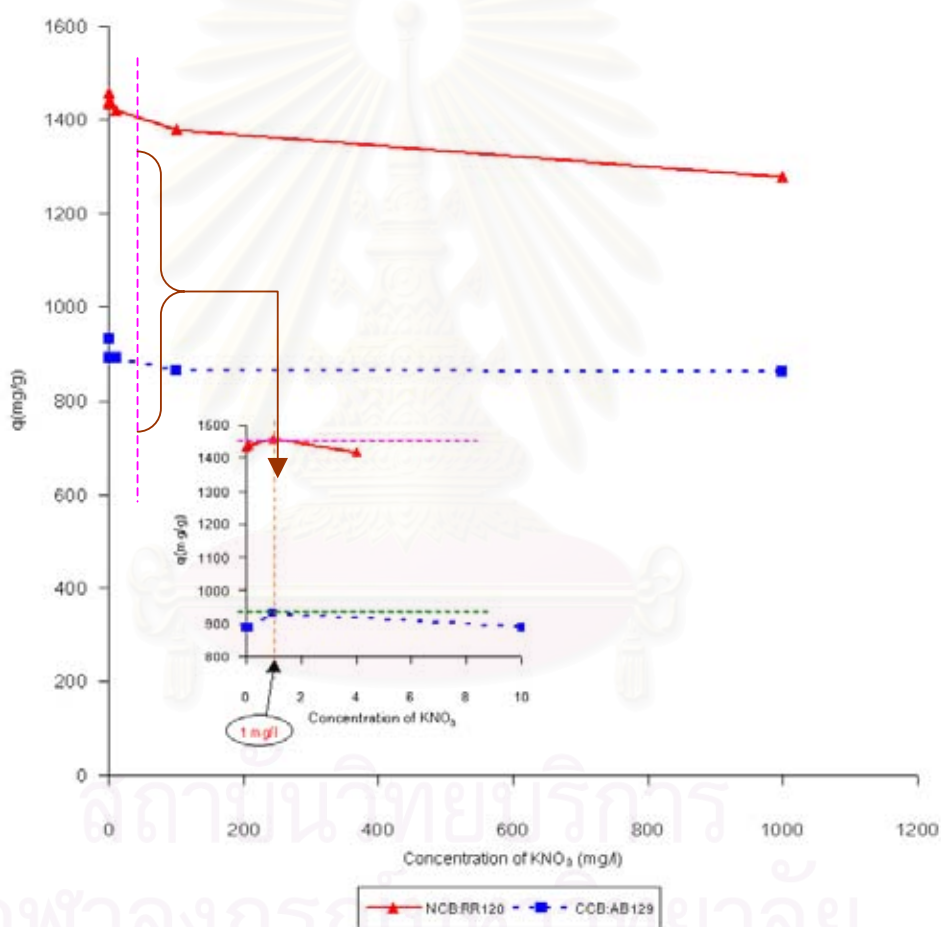
รูปที่ 4.9 ค่าพีเอชต่อปริมาณความจุในการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณ 2 กรัม ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.9 พบว่าปริมาณความจุในการดูดซับสี่ข้อมของเม็ดไคโตซานทั้งสองชนิดจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ค่าพีเอชต่ำหมู่เอมีโนของไคโตซานจะแตกตัวให้โปรตอนได้ง่ายซึ่งจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ( $-NH_3^+$ ) การที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงนั้นเกิดจากแรงดึงดูดอิเล็กตรอนภายในระหว่างหมู่เอมีนของไคโตซานกับ

สีย้อมที่มีประจุลบ จึงเป็นเหตุใคโตะซานมีประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมสูงขึ้นที่ค่าพีเอชต่ำๆ (Chiou และ Li, 2002 )

#### 4.5 ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด

ผลของความเข้มข้นโพแทสเซียมไนเตรดที่มีต่อการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิคบลู 129 บน NCB และ CCB ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10



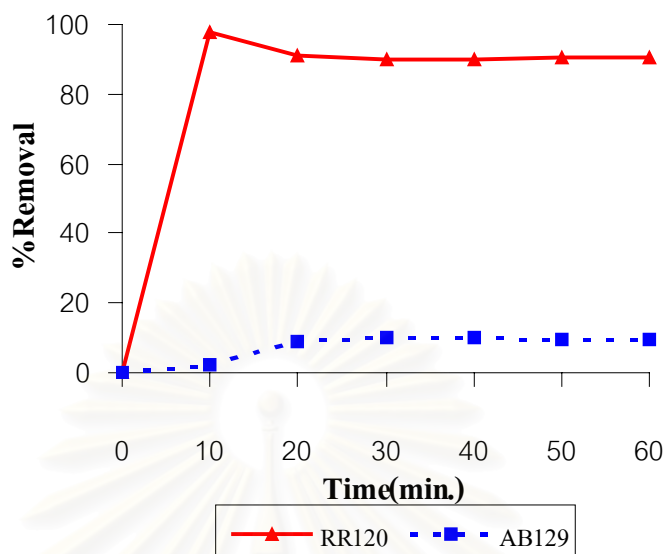
รูปที่ 4.10 ผลของความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรดต่อปริมาณความจุในการดูดซับสีย้อมที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร กรณีแรกใช้ NCB ปริมาณ 2 กรัมเป็นตัวดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 กรณีที่สองใช้ CCB ปริมาณ 2 กรัม เป็นตัวดูดซับสีย้อมแอซิคบลู 129 โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

จากรูปที่ 4.10 พบว่ากรณีเติมโพแทสเซียมไนเตรตเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ NCB และเติมลงในน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมแอซิคบลู 129 บนตัวดูดซับ CCB ตามลำดับ ปริมาณความจุในการดูดซับสี่ข้อมจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย หากเติมโพแทสเซียมไนเตรตจนมีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ปริมาณความจุในการดูดซับสี่ข้อมเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเพิ่มโพแทสเซียมไนเตรตมากขึ้นเป็นผลให้ปริมาณความจุในการดูดซับสี่ข้อมลดลงอย่างเห็นได้ชัด เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเติมโพแทสเซียมไนเตรต ( $KNO_3$ ) ลงไปในปริมาณความเข้มข้นไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ไนเตรตไอออน ( $-NO_3$ ) ของโพแทสเซียมไนเตรต ( $KNO_3$ ) และหมู่ซัลโฟนิค ( $-SO_3$ ) ของสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 แสดงความมีประจุลบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับหมู่เอมีน ( $-NH_3^+$ ) ซึ่งเป็นประจุบวกของเม็ดโคโคซานได้ดีขึ้น ทำให้สี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ถูกดูดซับบนเม็ดโคโคซาน NCB และ CCB ได้มากขึ้น ตามลำดับ ถ้าเติมไนเตรต ( $-NO_3$ ) มากเกินไป ก็มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้สี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ถูกดูดซับบนเม็ดโคโคซาน NCB และ CCB ได้ลดลง ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะเกิดการแข่งขันในปฏิกิริยารับอิเล็กตรอนระหว่างไนเตรตไอออน ( $-NO_3$ ) กับพันธะอะโซในสี่ข้อมอะโซ (Carliell และคณะ, 1995) กรณีสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 พันธะอะโซคือหมู่ซัลโฟนิค ( $-SO_3$ ) ซึ่งไนเตรตไอออน ( $-NO_3$ ) ของโพแทสเซียมไนเตรต จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าหมู่ซัลโฟนิค ( $-SO_3$ ) ของสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ทำให้ไนเตรตไอออนถูกดูดซับบน NCB และ CCB ทำให้บริเวณที่สามารถเกิดการดูดซับ (active site) ของตัวดูดซับเหลือพื้นที่ในการดูดซับลดลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสี่ข้อมบนเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด เมื่อมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตมากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี่ข้อมแอซิคบลู 129 มีค่าลดลง

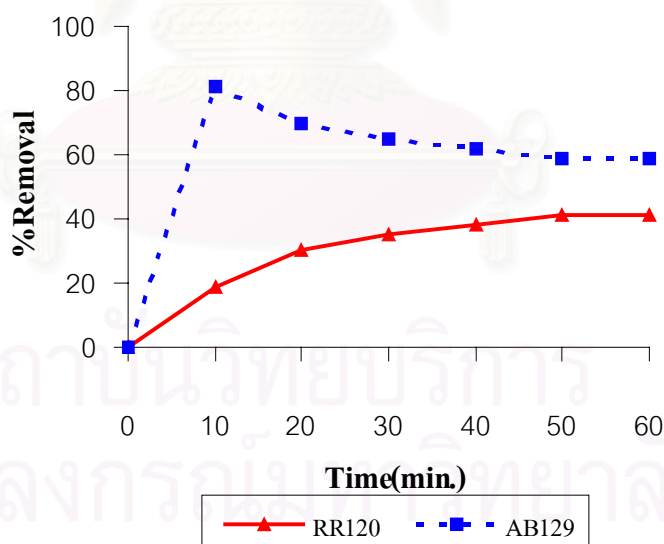
#### 4.6 การเลือกการดูดซับสี่ข้อมออกจากสี่ข้อมผสม

จากรูปที่ 4.11 พบว่าการเลือกการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมผสม ด้วยการดูดซับบน NCB สามารถเลือกดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้สูงถึง 97.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการสัมผัสตัวดูดซับ 10 นาที

จากรูปที่ 4.12 พบว่าการเลือกการดูดซับสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมผสม ด้วยการดูดซับบน CCB สามารถเลือกดูดซับสี่ข้อมแอซิคบลู 129 ได้สูงถึง 81.0 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการสัมผัสตัวดูดซับ 10 นาที



รูปที่ 4.11 เปรอ์เซ็นต์การขจัดสีข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ออกจากสีข้อมผสมระหว่างสีข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ NCB ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 เปรอ์เซ็นต์การขจัดสีข้อมแอซิดบลู 129 ออกจากสีข้อมผสมระหว่างสีข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสีข้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ CCB ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เวลาที่ใช้ในการสัมผัสตัวดูดซับ 1 ชั่วโมง

## 4.7 สมดุลไอโซเทอม

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของแลงเมียร์และฟรุนคลิชไอโซเทอม

ปัจจัยที่ศึกษา	สมการแลงเมียร์ $q_e = \frac{QbC_e}{1+bC_e}$				สมการฟรุนคลิช $q_e = Q_f C_e^{1/n}$		
	Q (มิลลิกรัม ต่อกรัม)	b (ลิตรต่อ กรัม)	R <sup>2</sup>	R <sub>L</sub>	Q <sub>f</sub> (ลิตรต่อ กรัม)	n	R <sup>2</sup>
<b>ปริมาณไคโตซาน</b>							
รีแอกทีฟเฟรด 120							
1.NCB	1250	0.8000	0.9983	0.0400	654	0.5598	0.9948
2.CCB	385	0.0741	0.9978	0.3103	183	1.6810	0.6065
แอซิดบลู 129							
1.NCB	222	0.0957	0.9924	0.2580	15	0.5913	0.9095
2.CCB	3333	0.0233	0.9946	0.5890	382	3.0600	0.9458

ค่าที่จำเป็นต้องรู้อีกค่าคือ เทอมของค่าคงที่ไร้หน่วยของการแยกหรือปัจจัยสมดุล (R<sub>L</sub>) ซึ่งสามารถแสดงดังนี้

$$R_L = \frac{1}{1+bC_0} \quad (4.1)$$

โดยที่ C<sub>0</sub> คือ ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

b คือ ค่าคงที่การดูดซับของแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

จากตารางที่ 4.3 พบว่า

1. ข้อมูลที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ เพราะค่า R<sup>2</sup> (correlation coefficient) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเบี่ยงเบนจากทฤษฎีเล็กน้อยเพียงใด ถ้าค่า R<sup>2</sup> มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าเป็นไปตามทฤษฎีนั้น จากตารางที่ 4.3 ค่า R<sup>2</sup> ของสมการแลงเมียร์ใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสีย้อมที่เกิดขึ้นเป็นแบบเคมี

2. NCB ชอบดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 มากกว่าสีย้อมแอซิดบลู 129 ดังจะเห็นได้จากค่า  $Q$  (ที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.3) ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ NCB สูงกว่าบนตัวดูดซับ CCB

3. CCB ชอบดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 มากกว่าสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ดังจะเห็นได้จากค่า  $Q$  (ที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.3) ของการดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ CCB สูงกว่าบนตัวดูดซับ NCB

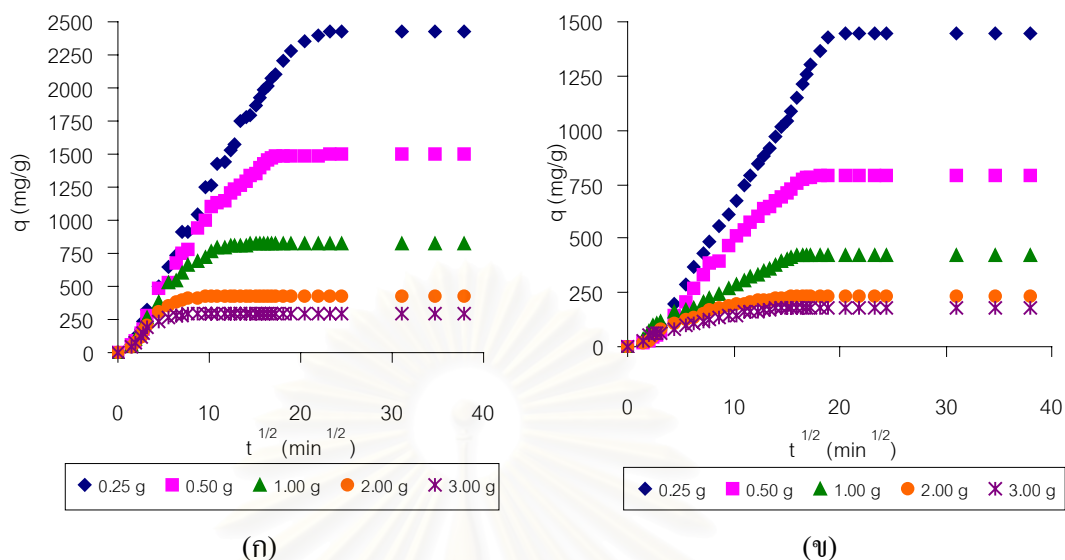
#### 4.8 อัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion rate control)

ปริมาณความจุ (adsorption capacity) ในการดูดซับสีย้อมของเม็ดโคโคซานวัดได้โดยอิทธิพลของกลไกการแพร่ของสีย้อม ซึ่งอิทธิพลของกลไกการแพร่ของสีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโคซานเป็นการประมาณค่าอัตราเร็วเริ่มต้นของการดูดซับสีย้อม (Webber และ Morris, 1963 ; Karthikeyan และคณะ, 2004 ; Abia และ Igwe, 2005) ซึ่งหาได้จากค่าความชัน ( $k_p$ ) ที่ได้จากการพล็อตกราฟระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{1/2}$  และค่าความชัน ( $k_p$ ) นี้ก็คือค่าอัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโคซาน ซึ่งใช้ในการหาอัตราเร็วในการดูดซับสีย้อมบนเม็ดโคโคซานที่สถานะเริ่มต้นได้

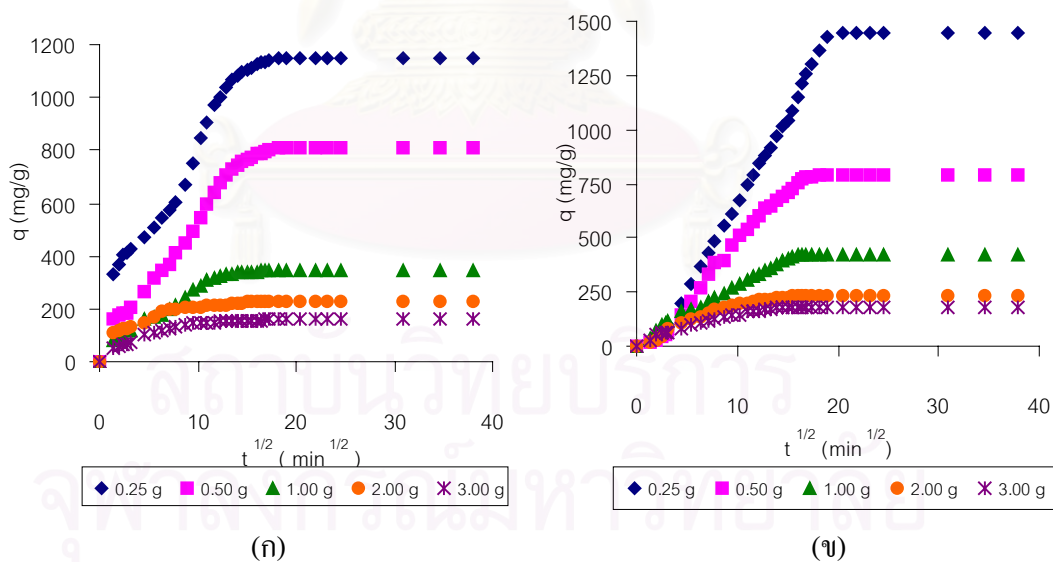
ในรูปที่ 4.13 แสดงผลของปริมาณเม็ดโคโคซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 เข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB ส่วนในรูปที่ 4.14 แสดงผลของปริมาณเม็ดโคโคซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมแอซิดบลู 129 เข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB

และในตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิดคือ NCB และ CCB ที่ใช้ปริมาณเม็ดโคโคซานแตกต่างกัน จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเม็ดโคโคซานน้อยๆ ค่า  $k_p$  จะสูง แต่ถ้าใช้ปริมาณเม็ดโคโคซานมากๆ ค่า  $k_p$  จะต่ำ





รูปที่ 4.13 ปริมาณเม็ดโคโคซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าไปภายในอนุภาคของโมเลกุลเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (ก) NCB (ข) CCB



รูปที่ 4.14 ปริมาณเม็ดโคโคซานต่ออัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เข้าไปภายในอนุภาคของโมเลกุลเม็ดโคโคซานทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 2 กรัม ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (ก) NCB (ข) CCB

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดโคโตซาน อัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 เข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซาน ทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB ที่สถานะเริ่มต้นจะมีค่าลดลง (ค่าความชันน้อย) ค่า  $k_t$  น้อย แต่ถ้าใช้ปริมาณเม็ดโคโตซานน้อยๆ อัตราเร็วในการควบคุมการแพร่ของสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 เข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซานทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB ที่สถานะเริ่มต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น (ค่าความชันมาก) ค่า  $k_t$  มาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในสถานะที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมเท่ากัน กรณีใช้ปริมาณเม็ดโคโตซานน้อยๆ เมื่อเปรียบเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรของเม็ดโคโตซานแล้วจะมีสีย้อมปริมาณมากกว่าที่ถูกดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซาน ทำให้ค่า  $k_t$  มาก ซึ่งก็แสดงว่าอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซานที่สถานะเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า ส่วนในกรณีใช้ปริมาณเม็ดโคโตซานมากๆ เมื่อเปรียบเทียบกับหนึ่งหน่วยปริมาตรของเม็ดโคโตซานแล้วจะมีสีย้อมปริมาณน้อยกว่าที่ถูกดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซาน เพราะการเพิ่มปริมาณเม็ดโคโตซานจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับ (active site) ให้มากขึ้น ทำให้โมเลกุลของสีย้อมกระจายตัวกันเพื่อที่จะแพร่เข้าไปสู่ภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซาน ทำให้ค่า  $k_t$  น้อย ซึ่งก็แสดงว่าอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคของเม็ดโคโตซานที่สถานะเริ่มต้นมีค่าต่ำกว่า

ค่า  $k_t$  ที่ได้จากการพล็อตกราฟในรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่ของอัตราเร็วในการแพร่ของสีย้อมเข้าไปภายในอนุภาคเม็ดโคโตซาน

ปัจจัยที่ศึกษา	แบบจำลองการแพร่สีย้อมรีแอกทีฟเรด120 ภายในอนุภาคเม็ดโคโตซานทั้ง 2 ชนิด				แบบจำลองการแพร่สีย้อมแอซิดบลู 129 ภายในอนุภาคเม็ดโคโตซานทั้ง 2 ชนิด			
	$q = k_t t^{0.5}$				$q = k_t t^{0.5}$			
	NCB		CCB		NCB		CCB	
	$k_t$ (g/mg min)	$R^2$	$k_t$ (g/mg min)	$R^2$	$k_t$ (g/mg min)	$R^2$	$k_t$ (g/mg min)	$R^2$
<b>ปริมาณโคโตซาน (กรัม)</b>								
0.25	128.4	0.9952	79.8	0.9946	65.9	0.9519	64.3	0.9913
0.5	94.5	0.9762	51.2	0.9892	50.2	0.9884	52.1	0.9916
1	82.5	0.9733	24.7	0.9911	24.6	0.9814	48.8	0.9719
2	71.8	0.9651	21.1	0.9867	18.8	0.8358	44.8	0.9443
3	50.9	0.9413	15.1	0.9615	15.0	0.9491	30.9	0.9160

#### 4.9 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ (Kinetic modeling of adsorption)

##### 4.9.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (The first order kinetic models)

สมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งคือ  $\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$  ในตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB พบว่า

ค่า  $R^2$  (The correlation coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนจากทฤษฎี มีค่าไม่ใกล้เคียง 1 แสดงว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่สามารถอธิบายกลไกในการดูดซับสีย้อมได้ในเวลาทั้งหมดที่ศึกษาได้

##### 4.9.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สอง (The second order kinetic models)

สมการปฏิกิริยาอันดับที่สองคือ  $\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt$  ในตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB พบว่า

ค่า  $R^2$  (The correlation coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนจากทฤษฎี มีค่าไม่ใกล้เคียง 1 แสดงว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่สามารถอธิบายกลไกในการดูดซับสีย้อมได้ในเวลาทั้งหมดที่ศึกษาได้

##### 4.9.3 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้ (The pseudo first order kinetic models)

สมการปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้คือ  $\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$  ในตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้ของการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB พบว่า

ค่า  $R^2$  (The correlation coefficient) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเบี่ยงเบนจากทฤษฎี มีค่าไม่ใกล้เคียง 1 แสดงว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้ไม่สามารถอธิบายกลไกในการดูดซับสีย้อมได้ในเวลาทั้งหมดที่ศึกษาได้ โดยทั่วไปแล้วจะนำ

ไปใช้อธิบายในช่วงเริ่มแรกของกระบวนการดูดซับเท่านั้น (Chiou และ Li, 2002) ดังนั้นจึงต้องอาศัย จลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ในการอธิบายกลไกในการดูดซับ สัมพันธ์ต่อไป

#### 4.9.4 แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ (The pseudo second order kinetic models)

สมการปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้คือ  $\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$  ในตารางที่ 4.5 แสดงค่าคงที่ ปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ของการดูดซับสี้อมรีแอดทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิคบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB

พบว่าค่า  $R^2$  (The correlation coefficient) ของการดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ มีค่าใกล้เคียง 1 มาก แสดงว่าแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับกลไกในการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้ สามารถทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมดในช่วงของการดูดซับและได้รับการยอมรับว่าการดูดซับเชิงเคมีเป็นกลไกในการควบคุมอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา (Chiou และ Li, 2002) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับแรงที่จำนวนอะตอมของไฮโดรเจนที่สามารถรวมกับหนึ่งอะตอมของธาตุอื่น (Valency force) หรือเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างประจุลบของสี้อมกับประจุบวกของตัวดูดซับ

เมื่อพิจารณาปริมาณตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ NCB และ CCB ต่ออัตราเร็วในการดูดซับสี้อมรีแอดทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิคบลู 129 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ อัตราเร็วในการดูดซับ ( $k_2$ ) สี้อมจะมีค่าสูงกว่าที่ใช้ปริมาณของตัวดูดซับต่ำกว่า เป็นเพราะว่าเมื่อปริมาณของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการดูดซับสี้อมให้มากขึ้น (Chiou, Ho และ Li, 2004) แต่ถ้าพิจารณาปริมาณสี้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่เวลาสมมูล ( $q_t$ ) พบว่าเมื่อใช้ปริมาณโคโตะซานต่ำๆ จะมีปริมาณสี้อมที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับมากกว่าเมื่อใช้ปริมาณเม็ดโคโตะซานสูงๆ ทั้งนี้เป็นเพราะโคโตะซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมได้ในปริมาณสูง

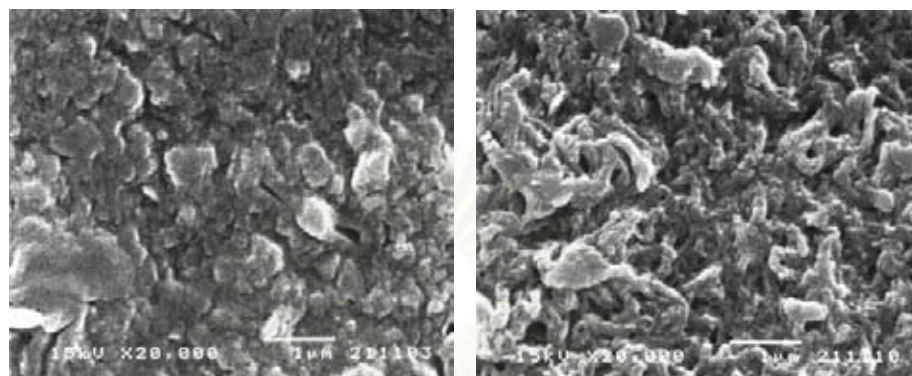
ตารางที่ 4.5 แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง (The first order kinetic models and the second order kinetic models)

ปัจจัยที่ศึกษา	แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ			
	ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง		ปฏิกิริยาอันดับที่สอง	
	$\ln \frac{[A]}{[A]_0} = -kt$		$\frac{1}{[A]} - \frac{1}{[A]_0} = kt$	
	$k_a$ (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	$k_a$ (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
<b>ปริมาณตัวดูดซับ</b>				
<u>รีแอกทีฟเรด 120</u>				
1.NCB				
0.25	0.0009	0.6071	0.00006	0.6684
0.5	0.0014	0.4829	0.0002	0.5686
1	0.0018	0.3407	0.0004	0.4254
2	0.0025	0.3322	0.0019	0.4816
3	0.0026	0.2603	0.0034	0.3631
2.CCB				
0.25	0.0009	0.5966	0.00005	0.6498
0.5	0.0009	0.4598	0.00007	0.5148
1	0.0010	0.4528	0.00009	0.5024
2	0.0011	0.3765	0.0001	0.4464
3	0.0029	0.4524	0.0014	0.4889
<u>แอซิคบลู 129</u>				
1.NCB				
0.25	0.0004	0.3867	0.00002	0.4116
0.5	0.0009	0.4392	0.00007	0.4904
1	0.0010	0.3795	0.00001	0.4401
2	0.0080	0.3327	0.00009	0.4182
3	0.0010	0.3369	0.0001	0.4290
2.CCB				
0.25	0.0005	0.4987	0.00003	0.5451
0.5	0.0007	0.4145	0.00004	0.4729
1	0.0015	0.5332	0.0002	0.6871
2	0.0034	0.5800	0.003	0.6961
3	0.0033	0.2683	0.0071	0.2919

ตารางที่ 4.6 แบบจำลองจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้และอันดับที่สองไม่แท้ (The pseudo first order kinetic models and the pseudo second order kinetic models)

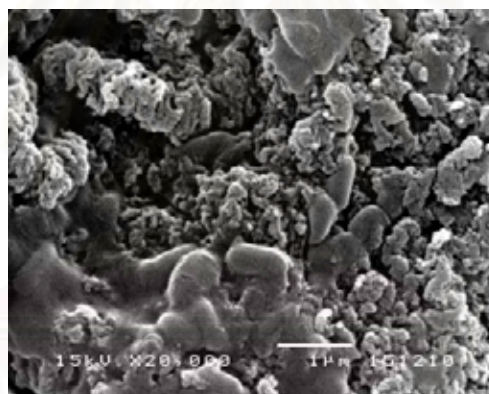
ปัจจัยที่ศึกษา	แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ			
	ปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่งไม่แท้		ปฏิกิริยาอันดับที่สองไม่แท้	
	$\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t$		$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	
	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	$k_2$ (g/mg per min.)	R <sup>2</sup>
<b>ปริมาณตัวดูดซับ</b>				
<u>รีแอกทีฟเรด 120</u>				
1.NCB				
0.25	0.00691	0.8396	0.01246	0.9944
0.5	0.00668	0.7499	0.02326	0.9975
1	0.00553	0.4841	0.08163	0.9994
2	0.00415	0.4152	0.17424	0.9998
3	0.00299	0.2586	0.36170	0.9999
2.CCB				
0.25	0.00069	0.5884	0.00812	0.9855
0.5	0.00023	0.4149	0.01600	0.9915
1	0.00012	0.3943	0.03075	0.9971
2	0.00005	0.2950	0.05753	0.9993
3	0.00005	0.3088	0.06368	0.9992
<u>แอซิคบลู 129</u>				
1.NCB				
0.25	0.00645	0.6420	0.04020	0.9978
0.5	0.00622	0.6716	0.03150	0.9970
1	0.00507	0.5990	0.05634	0.9999
2	0.00392	0.5320	0.13651	0.9999
3	0.00368	0.4988	0.11742	0.9999
2.CCB				
0.25	0.00645	0.8233	0.01914	0.9964
0.5	0.00576	0.7840	0.03218	0.9989
1	0.00530	0.8264	0.03442	0.9994
2	0.00438	0.6248	0.08738	0.9998
3	0.00299	0.2448	0.26106	0.9999

#### 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเม็ดไคโตซาน



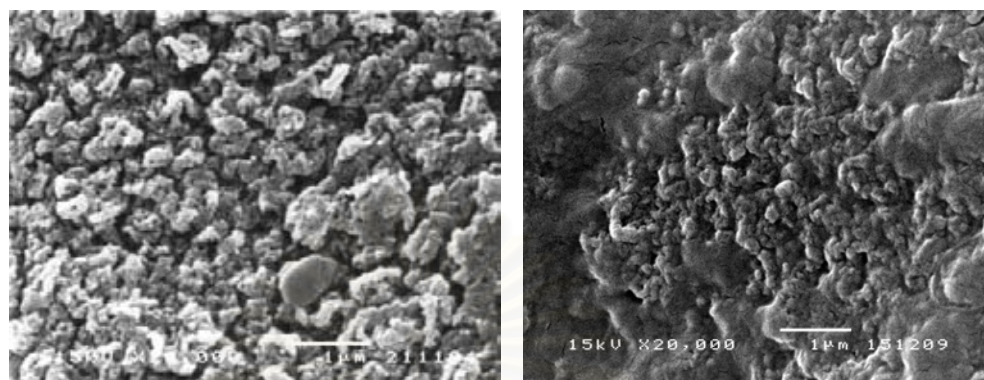
(ก)

(ข)



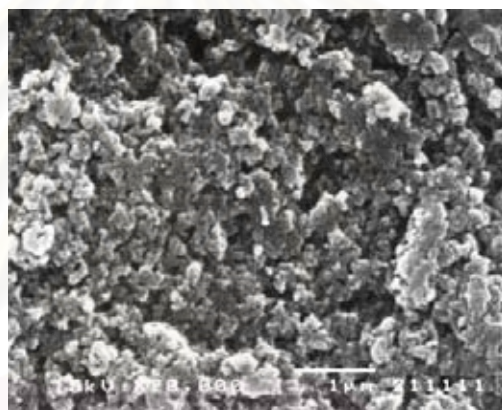
(ค)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM images) ของ NCB (ก) ก่อนดูดซับสีข้อม (ข) หลังดูดซับสีข้อมรีแอกทีฟเรด 120 (ค) หลังดูดซับสีข้อมแอซิคบลู 129



(ก)

(ข)



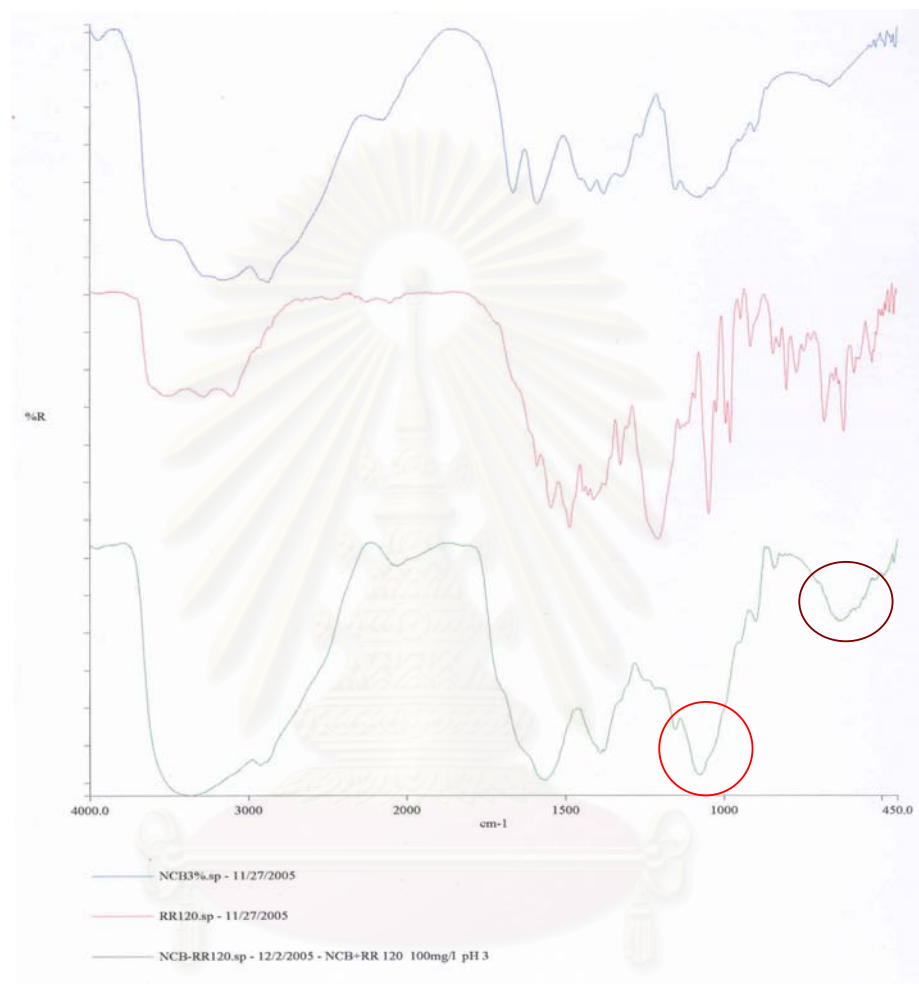
(ค)

**รูปที่ 4.16** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM images) ของ CCB (ก) ก่อนดูดซับ สีย้อม (ข) หลังดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 (ค) หลังดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงลักษณะพื้นผิวภายนอกของไคโตซานแต่ละชนิดก่อนและหลังดูดซับสีย้อมแต่ละประเภท พบว่าภายหลังการดูดซับสีย้อมพื้นผิวภายนอกของเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด คือจะเรียบกว่าก่อนการดูดซับ ทั้งนี้ เนื่องจากมีบางส่วนถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของสีย้อม

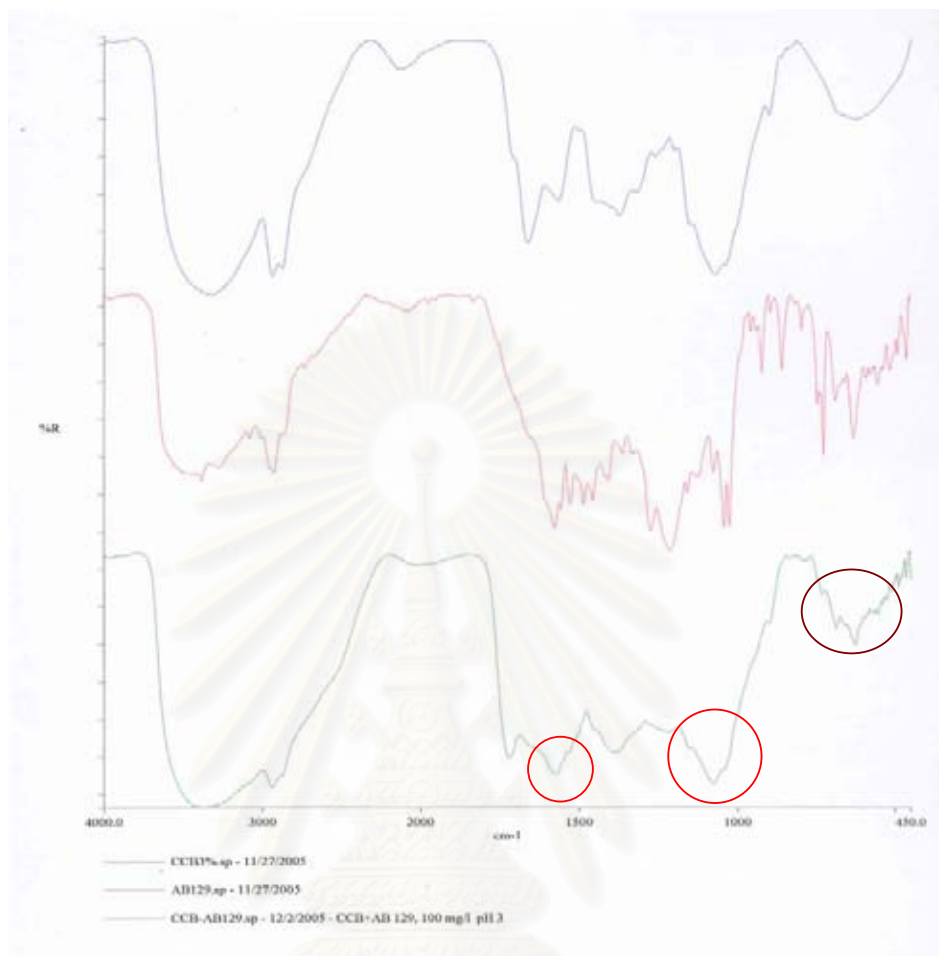


#### 4.11 ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องฟลูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy)



รูปที่ 4.17 กราฟ FTIR ของ NCB หลังจากดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ค่าพีเอชของน้ำเสีย สังกะหรณ์สีซีย้อมเท่ากับ 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

จากรูปที่ 4.17 หลังการดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 บนตัวดูดซับ NCB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีซีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ พบว่าปรากฏพีกตรงบริเวณความถี่ประมาณ 1175-1055  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid salts) และตรงบริเวณความถี่ประมาณ 1050-670  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น S-O-C str. หรือ สารประกอบนอนอะโรมาติกซัลเฟอร์ออกซิเจน (Non-Aromatic Sulfur-Oxygen Compounds) ปรากฏอยู่แสดงว่า NCB สามารถดูดซับสีซีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 เข้าไปภายในโมเลกุลของเม็ด NCB ได้จริง



**รูปที่ 4.18** กราฟ FTIR ของ CCB หลังจากดูดซับสีย้อมแอสิตบลู 129 ค่าพีเอชของน้ำเสียดังเคราะห์สีย้อมเท่ากับ 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ

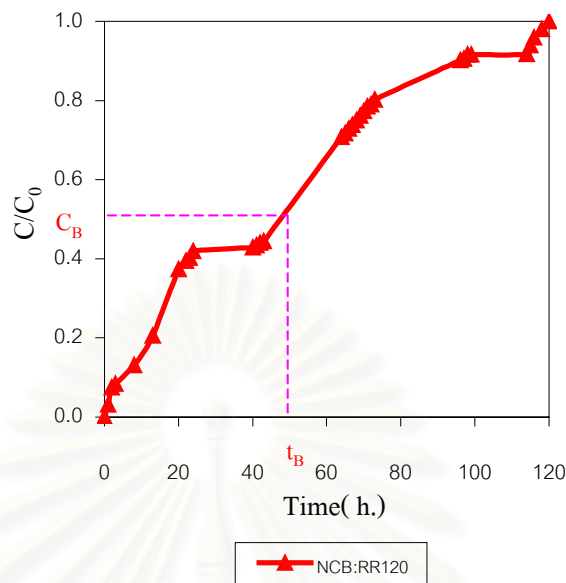
จากรูปที่ 4.18 หลังจากการดูดซับสีย้อมแอสิตบลู 129 บนตัวดูดซับ CCB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 3 ที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ พบว่าปรากฏพีกตรงบริเวณความถี่ประมาณ  $1640-1615\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น C=O หรือเป็นอะโรมาติกของกรดคาร์บอกซิลิก (Aromatic Carboxylic Acids) และบริเวณ ความถี่ ประมาณ  $1175-1055\text{ cm}^{-1}$  จะเป็นเกลือของกรดซัลโฟนิก (Sulfonic acid salts) และสุดท้ายเป็นบริเวณความถี่ประมาณ  $720-580\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็น NH,  $\text{NH}_2$  wag หรือเป็นนอนอะโรมาติกเอไมด์ (Non-Aromatic Amide) ปรากฏอยู่แสดงว่า CCB สามารถดูดซับสีย้อมแอสิตบลู 129 เข้าไปภายในโมเลกุลของเม็ด CCB ได้จริง

#### 4.12 การเลือกการดูดซับสีย้อมออกจากสีย้อมผสมในระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous mode)

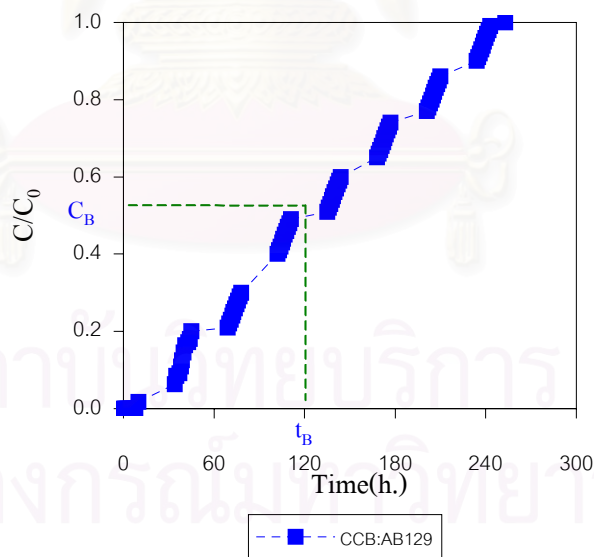
ทำการทดลองโดยจัดเตรียมคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ที่มีการเชื่อมต่อกัน โดยคอลัมน์แรกบรรจุ NCB น้ำหนัก 30 กรัม (ความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร) เพื่อต้องการเลือกการดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ออกจากสีย้อมผสมและในคอลัมน์ที่สองบรรจุ CCB น้ำหนัก 30 กรัม (ความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร) เพื่อต้องการเลือกการดูดซับสีย้อมแอสิตบลู 129 ออกจากสีย้อมที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ที่หนึ่ง อัตราการไหลป้อนของสีย้อมผสมคงที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองการเลือกการดูดซับสีย้อมออกจากสีย้อมผสม โดยทำการดูดซับแบบต่อเนื่องจากทั้ง 2 คอลัมน์แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20

จากรูปที่ 4.19 พบว่าเวลาที่ใช้สำหรับ 50 เปอร์เซ็นต์เบรคทรูจ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Time for 50 % breakthrough) ในการเลือกดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 ออกจากสีย้อมผสม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมผสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที บนตัวดูดซับ NCB ปริมาณ 30 กรัม (ความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร) คือ ประมาณ 47.7 ชั่วโมง และบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลที่ 50 เปอร์เซ็นต์เบรคทรูจ์ในระบบแบบต่อเนื่อง (Mass transfer zone at 50 % breakthrough) เท่ากับ 3.78 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเวลาที่ใช้สำหรับ 50 เปอร์เซ็นต์เบรคทรูจ์ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Time for 50 % breakthrough) ในการเลือกดูดซับสีย้อมแอสิตบลู 129 ออกจากสีย้อมผสม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 อัตราการไหล 2 มิลลิลิตรต่อนาที บนตัวดูดซับ CCB ปริมาณ 30 กรัม (ความสูงเบดนิ่งเฉลี่ย 7.3 เซนติเมตร) คือ ประมาณ 126.5 ชั่วโมง และบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลที่ 50 เปอร์เซ็นต์เบรคทรูจ์ในระบบแบบต่อเนื่อง (Mass transfer zone at 50 % breakthrough) เท่ากับ 2.99 เซนติเมตร



รูปที่ 4.19 เส้นโค้งเบรคธรรุจสำหรับการเลือกดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเฟรด 120 บนตัวดูดซับ NCB ออกจากสีย้อมผสมที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 7 อัตราเร็วในการไหลลงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของเบคนิ่งเฉลี่ย (NCB) ประมาณ 7.3 เซนติเมตร



รูปที่ 4.20 เส้นโค้งเบรคธรรุจสำหรับการเลือกดูดซับสีย้อมแอซิดบลู 129 ออกจากสีย้อมที่ผ่านการบำบัดจากคอลัมน์ที่หนึ่งที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 9 อัตราเร็วในการไหลลงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของเบคนิ่งเฉลี่ย (CCB) ประมาณ 7.3 เซนติเมตร

หลังการทดลองการดูดซับในระบบแบบต่อเนื่องพบว่าสามารถเลือกดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเฟรค 120 และสี้อมแอซิคบลู 129 ออกจากสี้อมผสม จะเห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมหลังการดูดซับไม่มีเหลืออยู่เลยและสามารถปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมได้เนื่องจากผ่านมาตรฐานน้ำทิ้ง



รูปที่ 4.21 การเลือกขจัดสี้อมรีแอกทีฟเฟรค 120 และสี้อมแอซิคบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณตัวดูดซับ 30 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์แก้ว 2 คอลัมน์ที่มีการเชื่อมต่อกัน ในระบบแบบต่อเนื่อง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อมผสมเท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อัตราการไหลของสี้อมคงที่เท่ากับ 2 มิลลิลิตรต่อนาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบปริมาณความจุการดูดซับสีย้อมโดยใช้ตัวดูดซับต่างๆ กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในงานวิจัยฉบับนี้

สีย้อม	ตัวดูดซับ	ปริมาณความจุในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	อ้างอิง
รีแอกทีฟเฟรด 120	เม็ดไลโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง	1250	งานวิจัยฉบับนี้
รีแอกทีฟเฟรด 120	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	385	งานวิจัยฉบับนี้
แอสซิดบลู 129	เม็ดไลโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง	222	งานวิจัยฉบับนี้
แอสซิดบลู 129	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	3333	งานวิจัยฉบับนี้
รีแอกทีฟเฟรด 222	เกร็ดไลโตซาน	494	Wu และคณะ (2000)
รีแอกทีฟเฟรด 189	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	1936	Chiou และ Li (2002)
AAVN	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	3362	Chiou และ Li (2003)
RB4	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	3823	Chiou และ Li (2003)
รีแอกทีฟ - เฮลโล่(GR)	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	9	Cestari และคณะ (2004)
รีแอกทีฟเฟรด(RB)	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	7.5	Cestari และคณะ (2004)
รีแอกทีฟเฟรด(RN)	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	10	Cestari และคณะ (2004)
รีแอกทีฟเฟรด 120	ไลโตซานชนิดแผ่น	333	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)
	เม็ดไลโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง	500	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)
	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	909	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)
แอสซิดบลู 129	ไลโตซานชนิดแผ่น	323	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)
	เม็ดไลโตซานที่ไม่ผ่านการเชื่อมขวาง	476	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)
	เม็ดไลโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง	833	ขวัญใจ สัจจาธรรม (2003)

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่างานวิจัยฉบับอื่นที่นำมาเป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อมบนตัวดูดซับชนิดต่างๆ โดยที่เป็นการศึกษาการดูดซับสีย้อมเพียงชนิดเดียวเท่านั้น ไม่ได้เป็นการเลือกการดูดซับสีย้อมออกจากสีย้อมผสมดังที่ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเลือกดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และแอซิคบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ที่เตรียมขึ้นจากเปลือกกุ้งแช่บ๊วยหรือเปลือกกุ้งขาว ในระบบแบบกะและแบบต่อเนื่อง ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การเตรียมตัวดูดซับ การทดลองแบบกะ และการทดลองแบบต่อเนื่อง ซึ่งจากการทดลองที่ได้สรุปได้ดังนี้

1. ระดับการกำจัดหมู่อะซิดิลของโคโคซานที่เตรียมขึ้นจากเปลือกกุ้งแช่บ๊วยหรือเปลือกกุ้งขาว เท่ากับ 99 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 398,789 และมีพื้นที่ผิวสำหรับ NCB และ CCB มีค่าเท่ากับ 1.1524 และ 0.3637 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ

2. การเติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่ายจะช่วยให้เม็ดโคโคซานมีความแข็งแรงกว่าไม่เติมสารเชื่อมขวางโครงร่างตาข่าย

3. น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และแอซิคบลู 129 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ปริมาตร 50 มิลลิตร เมื่อใช้ NCB ปริมาณ 2 กรัม เป็นตัวดูดซับ จะดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 98.49 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับสีย้อมแอซิคบลู 129 ได้ 81.92 เปอร์เซ็นต์ ถ้าใช้ CCB ปริมาณ 2 กรัมเป็นตัวดูดซับ จะดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 83.11 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับสีย้อมแอซิคบลู 129 ได้ 98.94 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้ NCB ปริมาณ 2 กรัมเป็นตัวดูดซับจะดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 97.83 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับสีย้อมแอซิคบลู 129 ได้ 37.45 เปอร์เซ็นต์ ถ้าใช้ CCB ปริมาณ 2 กรัมเป็นตัวดูดซับจะดูดซับสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 ได้ 70.99 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับสีย้อมแอซิคบลู 129 ได้ 91.81 เปอร์เซ็นต์

4. ทั้งความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม และความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมโดยใช้เม็ดโคโคซานเป็นตัวดูดซับ ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่การลดค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมจะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรต ( $KNO_3$ ) ถ้ามีเพียงเล็กน้อยคือ

0.1 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าในน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรตสูงขึ้นไปเป็น 10, 100 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมลดลง ทั้งในกรณีของ NCB และ CCB

5. การดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 และแอซิคบลู 129 โดยใช้เม็ดไคโตซานทั้งสองชนิดเป็นตัวดูดซับสามารถอธิบายได้ดีด้วยสมการแลงเมียร์ ซึ่งค่าประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ชั้นโมโนเลเยอร์ของสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 โดยใช้ NCB เป็นตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 1,250 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 7 และประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดที่ชั้น โมโนเลเยอร์ของสี้อมแอซิคบลู 129 โดยใช้ CCB เป็นตัวดูดซับมีค่าเท่ากับ 3,333 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ค่าพีเอช 7

6. เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 กับแอซิคบลู 129 แล้วพบว่า NCB จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ได้ดีกว่า สี้อมแอซิคบลู 129 ขณะที่ CCB จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมแอซิคบลู 129 ได้ดีกว่าสี้อมรีแอกทีฟเรด 120

7. การเลือกดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ออกจากสี้อมผสมระหว่างสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 กับสี้อมแอซิคบลู 129 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้ NCB เป็นตัวดูดซับแล้วปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมให้มีค่าเท่ากับ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ที่เวลา 10 นาที จะสามารถเลือกดูดซับสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 ออกจากสี้อมผสมได้ถึง 97.8 เปอร์เซ็นต์

และการเลือกการดูดซับสี้อมแอซิคบลู 129 ออกจากสี้อมผสมระหว่างสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 กับสี้อมแอซิคบลู 129 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้ CCB เป็นตัวดูดซับแล้วปรับค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี้อมให้มีค่าเท่ากับ 9 แล้วนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 120 รอบต่อ นาที ที่เวลา 10 นาที จะสามารถเลือกดูดซับสี้อมแอซิคบลู 129 ออกจากสี้อมผสมได้ถึง 81.0 เปอร์เซ็นต์

8. การทดลองการดูดซับสี้อมในระบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดซับสี้อมที่มีค่าสูง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสิ่งทอที่ปนเปื้อนด้วยสี้อมประเภทละลายน้ำได้ มาบำบัดด้วยเม็ดไคโตซาน NCB และ CCB



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- ขวัญใจ สัจจาธรรม.การกำจัดสีข้อมออกจากร้าน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมโดยไคโตซานจากเปลือกกุ้ง  
แห่ง.วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิต  
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- จินตนา ชำนาญบุญธรรม.การดูดซับของสีข้อมประเภทละลายน้ำได้บนไคตินและไคโตแซน.วิทยา  
นิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2542.
- โชติรส เอี่ยมสอาด.การกำจัดสีข้อมที่ละลายน้ำได้ด้วยการดูดซับโดยใช้ไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
โท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2545.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. วิทยาศาสตร์เส้นใย. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2543.

### ภาษาอังกฤษ

- Abia, A.A. and Igwe, J.C. Sorption kinetics and intraparticulate diffusivities of Cd, Pb and Zn ions on  
maize cob. African Journal of Biotechnology. 4, 6. (2005) : 509-512.
- Amornsri, A. Colour chemistry. Textile Technology., 2003.
- Alley, E.R. Water quality control handbook. New York : McGraw-Hill., 2000.
- Baughman, G.L. and Weber, E.J. Transformation of dyes and related compounds in anoxic sediment :  
kinetics and products. Environ. Sci. Technol. 28. (1994) : 267-276.
- Callely, A.G., Forster, C.F. and Stafford, D.A. Treatment of industrial effluents. New York :  
McGraw-Hill., 1977.
- Carliell, C. M., Barclay, S. J., Naidoo, N. and Buckley, C. A. Microbial decolourisation of reactive  
azo dye under anaerobic conditions. Water SA. 21, 1. (1995) : 61-69.

- Cestari, A.R., Vieira Eunice, F.S., dos Santos Aline, G.P, Mota, J.A. and de Almeida, V.P. Adsorption of anionic dyes on chitosan beads. 1. The influence of the chemical structures of dyes and temperature on the adsorption kinetics. Journal of Colloid and Interface Science. (2004) : 1-7.
- Chiou, M.S. and Li, H.Y. Equilibrium and kinetic modeling of adsorption of reactive dye on cross-linked chitosan beads. Journal of Hazardous Materials. B93. (2002) : 233-248.
- Chiou, M.S. and Li, H.Y. Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical cross-linked chitosan beads. Chemosphere. 50. (2003) : 1095-1105.
- Chiou, M.S., Ho, P.Y. and Li, H.Y. Adsorption of anionic dyes in acid solutions using chemically cross-linked chitosan beads. Dyes and Pigments. 60. (2004) : 69-84.
- Cooper, P. Colour in dyehouse effluent. Oxford : Society of dyes and colourist., 1995.
- Cooper, S.G. The Textile Industry : Environmental Control and Energy Conservation, (n.p.) : Noyes Data corporation., 1978.
- Dr. Giovanni Visco. esercitazione n. 1 [online]. A variable from : [w3.uniroma1.it/.../ immagine/404365\\_17804-49-8.png](http://w3.uniroma1.it/.../immagine/404365_17804-49-8.png) [2006, April 24].
- Easton, J.R. The dye maker's view. Colour in Dyehouse Effluent. Edited by Cooper P. Society of Dyes and Colourists., 1995.
- El-Geundi, M.S. Adsorbents for industrial pollution control. Adsorpt. Sci. Technol. 15. (1997) : 777-787.
- Foster, A.B. and Webber, J.M. Chitin. Advance in Carbohydrate Chemistry. 15. (1960) : 371-393.
- Gaeta, S.N., and Fedale, U. Recovery of water and auxiliary chemical from effluents of textile dye house. Desalination and Water Reuse Proceeding of the Twelfth International Symposium. U.K. : Institute of chemical Engineering. (1991)
- Gohl, E.P.G., Vilensky, L.D. Textile Science. 2<sup>nd</sup> ed. Longman Cheshire., 1983. : 120-162.
- Goosen, M. Application of chitin and chitosan. Technomic Publishing Company., 1997.
- Henning, K.D. and Degel, J. PURIFICATION OF AIR, WATER AND OFF GAS SOLVENT RECOVERY Activated Carbon for Solvent Recovery Idealized breakthrough curve of a fixed bed absorber. [online]. A variable from : [www.activated-carbon.com/sol\\_rec\\_3.html](http://www.activated-carbon.com/sol_rec_3.html) [2006, April 24].

- Hsien, T. and Rorrer, G.L. Heterogeneous Cross-linking of Chitosan Gel Beads : Kinetics Modeling, and Influence on Cadmium Ion Adsorption Capacity. Industrial and Engineering Chemistry. 36. (1997) : 3631-3638.
- Ingamells, W. Colour for Textiles:A User's Handbook. Oxford : Society of Dyes and Colourists., 1993.
- Jeon, C. and Holl, W.H. Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. Water Research. 37. (2003) : 4770-4780.
- John Shore. Society of Dyers and Colourists About the Chemistry of the Vinyl Sulfone dyes [online]. A variable from : [www.pburch.net/dyeing/ramazol\\_blue19.gif](http://www.pburch.net/dyeing/ramazol_blue19.gif) [2006, April 24].
- Karthikeyan, G, Anbalagan, K. and Muthulakshmi Andal, N. Adsorption dynamic and equilibrium studies of Zn(II) onto chitosan. J. Chem. Sci. 336, 2. (2004) : 119-127.
- Kenneth, E.N., and Vassilios, G. Adsorption technology for air and water pollution control. Lewis publishers., 1992.
- Khor, E. Chitin : fulfilling a biomaterial promise. Elsevier Science Ltd. UK., 2001.
- Kumar, M.N.V.R. A review of chitin and chitosan applications. Reactive and Functional Polymers. 46. (2000) : 1-27.
- Mallika langphasuk. The potential for photocatalytic oxidation of dyes on textile wastewater. Doctoral dissertation, Department of Technical Science, Faculty of science, Asian Institute of Technology. (1997)
- Mckay, G., Prasad, G.R. and Mowli, P.R. Equilibrium studies for the adsorption of dyestuffs from aqueous solutions by low-cost materials. Water Air Soil Pollut. 29. (1986) : 273-283.
- McKay, G., Blair, H.S. and Gardner, J.R. Adsorption of dyes on chitin.I.Equilibrium studies. Journal of Applied Polymer Science. 27. (1982) : 3043-3057.
- Mentell, C.L. Chemical Engineering Series : Adsorption. McGraw-Hill Book Company., 1951.
- Muzzarelli, R. A. A. Chitin. Pergamon Press., 1977.
- Muzzarelli, R.A.A. and Peter, M.G. Chitin Handbook. European Chitin Society., 1997.
- Noll K.E., Gounaris, V. and Hou, W.S. Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control. Lewis Publishers., 1992.

- Oldrich TOKAR. Iontosorb RED. [online]. A variable from : [www.iontosorb.cz/red.gif](http://www.iontosorb.cz/red.gif) [2006, April 24].
- Oldrich TOKAR. Iontosorb YELLOW [online]. A variable from : [www.iontosorb.cz/yellow86.gif](http://www.iontosorb.cz/yellow86.gif) [2006, April 24].
- Pereira, M.F., Orfao, S.J. and Figueiredo, J.L. Adsorption of dyes on activated carbons : influence of surface chemical groups. *Carbon* 41. (2003) : 811-821.
- Pouchert C. The [Aldrich Library of FT-IR Spectra Edition II Volume 1, 2, 3](#). Copy right by Sigma-Aldrich., 1997.
- Ray, B.T. [Environment Engineering](#). PWS Publishing Company., 1995.
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. Remediation of dyes in textile effluent : a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Tech.* 77. (2001) : 247-255.
- RSC Advancing the chemical Sciences. Cellulose. [online]. A variable from : [www.chemsoc.org/.../cfb/images/cellulose.gif](http://www.chemsoc.org/.../cfb/images/cellulose.gif) [2006, April 24].
- SERVA Electrophoresis. SERVA Blue R [online]. A variable from : [www.serva.de/products/data/35051.gif](http://www.serva.de/products/data/35051.gif) [2006, April 24].
- Shahidi, F., Arachchi, J.K.V. and Jeon, Y. Food applications of chitin and chitosans. *Trends in Food Science and Technology*. 10. (1999) : 37-51.
- Smith, B. Wastes from textile processing, [Plastics and the Environment](#). Edited by Andrady A.L. John Wiley & Sons., 2003.
- The University of South Carolina. Acid Blue 40 Alizarin Direct Blue A2G [online]. A variable from : [www.usca.edu/chemistry/spectra/acidbl40.gif](http://www.usca.edu/chemistry/spectra/acidbl40.gif) [2006, April 24].
- University of Southern Mississippi. Chitosan. [online]. A variable from : [www.pslc.ws/.../kidsmac/sea/images/chitosan1.gif](http://www.pslc.ws/.../kidsmac/sea/images/chitosan1.gif) [2006, April 24].
- Volker Franz. Surface Tension of Solids. [online]. A variable from : [www.uni-siegen.de/.../pcii/image/adsorption.GIF](http://www.uni-siegen.de/.../pcii/image/adsorption.GIF) [2006, April 24].
- Weber, W. J. and Morris, J.C. *Journal Sanit. Engg. Div. ASCE*89. (SA2) 31. (1963)
- WIKIPEDIA. Chitin. [online]. A variable from : [upload.wikimwdia.org/.../commons/a/a1/chitin.png](http://upload.wikimwdia.org/.../commons/a/a1/chitin.png) [2006, April 24].

- 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.
- Wu, F.C., Tseng, R.L. and Juang, R.S. Comparative adsorption of metal and dye on flake- and bead-types of chitosans prepared from fishery wastes. Journal of Hazardous Materials. B73. (2000) : 63-75.
- Wu, F.C., Tseng, R.L. and Juang, R.S. Enhanced abilities of highly swollen chitosan beads for color removal and tyrosinase immobilization. Journal of Hazardous Materials B81. (2001) : 167-177.
- Yoshida, H., Okamoto, A. and Kataoka, T. Adsorption of acid dye on cross-linked chitosan fibers : equilibria. Chem. Eng. Sci. 48.(1993) : 2267-2272.
- Yu, Y., Zhuang Y.Y. and Wang Z.H. Adsorption of Water-Soluble Dye onto Functionalized Resin. Journal of Colloid and Interface Science 242. (2001) : 288-293.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดไคโตซาน (BET surface area, Pore size and Pore volume)

ตารางที่ ก1. พื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน และปริมาตรของรูพรุนของเม็ดไคโตซานทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของเม็ดไคโตซาน	BET surface area (ตารางเมตรต่อกรัม)	ขนาดของรูพรุน (อังสตรอม)	ปริมาตรของรูพรุน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)
NCB	1.1524	47.610	0.001305
CCB	0.3637	39.957	0.000166

ระดับการบวมน้ำ (Degree of swelling)

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

ขณะที่  $W_{\text{wet bead}}$  คือ น้ำหนักเปียกของเม็ดไคโตซาน (กรัม)  
 $W_{\text{dry bead}}$  คือ น้ำหนักเปียกของเม็ดไคโตซาน (กรัม)

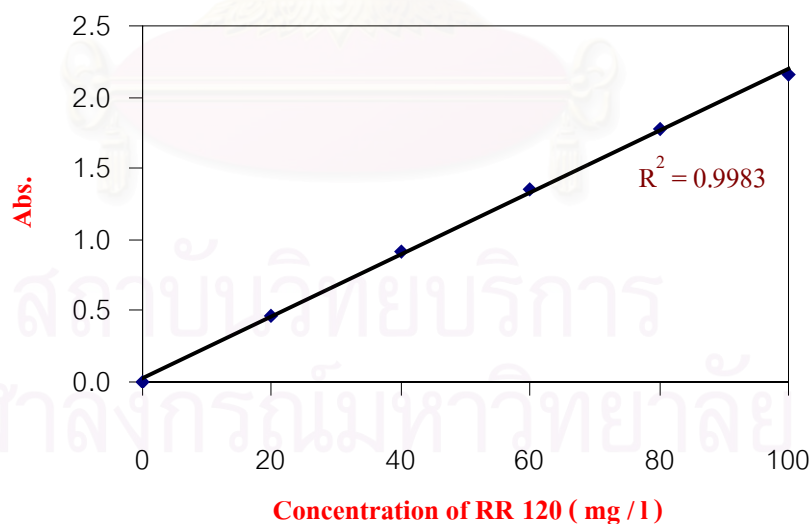
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

## กราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

ตารางที่ ข1. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120 และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 536 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืน (Abs.)
0	0.000
20	0.471
40	0.921
60	1.355
80	1.779
100	2.160



รูปที่ ข1. กราฟมาตรฐานของสีย้อมรีแอคทีฟเรด 120

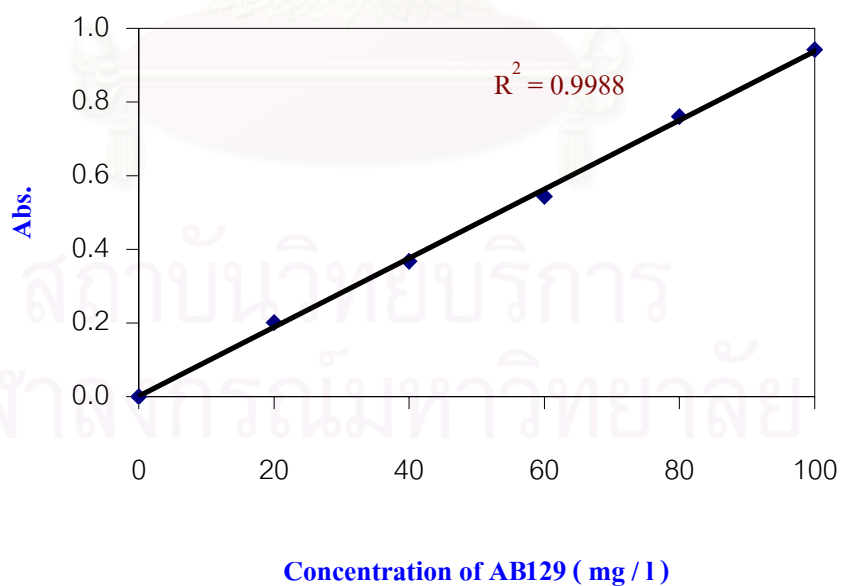


## ภาคผนวก ข

## กราฟมาตรฐานของสีย้อมแอซิดบลู 129

ตารางที่ ข2. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสีย้อมแอซิดบลู 129 และค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 629 นาโนเมตร

ความเข้มข้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าการดูดกลืน (Abs.)
0	0.000
20	0.202
40	0.368
60	0.544
80	0.761
100	0.942



รูปที่ ข 2. กราฟมาตรฐานของสีย้อมแอซิดบลู 129

### ภาคผนวก ก

#### บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone : MTZ)

บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล (เอ็มทีแซด) คือบริเวณความสูงของเม็ดโคโคซานที่บรรจุในคอลัมน์ที่แสดงถึงความแตกต่างของความเข้มข้นของของแข็งจากศูนย์ถึงสมดุล ซึ่งบริเวณนี้เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับขึ้น ความเข้มข้นของสีย้อมจะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปตลอดทุกส่วนของความสูงของเม็ดโคโคซานที่บรรจุในคอลัมน์จากค่าสุดท้ายไปจนถึงศูนย์ที่จุดเริ่มต้นของบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล (เอ็มทีแซด) ของความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมที่ป้อนเข้าไปจนถึงจุดสุดท้าย

$$MTZ_L = H \times (t_s - t_b) / t_s$$

- ขณะที่  $MTZ_L$  คือความยาวของบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร)  
 $H$  คือความสูงของเม็ดโคโคซานที่บรรจุในคอลัมน์ (เซนติเมตร)  
 $t_s$  คือเวลาที่จุดอิ่มตัว (นาที)  
 $t_b$  คือเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (นาที)

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ง

## เปอร์เซ็นต์การขจัดสีย้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสีย้อมแอซิดบลู 129

$$\text{Dry adsorbed} = C_i - C_f$$

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

โดยที่  $C_i$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)  
 $C_f$  คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 1. เปรอ์เซ็นต์การขจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120 และสี้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับสี้อม ที่สภาวะสมดุล

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี้อม	เปอร์เซ็นต์การขจัดสี้อมรีแอกทีฟเรด 120		เปอร์เซ็นต์การขจัดสี้อมแอซิดบลู 129	
	NCB	CCB	NCB	CCB
1.ปริมาณเม็ดโคโคซาน (กรัม)				
0.25	69.08	64.56	51.06	52.13
0.50	84.92	70.29	72.34	64.18
1	93.97	75.87	79.43	87.59
2	98.49	83.11	81.92	98.94
3	99.25	97.74	85.46	99.64
2.ความเข้มข้นเริ่มต้นของสี้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
30	98.49	83.11	81.92	98.94
100	97.83	71.00	37.45	91.81
3.ค่าพีเอช				
3	99.55	99.32	81.28	97.87
4	99.32	99.09	79.36	97.34
5	99.09	98.51	78.72	96.38
6	97.96	86.97	77.66	93.40
7	97.83	70.99	37.45	91.81
8	93.44	62.22	33.29	90.21
9	78.64	53.48	31.92	88.08
4.ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไนเตรด (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
0	97.83	-	-	95.21
0.1	98.28	-	-	95.11
1	99.59	-	-	99.47
10	96.83	-	-	95.32
100	94.07	-	-	92.55
1000	87.19	-	-	92.13

ตารางที่ ๒. เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมมูลของการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ข้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณ 2 กรัม โดยศึกษาผลของค่าพีเอชของสี่ข้อมตั้งแต่ 3 ถึง 9

ค่าพีเอช	เวลาที่เข้าสู่สมมูลของสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 (นาที)		เวลาที่เข้าสู่สมมูลของสี่ข้อมแอซิดบลู 129 (นาที)	
	NCB	CCB	NCB	CCB
3	90	180	50	75
4	105	195	50	165
5	120	270	75	240
6	135	285	105	240
7	150	300	195	240
8	195	300	195	240
9	210	300	255	255

จากตารางที่ ๒. เวลาที่เข้าสู่สมมูลของการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ข้อมแอซิดบลู 129 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร บนตัวดูดซับ NCB และ CCB ปริมาณ 2 กรัม โดยที่ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์สี่ข้อมแตกต่างกันตั้งแต่ 3 ถึง 9

พบว่าในการดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ข้อมแอซิดบลู 129 บนตัวดูดซับ NCB และ CCB เมื่อค่าพีเอชต่ำ เวลาที่เข้าสู่สมมูลของการดูดซับสี่ข้อมจะเร็วกว่าค่าพีเอชสูงๆ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง NCB และ CCB พบว่า NCB สามารถดูดซับสี่ข้อมรีแอกทีฟเฟรด 120 และสี่ข้อมแอซิดบลู 129 และเข้าสู่สมมูลได้เร็วกว่าการใช้ CCB เป็นตัวดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรัชณี ทรัพย์มากมี เกิดเมื่อวันที่ 26 กรกฎาคม 2520 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีเมื่อปีการศึกษา 2541 จากนั้นได้เข้าทำงานที่บริษัทเคมมาร์ทเอ็นเตอร์ไพรส์ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งพนักงานควบคุมคุณภาพ และได้ลาออกเพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาโท ในปีการศึกษา 2546 คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย