

การจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนโคโตซานรูปแบบต่างๆ



นางสาวทิพย์วิมล เกิดอ้อม

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6929-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF COPPER AND CADMIUM IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION  
ON VARIOUS FORMS OF CHITOSAN



Miss Thipwimon Kerd-im

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6929-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบน โคโตซานรูปแบบต่างๆ
โดย	นางสาวทิพย์วิมล เกิดอิม
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)

ทิพย์วิมล เกิดอิม : การขจัดไอออนทองแดงและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่าง ๆ (REMOVAL OF COPPER AND CADMIUM IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION ON VARIOUS FORMS OF CHITOSAN). อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี, อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ 113 หน้า. ISBN 974-17-6929-6.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการขจัดไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมโดยใช้การดูดซับบนไคโตซานรูปแบบต่างๆ เช่น เกล็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซานและเม็ดอะมิเนตไคโตซานที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี ซึ่งมีความสามารถในการทนต่อภาวะที่เป็นกรดและเบสได้ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการดูดซับทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ในส่วนของการทดลองแบบกะตัวแปรที่ศึกษาคือ พีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม และระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลของไคโตซาน การศึกษาการดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีทองแดงปนเปื้อนที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างกัน ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงด้วยสารละลายกรดไนตริกที่มีระดับความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงเท่ากับ 5 สำหรับทุกรูปแบบของไคโตซาน และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมเท่ากับ 5 สำหรับเกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซาน พีเอชเท่ากับ 6 สำหรับไคโตซานรูปแบบอื่นๆ เม็ดอะมิเนตไคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับไคโตซานรูปแบบอื่นๆ ปริมาณไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมที่ถูกดูดซับมีค่าเท่ากับ 345 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 333 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การศึกษาสมดุลของการดูดซับสามารถอธิบายได้ด้วยสมการแลงเมียร์ การดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียด้วยไคโตซานในการทดลองแบบต่อเนื่อง พบว่าความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำเสีย ไคโตซานที่นำมาฟื้นฟูคุณภาพแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้

ภาควิชา....เคมีเทคนิค....

สาขาวิชา....เคมีเทคนิค....

ปีการศึกษา....2547....

ลายมือชื่ออนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4572310023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CHITIN /CHITOSAN / COPPER / CADMIUM / REMOVAL

THIPWIMON KERD-IM : REMOVAL OF COPPER AND CADMIUM IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION ON VARIOUS FORMS OF CHITOSAN. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SANGOB TIP PONGSTABODEE, Ph.D. THESIS COADVISOR : PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D. 113 pp. ISBN 974-17-6929-6.

Objective of this study was to remove Cu(II) and Cd(II) ion from wastewater by adsorption on various forms of chitosan such as a flake, beads, cross-linked chitosan with glutaraldehyde (GLA), carboxylated chitosan beads and aminated chitosan beads. Chitosan modified beads were insoluble in aqueous acidic and basic solution. Adsorption of heavy metal was studied in a batch and continuous system. Batch adsorption experiment was carried out as a function of pH, initial concentration of metal ions and degree of deacetylation. In continuous system, the effect of industrial wastewater flow rate on Cu(II) adsorption on chitosan was considered. Additionally, it was found that copper adsorbed on the chitosan could be easily desorbed with an eluent containing 0.1 M nitric acid. Electrochemical method was used for recovery of copper from the eluent.

Optimum pH for adsorption of Cu(II) on chitosan in each form was approximately 5. In the case of Cd(II) ions adsorption on chitosan flake and chitosan bead, the optimum pH was approximately 5. Cd(II) ions adsorption on other forms of chitosan bead had an optimum pH of 6. Aminated chitosan beads gave a uptake capacity adsorption of Cu(II) and Cd(II) ions up to 345 mg/g and 333 mg/g, respectively. The equilibrium adsorption data were found to be well described by Langmuir isotherm. In continuous system, the results showed that the removal of Cu(II) ion from industrial wastewater depended on flow rate of the wastewater. Regenerated chitosan could be reused.

Department ...Chemical Technology..	Student's signature.....
Field of study ..Chemical Technology..	Advisor's signature.....
Academic year...2004.....	Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปตี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตตานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพวรรณ ประศาสน์สารกิจ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็นและคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ มาละดี ทัยคุปต์ และนางจิระประภา เนียมปาน ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องอะตอมมิคอปซอบชันสเปกโตรมิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนเพื่อการศึกษาวิจัย และโรงงานบางกอกอินดัสเทรียลลามิเนท (BIL) ที่ให้ความเอื้อเฟื้อน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน เจ้าหน้าที่วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เจ้าหน้าที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณนาตยาพร เกิดอิม และคุณคุณุตย์ เจตียวรรณ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านเงินทุนการศึกษา คุณสุภาพ ศิลปคัมภีรภาพ (พี่เอก) คุณปิยะพันธ์ จะกอบ (พี่นิน) คุณชุลีกร ชุกกลิ่น (พี่ตีก) คุณกฤษยาพร ทินกร (จ๋า) คุณกาญจนา พงษ์ศักดิ์ (จอย) คุณวินิตย์ บุญเกียรติ (บัว) และทุกๆคนในครอบครัวที่ช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน.....	5
2.2 แหล่งที่พบไคติน.....	7
2.3 โลหะหนัก.....	9
2.4 กระบวนการผลิตไคโตซาน.....	10
2.5 การเกิดโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน.....	13
2.6 การดูดซับ.....	14
2.6.1 ลักษณะการดูดซับ.....	15
2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	17
2.6.3 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดซับ.....	18
2.6.3.1 สมการแลงเมียร์.....	19
2.6.3.2 สมการฟรุนดลิช.....	20

2.7	การดูดซับแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode).....	21
2.7.1	ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone).....	21
2.7.2	ลักษณะเบรคทวร์จ (Breakthrough Characteristics).....	22
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.	วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	27
3.4	การดำเนินการวิจัย.....	28
3.4.1	การสกัดไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งกุลาดำ.....	28
	- การสกัดไคติน.....	28
	- การสกัดไคโตซาน.....	30
3.4.2	การเตรียมเม็ดไคโตซาน.....	30
3.4.3	การเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวาง.....	30
3.4.4	การเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี.....	31
3.5	การทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง.....	31
3.5.1	การทดลองแบบกะ.....	32
3.5.1.1	ศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก.....	32
3.5.1.2	ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับ.....	34
3.5.2	การทดลองแบบต่อเนื่อง.....	36
3.5.3	ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดง.....	38
3.5.4	ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	39



4.	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	41
4.1	ผลการเตรียมเกล็ดโคโตซาน เม็ดโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดโคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี.....	41
4.2	การละลาย.....	47
4.3	ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก.....	47
4.4	ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการขจัดไอออนโลหะหนัก.....	48
4.4.1	ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการขจัดไอออนทองแดง.....	48
4.4.2	ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการขจัดไอออนแคดเมียม.....	51
4.5	เครื่องมือวิเคราะห์ .....	53
4.5.1	SEM (Scanning electron microscope).....	53
4.5.2	EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy).....	56
4.6	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก.....	57
4.6.1	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดง.....	57
4.6.2	ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียม.....	58
4.7	ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไอออนโลหะหนัก.....	61
4.8	ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ระบบต่อเนื่อง.....	64
4.9	ศึกษาผลของศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดง.....	66
4.10	ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	68
5.	สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	69
	รายการอ้างอิง .....	72
	ภาคผนวก .....	76
	ภาคผนวก ก.....	77
	ภาคผนวก ข.....	79
	ภาคผนวก ค.....	96

ภาคผนวก ง.....	100
ภาคผนวก จ.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	113



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ปริมาณการนำเข้าและผลิตรวมในประเศตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 – 2542.....	1
1.2	สถิติการส่งออกกุ้งสดและแช่เยือกแข็งของประเทศไทย.....	3
2.1	ปริมาณของไคตินที่พบในปู กุ้ง แมลง สัตว์ที่มีเปลือกแข็ง และ สหราชอาณาจักรต่างๆ...	8
4.1	ผลการเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งกุลาดำ .....	42
4.2	แสดงสัญลักษณ์ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	45
4.3	แสดงความสามารถในการละลายของไคโตซานรูปแบบต่างๆ.....	47
4.4	ปริมาณทองแดงที่สามารถดูดซับได้ โดยใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆและระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน.....	61
4.5	ปริมาณแคดเมียมที่สามารถดูดซับได้ โดยใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆและระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน.....	62
4.6	ปริมาณการดูดซับทองแดงและแคดเมียมโดยใช้ไคโตซานในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ.....	63
4.7	เวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทอร์จ (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร).....	65
4.8	เวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทอร์จ (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายเทมวลของเม็ดอะมิเนตไคโตซานหลังการฟื้นฟูคุณภาพ.....	66
4.9	ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาได้จากเม็ดอะมิเนตไคโตซานและร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง.....	68
ค.1	ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ I ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน.....	96
ค.2	ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ II ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน.....	96
ค.3	ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ III ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน....	96

ค.4	ร้อยละการขาดทองแดงแคดเมียมที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ I ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน.....	97
ค.5	ร้อยละการขาดทองแดงแคดเมียมที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ II ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน...	97
ค.6	ร้อยละการขาดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ III ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน..	97
ค.7	ผลการศึกษาการแยกทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกโดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้า....	98



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรม.....	2
1.2	การใช้แคดเมียมในอุตสาหกรรม.....	2
2.1	โครงสร้างทางเคมีของโคติน .....	6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของโคโตซาน.....	6
2.3	โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	6
2.4	ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการแยกโคตินและโคโตซาน.....	11
2.5	ลักษณะ ของ ตัวดูดซับ, ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย.....	15
2.6	เส้นโค้งเบรคทรูจ์ในการดูดซับแบบคอลัมน์.....	22
3.1	ขั้นตอนการเตรียมเม็ดโคโตซานชนิดต่างๆ.....	31
3.2	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก.....	33
3.3	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก.....	35
3.4	ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงแบบต่อเนื่อง.....	37
3.5	คอลัมน์แก้วที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.6	ขั้นตอนการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียในระบบต่อเนื่อง.....	38
3.7	ขั้นตอนการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	39
3.8	การติดตั้งเครื่องมือแบบครบวงจรในขั้นตอนการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	40
4.1	ลักษณะเกล็ดโคโตซานที่เตรียมมาจากเปลือกกุ้ง.....	41
4.2	ลักษณะเม็ดโคโตซานที่เตรียมมาจากเปลือกกุ้ง.....	42
4.3	รูปของโคโตซานที่เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายกับกลูตารัลดีไฮด์.....	43

รูปที่	หน้า	
4.4	แสดงสูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานที่เกิดปฏิกิริยาโครงสร้างตาข่ายกับกลูตา รัลดีไฮด์.....	43
4.5a	โครงสร้างทางเคมีของการเกิดปฏิกิริยาของโคโตซานกับสารละลายกรดคลอโรแ เซติก.....	44
4.5b	โครงสร้างทางเคมีของการเกิดปฏิกิริยาของเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานกับเอธิลีน ไดเอมีน .....	44
4.6	อินฟราเรดสเปกตรัมของโคโตซานรูปแบบต่างๆ.....	46
4.7	ค่าประจุบนผิวโคโตซานที่พีเอชต่างๆ.....	48
4.8a	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนทองแดงของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 91-95 .....	49
4.8b	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนทองแดงของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 85-90 .....	49
4.8c	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนทองแดงของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 76-84.....	49
4.9a	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนแคดเมียมของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 91-95 .....	52
4.9b	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนแคดเมียมของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 85-90 .....	52
4.9c	ผลของพีเอชต่อการขจัดไอออนแคดเมียมของโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอส เทิลร้อยละ 76-84 .....	52
4.10	SEM Micrograp ของเกล็ดโคโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและ ไอออนแคดเมียม.....	54
4.11	SEM Micrograp ของเม็ดโคโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและ ไอออนแคดเมียม.....	55
4.12a	EDX ของเกล็ดโคโตซานที่ยังไม่ได้ดูดซับไอออนโลหะหนัก.....	56
4.12b	EDX ของเกล็ดโคโตซานที่ดูดซับไอออนทองแดง.....	56
4.12c	EDX ของเกล็ดโคโตซานที่ดูดซับไอออนแคดเมียม.....	57

รูปที่	หน้า
4.13 ผลของรูปแบบโคโตซานต่อการจัดสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮออนทองแดงต่างกัน ปริมาณเม็ดโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ .....	59
4.14 ผลของรูปแบบโคโตซานต่อการจัดสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไฮออนแคดเมียมต่างกัน ปริมาณเม็ดโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ .....	60
4.15 ขอบเขตการถ่ายเทมวลเมื่ออัตราการไหลแตกต่างกัน .....	63
4.16 เส้นโค้งเบรคทอร์จของการดูดซับน้ำเสียโดยใช้เม็ดอะมิเนตโคโตซานความเข้มข้นเริ่มต้น 480.80 ส่วนในล้านส่วน พีเอช 5.....	65
4.17 เส้นโค้งเบรคทอร์จของการดูดซับน้ำเสียโดยใช้เม็ดอะมิเนตโคโตซานความเข้มข้นเริ่มต้น 480.80 ส่วนในล้านส่วน พีเอช 5(เม็ดอะมิเนตโคโตซานพื้นฟูคุณภาพ)...	66
4.18 อินฟารेटสเปกตรัมของเม็ดอะมิเนตโคโตซานก่อนและหลังพื้นฟูคุณภาพ.....	66
5.1 แผนภาพการศึกษาการดูดซับแบบครบวงจร.....	71
ก.1.1 การกำจัดหมู่แอเซทิลของโคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (I).....	77
ก.1.2 การกำจัดหมู่แอเซทิลของโคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (II).....	77
ก.1.3 การกำจัดหมู่แอเซทิลของโคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (III).....	78
ข.1 เวลาที่สมดุลของเกล็ดโคโตซาน ที่พีเอช 5 เกล็ดโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน.....	81
ข.2 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซาน ที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน.....	82
ข.3 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไฮออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน.....	83

## รูปที่

## หน้า

ข.4	เวลาที่สมดุลของเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน.....	84
ข.5	เวลาที่สมดุลของเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน.....	85
ข.6	เวลาที่สมดุลของเกล็ดโคโตซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน.....	87
ข.7	เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน.....	89
ข.8	เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน.....	91
ข.9	เวลาที่สมดุลของเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน.....	93



รูปที่	หน้า	
ข.10	เวลาที่สมดุลของเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอสทิลต่าง ๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออน แคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วน ในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน.....	95
ง.1	สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดโคโต ซานและเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิล ต่างกัน.....	100
ง.2	สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดคาร์ บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิลต่าง กัน.....	101
ง.3	สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดโคโต ซานและเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิล ต่างกัน.....	102
ง.4	สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดคาร์ บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิลต่าง กัน.....	103
ง.5	สมการการดูดซับของฟรุนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดโคโต ซานและเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิล ต่างกัน.....	104
ง.6	สมการการดูดซับของฟรุนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดคาร์ บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิลต่าง กัน.....	105
ง.7	สมการการดูดซับของฟรุนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดโคโต ซานและเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสทิล ต่างกัน.....	106

รูปที่		หน้า
ง.8	สมการการดูดซับของฟลูออรีนสำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดคาร์บอนกัมมันต์โคโคซานและเม็ดอะมิเนตโคโคซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน.....	107
จ.1	แผนภูมิแบบกระจายแสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงต่างกันที่ระดับกำจัดหมู่แอเซทิลร้อยละ (a) ร้อยละ 91-95 (b) ร้อยละ 85-90 (c) ร้อยละ 76-84.....	109
จ.2	แผนภูมิแบบกระจายแสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงต่างกันที่ระดับกำจัดหมู่แอเซทิลร้อยละ (a) ร้อยละ 91-95 (b) ร้อยละ 85-90 (c) ร้อยละ 76-84.....	111

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

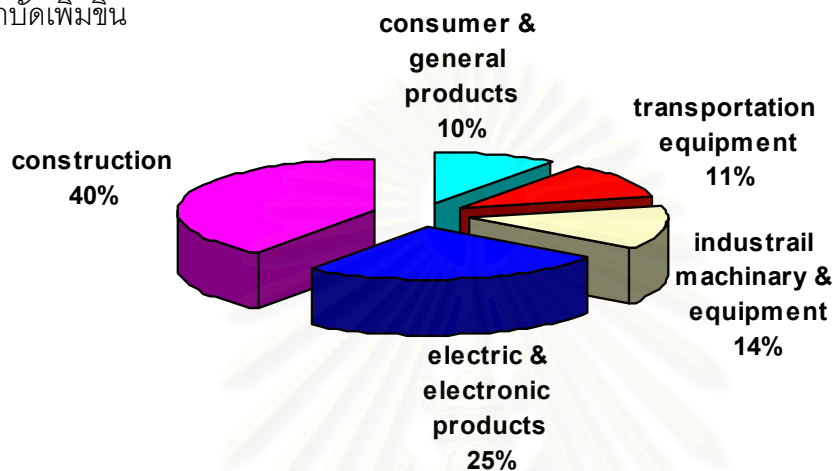
จากการเร่งรัดพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาทำให้ความต้องการใช้สารเคมีและเคมีวัตถุในภาคอุตสาหกรรม ภาคเกษตรกรรม และการใช้ในชีวิตประจำวันเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องทุกปี (ดังแสดงในตารางที่ 1.1) ควบคู่ไปกับการก่อตัวของปัญหาการคุกคามและทำอันตรายต่อชีวิตและสุขภาพร่างกายของประชาชน นับตั้งแต่ปัญหาการเกิดพิษเรื้อรังอันเกิดจากพิษของสารตกค้างเหล่านั้นในกลุ่มผู้ประกอบการอาชีพ ทั้งเกษตรกรและลูกจ้างปฏิบัติงานในโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงประชาชนทั่วไป และส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สิน นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดปัญหาการแพร่กระจายของมลพิษ ตลอดจนการตกค้างของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นผลกระทบสะสมที่จะก่อให้เกิดอันตรายในระยะยาวต่อไป นอกจากนี้ของเสียอันตรายที่เป็นผลจากกิจกรรมการใช้สารเคมีและเคมีวัตถุนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยทราบจากการคาดการณ์ปริมาณของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2540-2544 มีประมาณ 1.25-1.29 ล้านตัน สัดส่วนของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรมประมาณร้อยละ 80 ที่เหลือเป็นของเสียอันตรายจากภาคชุมชน (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2543)

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการนำเข้าและผลิตสารเคมีในประเทศตั้งแต่ปี พ.ศ. 2535 – 2543 (สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2543) (หน่วย: ล้านตัน)

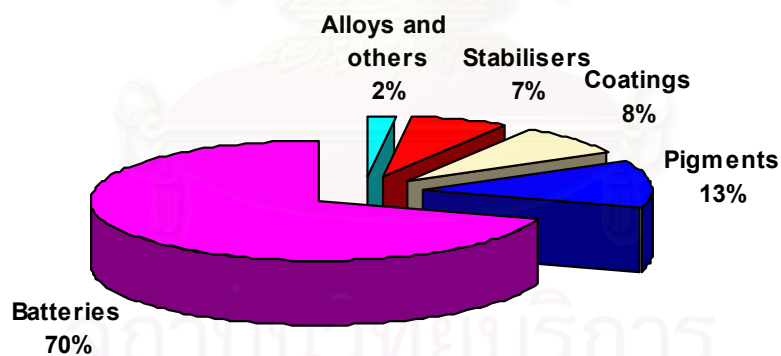
ปี พ.ศ.	2535	2536	2537	2538	2539	2540	2541	2542	2543
ปริมาณการนำเข้า	2.26	2.79	3.01	3.23	3.40	3.22	3.11	3.37	3.5
ปริมาณการผลิต (กำลังการผลิต)	2.40	2.74	5.88	6.61	8.89	9.70	9.80	9.87	14.23
รวม	4.66	5.53	8.89	9.84	12.29	12.92	12.91	13.24	17.73

หมายเหตุ ปริมาณการผลิตเป็นข้อมูลกำลังการผลิตสารเคมีหรือเคมีวัตถุของโรงงานลำดับที่ 42 ประเภทเดียวเท่านั้น

ในงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยเฉพาะไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม ซึ่งต้องถูกบำบัดก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม โลหะหนักทั้งสองชนิดนี้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในเกือบทุกอุตสาหกรรม (ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2) จากตารางที่ 1.1 ก็แสดงให้เห็นโดยนัยแล้วว่า แนวโน้มการใช้โลหะหนักทั้งสองชนิดย่อมสูงขึ้น ฉะนั้น กากของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องเสียค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1.1 การใช้ทองแดงในอุตสาหกรรม (Grishan,2000)



รูปที่ 1.2 การใช้แคดเมียมในอุตสาหกรรม (Cadmium, 1999)

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการขจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกโดยวิธีการดูดซับบนโคโตซาน ซึ่งได้มาจากเปลือกกุ้งของอุตสาหกรรมแช่แข็ง เหตุที่ต้องขจัดโลหะหนักทั้งสองนี้เนื่องมาจาก หากคนได้รับไอออนแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะก่อเกิดโรค อิต-อิต (Itai Itai Disease) สิ่งนี้เคยเกิดขึ้นในประเทศญี่ปุ่น และในประเทศไทย (มติชน, 2547) เช่น ต. พะเต๊ะ และ ต.แม่ตาว อ. แม่สอด จ. ตาก เป็นต้น และคนที่ได้รับไอออนทองแดงเข้าสู่ร่างกายมากเกินไปจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบการทำงานของตับและไต

อุตสาหกรรมกุ้งแช่แข็งมีกุ้งป้อนเข้าโรงงานปีละ 180,000 ตัน และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ดังแสดงในตารางที่ 1.2 ส่งผลให้มีวัสดุเหลือใช้จากกระบวนการแปรรูป ได้แก่ หัวกุ้งและเปลือกกุ้ง ประมาณปีละ 90,000 ตัน เปลือกกุ้งและหัวกุ้งประกอบด้วยสารพอลิแซคคาไรด์ ซึ่งเป็นไบโอพอลิเมอร์ที่เรียกว่า “ไคติน” อยู่ 14-27% (บุศรภากรณ์ มหาโยธี, 2537) เมื่อแปรรูปเป็นไคโตซานหรืออนุพันธ์ของไคติน จะมีคุณลักษณะที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ คุ่มน้ำ ป้องกันเชื้อจุลินทรีย์และไวรัส ตลอดจนมีคุณสมบัติสามารถดูดซับโลหะหนักด้วย จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรม ยา เคมี เครื่องสำอาง อาหารและเครื่องดื่ม กระจก และการบำบัดน้ำเสียได้ดี จึงเป็นเหตุให้เกิดงานวิจัยขึ้นนี้

ตารางที่ 1.2 สถิติการส่งออกกุ้งสดและแช่เยือกแข็งของประเทศไทย (Thai Frozen Foods Association, 2005)

ปี (พ.ศ.)	ปริมาณ (ตัน)	มูลค่า (ล้านบาท)
2538	9,954	1,651.87
2539	9,344	1,560.52
2540	12,198	2,283.10
2541	14,577	4,936.00
2542	138,105	48,348.24
2543	144,338	60,270.28
2544	144,606	54,748.03
2545	102,753	34,424.53
2546	118,904.63	35,915.39
2547	122,476.94	32,529.62
ม.ค. 2548	9,352.45	2,228.83

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาการขจัดโลหะหนักพวกไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนไคโตซาน ซึ่งอยู่ในรูปเกล็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานทั้งที่ไม่ผ่านการปรับปรุงโครงสร้างและที่เกิดปฏิกิริยาโครงสร้างตาย รวมทั้งไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี

## 1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาระดับการกำจัดหมู่แอมะทิลของไคโตซานที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเป็นช่วงๆ คือ ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอมะทิล 91-95% ใช้สัญลักษณ์ I ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอมะทิลระหว่าง 85-90% ใช้สัญลักษณ์ II และไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอมะทิลต่ำกว่า 76-84% ใช้สัญลักษณ์ III
2. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม
3. ศึกษาการดูดซับโลหะหนักทั้งสองชนิดสำหรับการทดลองแบบกะ และความเข้มข้นของไอออนทองแดง 10-200 ส่วนในล้านส่วน และความเข้มข้นของไอออนแคดเมียม 10-500 ส่วนในล้านส่วน น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องสนใจศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไอออนทองแดงปนเปื้อนอยู่
4. ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพไคโตซานที่หมดสภาพแล้ว
5. ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของไคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและราคาถูกเพื่อเป็นทางเลือกที่ดีในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม และช่วยลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

## บทที่ 2

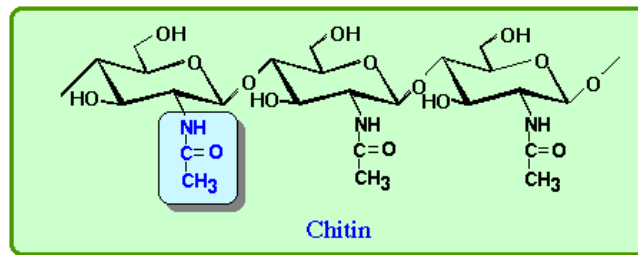
### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะทั่วไปของไคตินและไคโตซาน

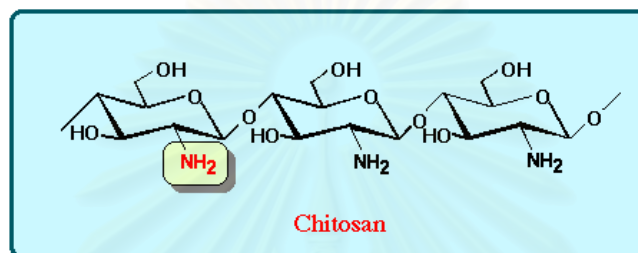
ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่ธรรมชาติได้สร้างสรรค้ให้กับสิ่งมีชีวิตมากมายในหลายรูปแบบ ไคตินได้รับการค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1811 โดย Braconnot ในราวปี ค.ศ. 1823 พอลิเมอร์ ชนิดนี้ถูกเรียกว่า "ไคติน" โดย Odier คำว่า Chitin มาจากคำว่า "Chitin" ในภาษากรีก ซึ่งมีความหมายว่า เกราะหุ้ม ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ ที่มีมากในโลกเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พอลิเมอร์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างป้องกันและสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยไคตินจะพบในโครงสร้างเปลือกนอกของสาหร่าย องค์กรประกอบของเปลือกแข็งที่หุ้มเซลล์ของรา ยีสต์ และจุลินทรีย์หลายชนิด และสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังจำพวกแมลง กุ้ง ปู และปลาหมึก โดยจะพบในรูปแบบของสารประกอบที่ปนอยู่กับสารอื่น เช่น เปลือกหุ้มแข็งของแมลงจะประกอบด้วย ไคตินในรูปแบบของไคติน-โปรตีน ขณะที่เปลือกนอกของสัตว์พวกกุ้ง ปู จะพบหินปูนหรือแคลเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย หรือบางครั้งอาจจะอยู่ร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆข้างต้น จะพบในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 (Knorr, 1984)

แหล่งสำคัญของไคตินที่ใช้ในการผลิตในอุตสาหกรรม คือ เปลือกกุ้งและเปลือกปู ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล โดยพบว่า จะมีไคตินปริมาณร้อยละ 14-27 (บุศราภรณ์ มหาโยธี, 2537) เมื่อคิดเป็นปริมาณต่อปีของสิ่งเหลือทิ้งจากการผลิตและแปรรูปกุ้งและปูทั้งโลกจะให้ไคตินถึง 150 ล้านกิโลกรัม ไคตินละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดฟอสฟอริก และกรดฟอร์มิกที่ปราศจากน้ำ แต่ไคตินไม่ละลายในต่างเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ (Knorr, 1984) โครงสร้างทางเคมีของไคตินแสดงในรูปที่ 2.1

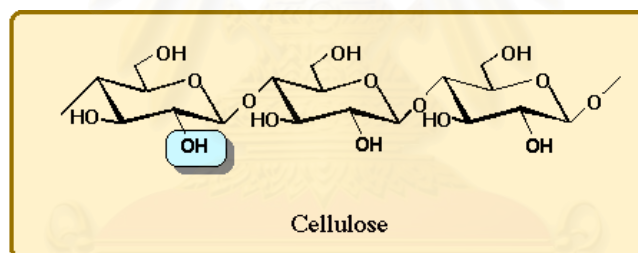
เมื่อทำการกำจัดหมู่แอเซทิล (deacetylation) ของไคตินด้วยด่างเข้มข้นทำให้โครงสร้างของหมู่อะซีตามิโน (-NHCOCH<sub>3</sub>) ของไคติน เปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน (-NH<sub>2</sub>) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ของทุกหน่วยซ้ำ (repeating unit) ของสายพอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เป็นที่น่าสังเกตว่าไคโตซานมีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลส (Cellulose) ต่างกันที่หมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลส ดังแสดงในรูป 2.3 (ประภัสสร สุรวฒนาภรณ์, 2540) และหมู่อะมิโนของไคโตซาน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไคติน (ประภัสสร สุรวัฒนาวรรณ, 2540)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของไคโตซาน (ประภัสสร สุรวัฒนาวรรณ, 2540)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (ประภัสสร สุรวัฒนาวรรณ, 2540)

ในทางปฏิบัติความแตกต่างระหว่างไคตินและไคโตซานคือระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล (Degree of deacetylation) ซึ่งปฏิกิริยาการกำจัดหมู่แอเซทิลมักจะเกิดไม่สมบูรณ์ โดยทั่วไปไคโตซานมีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลในช่วงประมาณ 70-95% ส่วนไคตินมักจะมีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลที่ต่ำกว่า 30%

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไคโตซาน เช่น ความหนืดและความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับปัจจัยทางโครงสร้างที่สำคัญสองประการ คือ ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล และ มวลโมเลกุล (ฐิติมา มณีกุล, 2545)



ระดับการกำจัดหมู่เอเซทิล หมายถึง เปอร์เซ็นของหมู่อะมิโนอิสระที่มีอยู่ในสายพอลิแซคคาไรด์ สามารถหาได้โดยเทคนิคต่างๆ เช่น อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (Infrared spectroscopy), การไทเทรชัน (titration), และโครมาโทกราฟี (chromatography) เป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์มวลโมเลกุล สามารถใช้เทคนิคการวัดความหนืด (viscometry), การวัดการกระเจิงแสง(light scattering) และโครมาโทกราฟี (chromatography) โดยทั่วไปไคโตซานมักจะละลายได้ดีในสารละลายกรดอินทรีย์ เช่น 1% กรดแอสติก ในขณะที่ไคตินจะไม่ละลายในน้ำหรือกรดและความหนืดของสารละลายไคโตซานจะเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุล (ฐิติมา มณีกุล, 2545)

## 2.2 แหล่งที่พบไคติน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่เป็นโพลิแซคคาไรด์ ซึ่งพบอยู่ทั่วไปในธรรมชาติโดยจะพบไคตินอยู่ร่วมกับโปรตีน (mucopolysacchride) ไคตินจัดเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากเป็นอันดับสองของโลก (Knorr, 1984) และสามารถพบไคตินได้ที่ผนังเซลล์ของพืช โดยอยู่แทนที่เซลลูโลสหรืออยู่ร่วมกับเซลลูโลสและพบมากในเปลือกของสัตว์ทะเลที่ไม่มีกระดูกสันหลัง (marine invertebrates) เช่น กุ้ง ปู เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในแมลง เชื้อรา และยีสต์ ไคตินที่พบในแหล่งต่างๆข้างต้นจะพบในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของไคตินที่พบในปู กุ้ง แมลง สัตว์ที่มีเปลือกแข็ง และ สหราชอาณาจักร  
(Knorr, 1984)

ชนิด	ปริมาณไคติน (%)	ชนิด	ปริมาณไคติน (%)
<u>Crustacea</u>		<u>Insects</u>	
Cancer (crab)	72.1 <sup>c</sup>	May beetle	16 <sup>b</sup>
Carcinus (crab)	0.4-3.3 <sup>a</sup>	Diptera (true fly)	54.8 <sup>c</sup>
	8.29 <sup>b</sup>	Pieris (sulfur butterfly)	64 <sup>c</sup>
Paralithodes(King crab)	35 <sup>b</sup>	Grasshopper	2-4 <sup>a</sup>
Callinectes (blue crab)	14 <sup>a</sup>		20 <sup>c</sup>
Pleuroncodes (red crab)	1.3-1.8 <sup>b</sup>	<u>Molluscan organs</u>	
	5.8 <sup>b</sup>	Clamshell	6.1 <sup>b</sup>
Crangon (shrimp)	69.1 <sup>c</sup>	Oyster shell	3.6 <sup>a</sup>
	28 <sup>d</sup>	Krill shell, deproteinized	40.2 <sup>c</sup>
Alaskan shrimp		<u>Fungi</u>	
<u>Insects</u>	2.0 <sup>b</sup>	<i>Aspergillus niger</i>	42.0 <sup>e</sup>
Periplaneta (cockroach)	18.4 <sup>c</sup>	<i>Penicillium notatum</i>	18.5 <sup>e</sup>
Blatella (cockroach)	10 <sup>b</sup>	<i>Penicillium chrysogenum</i>	20.1 <sup>e</sup>
	35 <sup>c</sup>	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	2.9 <sup>e</sup>
	5-15 <sup>b</sup>	<i>Mucor rouxii</i>	44.5 <sup>e</sup>
Colcoptera (beetle)	27-35 <sup>c</sup>	<i>Lactarius vellereus (mushroom)</i>	19.0 <sup>e</sup>
	2.1 <sup>a</sup>		
Tenebrio (beetle)	4.9 <sup>b</sup>		
	31.3 <sup>c</sup>		

<sup>a</sup> Wet body weight

<sup>b</sup> Dry body weight

<sup>c</sup> Organ weight of cuticle

<sup>d</sup> Total dry weight of cuticle

<sup>e</sup> Dry weight of the cell wall

## 2.3 โลหะหนัก

โลหะหนักที่เกิดขึ้นในธรรมชาติไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพราะจะปรากฏปริมาณเพียงเล็กน้อย แต่โลหะหนักจะมีอันตรายยิ่งขึ้นถ้ามีในปริมาณมาก อันเนื่องมาจากอุตสาหกรรม โลหะหนักที่เป็นอันตราย ได้แก่ ปรอท สารหนู ทองแดง แบริียม แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี เป็นต้น ในที่นี้จะอธิบายรายละเอียดของทองแดงและแคดเมียมที่สนใจในงานวิจัยนี้

**ทองแดง (COPPER)** (Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology (ATRDR)), 2005)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น หิน ททราย และน้ำ เป็นธาตุที่มีความจำเป็นทั้งต่อทั้งพืชและสัตว์(รวมทั้งมนุษย์) เนื่องจากมีความสำคัญต่อกระบวนการเปลี่ยนแปลงอาหารในร่างกาย เนื้อเยื่อและระบบประสาทของมนุษย์ ทองแดงสามารถปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยการทำเหมืองแร่ การเกษตร โรงงานอุตสาหกรรม และการปล่อยน้ำเสียสู่แหล่งน้ำโดยตรง ทองแดงนิยมนำมาทำผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น สายไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า ท่อ ขึ้นรูปเป็นแผ่นโลหะหรือดึงเป็นเส้น ทำโลหะผสมต่างๆ เช่น สัมฤทธิ์ ทองเหลือง แมงกานีส เป็นต้น ทองแดงปกติจะเป็นธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อยๆเนื่องจากมีความจำเป็นต่อร่างกาย หากได้รับทองแดงในปริมาณมากจะเป็นอันตรายต่อร่างกาย หากได้รับทองแดงทางการหายใจจะทำให้เกิดการกัดกร่อนและระคายเคืองในจมูก ลำคอ เยื่อปอดภายใน และจะกระจายเข้าไปทำอันตรายเส้นเลือดฝอย หากได้รับทองแดงโดยการกลืนกิน จะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียนระคายเคืองต่อระบบทางเดินอาหารอย่างรุนแรง และท้องร่วง หากได้รับทองแดงในปริมาณมากสามารถทำลายตับและไต เกิดการตายเฉพาบางส่วนในตับและไตได้ ประสาทส่วนกลางถูกรบกวน และอาจทำให้เสียชีวิต หากมีทองแดงปนเปื้อนในน้ำ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้น้ำนั้นมีรสฝาด

**แคดเมียม (CADMIUM)** (จูไรรัตน์ เกิดดอนแฝก, 2531 และ สุชาติดา ชินะจิตร์, 2533)

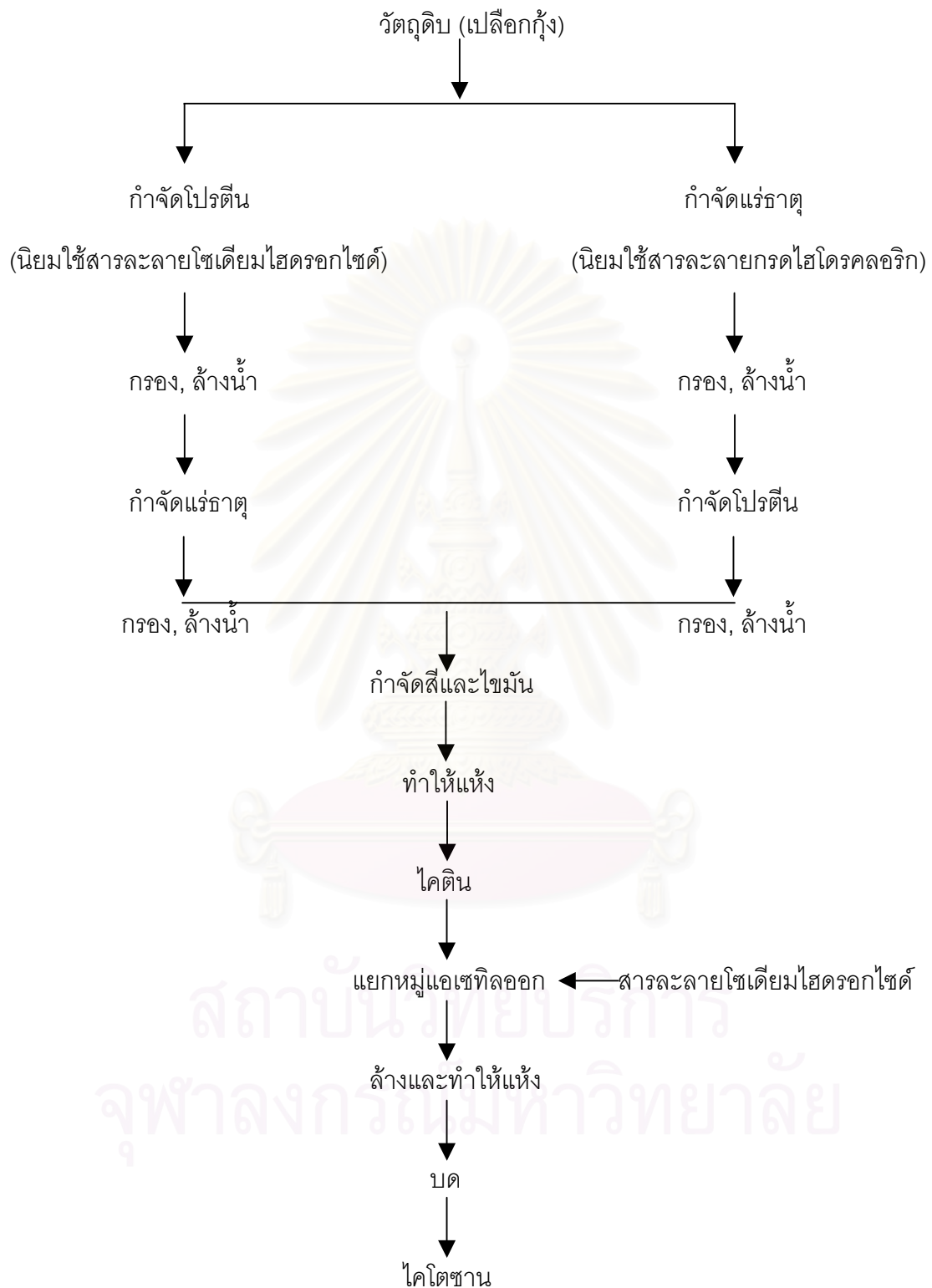
แคดเมียมเป็นหนึ่งในโลหะหนักที่เป็นพิษ ค่อนข้างหายากในธรรมชาติมักจะอยู่รวมกับกำมะถันเป็น สารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ มีสีเหลืองและมักปนอยู่ในแร่สังกะสีซัลไฟด์ เข้ามาเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งที่มีการทำเหมืองแร่สังกะสี (รวมทั้งตะกั่วทองแดง) การเผาไหม้ของทิ้งที่เป็นพวกพลาสติกและยาง โรงงานทำโลหะและชุบโลหะ อีกแหล่งที่มาของแคดเมียม คือ พบในควันบุหรี่ อาหาร ท่อน้ำ กาแฟ ชา การเผาไหม้ถ่านหิน และสัตว์น้ำ

จำพวกมีเปลือก ระดับของแคดเมียมจะพบมากในเมืองใหญ่มากกว่าในชนบท นิยมใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่ อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสม อะไหล่รถยนต์ โลหะผสมในอุตสาหกรรมเพชรพลอย แคดเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำ อาหาร และในยาสูบเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมในกระเพาะอาหาร แล้วแพร่กระจายไปที่ตับ ม้ามและลำไส้ แม้ได้รับปริมาณน้อยแต่ต่อเนื่อง แคดเมียมจะถูกสะสมไว้ที่ไต จากการให้หนูบริโภคอาหารที่มีแคดเมียมพบว่าหนูมีอาการ hyperglycemia และลดระดับของอินซูลินในตับอ่อน ทำให้การทำงานของไตผิดปกติ กรณีของคนการบริโภคอาหารหรือฝุ่นที่ปนเปื้อนแคดเมียมปริมาณสูงจะทำให้หายใจติดขัด เยื่อปอดถูกทำลาย ถุงลมโป่งพอง คลื่นไส้ อาเจียน อ่อนเพลีย เจ็บหน้าอก โลหิตจางเรื้อรัง ไตพิการ ปวดกระดูกสันหลัง แขนขา อาจเสียชีวิตได้ โรคที่เกิดจากพิษของแคดเมียมเรียกว่า โรคอิไต-อิไต (Itai Itai disease)

#### 2.4 กระบวนการผลิตโคโคซาน (เยาวพา ไหวพริบ, 2534)

กระบวนการผลิตโคโคซานต้องเริ่มต้นจากการสกัดโคโคตินก่อน กล่าวคือ การสกัดโคโคตินโดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ทั้งสองขั้นตอนนี้สามารถทำอย่างใดอย่างหนึ่งก่อนหรือหลังก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยในขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ จะเป็นการกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งนิยมใช้สารละลายไฮโดรคลอริกเจือจางอาจมีความเข้มข้นถึงร้อยละ 10 เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตให้เป็นแคลเซียมคลอไรด์ และในขั้นตอนการกำจัดโปรตีนนิยมใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Whistler and Bemiller, 1962)

กระบวนการผลิตโคโคซาน มีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียว คือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่แอเซทิล (Deacetylation) ในโคโคติน ด้วยสารละลายต่างเข้มข้น สำหรับขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการผลิตโคโคซาน แสดงในรูปที่ 2.4 (บุศรากรณ์ มหาโยธี, 2537)



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการแยกโคตินและโคโตซาน (บุศรากรณ์ มหาโยธี, 2537)

จากขั้นตอนการเตรียมโคโคซานที่แสดงไว้ข้างบนดังกล่าวนี้ จะเห็นว่ามีหลายเหตุปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของโคโคซาน (เยวพา ไหวพริบ, 2534)

ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายต่างๆที่ใช้ ในขั้นตอนกำจัดหมู่แอเซทิลออกจากโคโคติน ซึ่งจะส่งผลต่อความหนืดของสารละลายโคโคซานต่างกัน เมื่อใช้สารละลายต่างๆชนิดกันขณะเดียวกันความเข้มข้นของสารละลายต่างๆจะมีผลต่อคุณสมบัติการละลายของโคโคซาน

อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอเซทิลหากใช้อุณหภูมิในการกำจัดหมู่แอเซทิลที่สูงเกินไปจะทำให้โคโคซานเกิด (degradation) เสี่ยงภาพธรรมชาติได้

คุณภาพของโคโคตินที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโคโคซาน ซึ่งคุณภาพของโคโคตินจะขึ้นกับแหล่งและวัตถุดิบที่นำมาแยกโคโคตินและกรรมวิธีที่ใช้แยกโคโคติน

ในการใช้ประโยชน์จากโคโคตินและโคโคซาน อาจจะกล่าวได้ว่าสามารถใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยอาศัยคุณลักษณะพิเศษของมัน แต่ถ้าเทียบกับเซลลูโลสแล้วนับว่าน้อยมาก เนื่องจากยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาวิธีการทางอุตสาหกรรมให้สามารถผลิตขึ้นมาในเชิงการค้าได้ แต่เนื่องจากโคโคตินและอนุพันธ์ของมันมีประโยชน์สูง จึงมีการใช้พอลิเมอร์ชนิดนี้ใน 200 กว่าสายงานในสาขาต่างๆ ซึ่งแบ่งเป็นหัวข้อใหญ่ได้ดังนี้

### 1. อุตสาหกรรมกระดาษ

ในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษมีการใช้โคโคตินและโคโคซานเป็นสารเติมแต่ง (Additive) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กระดาษทั้งในขณะเปียกและแห้ง (Wet and Dry Strength)

### 2. วัสดุทางการแพทย์

เนื่องจากโคโคติน-โคโคซานเป็นสารธรรมชาติ ดังนั้นร่างกายมนุษย์มักจะไม่ทำการต่อต้าน นอกจากนี้ โคโคติน-โคโคซาน ยังสามารถป้องกันการติดเชื้อ ซึ่งจากข้อดีต่างๆ นี้เอง จึงสามารถนำโคโคติน โคโคซานมาใช้ในงานในส่วนของวัสดุทางการแพทย์ได้อย่างมากมาย เช่น วัสดุตกแต่งแผลไหม้เย็บแผล ตัวควบคุมการปลดปล่อยยา ผิวน้ำแข็งเทียม

### 3. อาหารและเครื่องดื่ม

โคโคติน-โคโคซานเป็นอาหารเสริม (nutritional additives) ที่ไม่ให้อพลังงานและไม่มีการดูดซึม เข้าสู่ร่างกาย เนื่องจากร่างกายคนไม่มีเอนไซม์ที่ช่วยย่อยโคโคติน-โคโคซาน ดังนั้นจึงมีการนำไปใช้ด้านนี้คือ เป็นตัวรักษาสภาพอาหาร สารเติมแต่งในอาหารเสริมควบคุมน้ำหนัก การถนอมรักษาอาหาร บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร

#### 4. การเกษตร

ไคติน-ไคโตซาน มีสมบัติพิเศษบางอย่างที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้ทางการเกษตรได้มีการพัฒนาการนำไปใช้ในทางการเกษตรอย่างมากมาย เช่น การเคลือบเมล็ดพันธุ์ ส่วนผสมในอาหารสัตว์ ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าไส้เดือน ยาฆ่าหรือยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา

#### 5. เครื่องสำอาง

ไคติน-ไคโตซานถูกใช้เป็นส่วนทำให้ข้น (thickening agent) และสารเติมแต่ง (additive) ในผลิตภัณฑ์ประเภท hair care , skin care และ oral care

#### 6. การบำบัดน้ำเสีย

ในด้านนี้จะอาศัยสมบัติความเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ และความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักของไคโตซานและไคโตซานจะทำหน้าที่เป็น chelating polymer ในการดูดซับโลหะที่เป็นพิษเนื่องจากปัจจุบันได้มีโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในประเทศไทยเป็นจำนวนมาก โรงงานเหล่านี้จึงปล่อยน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยไอออนโลหะ เช่น  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  และ  $\text{Pb}^{2+}$  มักถูกกำจัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (ยาวลักษณ์ ศรีสุวรรณ, 2547) รวมทั้งได้มีการใช้กระบวนการอื่นๆ เช่น น้ำดื่ม การบำบัดน้ำเสียจากสระว่ายน้ำ หรือจากโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย

#### 7. ด้านสิ่งทอ

นำมาขึ้นรูปเป็นเส้นใย และใช้ในการทอรวมหรือเคลือบกับเส้นใยอื่นๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติการต้านจุลชีพ ลดการเกิดกลิ่นอับขึ้น

### 2.5 การเกิดโครงร่างตาข่ายของไคโตซาน

การเกิดโครงร่างตาข่ายส่วนใหญ่จะมีผลต่อสมบัติพอลิเมอร์ คือ พอลิเมอร์ที่ไม่เกิดโครงร่างตาข่ายหรือเกิดน้อย จะมีสมบัติอ่อนนุ่ม (soft) และยืดหยุ่น (flexible) คล้ายยาง (elastomer) แต่ถ้าพอลิเมอร์นั้นเกิดโครงร่างตาข่ายมาก วัสดุนั้นจะแข็ง (rigid) (ฐิติมา มณีกุล, 2545)

สารเชื่อมขวาง (crosslinking agent) เป็นสารที่ช่วยในการเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่าย สารเชื่อมขวางของไคโตซานที่นิยมใช้ในปัจจุบันอาจจัดได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ (รัตเกล้า ภูติวรรณ, 2545) คือ

สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ได้แก่ กลูตารัลดีไฮด์ (Glutaraldehyde), ไกลออกซอล (Glyoxal), อี พิ ฮา โล ไฮ ด ริ น (Epihalohydrin), Succinaldehyde, 1,10-decanedial, Trichlorotriazine, Benzoquinone และ Bisepoxiranes ปฏิกริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กนี้จะเกิดภายในโครงสร้างของไคโตซาน โดยโมเลกุลเหล่านี้จะสามารถแพร่ผ่าน (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานได้

สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ สารประกอบที่มีหมู่ดีไฮด์มากกว่า 1 หมู่ (Polyaldehyde) เช่น Dextran Dialdehyde, Starch dialdehyde, Dialdehyde of Carageenan และ Dialdehyde of Alginic acid สารประกอบเหล่านี้เป็น Oxidized Polysaccharide Polyaldehyde ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ปฏิกริยาโครงร่างตาข่ายที่ใช้สารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของไคโตซาน สารเหล่านี้มีสายโซ่โมเลกุลยาวทำให้ไม่สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในโครงสร้างของไคโตซานได้

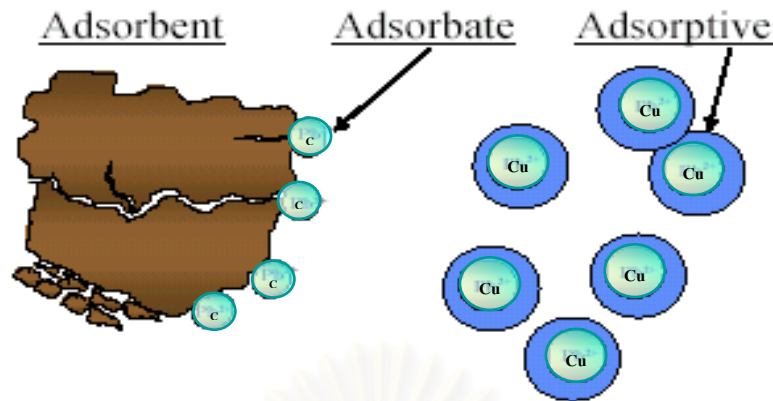
## 2.6 การดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

การดูดซับเป็นการทำให้ตัวถูกดูดซับเข้มข้นขึ้นที่ผิวของตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่พื้นผิวตัวดูดซับเนื่องมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ หรือเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ได้แก่

- |           |  |
|-----------|--|
| ระยะที่ 1 | โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ   |
| ระยะที่ 2 | โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่กระจาย (diffusion) เข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ  |
| ระยะที่ 3 | เกิดการดูดติดผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะดูดติดผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี หรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน |





รูปที่ 2.5 ลักษณะของ ตัวดูดซับ, ตัวถูกดูดซับ และโมเลกุลหรือไอออนที่อยู่ในสารละลาย  
(ที่มา: <http://soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf>)

### 2.6.1 ลักษณะการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งมีความมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ดังนั้นตัวถูกดูดซับจะยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับ ถ้าตัวดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของตัวดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของระบบนั้นก็ตาม ปฏิกิริยาการนี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติ จะให้ความร้อนออกมาเล็กน้อยแต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรืออุณหภูมิลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง ทำให้ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่า การคายการดูดซับ (desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (reversible) การดูดซับนี้สารถูกดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี การดูดซับทางกายภาพบางครั้งเรียกว่า การดูดซับแบบวานเดอร์วาลส์ (van der waal's adsorption) แรงดึงดูดของการดูดซับทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waal's force) รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตยับริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ

แรงแวนเดอร์วาลส์ อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้ว สามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อน ๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อน ๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะกระทำได้ง่ายซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่าง ๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้

1. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม
2. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption or chemisorption) เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพทุกประการ โดยที่จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ สร้างสารประกอบระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของตัวดูดซับลดลง ซึ่งไม่ขึ้นกับความดันมากนักและดูดซับตัวถูกดูดซับไว้ได้ในปริมาณน้อยต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีบนพื้นผิวจึงเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวบางแห่งเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นได้บนพื้นผิวทั้งหมด ปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิปกติองค์ประกอบบางชนิดจะไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ แรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) ในช่วงสั้น ๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

แรงทางเคมี เป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่าง ๆ เช่น คอลลอยด์ดินเหนียว เนื่องจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะดังนี้

1. เป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์

2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

### 2.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541)

ก. **ธรรมชาติของสารดูดซับ (nature of the adsorption)** โดยเฉพาะพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (surface area and pore structure) และขนาดของตัวดูดซับในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุน

พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวของสารดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

ในกรณีที่สารดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลงซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมาก ๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดวัตถุ

ข. **ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (nature of the adsorbate)** ได้แก่ความสามารถในการละลาย น้ำหนักและขนาดของโมเลกุล และความมีขั้วของโมเลกุล (polarity)

ตัวถูกดูดซับที่มีความสามารถในการละลายสูงจะถูกดูดซับได้น้อย เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะระหว่างตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่นถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (polarity) เพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น



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

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้ถูกนำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวกับการดูดซับด้วยดินคือสมการแลงเมียร์ (Langmuir Equation) และสมการฟรุนดลิช (Freundlich Equation)

### 2.6.3.1 สมการแลงเมียร์ (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541 และ Albers, 2003)

สมการของแลงเมียร์ ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1918 เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิว และถูกประยุกต์ใช้กับดินครั้งแรกโดย Fride และ Shapiro ในปี ค.ศ. 1956 และ Olsen และ Watanabe ในปี ค.ศ. 1957 เพื่ออธิบายการดูดซับฟอสเฟตบนดิน ต่อมาจึงมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในการอธิบายการดูดซับบนผิวของคอลลอยด์ สมการของแลงเมียร์ใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำเช่นเดียวกับสมการของฟรุนดลิช

สมมติฐานของสมการแลงเมียร์

1. การดูดซับจะเกิดบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน
2. พื้นที่นั้น ๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (monolayer)
3. จะไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุก ๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมมติฐานเหล่านี้ส่วนใหญ่จะไม่นำมาใช้อธิบายการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น heterogeneous เช่น ดิน เพราะสมมติฐานของสมการแลงเมียร์ จะใช้ได้กับการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นผิวเป็น homogeneous สมการแลงเมียร์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$q_e = \frac{x}{m} = \frac{KQ^0C_e}{1 + KC_e} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $x$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)

m	คือ	ปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้ (มิลลิกรัม)
$C_e$	คือ	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
$Q^0$	คือ	ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน)
K	คือ	ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ bonding strength หรือเป็นค่าคงที่ของความร้อนของการดูดซับ

จากสมการของแลงเมียร์ สามารถเปลี่ยนแปลงให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\left(\frac{1}{x/m}\right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0} \left(\frac{1}{C_e}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้  $\left(\frac{1}{x/m}\right)$  เป็นแกน y และ  $\left(\frac{1}{C_e}\right)$  เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{KQ^0}$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{Q^0}$

### 2.6.3.2 สมการฟรุนดลิช (ธีรวิทย์ ทับทอง, 2541 และ Albers, 2003)

สมการฟรุนดลิชถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซและตัวถูกละลายในสารละลาย เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม (logarithmic) สามารถแสดงได้ดังสมการ

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

เมื่อ	K	คือ	ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ
	n	คือ	ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตรต่อกรัม)

จากสมการของฟรุนดลิช สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (2.4)$$

เมื่อนำค่า  $\log\left(\frac{x}{m}\right)$  กับ  $\log(C_e)$  มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้  $\log\left(\frac{x}{m}\right)$  เป็นแกน y และ  $\log(C_e)$  เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K$

## 2.7 การดูดซับแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode)

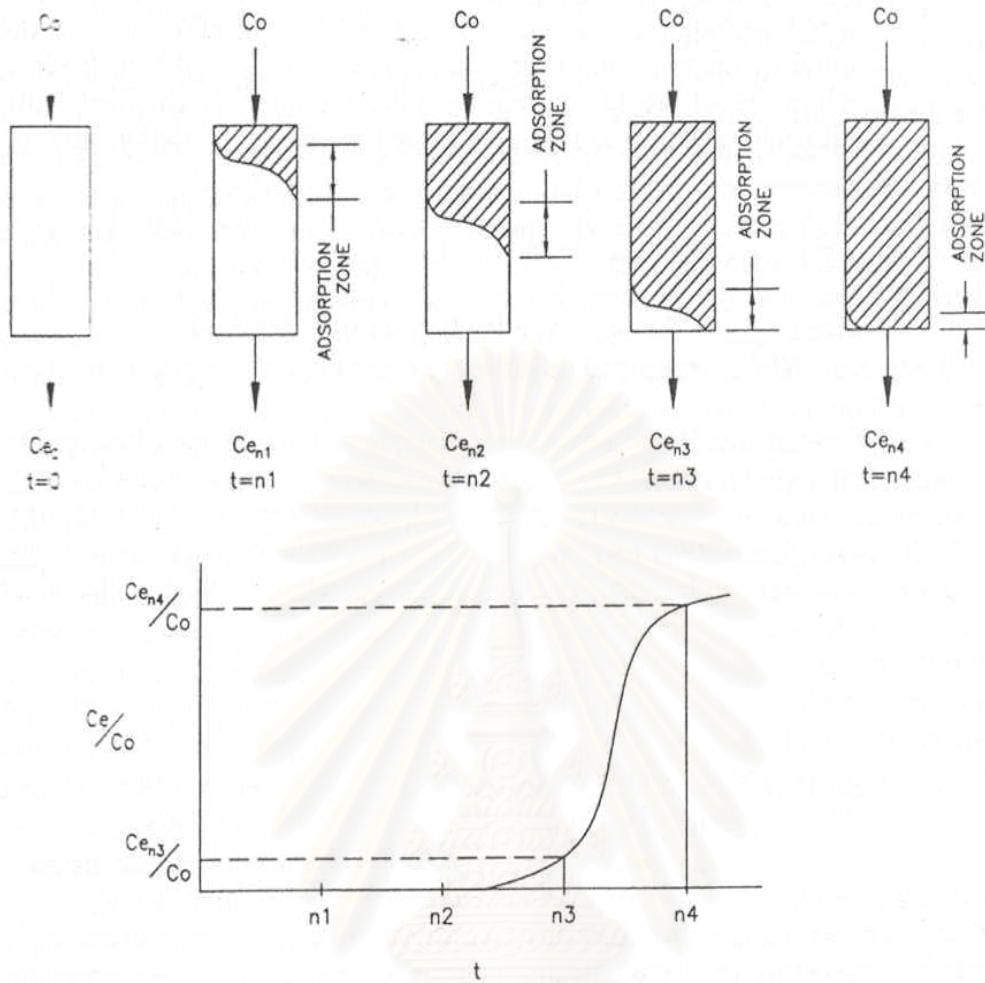
ในการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวที่มีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง

### 2.7.1 ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

เมื่อน้ำที่มีสารที่ต้องการดูดซับปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ขอบเขตการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องและสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารถูกดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของสารถูกดูดซับ และลักษณะของการดูดซับ

### 2.7.2 ลักษณะเบรคทรูจ์ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทรูจ์เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่องระหว่างความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังรูปที่ 2.6 แสดงรูปทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทรูจ์ จากรูปที่เวลาเริ่มต้นตัวถูกดูดซับยังไม่เกิดการดูดซับ เมื่อเวลา  $t=n1$  น้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณสารดูดซับต่ำ สารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยตัวดูดซับในชั้นต้นๆ เมื่อของเหลวไหลผ่านปริมาณมากขึ้น เวลา  $t=n2$  และ  $t=n3$  ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งเวลา  $t=n4$  ชั้นของตัวดูดซับใกล้หมดสภาพปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาเข้า



รูปที่ 2.6 เส้นโค้งเบรคทROUGH ในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Roberts, 1976)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิตติมา มณีกุล (2545) ได้ทำการศึกษาการเตรียมเม็ดโคโตซานเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับสีย้อม และทำการพัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ในการเตรียมเม็ดโคโตซานใหม่ ทำให้สามารถเตรียมได้มากขึ้น มีขนาดเท่ากัน และยังสามารถเตรียมเม็ดโคโตซานได้หลายขนาดมากขึ้นด้วย และพบว่าเม็ดโคโตซานที่มีขนาดเล็กสามารถดูดซับได้ดีกว่าเม็ดโคโตซานที่มีขนาดใหญ่ และเม็ดโคโตซานที่ทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางจะสามารถดูดซับได้ดีขึ้น นอกจากนี้การนำเม็ดโคโตซานมาทำให้แห้งในสถานะของแข็ง (Freeze dry) แล้วบดจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีขึ้นอีกด้วย การดูดซับของเม็ดโคโตซานเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 10 ชั่วโมง ซึ่งสมบัติการดูดซับที่สมดุลสอดคล้องกันโดยเม็ดโคโตซานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร สามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 345 มิลลิกรัมต่อกรัมโคโตซาน และจากการตรวจสอบปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างโคโตซานกับกลูตารัล



ดีไฮด์ พบว่าไคโตซานสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์แล้วเปลี่ยนหมู่เอมีน (amine) ของไคโตซานเป็นหมู่อิมีน (imine)

เยาวลักษณ์ ศรีสุวรรณ และคณะ (2547) ศึกษาการตกตะกอนเพื่อกำจัดโลหะหนักในกากของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี ไอออนโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ แคดเมียม โครเมียม แคดเมียม และตะกั่ว ในกากของเสียทางเคมี โดยใช้วิธีเฟอไรท์และวิธีซิลิเกต ตัวแปรที่ศึกษาคือ ปริมาณของสารละลายที่ใช้ตกตะกอน พีเอช อุณหภูมิ และเวลาในการคนสารละลาย พบว่า ตะกอนเฟอไรท์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกากของเสียปริมาณ 100 มิลลิลิตร และเฟอรัสซัลเฟต 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 60 มิลลิลิตร ที่พีเอช 9.5-10.5 ควบคุมอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และเวลาในการคนสารละลาย 120 นาที จะให้ผลการทดลองที่ดีโดยมีค่าความหนาแน่นสูง อยู่ในช่วง 7.58-8.09 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และตะกอนเฟอไรท์ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กและสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุแม่เหล็กได้ สภาวะสำหรับการตกตะกอนโลหะหนักจากกากสารละลายด้วยวิธี ซิลิเกต คือ ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตเข้มข้น 10 มิลลิลิตร คนสารละลาย 15 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารละลายแห้งที่อุณหภูมิห้อง และสามารถนำไปกำจัดต่อโดยการฝังกลบในหลุมต่อไป

Liang และคณะ (1997) ได้ศึกษาผลของสารละลายต่าง อุณหภูมิ และอัตราส่วนของสารละลายต่างต่อไคตินในขั้นตอนการผลิตไคโตซาน โดยใช้สารละลายต่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแปรค่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 แปรค่าอุณหภูมิจาก 70 - 150 องศาเซลเซียส และแปรค่าปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของไคติน จาก 5 - 45 มิลลิลิตร พบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 60 อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไคติน 26 มิลลิลิตรทำให้ได้ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีทิลสูงสุด ระดับการกำจัดหมู่แอสเททิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิหรือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น และยังพบว่าไคโตซานที่มีค่าระดับการกำจัดหมู่แอสเททิลแตกต่างกันนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้ว แหล่งที่มาของเปลือกกุ้ง ชนิดของกุ้ง และไคตินที่แตกต่างกัน มีผลต่อค่าระดับการกำจัดหมู่แอสเททิลด้วย

Feng และคณะ (2000) ศึกษาความสามารถในการดูดซับของโลหะหนักและสีย้อมโดยใช้เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จากของเสียจากการประมง (fishery wastes) ตัวแปรที่ศึกษา คือ ชนิดของไคโตซาน (เม็ด, เกล็ด) และชนิดของของเสียจากการประมง (เปลือกกุ้ง,

เปลือกกุ้งมังกร, เปลือกปู) พบว่า เมื่อนำไคตินและไคโตซานไปวัดค่าพื้นที่ผิว (Surface area) โดยใช้ BET surface area method เกล็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานมีพื้นที่ผิว 4-6 และ 30-40 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของไคโตซานที่ได้จาก เปลือกปู เปลือกกุ้งมังกร และเปลือกกุ้ง จะมีค่าลดลงตามลำดับ (เปลือกปู > เปลือกกุ้งมังกร > เปลือกกุ้ง) เป็นผลให้ไคโตซานเม็ดมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่าไคโตซานเกล็ด และไคโตซานเม็ดที่เตรียมได้จากเปลือกปูจะมีประสิทธิภาพมากกว่าไคโตซานเม็ดชนิดอื่น ๆ ทั้งการดูดซับไอออนทองแดงและการดูดซับสีย้อมชนิด RR222

Schmuhi และคณะ (2001) ได้ศึกษาการใช้ไคโตซานในการดูดซับ Cu(II) และ Cr(VI) โดยไคโตซานที่ใช้มีทั้งที่ทำกรเชื่อมขวางและไม่ได้ทำกรเชื่อมขวาง ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก พีเอชของสารละลาย และรอบการกวน โลหะหนักที่ใช้มีความเข้มข้นตั้งแต่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จนถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชระหว่าง 2 ถึง 11 รอบการกวนที่ใช้คือ 200 รอบต่อนาที 400 รอบต่อนาที และ 600 รอบต่อนาที สารเชื่อมขวางที่ใช้คือ อีพิสโกลไฮดรินเข้มข้น 0.01 โมลาร์ พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 และความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อพีเอชเปลี่ยนไป รอบการกวนไม่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ เมื่อทำการเชื่อมขวางไคโตซานด้วยอีพิสโกลไฮดรินทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับลดลงซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักถูกใช้ไปในการเชื่อมขวาง ไคโตซานที่ไม่ได้ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดซับได้ 78 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน และไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางสามารถดูดซับได้ 50 มิลลิกรัมต่อกรัมไคโตซาน การดูดซับไอออนทองแดงและโครเมียมไอออนสามารถอธิบายได้โดยใช้ Freundlich isotherm และ แลงเมียร์ isotherm ตามลำดับ

Wan Ngah และคณะ (2002) ได้ศึกษาการจัดไอออนทองแดงจากสารละลายโดยใช้เม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ ตัวแปรที่ศึกษา ความเข้มข้นของสารละลายทองแดง ชนิดของสารเชื่อมขวาง ค่าพีเอช อัตราการกวน คาบการกวน สารเชื่อมขวางที่ใช้คือ กลูตาไรลดีไฮด์ เอพิคลอโรไฮดริน เอทิลีนไกลคอลไดกลีซีดีลอีเทอร์ แปรค่าพีเอชตั้งแต่ 1-6 ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงอยู่ในช่วง 0-14 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าไคโตซานที่ไม่ได้ทำการเชื่อมขวางจะละลายในกรดแอสติกแต่เมื่อทำการเชื่อมขวางแล้วทำให้ไคโตซานที่ได้ไม่ละลายในกรดแอสติกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะสารเชื่อมขวางจะเข้าไปช่วยเสริมให้พันธะโควาเลนต์ในไคโตซานแข็งแรงขึ้นและช่วยทำให้ไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางมีร้อยละของการบวมในกรดและเบสลดลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นในการเชื่อมขวางเพื่อควมมีเสถียรภาพทางเคมี รวมทั้งการที่ไคโตซานที่ผ่านการทำการเชื่อมขวางมีร้อยละของการบวมน้อย ๆ ทำให้เหมาะกับการที่จะ

นำไปใช้ในระบบต่อเนื่อง (คอลัมน์) และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับปริมาณของทองแดงที่ดูดซับได้ พบว่าเมื่อค่าพีเอช เพิ่มขึ้น(มีความเป็นด่างมากขึ้น) ทำให้สามารถดูดซับทองแดงได้มากขึ้น สำหรับเวลาในการกวนพบว่า การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการกวนมากขึ้น จนถึงสมดุลโดยเม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยกลูตาร์ดีไฮด์และเอพิคลอโรไฮดรินใช้เวลา 60 นาทีในการเข้าสู่สมดุล ส่วนเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางด้วยเอทิลีนไกลคอลไดกลีซีดีลอีเทอร์ใช้เวลา 90 นาทีในการเข้าสู่สมดุล และยังพบว่า เม็ดไคโตซานที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวางดูดซับได้ดีกว่าเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวาง และการดูดซับของทองแดงโดยเม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางสามารถอธิบายได้ด้วยการดูดซับแบบอุณหภูมิกึ่งของแลงเมียร์ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาคายการดูดซับของเม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางโดยใช้ EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) พบว่าไคโตซานที่ไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวางจะละลายเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย EDTA มีค่ามาก แต่ไคโตซานที่ผ่านการเชื่อมขวางจะสามารถคายการดูดซับได้เพิ่มขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ก. เปลือกกุ้งกุลาดำ

ข. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง (สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็น Analytical reagent)

ชื่อสารเคมี	บริษัท
กรดแอซิดิก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ )	BHD
อะซีโตน ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ )	Lab-Scan
แคดเมียมซัลเฟต ( $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )	BHD
แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	Univar
กรดคลอโรแอซิดิก ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{ClO}_2$ )	Fluka
คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )	BHD
เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	Mallinckrodt
เอธิลีนไดเอมีน ( $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$ )	Fluka
กลูตารัลดีไฮด์	BHD
กรดไฮโดรคลอริก (HCl)	BHD
กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ )	BHD
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)	BHD
สารละลายมาตรฐานแคดเมียม	Lab-Scan
สารละลายมาตรฐานทองแดง	Fisher Chemicals

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น
ตู้อบ (Hot air oven)	TSF
แผ่นความร้อน (Hot plate)	SLR
เครื่องกวนปรับความเร็วรอบ	RW20N
เครื่องชั่งน้ำหนัก	HF4000
เครื่องเขย่า (Shaker)	GFL3020
เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)	CG840
ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)	A-3S
Perisatic pump	7520-47
เครื่องจ่ายไฟกระแสตรง (DC power supply)	EE-1243-3
เทอร์โมมิเตอร์ช่วงอุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส	-
เครื่องแกว่งอื่นๆในห้องปฏิบัติการ	-

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์	รุ่น	สถานที่
Atomic Absorption Spectrometer	PerkinElmer AAnalyst 300	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาฯ
Energy dispersive X-ray spectroscopy	JSM-5800LV	ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Fourier Transform Infrared Spectrophotometer	FT-IR 1760X	ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Nuclear Magnetic Resonance	DTX300	MTEC
Scanning Electron Microscope	JSM-5800LV	ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
Zeta meter	System 3.0+	วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาฯ
BET surface area	AUTOSORB-1	ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

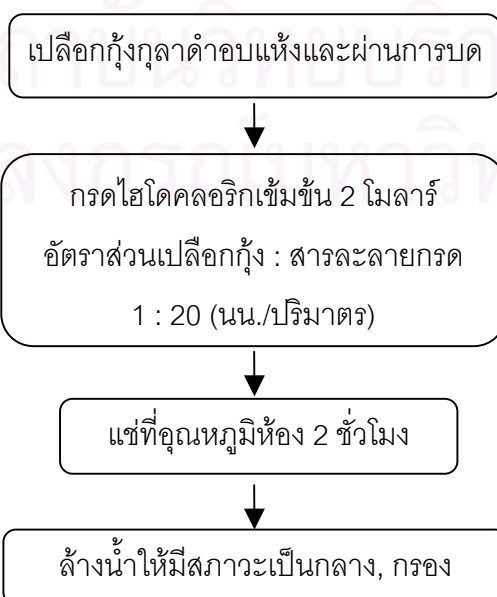
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมเม็ดโคโตซานในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยในขั้นแรกศึกษาการสกัดโคโตซานจากเปลือกกุ้งกุลาดำและเตรียมโคโตซานในรูปแบบต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาค่าพีเอชและภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมในการทดลองแบบกะ และศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำเสียจริงในการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยข้อมูลที่น่าสนใจจะเป็นค่าเฉลี่ยจากผลของการทำการทดลองจำนวน 2 ครั้ง และแต่ละข้อมูลการวัดปริมาณไอออนโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอชันสเปกโตรมิเตอร์เป็นข้อมูลที่ได้จากค่าเฉลี่ยที่ทำการวัดจำนวน 3 ครั้งและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ดังแสดงตัวอย่างในภาคผนวก ข

#### 3.4.1 การสกัดโคตินและโคโตซานจากเปลือกกุ้งกุลาดำ

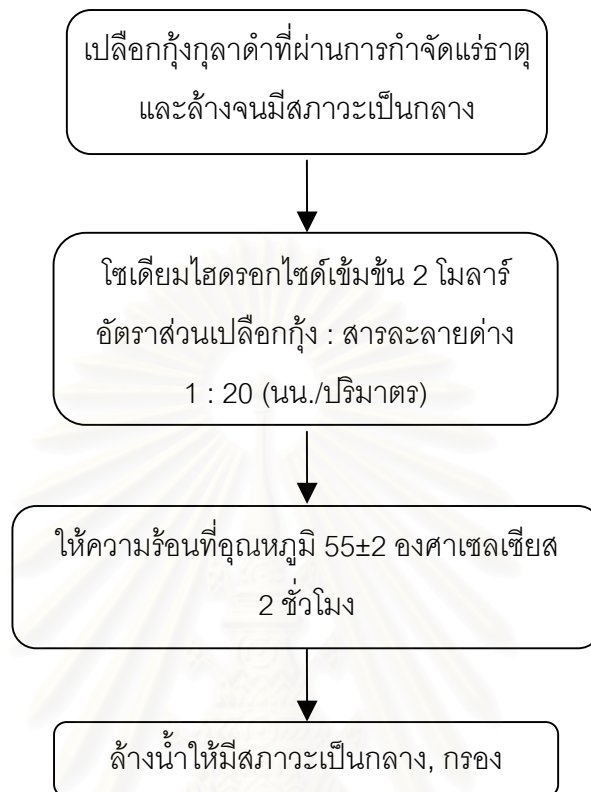
การสกัดโคตินจากเปลือกกุ้งกุลาดำในงานวิจัยนี้จะใช้การสกัดตามวิธีของเยาวภา (เยาวพา ไหวพริบ, 2534) และทำการสกัดโคโตซานโดยใช้โคตินทำปฏิกิริยากับสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิคงที่ที่  $100 \pm 5$  องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

##### การสกัดโคติน

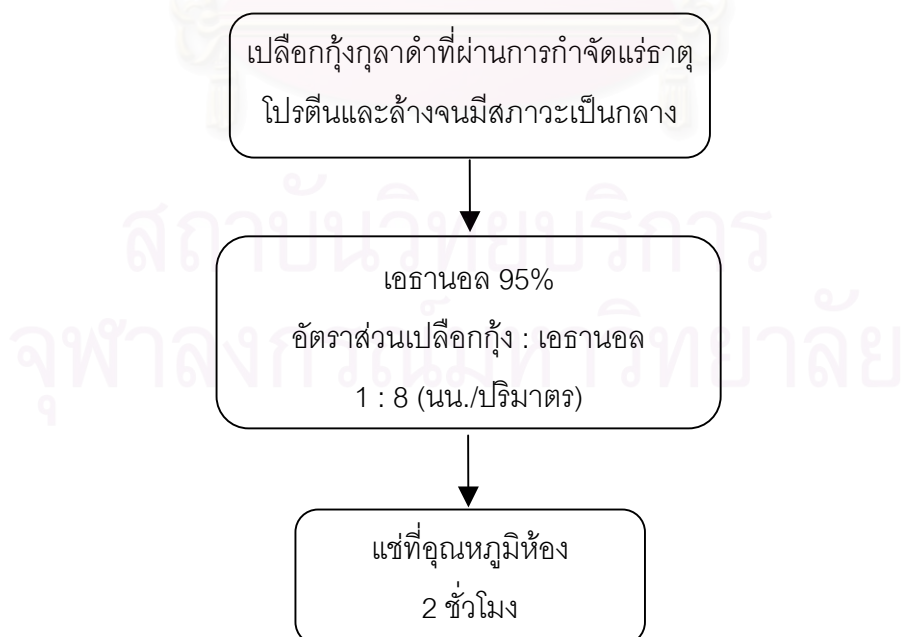
1. ล้างเปลือกกุ้งด้วยน้ำประปา ทิ้งให้สะเด็ดน้ำ แล้วอบเปลือกกุ้งที่อุณหภูมิ  $100 \pm 10$  องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง
2. บดด้วยเครื่องบด ชั่งน้ำหนัก
3. กำจัดแร่ธาตุ ดังแผนภาพ



## 4. กำจัดโปรตีน



## 5. กำจัดสีและไขมัน



6. อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลา 1 ชั่วโมง สารที่ได้คือ ไคติน

### การสกัดไคโตซาน

1. นำไคตินที่ได้แช่ลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (NaOH) 40% และ 60% (นน./นน.) อัตราส่วนระหว่างไคตินและสารละลายต่างเท่ากับ 1:20 (นน./ปริมาตร) ที่อุณหภูมิ 100±5 องศาเซลเซียส เวลา 2 และ 4 ชั่วโมง ที่สภาวะบรรยากาศปกติ สารที่ได้ คือไคโตซาน ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลแตกต่างกัน
2. นำไคโตซานที่ได้วิเคราะห์หาระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิล

ไคโตซานที่ใช้ในการทดลองจะมีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลต่างๆ โดยกำหนดสัญลักษณ์และช่วงของระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลดังนี้ ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 91-95% ใช้สัญลักษณ์ I ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 85-90% ใช้สัญลักษณ์ II และไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 76-84% ใช้สัญลักษณ์ III

#### 3.4.2 การเตรียมเม็ดไคโตซาน (Chitosan beads)

การเตรียมเม็ดไคโตซานต้องเตรียมสารละลายไคโตซานก่อน โดยนำเกล็ดไคโตซาน 1 กรัม ละลายด้วยสารละลายกรดแอสเซติก 50 มิลลิลิตร กวนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง กรองด้วยผ้าขาวบางแล้วตั้งทิ้งไว้จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่ในสารละลาย นำสารละลายไคโตซานที่ได้หยดลงในสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเอทานอลโดยใช้อัตราส่วน 3:5 (กรัม: มิลลิลิตร) (Juang et al, 2002) เม็ดไคโตซานที่ได้นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่น

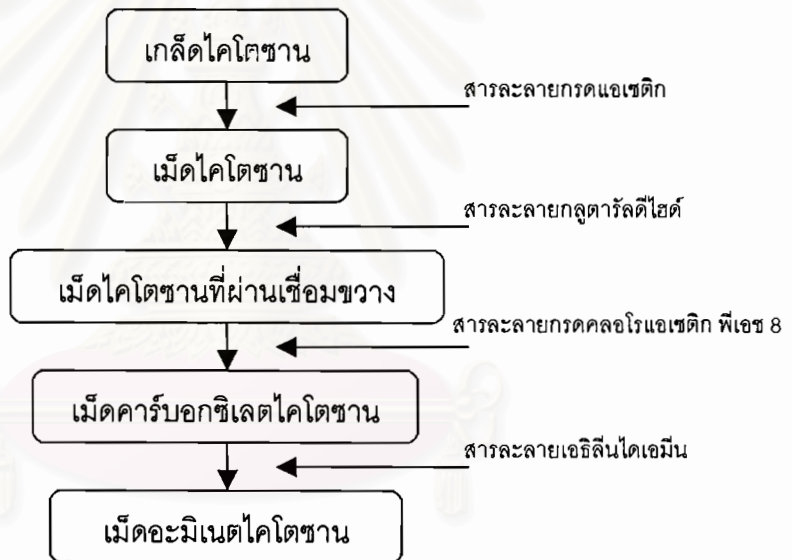
#### 3.4.3 การเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวาง (Crosslink chitosan beads)

นำเม็ดไคโตซานที่เตรียมได้มาทำการเชื่อมขวางกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ด้วยอัตราส่วนของ สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ต่อเม็ดไคโตซานประมาณ 15:1 (มิลลิลิตร/กรัม) (Tzu and Gregory, 1995) แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่น



### 3.4.4 การเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (Chitosan modified beads) (Choong and Wolfgang, 2003)

ในงานวิจัยนี้ไคโตซานที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีจะมี 2 ชนิด คือ Carboxylated chitosan และ Aminated chitosan โดยนำเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางแช่ใน 0.5 โมลาร์ของสารละลายกรดคลอโรแอซติก (Chloroacetic acid) ปรับพีเอชเป็น 8 แช่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จะได้ คือ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซาน แบ่งเม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซาน (Carboxylate chitosan beads) ที่ได้นำมาแช่ใน 1.0 โมลาร์ของสารละลายเอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) 100 มิลลิลิตร แช่เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เม็ดอะมิเนตไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีทั้งสองชนิด กรองและล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อความสะดวกจึงเขียนขั้นตอนการเตรียมเม็ดไคโตซานชนิดต่างๆดังแผนภาพในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดไคโตซานชนิดต่างๆ

### 3.5 การทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง (Batch and Continuous Mode)

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองเป็นสองส่วน คือ การทดลองแบบกะ และการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยในส่วนของ การทดลองแบบกะจะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ของสารละลายโลหะหนักสองชนิด คือ ทองแดงและแคดเมียม และใช้ไคโตซาน 5 แบบ คือ เกล็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตวานที่ผ่านการเชื่อมขวางกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซานและเม็ดอะมิเนตไคโตซาน ที่เตรียมได้ในขั้นตอนข้อที่ 3.4.2 ถึง 3.4.4 การทดลองแบบต่อเนื่อง

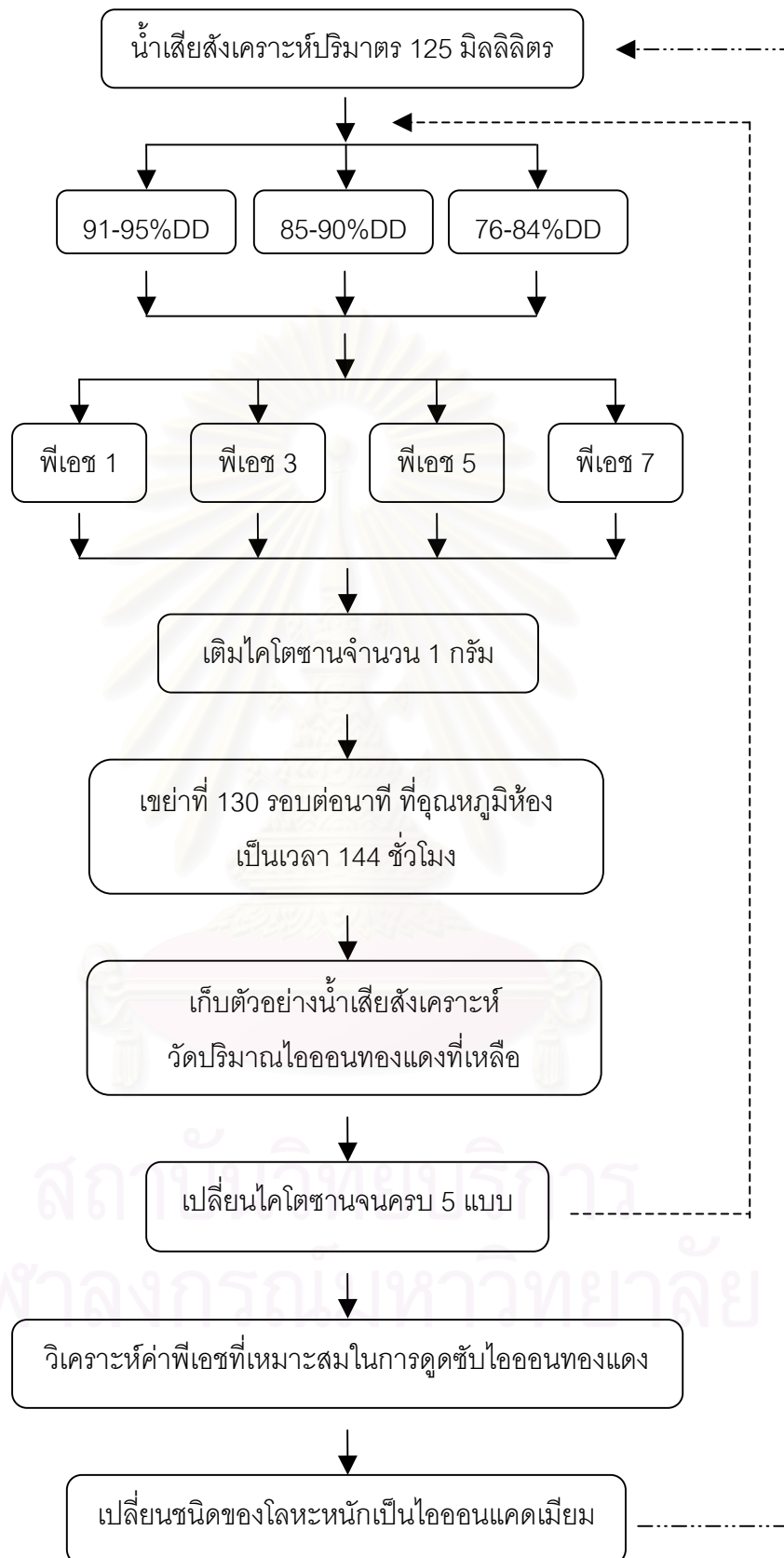
จะใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีทองแดงปนเปื้อนอยู่ แปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียที่ความสูงของเบตนิ่ง (Fixed bed) คงที่ที่ 8.5 เซนติเมตร ใช้เวลาในการศึกษาการดูดซับ 12 ชั่วโมง เป็นเวลาที่โคโตซานอิมตัว ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงด้วยสารละลายกรดไนตริก และศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

### 3.5.1 การทดลองแบบกะ (Batch Mode Experiment)

#### 3.5.1.1 ศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

การศึกษาอิทธิพลของพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนทองแดง ปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 1 3 5 และ 7 สำหรับไอออนทองแดง ปรับพีเอชเป็น 1 3 5 และ 6 สำหรับไอออนแคดเมียมโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)
2. นำสารละลายไอออนทองแดงที่มีค่าพีเอชต่างๆ ปริมาตร 125 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติกเพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่า นำเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานรูปแบบต่างๆ ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดพลาสติกแต่ละใบ จำนวน 1 กรัมเท่าๆกันของโคโตซานแต่ละชนิด จากนั้นทำการเขย่าที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 144 ชั่วโมง เป็นเวลาที่โคโตซานอิมตัว
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อนำไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลือด้วยอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์
4. วิเคราะห์ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากไอออนทองแดงเป็นไอออนแคดเมียม และปรับพีเอชเป็น 1 3 5 และ 6 ตามลำดับ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.2

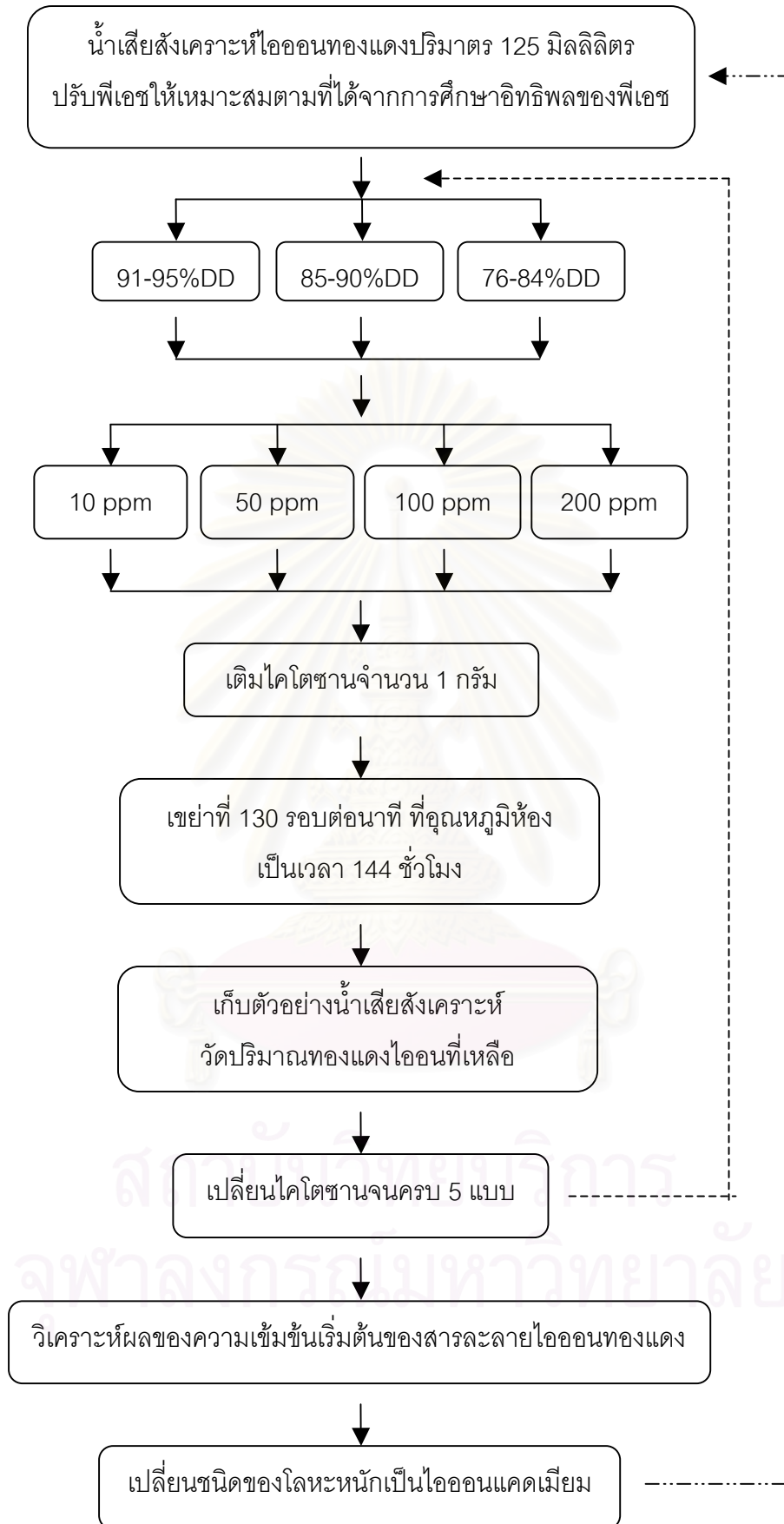


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก

### 3.5.1.2 ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับ

การศึกษากอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลองแบบกะสามารถทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนทองแดงความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 ส่วนในล้านส่วน ปรับพีเอชให้เหมาะสมตามที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของพีเอชสำหรับไอออนทองแดง
2. เตรียมสารละลายไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 50 100 และ 200 ส่วนในล้านส่วน และความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 50 100 200 500 สำหรับสารละลายไอออนแคดเมียม ปริมาตรของสารละลาย 125 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดพลาสติกเพื่อเตรียมทดสอบการดูดซับโดยใช้เครื่องเขย่า นำเกล็ดโคโคไตซานและเม็ดโคโคไตซานรูปแบบต่างๆ ที่เตรียมได้ใส่ลงในขวดพลาสติกแต่ละใบ จำนวน 1 กรัมเท่าๆกันของโคโคไตซานแต่ละชนิด จากนั้นทำการเขย่าที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 144 ชั่วโมง
3. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อนำไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลือด้วยอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์
4. วิเคราะห์ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นในการดูดซับไอออนทองแดง
5. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4 อีกครั้ง แต่เปลี่ยนจากไอออนทองแดงเป็นไอออนแคดเมียม และความเข้มข้นเริ่มต้น 10 50 100 200 500 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.3



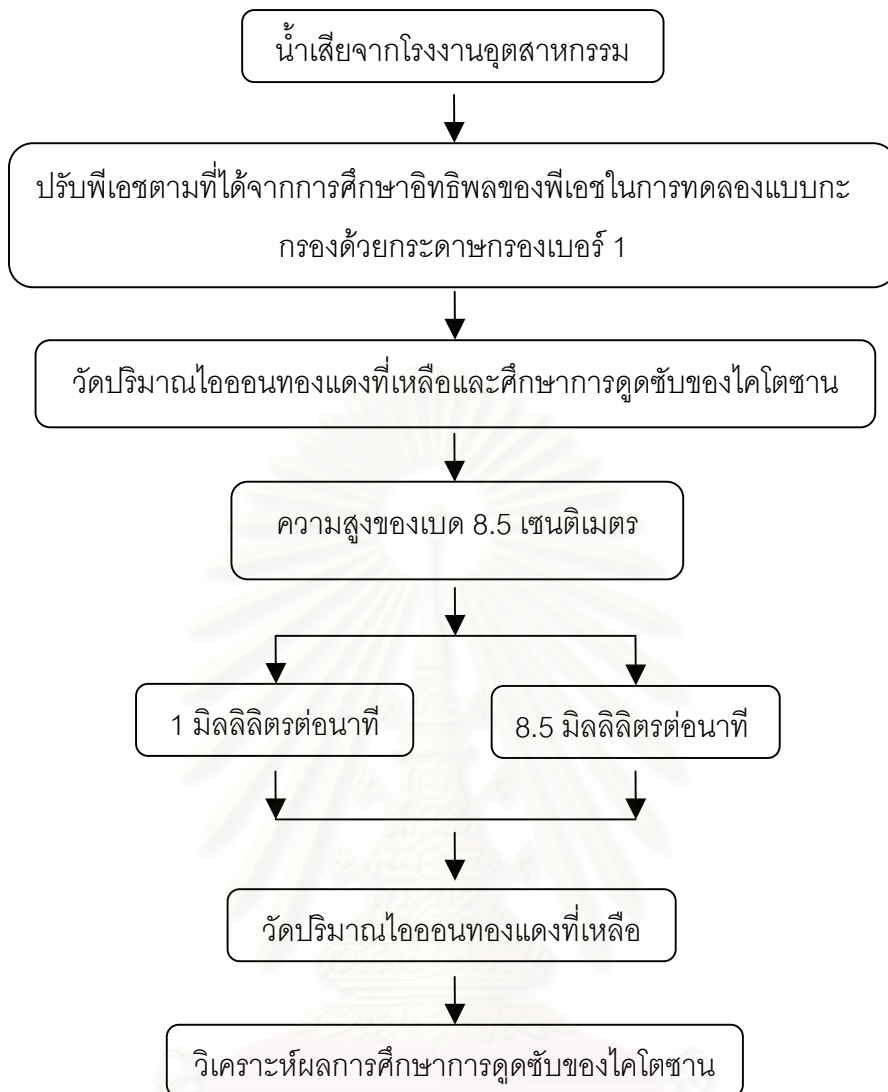
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก

### 3.5.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Mode Experiment)

การศึกษาในส่วนนี้จะใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีทองแดงปนเปื้อนอยู่ที่อัตราการไหลของน้ำเสียต่างกัน และใช้ชนิดของโคไตซานที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงมากที่สุด และศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคไตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงด้วยสารละลายกรดไนตริก ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคไตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

คอลัมน์แก้ว (Glass column) ที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องมีความสูง 20 เซนติเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร ศึกษาแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) ลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำเสียมูลักษณะเคลื่อนที่ขึ้น (up flow) จากด้านล่างของคอลัมน์แก้ว และทำการทดลองดังนี้ (แสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.4)

1. นำโคไตซานใส่คอลัมน์แก้ว ความสูงของเบดคงที่ที่ 8.5 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)
2. นำน้ำเสียจริงที่มีไอออนทองแดงปนเปื้อนอยู่ ทำการปรับพีเอชให้เหมาะสมตามที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของพีเอชในการทดลองแบบกะ จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 นำน้ำส่วนใสไปวัดปริมาณไอออนทองแดงในน้ำเสียด้วยอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่เหลือ
3. ศึกษาการดูดซับของโคไตซาน โดยแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และ 8.5 มิลลิลิตรต่อนาที
4. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับจากโคไตซาน เพื่อนำไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลือด้วยอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงแบบต่อเนื่อง

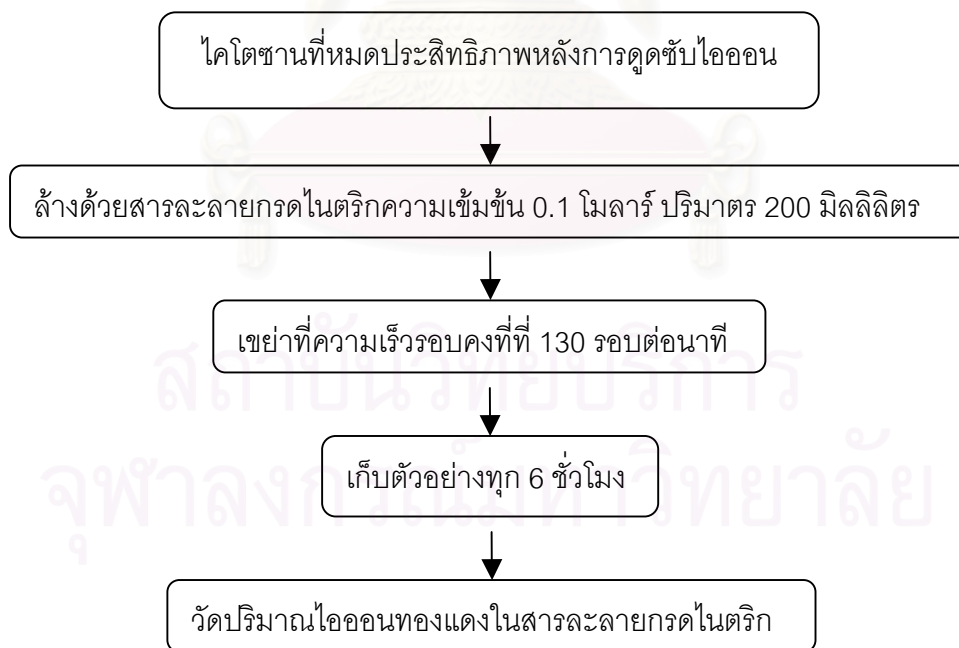


รูปที่ 3.5 คอลัมน์แก้วที่ใช้ในการทดลอง

### 3.5.3 ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดง

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียในระบบต่อเนื่อง เพื่อนำโคโตซานกลับมาใช้ในการดูดซับน้ำเสียอีกครั้ง โดยการล้างด้วยสารละลายกรดไนตริกและมีขั้นตอนดังนี้ และแสดงขั้นตอนการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานแสดงแผนภาพ ดังรูปที่ 3.6

1. นำโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสีย ใสในขวดรูปชมพู่
2. นำสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เติมลงในขวดรูปชมพู่ที่บรรจุโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับไอออนทองแดง
3. เขย่าที่ความเร็วรอบคงที่ที่ 130 รอบต่อนาที และเก็บตัวอย่างทุก 6 ชั่วโมง
4. วัดปริมาณไอออนทองแดงในสารละลายกรดไนตริกด้วยอะตอมมิคแอบซอซชันสเปกโตรมิเตอร์
5. นำโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพด้วยกรดไนตริกแล้ว ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด นำกลับไปใช้ดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำเสียอีกครั้ง โดยทำการทดลองซ้ำในหัวข้อ 3.5.2



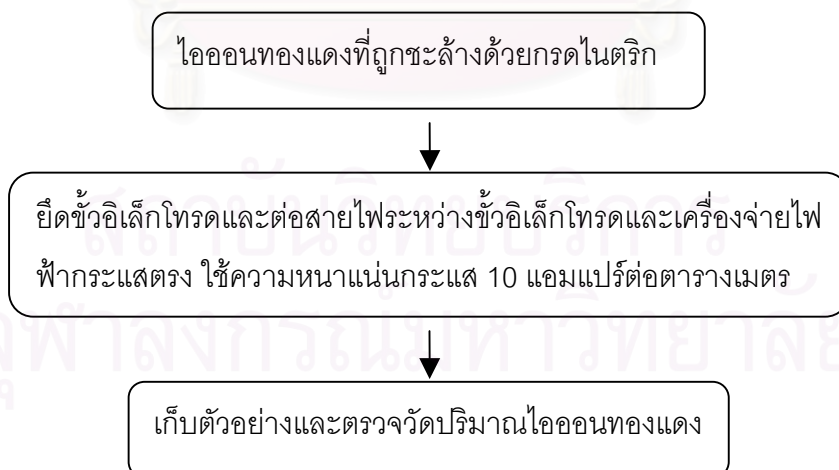
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียในระบบต่อเนื่อง



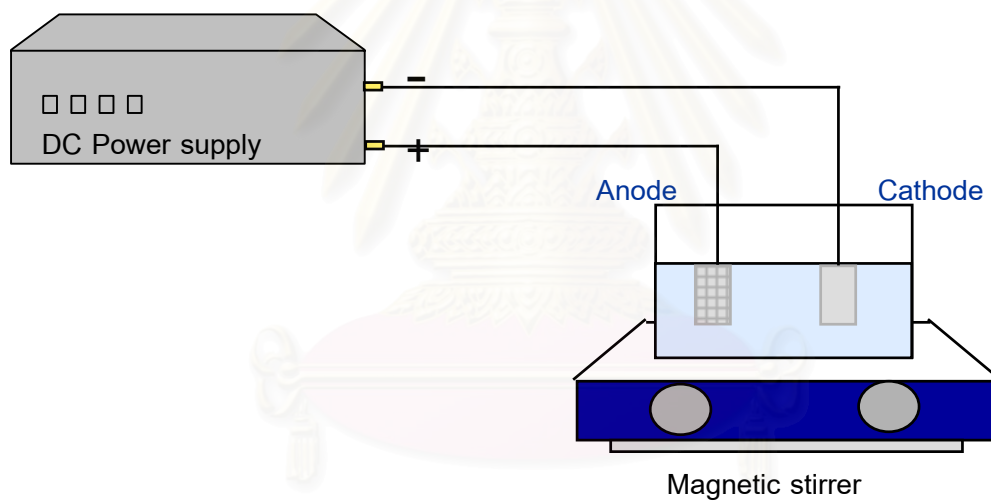
### 3.5.4 ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ไอออนทองแดงที่ได้จากการชะล้างโคโตซานด้วยสารละลายกรดไนตริก สามารถแยกออกจากสารละลายกรดไนตริกด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี โดยมีขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้คือ ขั้วแอโนด ทำจากไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ และขั้วแคโทดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ขนาด 32 ตารางเซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (หทัยทัต ชื้อสุวรรณ, 2544) การศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้ามีขั้นตอนดังนี้ แสดงแผนภาพดังรูปที่ 3.7 และแสดงการติดตั้งเครื่องมือดังรูปที่ 3.8

1. นำสารละลายไอออนทองแดงที่ได้จากการชะล้างโคโตซานด้วยกรดไนตริกเตรียมใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร ตั้งบนเครื่องกวนแม่เหล็กปรับความเร็วรอบ
2. นำขั้วอิเล็กโทรดยึดกับแท่นวาง และให้ระดับของขั้วอิเล็กโทรดอยู่ในระดับเดียวกันและจมลงในสารละลายไอออนทองแดง
3. ต่อสายไฟระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ใช้ความหนาแน่นกระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. เก็บตัวอย่างสารละลายไอออนทองแดงและตรวจวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลือ



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า



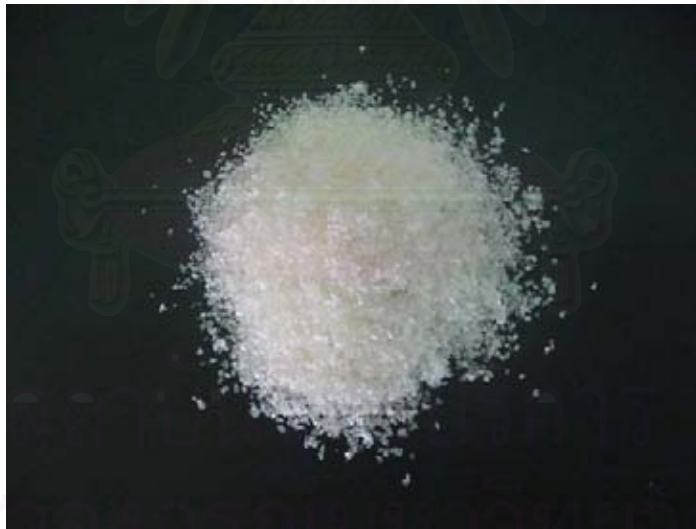
รูปที่ 3.8 การติดตั้งเครื่องมือแบบครบวงจรในขั้นตอนการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตะซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการเตรียมเกล็ดโคโตซาน เม็ดโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดโคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี

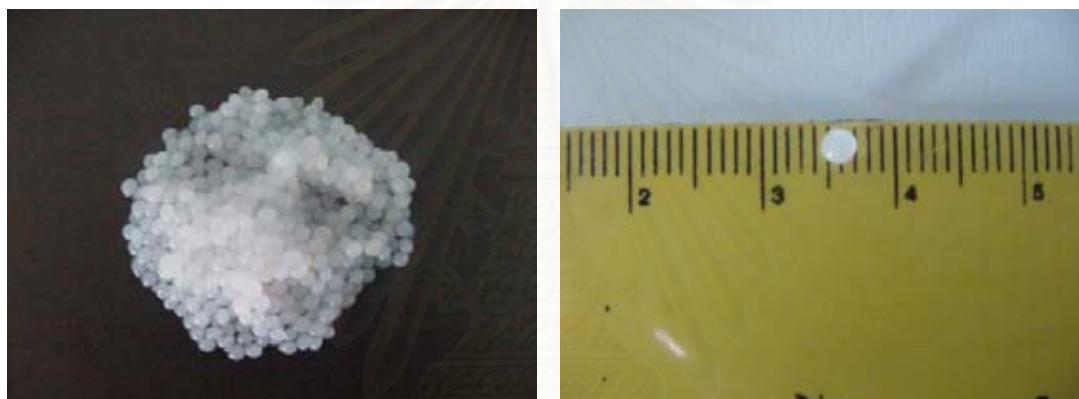
เมื่อนำเปลือกกุ้งกุลาดำที่ผ่านการอบแห้งจำนวน 50 กรัม มาเตรียมเป็นไคตินจะได้ปริมาณไคตินประมาณ 20-25 กรัม คิดเป็นร้อยละน้ำหนักของไคตินเทียบกับน้ำหนักเปลือกกุ้งกุลาดำอบแห้งจะมีค่าเท่ากับ 40-50 เมื่อนำไคตินที่ได้เตรียมเป็นโคโตซานพบว่า จะได้ปริมาณโคโตซานประมาณ 16-20 กรัม ซึ่งคิดเป็นร้อยละน้ำหนักของโคโตซานเทียบกับน้ำหนักเปลือกกุ้งกุลาดำอบแห้งจะมีค่าเท่ากับ 32-40 ตารางที่ 4.1 แสดงร้อยละผลได้ของไคตินและโคโตซานที่เตรียมได้เทียบกับน้ำหนักเปลือกกุ้งอบแห้ง โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากงานวิจัยอื่นๆ รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเกล็ดโคโตซานที่เตรียมมาจากเปลือกกุ้ง



รูปที่ 4.1 ลักษณะเกล็ดโคโตซานที่เตรียมมาจากเปลือกกุ้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการเตรียมไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้งกุลาดำ

ร้อยละผลได้เทียบกับเปลือกกุ้งอบแห้ง		ระดับการกำจัดหมู่แอสเททิล(%)	เอกสารอ้างอิง
ไคติน	ไคโตซาน		
40-50	32-40	91-95%, 85-90%, 76-84%	งานวิจัยนี้
27.82-32.78	21.58-24.28	91.97	(เยาวพา ไหวพริบ, 2534)
33.60	25.86	93-94	(เกษม สีดอกบวบ, 2543)
21.00	14.60	80.90	(Feng และคณะ, 2000)



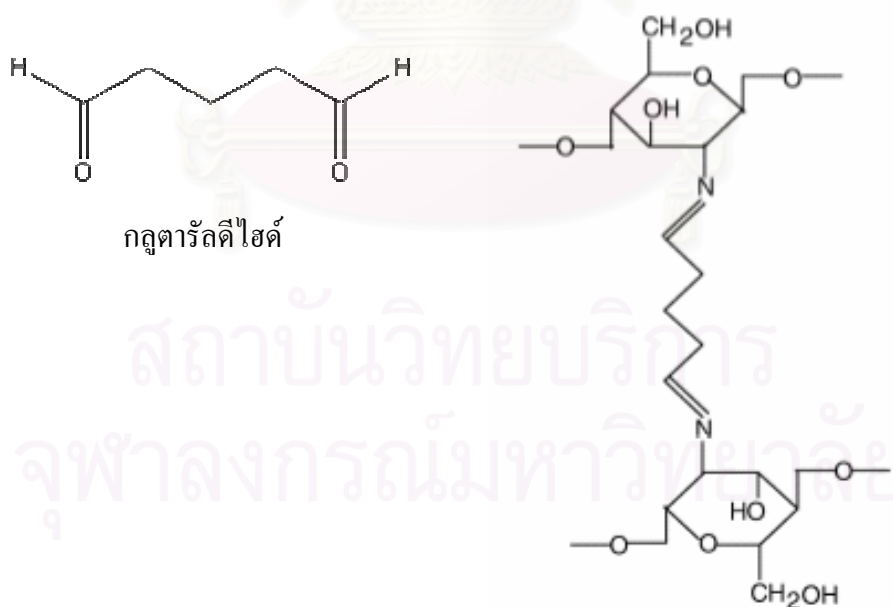
รูปที่ 4.2 ลักษณะเม็ดไคโตซานที่เตรียมมาจากเปลือกกุ้ง

ผลิตไคโตซานที่เตรียมได้จำนวน 1 กรัม จะสามารถเตรียมเป็นเม็ดไคโตซานได้ถึง 31.58 กรัม (บวมน้ำ) เม็ดไคโตซานที่เตรียมได้มีรูปร่างเป็นทรงกลม และมีสีขาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เม็ดไคโตซานที่เตรียมได้จะนำไปเตรียมเป็นเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์พบว่า เม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเม็ดไคโตซานก่อนที่ทำการเชื่อมขวาง แต่สีของเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางจะต่างกับสีของเม็ดไคโตซานก่อนทำการเชื่อมขวาง โดยสีของเม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางจะมีสีเขียวเหลือง ดังแสดงในรูป 4.3 สารละลายกลูตารัลดีไฮด์และไคโตซานที่เตรียมก่อนทำปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายจะไม่มีสีและสีขาวนวลตามลำดับ แต่เมื่อไคโตซานเกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายแล้วสีจะเปลี่ยนจากสีขาวนวลเป็นสีเขียวเหลือง เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเกี่ยวข้องกับการเกิด Chromophore ในโครงสร้างของไคโตซาน และสีที่เปลี่ยนแปลงไปของไคโตซานที่เกิดโครงร่างตาข่าย

จะขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยสีจะเข้มมากขึ้นเมื่อปริมาณสารละลายกลูตารัลดีไฮด์เพิ่มขึ้น (รัตเกล้า ภูติวรรณ, 2545) นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวาง จะมีความแข็งมากกว่าเม็ดโคโตซานก่อนทำการเชื่อมขวาง การเชื่อมขวางนี้เกิดขึ้นเนื่องจาก หมู่อัลดีไฮด์ของสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ จับกับหมู่อะมิโนของโคโตซาน (Tzu and Gregory, 2002) เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายดังแสดงในรูปที่ 4.4



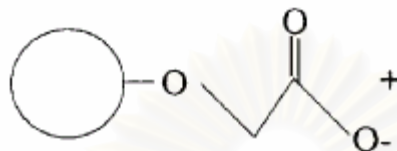
รูปที่ 4.3 รูปของโคโตซานที่เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายกับกลูตารัลดีไฮด์



รูปที่ 4.4 สูตรโครงสร้างทางเคมีของโคโตซานที่เกิดปฏิกิริยาโครงร่างตาข่ายกับกลูตารัลดีไฮด์

(Wan Ngah และคณะ, 2002)

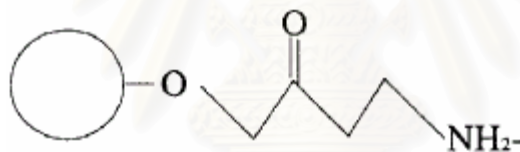
เม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางแล้วจะถูกนำไปเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมเม็ดไคโตซานที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี 2 ชนิด คือ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซาน (Carboxylated chitosan beads) และ เม็ดอะมิเนตไคโตซาน (Aminated chitosan beads) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีดังแสดงในรูปที่ 4.5a และ 4.5b ตามลำดับ



(O-OH ; the hydroxyl groups of chitosan molecule)

รูปที่ 4.5a โครงสร้างทางเคมีของการเกิดปฏิกิริยาของไคโตซานกับสารละลายกรดคลอโรแอซติก

(Choong and Wolfgang, 2003)



รูปที่ 4.5b โครงสร้างทางเคมีของการเกิดปฏิกิริยาของเม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซานกับเอธิลีนไดเอมีน

(Choong and Wolfgang, 2003)

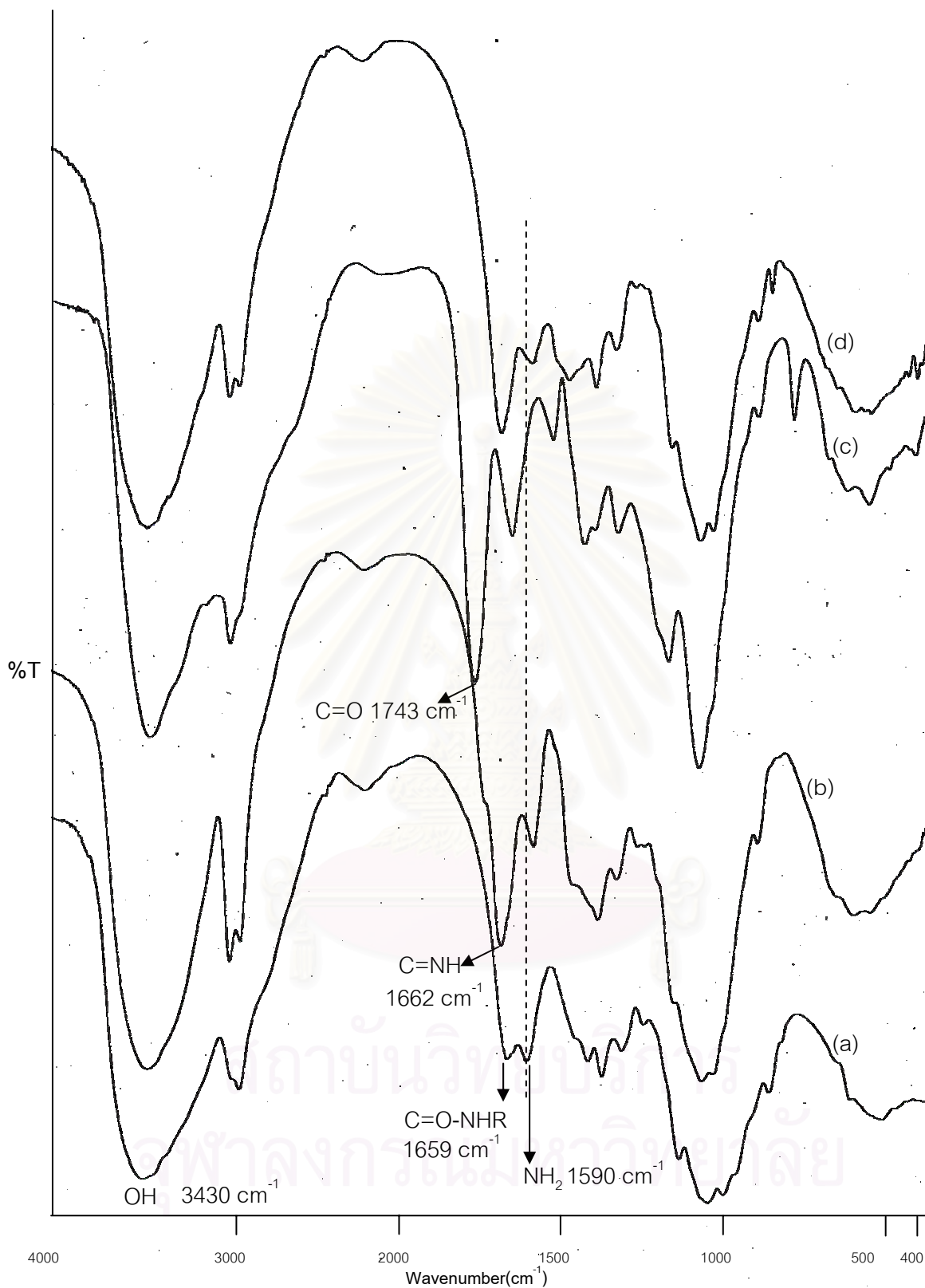
ในงานวิจัยนี้มีการเตรียมไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิลถึง 3 ระดับคือ ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิลระหว่าง 91-95% ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนไคโตซานประเภทนี้คือ I ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิลระหว่าง 85-90% ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนไคโตซานประเภทนี้คือ II และสุดท้ายเป็นไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิลระหว่าง 84-76% ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์แทนไคโตซานประเภทนี้คือ III ซึ่งระดับการกำจัดหมู่แเซทิลของไคโตซานถูกวิเคราะห์โดย NMR spectrometer (ดังแสดงในภาคผนวก ก)

ฉะนั้น เกล็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซาน เม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตาร์ลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซานและเม็ดอะมิเนตไคโตซาน ที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้แต่ละชนิด มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิล 3 ระดับ โดยจะเขียนเป็นสัญลักษณ์ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงสัญลักษณ์โคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แเซทิลต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

รูปแบบของโคโตซาน	สัญลักษณ์	ระดับการกำจัดหมู่แเซทิล		
		91-95%	85-90%	76-84%
เกล็ดโคโตซาน	F	IF	IIF	IIIF
เม็ดโคโตซาน	B	IB	IIB	IIIB
เม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตาไรลดีไฮด์	G	IG	IIG	IIIG
เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน	C	IC	IIC	IIIC
เม็ดอะมิเนตโคโตซาน	A	IA	IIA	IIIA

เพื่อยืนยันผลการเตรียมโคโตซานรูปแบบต่างๆ จึงใช้ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) วิเคราะห์หาอินฟราเรดสเปกตรัมของโคโตซานรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่า absorption band ที่สำคัญที่พบในรูป 4.6a-4.6d คือ absorption band ของ primary amine ( $-NH_2$ ) absorption band ของ hydroxyl (OH) ซึ่งแสดงความเป็นพอลิเมอร์ absorption band ของ carbonyl ( $C=O$ ) และ amide interaction ของ acetamido group ( $-NHCOCH_3$ ) จากรูป 4.6a จะเห็นว่า absorption band ของ primary amine จะพบที่เลขคลื่นในช่วง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  และ  $1650-1590\text{ cm}^{-1}$  (ปรานอม ชาวเมฆ, 2539., daimay et al., 1976) absorption band ของ hydroxyl (OH) พบที่เลขคลื่น  $3430\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งบังพืดของ primary amine ในช่วง  $3500-3300\text{ cm}^{-1}$  จึงไม่เห็นพืดของ primary amine ในช่วงนี้ absorption band ของ carbonyl ( $C=O$ ) และ amide interaction ของ acetamido group ( $-NHCOCH_3$ ) พบในช่วง  $1630-1715\text{ cm}^{-1}$  รูปที่ 4.6b เมื่อทำการเชื่อมขวางโคโตซานแล้ว absorption band ของ primary amine หายไป และเกิด absorption band ของ imine ( $-C=N-H$ ) ขึ้นในช่วง  $1600-1640\text{ cm}^{-1}$  สำหรับรูปที่ 4.6c จะมี absorption band ของ carbonyl ( $R-C=O-OR$ ) เกิดขึ้นที่  $1743\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งอาจเป็นหมู่คาร์บอนิลของกรดคลอโรแอสติก ในขั้นตอนการเตรียมเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน แต่ทั้งรูปที่ 4.9c และ 4.9d absorption band ที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากสารเคมีที่ใช้กับโคโตซานเกิดโครงสร้างที่เป็น complex จึงเป็นการยืนยันอีกทางหนึ่งว่ามีการปรับปรุงทางเคมีเกิดขึ้นทำให้โครงสร้างของโคโตซานเปลี่ยนแปลง



- (a): เม็ดโคโตซาน (b): เม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์  
 (c): เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน (d): เม็ดอะมิเนตโคโตซาน

รูปที่ 4.6 อินฟราเรดสเปกตรัมของโคโตซานรูปแบบต่างๆ



## 4.2 การละลาย (Solubility)

โคโตซานที่เตรียมได้จากข้อ 4.1 และมีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ จะถูกนำมาทดสอบสมบัติการละลายโดยใช้สารละลายกรดแอเซติก น้ำกลั่น และสารละลายไซเตียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งให้ผลดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงความสามารถในการละลายของโคโตซานรูปแบบต่างๆ

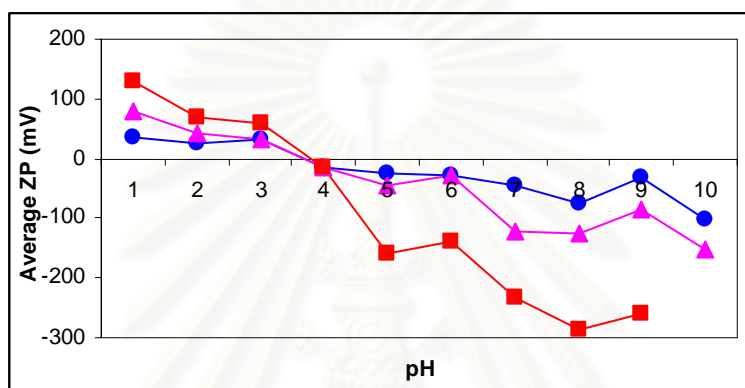
สัญลักษณ์	รูปแบบของโคโตซาน	ผลการละลาย		
		5% กรดแอเซติก	น้ำกลั่น	0.10 โมลาร์ ไซเตียมไฮดรอกไซด์
IF, IIF, IIIF	เกล็ดโคโตซาน	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
IB, IIB, IIIB	เม็ดโคโตซาน	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
IG, IIG, IIIG	เม็ดโคโตซานเชื่อมขวาง กับกลูตารัลดีไฮด์	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
IC, IIC, IIIC	เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย
IA, IIA, IIIA	เม็ดอะมิเนตโคโตซาน	ละลาย	ไม่ละลาย	ไม่ละลาย

จากตารางพบว่าเม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน และเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีความสามารถในการทนต่อการละลายในสารละลายกรดแอเซติกเมื่อเทียบกับเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซาน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์จะมีโครงร่างตาข่ายเกิดขึ้นในสายไซโมเลกุลของโคโตซานซึ่งทำให้สารละลายกรดแอเซติกไม่สามารถแยกสายไซโมเลกุลของโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางออกจากกันได้ (ฐิติมา มณีกุล, 2545) จึงเป็นเหตุให้เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน และเม็ดอะมิเนตโคโตซาน ไม่ละลายในสารละลายกรดแอเซติก

## 4.3 ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก

เมื่อทำการพิจารณาค่าประจุที่ผิวหน้าของโคโตซานรูปแบบต่างๆ ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลร้อยละ 91-95 ณ พีเอชต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเกล็ดและเม็ดโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก ( $\text{pH}_{\text{ZPC}}$ ) มีค่าเท่ากับ 6.6 (Jin et al., 2002) จากรูปที่

4.7 พบว่า เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานจะมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก เมื่อค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 3.2 ขณะที่เม็ดอะมิเนตโคโตซานจะมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก เมื่อค่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 3.3 นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่า ประจุบนผิวโคโตซานรูปแบบต่างๆจะเปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช โดยเมื่อค่า พีเอชมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก โคโตซานนั้นๆจะมีประจุบวกบนผิวหน้า แต่เมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก โคโตซานนั้นๆจะมีประจุลบบนผิวหน้า



▲ เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์

● เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน

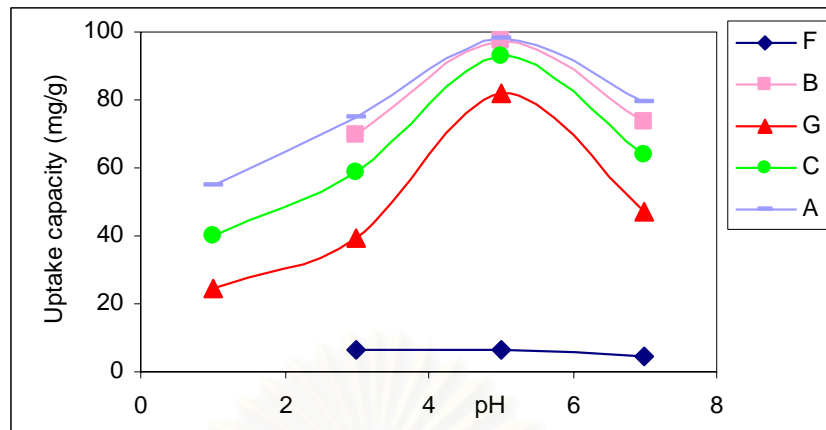
■ เม็ดอะมิเนตโคโตซาน

รูปที่ 4.7 ค่าประจุบนผิวโคโตซานที่พีเอชต่างๆ

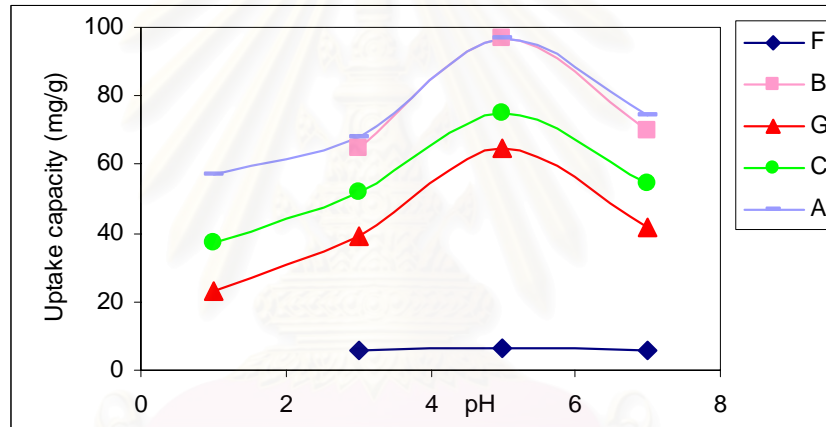
#### 4.4 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการขจัดไอออนโลหะหนัก

##### 4.4.1 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการขจัดไอออนทองแดง

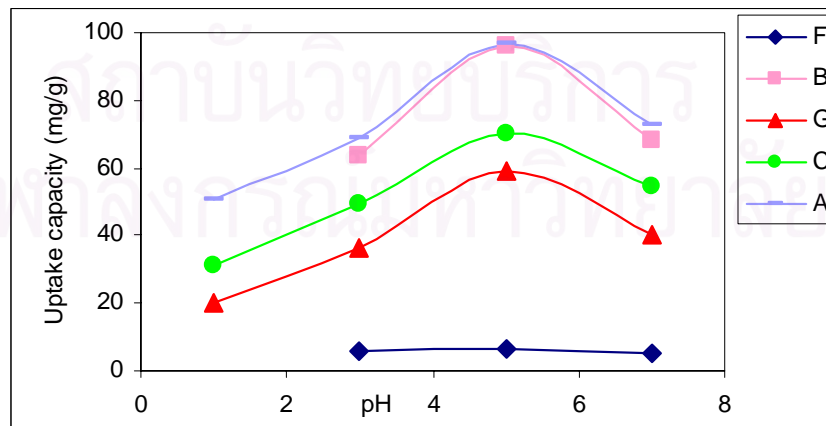
ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงจะให้ความเข้มข้นสารละลายทองแดงเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้โคโตซาน 1 กรัม ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ให้ได้พีเอชเท่ากับ 1 3 5 และ 7 นำโคโตซานใส่ลงไปตามที่กำหนดไว้ ทำการเขย่าเก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.8a ถึง 4.8c



รูปที่ 4.8a ผลของพีเอชต่อการขจัดทองแดงสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 91-95



รูปที่ 4.8b ผลของพีเอชต่อการขจัดทองแดงสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 85-90



รูปที่ 4.8c ผลของพีเอชต่อการขจัดทองแดงสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 76-84

จากการทดลองพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงเท่ากับ 5 สำหรับทุกรูปแบบของโคโตซาน และรูปแบบของโคโตซานมีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดงคือ เม็ดอะมิเนตโคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มากกว่า เม็ดโคโตซาน เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่เชื่อมขวางกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ และเกล็ดโคโตซาน ตามลำดับ ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงสูงสุดเมื่อค่าพีเอชอยู่ที่ระดับ 5 ไม่ว่าจะโคโตซานรูปแบบใดหรือระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลใด ๆ ก็แสดงที่พีเอชนี้ ค่าพีเอชที่มากกว่า 7 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเกิดการตกตะกอนของทองแดงในรูปไฮดรอกไซด์ซึ่งมีผลต่อการดูดซับ

เมื่อพิจารณาเกล็ดและเม็ดโคโตซานพบว่าพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงเพิ่มขึ้น ที่ค่าพีเอชต่ำกว่าพีเอช 5 หมู่อะมิโนในโคโตซานสามารถจับโปรตอนได้ง่ายและจะอยู่ในรูปของ  $\text{NH}_3^+$  ทำให้เกิดการผลักกันระหว่าง  $\text{NH}_3^+$  กับ  $\text{Cu}^{2+}$  และในสภาวะที่เป็นกรดจะเกิดการแข่งขันกันระหว่างไอออนทองแดงและโปรตอน ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงลดลง เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นโคโตซานสามารถดูดซับได้ดีขึ้นจนถึงพีเอช 5 สามารถดูดซับได้ดีที่สุด แต่เมื่อพีเอชมากกว่า 5 ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเกล็ดและเม็ดโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 6.6 (Jin et al., 2002) ค่าพีเอชที่น้อยกว่านี้จะทำให้โคโตซานมีประจุที่ผิวเป็นบวก จึงเกิดการผลักกันระหว่างโคโตซานกับไอออนทองแดง และเมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น (เป็นกรดอ่อนๆ) ทำให้  $\text{OH}^-$  เริ่มมีมากขึ้น ไอออนทองแดงจึงเลือกที่จะจับกับ  $\text{OH}^-$  มากกว่า สำหรับเม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซาน เมื่อค่าพีเอชของสารละลายมากกว่าค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวก โคโตซานจะมีประจุที่ผิวเป็นลบทำให้ดูดซับไอออนทองแดงได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น (เป็นกรดอ่อนๆ) ทำให้  $\text{OH}^-$  เริ่มมีมากขึ้น ไอออนทองแดงจึงเลือกที่จะจับกับ  $\text{OH}^-$  มากกว่าเช่นเดียวกับในกรณีของเกล็ดและเม็ดโคโตซาน

จากรูป 4.8a ถึง 4.8c เมื่อพิจารณาโคโตซานรูปแบบเดียวกันที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน ที่พีเอชค่าหนึ่งจะสังเกตได้ว่าการทดลองนี้ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลที่ใกล้เคียงกันจะให้ผลการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลที่ใกล้เคียงกันในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อการดูดซับ แต่ที่ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกันมากๆจะมีผลต่อการดูดซับคือโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลมากกว่าจะสามารถดูดซับได้ดีกว่า

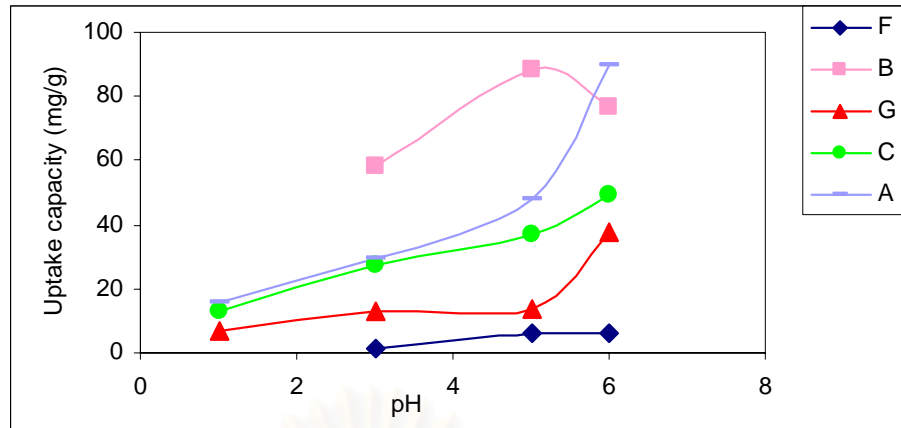
#### 4.4.2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมของโคโตซานในการจัดไอออนแคดเมียม

ศึกษาผลของพีเอชของสารละลายไอออนแคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้โคโตซาน 1 กรัม ปรับพีเอชในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ให้ได้พีเอชเท่ากับ 1 3 5 และ 6 นำโคโตซานใส่ลงไปตามที่กำหนดไว้ ทำการเขย่า เก็บน้ำตัวอย่างและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ ทำการทดลองแบบเดียวกับการจัดไอออนทองแดง แต่เปลี่ยนโลหะหนักเป็นแคดเมียม ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.9a ถึง 4.9c

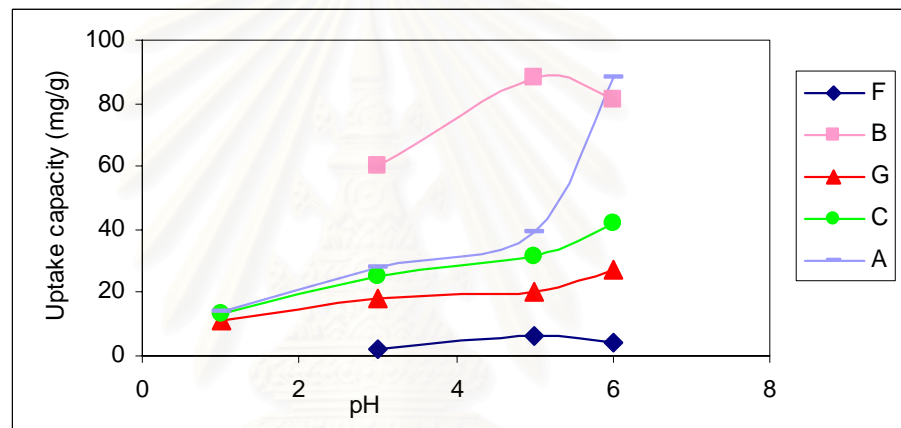
จากการทดลอง รูปแบบของโคโตซานมีผลต่อการดูดซับไอออนแคดเมียมคือ เม็ดอะมิเนตโคโตซานสามารถดูดซับไอออนแคดเมียมได้มากกว่า เม็ดโคโตซาน เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่เชื่อมขวางกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ และเกล็ดโคโตซาน ตามลำดับเช่นเดียวกับการดูดซับไอออนทองแดง ค่าพีเอชที่มากกว่า 6 ไม่นำมาพิจารณาเนื่องจากเกิดการตกตะกอนของแคดเมียมในรูปไฮดรอกไซด์ซึ่งมีผลต่อการดูดซับ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมเมื่อใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆมีค่าต่างกัน คือ พีเอชเท่ากับ 5 สำหรับเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซาน ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมของไอออนทองแดง พีเอชเท่ากับ 6 สำหรับโคโตซานรูปแบบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ และเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน มีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 3.2 ค่าพีเอชที่ทำให้ผิวหน้าของเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีความสมดุลระหว่างประจุลบและประจุบวกเท่ากับ 3.3 แล้วค่าพีเอชที่มากกว่านี้จะทำให้โคโตซานมีประจุที่ผิวเป็นลบ ทำให้การดูดซับไอออนแคดเมียมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น (เป็นกรดอ่อนๆ) ทำให้  $\text{OH}^-$  เริ่มมีมากขึ้นแต่การดูดซับยังเพิ่มขึ้นเนื่องจาก แคดเมียมเป็นซอฟต์แวร์ไอออน (soft ion) ซึ่งสามารถเกิดพันธะที่แข็งแรงกับ  $\text{CN}^-$ ,  $\text{RS}^-$ ,  $\text{SH}^-$  และ  $\text{NH}_2^-$  (Choong and Wolfgang, 2003) ทำให้เม็ดโคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีร้อยละการจัดเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น

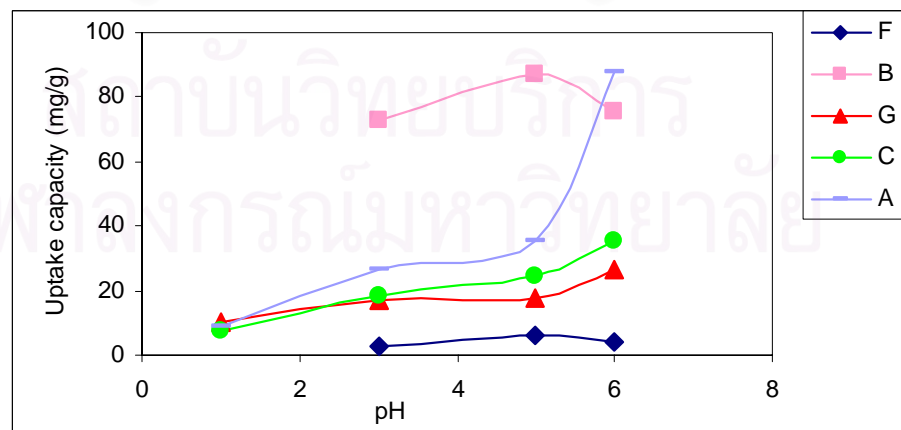
จากรูป 4.9a ถึง 4.9c เมื่อพิจารณาโคโตซานรูปแบบเดียวกันที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน ที่พีเอชค่าหนึ่งสามารถกล่าวได้ว่าระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลที่ใกล้เคียงกันในงานวิจัยนี้ไม่มีผลต่อการดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับไอออนทองแดง



รูปที่ 4.9a ผลของพีเอชต่อการขจัดแคดเมียมสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 91-95



รูปที่ 4.9b ผลของพีเอชต่อการขจัดแคดเมียมสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 85-90



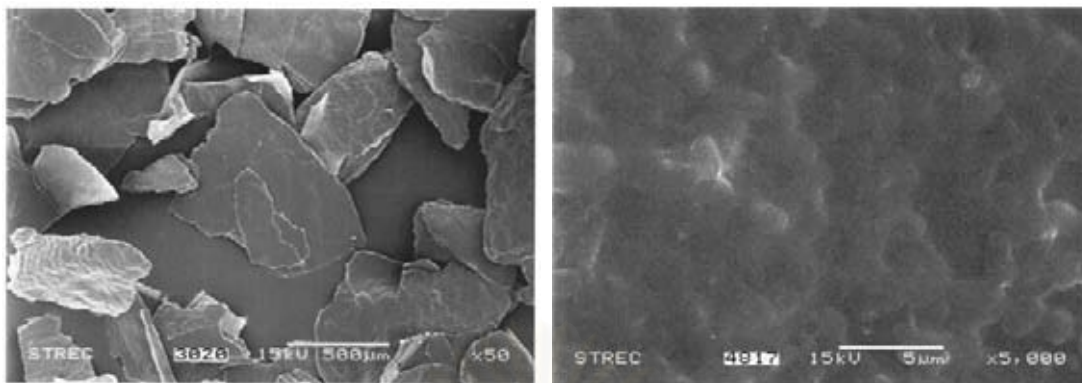
รูปที่ 4.9c ผลของพีเอชต่อการขจัดแคดเมียมสำหรับโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิล ร้อยละ 76-84

## 4.5 เครื่องมือวิเคราะห์ (Instrumental analyses)

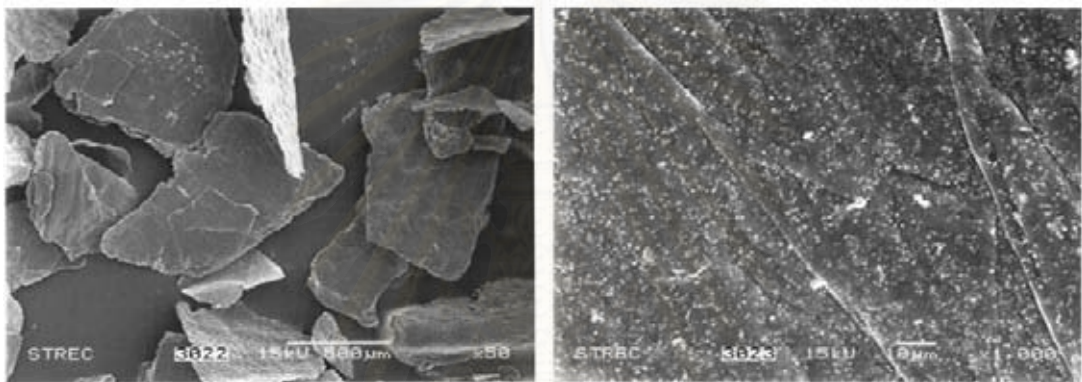
### 4.5.1 SEM (Scanning electron microscope)

ในงานวิจัยได้ทำการสังเกตความแตกต่างของโคโตซานก่อนและหลังดูดซับโลหะหนัก โดยในที่นี้จะพิจารณาเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลร้อยละ 91-95 และใช้ในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม

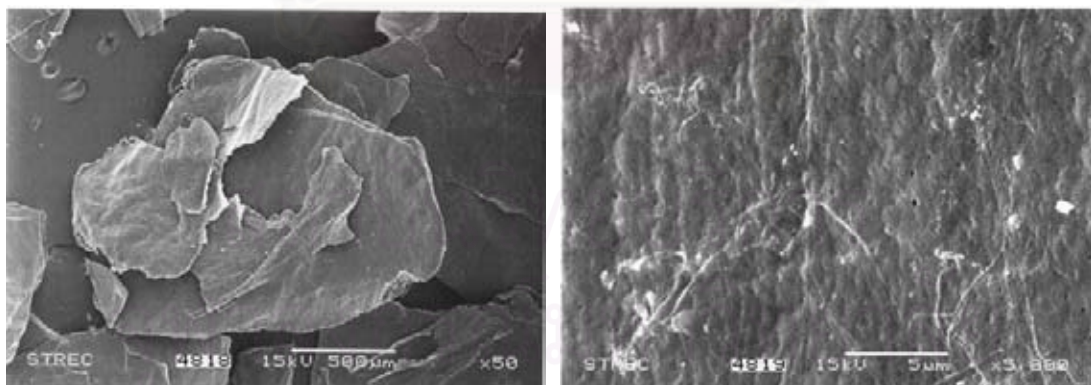
รูปที่ 4.10 แสดงเกล็ดโคโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมโดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า และ 5,000 เท่า ตามลำดับ สำหรับเกล็ดโคโตซานหลังการดูดซับไอออนทองแดงใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า และรูปที่ 4.11 แสดงเม็ดโคโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมโดยใช้กำลังขยาย 50 เท่า และ 5,000 เท่า ตามลำดับ จะเห็นว่าทั้งเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานเมื่อผ่านการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมจะมีลักษณะของพื้นผิวที่หนาแน่นขึ้น และจะเป็นจุดเล็กๆ ซึ่งเป็นไอออนทองแดงปรากฏภายหลังการดูดซับทั้งของเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซาน แสดงให้เห็นว่าทั้งเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ ส่วนผลการดูดซับแคดเมียมก็ให้ผลลักษณะเดียวกับการดูดซับไอออนทองแดง ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าผิวของเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานหลังการดูดซับไอออนแคดเมียม มีความขรุขระมากกว่าผิวของเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานที่ผ่านการดูดซับไอออนทองแดง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากไอออนแคดเมียมมีขนาดใหญ่กว่าไอออนทองแดง



(a) เกล็ดโคโทซานก่อนการดูดซับไอออนทองแดง



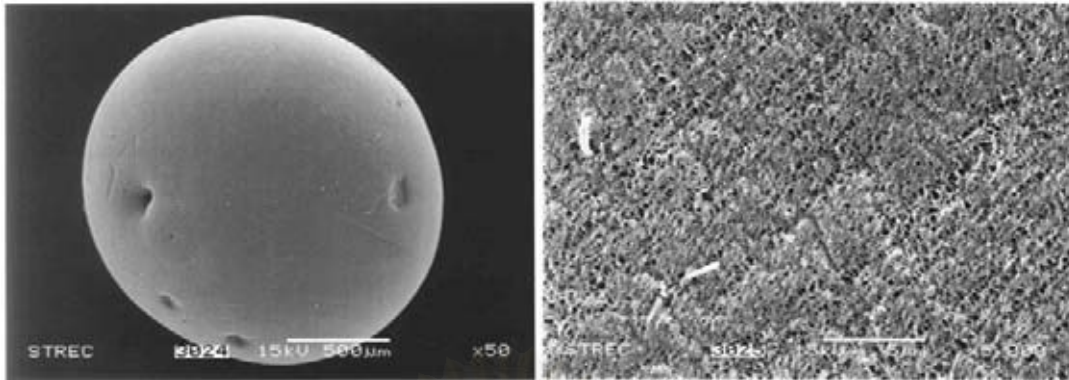
(b) เกล็ดโคโทซานหลังการดูดซับไอออนทองแดง



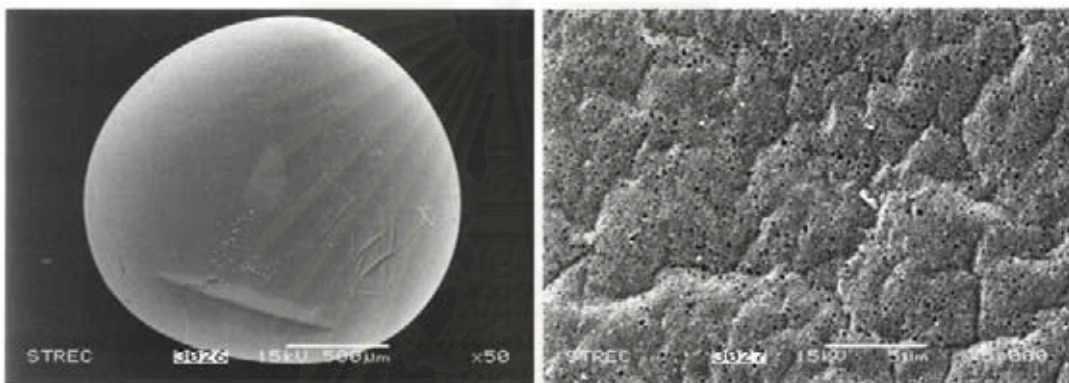
(c) เกล็ดโคโทซานหลังการดูดซับไอออนแคดเมียม

รูปที่ 4.10 SEM Micrograp ของเกล็ดโคโทซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม

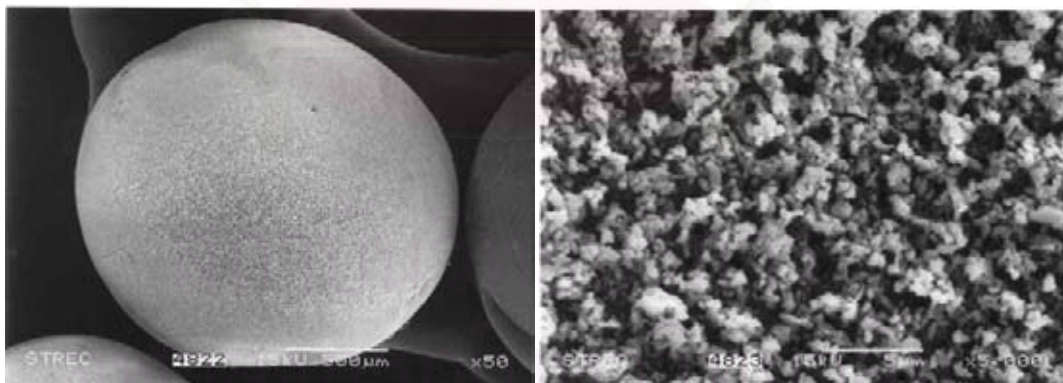




(a) เม็ดโคไโตซานก่อนการดูดซับไอออนทองแดง



(b) เม็ดโคไโตซานหลังการดูดซับไอออนทองแดง

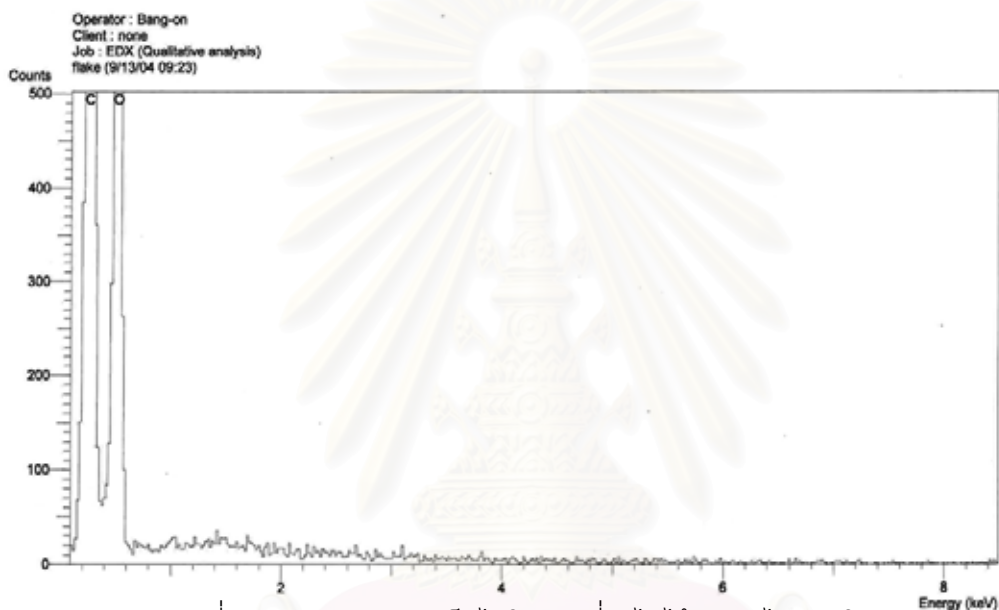


(c) เม็ดโคไโตซานหลังการดูดซับไอออนแคดเมียม

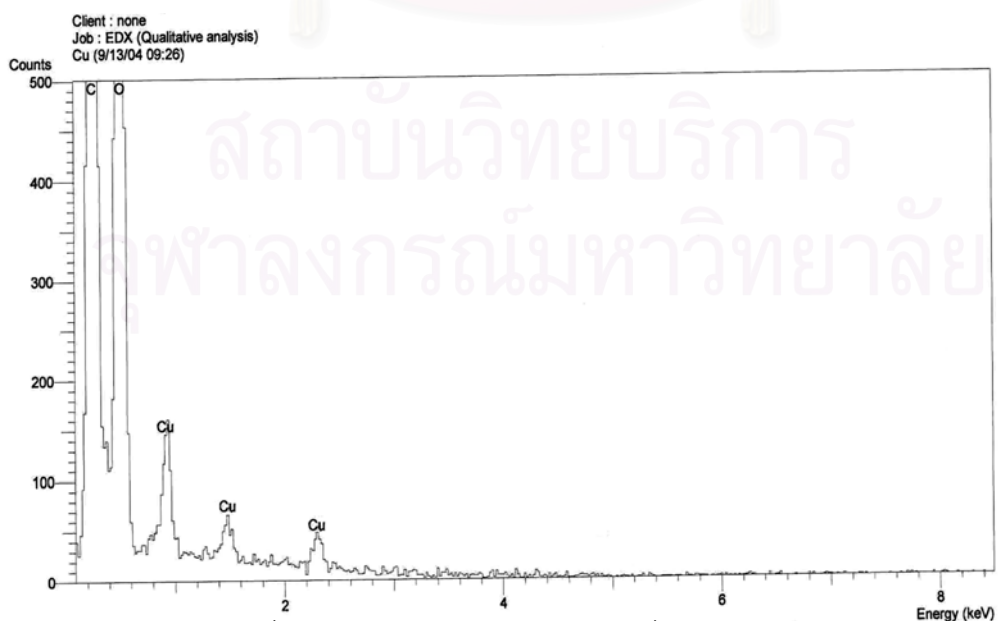
รูปที่ 4.11 SEM Micrograp ของเม็ดโคไโตซานก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม

#### 4.5.2 EDX (Energy dispersive X-ray spectroscopy)

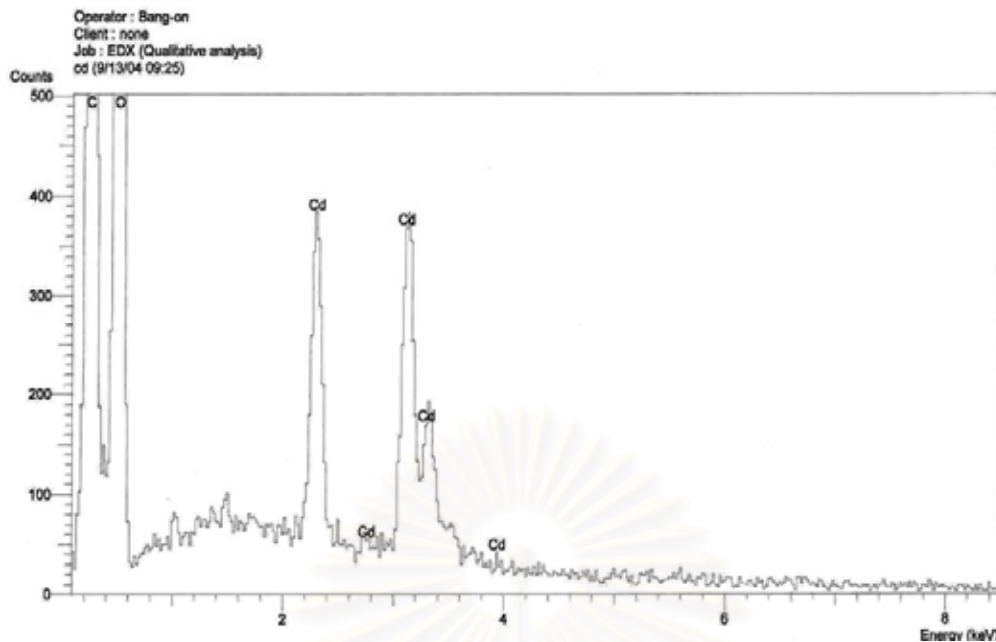
เมื่อนำเกล็ดโคโคซานในข้อ 4.5.1 มาวิเคราะห์ว่าพื้นผิวที่สังเกตเห็นคือไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม จึงใช้ผลจากการวิเคราะห์โดย EDX ยืนยันว่าโคโคซานสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้ รูปที่ 4.12a แสดงเกล็ดโคโคซานที่ยังไม่ได้ดูดซับไอออนโลหะหนัก จะมีเพียงออกซิเจนและคาร์บอนเท่านั้น รูปที่ 4.12b แสดงเกล็ดโคโคซานที่ดูดซับไอออนทองแดง จะเห็นว่ามีพีคของทองแดงปรากฏอยู่แสดงว่าโคโคซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.12c แสดงเกล็ดโคโคซานที่ดูดซับไอออนแคดเมียม จะมีพีคของแคดเมียมปรากฏให้เห็น



รูปที่ 4.12a EDX ของเกล็ดโคโคซานที่ยังไม่ได้ดูดซับไอออนโลหะหนัก



รูปที่ 4.12b EDX ของเกล็ดโคโคซานที่ดูดซับไอออนทองแดง



รูปที่ 4.12c EDX ของเกล็ดโคโคโตซานที่ดูดซับไอออนแคดเมียม

#### 4.6 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก

##### 4.6.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดง

ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้น ของสารละลายทองแดง โดยใช้โคโคโตซานรูปแบบต่างๆ และที่ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างๆ ปริมาณ 1 กรัมของเม็ดโคโคโตซาน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 50 100 200 ส่วนในล้านส่วน เตรียมสารละลายไอออนทองแดงที่พีเอช 5 ซึ่งได้จากการศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสม ทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 130 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาทั้งหมด 144 ชั่วโมง สารละลายไอออนทองแดงจะถูกเก็บไปวัดความเข้มข้นที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอบชันสเปกโตรมิเตอร์

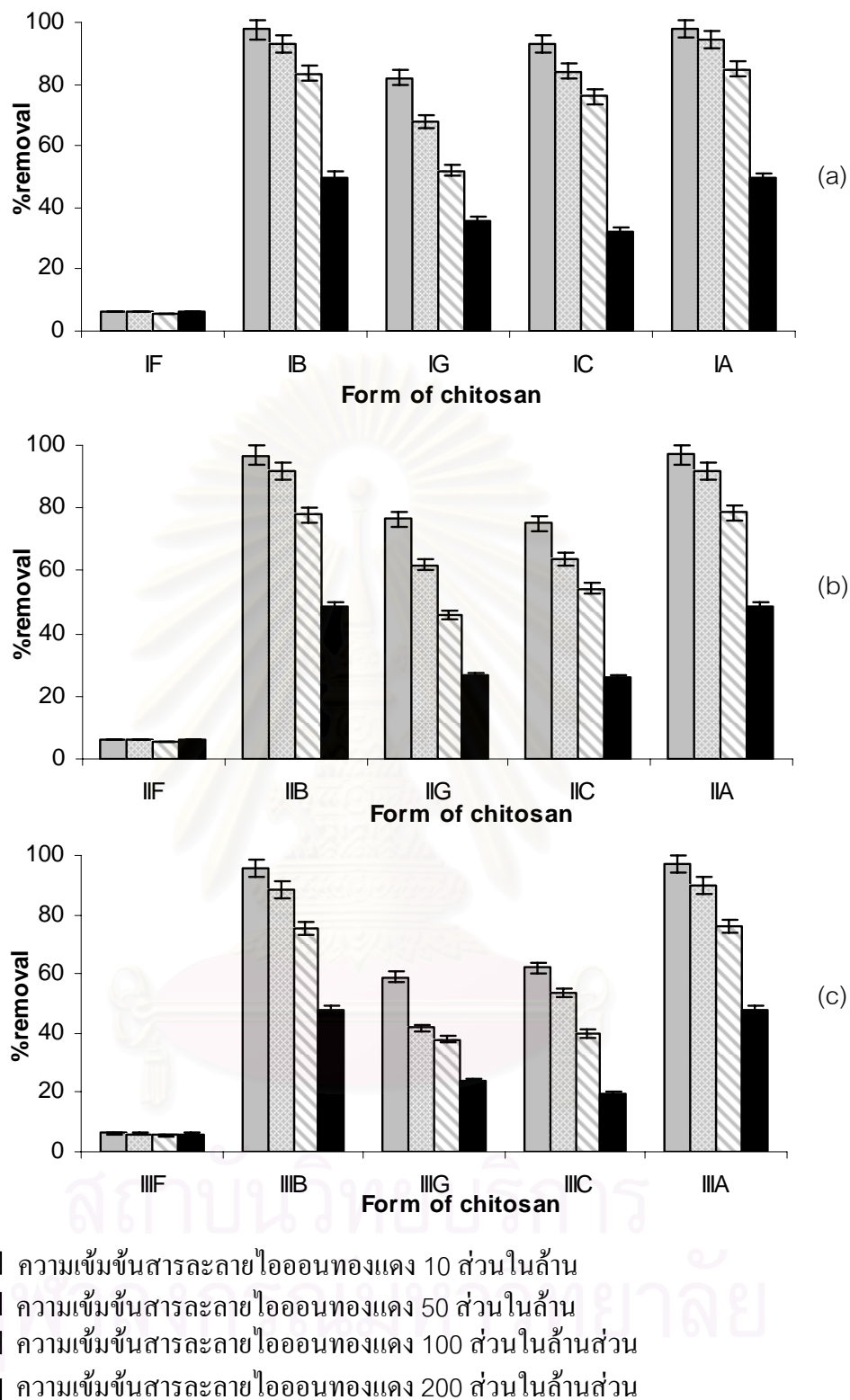
ความเข้มข้นของสารละลายทองแดงที่มากกว่า 200 ส่วนในล้านส่วน ไม่สามารถทำการศึกษาได้ เนื่องจากเมื่อทำการปรับพีเอชแล้วจะเกิดการตกตะกอนของสารละลาย และพบว่าในทุกรูปแบบของโคโคโตซานเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงมีค่ามากขึ้น โคโคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของโคโคโตซานจะเห็นว่าเม็ดอะมิเนตโคโคโตซานดูดซับได้ดีกว่าเม็ดโคโคโตซาน เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโคโตซาน เม็ดโคโคโตซานที่เชื่อมขวางกับสารละลายกลูตารัลดีไฮด์ และเกล็ดโคโคโตซาน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมของไอออนทองแดง แสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงต่างๆ ดังรูปที่ 4.13a ถึง 4.13e (แสดงกราฟแผนภูมิแบบกระจายดังภาคผนวก จ)

#### 4.6.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียม

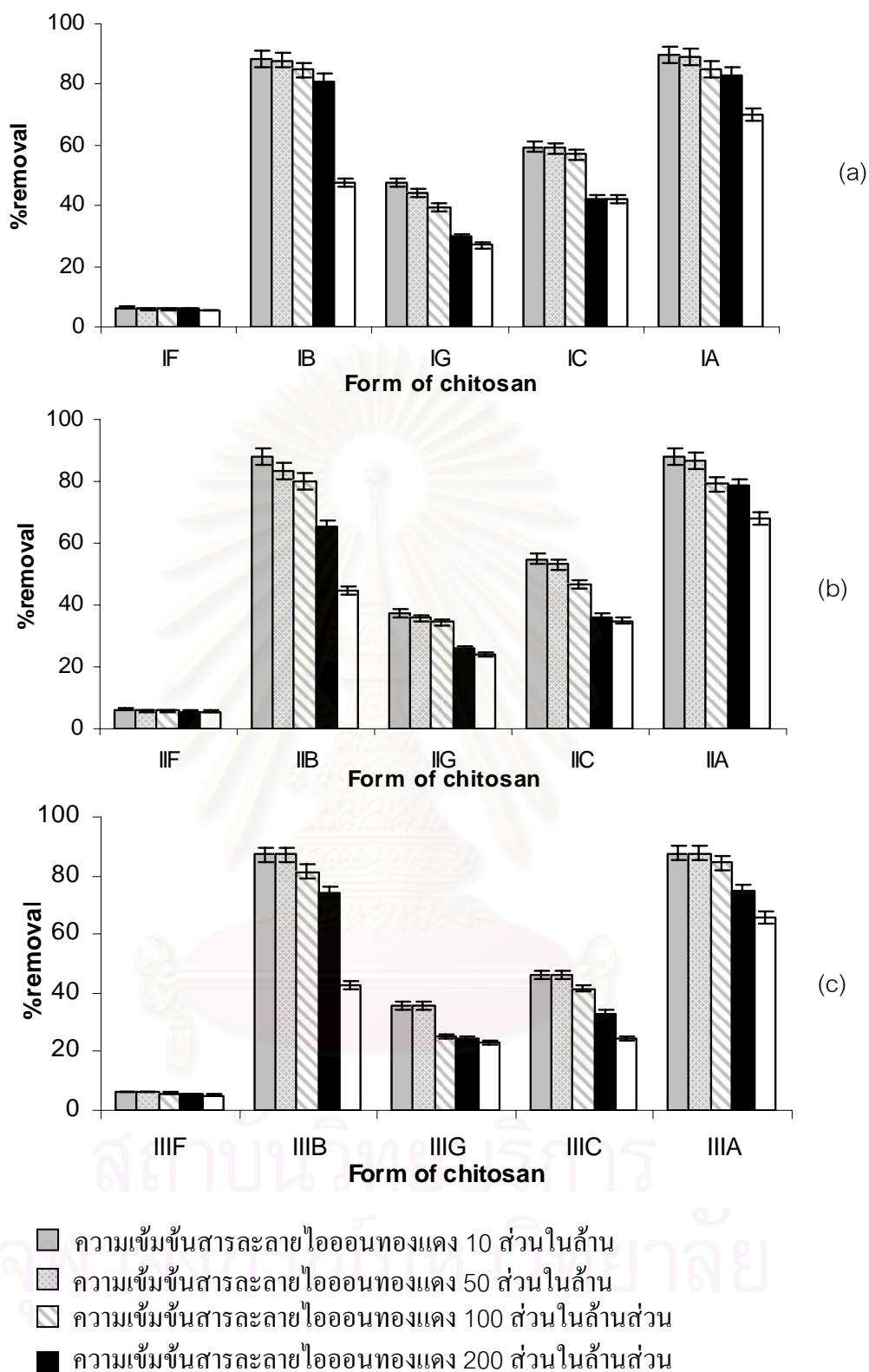
ในส่วนของการศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียมโดยเตรียมความเข้มข้นเริ่มต้นตั้งแต่ 10 ส่วนในล้านส่วนถึง 500 ส่วนในล้านส่วน และทำการปรับพีเอช โดยใช้พีเอช 5 สำหรับเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซาน ใช้พีเอช 6 สำหรับโคโตซานรูปแบบอื่นๆ ทำการทดลองเช่นเดียวกับส่วนของสารละลายไอออนทองแดง

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียมที่มากกว่า 500 ส่วนในล้านส่วนขึ้นไปจะเกิดการตกตะกอนที่พีเอช 6 ดังนั้น จะทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมถึงความเข้มข้น 500 ส่วนในล้านส่วนเท่านั้น และพบว่าในทุกรูปแบบของโคโตซานเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียมมีค่ามากขึ้น โคโตซานสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มากขึ้นเช่นเดียวกับการดูดซับไอออนทองแดงและเม็ดอะมิเนตโคโตซานดูดซับได้ดีกว่าเม็ดโคโตซาน เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่เชื่อมขวางกับสารละลายกลูตาไรต์ไฮด์ และเกล็ดโคโตซาน ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมของไอออนแคดเมียม แสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.14a ถึง 4.14b (แสดงกราฟแผนภูมิแบบกระจายดังภาคผนวก จ)

จะสังเกตได้ว่าทั้งการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดง และผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนแคดเมียม จะให้ผลเช่นเดียวกันคือ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนักมีค่ามากขึ้น โคโตซานสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้มากขึ้น เม็ดอะมิเนตโคโตซานดูดซับได้ดีกว่าเม็ดโคโตซาน เม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซาน เม็ดโคโตซานที่เชื่อมขวางกับสารละลายกลูตาไรต์ไฮด์ และเกล็ดโคโตซาน ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสมของโลหะหนักทั้งสองชนิด และสังเกตได้ว่าเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดีกว่าเกล็ดโคโตซานเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะของเม็ดอะมิเนตโคโตซานและเกล็ดโคโตซานเท่ากับ 15.13 ตารางเมตรต่อกรัมและ 6.02 ตารางเมตรต่อกรัมตามลำดับ จะเห็นว่าเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเกล็ดโคโตซาน ซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM Micrograp ของเม็ดโคโตซานที่เห็นรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นเหตุให้เม็ดโคโตซานมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเกล็ดโคโตซาน และเมื่อพิจารณาที่รูปแบบเดียวกัน แต่มีระดับการกำจัดหมู่แอกซิลต่างกันจะให้ผลการดูดซับไอออนโลหะหนักใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.13 ผลของรูปแบบไคโตซานต่อการขจัดสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนทองแดงต่างกัน ปริมาณเม็ดไคโตซาน 1 กรัม และระดับการกำจัดหมู่แอสเททิล (a) ร้อยละ 91-95 (b) ร้อยละ 85-90 (c) ร้อยละ 76-84



รูปที่ 4.14 ผลของรูปแบบไคโตซานต่อการกำจัดสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไออนแคดเมียมต่างกัน ปริมาณเม็ดไคโตซาน 1 กรัม และระดับการกำจัดหมู่แอสเททิด (a) ร้อยละ 91-95 (b) ร้อยละ 85-90 (c) ร้อยละ 76-84

#### 4.7 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับไอออนโลหะหนัก

ศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์เพื่อใช้ในการอธิบายการดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\left(\frac{1}{(x/m)}\right)$  และ  $\left(\frac{1}{C_e}\right)$  จะได้เป็นกราฟเส้นตรง (ดูในภาคผนวก ง) สามารถหาค่าปริมาณการดูดซับโลหะหนัก( $Q_0$ ) ได้ดังตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ปริมาณทองแดงที่สามารถดูดซับได้ โดยใช้โคโคซานรูปแบบต่างๆและระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน

รูปแบบของโคโคซาน	$Q_0$ (mg. g-1)	$R^2$	r
IA	344.8	0.998	0.999
IIA	333.3	0.998	0.999
IIIA	322.6	0.993	0.997
IB	333.3	0.997	0.999
IIB	322.6	0.998	0.999
IIIB	312.5	0.997	0.998
IC	285.7	0.997	0.999
IIC	277.8	0.998	0.999
IIIC	263.2	0.983	0.991
IG	263.2	0.998	0.999
IIG	250.0	0.975	0.988
IIIG	204.0	0.996	0.998

ตารางที่ 4.5 ปริมาณแคดเมียมที่สามารถดูดซับได้ โดยใช้ไคโตซานรูปแบบต่างๆและระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน

รูปแบบของไคโตซาน	Q <sub>0</sub> (mg. g <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	r
IA	333.3	0.992	0.996
IIA	285.7	0.986	0.993
IIIA	250.0	0.982	0.991
IB	312.5	0.975	0.987
IIB	277.8	0.956	0.978
IIIB	200.0	0.968	0.984
IG	122.0	0.981	0.991
IIG	92.6	0.975	0.987
IIIG	85.4	0.952	0.976
IC	163.9	0.978	0.989
IIC	153.8	0.957	0.978
IIIC	120.4	0.942	0.971

จากตาราง 4.4 และ 4.5 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับได้บนไคโตซานพบว่า เม็ดอะมิเนตไคโตซานสามารถดูดซับทองแดงและแคดเมียมได้มากกว่าไคโตซานรูปแบบอื่นๆ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาผลของพีเอชของสารละลายโลหะหนักและผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก โดยมีความสามารถในการดูดซับ ดังนี้ เม็ดอะมิเนตไคโตซาน > เม็ดไคโตซาน > เม็ดคาร์บอกซิลเลตไคโตซาน > เม็ดไคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตาร์ลดีไฮด์ สาเหตุที่เม็ดอะมิเนตไคโตซานสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าไคโตซานรูปแบบอื่นมากนั้นเนื่องมาจากแคดเมียมเป็นซอฟต์แวร์ไอออน (soft ion) ซึ่งสามารถเกิดพันธะที่แข็งแรงกับ NH<sub>2</sub><sup>-</sup> (Choong and Wolfgang, 2003) เมื่อหมู่อะมิโนเพิ่มขึ้นจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี จึงทำให้สามารถดูดซับแคดเมียมได้มากกว่าไคโตซานรูปแบบอื่นๆ และเมื่อพิจารณารูปแบบของไคโตซานเดียวกัน แต่ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน พบว่าปริมาณของไอออนโลหะหนักที่ไคโตซานสามารถดูดซับได้มีค่าใกล้เคียงกัน ตารางที่ 4.6 แสดงปริมาณการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ไคโตซานในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ



ตารางที่ 4.6 ปริมาณการดูดซับทองแดงและแคดเมียมโดยใช้ไคโตซานในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

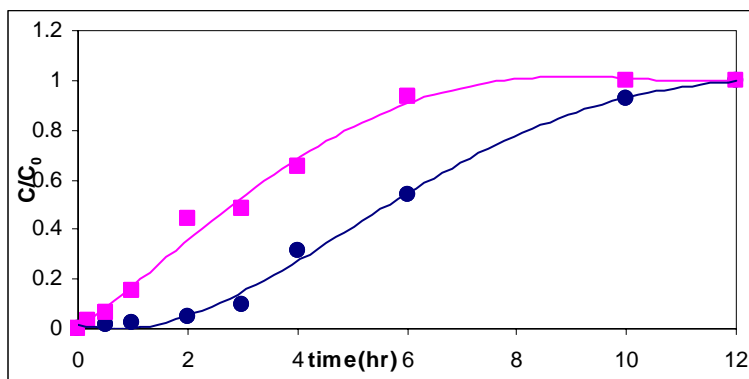
ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)		ตัวดูดซับ	อ้างอิง
ทองแดง	แคดเมียม		
344.828	333.333	Aminated chitosan beads	งานวิจัยนี้
285.714	163.934	Carboxylated chitosan beads	งานวิจัยนี้
263.158	121.951	Crosslink chitosan beads	งานวิจัยนี้
333.333	312.500	Chitosan beads	งานวิจัยนี้
-	236.061	Chitosan flake	Evans, J.R. (2002)
80.71	-	Chitosan beads	Wan Ngah et al. (2002)
59.67	-	Chitosan-GLA	Wan Ngah et al. (2002)
62.47	-	Chitosan-ECH	Wan Ngah et al. (2002)
45.62	-	Chitosan-EGDE	Wan Ngah et al. (2002)
85	-	Chitosan beads	Schmuhl (2001)
86	-	Crosslink chitosan beads	Schmuhl (2001)
203.328	-	Crosslink chitosan beads	Sung-Tao et al.(2001)
179.8182	-	Crosslink chitosan beads	Zuoying Cao. (2001)
123.1	-	Chitosan flake	Feng (2000)
103.8	-	Chitosan bead	Feng (2000)
-	250	Chitosan beads	Hsien (1998)
-	449.64	Chitosan flake	Rorrer (1993)
222	-	Chitosan flake	McKay (1989)
-	5.93	Chitosan flake	Jha (1988)

#### 4.8 ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ระบบต่อเนื่อง (Continuous Mode Experiment)

จากภาวะที่ดีที่สุดในการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงแบบกะ คือ พีเอชของสารละลายทองแดงเท่ากับ 5 และใช้เม็ดอะมิเนตโคโตซานซึ่งในระบบต่อเนื่องจะนำภาวะนี้มาใช้ในการทดลอง โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีไอออนทองแดงปนเปื้อนอยู่ ทำการปรับพีเอชและกรอง จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปตรวจวัดความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 480.80 ส่วนในล้านส่วน

ศึกษาผลของอัตราการไหล โดยให้ความสูงของเบดคงที่ที่ 8.5 เซนติเมตร อัตราการไหลแปรค่าเป็น  $1 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที และ  $8.5 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที โดยจะพิจารณาค่าขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, mass transfer zone) เป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับไอออนทองแดง ช่วงก่อนขอบเขตการถ่ายเทมวลการดูดซับของเม็ดอะมิเนตโคโตซานจะเริ่มอิ่มตัว ช่วงหลังจากขอบเขตการถ่ายเทมวลเม็ดอะมิเนตโคโตซานยังไม่เกิดการดูดซับ ค่าขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ชนิดของสารดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ ปริมาณสารดูดซับ และอัตราการไหลของสารถูกดูดซับ ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาแค่อัตราการไหลของน้ำเสียเท่านั้น รูปที่ 4.15 แสดงขอบเขตการถ่ายเทมวลเมื่ออัตราการไหลแตกต่างกัน

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดความเข้มข้นของไอออนทองแดงในน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับโดยเม็ดอะมิเนตโคโตซานโดยให้ความสูงของเบดคงที่ที่ 8.5 เซนติเมตร อัตราการไหลแปรค่าเป็น  $1 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที และ  $8.5 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที ข้อมูลจากการทดลองนำมาเขียนเส้นโค้งเบรคทอร์จ์ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียขาออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลาสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเวลาเริ่มต้น น้ำเสียที่ผ่านออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณไอออนทองแดงต่ำ ไอออนทองแดงส่วนใหญ่จะถูกดูดซับไว้ได้โดยเม็ดอะมิเนตโคโตซานในชั้นต้นๆ และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านเป็นจำนวนมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณไอออนทองแดงในน้ำเสียขาออกมีมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของโคโตซานใกล้หมดสภาพปริมาณของไอออนทองแดงในน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในน้ำขาออกจนมีค่าเท่ากับปริมาณของไอออนทองแดงในน้ำขาเข้า รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C/C_0$  กับ เวลา เมื่อ  $C$  คือ ความเข้มข้นขาออกของน้ำเสียที่เวลา  $t$  และ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นขาเข้าของน้ำเสีย



● 8.5 เซนติเมตร  $1 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที

■ 8.5 เซนติเมตร  $8.5 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที

รูปที่ 4.16 เส้นโค้งเบรคทวร์จของการดูดซับน้ำเสียโดยใช้เม็ดอะมิเนตโคโตซานความเข้มข้นเริ่มต้น 480.80 ส่วนในล้านส่วน พีเอช 5

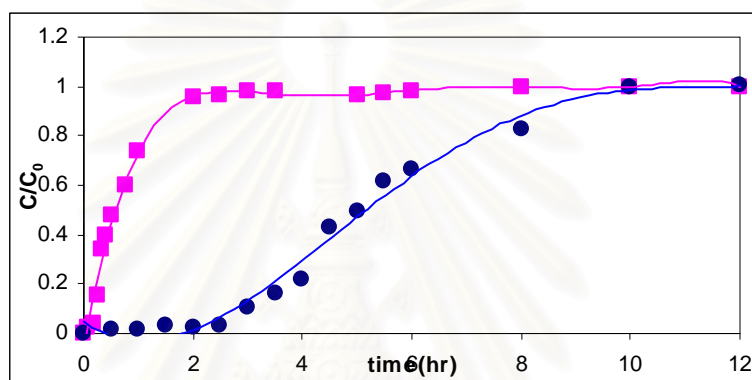
จากกราฟจะเห็นว่า เส้นโค้งเบรคทวร์จมีลักษณะเป็น s-shape เมื่อความสูงของเบดคองที่ที่ 8.5 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ได้ Breakthrough time ที่เกิดขึ้นสั้นมาก และขอบเขตการถ่ายเทมวลมาก เป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจาก เมื่ออัตราการไหลมากขึ้น เวลาที่โคโตซานจะสัมผัสกับน้ำเสียน้อยลงจึงดูดซับได้ลดลงประสิทธิภาพของโคโตซานจะพิจารณาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ ตารางที่ 4.7 แสดงเวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ และขอบเขตการถ่ายเทมวลที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ 50% ของ เส้นโค้งเบรคทวร์จ (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร)

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	เวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ (ชั่วโมง)	ขอบเขตการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร)
$1 \pm 0.05$ มิลลิลิตรต่อนาที	6.6	3.62
$8.5 \pm 0.05$ มิลลิลิตรต่อนาที	3.6	4.86

#### 4.9 ศึกษาผลของศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพของโคโตซานที่หมดประสิทธิภาพหลังการดูดซับ ไอออนทองแดง

เมื่อดอะมิเนตโคโตซานที่ผ่านการดูดซับน้ำเสียแล้วสามารถทำการฟื้นฟูคุณภาพได้ด้วยการนำมาชะล้างด้วยสารละลายกรดไนตริก 0.1 โมลาร์ จากนั้นนำเมื่อดอะมิเนตโคโตซานมาทำการดูดซับน้ำเสียอีกครั้ง โดยใช้ภาวะเดียวกับข้อ 4.8 รูปที่ 4.17 แสดงเส้นโค้งเบรคทวร์จของการดูดซับโดยใช้เมื่อดอะมิเนตโคโตซานที่ฟื้นฟูคุณภาพแล้ว ขอบเขตของการดูดซับและ Breakthrough time แสดงดังตารางที่ 4.8



● 8.5 เซนติเมตร  $1 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่ออนาที

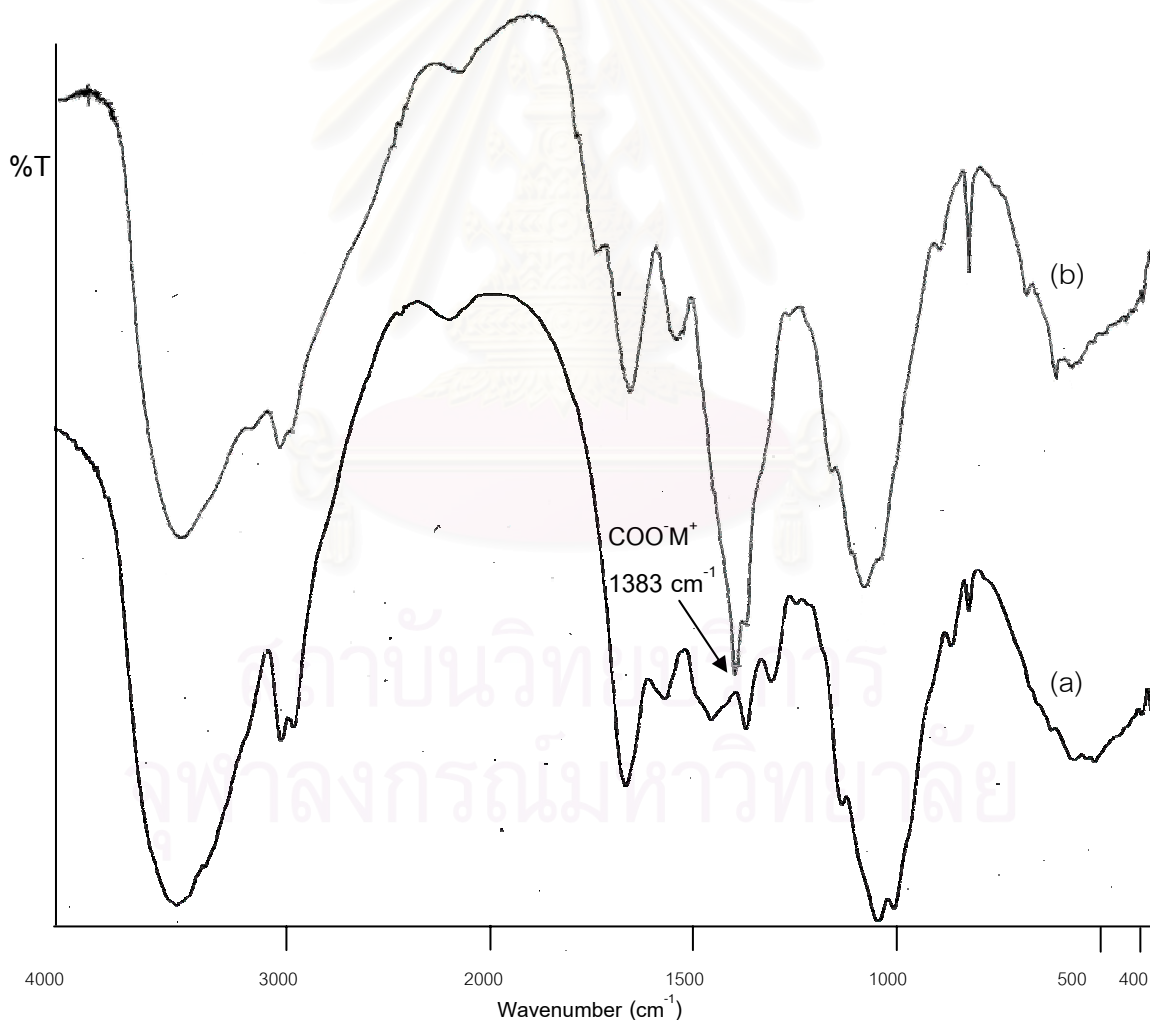
■ 8.5 เซนติเมตร  $8.5 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่ออนาที

รูปที่ 4.17 เส้นโค้งเบรคทวร์จของการดูดซับน้ำเสียโดยใช้เมื่อดอะมิเนตโคโตซานที่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพ ความเข้มข้นเริ่มต้น 480.80 ส่วนในล้านส่วน พีเอช 5

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ (ชั่วโมง) และขอบเขตการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร) ของเมื่อดอะมิเนตโคโตซานหลังการฟื้นฟูคุณภาพ

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่ออนาที)	เวลาที่ 50% ของเส้นโค้งเบรคทวร์จ (ชั่วโมง)	ขอบเขตการถ่ายเทมวล (เซนติเมตร)
$1 \pm 0.05$ มิลลิลิตรต่ออนาที	5.00	5.90
$8.5 \pm 0.05$ มิลลิลิตรต่ออนาที	0.75	8.45

จะเห็นว่า เวลาที่ถึงค่า 50% ของเส้นโค้งเบรคทจรัลลดลงมากกว่าก่อนการฟื้นฟูคุณภาพของเม็ดอะมิเนตโคโตซาน แสดงว่าเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงได้น้อยลง อาจเกิดจากการชะล้างซึ่งกรดไนตริกอาจทำให้โครงสร้างของโคโตซานเปลี่ยนแปลงหรือเม็ดอะมิเนตโคโตซานยังมีทองแดงเกาะติดอยู่ที่ผิวทำให้ตำแหน่งในการจับไอออนทองแดงลดลง รูปที่ 4.18 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดอะมิเนตโคโตซานก่อนการดูดซับไอออนทองแดง และหลังการฟื้นฟูคุณภาพด้วยกรดไนตริก จะเห็นว่าเม็ดอะมิเนตโคโตซานหลังการฟื้นฟูคุณภาพปรากฏพีคที่เลขคลื่น  $1383\text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคที่ไม่ปรากฏให้เห็นก่อนการดูดซับไอออนทองแดง ซึ่งเลขคลื่นช่วง  $1400\text{-}1310\text{ cm}^{-1}$  เป็น absorption band ของ  $\text{COO}^-\text{M}^+$  คือ ไอออนโลหะหนัก (ปรานอม ชาวเมฆ, 2539) แสดงให้เห็นว่าเม็ดอะมิเนตโคโตซานหลังการฟื้นฟูคุณภาพด้วยกรดไนตริกยังมีทองแดงเกาะติดอยู่ เป็นเหตุให้ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงของเม็ดอะมิเนตโคโตซานลดลง



รูปที่ 4.18 อินฟราเรดสเปกตรัมของเม็ดอะมิเนตโคโตซานก่อนและหลังฟื้นฟูคุณภาพ

(a) เม็ดอะมิเนตโคโตซาน (b) เม็ดอะมิเนตโคโตซานหลังฟื้นฟูคุณภาพ

#### 4.10 ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพของโคโคซานด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

ทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาด้วยกรดไนตริก จะนำไปวัดปริมาณความเข้มข้นที่สามารถล้างออกมาได้ จากนั้นจะนำสารละลายทองแดงที่ได้ไปทำการแยกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยมีขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้คือ ขั้วแอโนด ทำจากไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ และขั้วแคโทดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ขนาด 32 ตารางเซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (หทัยทัต ชัยสุวรรณ, 2544) ตารางที่ 4.9 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาได้จากเม็ดอะมิเนตโคโคซานและร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง

ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงที่ถูกชะล้างออกมาได้จากเม็ดอะมิเนตโคโคซานและร้อยละของการนำกลับคืนของทองแดง

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	ร้อยละการนำกลับคืนของทองแดง
1±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที	453.2	99.40
8.5±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที	379.8	98.14

จากผลการทดลองจะเห็นว่า การแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าจะได้ทองแดงกลับคืนมาได้ และยังได้สารละลายกรดไนตริกที่สามารถนำกลับไปใช้ในขั้นตอนการชะล้างทองแดงได้อีก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขจัดไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม โดยใช้ไคโตซานที่เตรียมได้จากเปลือกกุ้งกุลาดำ ซึ่งรูปเป็นเกล็ดและเม็ดไคโตซานทั้งที่ทำการเชื่อมขวางและไม่ได้ทำการเชื่อมขวางโดยใช้สารละลายกลูตารัลดีไฮด์และทำการปรับปรุงคุณภาพโดยเพิ่มหมู่อะมิโนในไคโตซาน ทำการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการทดลองแบบกะคือ พีเอชของสารละลายโลหะหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโลหะหนัก ระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิล ชนิดของโลหะหนัก สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องใช้ตัวแปรที่ศึกษาคือ อัตราการไหลของน้ำเสียที่มีไอออนทองแดงปนเปื้อนอยู่ จากการทดลองที่กล่าวมาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ไคโตซานที่ใช้ในการทดลองจะมีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลต่างๆ โดยกำหนดสัญลักษณ์และช่วงของระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลดังนี้ ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 91-95% ใช้สัญลักษณ์ I ไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 85-90% ใช้สัญลักษณ์ II และไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลระหว่าง 76-84% ใช้สัญลักษณ์ III และรูปแบบต่างๆของไคโตซานจะใช้สัญลักษณ์ ดังนี้

เกล็ดไคโตซาน (Chitosan flake) : F

เม็ดไคโตซาน (Chitosan beads) : B

เม็ดไคโตซานที่ทำการเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ (Chitosan-GLA) : G

เม็ดคาร์บอกซิเลตไคโตซาน (Carboxylated chitosan bead) : C

เม็ดอะมิเนตไคโตซาน (Aminated chitosan bead) : A

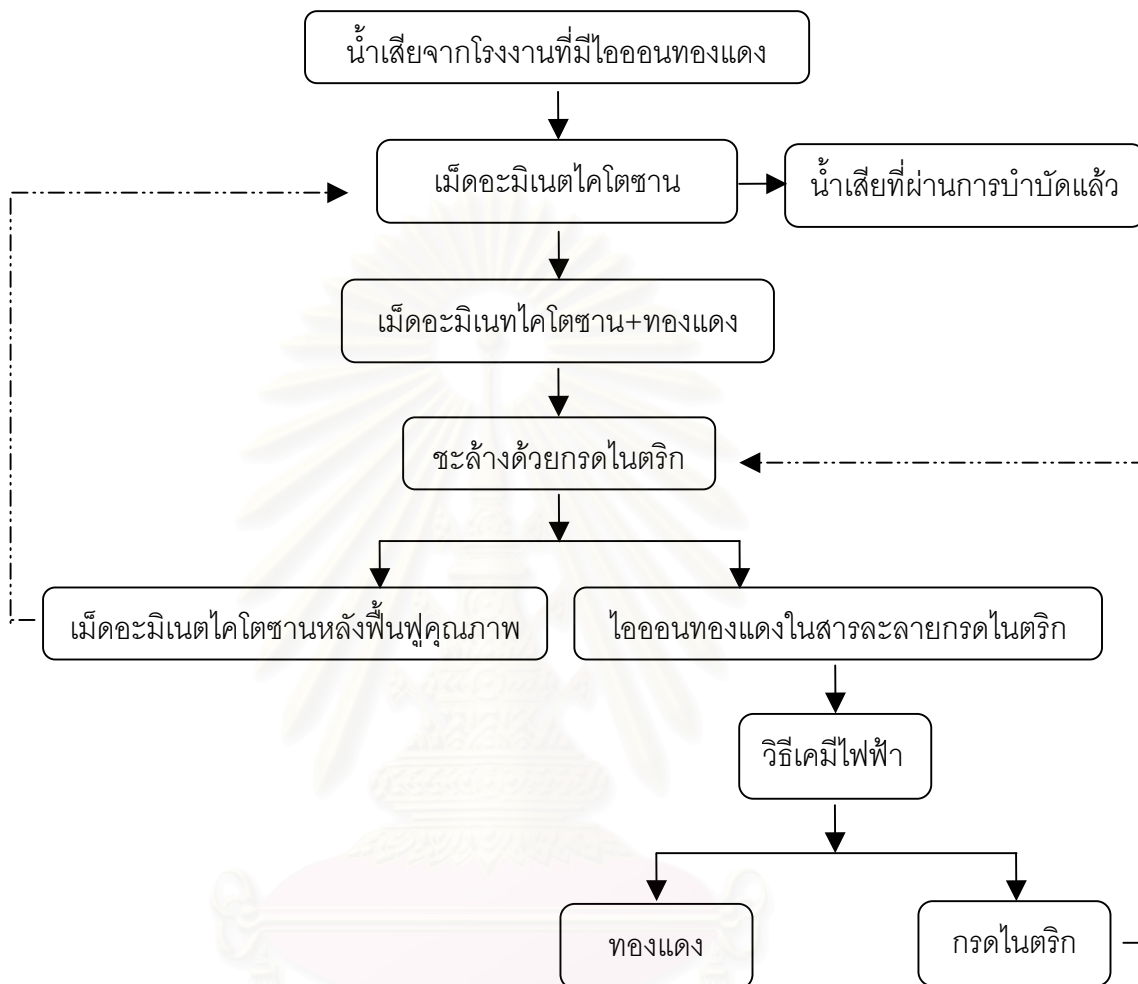
ระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลที่เพิ่มขึ้นแทบจะไม่มีผลต่อการดูดซับเนื่องจากระดับการกำจัดหมู่ของไคโตซานในงานวิจัยนี้ค่อนข้างสูง แต่รูปแบบของไคโตซานที่ต่างกันทำให้ความสามารถในการดูดซับต่างกัน โดยเรียงลำดับได้ดังนี้  $A > B > C > G > F$  ตามลำดับ เม็ดอะมิเนตไคโตซานมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าเกล็ดไคโตซานเนื่องจากเม็ดอะมิเนตไคโตซานมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเกล็ดไคโตซาน

2. พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงสำหรับโคโตซานทุกรูปแบบเท่ากับ 5  
พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมสำหรับเกล็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซาน เท่ากับ 5  
และพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนแคดเมียมสำหรับโคโตซานรูปแบบอื่นๆ เท่ากับ 6
3. เมื่อพีเอชของสารละลายไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมเพิ่มขึ้น ร้อยละการขจัด  
ของโคโตซานเพิ่มขึ้น
4. เมื่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมเพิ่มขึ้น ร้อยละการขจัดของ  
โคโตซานน้อยลง
5. การดูดซับของไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียมสามารถอธิบายได้โดยใช้ไอโซ  
เทอมของแลงเมียร์
6. สำหรับระบบต่อเนื่องเมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ได้  
Breakthrough time ที่เกิดขึ้นสั้นมาก ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ) มากทำให้ช่วงอายุของการ  
ใช้งานของเม็ดอะมิเนตโคโตซานต่ำ
7. เม็ดอะมิเนตโคโตซานที่ผ่านการดูดซับไอออนทองแดงในการศึกษาแบบต่อเนื่อง  
สามารถฟื้นฟูคุณภาพด้วยกรดไนตริกแล้วนำกลับมาใช้ได้อีก แต่ความสามารถในการดูดซับ  
ไอออนทองแดงจะลดลง
8. ไอออนทองแดงที่ได้จากการชะล้างออกจากเม็ดอะมิเนตโคโตซานด้วยกรดไนตริก จะ  
ถูกนำมาศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไนตริกด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะได้  
ทองแดงกลับคืนมาและสารละลายกรดไนตริกสามารถนำกลับไปใช้อีกได้ ซึ่งสามารถเขียนแผน  
ภาพการศึกษาการดูดซับแบบครบวงจรของงานวิจัยนี้ได้ดังรูปที่ 5.1

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพของโคโตซานด้วยการเติมสารเคมีชนิดอื่นๆ  
เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของโคโตซาน
2. ควรทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพของเม็ดโคโตซานในขั้นตอนการขึ้นรูปเม็ดโค  
โตซานเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนแคดเมียม เช่น ลดขนาดของ  
เม็ดโคโตซาน เป็นต้น
3. สารละลายกรดไนตริกที่ใช้ในการล้างทองแดงออกจากเม็ดอะมิเนตโคโตซานมีผลต่อ  
การดูดซับของเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่ฟื้นฟูคุณภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ อาจทดลองโดยใช้สาร  
เคมีชนิดอื่น





สถาบันวิทยบริการ  
 รูปที่ 5.1 แผนภาพการศึกษาการดูดซับแบบครบวงจร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- “จีนซู”ลุ่มน้ำแคดเมียม กรณีศึกษาจาก“ญี่ปุ่น”ถึง“แม่ดาว”. มติชน [Online], 26 เมษายน 2547.  
แหล่งที่มา: [http://www.dmr.go.th/news/6\\_03\\_47\\_2.html](http://www.dmr.go.th/news/6_03_47_2.html) [มกราคม 2548]
- กองทุนสนับสนุนการวิจัย, สำนักงาน., เอกสารประกอบแผนปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาความปลอดภัยด้านสารเคมี. (ม.ป.ท.), 2543.
- เกษม สีดอกบวบ. การกำจัดไอออนโลหะหนักในน้ำเสียโดยไคโตซาน. วิทยานิพนธ์ปริญญา  
มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- จุไรรัตน์ เกิดดอนแฝก. ภัยมืดจากสารพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักอนามัยกรุงเทพมหานคร:สำนัก  
พิมพ์ เค.ยู.บุ๊คเซ็นเตอร์, 2531.
- ฐิติมา มณีกุล. ศึกษาการเตรียมไบโอดีเซลเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ธีรวิทย์ ทับทอง. การดูดซับไอออนโลหะหนักในน้ำเสียด้วยวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งที่ถูกตรึงเป็นเม็ด.  
วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2541.
- บุศรากรณ์ มหาโยธี. การขจัดหมู่อะซิติกในไคตินและสมบัติของไคตินและไคโตแซนในการคีเลต  
เฟอริกไอออน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะ  
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- ประภัสสร สุวัฒน์วารณ. ไคติน-ไคโตซาน [Online]. สถาบันวิจัยและพัฒนา, 2540. แหล่งที่มา:  
[www.gpo.or.th/rdi/html/chitin.html](http://www.gpo.or.th/rdi/html/chitin.html) [มกราคม 2548]
- ปรานอม ชาวเมฆ. คู่มือหลักสูตรเข้มข้นการวิเคราะห์โดยใช้ Fourier Transform Infrared  
Spectrometer. ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
2539.
- เยาวพา ไหวพริบ. การผลิตไคตินและไคโตซานจากเปลือกกุ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต  
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
- เยาวลักษณ์ ศรีสุวรรณ และคณะ. การตกตะกอนอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อกำจัดโลหะหนักในกาก  
ของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2547

รัตเกล้า ภูติวรรณ. การทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มโคโตซานโดยใช้กอลลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

สุชาติ ชินะจิต. อันตรายจากสารเคมี. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2533.

หทัยทัต ชื่อสุวรรณ. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

### ภาษาอังกฤษ

Albers, B. A Modified Langmuir Model of Adsorption: Stability of Flows. [Online]. Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics, 23 May 2003. Available from: <http://www.wias-berlin.de/people/albers> [July, 2004]

Bernadin, F. E. Selecting and Specifying Activated-Carbon-Adsorption Systems. Chemical Engineering. 83 (1976): 77-82.

Cadmium - a problem of the past - a solution for the future. [Online], 1999. Available from: [www.jamesmbrown.co.uk/cd\\_pigments/cadmium.htm](http://www.jamesmbrown.co.uk/cd_pigments/cadmium.htm) [2005,Jan]

Choong, J., and Wolfgang, H. Chemical modification of chitosan and equilibrium study for mercury ion removal. Water Research 37 (2003) 4770-4780.

Daimay, L. V., Norman, B. C., William, G. F., and Jeanette, G. G. The Handbook of Infrared and Raman Characteristic Frequencies of Organic Molecules.

ENSC 4734 Topic VI Sorption Phenomena on soils. [Online]. Available from: <http://soils1.cses.vt.edu/MJE/ENSC4734/Slides/TopicV.pdf>

Evans, J. R., Davids, J. D., and MacRae, A. A., Water Research 36 (2002): 3219.

Export of Marine Products by Country: Fresh and Frozen Shrimp. [Online]. Thai Frozen Foods, Association, (n.d.). Available from: [www.thaifrozen.or.th/fact/sub2\\_fish\\_imp.htm](http://www.thaifrozen.or.th/fact/sub2_fish_imp.htm) [2005,Jan]

Feng, C. W., Ru, L. T., and Ruey, S.J. Comparative adsorption of metal and dye on flake and bead types of Chitosan prepared from fishery wastes. Journal of Hazardous Materials B73 (2000): 63-75.

- Grishan, M. World copper market trends. [Online]. 2000. Available from: <http://www.ifs.ru/body/memo/2000/mar/e060300t.htm> [2005,Jan]
- Hsien, T.-Y., Rorrer, G.-L., Chen, R.-H., and Chen, H.-S. Proceedings of the Third Asia-Pacific Symposium on Chitin and Chitosan. National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan. (1998): 111–120.
- Jha, I. N., Iyengar, L., and Rao, A. V. S. P. Journal of Environment Engineer 114 (1988): 962-974.
- Juang, R. S., Wu, F. C., and Tseng, R. L. Use of chemically modified chitosan beads for sorption and enzyme immobilization. Advances in Environmental Research 6 (2002): 171-177.
- Ke Liang, B.C., Tsai, G., Lee, J., and Fu, W. R. Heterogeneous N-deacetylation of chitin in alkaline solution. Carbohydrate Research 303 (1997): 327-332.
- Knorr, D. Use of chitinous polymers in food. Food Technology 38 (January 1984): 85-97.
- Li Jin., and Renbi, B. Mechanisms of Lead Adsorption on Chitosan/PVA Hydrogel Beads. Langmuir 18 (2002): 9765-9770.
- McKay, G., Blair, H. S., and Findon, A. Industriail Journal Chemical 28A (1989): 356–360.
- Pearson, R. G. Journal of American Chemical Society 85 (1963):3533-3543.
- properties and cadmium ion adsorption capacity of porous chitosan beads. Separation science and technology 30 (1995): 2455-2475.
- Robert, G. A. F., and Taylor, K. E. The formation of gels by reaction of chitosan with glutaraldehyde. Makromolulare Chemie 190 (1989): 951-960.
- Roberts, E. Water Quality Control Handbook. McGraw-Hill, Inc. (1976).
- Rorrer, G. L., Hsien, T.-Y., and Way, J. D. Industail Engineer Chemical Research 32 (1993): 2170
- Schmuhl, R., Krieg, H. M., and Keizer, K. Adsorption of Cu(II) and Cr(VI) ions by chitosan: Kinetics and equilibrium studies, WaterSA 27 (2001).
- Sung-Tao, L., Fwu-Long, M., Yu-Ju, S., and Shin-Shing, S. Equilibrium and kinetic studies of copper(II) ion uptake by chitosan-tripolyphosphate chelating resin. Polymer 42 (2001): 1879-1892

Tzu-Y. H., and Gregory, L. R. Effects of acylation and crosslinking on the material properties and cadmium ion adsorption capacity of porous chitosan beads, Separation Science and Technology 30(1995): 2455-2475.

Wan Ngah W.S. et al., Removal of copper (II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads. Reactive & Functional Polymers 50 (2002): 181-190.

What is copper. [Online]. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Toxicology(ATRDR), September 2004. Available from: [ATSDRIC@cdc.gov](mailto:ATSDRIC@cdc.gov) [2005,Jan]

Whistler, R. S., and Bemiller, J. N. Alkaline degradation of amino sugar. Journal of organic chemistry 27 (1962): 1161-1164.

Wiley, J., Chemogenesis: The Literature References (1976).

Zuoying, C., Huacai, G., Shengli, L. Studies on synthesis and adsorption properties of chitosan cross-linked by glutaraldehyde and Cu(II) as template under microwave irradiation. European Polymer Journal 37 (2001):2141-2143.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



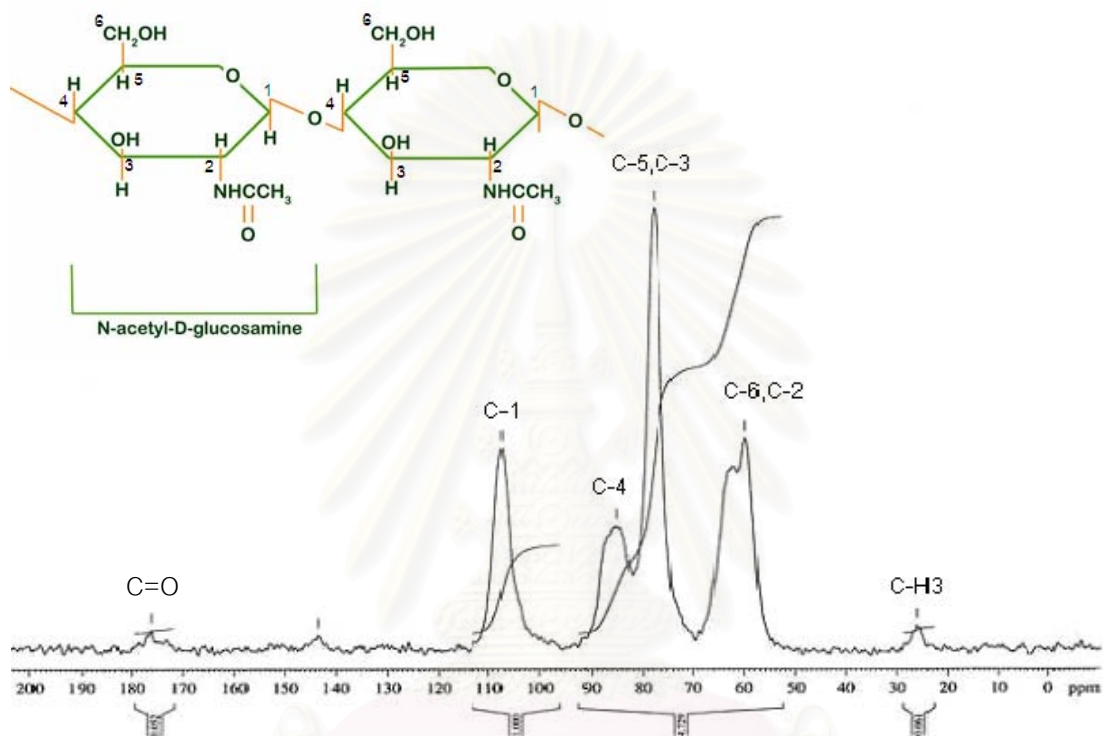
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

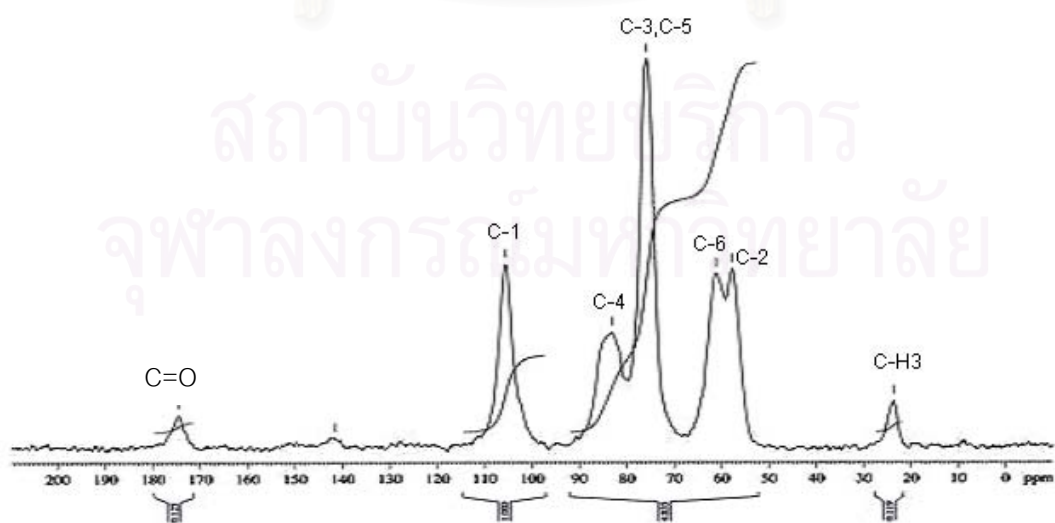
## ภาคผนวก ก

### ผลการวิเคราะห์การกำจัดหมู่แอสทิลของโคโตซาน

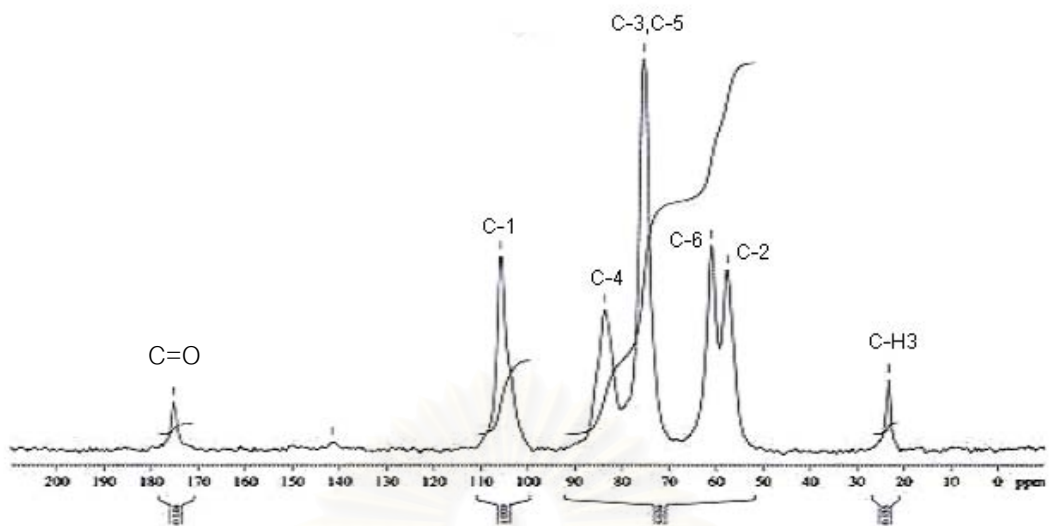
รูปที่ ก.1.1 ถึง ก.1.3 แสดงระดับการกำจัดหมู่แอสทิลของโคโตซาน ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ Nuclear Magnetic Resonance (NMR)



รูปที่ ก.1.1 การกำจัดหมู่แอสทิลของโคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (I)



รูปที่ ก.1.2 การกำจัดหมู่แอสทิลของโคโตซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (II)



รูปที่ ก.1.3 การกำจัดหมู่แอลเซทิลของโคโคซานที่เตรียมจากเปลือกกุ้งกุลาดำ (III)

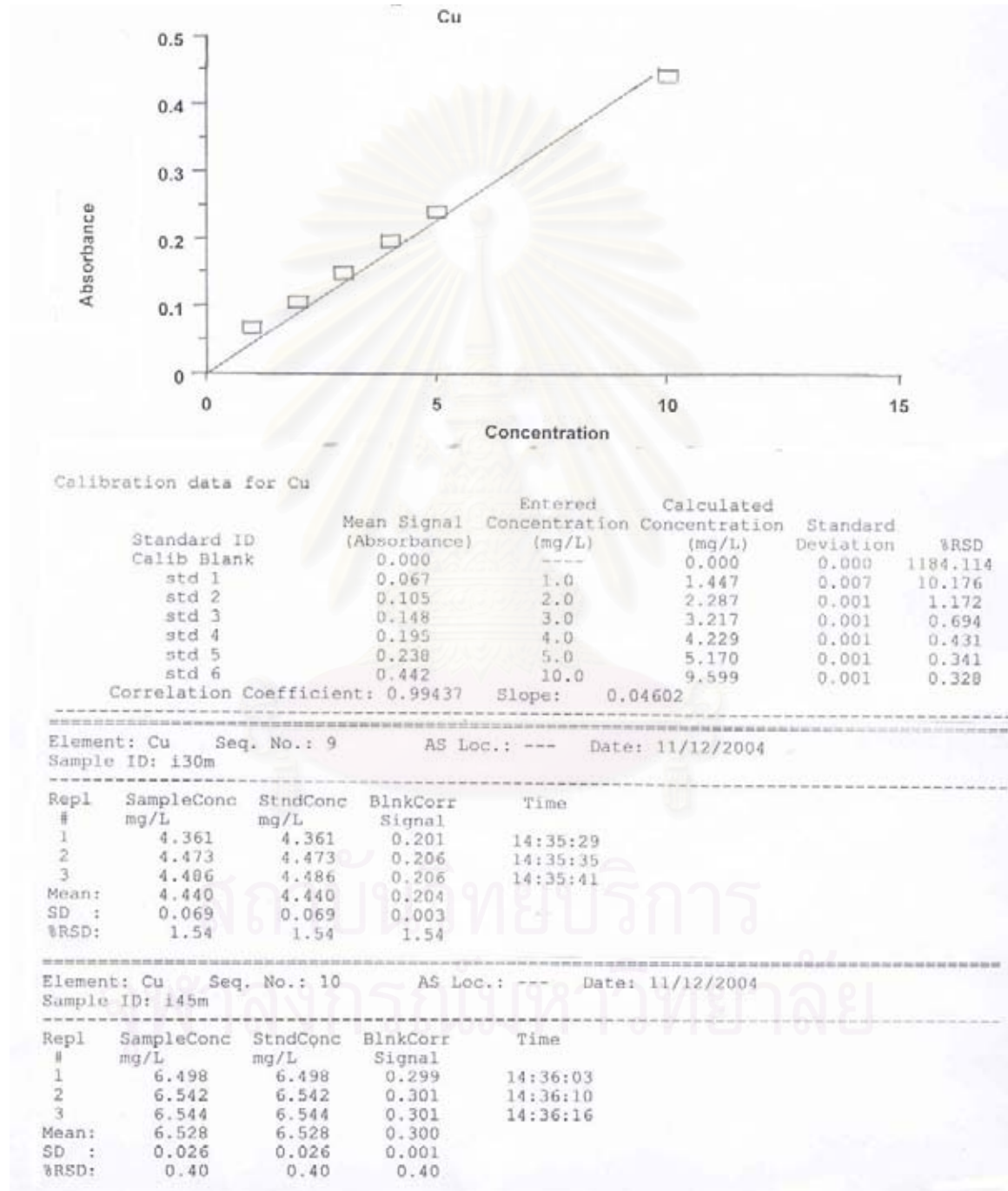
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



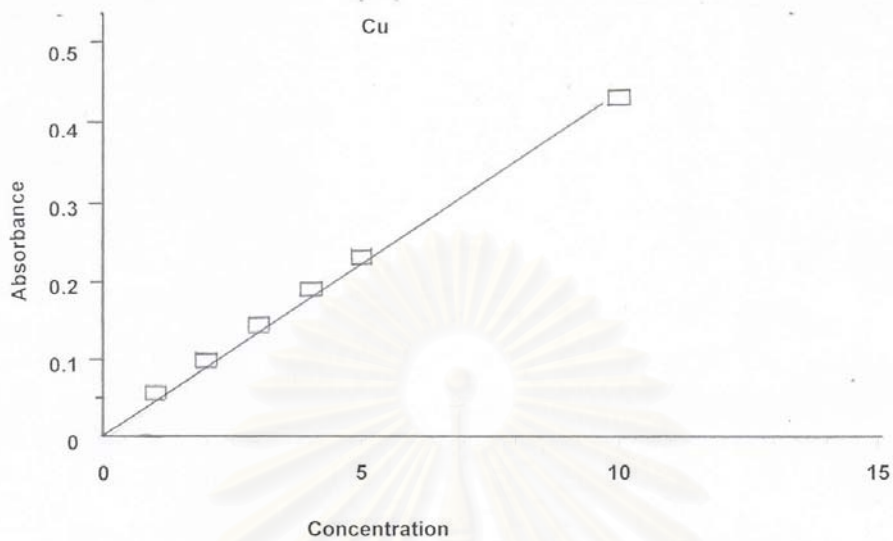
ภาคผนวก ข

ตัวอย่างข้อมูลการวัดปริมาณไอออนโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอภชันสเปกโตรมิเตอร์และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

การทดลองครั้งที่ 1



## การทดลองครั้งที่ 2



Calibration data for Cu

Standard ID	Mean Signal (Absorbance)	Entered Concentration (mg/L)	Calculated Concentration (mg/L)	Standard Deviation	%RSD
Calib Blank	0.000	---	0.000	0.000	63.762
std 1	0.057	1.0	1.276	0.001	0.980
std 2	0.099	2.0	2.196	0.001	0.343
std 3	0.143	3.0	3.174	0.001	0.448
std 4	0.189	4.0	4.210	0.001	0.359
std 5	0.233	5.0	5.167	0.000	0.188
std 6	0.436	10.0	9.682	0.001	0.222

Correlation Coefficient: 0.99687    Slope: 0.04500

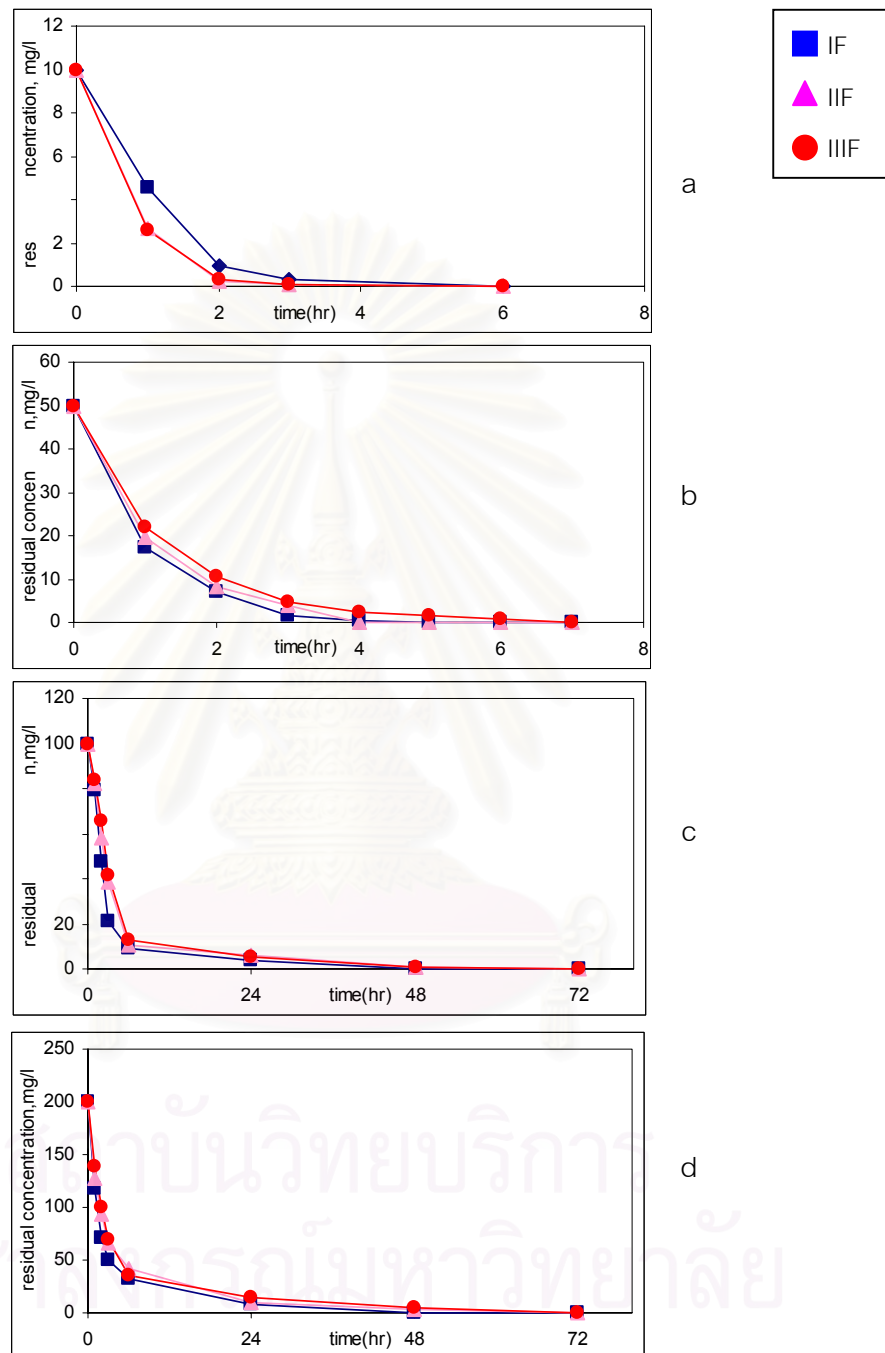
Element: Cu    Seq. No.: 11    AS Loc.: ---    Date: 11/22/2004  
 Sample ID: i30m

Repl #	Sample Conc mg/L	Stnd Conc mg/L	Blk Corr Signal	Time
1	6.475	6.475	0.291	13:45:47
2	6.452	6.452	0.290	13:45:52
3	6.496	6.496	0.292	13:45:56
Mean:	6.475	6.475	0.291	
SD :	0.022	0.022	0.001	
%RSD:	0.34	0.34	0.34	

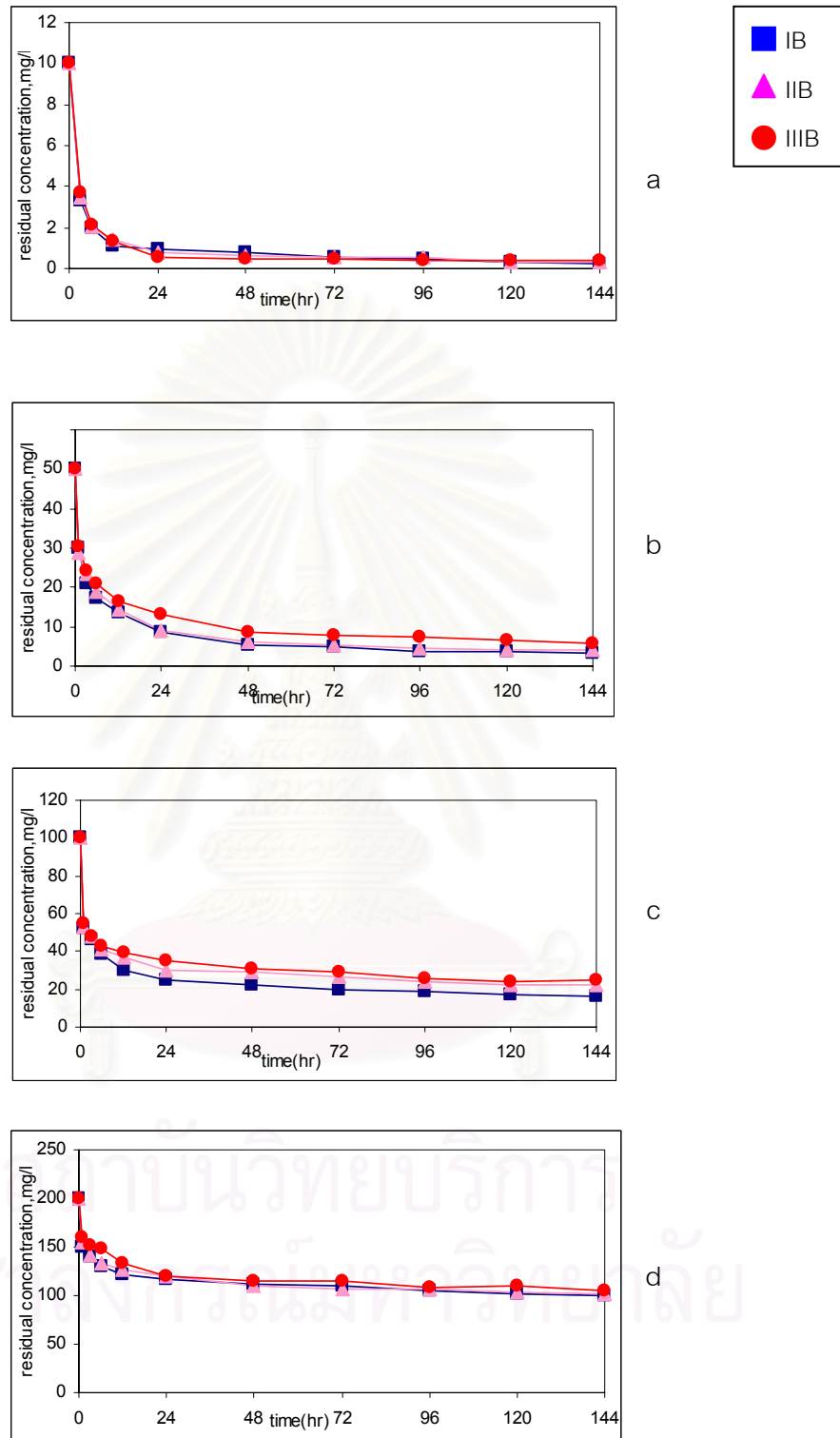
Element: Cu    Seq. No.: 54    AS Loc.: ---    Date: 11/22/2004  
 Sample ID: i45m

Repl #	Sample Conc mg/L	Stnd Conc mg/L	Blk Corr Signal	Time
1	7.424	7.424	0.334	13:46:14
2	7.419	7.419	0.334	13:46:20
3	7.394	7.394	0.333	13:46:24
Mean:	7.412	7.412	0.334	
SD :	0.016	0.016	0.001	
%RSD:	0.22	0.22	0.22	

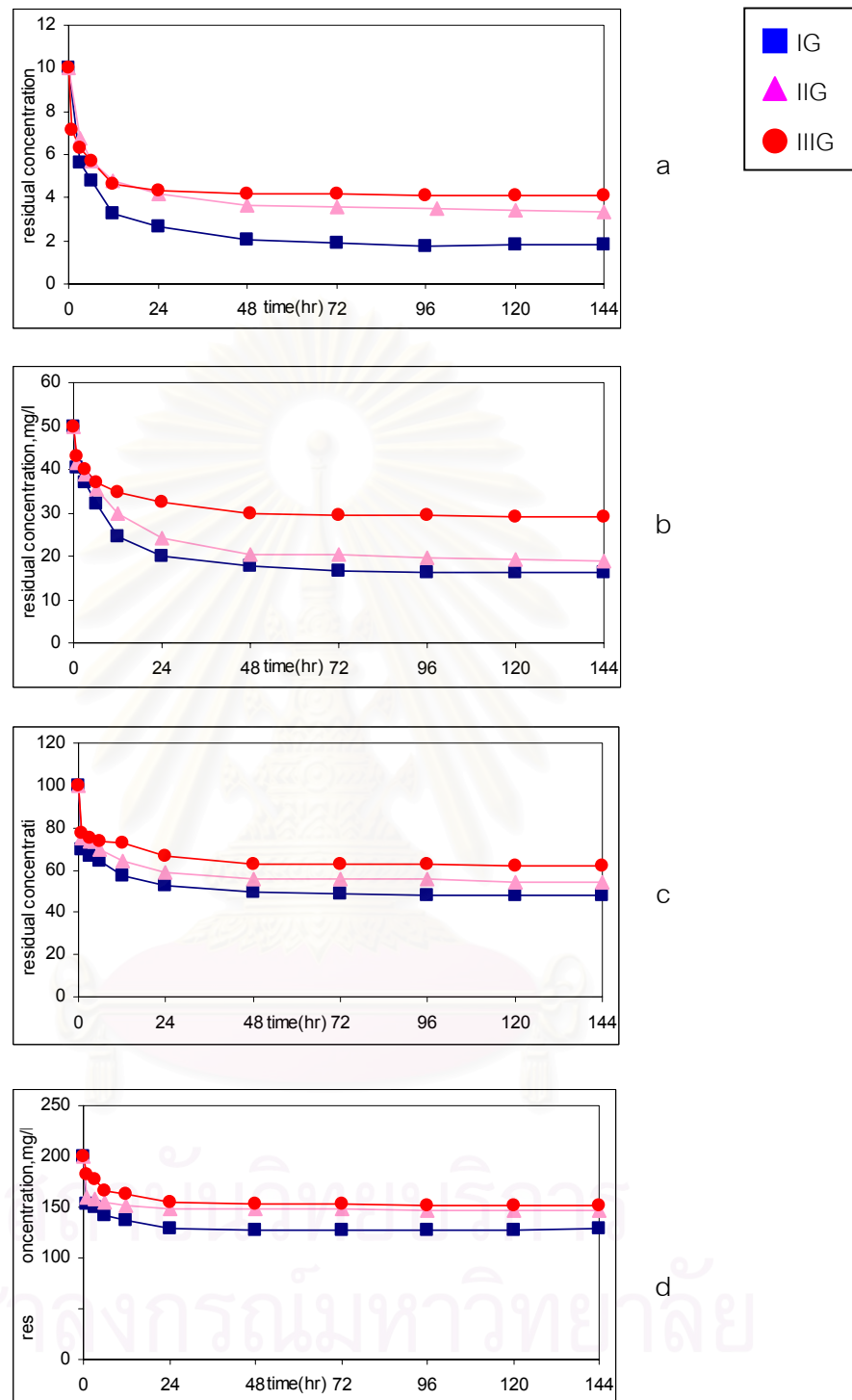
ผลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโคโตซานรูปแบบต่างๆ ที่พีเอช 5 ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลและความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่างกัน



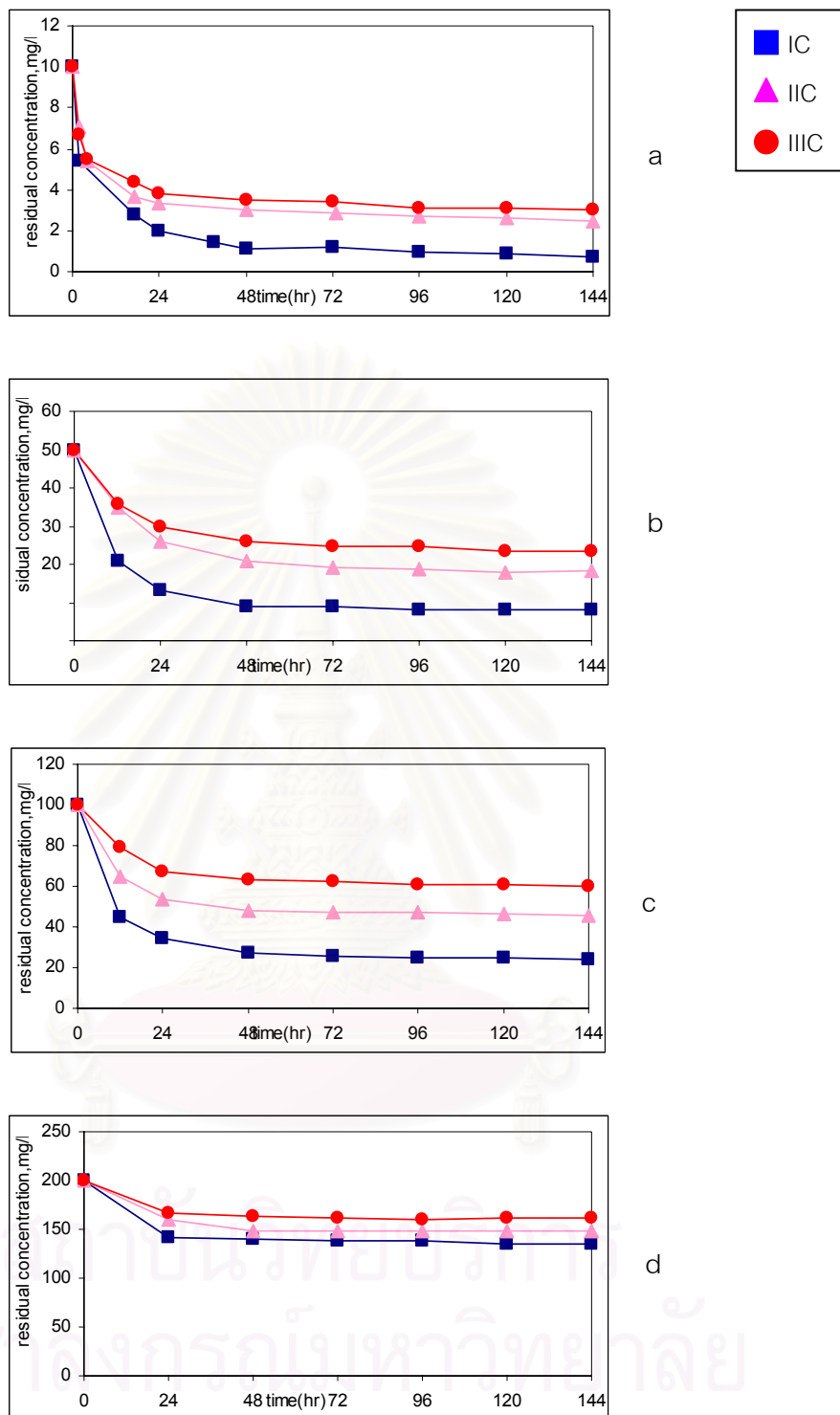
รูปที่ ข.1 เวลาที่สมดุลของเกล็ดโคโตซาน ที่พีเอช 5 เกล็ดโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน



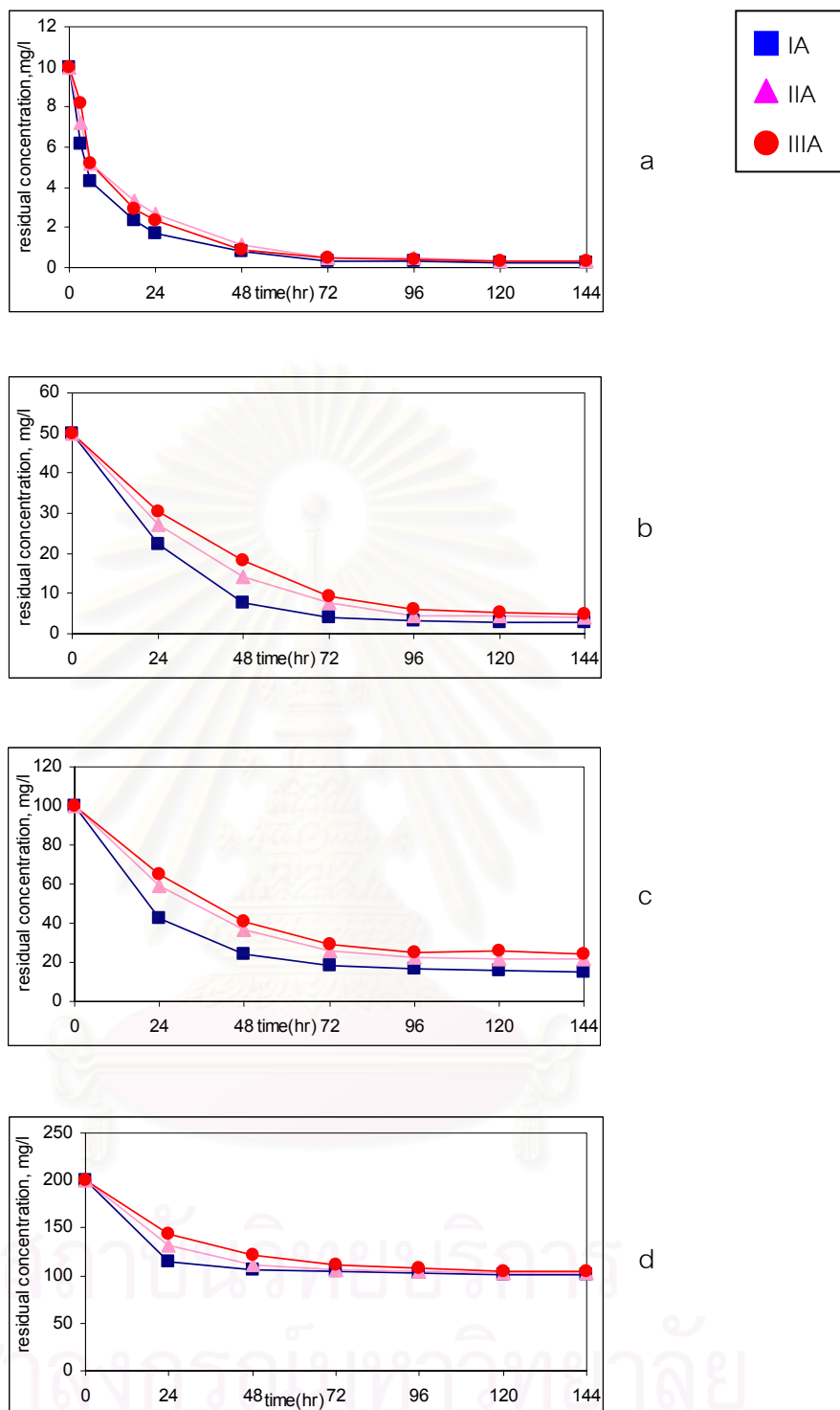
รูปที่ ข.2 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซาน ที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน



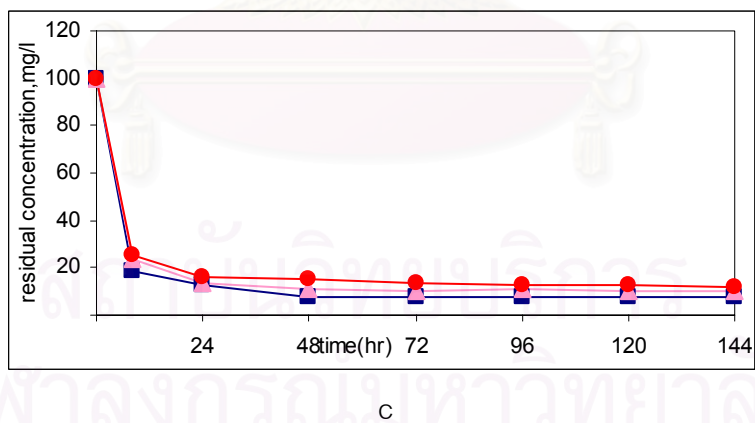
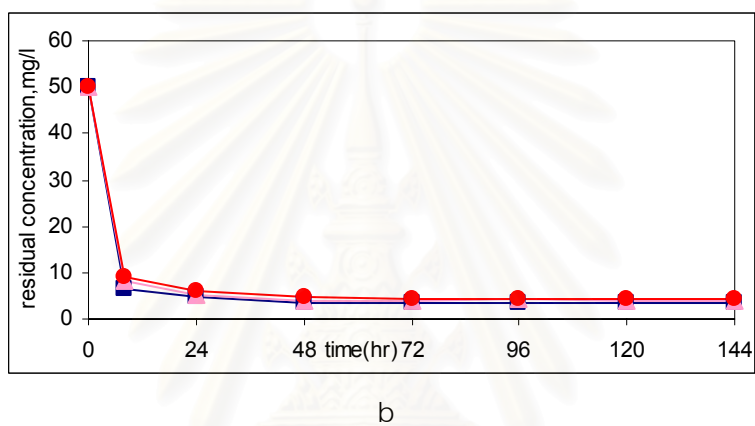
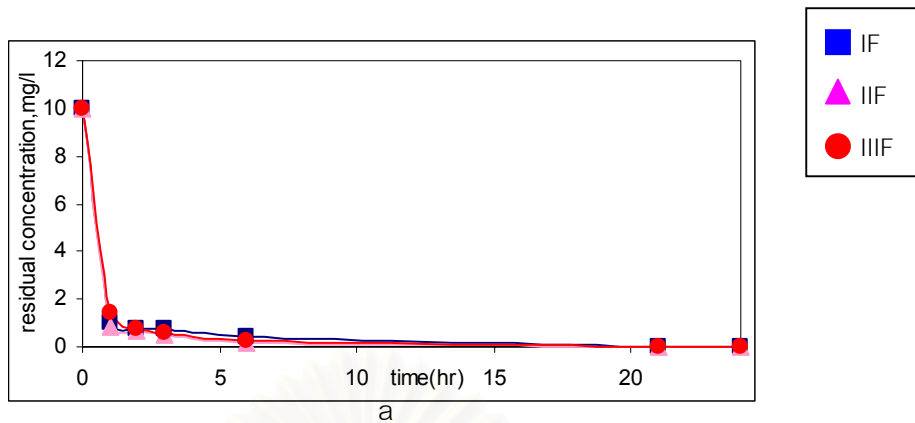
รูปที่ ข.3 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตาร์ลดีไฮด์ที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน



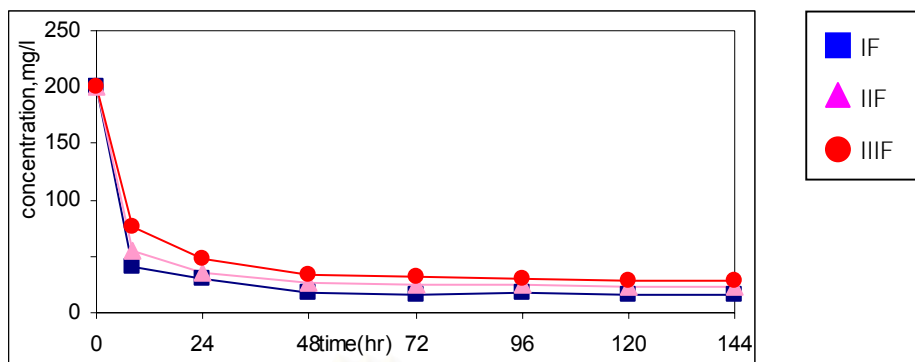
รูปที่ ข.4 เวลาที่สมดุลของเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตะซานที่พีเอช 5 ปริมาณโคโตะซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน



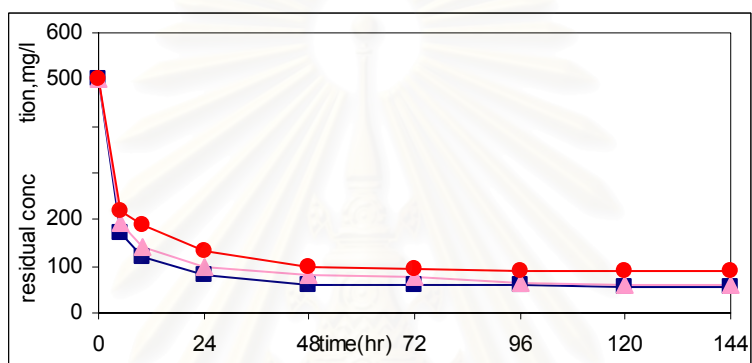
รูปที่ 1.5 เวลาที่สมดุลของเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอสซิติลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดงเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน







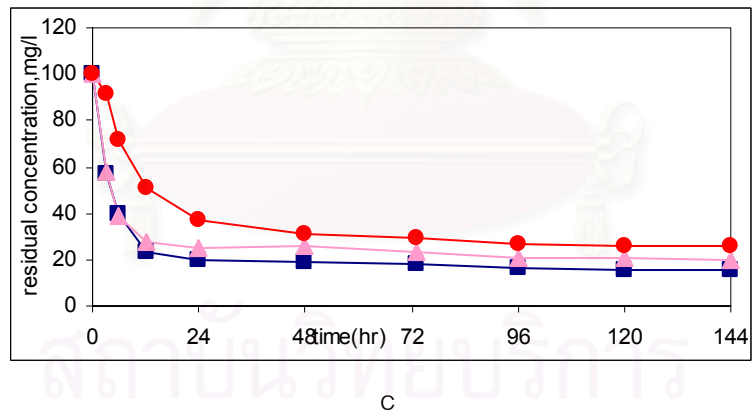
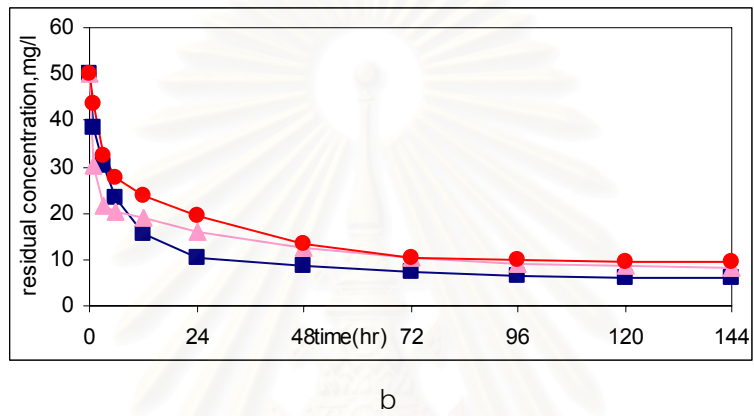
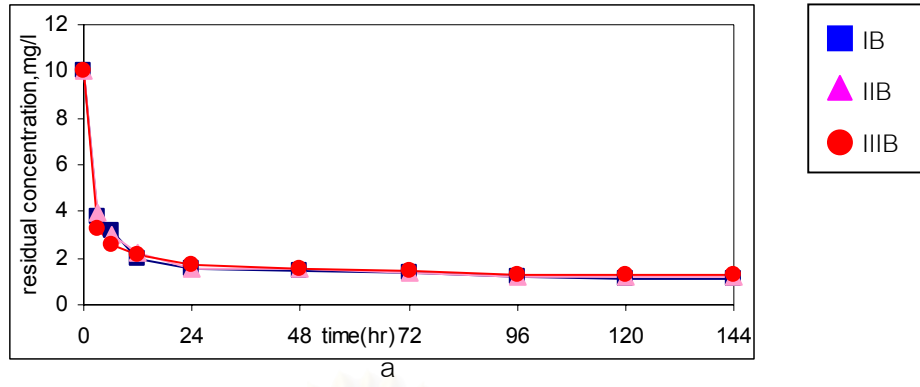
d

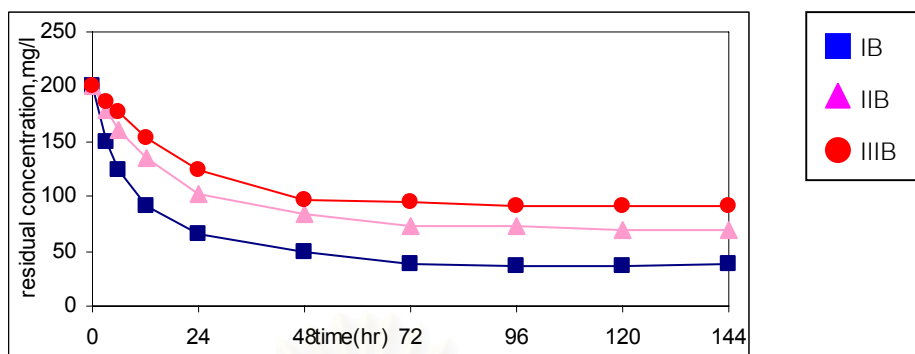


e

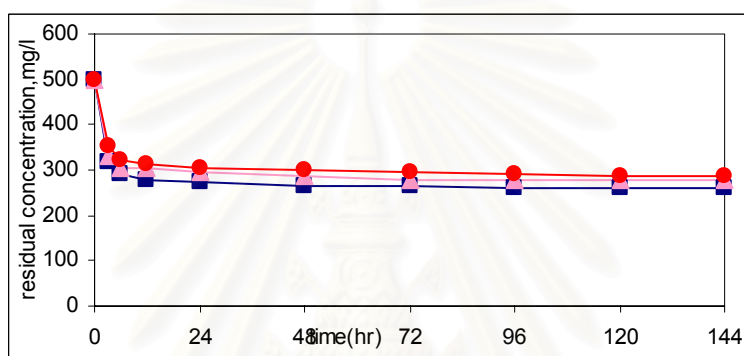
รูปที่ ข.6 เวลาที่สมดุลของเกล็ดโคโคซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโคซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





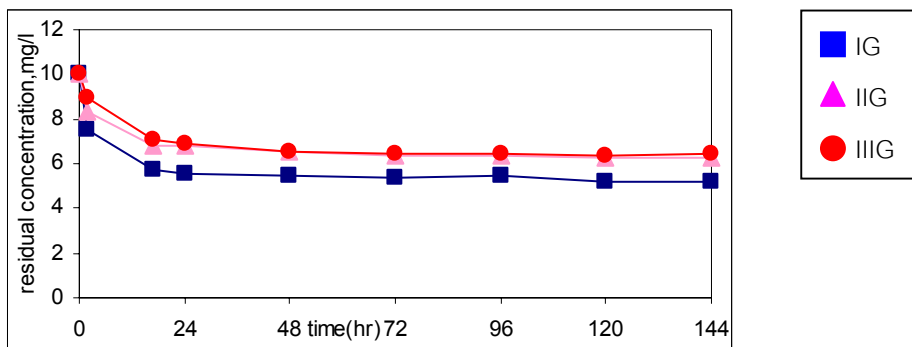
d



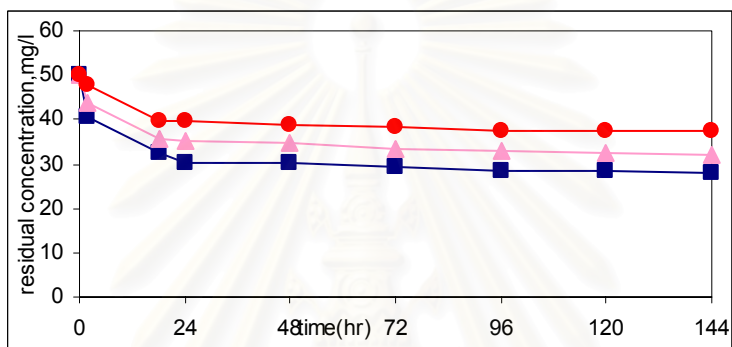
e

รูปที่ ข.7 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานที่พีเอช 5 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน

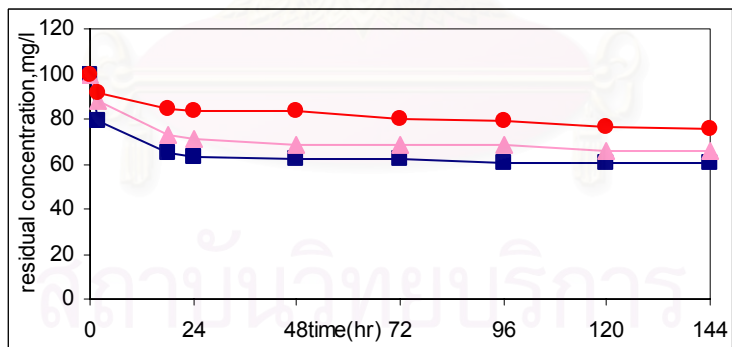
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a

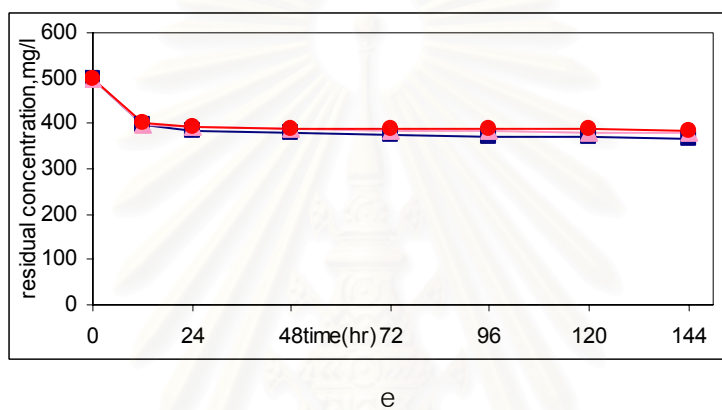
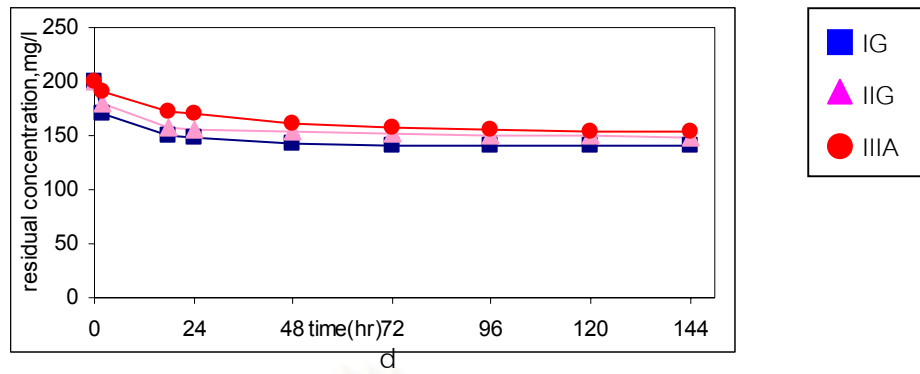


b



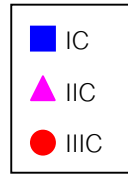
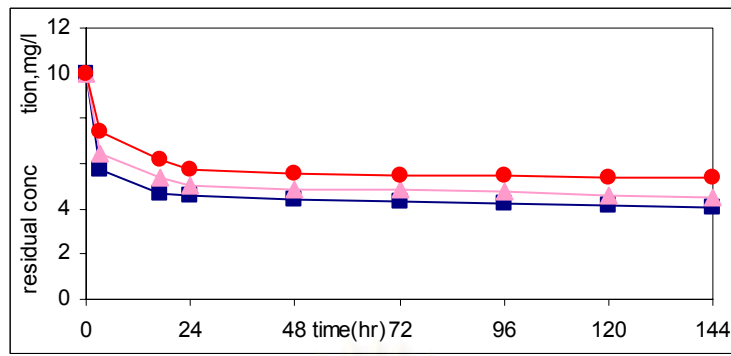
c

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

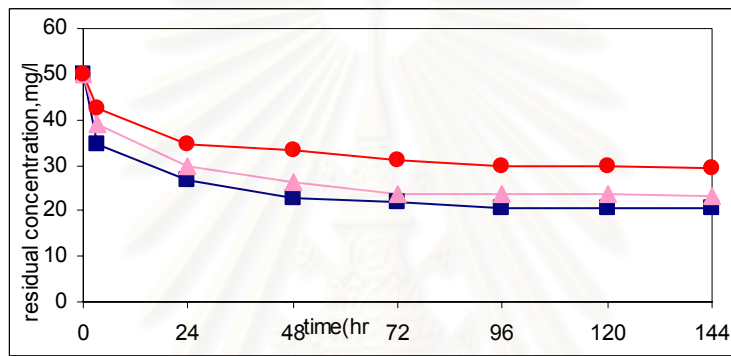


รูปที่ ข.8 เวลาที่สมดุลของเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกอลลูตารัลดีไฮด์ที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอสซิติลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน

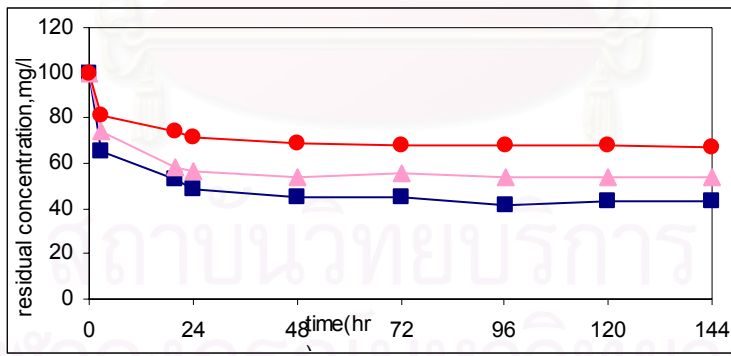
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



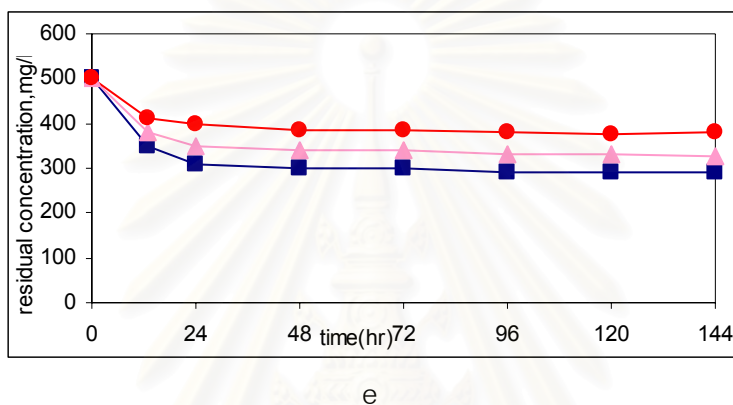
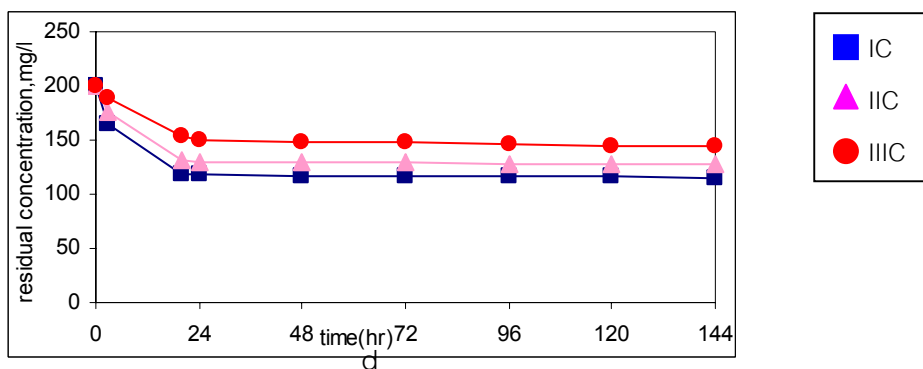
a



b

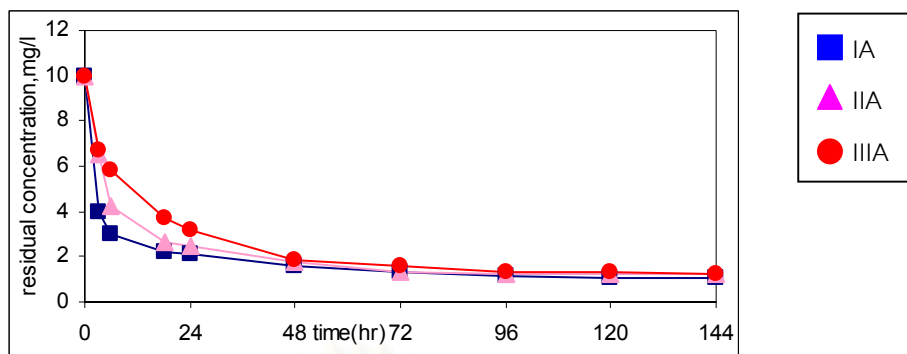


c

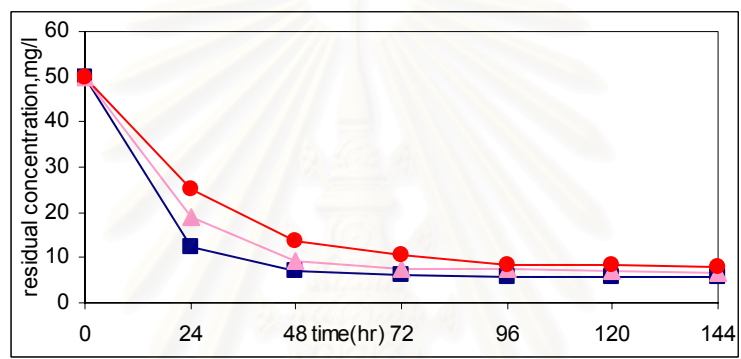


รูปที่ ข.9 เวลาที่สมดุลของเม็ดคาร์บอกซิเลตโคโตซานที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน

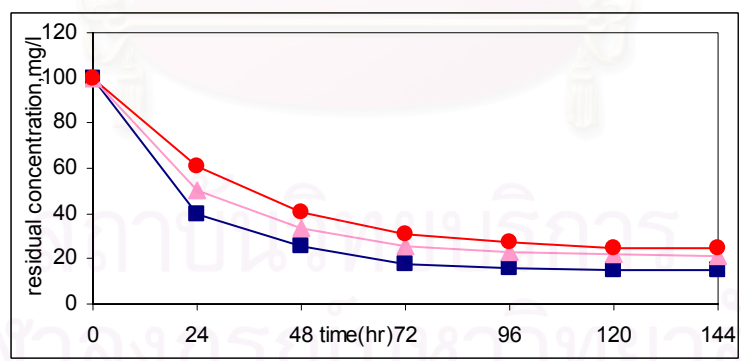
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



a

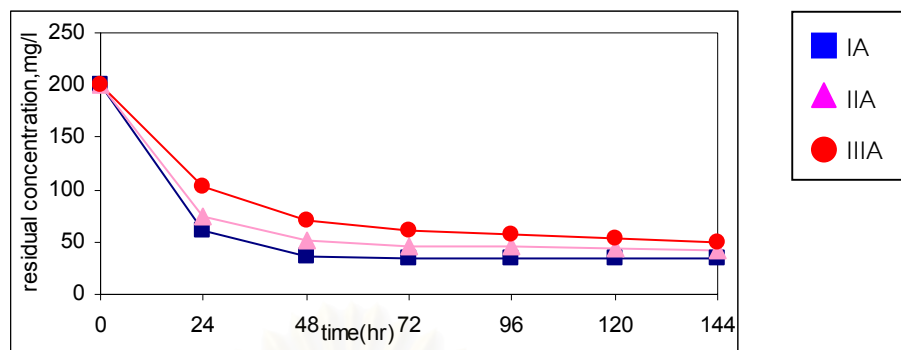


b

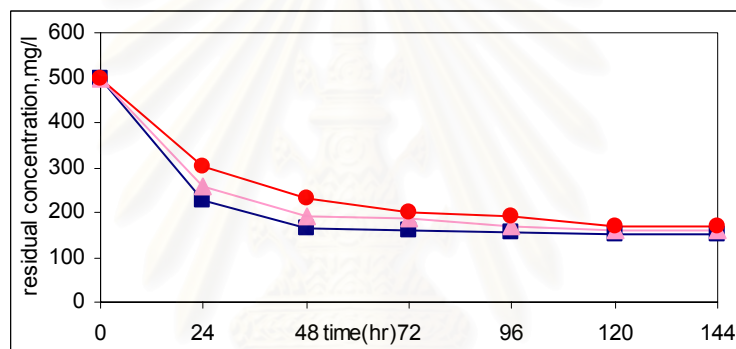


c





d



e

รูปที่ ข.10 เวลาที่สมดุลของเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่พีเอช 6 เม็ดปริมาณโคโตซาน 1 กรัม ระดับการกำจัดหมู่แอมเทิลต่างๆ แปรค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนแควดเมียมเริ่มต้น (a) 10 ส่วนในล้านส่วน (b) 50 ส่วนในล้านส่วน (c) 100 ส่วนในล้านส่วน (d) 200 ส่วนในล้านส่วน (e) 500 ส่วนในล้านส่วน

### ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตนานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ I ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	IF	IB	IG	IC	IA
1	-	-	24.7	39.98	54.95
3	6.33	69.48	39.34	58.79	74.55
5	6.33	97.67	81.88	93	97.9
7	4.58	73.3	46.87	64.01	79.5

ตารางที่ ค.2 ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตนานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ II ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	IIF	IIB	IIG	IIC	IIA
1	-	-	22.89	37	56.76
3	5.92	64.82	39.23	52.22	68.19
5	6.29	96.89	64.57	75.13	96.99
7	5.60	69.96	41.4	54.54	74.2

ตารางที่ ค.3 ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตนานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ III ความเข้มข้นของสารละลายไอออนทองแดง 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	IIIF	IIIB	IIIG	IIIC	IIIA
1	-	-	20.17	31.01	50.79
3	6.16	63.77	36.4	49.65	69.13
5	6.27	95.95	58.98	70.15	96.95
7	5.50	67.99	40.56	54.6	72.93

ตารางที่ ค.4 ร้อยละการขจัดทองแดงแคดเมียมที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ I ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	F	B	G	C	A
1	-	-	6.66	13.08	15.5
3	1.62	57.88	13.3	27.13	29.7
5	6.33	88.62	13.59	37.19	48.1
6	6.33	76.94	37.79	49.29	89.5

ตารางที่ ค.5 ร้อยละการขจัดทองแดงแคดเมียมที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ II ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	F	B	G	C	A
1	-	-	11.38	12.99	13.9
3	2.00	59.95	18.2	24.99	28
5	6.23	87.79	20	31.67	39.5
6	4.53	80.84	27.39	41.71	87.9

ตารางที่ ค.6 ร้อยละการขจัดไอออนทองแดงที่พีเอชต่างๆและใช้โคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่ III ความเข้มข้นของสารละลายไอออนแคดเมียม 10 ส่วนในล้านส่วน

pH	F	B	G	C	A
1	-	-	9.97	7.43	8.6
3	2.43	72.99	16.99	18.44	26.5
5	6.16	87.08	17.67	24.49	35.6
6	4.06	75.73	26.68	35.26	87.7

ตารางที่ ค.7 ผลการศึกษาการแยกทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกโดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการนำกลับคืนของทองแดง (% Recovery)	
	อัตราการไหลการไหลของน้ำเสีย 1±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที	อัตราการไหลการไหลของน้ำเสีย 8.5±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที
0.17	3.96	4.73
0.25	4.99	5.96
0.33	5.48	6.54
0.50	6.38	7.62
0.75	7.89	9.42
1.00	9.43	11.25
1.50	11.80	13.55
2.00	16.15	17.36
3.00	20.56	23.91
4.00	26.30	29.96
5.00	30.05	35.23
6.00	35.13	41.28
9.00	44.84	51.82
12.00	51.46	60.50
22.00	67.77	78.68
24.00	71.95	81.74
28.00	77.32	86.60
30.00	79.94	89.19
32.00	82.20	90.80
34.00	84.78	92.89
48.00	93.10	98.16
50.00	94.42	98.51
52.00	95.31	98.84
54.00	95.96	98.70

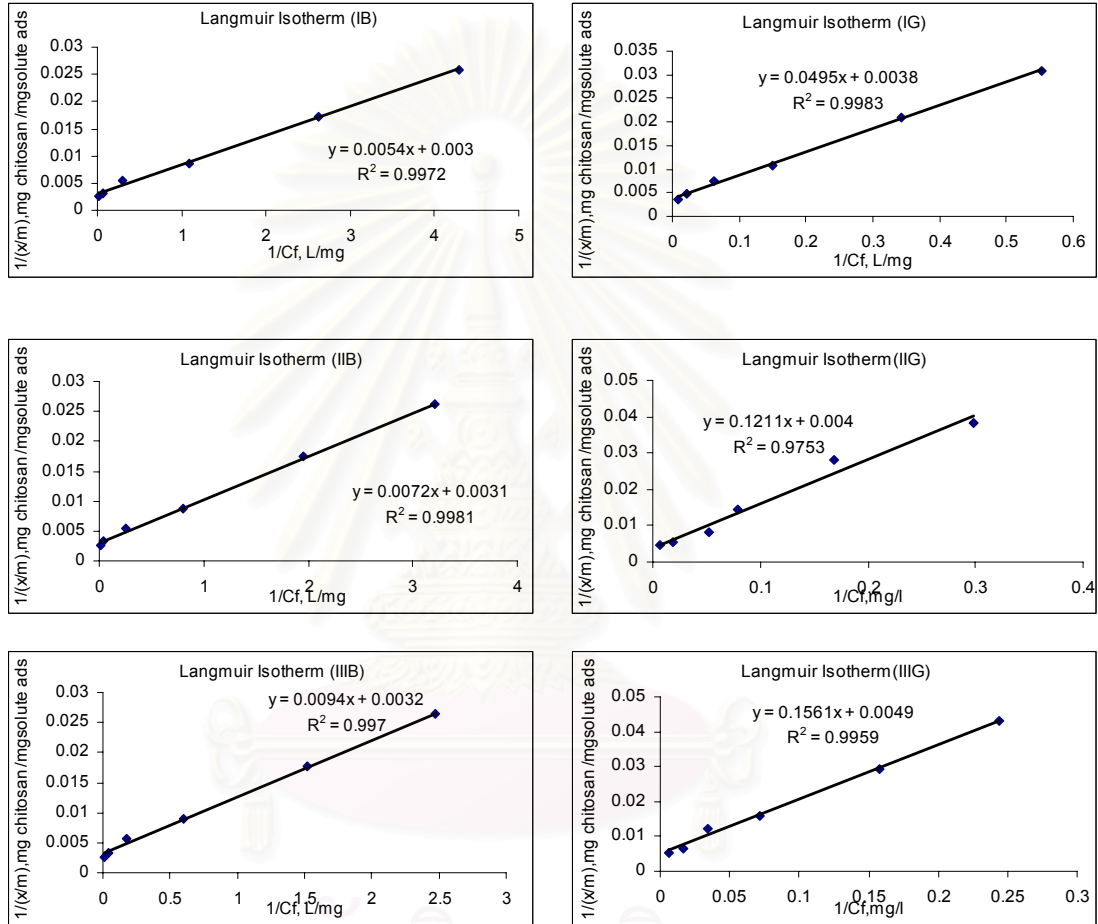
ตารางที่ ค.7(ต่อ) ผลการศึกษาการแยกทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกโดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้า

เวลา (ชั่วโมง)	ร้อยละการนำกลับคืนของทองแดง (% Recovery)	
	อัตราการไหลการไหลของน้ำเสีย 1±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที	อัตราการไหลการไหลของน้ำเสีย 8.5±0.05 มิลลิลิตรต่อนาที
56.00	96.68	98.88
58.00	97.72	99.18
60.00	98.43	98.14
62.00	98.92	98.16
64.00	99.16	98.45
66.00	99.40	98.73

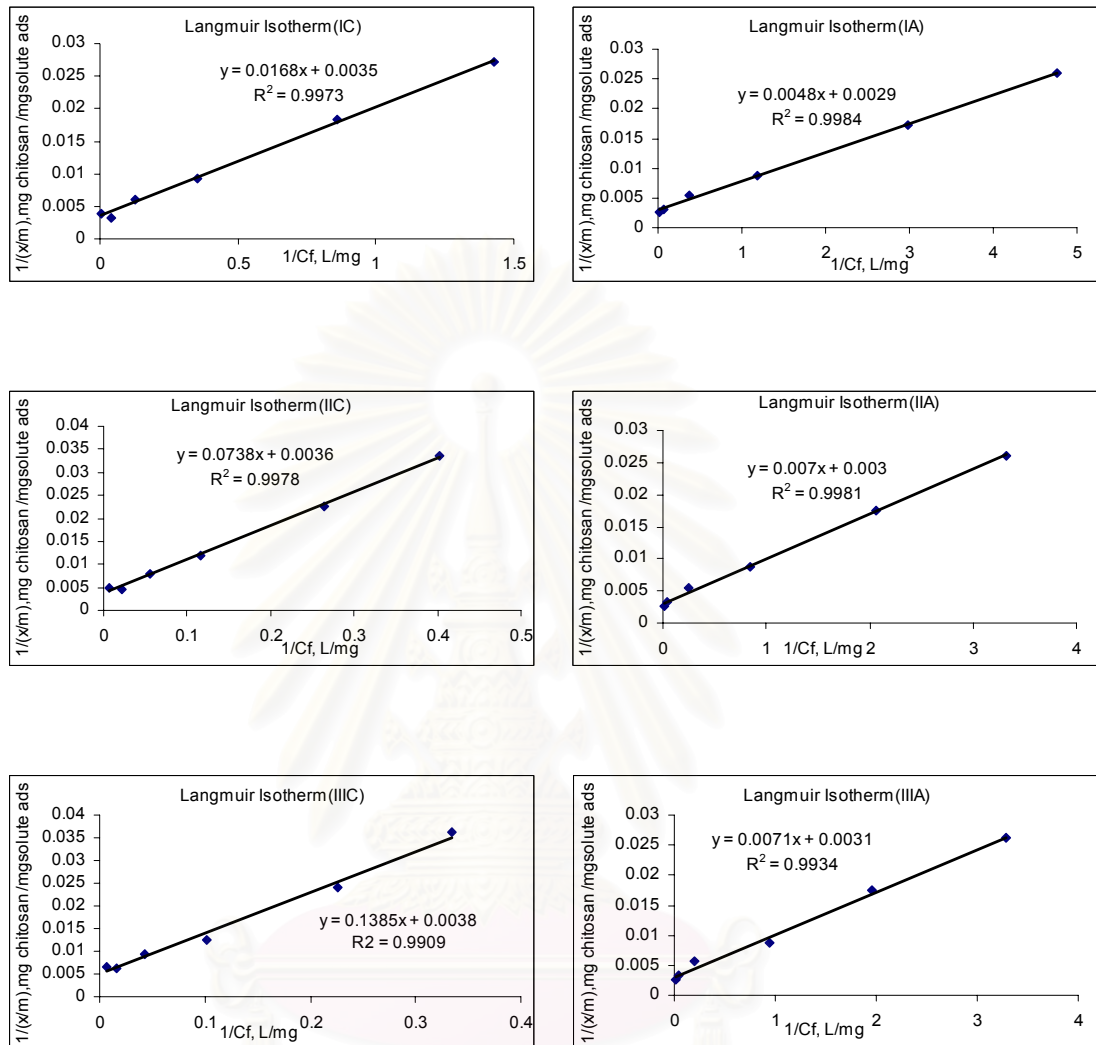
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

แลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงโดยไคโตซานรูปแบบต่างๆ ที่ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน

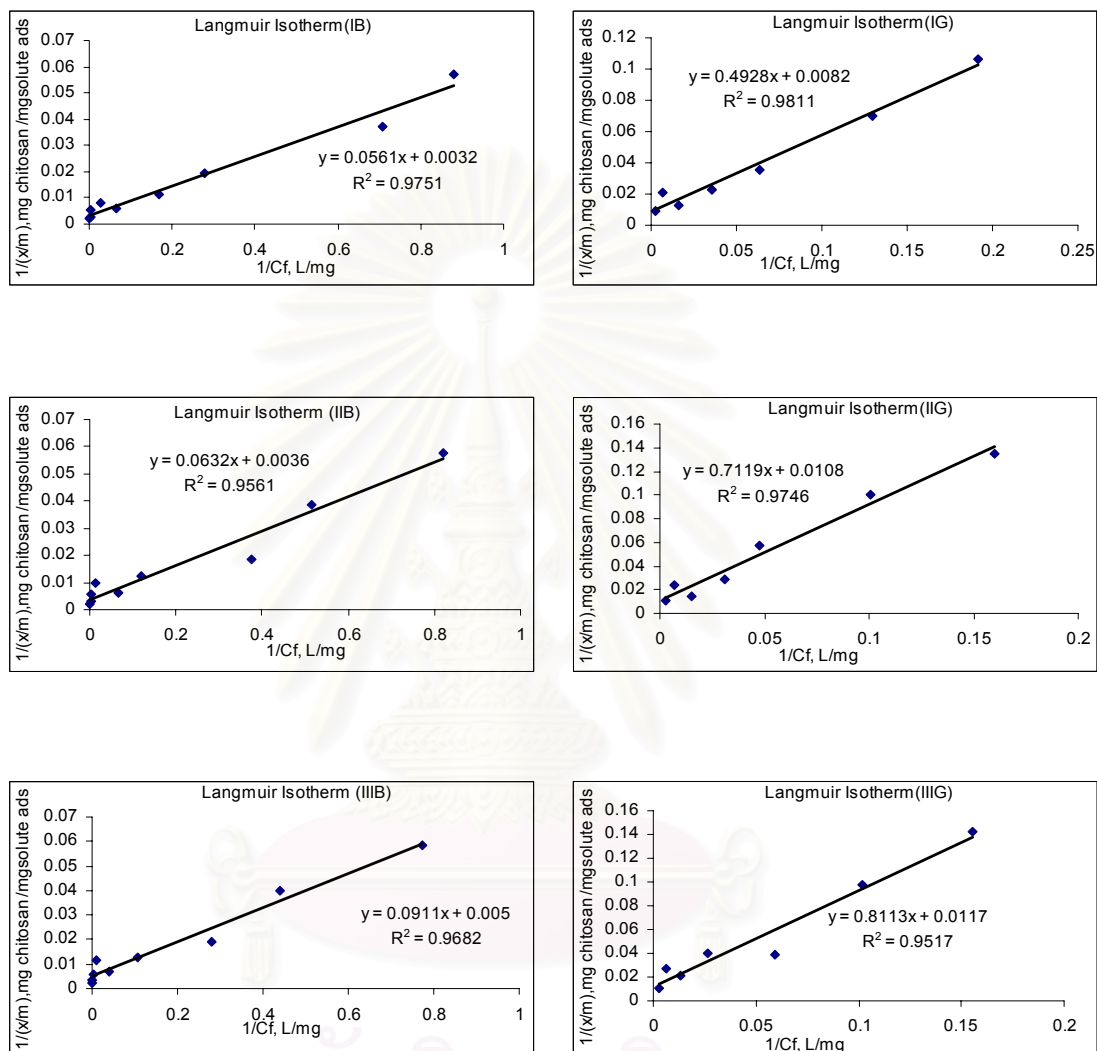


รูปที่ ง.1 สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตาไรลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน



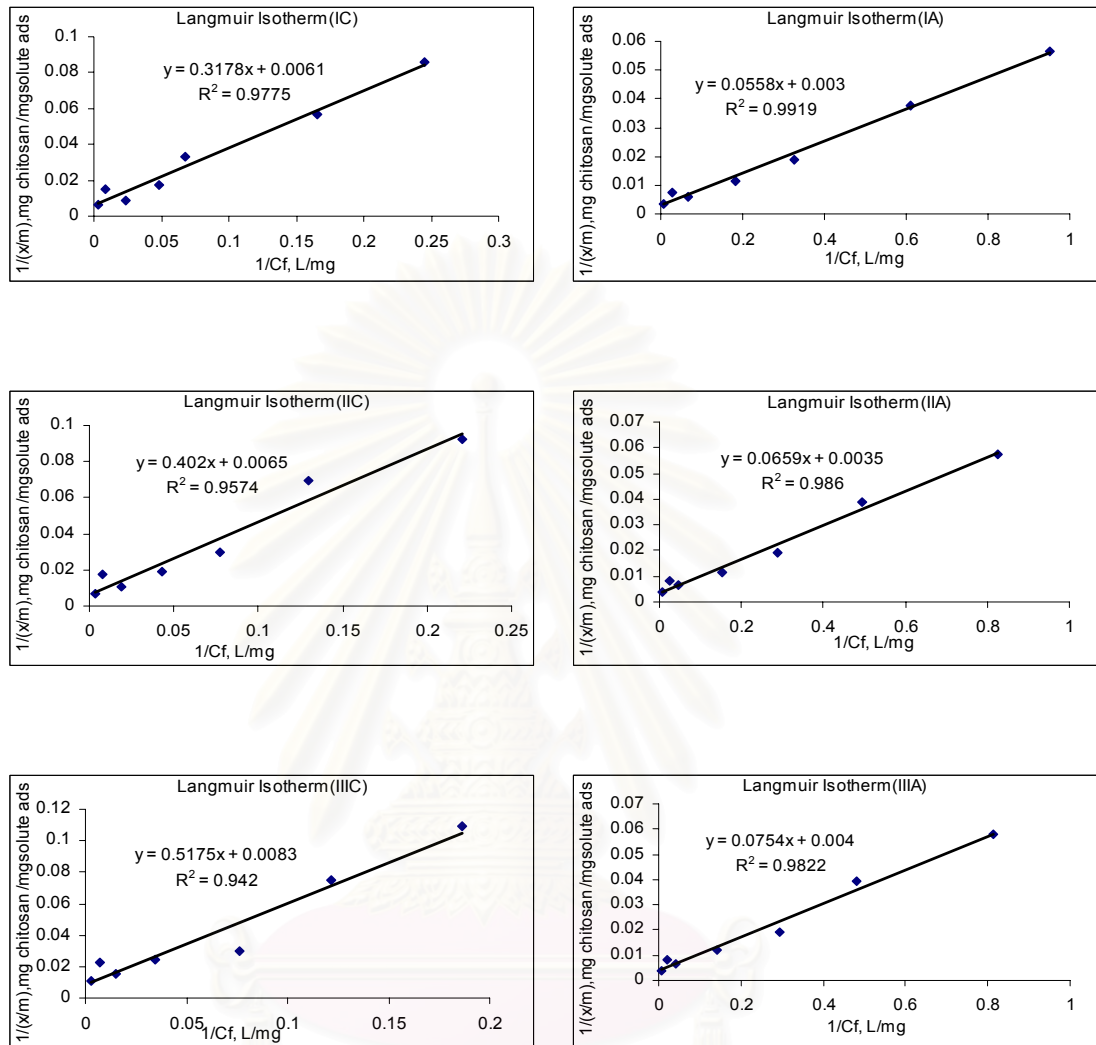
รูปที่ ๒.2 สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดคาร์บอนกัมพูชาโคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน

แปลงเมียร์ไอโซเทอมของการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยไคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน



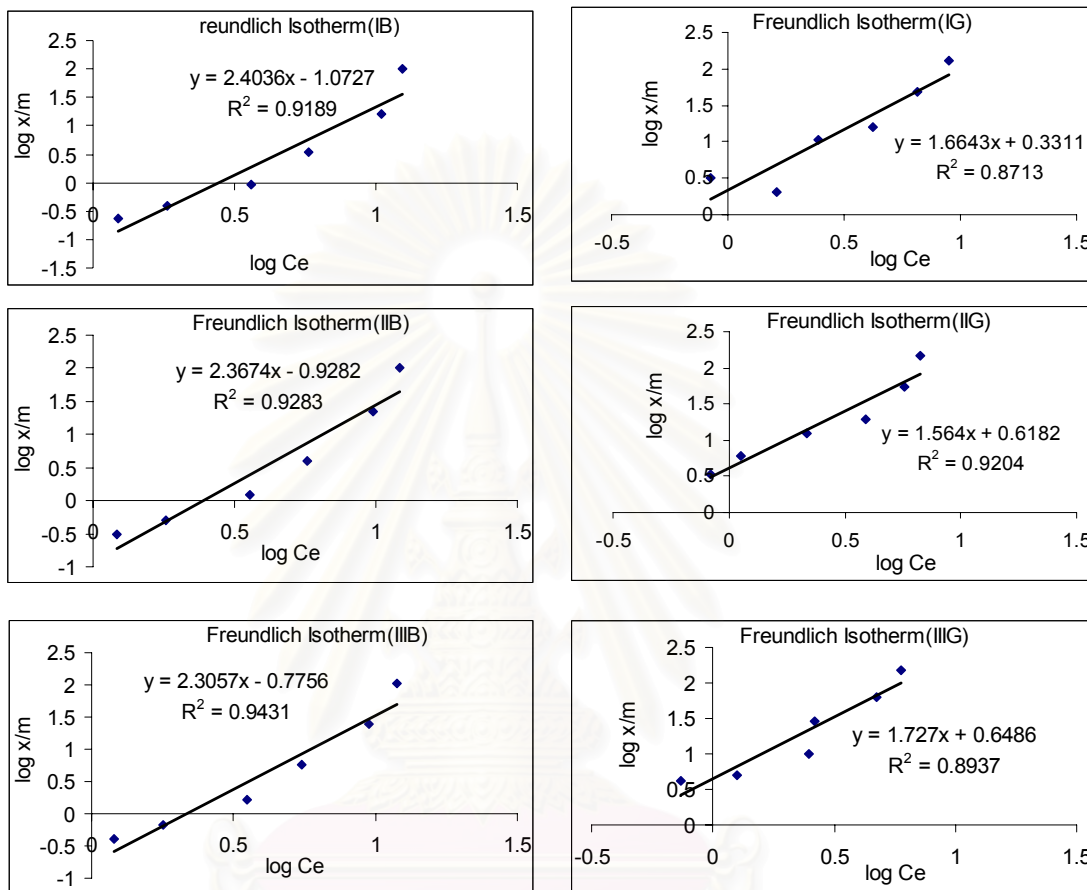
รูปที่ 3.3 สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน





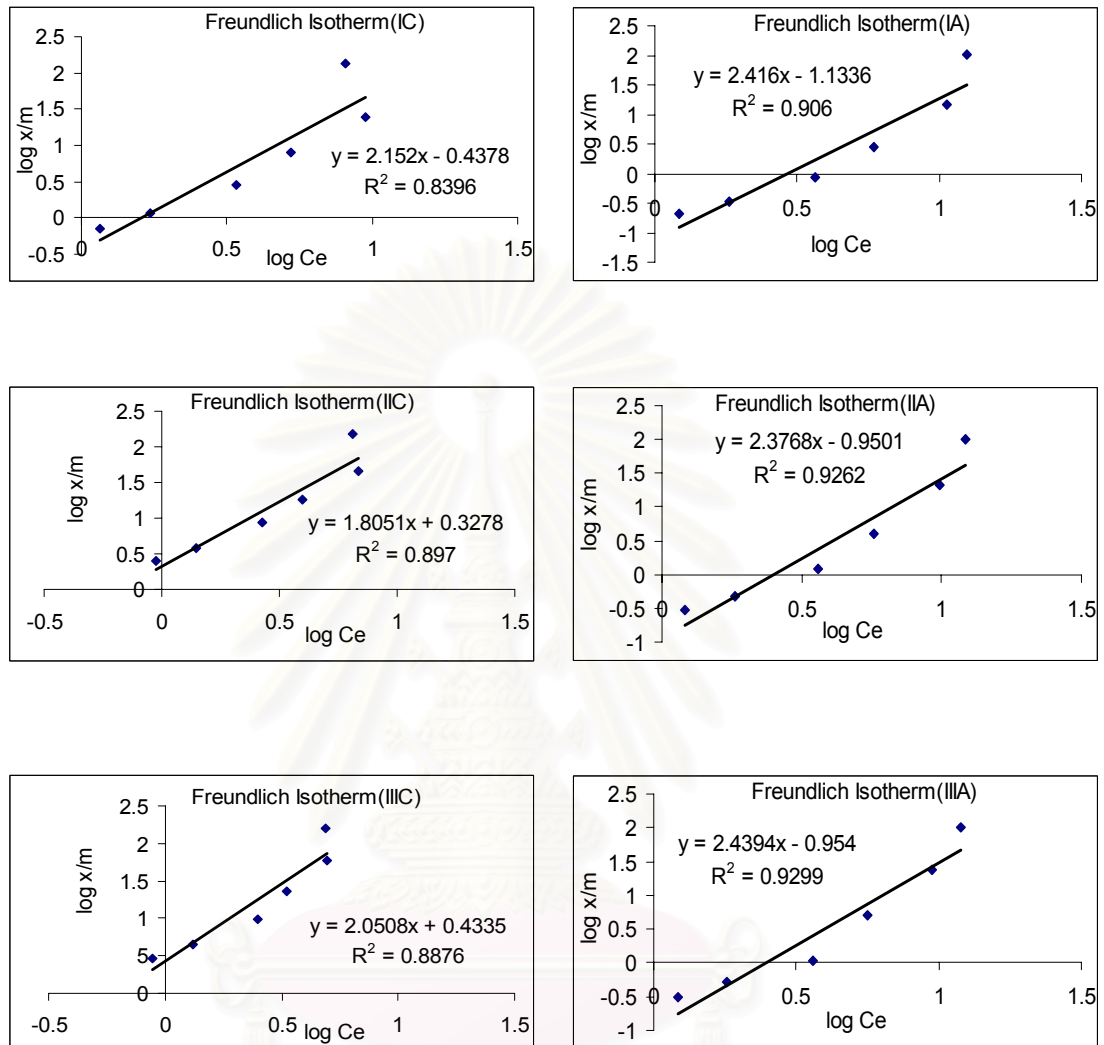
รูปที่ 4.4 สมการการดูดซับของแลงเมียร์สำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดคาร์บอนกัมไลดโคโคซานและเม็ดอะมิเนตโคโคซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลต่างกัน

พหุนดลชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนทองแดงโดยโคโตซานรูปแบบต่างๆ ที่ระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน



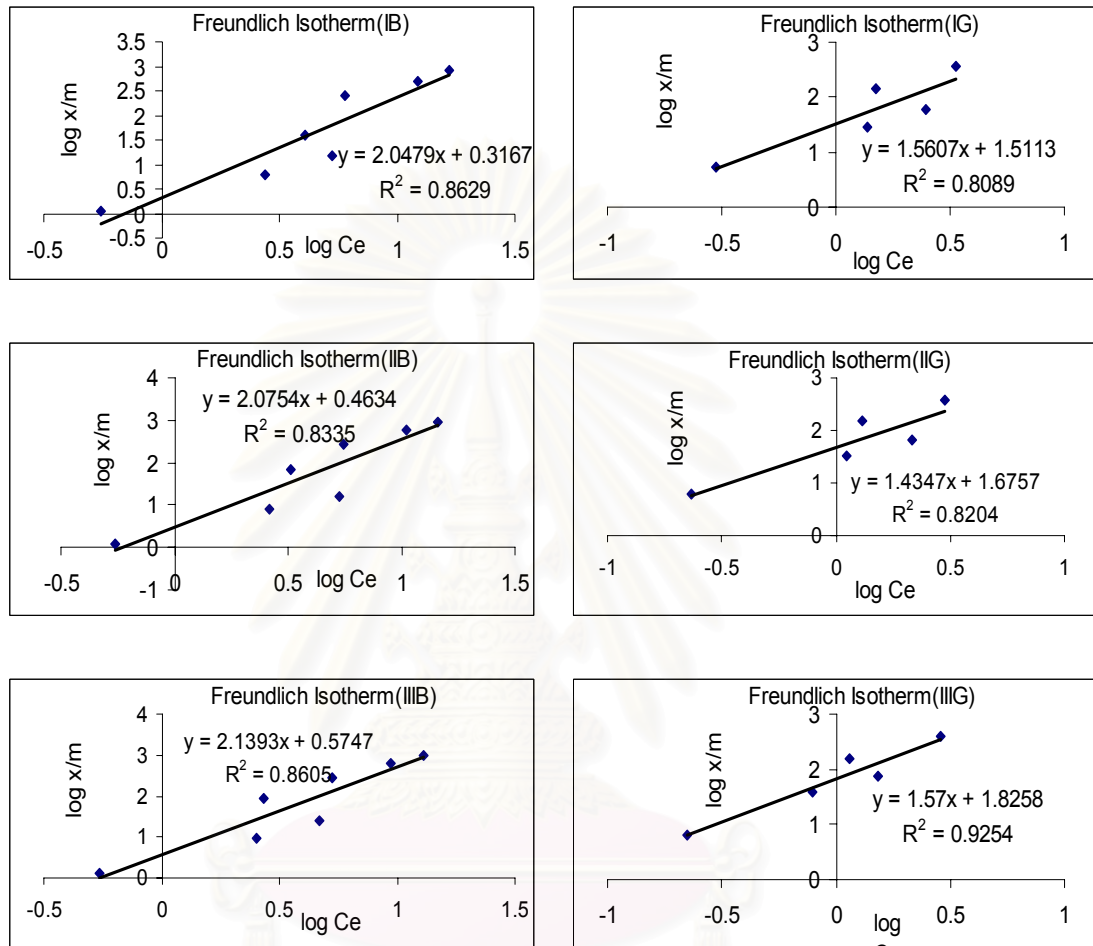
รูปที่ 5 สมการการดูดซับของพหุนดลชสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดโคโตซานและเม็ดโคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอเซทิลต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

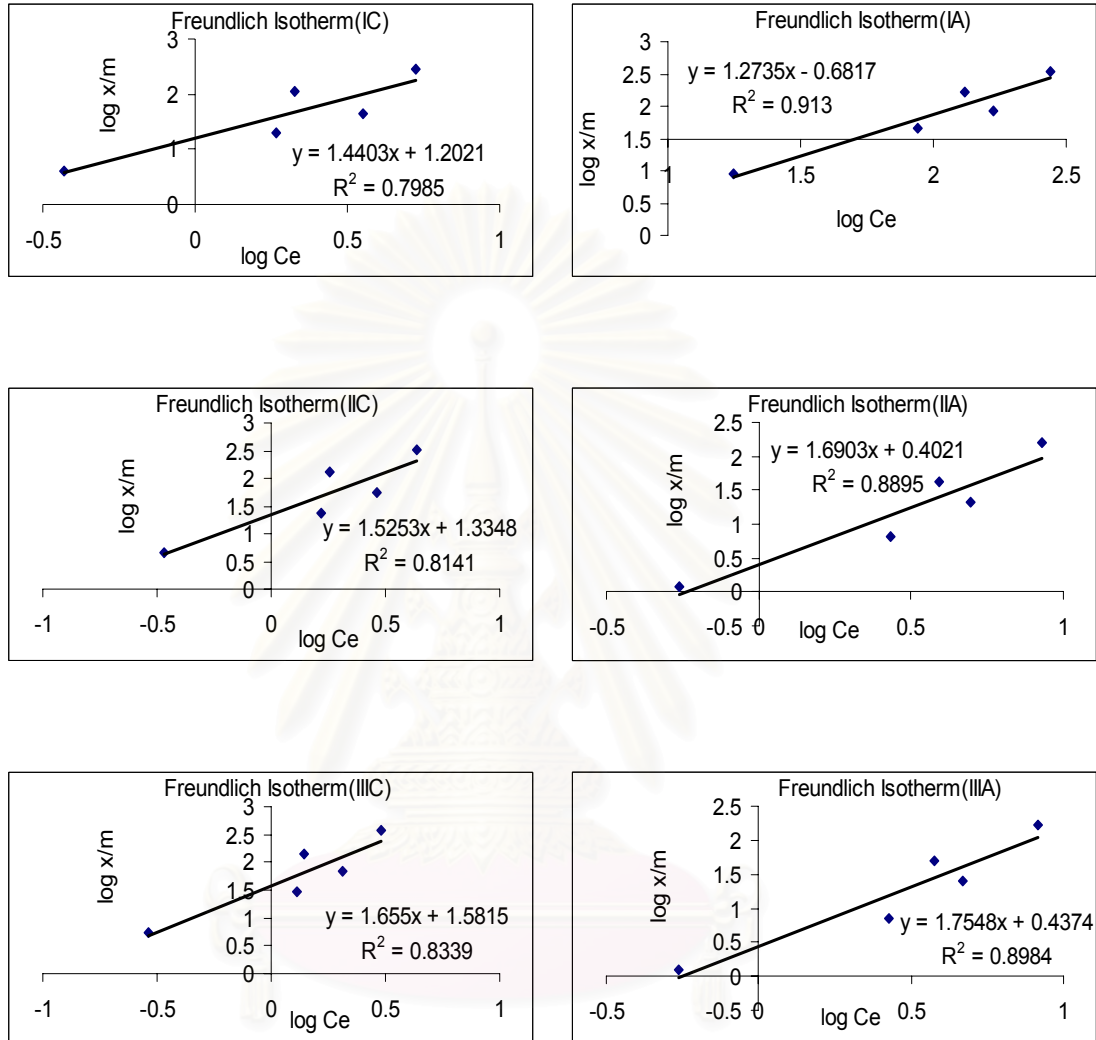


รูปที่ 5.5 สมการการดูดซับของฟรอนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้เม็ดคาร์บอนกัมมันต์ ไคโตซานและเม็ดอะมิเนตไคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอมะซิลต่างกัน

ฟรอนดลิชไอโซเทอมของการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยไคโตซานรูปแบบต่างๆที่ระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน



รูปที่ 6.6 สมการการดูดซับของฟรอนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดไคโตซานและเม็ดไคโตซานเชื่อมขวางกับกลูตารัลดีไฮด์ที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเทิลต่างกัน



รูปที่ ง.7 สมการการดูดซับของฟรอนดลิชสำหรับการดูดซับไอออนแคดเมียมโดยใช้เม็ดคาร์บอนกัมมิเคลต์โคโตซานและเม็ดอะมิเนตโคโตซานที่มีระดับการกำจัดหมู่แอสเซทิลต่างกัน

## ภาคผนวก จ

### ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

$$MTZ = H \cdot (t_s - t_b) / t_s$$

เมื่อ : ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone) (เซนติเมตร)

H คือ ความสูงของเบด (เซนติเมตร)

$t_s$  คือ เวลาที่เม็ดโคโตะซานอิ่มตัว (นาที)

$t_b$  คือ breakthrough time (นาที)

### ตัวอย่างการคำนวณ

ที่ความสูงของเบด 8.5 เซนติเมตร เวลาที่โคโตะซานอิ่มตัวเท่ากับ 12 ชั่วโมง (720 นาที) และ breakthrough time เท่ากับ 6.6 ชั่วโมง (396 นาที)

$$\begin{aligned} MTZ &= 8.5 \cdot (720 - 396) / 720 \\ &= 3.62 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

### ปริมาตรช่องว่าง ( $V_{\text{void}}$ ) และ Resident time

เส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดโคโตะซาน (d) เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์แก้ว (D) เท่ากับ 2.5 เซนติเมตร

ความสูงของเบด (H) เท่ากับ 8.5 เซนติเมตร (37 กรัม, 3441 เม็ด)

### ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาตรช่องว่าง

$$\text{ปริมาตรคอลัมน์ } (V_{\text{column}}) = (\pi \cdot D^2 \cdot H) / 4 = 41.7 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรเม็ดอะมิเนตโคโตะซาน } (V_{\text{bead}}) = (4 \cdot \pi \cdot r^3) / 3 = 28.14 \text{ ml}$$

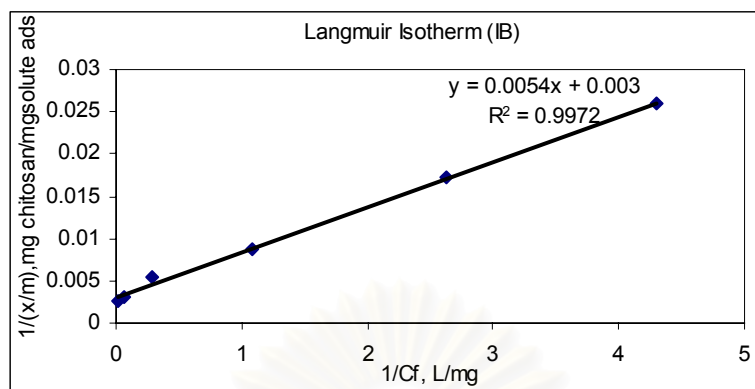
$$\text{ปริมาตรช่องว่าง } (V_{\text{void}}) = 41.7 - 28.14 = 13.56 \text{ ml}$$

### การคำนวณหา resident time

อัตราการไหล  $1 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที, resident time = 13.56 นาที

อัตราการไหล  $8.5 \pm 0.05$  มิลลิลิตรต่อนาที, resident time = 1.60 นาที

### แลงเมียร์ไอโซเทอม



จากรูปแสดงแลงเมียร์ไอโซเทอมของเม็ดโคโคซานที่ระดับการกำจัดหมู่แอสทิลร้อยละ 91-95 ดูดซับสารละลายไอออนทองแดงที่พีเอช 5

จากสมการของแลงเมียร์

$$\left( \frac{1}{(x/m)} \right) = \frac{1}{Q^0} + \frac{1}{KQ^0} \left( \frac{1}{C_e} \right)$$

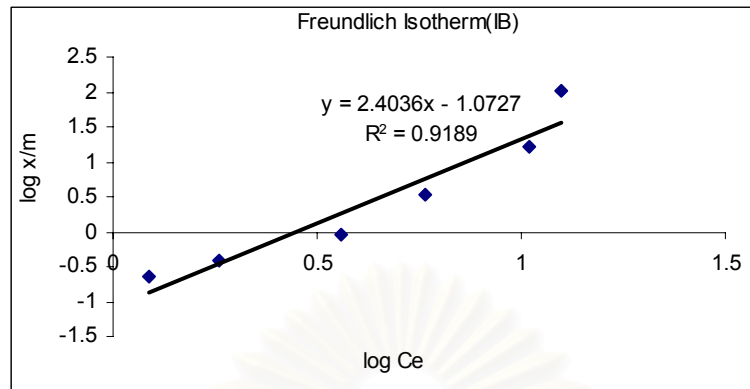
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\left( \frac{1}{(x/m)} \right)$  กับ  $\left( \frac{1}{C_f} \right)$  โดยให้  $\left( \frac{1}{(x/m)} \right)$  เป็นแกน y และ  $\left( \frac{1}{C_f} \right)$  เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ  $\frac{1}{KQ^0}$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\frac{1}{Q^0}$

จากกราฟ  $y=0.0054x+0.003$

ความชันคือ 0.0054

จุดตัดแกน y คือ  $\frac{1}{Q^0} = 0.003$  ;  $Q_0 = 1/0.003 = 333.33$

## ฟรอนดลิชไอโซเทอม



จากรูปแสดงฟรอนดลิชไอโซเทอมของเม็ดโคโคซานที่ระดับการกำจัดหมู่เอเซทิลร้อยละ 91-95 ดูซ้ำสารละลายไอออนทองแดงที่พีเอช 5

จากสมการของฟรอนดลิช

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log(C_e)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log\left(\frac{x}{m}\right)$  กับ  $\log(C_e)$  โดยให้  $\log\left(\frac{x}{m}\right)$  เป็นแกน y และ  $\log(C_e)$  เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K$

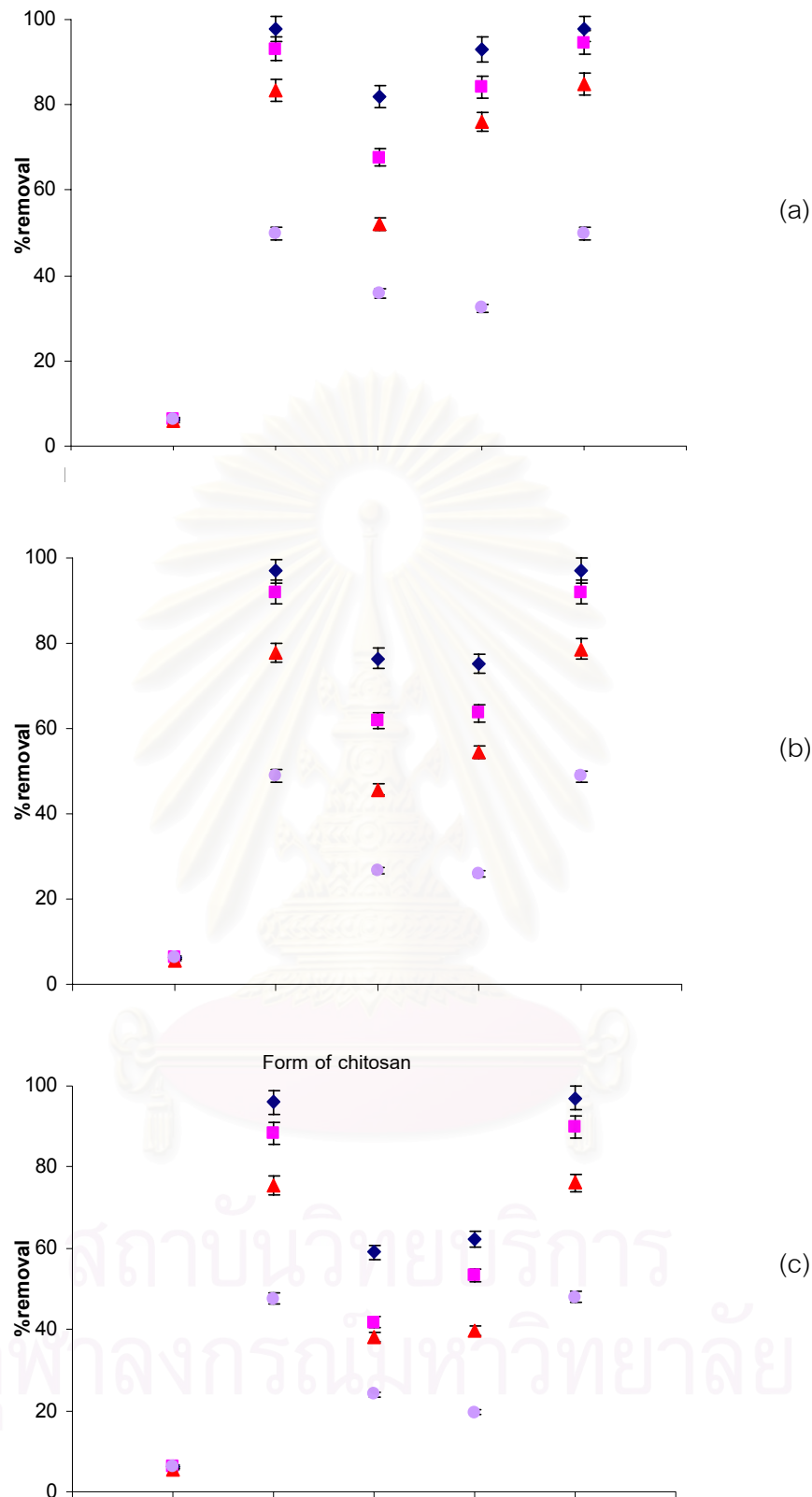
จากกราฟ  $y = 2.4036x - 1.0727$

ความชันคือ  $1/n = 2.4036$ ;  $n = 0.416$

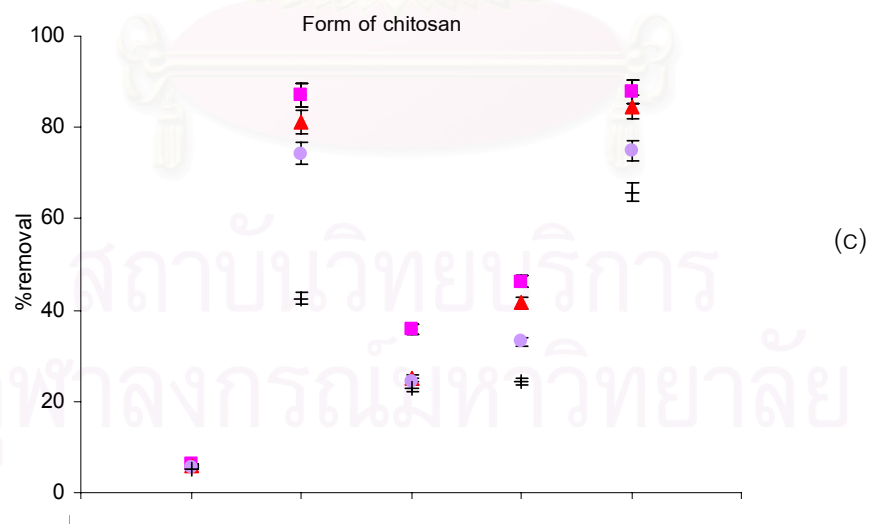
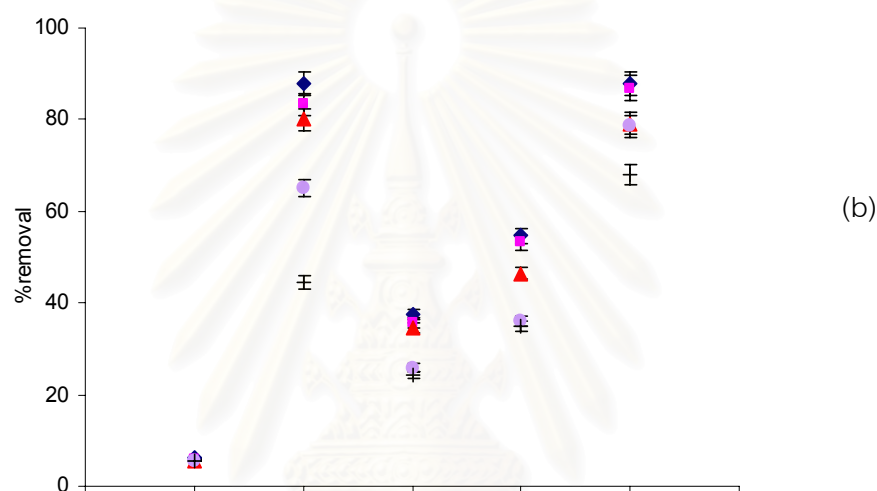
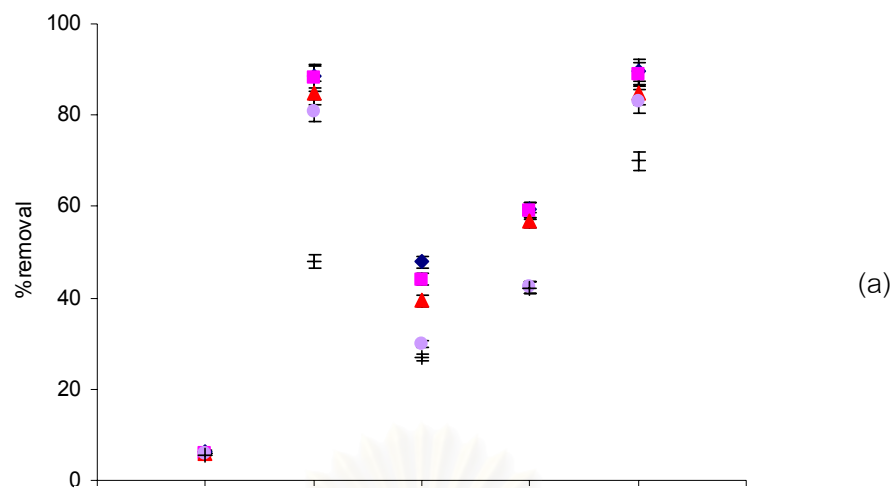
จุดตัดแกน y คือ  $\log K = -1.0727$ ;  $K = 0.0846$

สำนักงานวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ ๑.1 แผนภูมิแบบกระจายแสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายทองแดงต่างกันที่ระดับกำจัดหมู่แอมะทิลต่างๆ (a) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 91-95 (b) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 85-90 (c) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 76-84



รูปที่ ๑.2 แผนภูมิแบบกระจายแสดงร้อยละการขจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแคดเมียมต่างกันที่ระดับกำจัดหมู่แอมะทิลต่างๆ (a) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 91-95 (b) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 85-90 (c) ร้อยละการกำจัดหมู่แอมะทิล 76-84

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิพย์วิมล เกิดอ้อม เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เมื่อเดือนมีนาคม พ.ศ. 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2545 และสำเร็จหลักสูตรในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย