



รายงานผลการวิจัย  
ทุนวิจัยรัชกาลที่๖เฉลิมโกษา

เรื่อง

การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน  
ที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

(Heavy Metal Removal by Ion Exchange Resin  
Made From Agricultural Wastes)

สถาบันวิจัยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เท็ชรพร เขาวกิจเจริญ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภช

รายงานผลงานวิจัย



การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร  
(HEAVY METAL REMOVAL BY ION EXCHANGE RESIN MADE FROM AGRICULTURAL WASTES)

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.เพชรพร เชาวกิจเจริญ  
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธันวาคม 2537

I20121039

18 ส.ย. 2546

## กิตติกรรมประกาศ

การกำจัดโลหะหนักโดยใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน เเรินที่ใช้ส่วนมากเป็นเรซินสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร อาทิเช่น ผักตบชวาและชานอ้อย มาใช้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการปรับสภาพทางเคมีเพื่อนำไปใช้กำจัดโลหะหนัก แนวคิดดังกล่าวนอกจากจะเป็นการลดมลภาวะแล้วยังเป็นการช่วยลดปริมาณผักตบชวาซึ่งเป็นวัชพืชที่แพร่พันธุ์รวดเร็วและเป็นปัญหาสำคัญในปัจจุบันอีกด้วย

ผลการวิจัยครั้งนี้แม้ว่าจะยังไม่ให้คำตอบที่สมบูรณ์สำหรับการแก้ไขปัญหาเชิงอุตสาหกรรม แต่ก็เป็นไปได้มาซึ่งข้อมูลสำหรับการประยุกต์ใช้ผักตบชวาอีกวิธีหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักปริมาณต่ำๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีทางเคมีแล้วยังไม่ได้มาตรฐาน สามารถผ่านขั้นตอนนี้เพื่อช่วยลดความปนเปื้อนของโลหะหนักให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสามารถระบายทิ้งได้

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณภาคีชาววิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณนางสาวเกศสุชา พูลคำและ นางสาวนันทนา อธิธิพรโกวิท ผู้ช่วยวิจัยทั้งสองซึ่งให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนโครงการวิจัยด้วยทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2536 (ครั้งที่ 2) ผู้วิจัยใคร่ขอแสดงความขอบคุณและประกาศ กิตติกรรมไว้ ณ. ที่นี้ด้วย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เชาวกิจเจริญ

กองส่งเสริมเทคโนโลยี ปร. สถาบันวิจัย-  
พัฒนา กรมพัฒนาเทคโนโลยี  
กรมวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

29 มิ.ย. 44

ชื่อโครงการวิจัย : การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ชื่อผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ

เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ : ธันวาคม 2537

### บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้ใช้ผักตบชวาและชานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี การทดลองที่ใช้ เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20, 50 มิลลิกรัม/ลิตร ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราไหล 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.686-0.809 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฟเอทิลและโครอสติลลิ่งแซนเทตมีค่าอยู่ในช่วง 0.330-0.496 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม 0.233-0.503 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม และ 0.279-0.595 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม ตามลำดับ สำหรับชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน มีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม และชานอ้อยที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมทิล มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 มิลลิควิวาเลนท์/กรัม ผลจากการวิจัยพบว่า การปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีทั้ง 3 วิธี ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยลดลง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยลง สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้สารรีเจนเนอเรนต์แต่ละชนิด เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Project Title: Heavy Metal Removal by Ion Exchange Resin made from Agricultural Wastes

Name of the Investigator : Assist. Prof. Dr. Petchporn Chawakitchareon

Year : December 1994

### Abstract

Water hyacinth and bagasse were used as natural cation exchange in this study. The heavy metals to be studied were copper, nickel and zinc. The experiment was carried out using column technique with 20 cm. height packed bed of resin. Synthetic wastewater, pH 5.0, contained heavy metal of four different concentrations, 5, 10, 20, 50 mg/l was percolated through the column at 3 bed-volume/hr. The variable considered was methods of chemical treatment of Water hyacinth and bagasse and concentration of heavy metal in synthetic wastewater. The experimental results found the highest cation exchange capacity (CEC) value of 0.686 - 0.809 meq/g for untreated Water hyacinth. The CEC value for carboxymethyl-treated, Sulphoethyl-treated and crosslink-xanthate-treated water hyacinth were equal to 0.330-0.496 meq/g, 0.233-0.503 meq/g and 0.279-0.595 meq/g, respectively. The CEC value was found to be 0.065-0.086 meq/g for untreated bagasse and 0.052-0.069 meq/g for Carboxymethyl-treated bagasse. The experimental results show that three methods of chemical treated resin cannot improve ion exchange capacity of Water hyacinth and bagasse. The cation exchange capacities increased with the dilution of wastewater percolated. The regeneration of resin required 2- 3 bed-volumes of 0.5 N regenerant.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ii
บทคัดย่อภาษาไทย.....	iii
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iv
สารบัญ.....	v
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	ix
สารบัญภาคผนวก.....	xix
คำย่อและคำจำกัดความ.....	xx
บทที่ 1. บทนำ.....	1
2. วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย .....	3
3. การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร .....	4
4. วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	11
4.1 แผนการวิจัย .....	11
4.1.1 ตัวแปรในการทดลอง.....	11
4.1.2 ลำดับขั้นการทดลอง.....	12
4.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	14
5. ผลการวิจัย.....	20
5.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างๆ.....	20
5.2 การเปรียบเทียบขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักชนิดต่างๆ.....	22
5.3 การเปรียบเทียบผลของกระบวนการเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	24
5.4 การเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อชนิดของโลหะหนัก.....	55
5.5 การเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย.....	55

สารบัญ

หน้า

5.6 ระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวา และชานอ้อย.....	68
5.7 ระดับการรีเจนเนอเรชั่นของผักตบชวาและชานอ้อย .....	69
6. สรุปผลการทดลอง.....	124
7. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม.....	126
เอกสารอ้างอิง.....	127
ภาคผนวก.....	130



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของผักตบชวาและชานอ้อย.....	2
ตารางที่ 3.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเรซินที่ทำจากเปลือกแตงโม.....	8
ตารางที่ 3.2 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของกากแอปเปิ้ล.....	10
ตารางที่ 4.1 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง.....	13
ตารางที่ 5.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	21
ตารางที่ 5.2 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยน ไอออนชนิดต่างๆ.....	23
ตารางที่ 5.3 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ).....	49
ตารางที่ 5.4 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	49
ตารางที่ 5.5 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ).....	50
ตารางที่ 5.6 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	50
ตารางที่ 5.7 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Sulphoethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ).....	51
ตารางที่ 5.8 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Sulphoethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	51



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.9	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ).....	52
ตารางที่ 5.10	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	52
ตารางที่ 5.11	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน).....	53
ตารางที่ 5.12	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	53
ตารางที่ 5.13	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated bagasse ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน ).....	54
ตารางที่ 5.14	ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated bagasse ที่มีต่อโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ (กำหนดให้น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย).....	54

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 4.1	แบบจำลองของ Ion Exchange Column ที่ใช้ในการวิจัย.....	15
รูปที่ 5.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	25
รูปที่ 5.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	26
รูปที่ 5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	27
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	28
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณนิกเกิลประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	29
รูปที่ 5.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณนิกเกิลประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	30
รูปที่ 5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณนิกเกิล ประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	31
รูปที่ 5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณนิกเกิล ประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	32
รูปที่ 5.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณสังกะสี ประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	33

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และขานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณสังกะสี ประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	34
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และขานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณสังกะสี ประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	35
รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และขานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสีย ที่มีปริมาณสังกะสี ประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	36
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	37
รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	38
รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	39
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	40
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	41
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสต์ลิงค์-แซนเทต.. (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวากับประสิทธิภาพ ในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	42

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิคเกิลประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	43
รูปที่ 5.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิคเกิลประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	44
รูปที่ 5.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	45
รูปที่ 5.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	46
รูปที่ 5.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	47
รูปที่ 5.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิ่งค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	48
รูปที่ 5.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสีย กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	56
รูปที่ 5.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสีย กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	57
รูปที่ 5.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสีย กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	58

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	59
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก ประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	60
รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก ประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	61
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก ประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	62
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก ประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	63
รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	64
รูปที่ 5.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร .....	65
รูปที่ 5.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	66

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	67
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) .....	70
รูปที่ 5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth).....	71
รูปที่ 5.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) .....	72
รูปที่ 5.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของชานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) .....	73
รูปที่ 5.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา.....	74
รูปที่ 5.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา.....	75
รูปที่ 5.43 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	76
รูปที่ 5.44 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	77
รูปที่ 5.45 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	78



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.59 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	92
รูปที่ 5.60 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	93
รูปที่ 5.61 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	94
รูปที่ 5.62 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	95
รูปที่ 5.63 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	96
รูปที่ 5.64 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	97
รูปที่ 5.65 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	98
รูปที่ 5.66 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	99
รูปที่ 5.67 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	100



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.68 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	101
รูปที่ 5.69 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	102
รูปที่ 5.70 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	103
รูปที่ 5.71 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	104
รูปที่ 5.72 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมี ปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	105
รูปที่ 5.73 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมี ปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	106
รูปที่ 5.74 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ผักตบชวา ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinty) เมื่อน้ำเสียมี ปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	107
รูปที่ 5.75 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	108
รูปที่ 5.76 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	109

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.77 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	110
รูปที่ 5.78 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	111
รูปที่ 5.79 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	112
รูปที่ 5.80 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	113
รูปที่ 5.81 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	114
รูปที่ 5.82 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ ขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	115
รูปที่ 5.83 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจาก ผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	116
รูปที่ 5.84 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำ จากผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	117
รูปที่ 5.85 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจาก ผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	118

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 5.86 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจาก ผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....*	119
รูปที่ 5.87 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร.....	120
รูปที่ 5.88 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร.....	121
รูปที่ 5.89 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร.....	122
รูปที่ 3.90 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน. โดยใช้ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร.....	123

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาคผนวก

หน้า

ตารางที่ ผ-1	ผลการทดลองหา Dry moisture content ของสารเซลลูโลส แลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	131
ตารางที่ ผ-2	ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	132
ตารางที่ ผ-3	ผลการทดลองหาความหนาแน่นจริง (True density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย แบบไม่ได้ปรับสภาพ และแบบ คาร์บอกซิเมทิล.....	133
ตารางที่ ผ-4	ผลการทดลองหาความหนาแน่นจริง (True density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา แบบ ซัลโฟเอทิล และแบบ ครอสส์ลิงค์-แซนเทต .....	134
ตารางที่ ผ-5	ผลการทดลองหา % Void volume ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	135
ตารางที่ ผ-6	ผลการทดลองหา % Moisture content/wet resin ของสารเซลลูโลสที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	136
ตารางที่ ผ-7	ผลการทดลองหา การพองตัว ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย.....	137

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### คำย่อและคำจำกัดความ

- BV : Bed Volume  
: ปริมาตรสารละลายที่ถูกกำหนดใช้แทนเวลาที่ผ่านชั้นเรซินเทียบเท่าปริมาตรเรซิน
- eq : Equivalent  
: หน่วยมวลสมมูล หรือ อีควิวาเลนต์
- meq : Milli-equivalent  
: หน่วยมวลมิลลีสมมูล หรือ มิลลิอีควิวาเลนต์
- DVB : Divinylbenzene (A difunction monomer used to crosslink polymer)
- True density : ความหนาแน่นจริง  
: มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเรซิน(กรัม/มิลลิลิตร)
- Apparent density : ความหนาแน่นปรากฏ  
: มวลต่อหน่วยปริมาตรเรซินที่รวมความพรุนที่เกิดจากการซ้อนกันของเรซิน (กรัม/มิลลิลิตร)
- Moisture content : ความจุความชื้นของเรซิน
- Swelling : ความบวมตัวของเรซิน(มิลลิลิตร/กรัม)



## บทที่ 1

## บทนำ

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักละลายอยู่ในน้ำเสีย นิยมใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบเคมี ซึ่งเหมาะกับน้ำเสียที่มีโลหะหนักละลายอยู่ในน้ำเสียปริมาณมาก (มากกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร) สำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหนักต่ำ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นวิธีการที่เหมาะสมมากกว่าเรซินที่ใช้เป็นเรซินที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นต้นทุนของระบบบำบัดน้ำเสียแบบแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีราคาค่อนข้างแพง

การพิจารณานำวัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินแบบสังเคราะห์ จึงเป็นแนวทางหนึ่ง ที่ควรนำมาพิจารณา ทั้งนี้เพื่อให้ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียมีราคาถูกลง วัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร เช่น เปลือกไม้ เปลือกผลไม้ ชี้อ้อย ฯลฯ เป็นวัสดุที่สามารถนำมาใช้ทำเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของวัสดุเหล่านี้ คือ เซลลูโลส ลิกนิน ซึ่งมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งนี้เพราะโครงสร้างของเซลลูโลส ประกอบด้วยฟังก์ชันกรุป คือ carboxylic, phenolic และ hydroxylic ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินที่สังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี แต่จะมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของเซลลูโลสเป็นแบบ hydrophilic แต่โครงสร้างของเรซินที่สังเคราะห์เป็น hydrophobic เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์ การยึดเกาะกันของโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนโดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนโครงร่างตาข่ายโมเลกุลของเซลลูโลสที่มีกลุ่ม hydroxylic ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 จะเป็นส่วนที่เกิดการทำปฏิกิริยามากที่สุด

การสังเคราะห์สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ประกอบด้วย hydroxy-cellulose และกลุ่ม COOH 15% มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำ ปฏิกิริยาที่สำคัญประกอบด้วย การเปลี่ยน alkali cellulose ด้วยสารประกอบคลอรีนและเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการประสานพันธะของเซลลูโลส ด้วย di-(2-ethylimine) sulfate, 1,4 butanesulfate, 1,3-dichloro-2-propanal, divinyl sulfone และ formaldehyde ซึ่งเป็นหมู่ไอออนที่เกาะจับอยู่บนโครงร่าง (active group) โดยมี dichloro acetic acid เป็น crosslink agent ที่ใช้เป็นตัวแสดงกลุ่มแลกเปลี่ยนไอออน

จากคุณสมบัติดังกล่าวสมมติฐานสำหรับงานวิจัยนี้ คือ สารเซลลูโลสในวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถนำมาพัฒนาเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้ โดยการปรับสภาพด้วยสารเคมีเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่ ผักตบชวาและชานอ้อย ซึ่งมีองค์ประกอบดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของผักตบชวาและชานอ้อย (ปราณี, 2532 และ ปรีชา, 2532)

องค์ประกอบ	ชานอ้อย	ผักตบชวา
เซลลูโลส	44%	43-44%
ลิกนิน	20%	12-13%
แพนโตแซน	27%	14-15%
เถ้า	1.6%	20-21%
คาร์บอน	-	32.35%

สถาบันเวทย์บริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย

#### 2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสม ในการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา และชานอ้อย เพื่อนำมาใช้ในการกำจัดโลหะ
2. เพื่อหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อย
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

#### 2.2 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อยชนิดต่าง ๆ คือ

1. สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ
2. สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยคลอโรอะซิติกเอซิด ได้สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนแบบคาร์บอกซิเมทิล
3. สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยไฮเดียม 2-คลอโรอีเทนซัลไฟเนต ได้สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนแบบซัลไฟเอทิล
4. สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ ได้สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนแบบครอสลิงค์แซนเทต

ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองมีค่า Effective size อยู่ในช่วง 0.18-0.212 มิลลิเมตร โลหะหนักที่ทำการศึกษ ได้แก่ ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ และทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer



## บทที่ 3

## การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

การนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากประเทศเหล่านี้มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ มาก ดังนั้นจึงมีกากสารอินทรีย์ที่เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีการนำมาทดลองใช้บำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักได้แก่

1. เปลือกไม้ (Bark)
2. ฟางข้าว (Rice Straw)
3. เปลือกมะพร้าว (Coconut Husk)
4. ไม้เลื่อย (Sawdust)
5. ใบชา (Tea Leaves)
6. Peat Moss
7. ชานอ้อย (Bagasse)
8. เปลือกถั่วลิสง (Peanut Skin)
9. เปลือกเมล็ดแตงโม (Melon Seed Husk)
10. เปลือกหอมแดง (Red Onion Skin)
11. ชังข้าวโพด (Corn Cob)
12. เส้นใยลูกปาล์ม (Palm Pressed Fibers)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

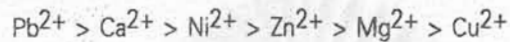
Kumar และ Dara, 1981 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกหอมแดง กำจัด  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย การกำจัดสีและการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพ ทำได้โดยนำเปลือกหอมแดงที่ทำให้แห้งแล้วและบดเป็นผง 1 ส่วน แซใน 5 ส่วนของ Formaldehyde 39% และ 20 ส่วนของ 0.2 นอร์มอลของกรดซัลฟูริก เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจน Filtrate มี pH 4-5 จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Method โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 3 มิลลิลิตร/นาที ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 40, 100, 130 และ 220 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าโลหะหนักถูกกำจัดได้ 63-99.87% และ ความจุสูงสุด(Maximum Capacity) ของเปลือกหอมแดงที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี สามารถกำจัด  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  และ  $Pb^{2+}$  ได้ 1.62, 1.35, 1.22, 1.55, 1.3 และ 0.82 มิลลิกรัม/กรัมแห้ง/กรัมเรซิน ตามลำดับ

Bhargava และ คณะ, 1985 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ขี้เลื่อย (Sawdust) ในการกำจัดโครเมียม, ตะกั่วและแคดเมียมซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสีย การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiment โดยทำการแปรค่าตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของน้ำเสีย 1, 5, 10, 25, และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ขี้เลื่อยที่ใช้มีขนาด 0.42-1.0 มิลลิเมตร ปริมาณ 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม โดยใช้ความเร็วในการกวน 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 5, 30, 60, 180 และ 360 นาที การกรองเพื่อแยกขี้เลื่อยออกแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำ (1-5 มิลลิกรัม/ลิตร) โครเมียมถูกกำจัดได้ประมาณ 90-99.9%, ตะกั่ว 80-98.5% เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้น 10-25 มิลลิกรัม/ลิตร โครเมียมถูกกำจัดได้ประมาณ 55-75% ตะกั่ว 6-30% และแคดเมียมกำจัดได้สูงเพียง 9% เท่านั้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย, ปริมาณขี้เลื่อยที่ใช้ และเวลาที่ใช้ในการทดลอง

Odozi และ คณะ, 1985 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ซังข้าวโพด (Corn Cob), ขี้เลื่อย (Sawdust) และเปลือกหอมแดง (Red Onion Skin) กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$   $Zn^{2+}$  และ  $Ca^{2+}$  การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch และ Column Experiments โดยใช้ Column ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เรซินขนาด 150 ไมครอน บรรจุเรซินที่ทำจากซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลลงใน Column และอีก Column บรรจุเรซินที่ทำจากส่วนผสมของซังข้าวโพด, ขี้เลื่อยและเปลือกหอมแดงที่ปรับสภาพด้วย ฟีนอลและฟอร์มาลดีไฮด์ น้ำเสียที่ใช้จำนวน 1 ลิตร โดยควบคุมอัตราการไหล 2-3 มิลลิลิตร/นาที ส่วน Batch Experiment ทำการทดลองโดยใช้เรซินที่มีขนาด 150 และ 300 ไมครอน

จากผลการทดลอง พบว่า ชั่งข้าวโพด, ชี้เลื่อยและเปลือกหอมแดง ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมีมีคุณสมบัติเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และพบว่าเรซินที่มีขนาด (Particle size) เล็กกว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเรซินที่มีขนาดใหญ่ เรซินที่ทำมาจากส่วนผสมของชั่งข้าวโพด, ชี้เลื่อยและเปลือกหอมแดงสามารถกำจัดโลหะหนักได้ 76-88% ซึ่งสูงกว่าเรซินที่ทำจากชั่งข้าวโพดเพียงอย่างเดียวที่สามารถกำจัดโลหะหนักได้ 65-79% ส่วนความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของเรซินทั้ง 2 ชนิดเป็นดังนี้



Macchi และ คณะ, 1986 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากกาแฟ (Exhausted Coffee Grounds) กำจัดปรอทในน้ำเสีย การกำจัดสีของกากกาแฟสามารถทำได้ โดยนำกากกาแฟแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 1 ลิตร กวนนาน 60 นาที กรองแล้วทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 1 ลิตร กวนนาน 30 นาที กรองและล้างด้วยน้ำ การวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Experiments โดยมีการควบคุมพีเอชที่ 3 และ 11 ความเข้มข้นของ  $\text{Hg}^{2+}$  อยู่ในช่วง 0.05 - 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัด  $\text{Hg}^{2+}$  ได้ 99.9% ที่พีเอช 3 และสามารถกำจัด  $\text{Hg}$  ได้ 99% ที่พีเอช 11 สารละลายปรอทมีค่า Ionic Strength 0.1 โมลาร์ของโซเดียมไนเตรท หรือ 0.1 โมลาร์ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ การทำ Elution สามารถทำได้โดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก 1 โมลาร์ ใช้ปริมาณ 16 เท่าของ Bed volume จากการทดลองพบว่า สามารถ กำจัด  $\text{Hg}^{2+}$  ได้ 70% ที่พีเอช 11 และ 85% ที่พีเอช 3

Srivastava และ คณะ, 1986 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ชี้เลื่อย (Sawdust) กำจัดโครเมียม ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การวิจัยเลือกใช้แบบ Batch Test โดยมีการแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียและปริมาณชี้เลื่อย ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้มี โครเมียมประจุ +6 1, 5, 10, 25 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณชี้เลื่อยที่ใช้ในการวิจัย 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม ผสมน้ำเสียน้ำกับชี้เลื่อยแล้วกวนด้วยความเร็ว 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 30, 60, 180 และ 360 นาที นำไปกรองด้วย Whatman Filter Paper No.42 เพื่อแยกชี้เลื่อยออก

จากผลการทดลอง พบว่า โครเมียมถูกกำจัดออกไปได้ประมาณ 30-90% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณของชี้เลื่อยที่ใช้และเวลาที่ใช้การทดลอง การดูดซับ โครเมียมประจุ +6 ด้วยชี้เลื่อยไม่ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำเสีย

Adelina, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ผงกาบมะพร้าว (Coconut Coir Dust) ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว, แมงกานีส, สังกะสี, แมกนีเซียม, นิกเกิล, แคดเมียมและทองแดงในน้ำเสีย การวิจัยเลือกใช้ Batch Experiments น้ำเสียที่ใช้มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร ขนาดของผงกาบมะพร้าวที่ใช้ 24, 40 และ 60 mesh ซึ่งไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี ทำการทดลองโดยนำผงกาบมะพร้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง มาผสมกับน้ำเสียแล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  ได้ 87%,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  95%,  $\text{Ni}^{2+}$  98% และ  $\text{Cd}^{2+}$  99% เมื่อใช้เวลา 1 ชั่วโมง และถ้าใช้เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัด  $\text{Mg}^{2+}$  ได้ 88%,  $\text{Cu}^{2+}$  ได้ 95-98% และ  $\text{Zn}^{2+}$  ได้ 98-99%

Krishnan และ คณะ, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ใบต้นธูปฤาษีและเส้นผมของคนในการกำจัดโลหะหนักได้แก่ แคดเมียม, ปรอทและตะกั่ว การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiments โดยมีการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย 1-100 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณใบธูปฤาษีและเส้นผมที่ใช้ 50-200 มิลลิกรัม โดยต้นธูปฤาษีที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกตัดให้มีความยาว 0.5 เซนติเมตร และอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นผมที่ใช้จะถูกตัดให้มีความยาว 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปแช่ใน Ether นาน 30 นาทีแล้วจึงล้าง ด้วยน้ำ

จากผลการทดลอง พบว่า ใบต้นธูปฤาษี สามารถกำจัด  $\text{Cd}^{2+}$  ได้ 43-54% และ  $\text{Pb}^{2+}$  ได้ 50-68% ส่วนเส้นผมสามารถกำจัด  $\text{Hg}^{2+}$  ได้เพียงอย่างเดียว โดยกำจัดได้ประมาณ 74-83%

Okieimen และ Onyenikpa, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกเมล็ดแตงโม (Melon Seed Husk) กำจัด  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Pb}^{2+}$  ในน้ำเสีย การวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Method เปลือกเมล็ดแตงโมที่ใช้มีขนาด 300-425 ไมครอน โดย

- Batch Method ใช้ทดสอบการกำจัด  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Ni}^{2+}$  ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีและใช้เปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วย Ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) ในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Cd}^{2+}$  น้ำเสียที่ใช้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม/100 มิลลิตร

- Column Method ใช้ทดสอบการกำจัด  $\text{Pb}^{2+}$  ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีโดยใช้ คอลัมน์ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ยาว 35 เซนติเมตร ควบคุม

อัตราการไหลของน้ำเสีย 1 มิลลิลิตร/นาที ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัม/ลิตร และแปรผันปริมาตรของน้ำเสียที่ใช้ 50, 100, 400, 800 และ 1000 มิลลิลิตร

จากผลการทดลอง พบว่า เปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเปลือกแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเรซินที่ทำจากเปลือกแตงโม (Okieimen, 1988)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/100มิลลิลิตร)	ปริมาณโลหะหนักที่ดูดซับได้ (มิลลิกรัม/กรัมเปลือกแตงโม)			
	แคดเมียม(Cd <sup>2+</sup> )	ทองแดง(Cu <sup>2+</sup> )	ตะกั่ว(Pb <sup>2+</sup> )	นิกเกิล(Ni <sup>2+</sup> )
10	2.1(2.8)	1.5(2.1)	2.4	1.6
20	3.6(5.0)	2.2(3.5)	-	-
30	4.3(6.6)	3.2(4.8)	6.0	3.4
40	5.4(8.3)	5.1(7.6)	-	-
50	6.2(9.4)	6.0(8.5)	6.8	5.9

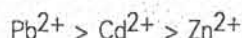
ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้โดยเปลือกแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแสดงในวงเล็บ

จาก Column Method พบว่า สามารถกำจัด Pb<sup>2+</sup> ได้ 62-92% และการทำ Recovery โดยใช้กรดไนตริก (2% VM) สามารถ Recovery Pb<sup>2+</sup> ได้ถึง 70%

Tan และ Rahman , 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชา (Tea leaves) กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ ตะกั่ว, แคดเมียม และสังกะสี ใบชาที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นใบชาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปการเกษตร การวิจัยเลือกใช้ Column Method บรรจุเมล็ดใบชาขนาด 60-80 mesh กากใบชาที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกนำไปต้มในน้ำร้อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่ใน กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่า โลหะหนักถูกกำจัดเกือบ 100% เมื่อใช้ใบชา 1.87 กรัม และน้ำเสียมีความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ของ Cd<sup>2+</sup> และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ของ Zn<sup>2+</sup> โดยควบคุมพีเอชเท่ากับ 6

ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย อัตราไหล ของน้ำเสียที่ไหลผ่าน Column จะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ประมาณ 90% เมื่อมีอัตราการไหล 8.3 มิลลิลิตร/นาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง จากผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดโลหะหนักได้ ดังนี้



Maranon และ Sastre ,1990 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอปเปิลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิลกำจัดโลหะหนักซึ่งละลายอยู่ในน้ำ การวิจัยเลือกใช้ Column Method โดยใช้ Column ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ภายในบรรจุกากแอปเปิลที่นำไปบดมีขนาด 0.20-0.63 มิลลิเมตร ในการทดลองจะศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดของกากแอปเปิล, การปรับสภาพกาก แอปเปิลด้วยกระบวนการทางเคมี และความเข้มข้นของน้ำเสีย

สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพกากแอปเปิล คือ Phosphation Reaction และ Crosslinking and Xanthation Reaction และทำการควบคุมอัตราไหลของน้ำเสีย 3 มิลลิลิตร/นาที

จากผลการทดลอง พบว่า กากแอปเปิลสามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ โลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง, สังกะสีและนิกเกิล กากแอปเปิลที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่ากากแอปเปิลที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี

การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินที่มีคุณสมบัติของ Cation Exchanger และน้ำเสียที่ไหลผ่าน Column มีความเข้มข้นของโลหะหนักประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 3.2

เมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหมด สามารถทำการรีเจนเนอเรชัน เพื่อฟื้นอำนาจให้กับกากแอปเปิล โดยใช้ กรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.5 นอร์มัล

Shukla และ Sakhardane, 1992 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เยื่อไม้ไผ่ (Bamboo Pulp), เส้นใยปอกระเจา (Jute Fibre) และขี้เลื่อย (Sawdust) มาทำการฟอกขาวและแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ย้อมสีและไม่ย้อมสี เพื่อใช้ในการกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  และ  $\text{Ni}^{2+}$  ในการวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Experiments

ตารางที่ 3.3 ซีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของกากแอปเปิล (Maranon, 1990)

Exchanger	CEC (meq/g)		
	Cu <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>
AR	0.4	0.3	0.3
CLX-AR	1.1	0.6	0.6
P-AR	1.6	1.1	1.1

AR : Apple Residues

CLX - AR : Crosslinked Xanthated Apple Residues

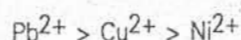
P-AR : Phosphatation Apple Residues

จากผลการทดลอง พบว่า เยื่อไม้ไผ่, เส้นใยปอกระเจา และซีลื้อยที่ไม่ได้ย้อมสี สามารถกำจัดโลหะหนักได้ประมาณ 17-35%, 17-48% และ 17-30% ตามลำดับ สำหรับเยื่อไม้ไผ่, เส้นใยกระเจาและซีลื้อยที่ย้อมสี สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่า คือประมาณ 28-76%, 28-69% และ 34-97% ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่า สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี

Low และ คณะ, 1993 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เส้นใยลูกปาล์ม (Oil-Palm Fibres) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม กำจัดทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสีย การวิจัยเลือกใช้ Batch Experiments และมีการปรับปรุงคุณภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยลูกปาล์มด้วยวิธีการทางเคมี

จากผลการทดลอง พบว่า เส้นใยลูกปาล์มสามารถใช้ในการกำจัด Cu<sup>2+</sup> ได้ โดยเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัด Cu<sup>2+</sup> ได้ 90% ส่วนการดูดซับ Cu<sup>2+</sup> ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสียณจุดเริ่มต้น และถ้าน้ำเสียที่ใช้ประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิด จากการทดลองพบว่า สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้



และที่ pH สูงจะกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าที่ pH ต่ำ

## บทที่ 4

## วิธีการดำเนินการวิจัย



## 4.1 แผนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แผนการวิจัยได้กำหนดให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย ดังนี้

## 4.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองครั้งนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย ซึ่งมีค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

## - ตัวแปรอิสระ

1. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเรซิน
2. การปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี
3. ชนิดของโลหะหนัก
4. ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

## - ตัวแปรตาม

1. ปริมาณน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงจุดยุติ
2. ลักษณะสมบัติของน้ำที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ ปริมาณโลหะหนักและค่าพีเอช
3. ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน
4. ประสิทธิภาพในการฟื้นอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน (Regeneration)



- ตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ในการทดลอง

1. ความสูงของชั้นเรซิน
2. ชนิดของสารพื้นอำนาจ (สารรีเจนเนอเรนต์)
3. ความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรนต์
4. อัตราการไหลของน้ำเสียในการแลกเปลี่ยนไอออน
5. ขนาดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการทดลอง

ค่าตัวแปรต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

#### 4.1.2 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง การศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเรซิน การศึกษาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน การทดลองเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนตามค่าตัวแปรที่กำหนด

รูปแบบและลักษณะการทดลอง ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมขั้นต้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

ก. การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ข. การเตรียมสารเซลล์ูโลสจากผักตบชวาและชานอ้อย แบ่งเป็น 4 ชนิด คือ

Untreated Cellulose

Carboxymethyl Cellulose

Sulphoethyl Cellulose

Crosslink-Xanthate Cellulose

ค. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

2. การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ-เคมีของสารเซลล์ูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ดังต่อไปนี้

- ความหนาแน่น

- ความชื้น

- %Void Volume

- การพองน้ำ

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับ	พารามิเตอร์
<b>- ตัวแปรอิสระ</b>	
1. ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	1. ผักตบชวา 2. ชานอ้อย
2. การปรับสภาพวัสดุโดยกระบวนการทางเคมี	1. Untreated Cellulose 2. Carboxymethyl Cellulose 3. Sulphoethyl Cellulose 4. Crosslink-Xanthate Cellulose
3. ชนิดของโลหะหนัก	1. ทองแดง 2. นิกเกิล 3. สังกะสี
4. ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์	1. 5 มิลลิกรัม/ลิตร 2. 10 มิลลิกรัม/ลิตร 3. 20 มิลลิกรัม/ลิตร 4. 50 มิลลิกรัม/ลิตร
<b>- ตัวแปรคงที่</b>	
1. ความสูงของชั้นเรซิน	20 เซนติเมตร
2. สารรีเจนเนอแรนต์	HCl, NaCl
3. ความเข้มข้นของสารรีเจนเนอแรนต์	0.5 นอร์มอล
4. อัตราการไหลของน้ำเสีย	3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง
5. จุดยุติ	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย เข้าเท่ากับความเข้มข้นของโลหะหนัก ในน้ำเสียที่ผ่าน Column
6. ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	0.18-0.212 มิลลิเมตร
<b>- ตัวแปรตาม</b>	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์	1. ปริมาณโลหะหนัก 2. pH
2. ปริมาณน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงจุดยุติ	
3. ปริมาณสารรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้ในการฟื้นอำนาจ	

3. การศึกษาขีดความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลล์โลส
4. การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนตามค่าตัวแปรต่าง ๆ

ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัย ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2536 ถึง ตุลาคม 2537 รวม 12 เดือน

**หมายเหตุ** การทดลองชุดแรกใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากผักตบชวาและขานอ้อยแบบไม่ได้ปรับสภาพและแบบคาร์บอกซีเมททีล พบว่าผักตบชวามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าขานอ้อยหลายเท่า และการทดสอบขั้นต่อไปจึงนำผักตบชวามาปรับสภาพแบบ คลออสลิ่งค์-แซนเทต และ ซัลโฟเอทีล

#### 4.1.3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. คอลัมน์บรรจุสารเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออน
  - คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร
  - คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
2. ขวดน้ำเกลือขนาด 1 ลิตรพร้อมสายยางปรับอัตราการไหล
3. เครื่องวัดพีเอช
4. เครื่องชั่งสารเคมี
5. เครื่องบดวัสดุ
6. เครื่องคัดแยกขนาด
7. เครื่อง Atomic Absorbtion Spectrophotometer

รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลอง Ion Exchange ที่ใช้ในการวิจัย

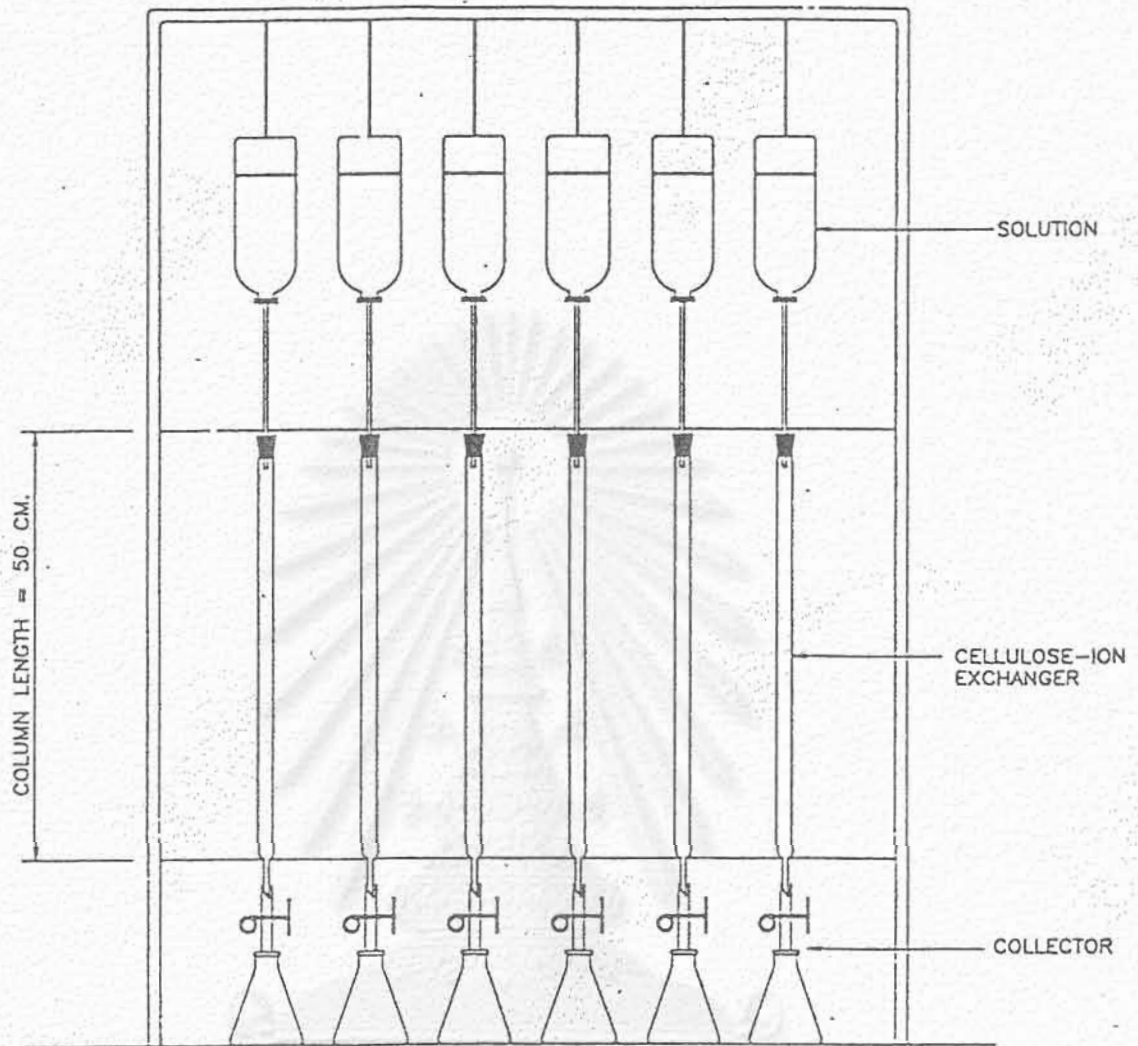
#### 4.2 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน ดังนี้

##### 4.2.1 การเตรียมสารเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออนและน้ำเสียสังเคราะห์

1. การเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

นำผักตบชวาและขานอ้อยล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง จนสะอาดแล้วนำมาตากให้แห้งกลางแดด 1 วัน อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสนาน 24 ชั่วโมง ทำให้ละเอียดด้วยเครื่องบดและร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดด้วยตะแกรงเบอร์ 70 และ 80



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของ Ion Exchange ที่ใช้ในการวิจัยนี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. การเตรียม Untreated Cellulose (Maranon and Sastre, 1991)

นำวัสดุที่ตัดขนาดใส่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มอล กวนนาน 30 นาที นำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH ของน้ำทิ้งประมาณ 7 แล้วจึงนำไปทำให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

## 3. การเตรียม Carboxymethyl Cellulose (Peska และ คณะ, 1976)

3.1 ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 90 กรัม ในน้ำกลั่น 200 มิลลิลิตร เติมผักตบชวาหรือขานอ้อย 60 กรัม ผสมให้เข้ากัน กวนนาน 30 นาที ในอ่างน้ำแข็ง

3.2 ละลายคลอโรอะซิติกเอซิด 30 กรัม ในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร เติมลงในของผสม แล้วนำไปกวนบนอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง

3.3 ปรับ pH ของผสมให้เป็นกลางโดยใช้อะซิติกเอซิด

3.4 นำของผสมที่ได้ไปกรองล้างด้วยน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มอล จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จนที่เอชของน้ำสุดท้ายเท่ากับ 7 แล้วจึงล้างด้วยเอทานอล ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง

## 4. การเตรียม Sulphoethyl Cellulose (Peska และคณะ, 1976)

4.1 นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 9.2 กรัม จากนั้นเติมผักตบชวาที่เตรียมไว้ 5.0 กรัม ทำการกวนผสมให้เข้ากันในบีกเกอร์ที่แช่ในอ่างน้ำแข็งเป็นเวลา 20 นาที แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

4.2 เติมสารละลายเข้มข้นโซเดียม 2-คลอโรอีเทน ซัลไฟเนต 3.07 กรัม ลงในบีกเกอร์

4.3 นำบีกเกอร์วางบนอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส กวนนาน 20 นาที แล้วทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4.4 นำของผสมที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่นและอีเธอร์ ตามลำดับ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

## 5. การเตรียม Crosslink-Xanthate Cellulose (Wing และ คณะ , 1975)

- 5.1 นำโซเดียมคลอไรด์ 1.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 150 มล. ในบีกเกอร์ เติมอีพิคลอโรไฮดริน 5.5 มิลลิลิตร แล้วกวนให้เข้ากัน
- 5.2 เติมผักตบชวาที่เตรียมไว้ 100 กรัม ลงในบีกเกอร์และกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 5.3 นำโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ 6 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 40 มิลลิลิตร ค่อยๆรินสารละลายลงในบีกเกอร์ แล้วทำการกวนช้า ๆ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
- 5.4 นำอีพิคลอโรไฮดริน 2 มิลลิลิตรละลายในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรเทลงในบีกเกอร์แล้วกวนเป็นเวลา 16 ชั่วโมง
- 5.5 นำโซเดียมไฮดรอกไซด์ 48 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร ค่อยๆรินสารละลายลงในบีกเกอร์
- 5.6 เติมคาร์บอนไดออกไซด์ 15 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์และทำการกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 5.7 นำของผสมล้างด้วยน้ำกลั่น, อะซีโตน 1500 มิลลิลิตร และอีเธอร์ 150 มิลลิลิตร แล้วทำให้แห้งใน dissicator เป็นเวลา 72 ชั่วโมง

## 6. การเตรียมน้ำเสียที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

- 6.1 น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก (Cu, Ni, Zn) 5 มิลลิกรัม/ลิตร  
 ดูดสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร จำนวน 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร เจือจางให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสีย สังเคราะห์เท่ากับ 5
- 6.2 น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก (Cu, Ni, Zn) 10 มิลลิกรัม/ลิตร  
 ดูดสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร เจือจางให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชของ น้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5
- 6.3 น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก (Cu, Ni, Zn) 20 มิลลิกรัม/ลิตร  
 ดูดสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร เจือจางให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตรจะได้สารละลายที่มีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสีย สังเคราะห์เท่ากับ 5

6.4 น้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนัก (Cu, Ni, Zn) 50 มิลลิกรัม/ลิตร.

อุตสาหกรรมละลายโลหะหนักเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตรจำนวน 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตร เจือจางให้มีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายที่มีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสีย สังเคราะห์เท่ากับ 5

6.5 การเตรียมน้ำเสียที่มีโลหะหนักเข้มข้น 0.5 นอร์มอล

1. สารละลายทองแดงเข้มข้น 0.5 นอร์มอล

ละลาย  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 31.211 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร

2. สารละลายนิกเกิลเข้มข้น 0.5 นอร์มอล

ละลาย  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 32.858 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร

3. สารละลายสังกะสีเข้มข้น 0.5 นอร์มอล

ละลาย  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ปริมาณ 35.942 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 500 มิลลิลิตร

4.2.2 การหาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเคลดูลอสแลกเปลี่ยนไอออน

1. บรรจุเรซินที่ทราบน้ำหนักลงในคอลัมน์ ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร ชั้นเรซินสูง 16 เซนติเมตร

2. ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 0.5 นอร์มอล จำนวน 500 มิลลิลิตรด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตร/นาที

3. ชะล้างอย่างช้าด้วยน้ำกลั่น 1 ปริมาตรเรซิน ใช้อัตราการไหลเดียวกับการป้อนน้ำดิบ

4. ทำการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายเกลือแกงเข้มข้น 1 นอร์มอล จำนวน 100 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราการไหล 3 มิลลิลิตร/นาที

5. นำน้ำที่ได้จากการรีเจนเนอเรชันไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแต่ละชนิด หน่วยจะอยู่ในรูป มิลลิอิกิววาเลนท์/กรัม น้ำหนักแห้ง (meq/g dry. wt.)

#### 4.2.3 การเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแต่ละชนิดโดยการแปรเปลี่ยนค่าตัวแปร

1. บรรจุเรซินที่ใช้ทดลองลงในคอลัมน์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร ให้ชั้นเรซินสูงประมาณ 20 เซนติเมตร
2. ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าคอลัมน์ โดยมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรตามตารางที่ 4.1 ด้วยอัตราการไหล 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง (3 มิลลิลิตร/นาที)
3. เก็บตัวอย่างน้ำ ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนทุก 30 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ทดลองจนความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหมด
4. ซะล้างอย่างช้าด้วยน้ำกลั่น 1 ปริมาตรเรซิน ใช้อัตราการไหลเดียวกับการป้อนน้ำดิบ
5. ทำการรีเจนเนอเรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือสารละลายเกลือแกงเข้มข้น 0.5 นอร์มอล โดยใช้อัตราการไหล 10 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง (10 มิลลิลิตร/นาที) เก็บตัวอย่างทุก 30 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หา ปริมาณโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### ผลของการวิจัย

#### 5.1 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างๆ

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิด คือ

1. ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี (Untreated Water hyacinth)
2. ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยคลอไรอะซีติกเอซิด (Carboxymethyl-treated Water hyacinth)
3. ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยโซเดียม 2-คลอโรซัลไฟเนต (Sulphoethyl-treated Water hyacinth)
4. ผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ (Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth)
5. ชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี (Untreated bagasse)
6. ชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยคลอไรอะซีติกเอซิด (Carboxymethyl-treated bagasse)

ตารางที่ ๘-1 ถึง ๘-7 ในภาคผนวก แสดงผลการทดลองทั้งหมดในการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 5.1 แสดงผลสรุปของลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ 5.1 จะเห็นว่าผักตบชวาและชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีมีความหนาแน่นสูงขึ้น ทั้งความหนาแน่นจริง (True density) และความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) โดยที่ Carboxymethyl-treated Water hyacinth, Carboxymethyl-treated bagasse, Sulphoethyl-treated Water hyacinth และ Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth มีค่าความหนาแน่นจริงเท่ากับ 1.023, 1.175, 1.661, 1.680 กรัม/มิลลิลิตร และมีค่าความหนาแน่นปรากฏเท่ากับ 0.274, 0.367, 0.328 และ 0.318 กรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ ส่วนผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทางเคมีมีค่าความหนาแน่นจริงเท่ากับ 0.975 และ 0.766 กรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ และมีค่าความหนาแน่นปรากฏ เท่ากับ 0.227 และ 0.240 กรัม/ มิลลิลิตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

สารเซลลูโลส	ขนาด (มิลลิเมตร)	ปริมาตร* (มิลลิลิตร)	ความหนาแน่น ปรากฏ (กรัม/มิลลิลิตร)	ความหนาแน่น จริง (กรัม/มิลลิลิตร)	เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร ช่องว่าง	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น (เรซินแห้ง)	ค่าการบวมน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร) (เรซินแห้ง)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น (เรซินเปียก)
Untreated Water hyacinth	0.18-0.212	65	0.227	0.975	76.72	9.321	21.3	79.41
Carboxymethyl-treated Water hyacinth	0.18-0.212	60	0.274	1.023	73.21	10.032	23.2	73.75
Sulphoethyl-treated Water hyacinth	0.18-0.212	65	0.328	1.661	80.25	8.045	10.8	61.14
Crosslink-Xanthate- treated Water hyacinth	0.18-0.212	65	0.318	1.680	81.07	8.455	12.2	61.31
Untreated bagasse	0.18-0.212	70	0.240	0.766	68.67	5.668	13.9	82.04
Carboxymethyl-treated bagasse	0.18-0.212	60	0.367	1.175	68.77	10.860	11.2	75.50

\* ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนและปล่อยน้ำออกจนแห้ง

เมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์ปริมาตรช่องว่าง (%Void volume) พบว่า เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์ปริมาตรช่องว่างจะมีค่าลดลงและ สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่มีช่องว่างน้อยจะมีความสามารถเก็บน้ำได้ดี ซึ่งจะมีผลทำให้ ความชื้นของสารเซลลูโลสและการพองตัวน้อย จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าผักตบชวาและชานอ้อยที่ ผ่านกระบวนการเคมีมีเปอร์เซ็นต์ปริมาตรช่องว่าง ความชื้น การพองน้ำต่ำกว่าผักตบชวาและชานอ้อย ที่ไม่ผ่านกระบวนการเคมี เนื่องจากในการปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย ขั้นตอนแรกของ กระบวนการ คือ การกวนวัสดุในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น ปฏิกริยานี้ทำให้การพองน้ำ ของวัสดุลดลง หลังจากนั้นจึงเติมสารเคมีที่จะเติมหมู่ไอออนให้กับสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ผักตบชวาและชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีคุณสมบัติทางด้าน กายภาพและทางเคมีดีกว่าผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ

## 5.2 การเปรียบเทียบขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนกับ โลหะหนักชนิดต่าง ๆ

การศึกษาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสโดยจะใช้น้ำเสีย สังเคราะห์ ที่มีปริมาณโลหะหนักมากเกินพอ ไหลผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนหลังจากนั้นทำ การชะล้างโดยใช้สารรีเจนเนอเรนต์เข้มข้น 1 นอร์มอล แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ ชะล้าง ออกมาได้ ซึ่งสามารถสรุปผลได้ด้วยตารางที่ 5.2

เมื่อพิจารณาผลจากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพคือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.686-0.809 มิลลิกรัมอิควิวาเลนต์/กรัม โดยขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียที่นำมาใช้ทดลอง ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีค่าสูงกว่าผักตบชวาที่ปรับสภาพประมาณ 2-3 เท่า และมากกว่าชานอ้อย ที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพประมาณ 10-12 เท่า ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการทางเคมีที่ใช้คลอโรอะซิติกแอซิด, โซเดียม 2- คลอโรเอเทน ซัลไฟเนต และ คาร์บอนไดออกไซด์ ในการปรับสภาพของผักตบชวาและชานอ้อย ทำให้ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผัก ตบชวา และชานอ้อยลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ผักตบชวา มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนดีกว่าชานอ้อย โดยผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีขีดความ สามารถสูงกว่าชานอ้อยประมาณ 10-12 เท่า ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพมีขีดความสามารถสูง กว่าชานอ้อยประมาณ 6-8 เท่า

ตารางที่ 5.2 ซีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างๆ  
ที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	ซีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (มิลลิอิกวาเลนต์/กรัม)( meq/g )		
	Cu <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>
Untreated Water hyacinth	0.809	0.686	0.705
Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth	0.279	0.583	0.595
Sulphoethyl-treated Water hyacinth	0.233	0.500	0.503
Carboxymethyl-treated Water hyacinth	0.496	0.346	0.330
Untreated bagasse	0.086	0.065	0.069
Carboxymethyl-treated bagasse	0.069	0.052	0.056

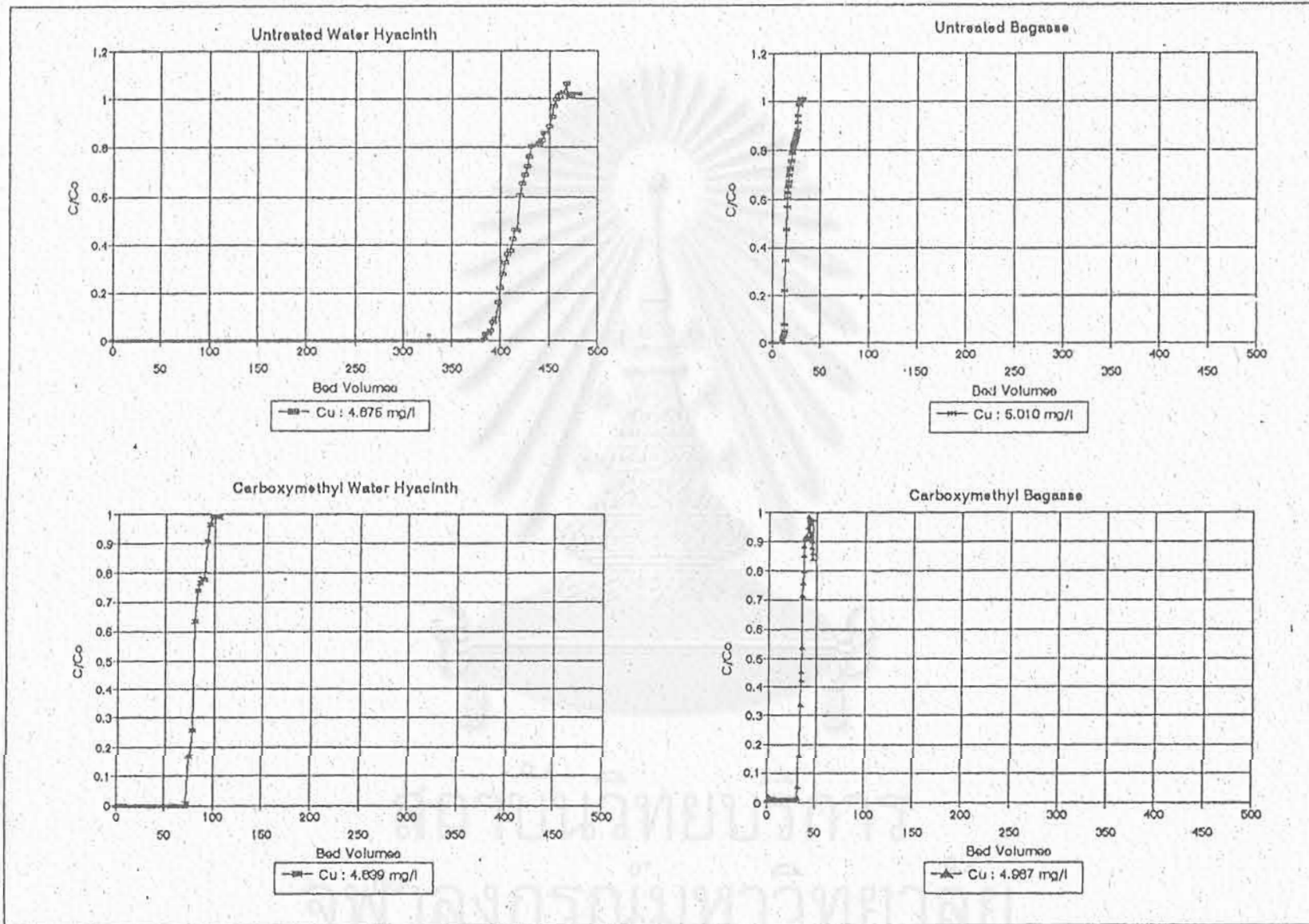
### 5.3 การเปรียบเทียบผลของกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนสภาพผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพกับใช้สารเคมีปรับสภาพ ในกรณีของผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพที่ใช้ในการทดลองมีการเตรียม คือ นำไปกวนในกรดไฮโดรคลอริก นาน 30 นาที แล้วล้างออกด้วยน้ำ จุดประสงค์ในการทำขั้นตอนนี้เพื่อเติมหมู่ไฮดรอกซิลให้กับผักตบชวาและชานอ้อย ในกรณีของผักตบชวาและชานอ้อยที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีประกอบด้วยการใช้สารละลายต่างแก่เข้มข้นทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสเพื่อปรับสภาพ ทำให้การพองน้ำของเซลลูโลสลดลง และเติมสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสานและแสดงฟังก์ชันกรุป จากนั้นจึงเติมไฮดรอกซิลเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน ผักตบชวาและชานอ้อยที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารเคมีที่ใช้ในการวิจัยนี้ ได้แก่ Carboxymethyl Cellulose, Sulphoethyl Cellulose และ Crosslink-Xanthate Cellulose

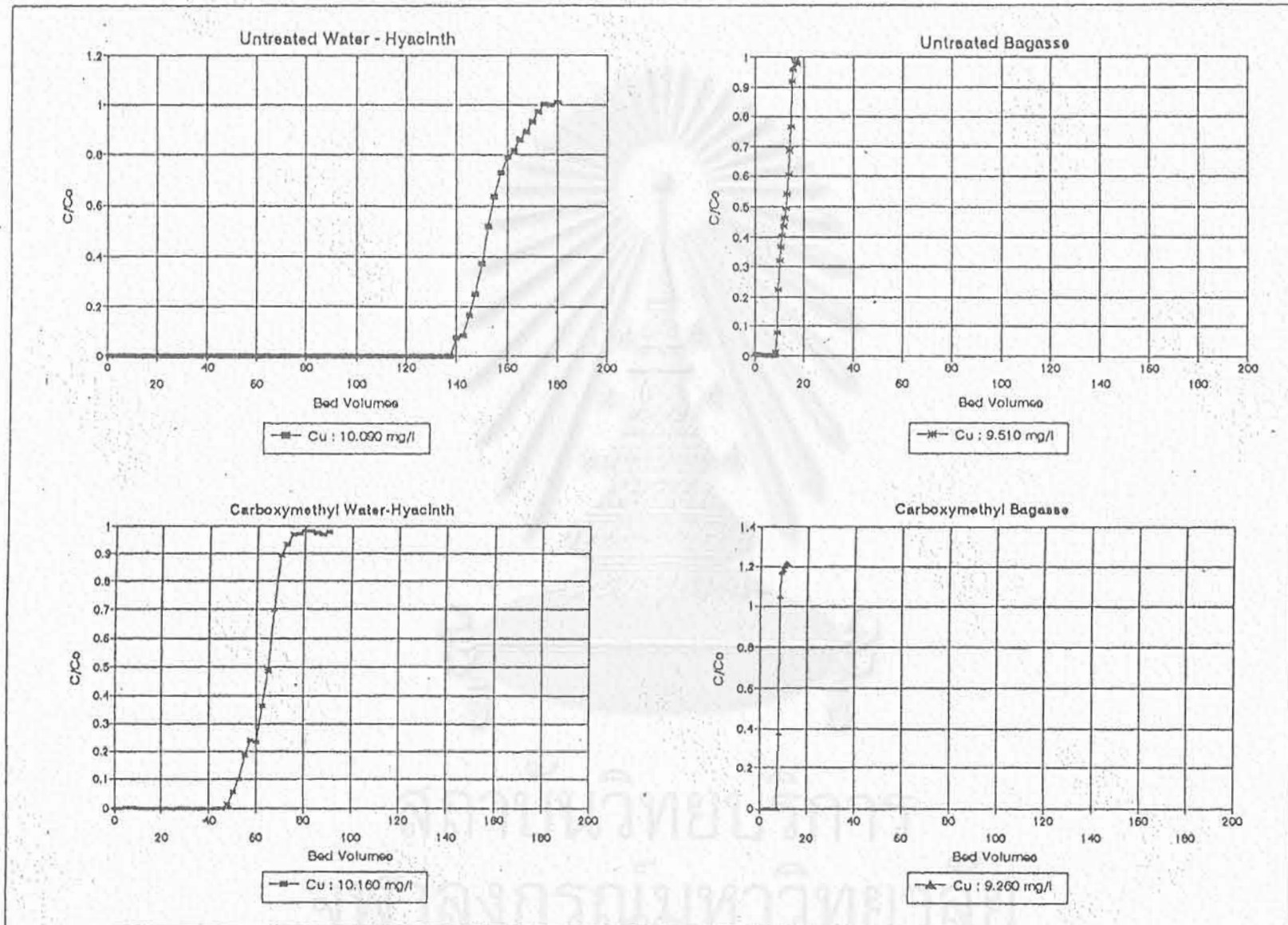
ผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะของผักตบชวาและชานอ้อยชนิดต่างๆ สามารถสรุปเป็นกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.1-5.24 โลหะหนักที่ทดลอง คือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยมีปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

เมื่อพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่า ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดีที่สุด สามารถสรุปได้ตารางที่ 5.3 และ 5.4 ในกรณีที่จะใช้ผักตบชวาเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 485 ปริมาตรเรซินตามชนิดของโลหะหนักและเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนก็จะลดต่ำลง

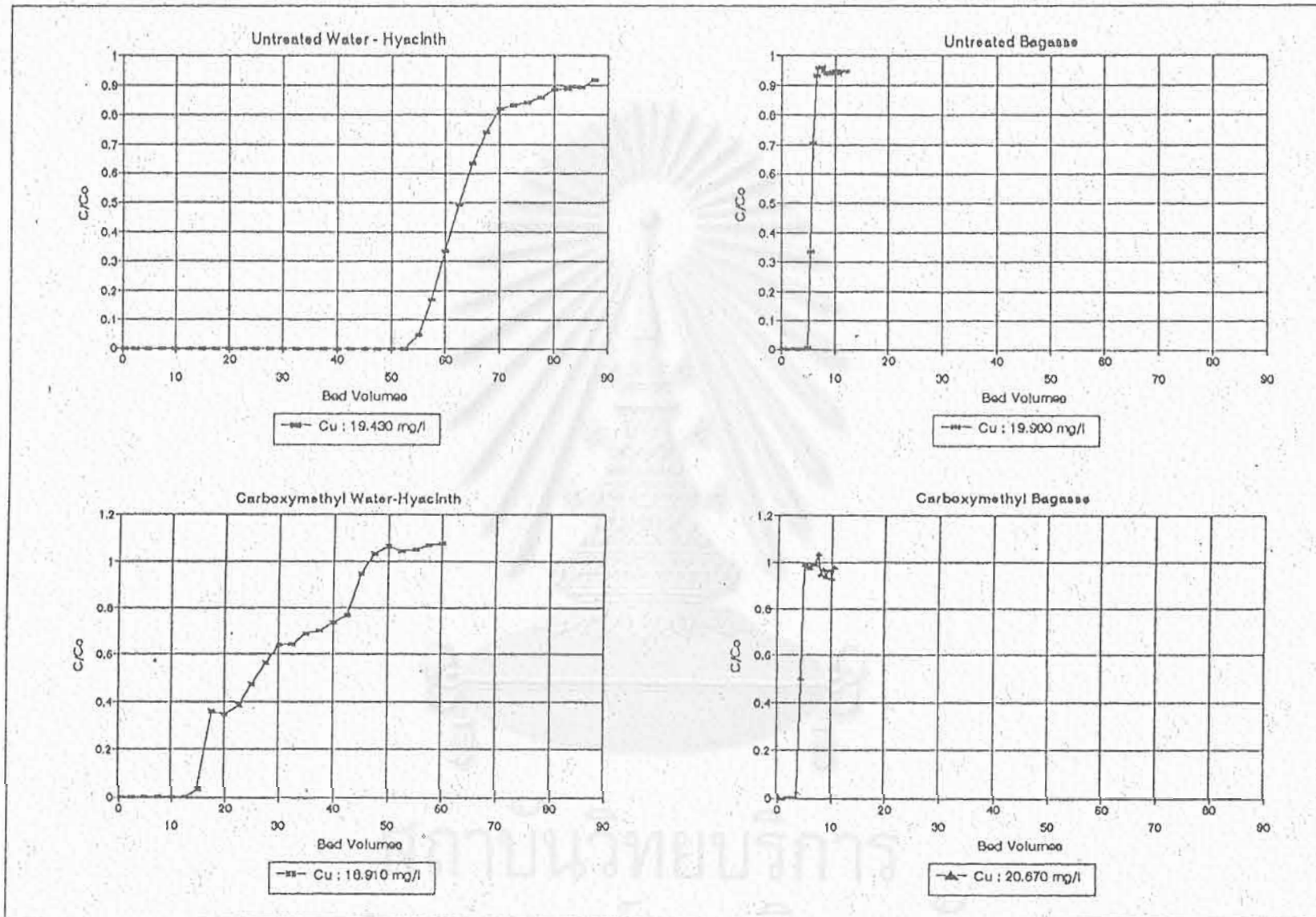
ส่วนประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาแบบ Carboxymethyl, Sulphoethyl Crosslink-Xanthate, ชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพและชานอ้อยแบบ Carboxymethyl Cellulose สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 5.5-5.14 เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลทั้งหมดจะเห็นได้ว่ากระบวนการทางเคมีที่เลือกมาใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อยในการวิจัยนี้ ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นได้แต่ยังลดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสามารถเห็นได้ค่อนข้างชัดเจนกล่าวคือ ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีประสิทธิภาพสูงกว่าผักตบชวาที่ปรับสภาพประมาณ 1-3 เท่า ส่วนชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพมีประสิทธิภาพสูงกว่าชานอ้อยที่ปรับสภาพประมาณ 1.25 เท่า ดังที่ได้แสดงในหัวข้อ 5.2



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

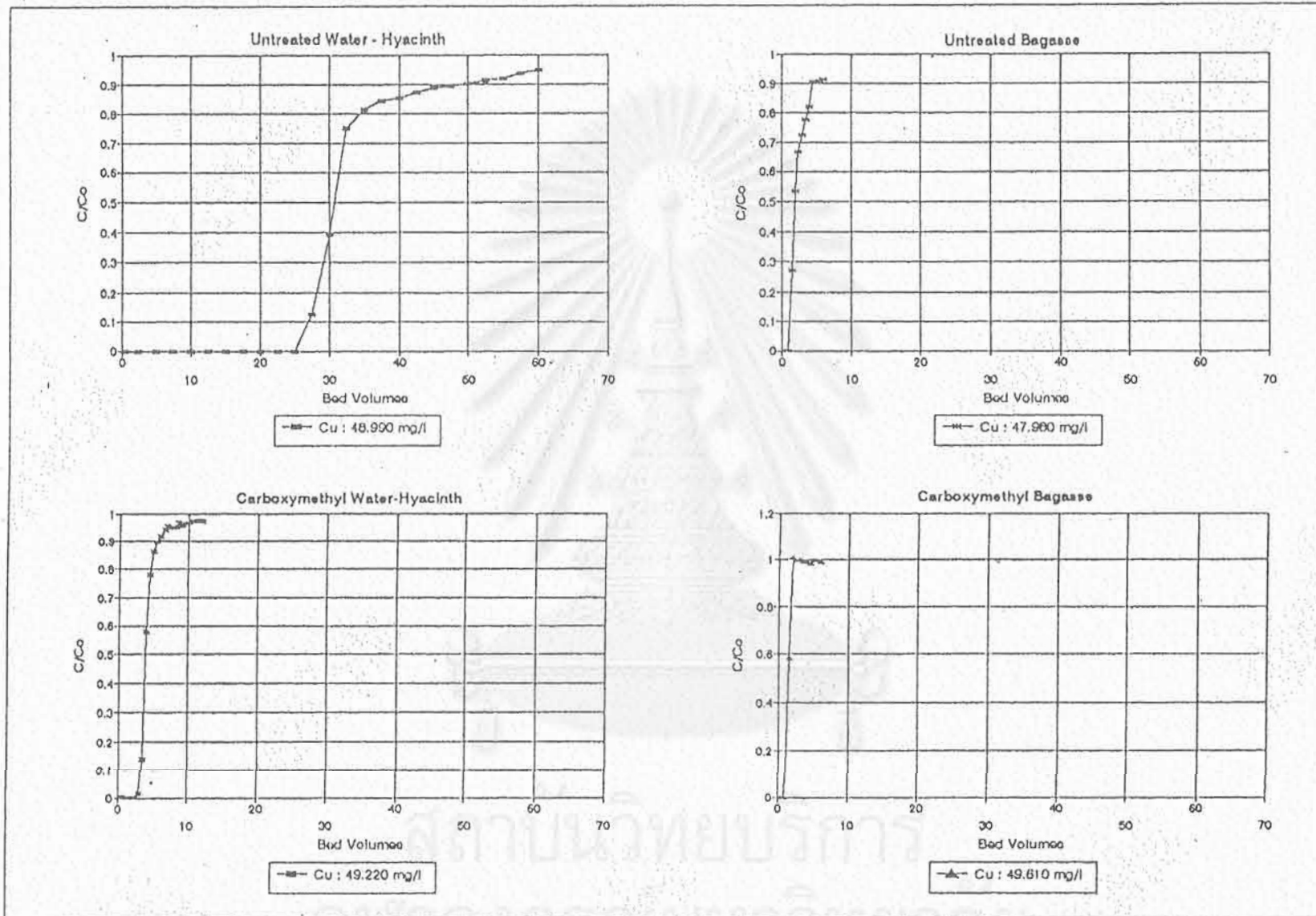


รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

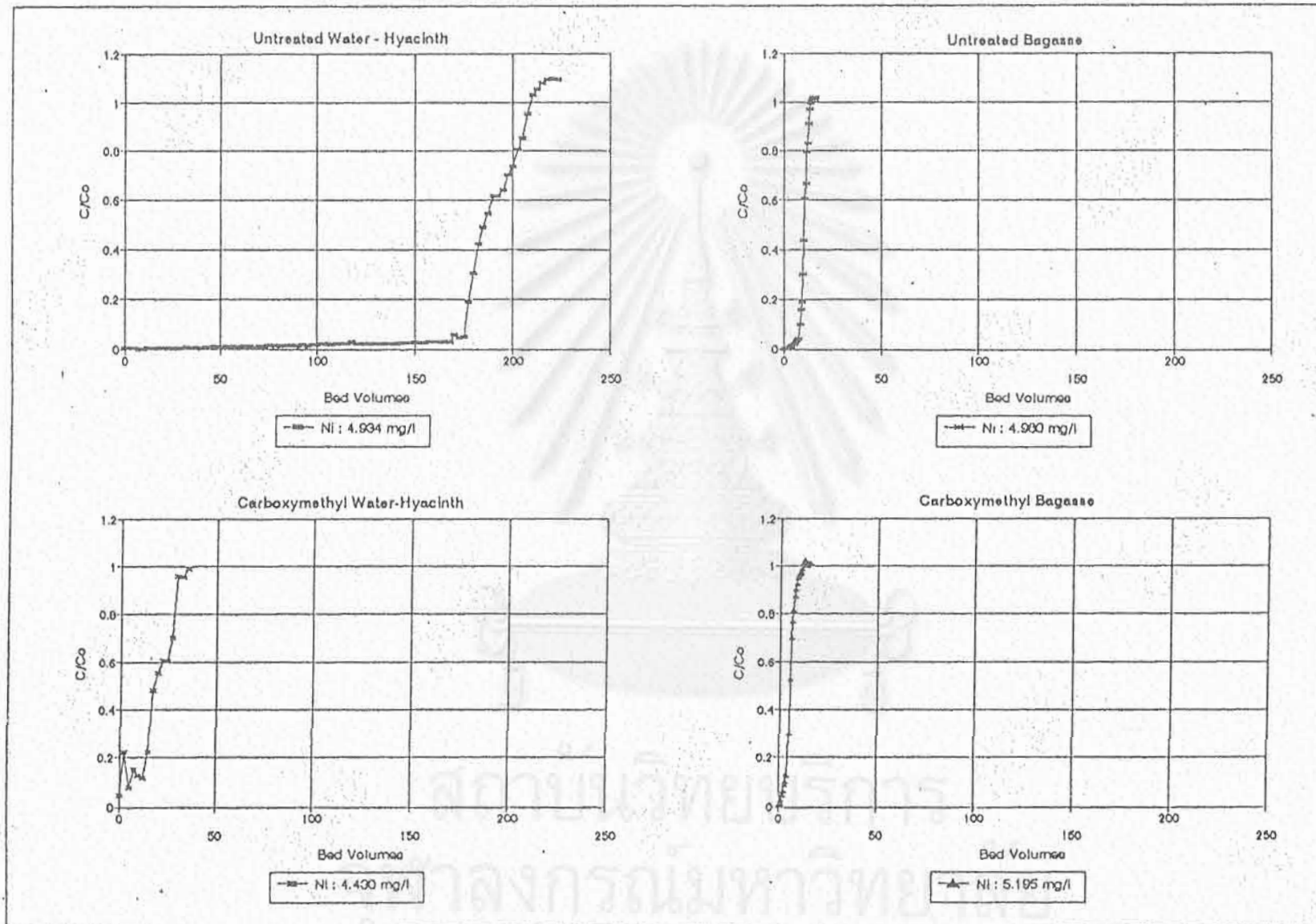


รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

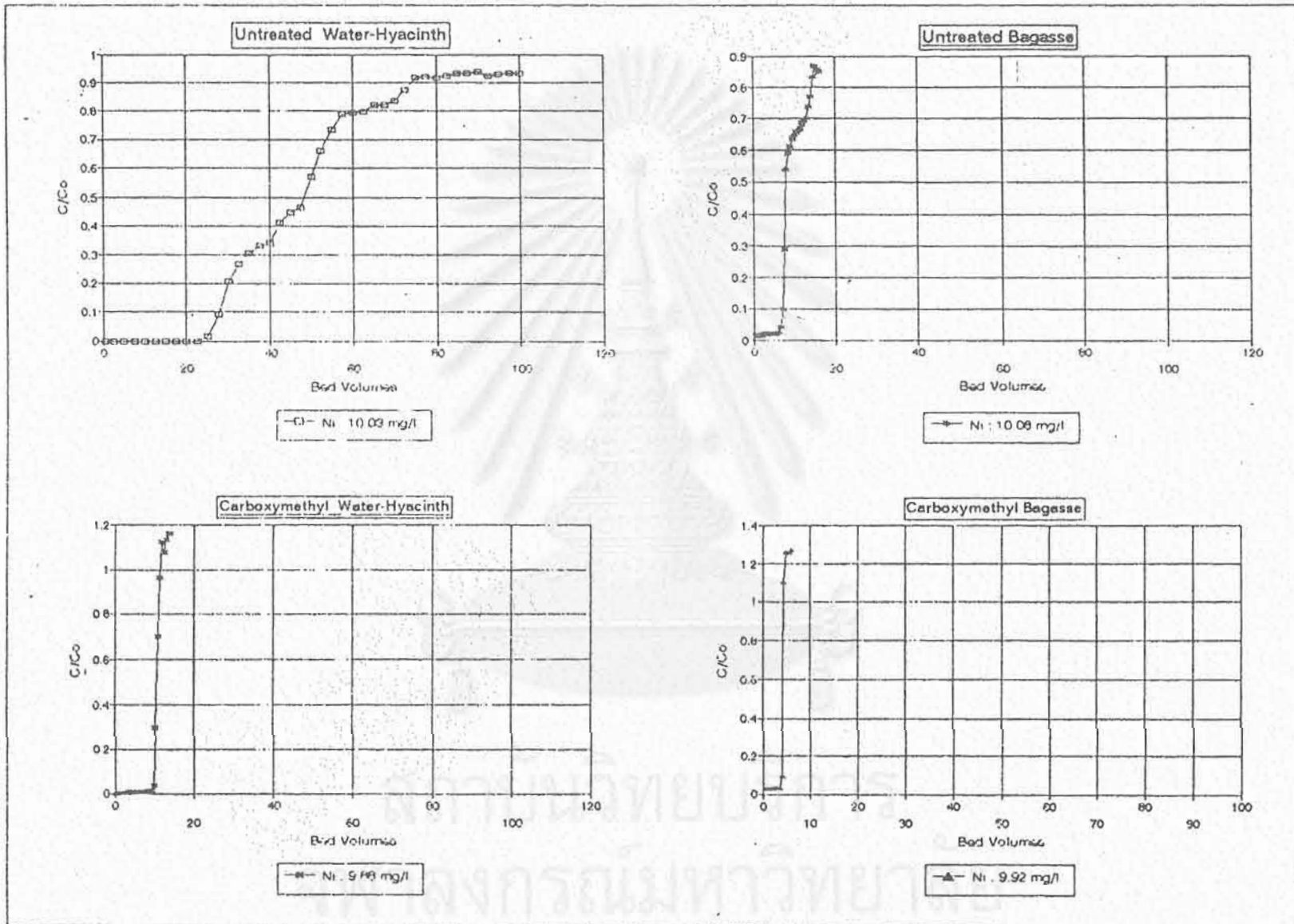




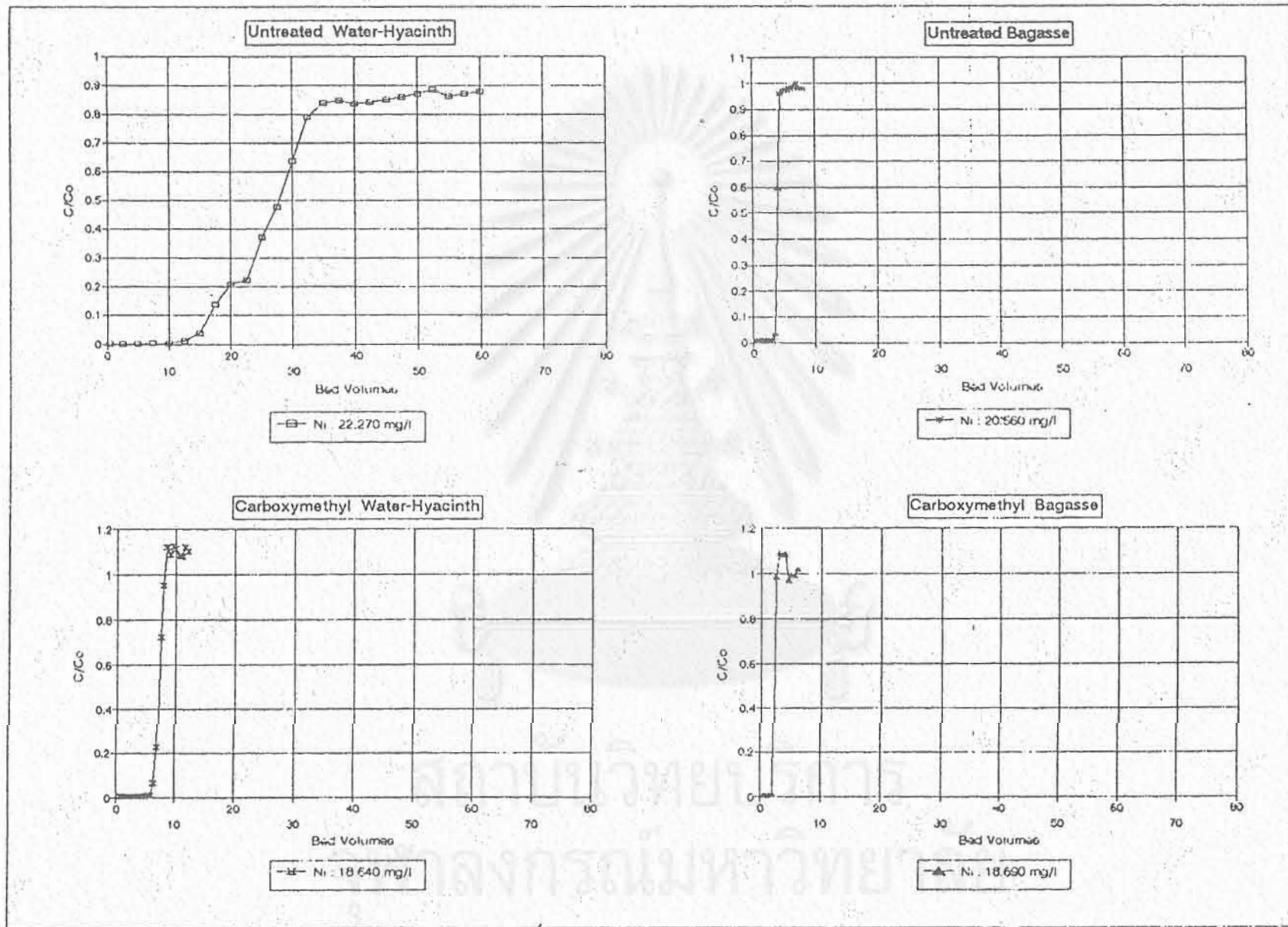
รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร



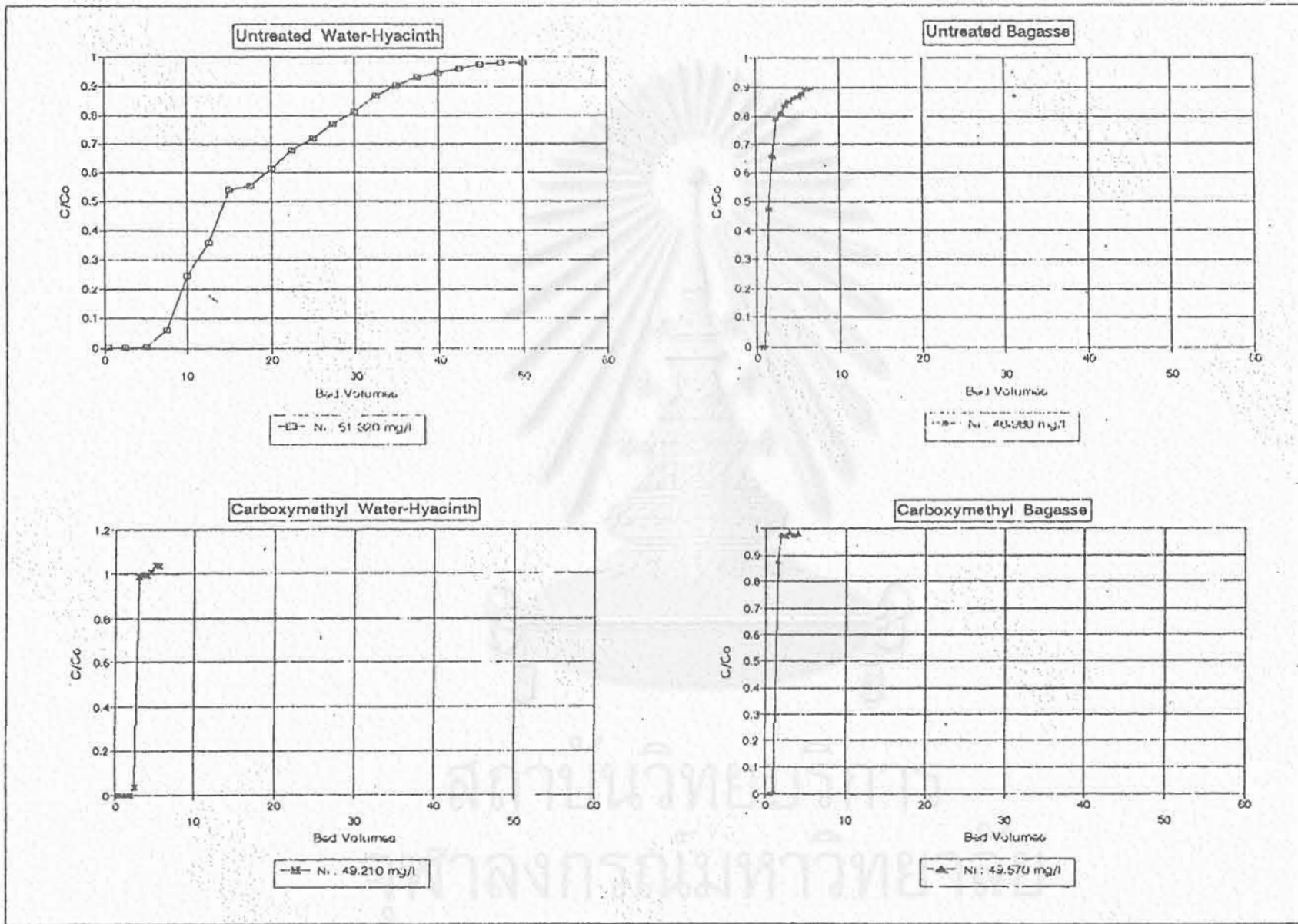
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณนิกเกิลประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร



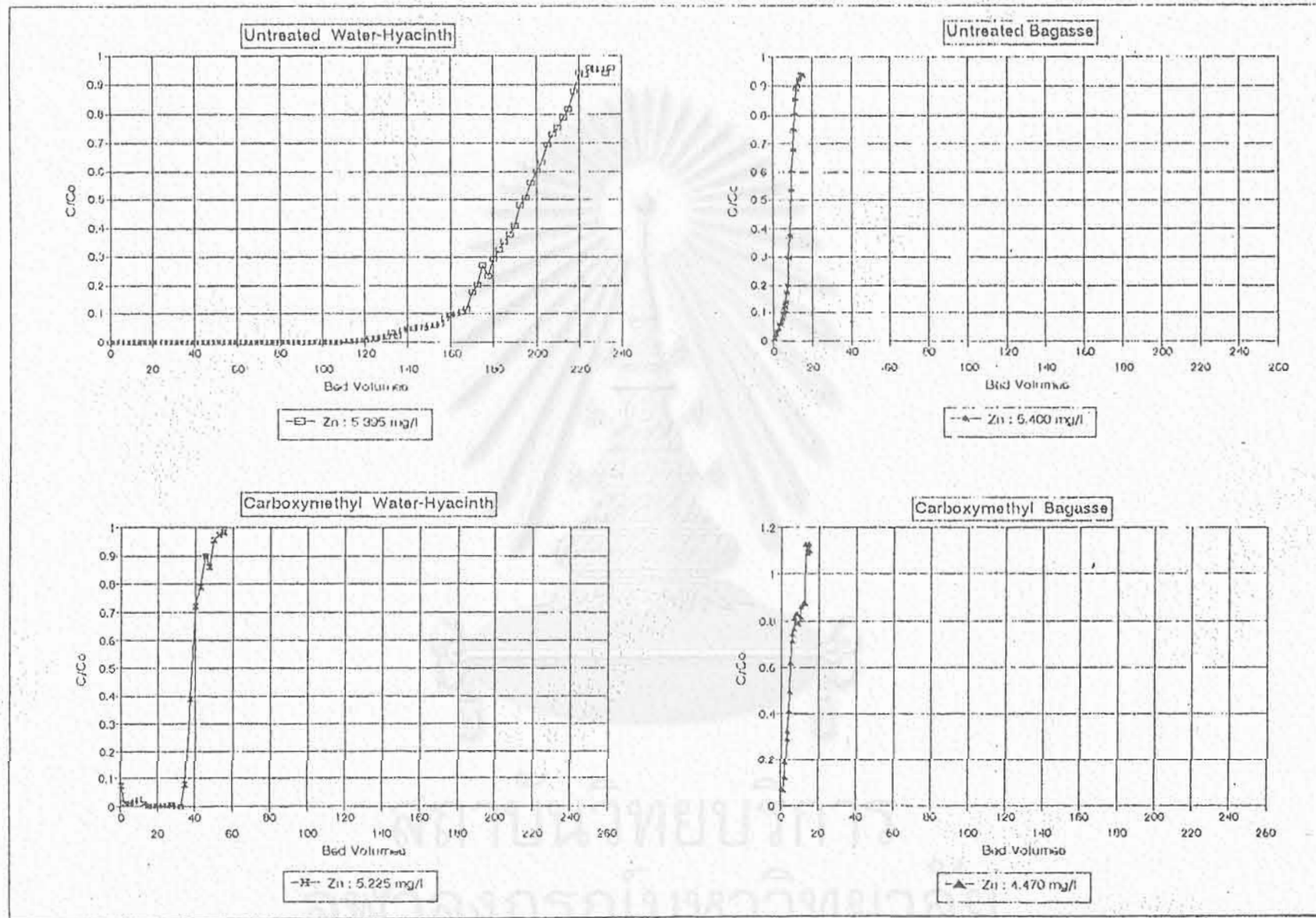
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณนิกเกิลประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร



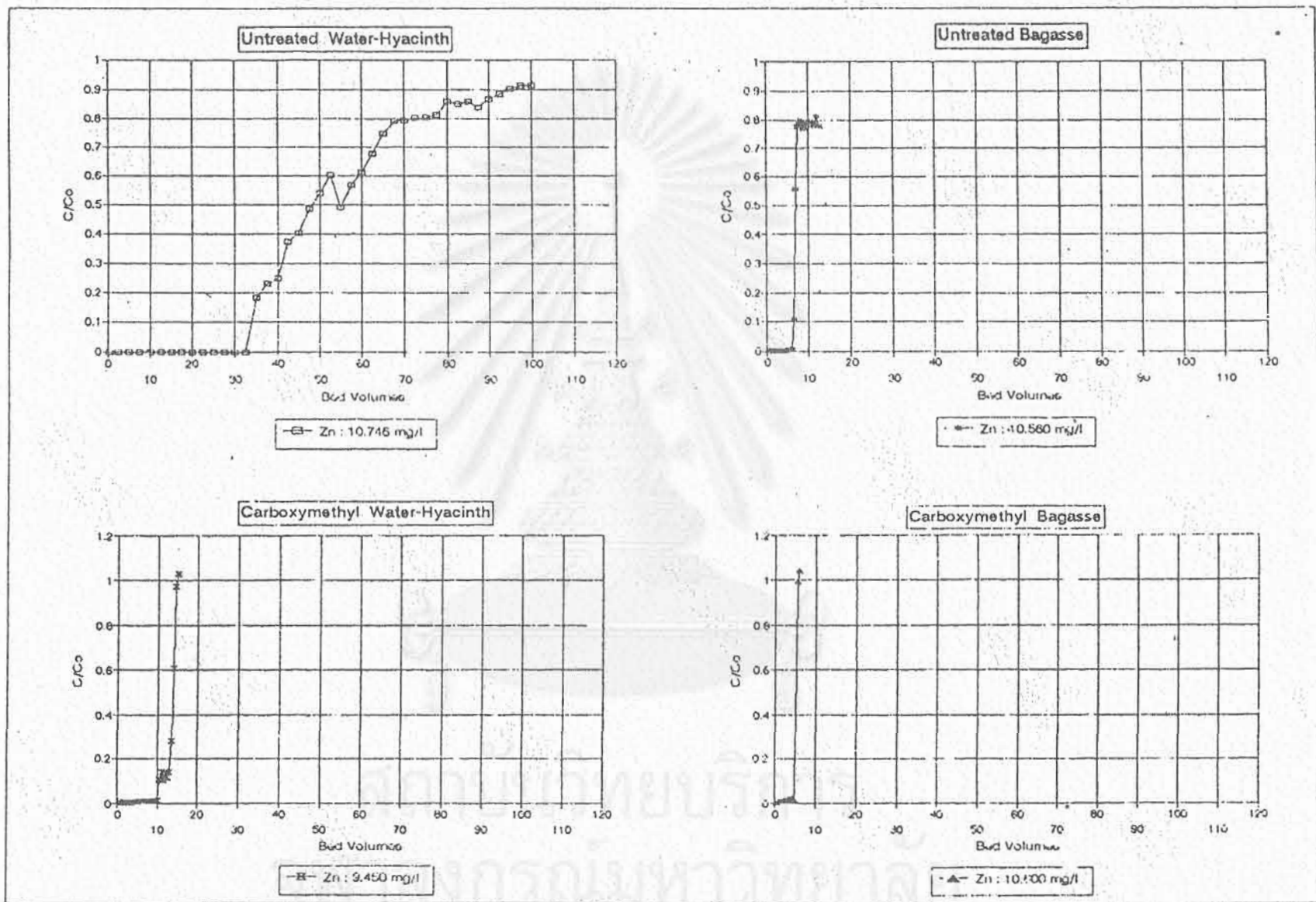
รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ขาน้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณนิกเกิลประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

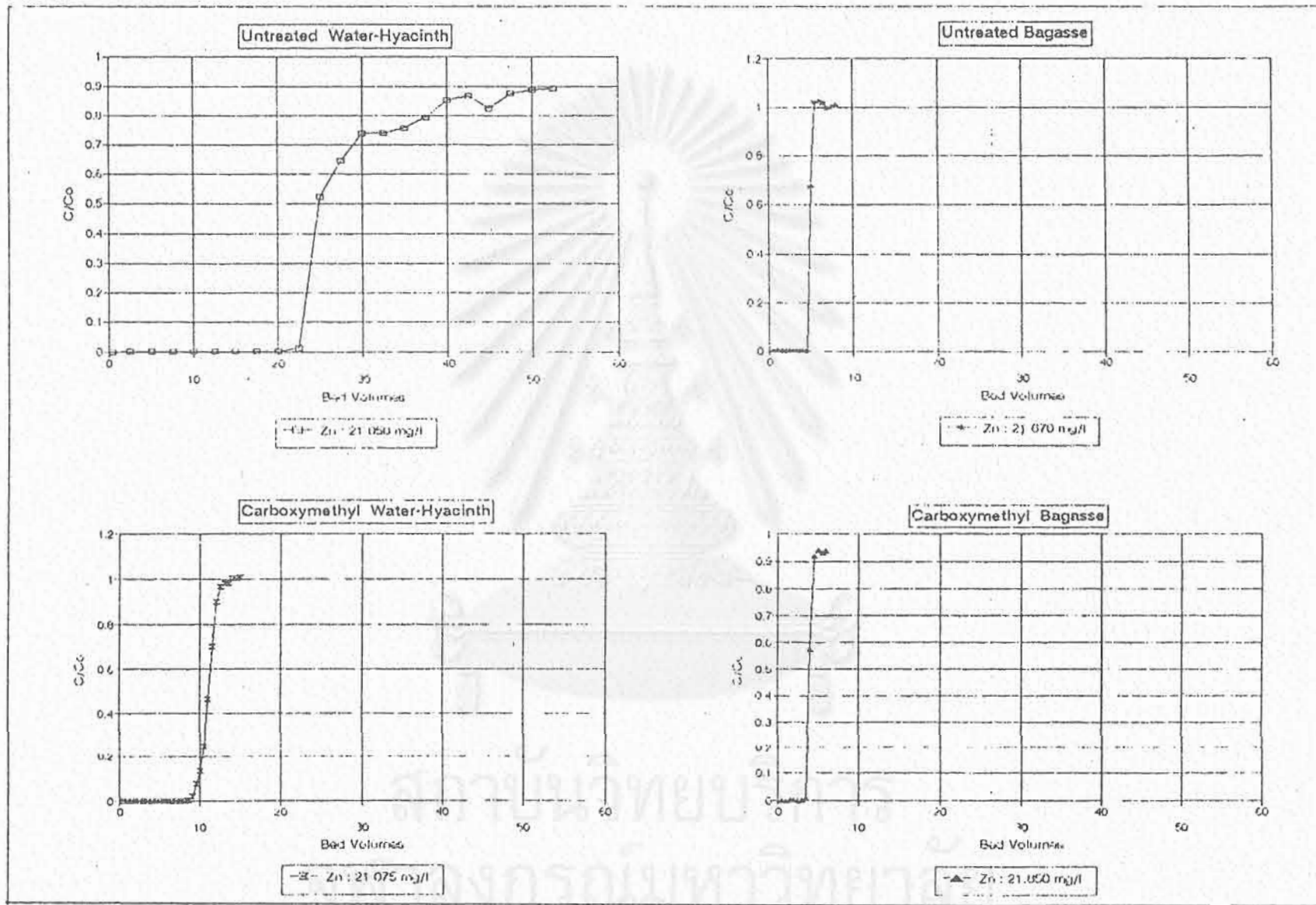


รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณสังกะสีประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร



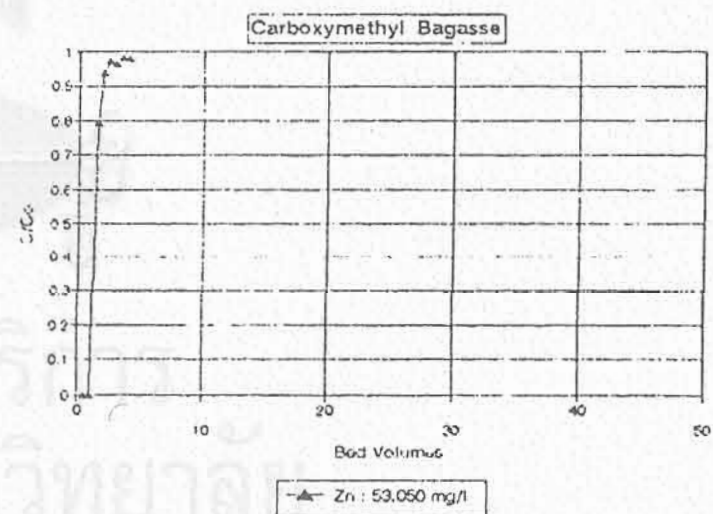
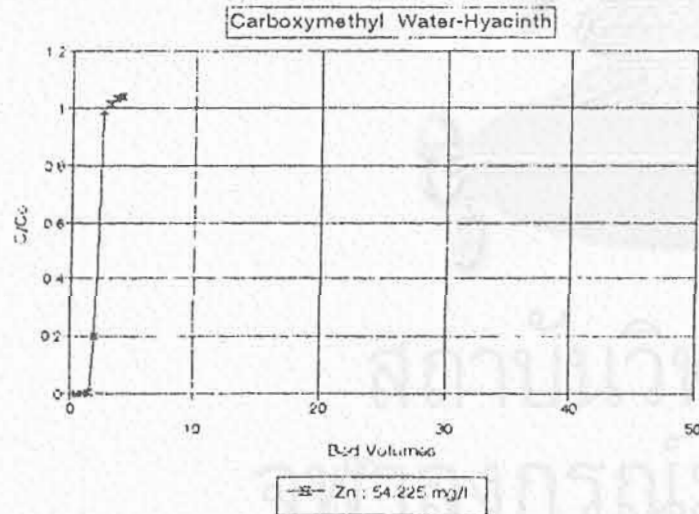
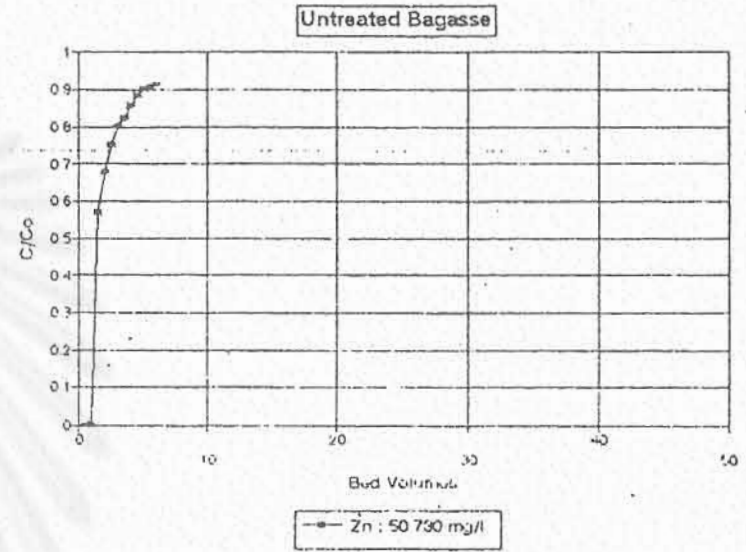
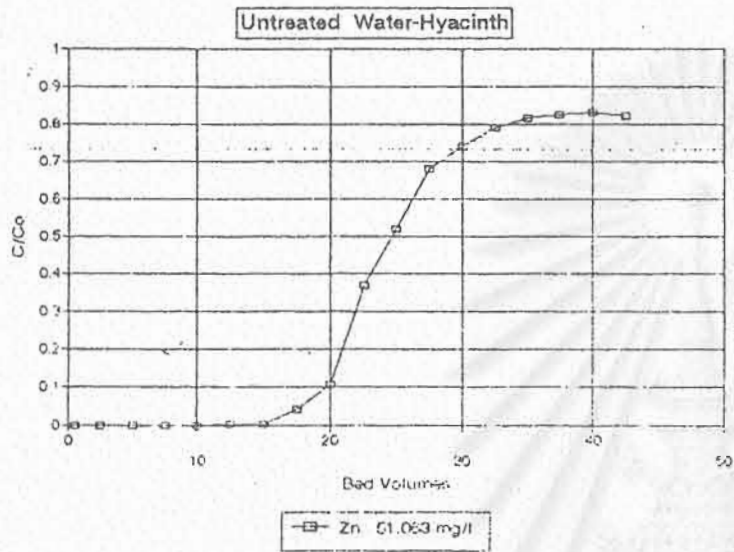
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณสังกะสีประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

I 2012/1039  
689



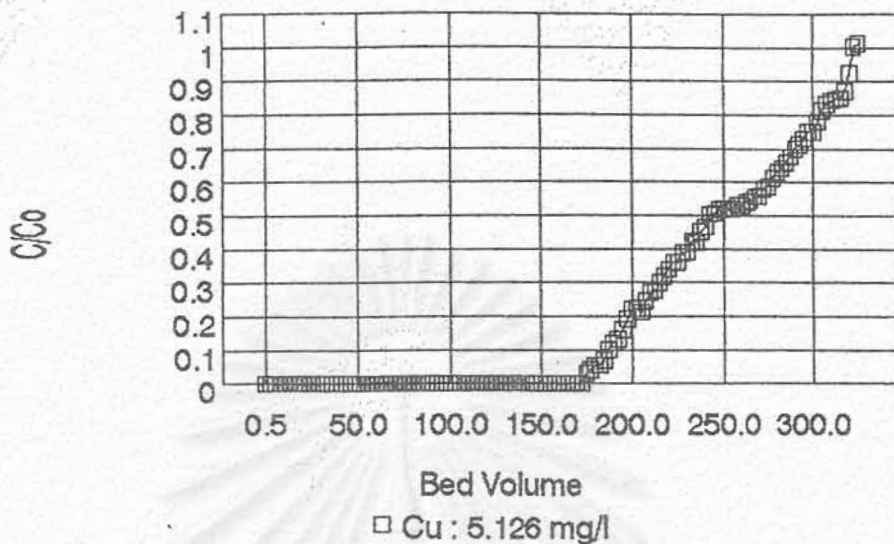
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณสังกะสีประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร



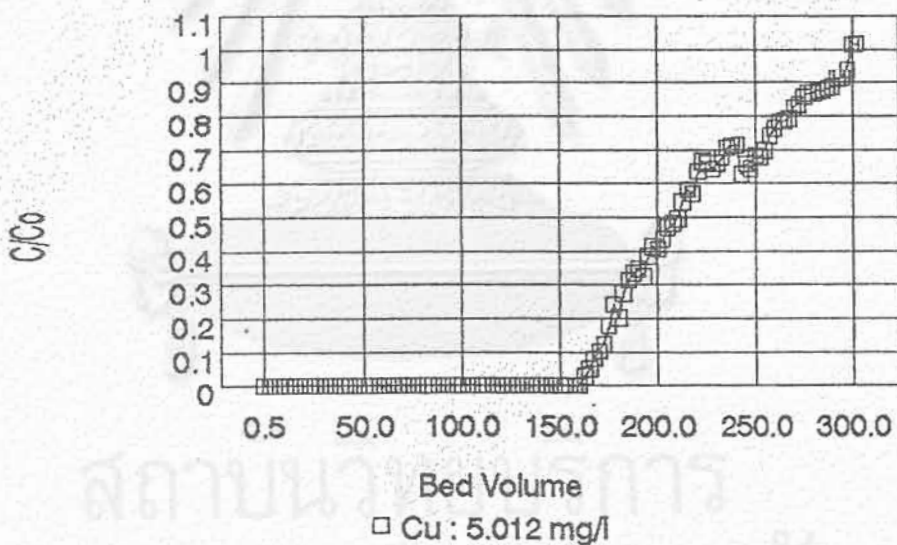


รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผักตบชวา (Water hyacinth) และ ชานอ้อย (Bagasse) ชนิดต่างๆ กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณสังกะสีประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

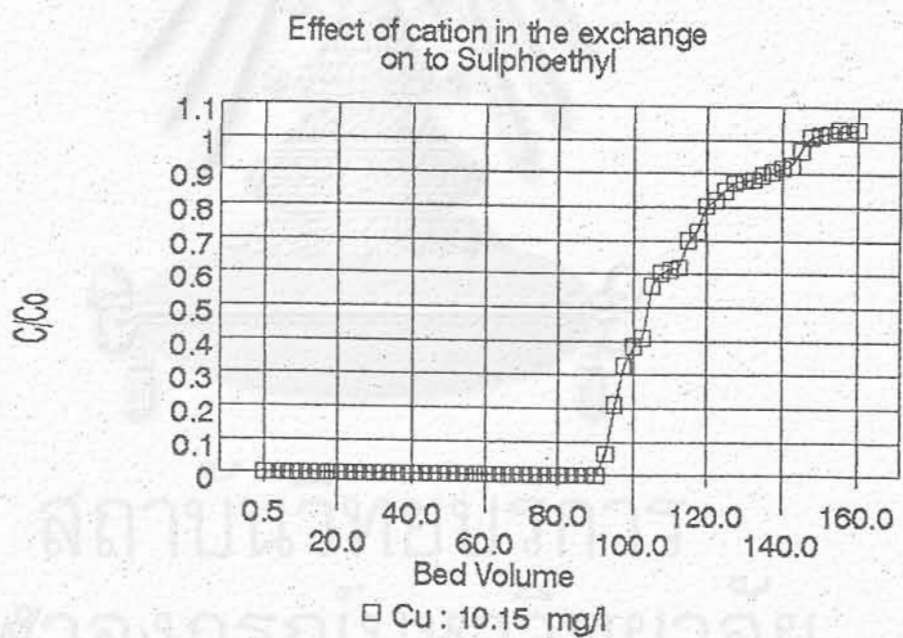
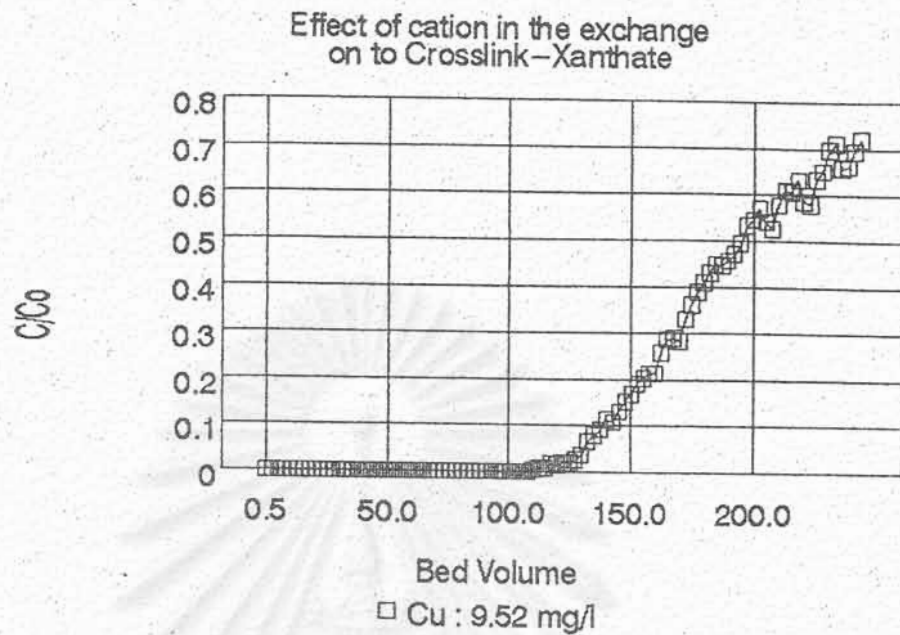
Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate



Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

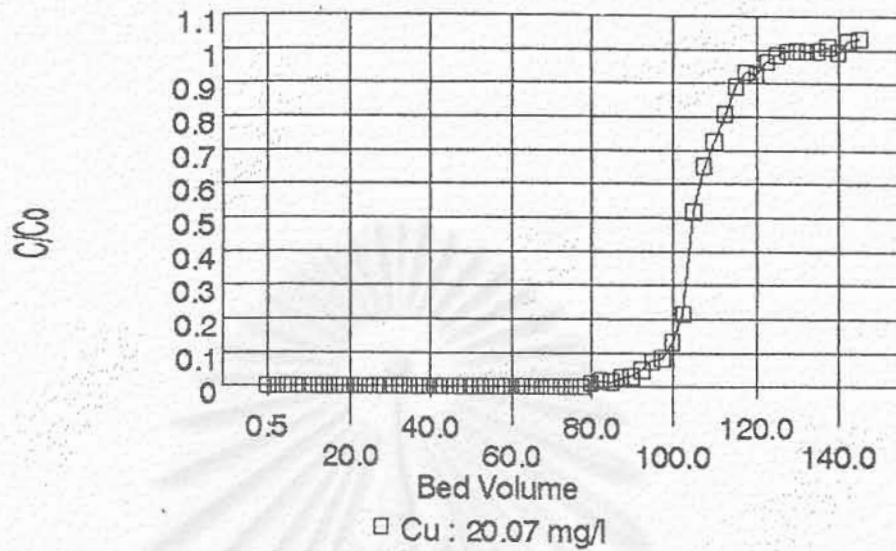


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

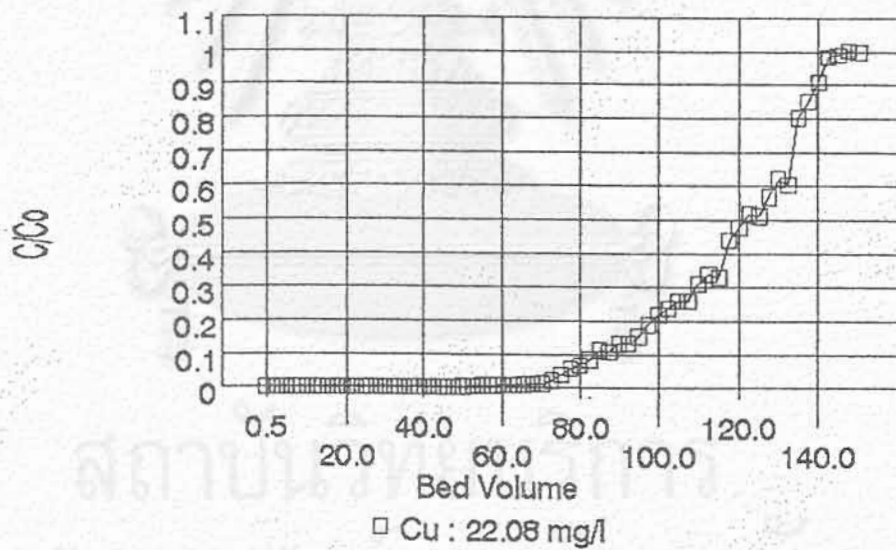


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

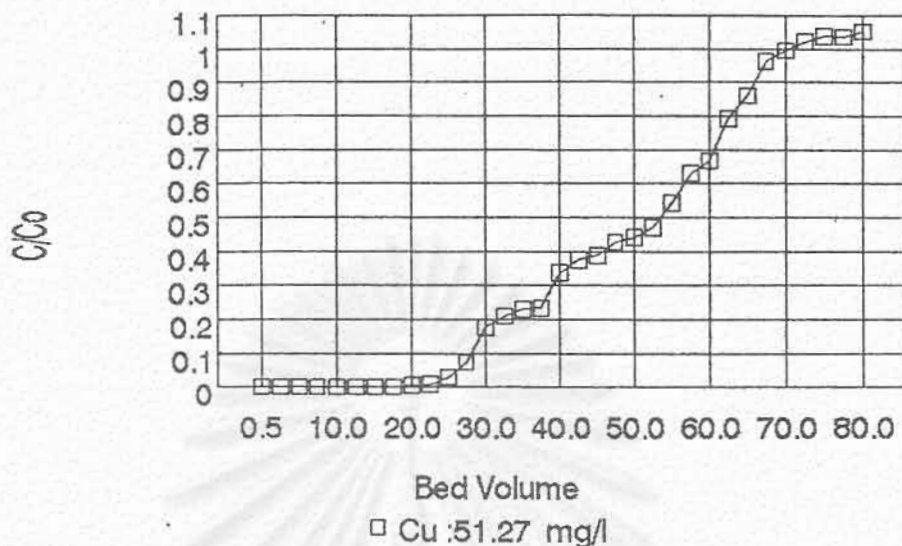


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

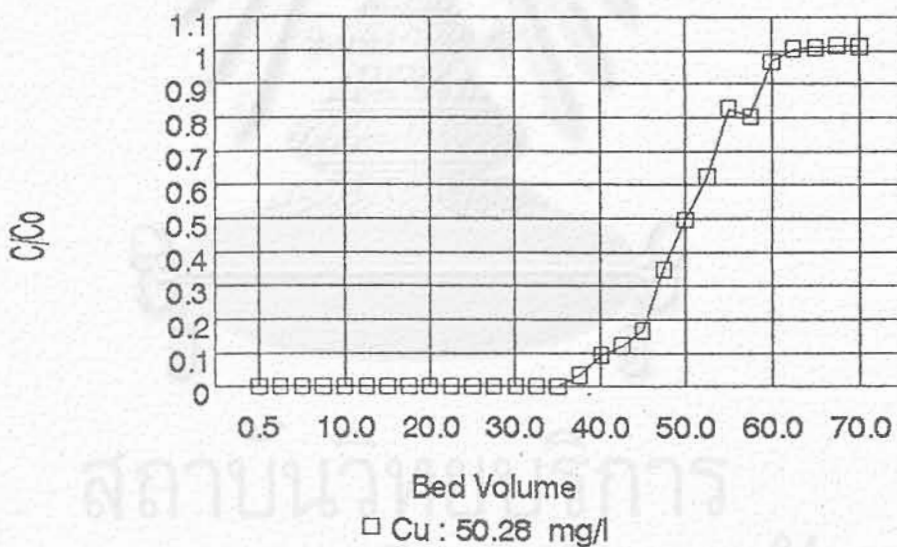


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

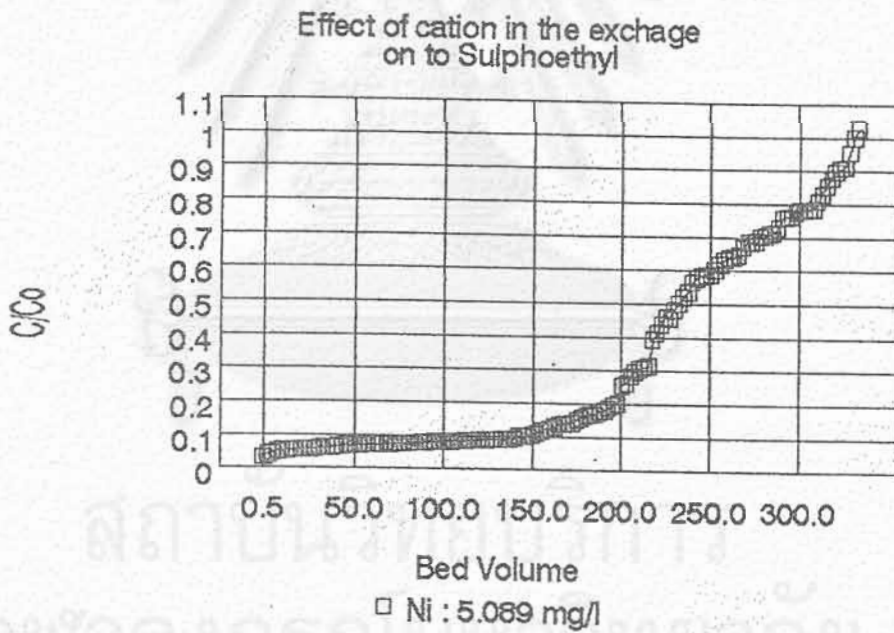
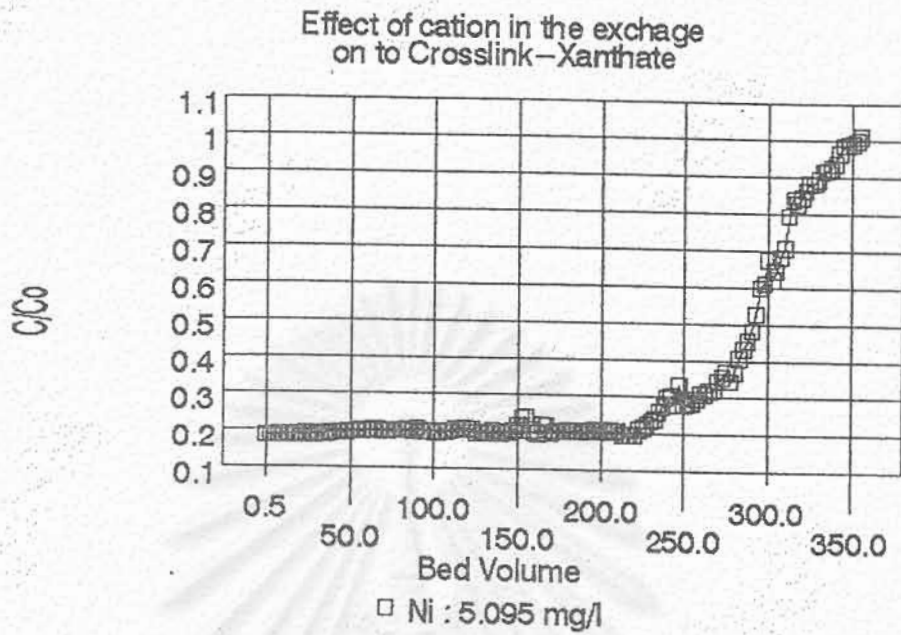
Effect of cation in the exchange on to Crosslink-Xanthate



Effect of cation in the exchange on to Sulphoethyl

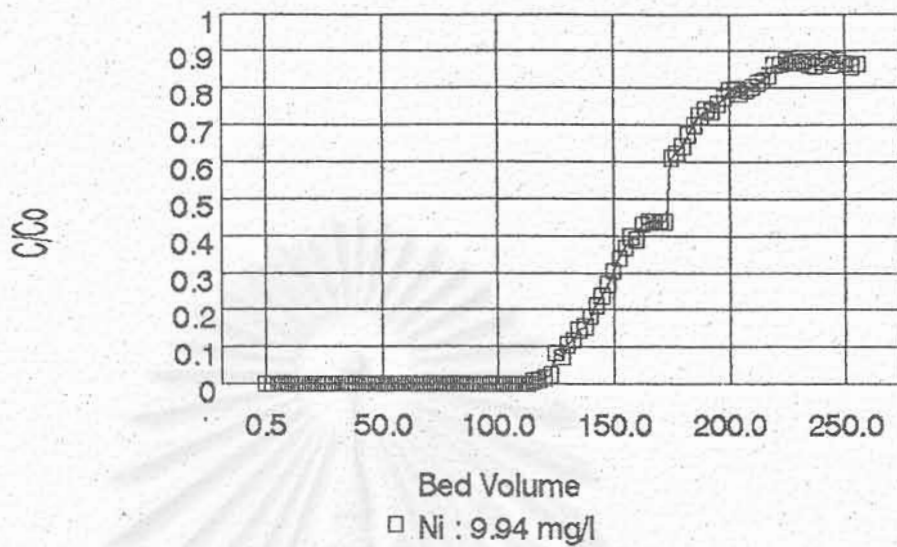


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวาที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณทองแดงประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

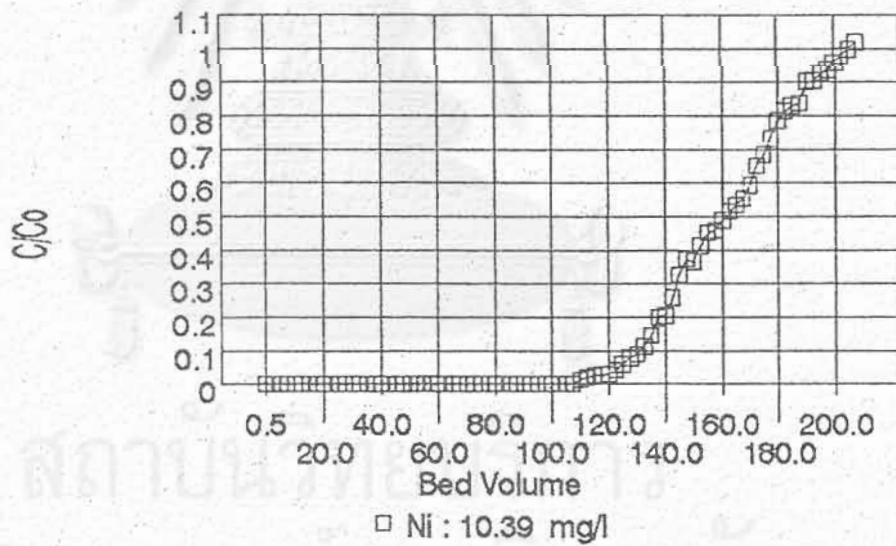


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

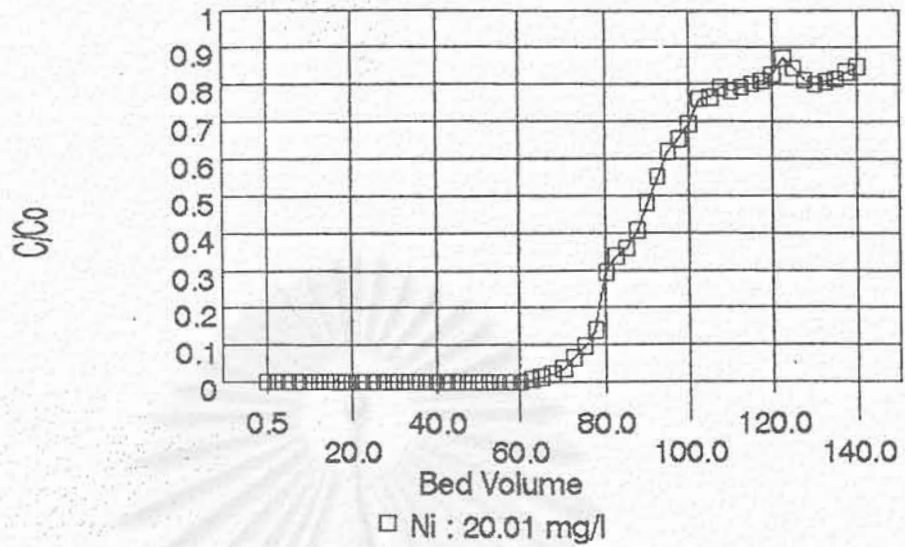


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

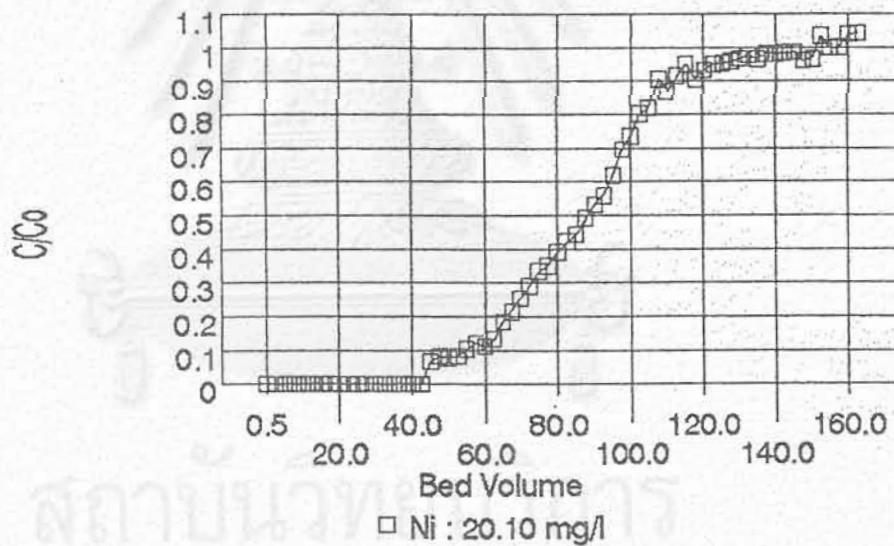


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate



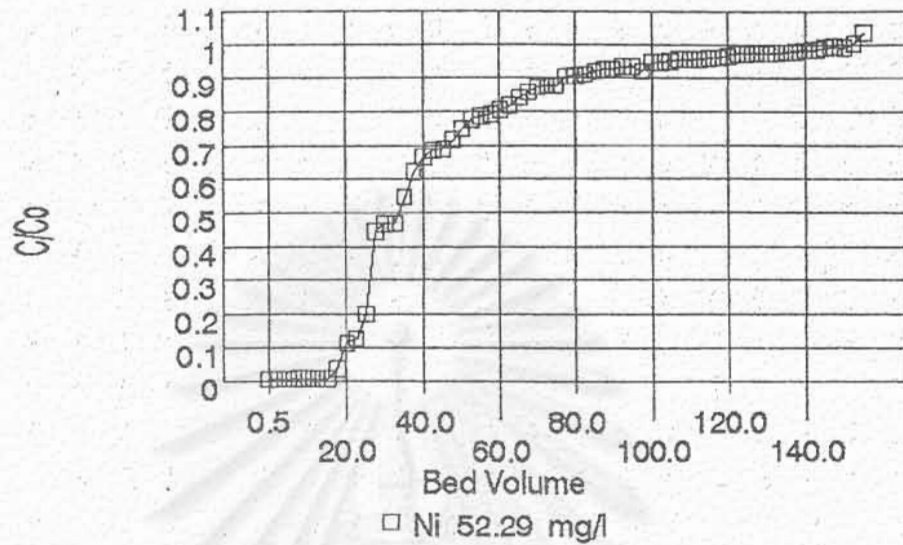
Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl



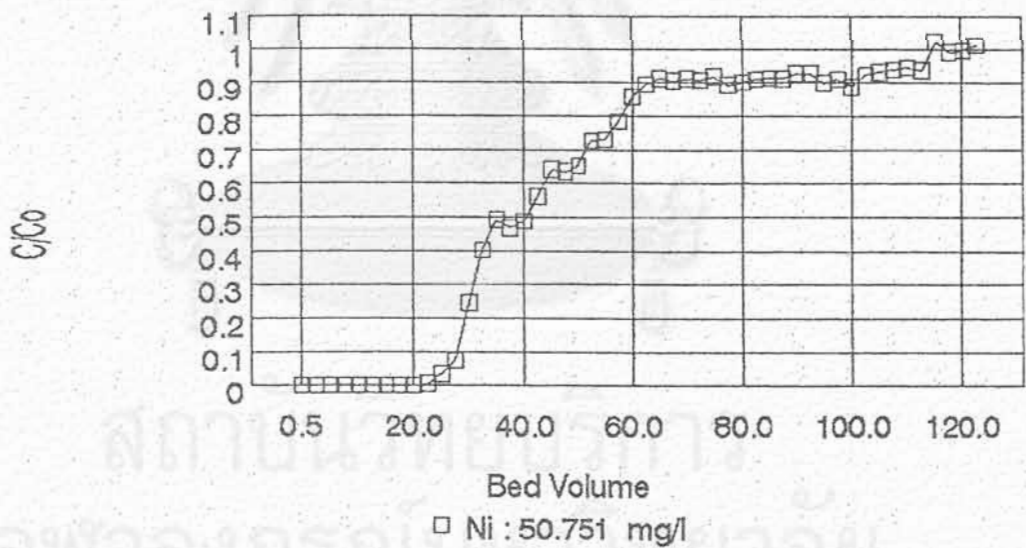
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรลคูไลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร



Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

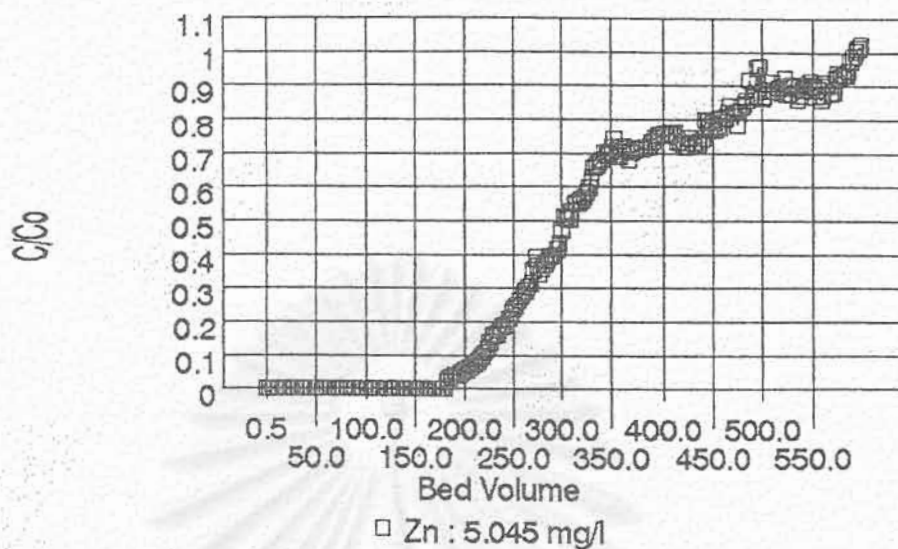


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

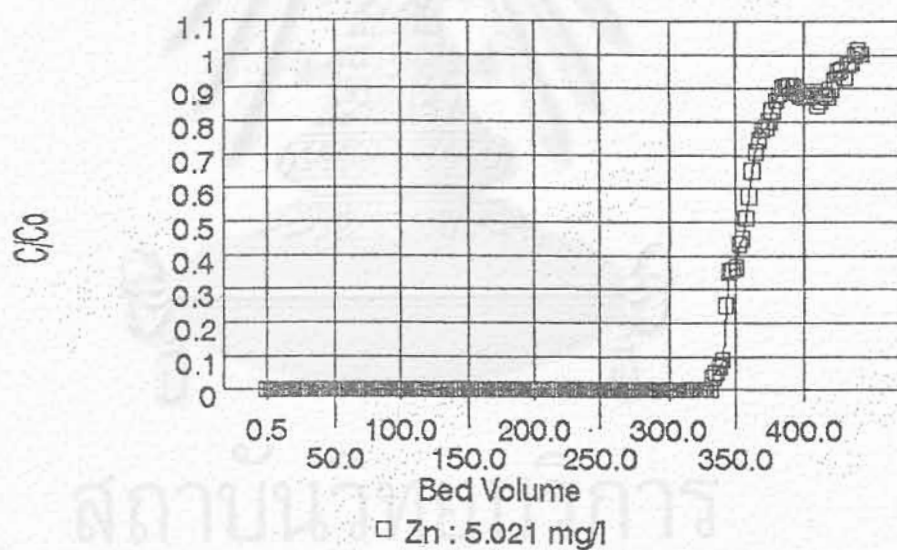


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณนิกเกิลประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

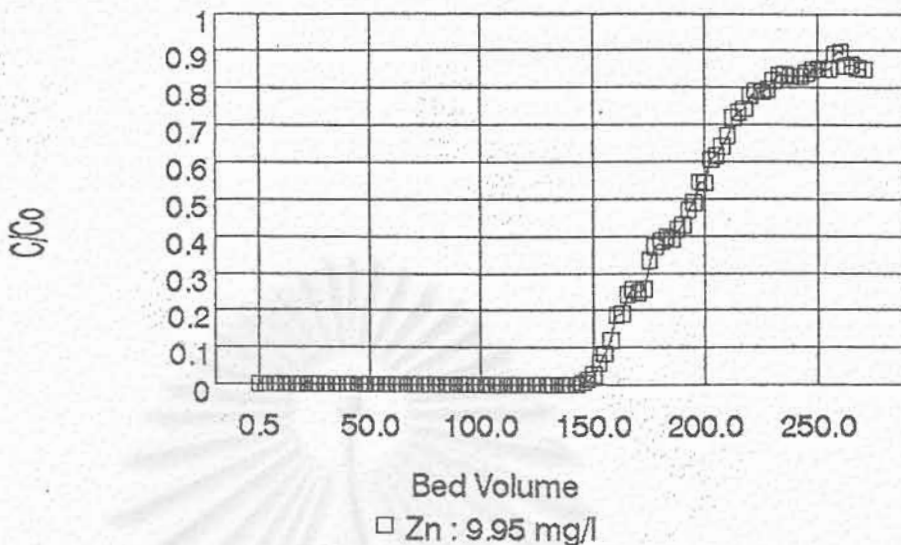


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

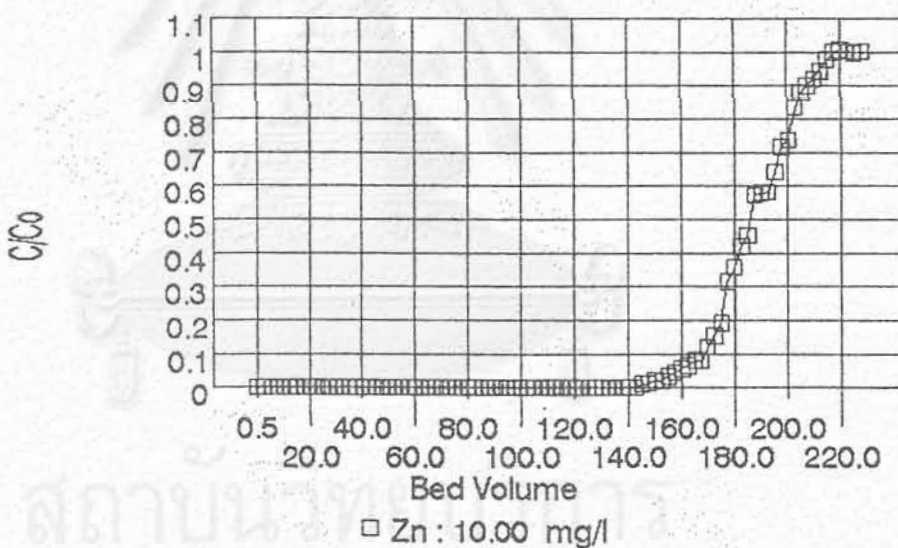


รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียนี้อมีปริมาณสังกะสีประมาณ 5 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

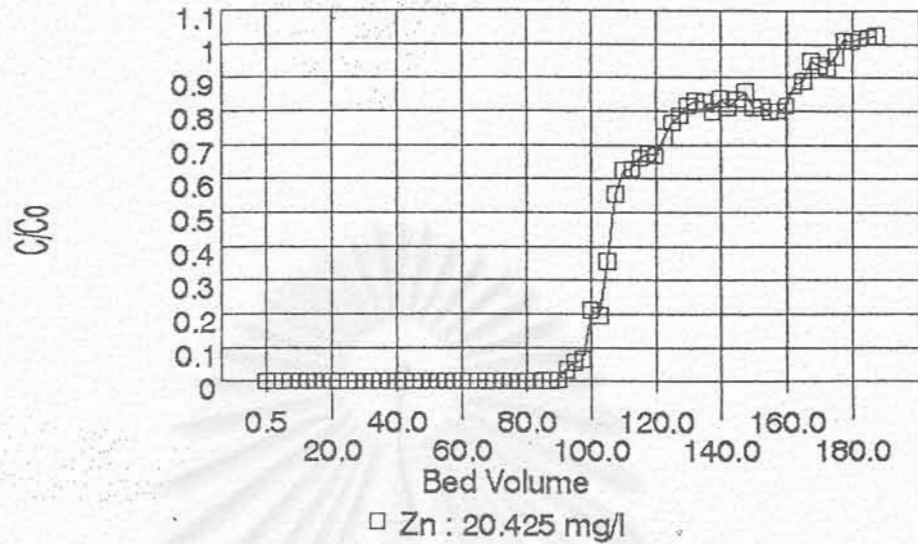


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

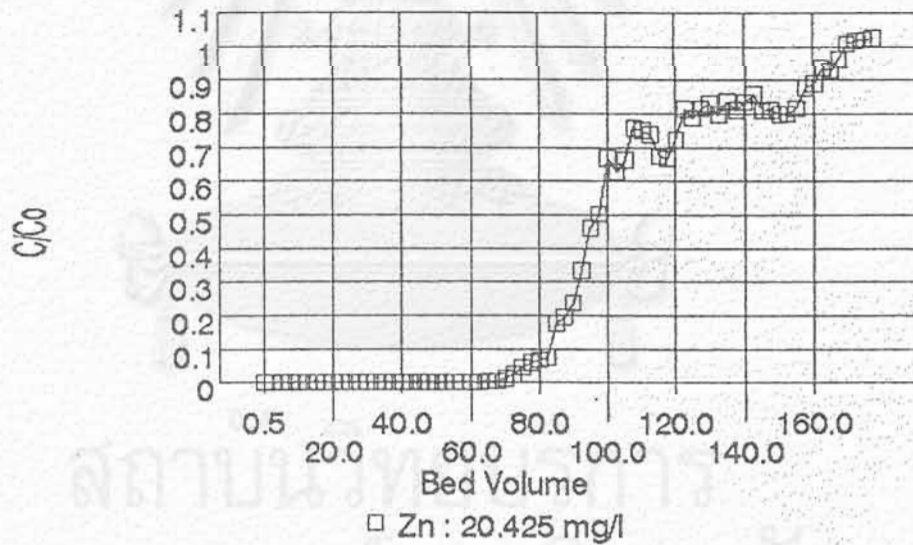


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

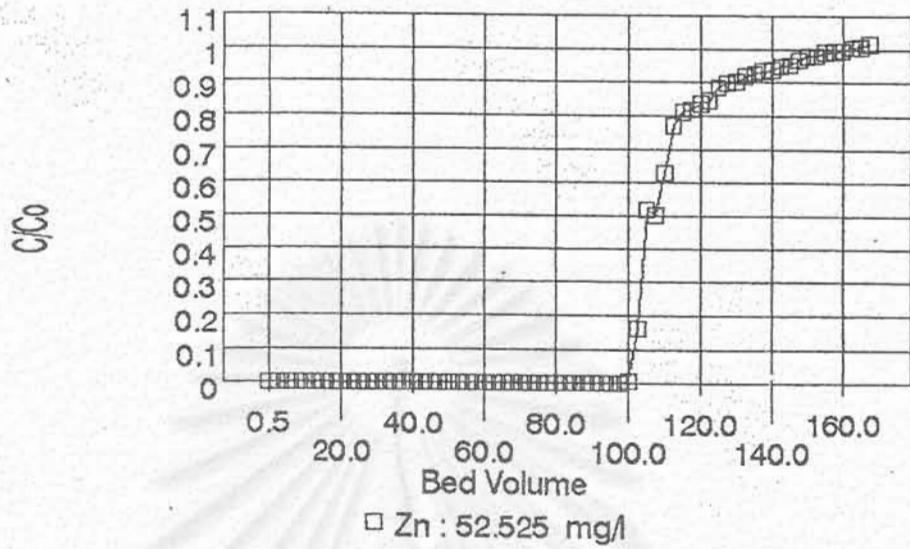


Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl

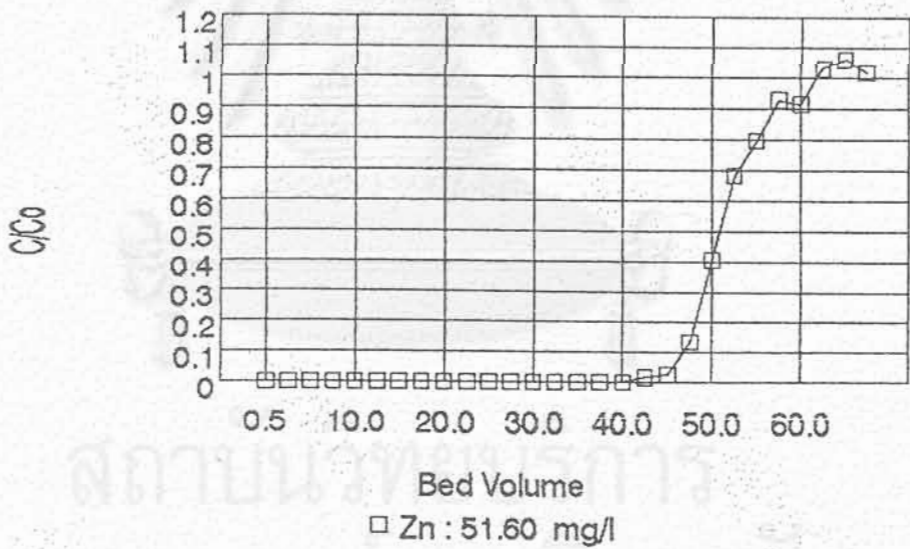


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์แลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวาที่ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 20 มิลลิกรัม/ลิตร

Effect of cation in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate



Effect of cation in the exchange  
on to Sulphoethyl



รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์โลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดโครสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) และซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา กับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อน้ำเสียมีปริมาณสังกะสีประมาณ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.3 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ  
(Untreated Water hyacinth) ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ  
(น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร.)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	400	170	220
10	142	25	45
20	55	10	23
50	25	5	18

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.4 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ  
(Untreated Water hyacinth) ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ  
(น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	465	210	220
10	175	100	100
20	87	60	52
50	60	50	42

ตารางที่ 5.5 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	75	-	50
10	53	10	14
20	15	6	10
50	3	2	1.5

**หมายเหตุ** มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.6 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	105	35	55
10	90	11	14
20	45	8	13
50	12	4	2

ตารางที่ 5.7 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของซันอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ  
(Untreated bagasse) ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ  
(น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาณเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	13	8	15
10	9	2	7
20	5	-	4
50	1	1	1

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.8 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของซันอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ  
(Untreated bagasse) ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ  
(น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาณเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	28	14	15
10	17	16	12
20	12	6	5
50	6	6	6



ตารางที่ 5.9 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated bagasse ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	32	2	12
10	7	-	5
20	4	2	3
50	1	0.5	1

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.10 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Carboxymethyl-treated bagasse ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	50	11	12
10	7	4	5
20	6	2.5	6
50	6	1	4

ตารางที่ 5.11 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Sulphoethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	175	2	437
10	92	112	185
20	75	42	90
50	35	20	45

หมายเหตุ    มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.12 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Sulphoethyl-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาตรเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	300	327	437
10	145	200	217
20	140	150	167
50	60	65	60

ตารางที่ 5.13 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาณเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	197	-	592
10	137	120	195
20	92	62	102
50	22	-	100

หมายเหตุ มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานฯ กระทรวงอุตสาหกรรม

- ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร
- นิกเกิล (Nickle) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร
- สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 5.14 ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของ Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth ที่มีต่อโลหะหนักที่เข้มข้นต่างๆ (น้ำทิ้งต้องมีปริมาณโลหะหนักไม่มากกว่าในน้ำเสีย)

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออน (ปริมาณเรซิน)		
	ทองแดง	นิกเกิล	สังกะสี
5	322	345	592
10	242	255	260
20	127	140	177
50	67	110	147

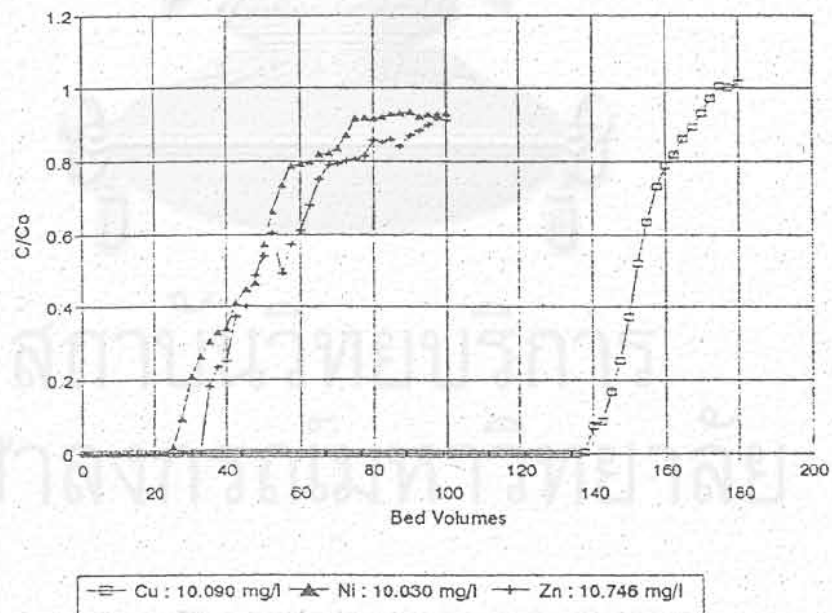
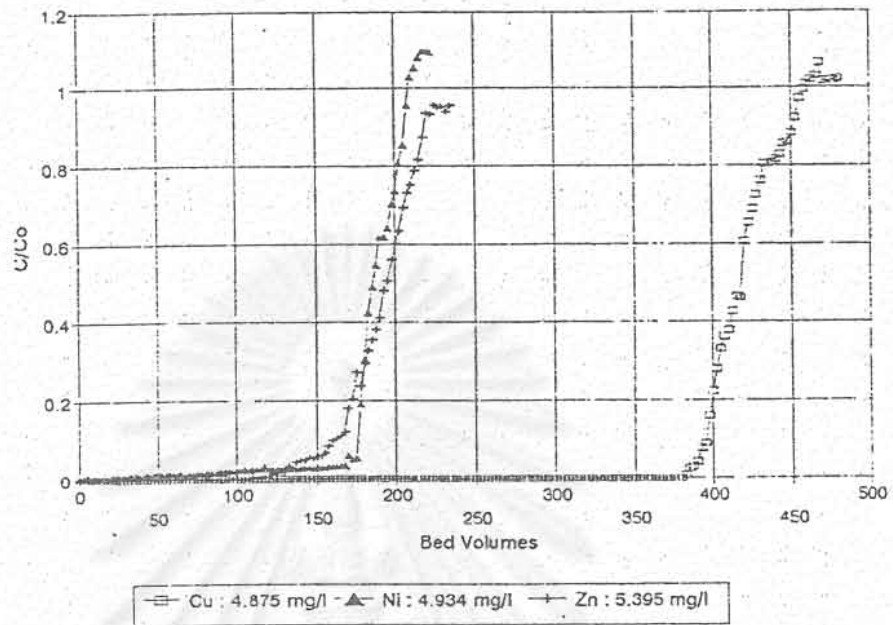
#### 5.4 การเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อชนิดของโลหะหนัก

เมื่อพิจารณาลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน พบว่า เรซินทั้งแบบกรดและต่างมีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินเลือกที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาเปรียบเทียบลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อโลหะหนักที่พบได้มากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งโลหะที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี ซึ่งสามารถสรุปเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.25-5.36

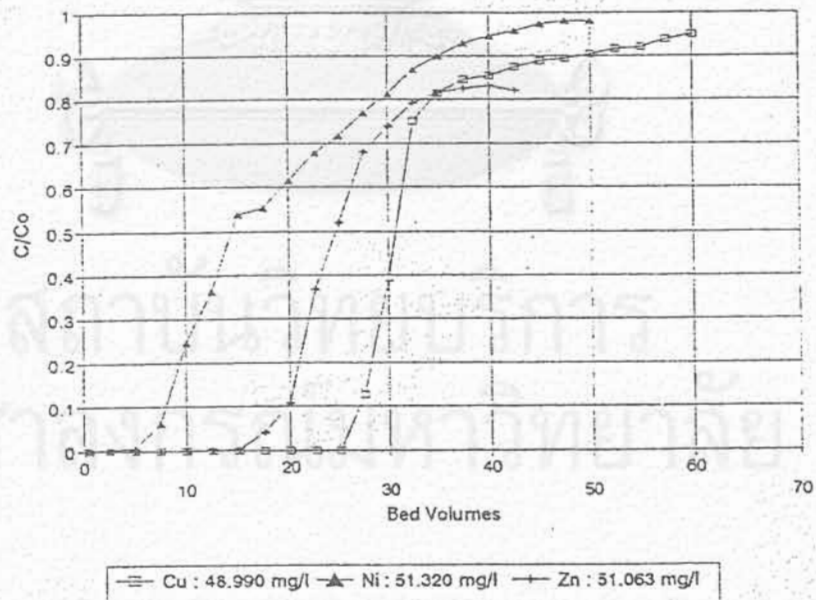
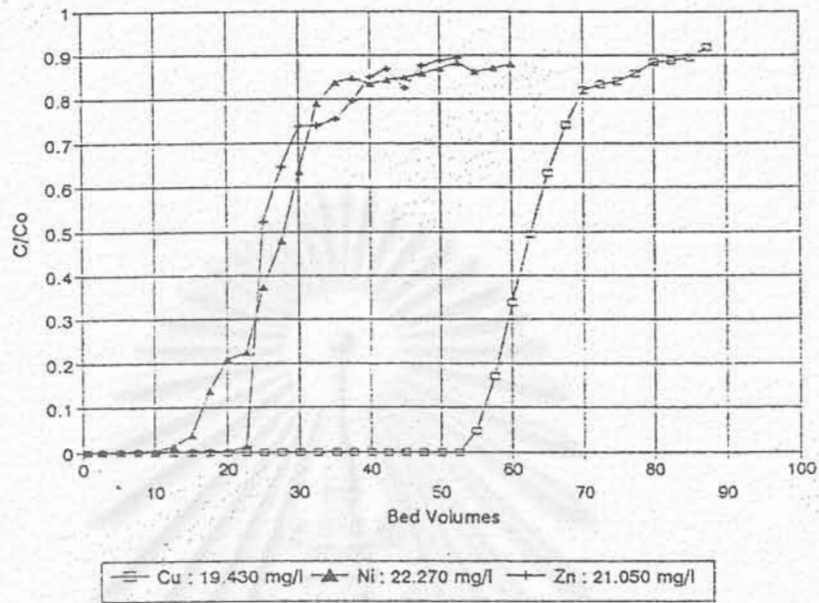
จากผลการทดลองพบว่า ผักตบชวาและชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพและปรับสภาพด้วยกรดคลอโรอะซิติก มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมากที่สุด รองลงมา คือ สังกะสีและนิกเกิล จากข้อมูลสรุปในตารางที่ 5.3-5.10 เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดนี้พบว่า ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพมีลำดับความชอบในการเลือกจับทองแดงมากกว่านิกเกิลและสังกะสีประมาณ 2-5 เท่า ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดคลอโรอะซิติก มีลำดับความชอบในการจับทองแดงมากที่สุด และมากกว่านิกเกิลและสังกะสีประมาณ 1-2 เท่า ทั้งชานอ้อยที่ปรับและไม่ได้ปรับสภาพด้วยกรดคลอโรอะซิติก มีลำดับความชอบในการจับทองแดงสูงสุด และมากกว่านิกเกิลและสังกะสี สำหรับผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วย คาร์บอนไดออกไซด์และที่ปรับสภาพด้วย โซเดียม 2-คลอโรเอเทน ซัลโฟเนต มีลำดับความชอบในการเลือกจับสังกะสีมากที่สุด รองลงมา คือนิกเกิลและทองแดงตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับลำดับความชอบในการเลือกจับโลหะหนักของสารแลกเปลี่ยนที่กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากลำดับความชอบในการเลือกจับโลหะหนักเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละชนิด จากข้อมูลในตารางที่ 5.11-5.14 พบว่าผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ชอบที่จะเลือกจับกับสังกะสีมากกว่า นิกเกิลและทองแดงประมาณ 1-2 เท่า ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยโซเดียม 2-คลอโรเอเทน ซัลโฟเนต ชอบที่จะเลือกจับกับสังกะสีมากกว่า นิกเกิลและทองแดงประมาณ 0.2-0.5 เท่า

#### 5.5 การเปรียบเทียบผลของการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยที่มีต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

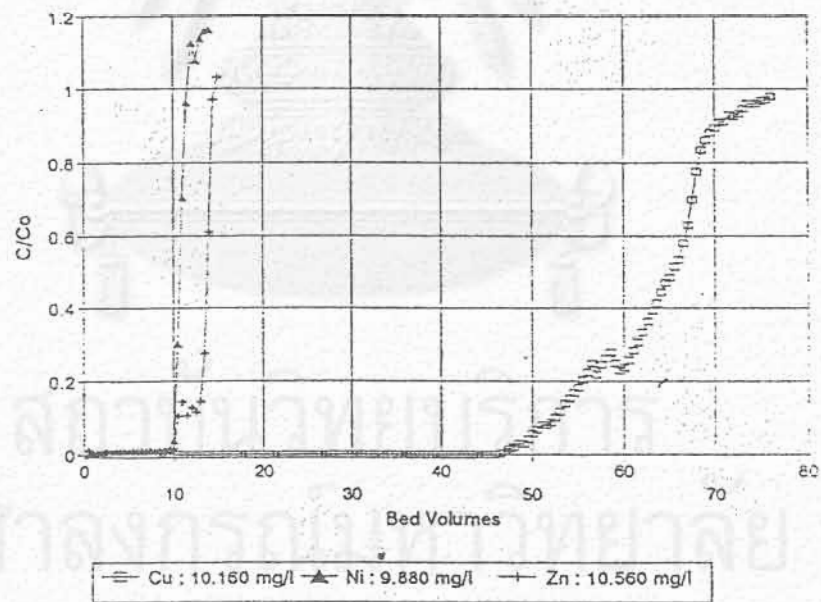
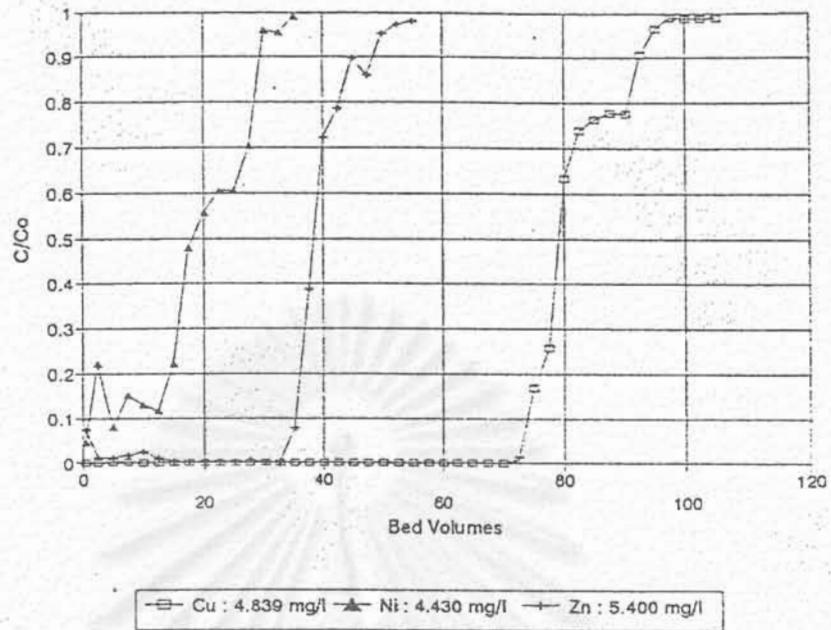
ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย มีอิทธิพลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อย ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อย เมื่อน้ำเสียนี้อาจมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่าง ๆ กัน คือ



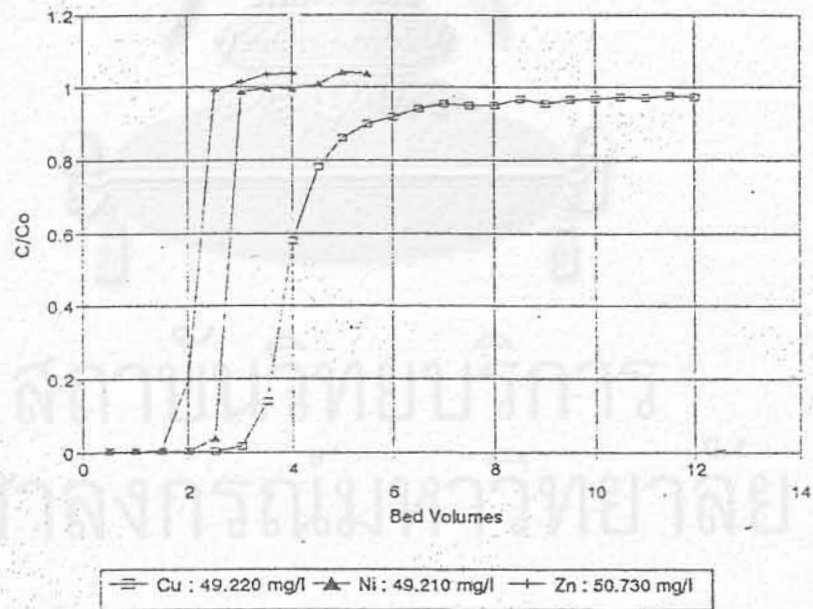
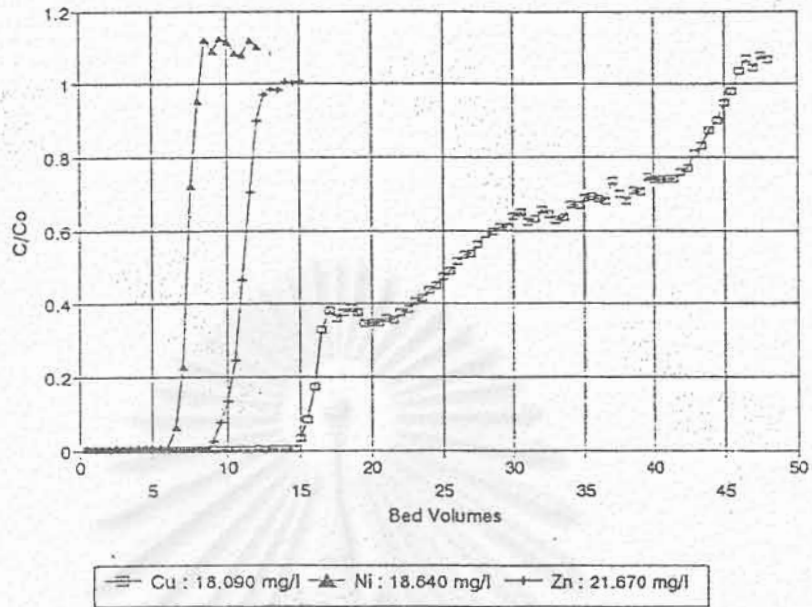
รูปที่ 5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียนี้อมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

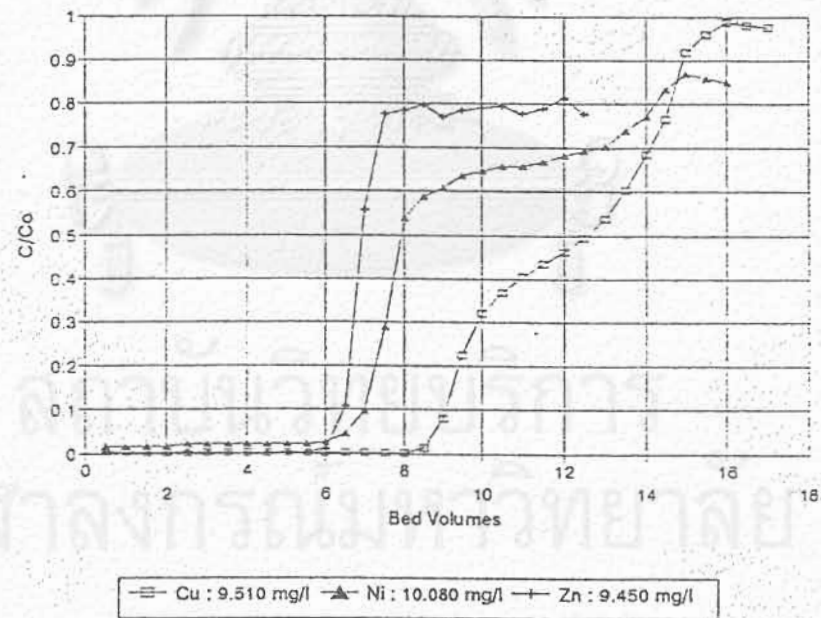
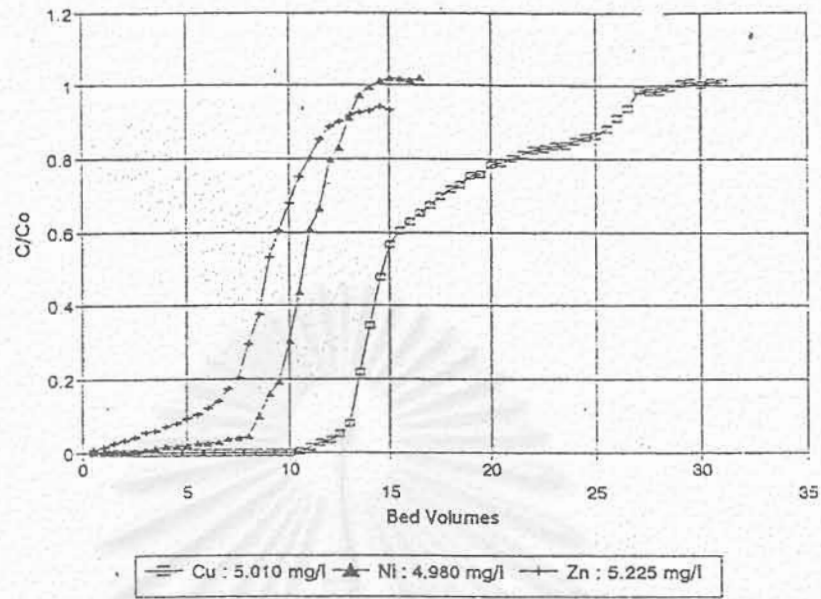


รูปที่ 5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

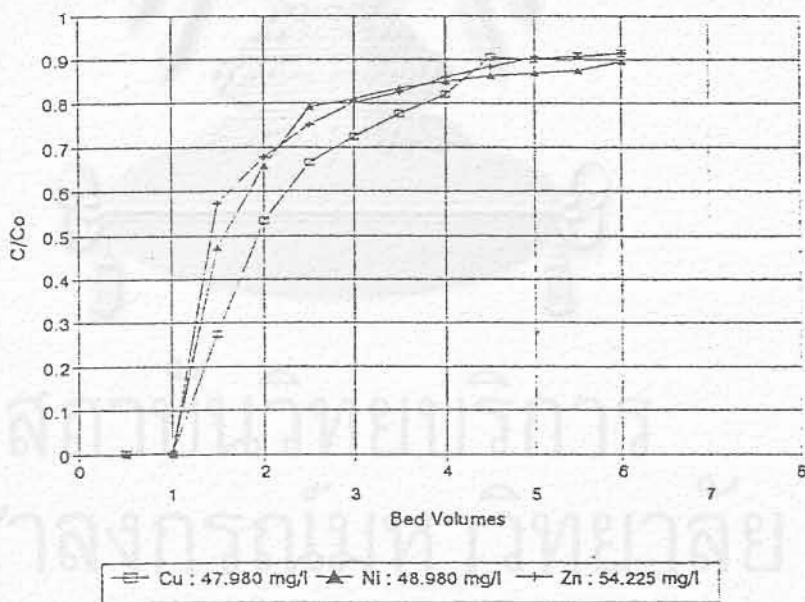
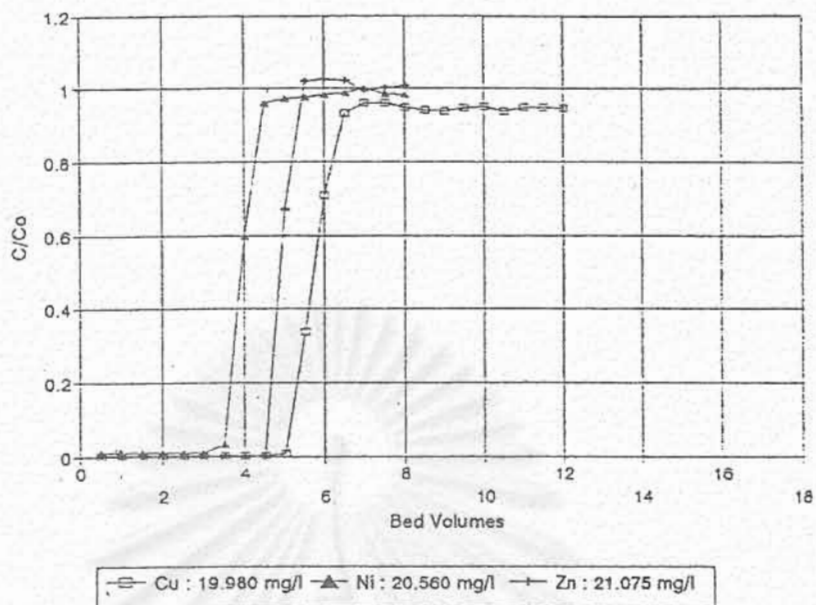


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

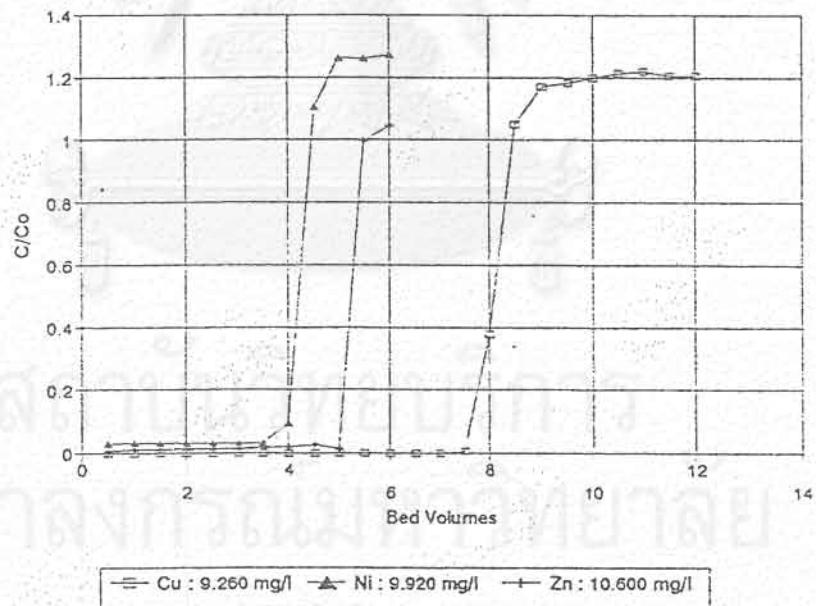
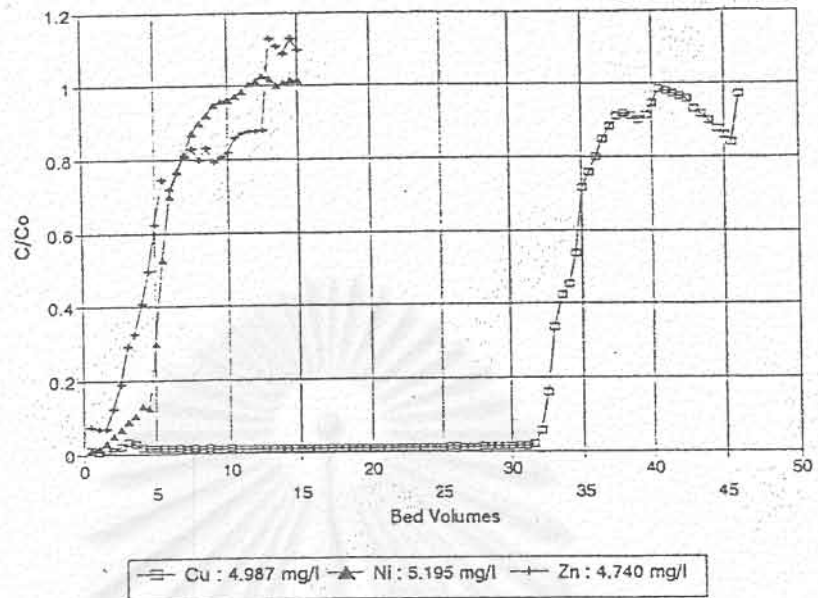




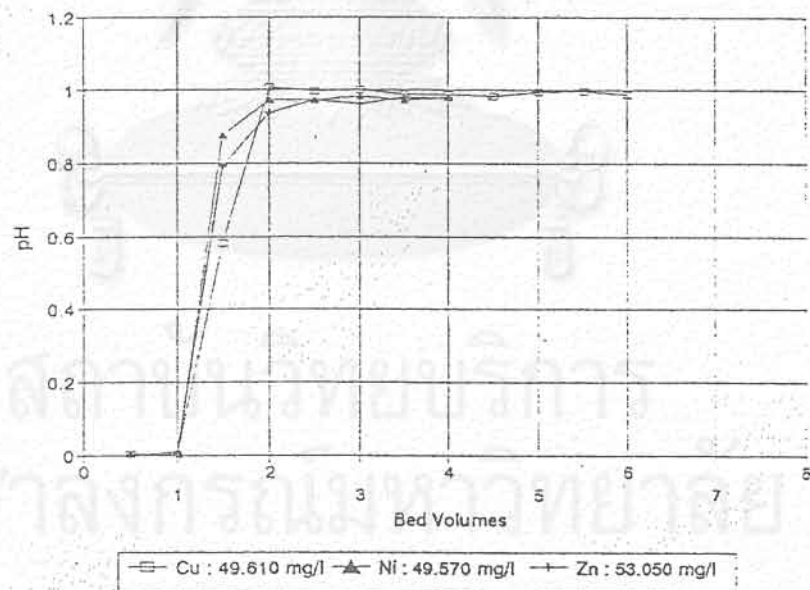
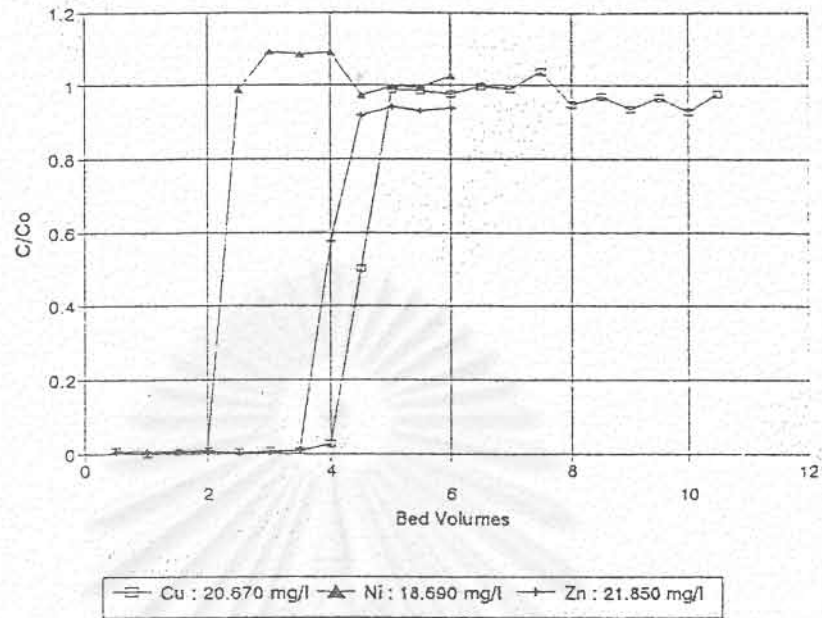
รูปที่ 5.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร



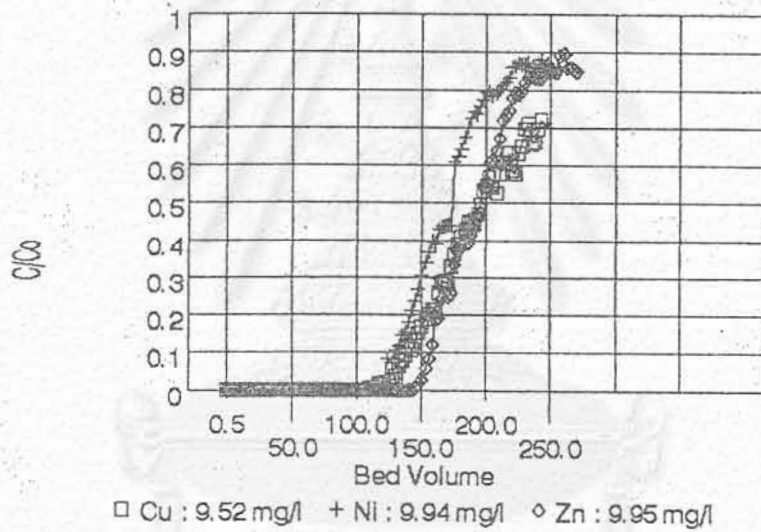
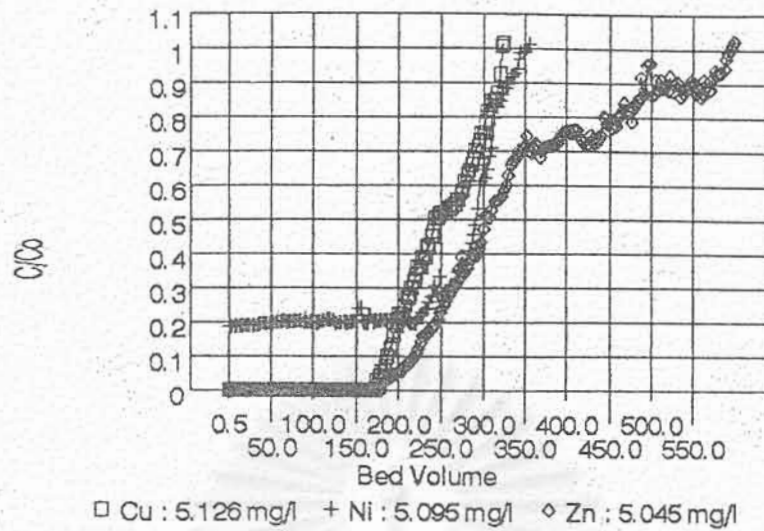
รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร



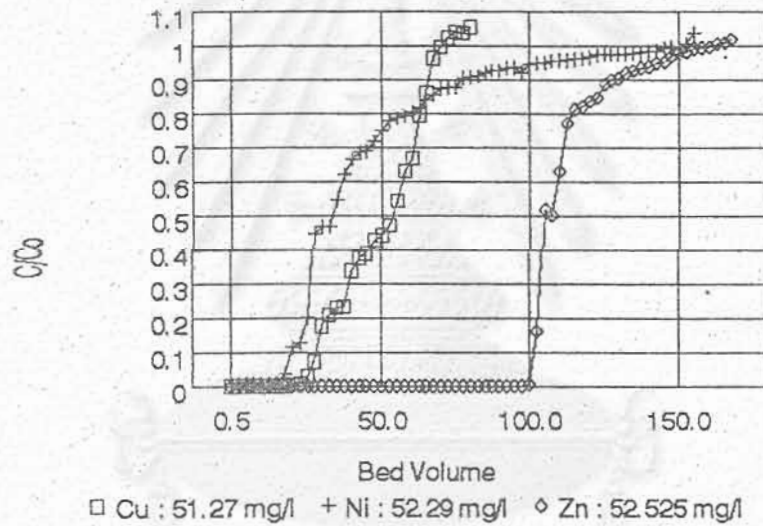
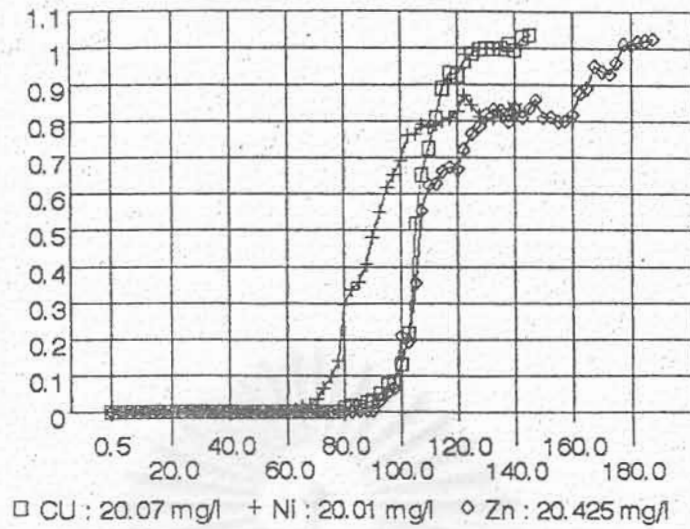
รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร



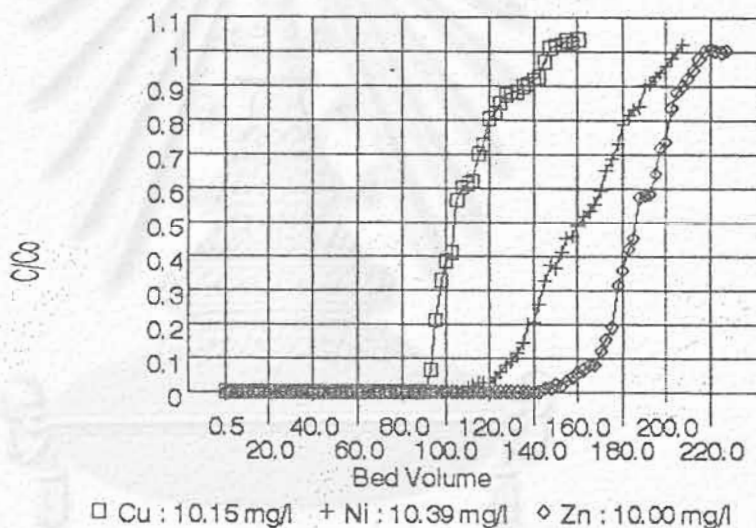
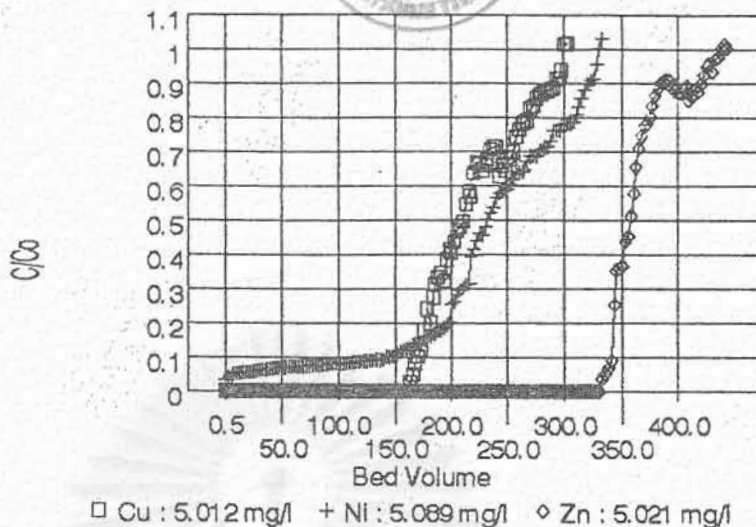
รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร

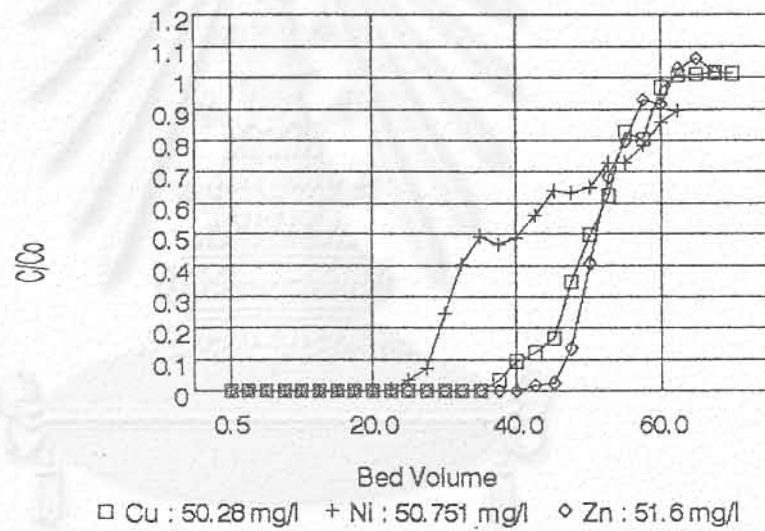
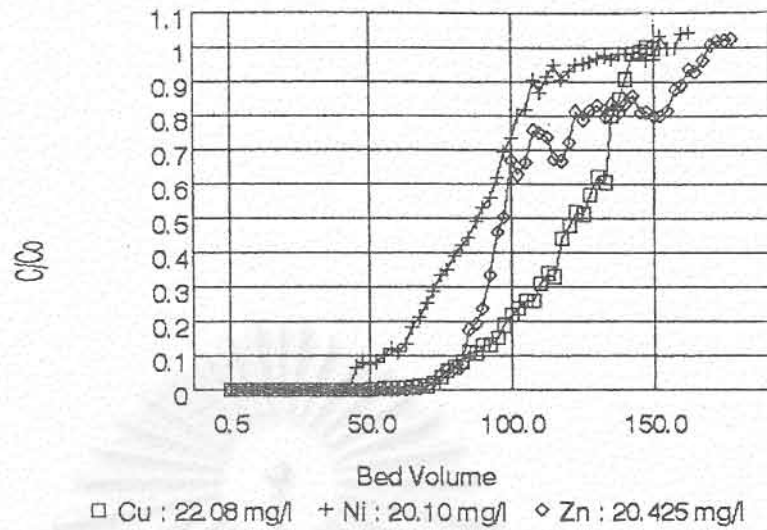


รูปที่ 5.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต ( Crosslink-Xanthate ) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร



### สถาบันวิทยบริการ

รูปที่ 5.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของโลหะหนักในน้ำเสี้ยวกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวาเมื่อน้ำเสี้ยวมีปริมาณโลหะหนักประมาณ 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร



5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของโลหะหนักประจุ 2 บวก ( $M^{2+}$ ) สามารถสรุปเป็นกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.37-5.42 จากการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาทั้ง 2 ตัว คือ จาก Total capacity และ Operating capacity ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกัน

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในเชิง Bed volume ของผักตบชวาและชานอ้อยจะลดลง สำหรับชานอ้อยซึ่งมีลักษณะของโครงสร้างมีความพรุนมากทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำกว่าผักตบชวามากและมีการรั่วหนีของไอออน ได้ง่ายโดยเฉพาะสังกะสี เกิดขึ้นทั้งชานอ้อยที่ปรับสภาพและไม่ปรับสภาพดังแสดงในรูปที่ 5.39 และ 5.40 ส่วนของผักตบชวการรั่วหนีของไอออนเกิดขึ้นน้อย โดยเฉพาะจะเกิดกับผักตบชวาที่ปรับสภาพแบบ Carboxymethyl เท่านั้น ชนิดของไอออนที่รั่วหนีค่อนข้างง่าย คือ ไอออนของนิคเกิล ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.38 เมื่อพิจารณากรณีที่น่าเสียมีความเข้มข้นสูง คือ 20-50 มิลลิกรัม/ลิตร ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน

สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาแบบ Crosslink-Xanthate ดังแสดงในรูปที่ 5.41 พบว่า การรั่วของไอออนเกิดขึ้นน้อยและไอออนที่รั่วง่ายที่สุด คือ นิคเกิล ส่วนผักตบชวาแบบ Sulphoethyl เมื่อพิจารณาโดยรวมแล้ว พบว่า มีการรั่วหนีของไอออนได้ง่ายกว่าผักตบชวาแบบ Crosslink-Xanthate ดังแสดงในรูปที่ 5.42 นอกจากนี้ยัง พบว่า สารเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิดนี้มีการรั่วหนีของไอออนได้ง่ายที่สุดเหมือนกัน คือ นิคเกิล เมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของปริมาณโลหะหนัก พบว่า สารเซลลูโลสทั้ง 2 ชนิดนี้ เหมาะสมที่จะใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5-20มก./ล. ในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณโลหะหนักสูงกว่านี้ จะ พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสจะลดลงอย่างรวดเร็ว

#### 5.6 ระดับพีเอชของน้ำทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวาและชานอ้อย

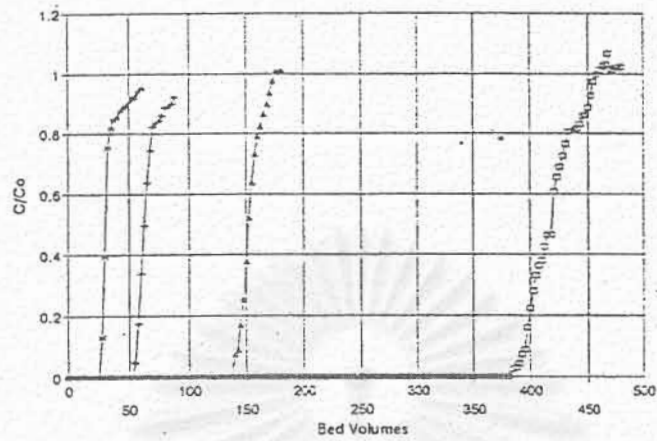
น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองในการวิจัยนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักปริมาณต่างๆ ซึ่งควบคุมพีเอชของน้ำเสียให้เท่ากับ 5 เนื่องจากที่พีเอชประมาณ 5 นี้ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะมีประสิทธิภาพดีที่สุด (Maranon และ Sastre, 1992) รูปที่ 5.43-5.58 แสดงกราฟของพีเอชน้ำทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้ผักตบชวาและชานอ้อยแบบ Carboxymethyl และแบบที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พบว่าค่าพีเอชของน้ำทิ้งจะมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชของน้ำเสีย จากรายงานของ Odozi และคณะ, 1985 ได้อธิบายไว้ว่าการที่พีเอชของน้ำทิ้งมีค่าต่ำกว่าพีเอชของน้ำเสียเกิดขึ้นเนื่องจากสารแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้เป็นเรซินแบบกรด ดังนั้น

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถเกิดขึ้นโดย  $H^+$  ซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จึงทำให้มี  $H^+$  ในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าพีเอชน้ำทิ้งมีค่าต่ำกว่าพีเอชของน้ำเสีย จากกราฟจะเห็นได้ว่า พีเอชของน้ำทิ้งมีค่าอยู่ในช่วง 3-4 สำหรับน้ำทิ้งที่ผ่านการแลกเปลี่ยนกับผักตบชวาแบบ Crosslink-Xanthate จะมีค่าพีเอชสูงกว่าค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์เนื่องจากการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นโดยใช้  $Na^+$  แลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จึงทำให้มี  $Na^+$  ในน้ำทิ้งเพิ่มมากขึ้นและเนื่องจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้อยู่ในรูป  $SO_4^{2-}$  ดังนั้นน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจึงอยู่ในรูป  $Na_2SO_4$  ซึ่งมีคุณสมบัติค่อนข้างเป็นกลาง ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ได้อยู่ในช่วง 6-9 ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.59-5.62

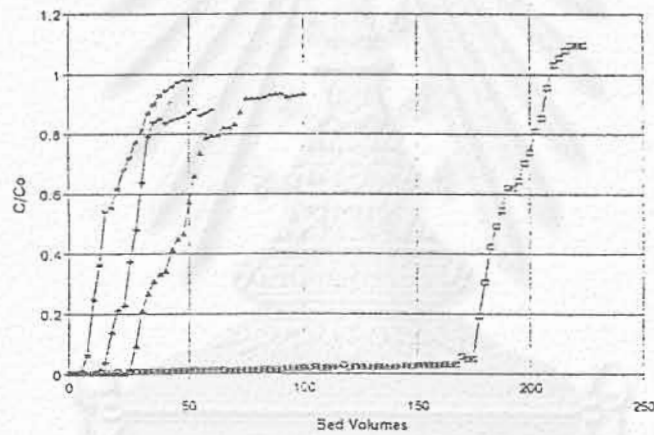
ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับผักตบชวาแบบ Sulphoethyl พบว่า ในช่วงแรกค่าพีเอชของน้ำทิ้งมีค่าสูงประมาณ 9 เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนประกอบการใช้สารละลายต่างเข้มข้นมาทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสเพื่อปรับสภาพทำให้การพองน้ำของสารเซลลูโลสลดลง จากขั้นตอนนี้ทำให้สารเซลลูโลสที่เตรียมได้มีความเป็นด่างอยู่เล็กน้อยซึ่งเหมือนกับสารเซลลูโลสแบบ Crosslink-Xanthate เมื่อพิจารณาต่อไป พบว่า เมื่อมีการแลกเปลี่ยนไอออนค่าพีเอชของน้ำทิ้งลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าใกล้เคียงกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจนที่เป็นอนุมูลอิสระในสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน มีการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ จึงทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5-9 ดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.63-5.66

#### 5.7 ระดับการรีเจนเนอเรชันของผักตบชวาและขาน้อย

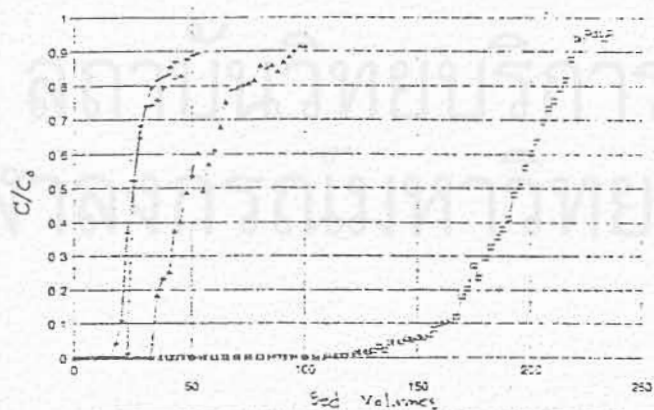
ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน คือ ปริมาณสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้ในการทำรีเจนเนอเรชัน โดยทั่วไป เรซินแบบกรดอ่อนมีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันสูงถึง 90% ทำให้ไม่เปลืองสารเคมีที่ใช้ในการทำรีเจนเนอเรชัน เนื่องจากสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเรซินแบบกรดอ่อน สารรีเจนเนอเรนต์ ได้แก่ กรดแก่ , กรดอ่อนหรือเกลือแกง ในการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกและสารละลายเกลือแกงเข้มข้น 0.5 นอร์มอล เป็นสารรีเจนเนอเรนต์ สามารถสรุปเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.67-5.90 พบว่าปริมาณสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้ในการทำรีเจนเนอเรชันประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน



—○— Cu : 4.875 mg/l —▲— Cu : 10.090 mg/l —□— Cu : 19.430 mg/l —◇— Cu : 48.990 mg/l

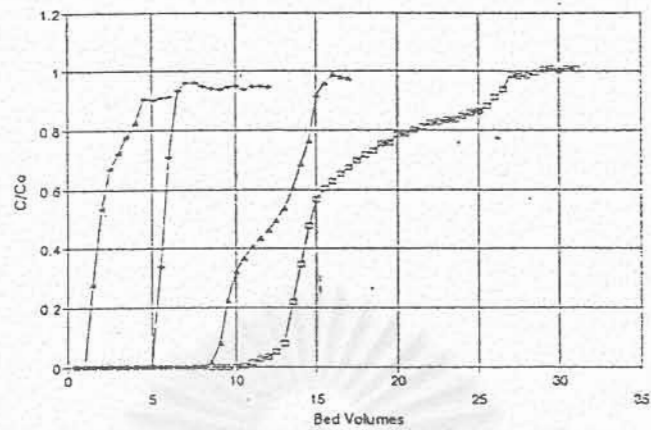


—○— Ni : 4.934 mg/l —▲— Ni : 10.030 mg/l —□— Ni : 22.270 mg/l —◇— Ni : 51.320 mg/l

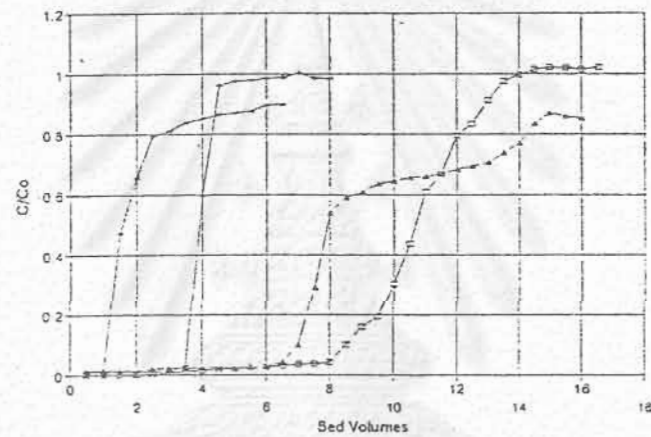


—○— Zn : 5.395 mg/l —▲— Zn : 10.746 mg/l —□— Zn : 21.050 mg/l —◇— Zn : 51.063 mg/l

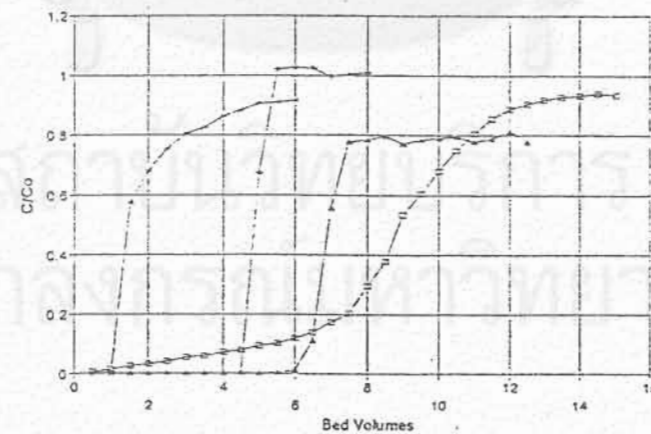
รูปที่ 5.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth)



$\square$  Cu : 5.010 mg/l    $\blacktriangle$  Cu : 9.510 mg/l    $\blacklozenge$  Cu : 19.980 mg/l    $\blacklozenge$  Cu : 47.980 mg/l

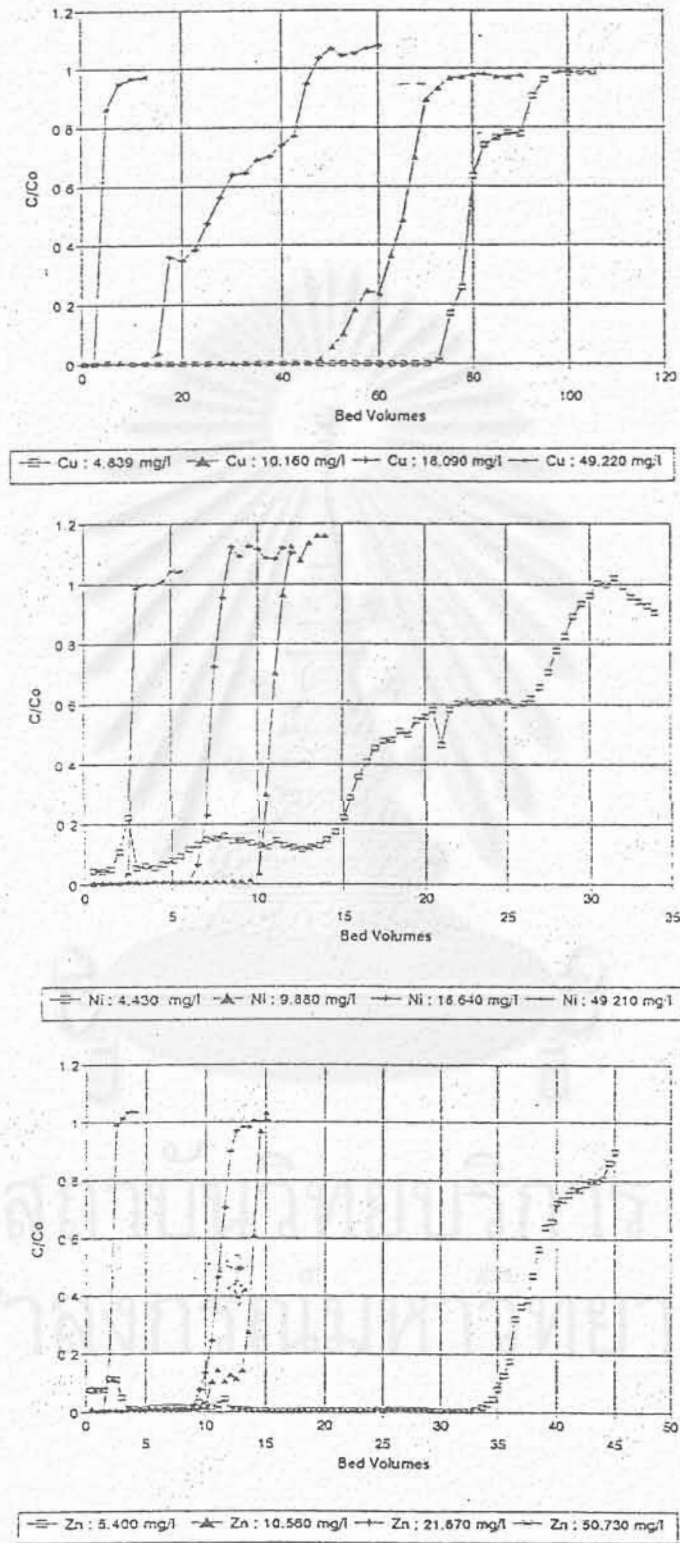


$\square$  Ni : 4.980 mg/l    $\blacktriangle$  Ni : 10.080 mg/l    $\blacklozenge$  Ni : 20.560 mg/l    $\blacklozenge$  Ni : 48.980 mg/l

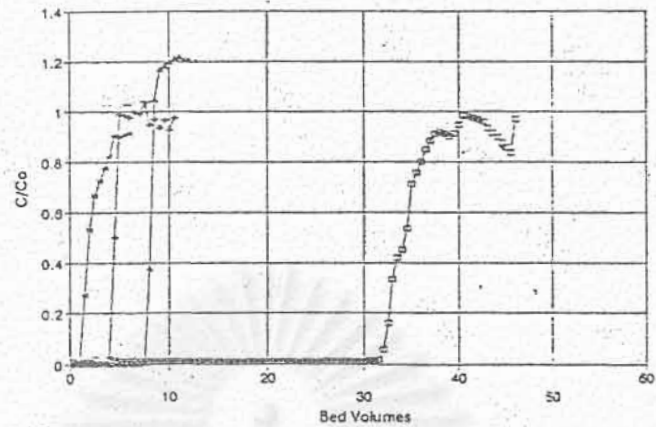


$\square$  Zn : 5.225 mg/l    $\blacktriangle$  Zn : 9.450 mg/l    $\blacklozenge$  Zn : 21.075 mg/l    $\blacklozenge$  Zn : 54.225 mg/l

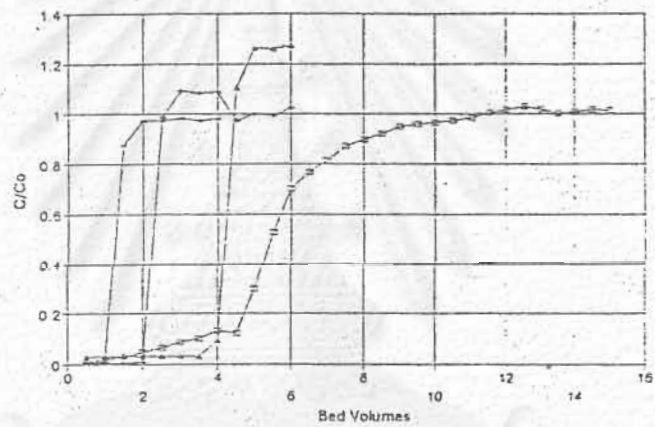
รูปที่ 5.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth)



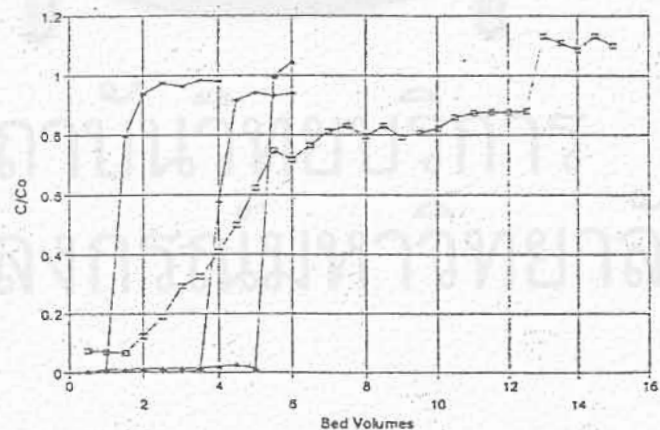
รูปที่ 5.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียดกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของซันอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse)



— Cu : 4.987 mg/l —▲— Cu : 9.260 mg/l —+— Cu : 20.670 mg/l —●— Cu : 47.980 mg/l

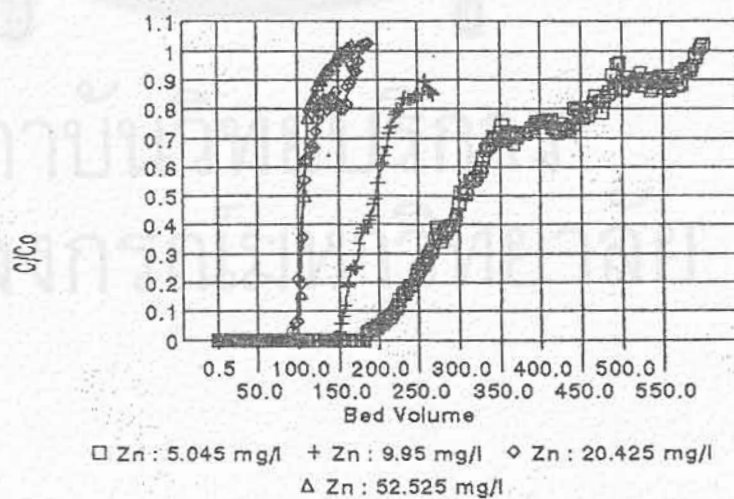
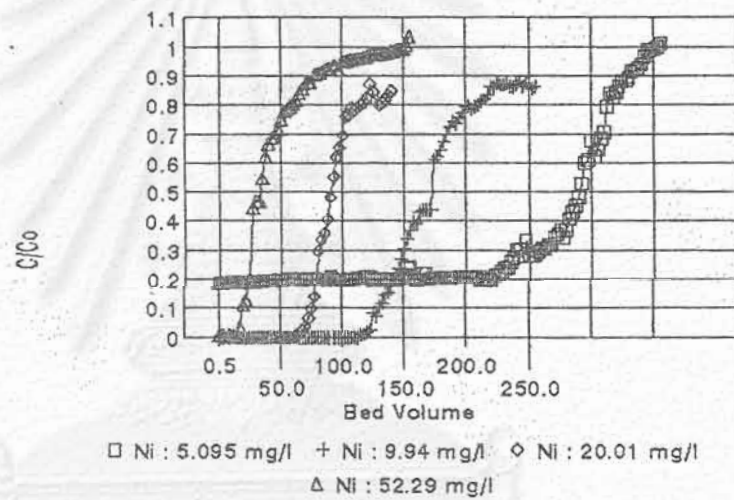
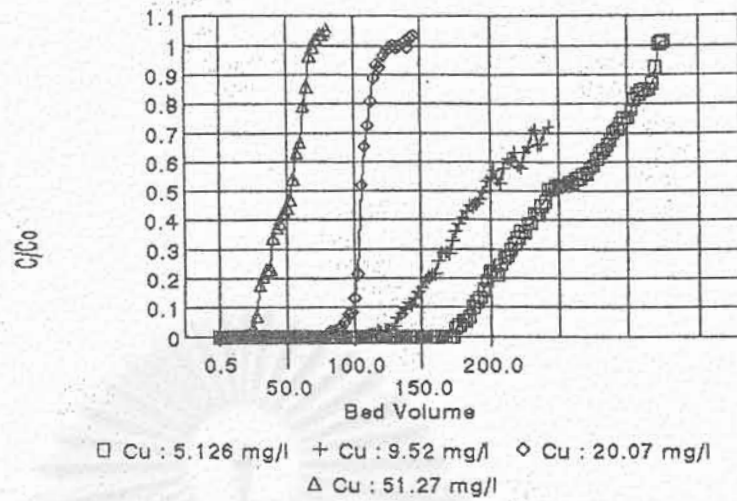


— Ni : 5.195 mg/l —▲— Ni : 9.920 mg/l —+— Ni : 18.690 mg/l —●— Ni : 49.570 mg/l

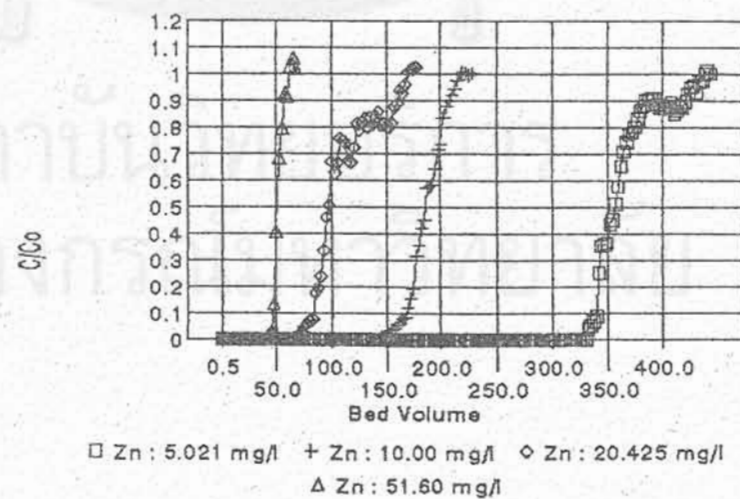
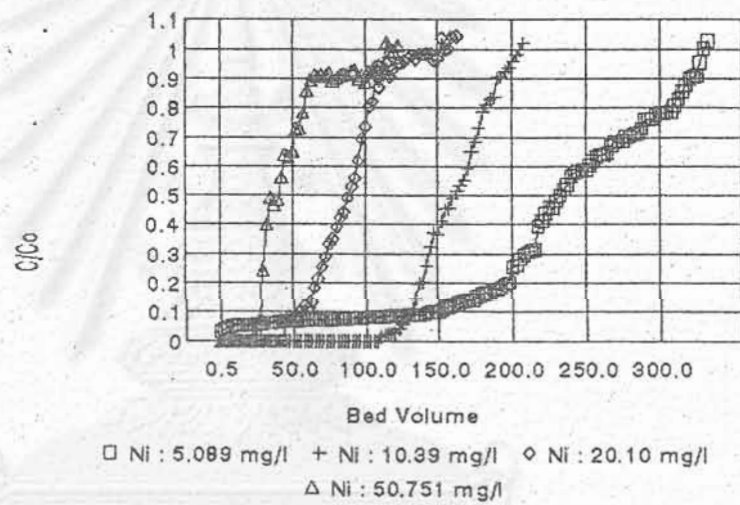
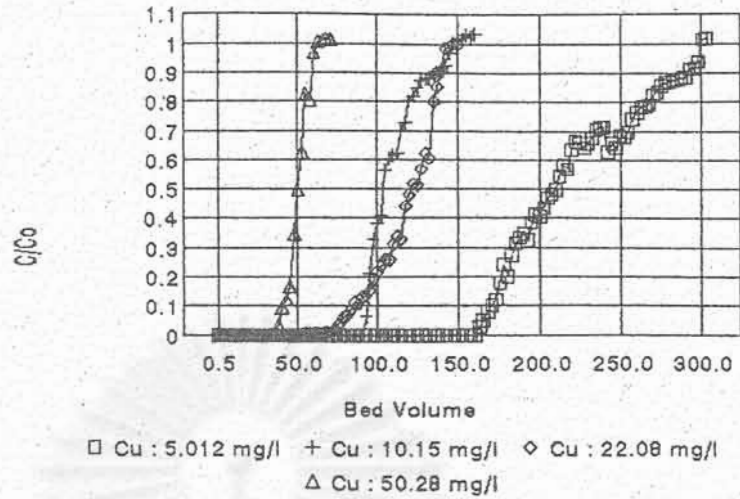


— Zn : 4.470 mg/l —▲— Zn : 10.600 mg/l —+— Zn : 21.850 mg/l —●— Zn : 53.050 mg/l

รูปที่ 5.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียดกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของขานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated bagasse)

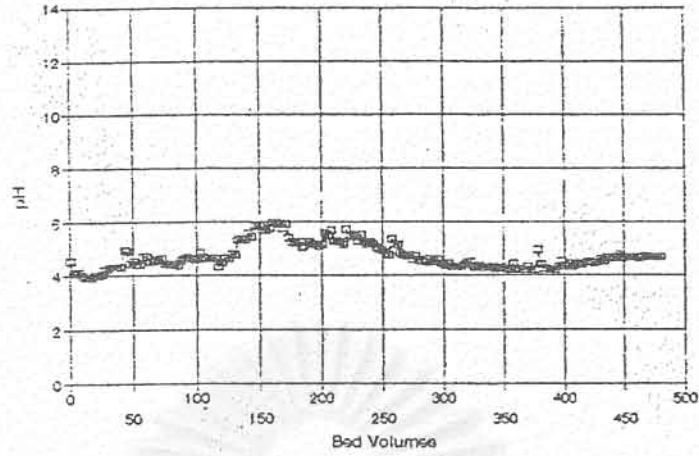


รูปที่ 5.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา

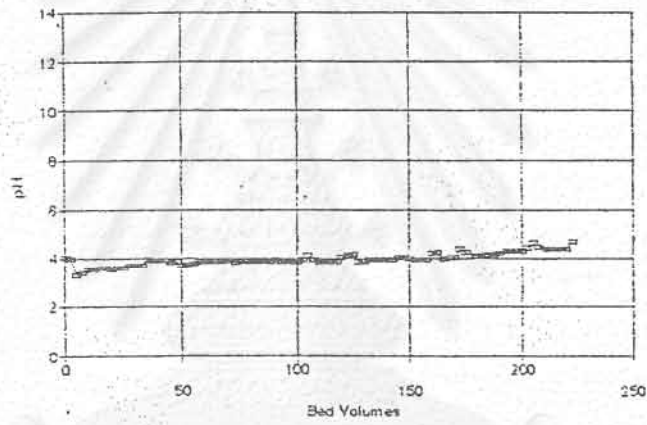


รูปที่ 5.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียดกับประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารแลกเปลี่ยนชนิดซัลไฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา

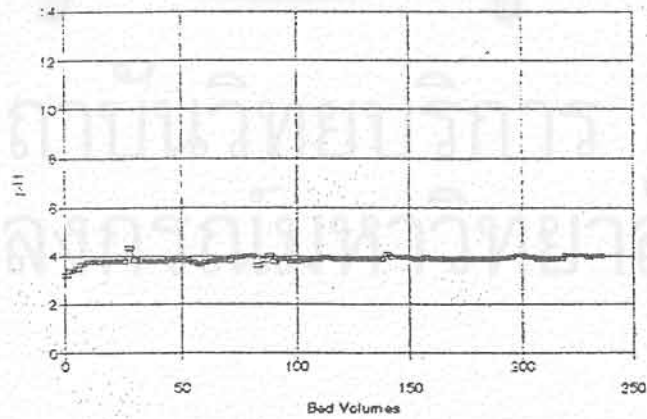




Cu : 4.875 mg/l

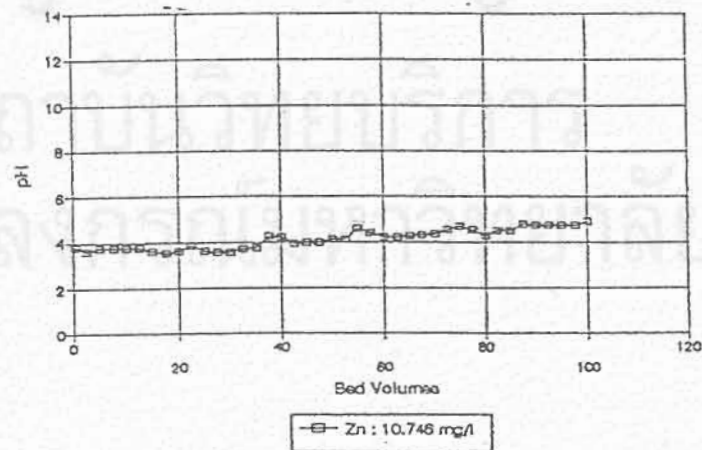
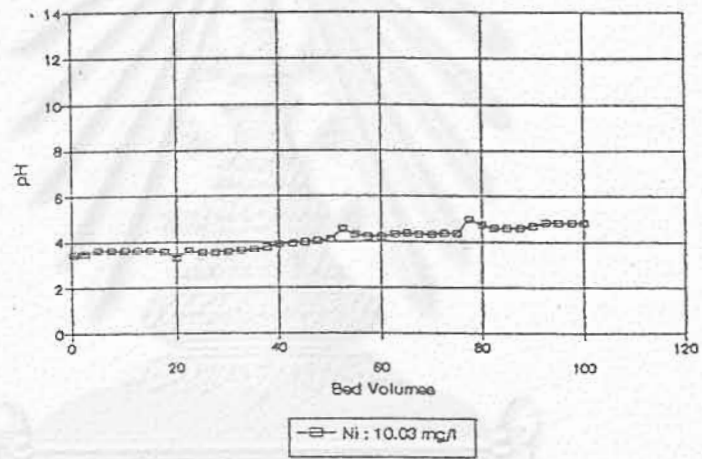
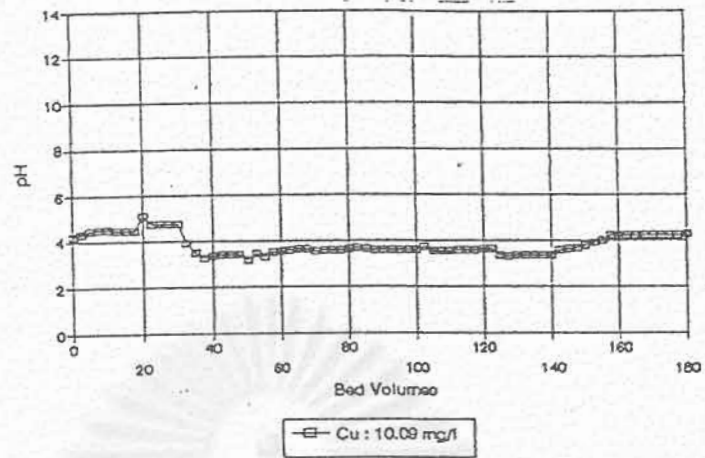


Ni : 4.934 mg/l

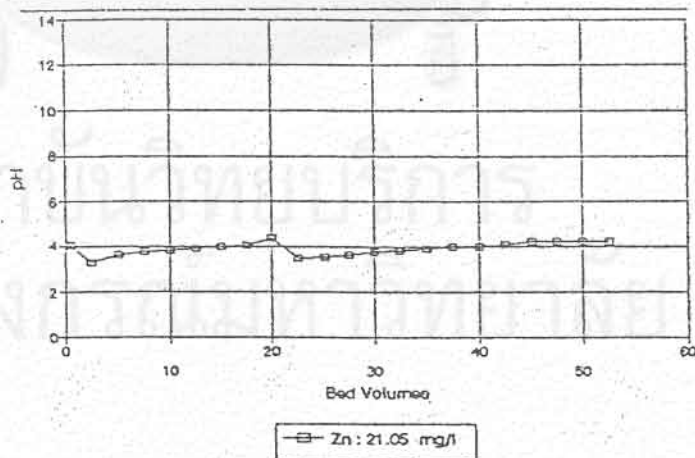
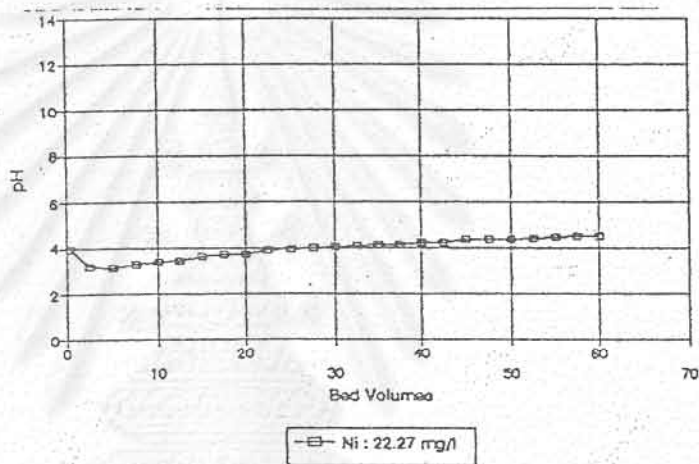
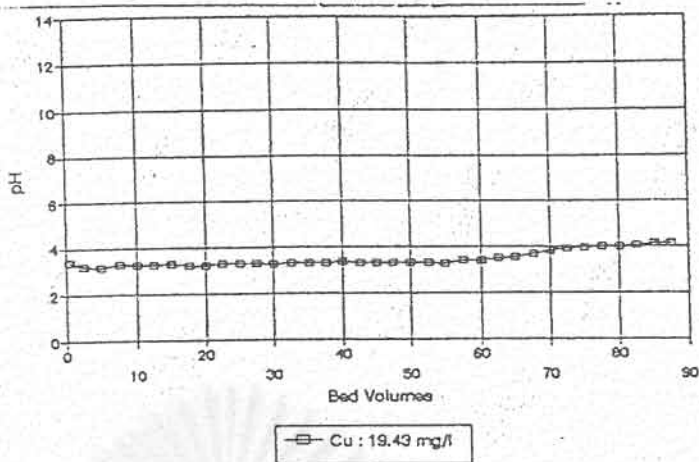


Zn : 5.395 mg/l

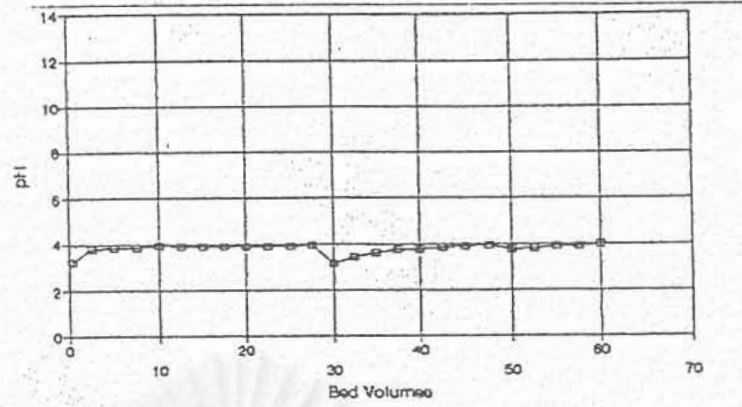
รูปที่ 5.43 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



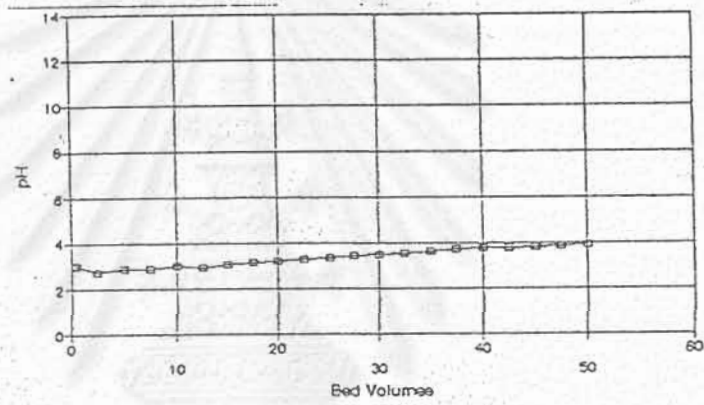
รูปที่ 5.44 ค่าที่เฝ้าของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



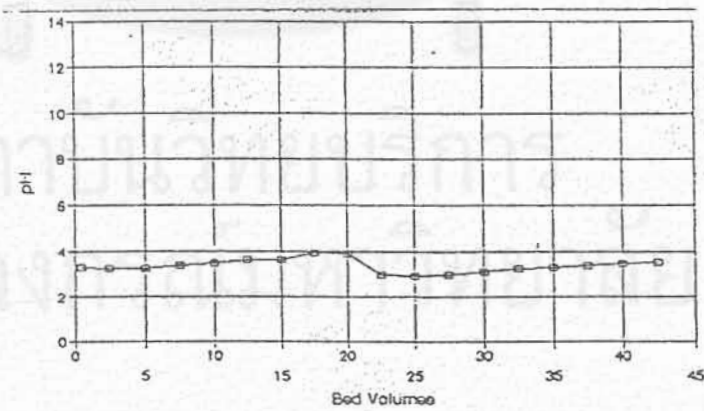
รูปที่ 5.45 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



— Cu : 48.99 mg/l

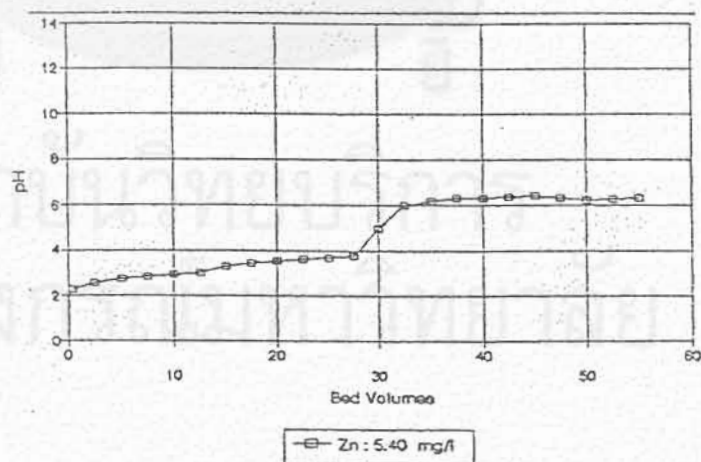
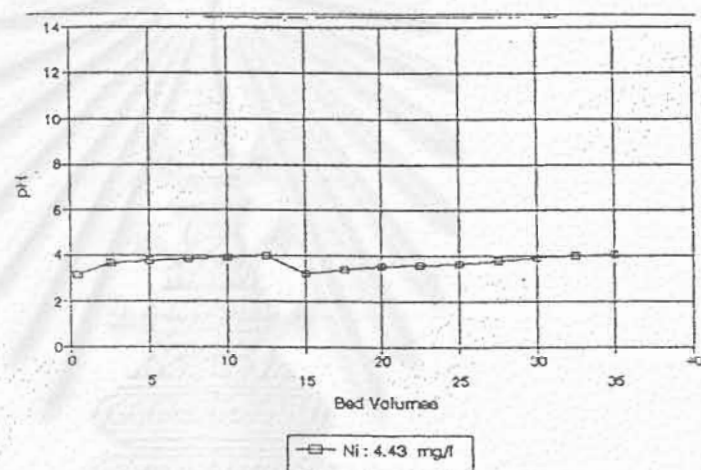
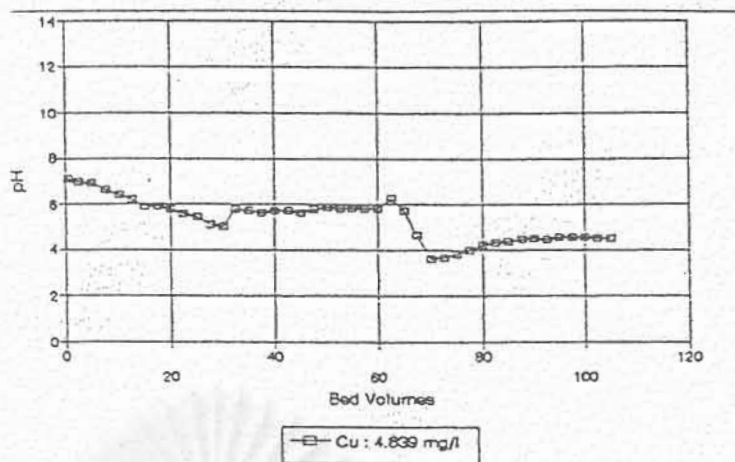


— Ni : 51.32 mg/l

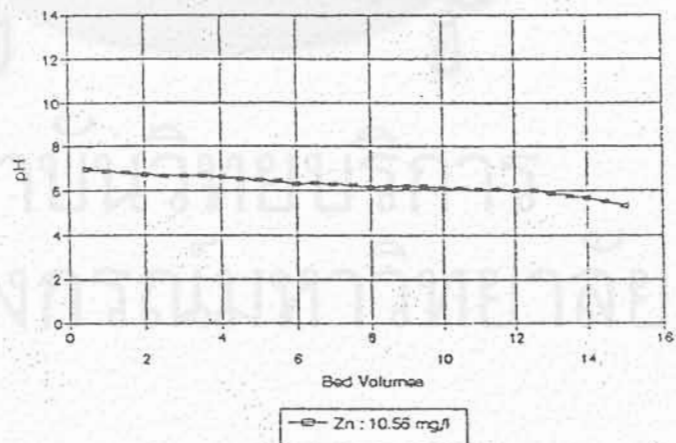
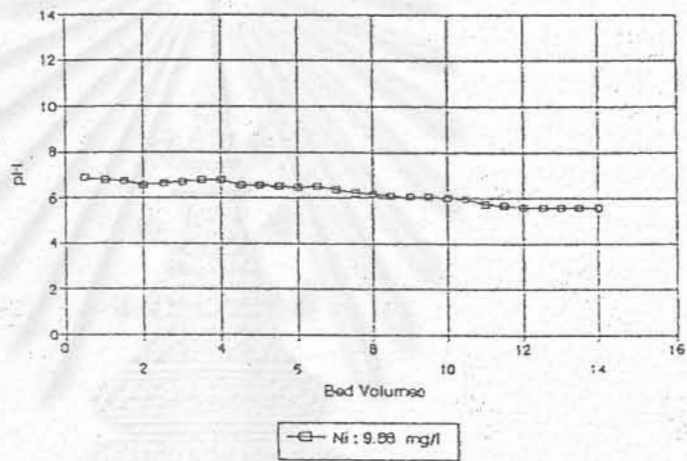
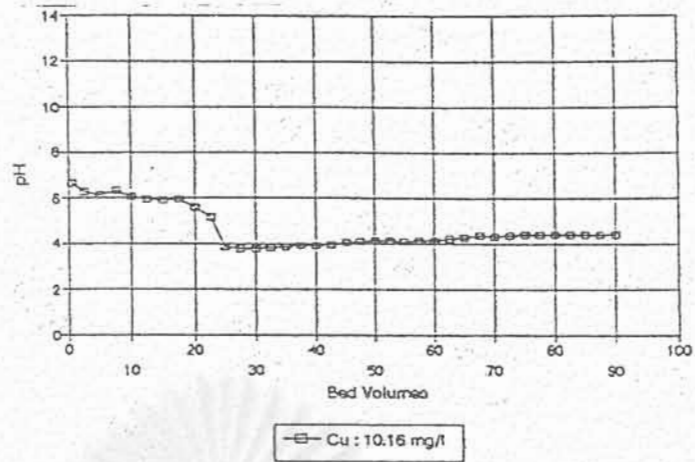


— Zn : 51.063 mg/l

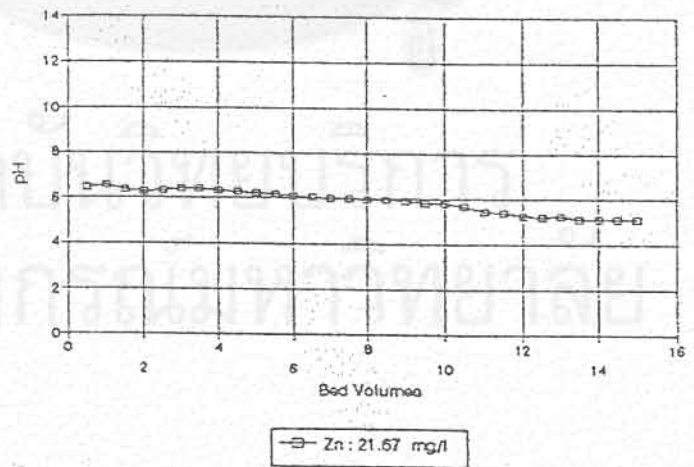
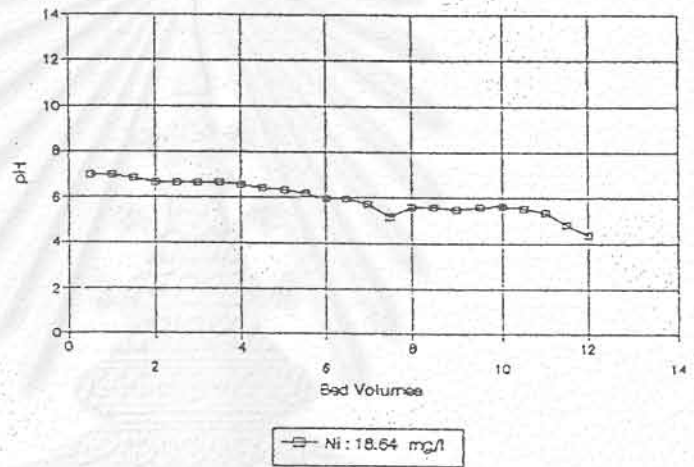
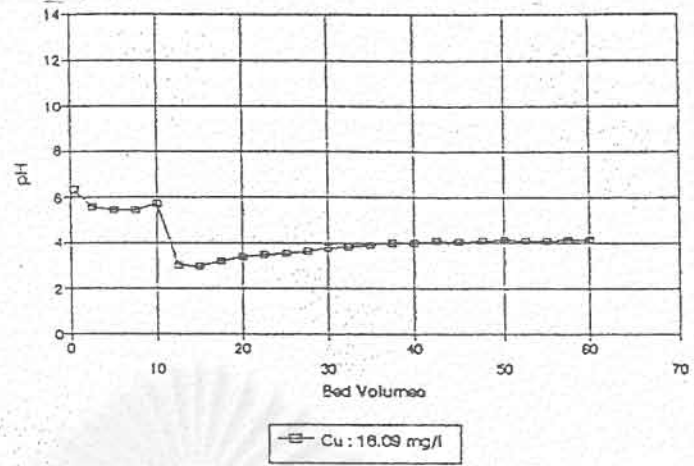
รูปที่ 5.46 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



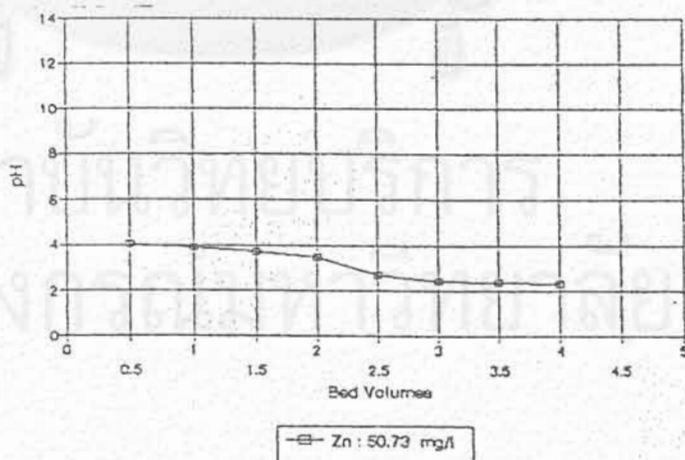
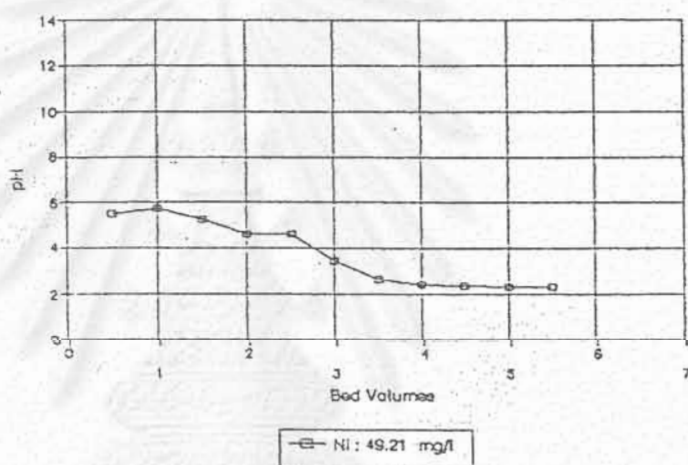
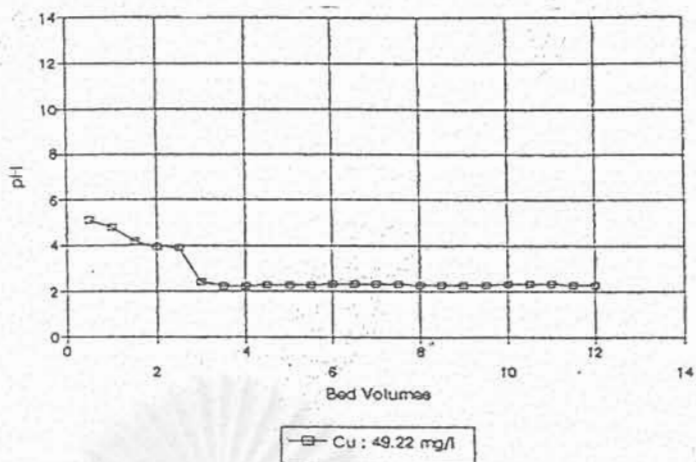
รูปที่ 5.47 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.48 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

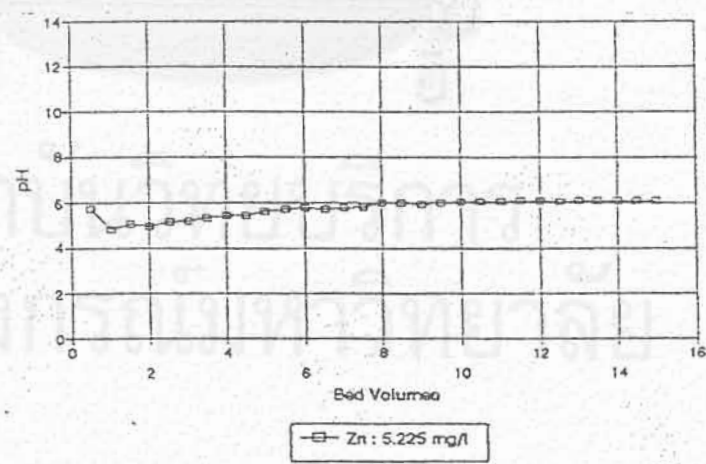
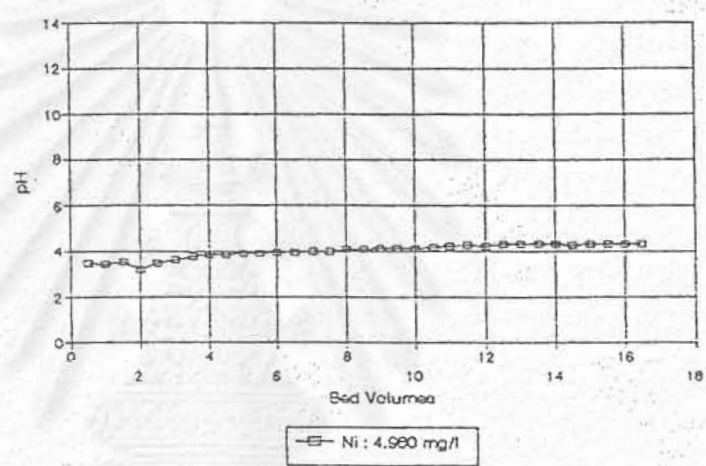
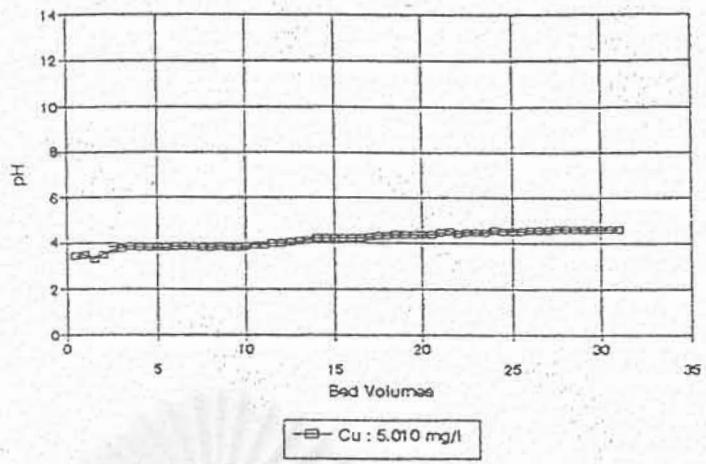


รูปที่ 5.49 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร

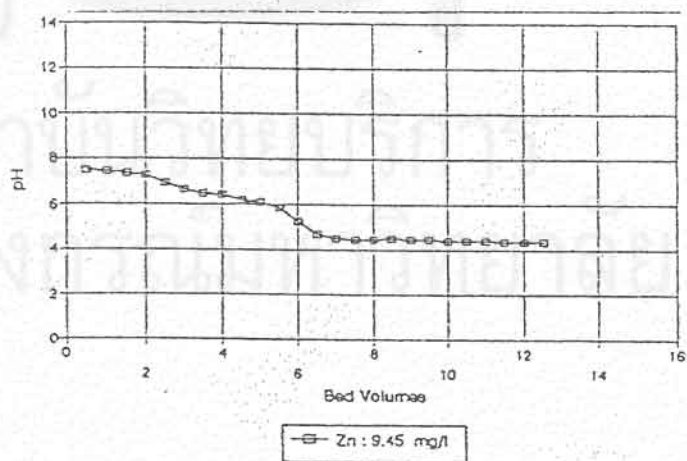
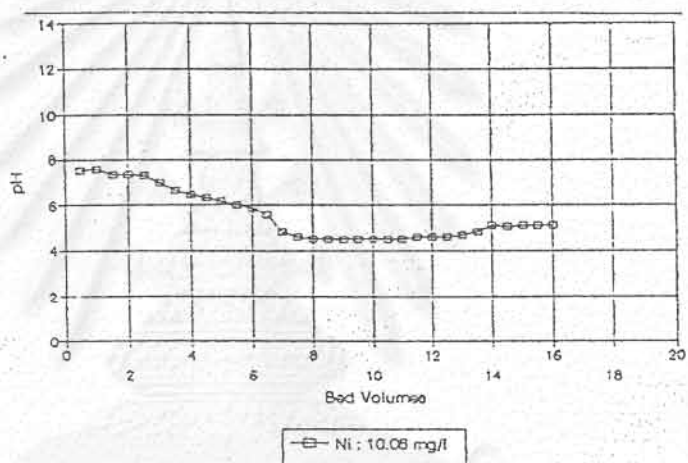
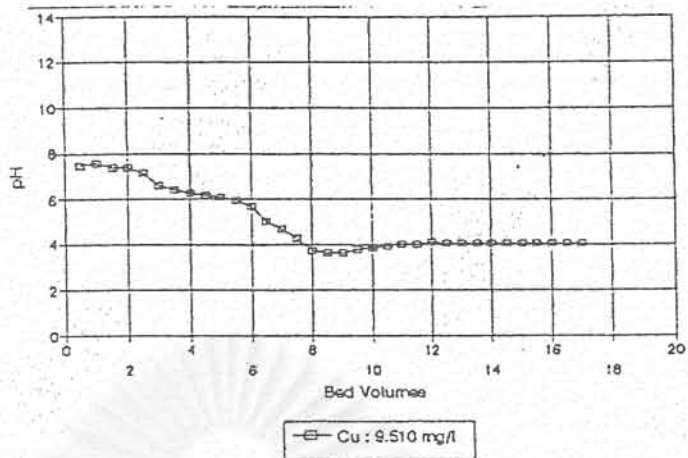


รูปที่ 5.50 ค่าที่เอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวาที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมี่ปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร

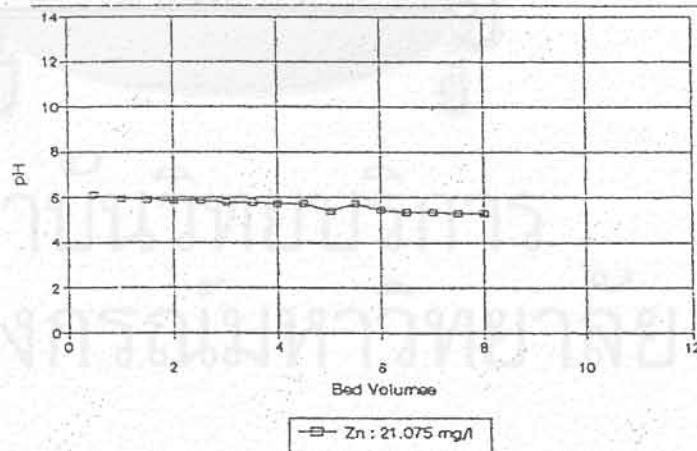
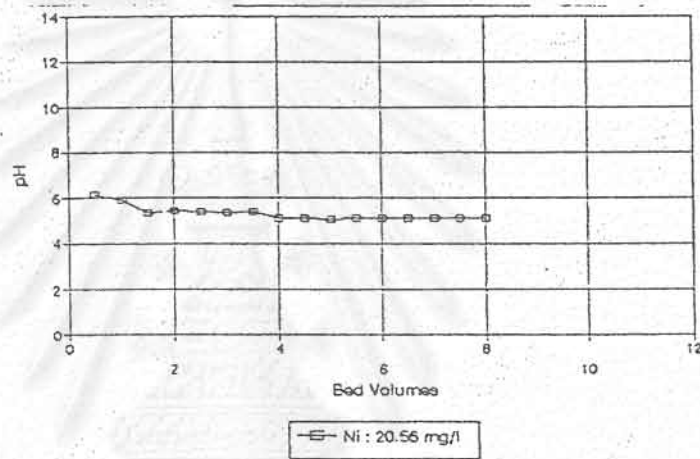
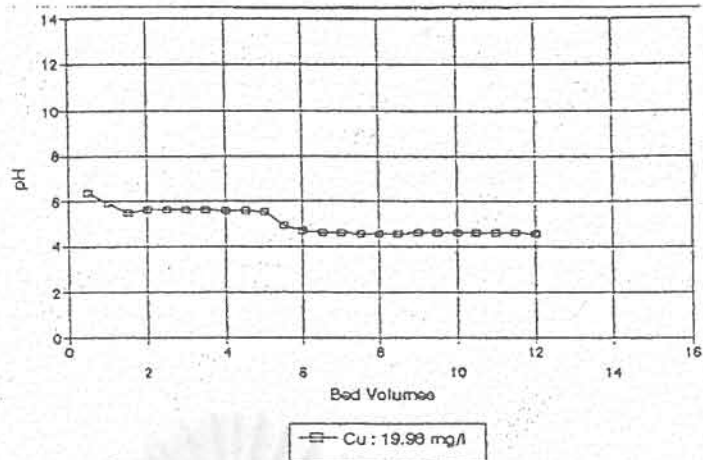




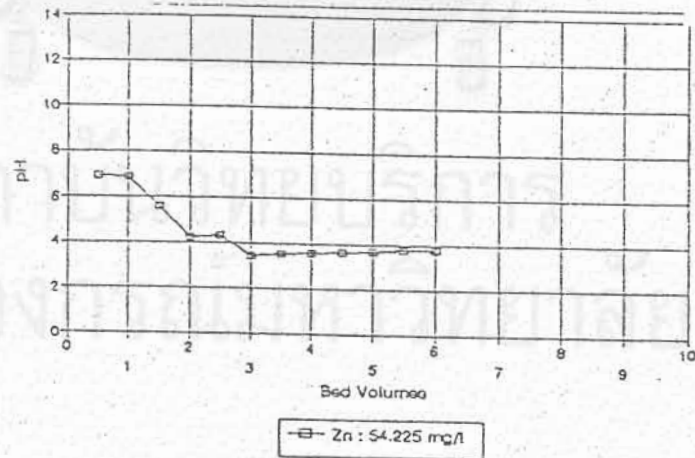
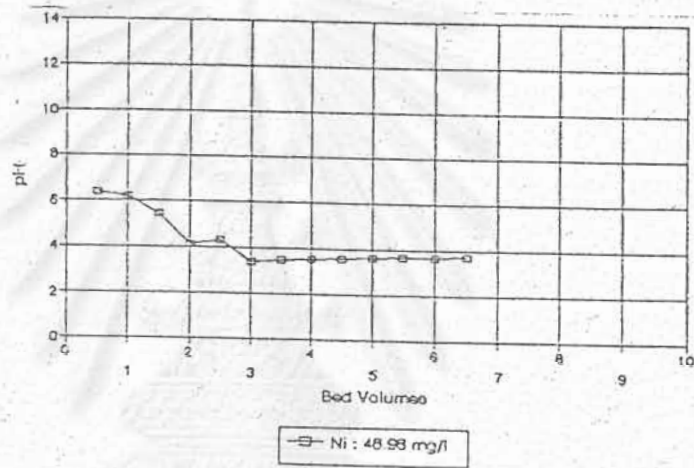
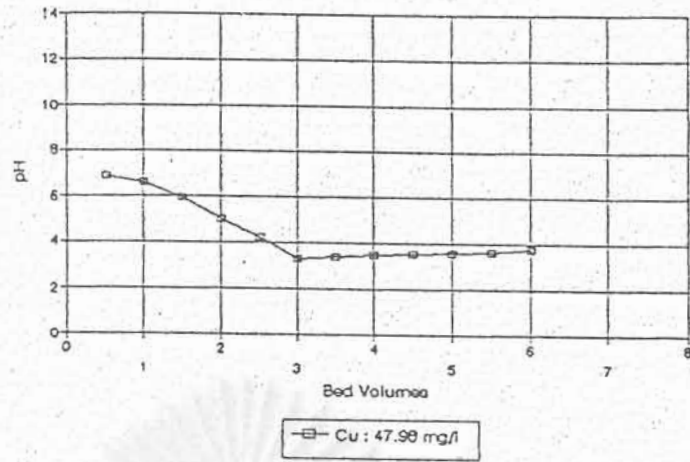
รูปที่ 5.51 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



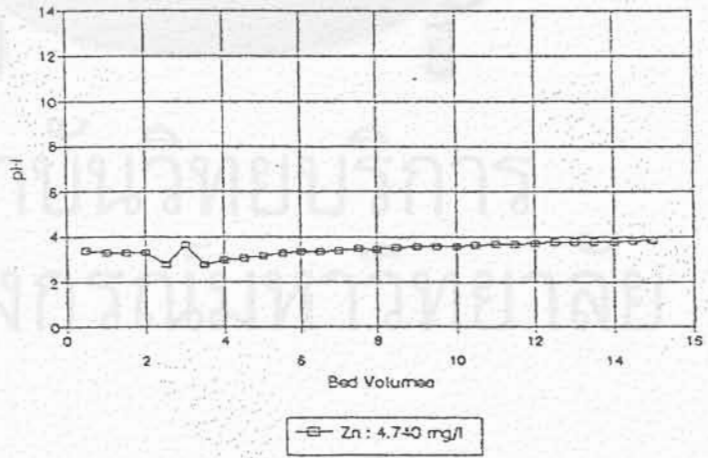
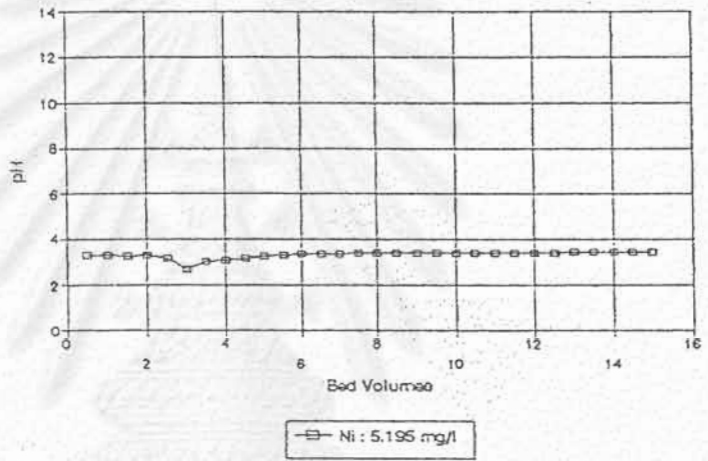
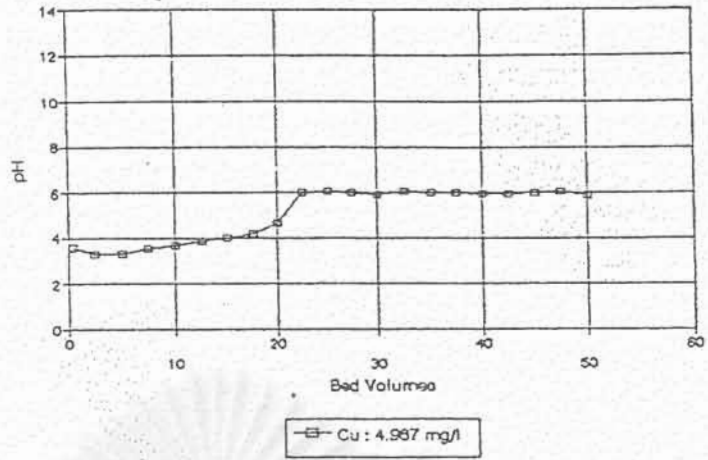
รูปที่ 5.52 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยไม่ได้ปรับสภาพปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



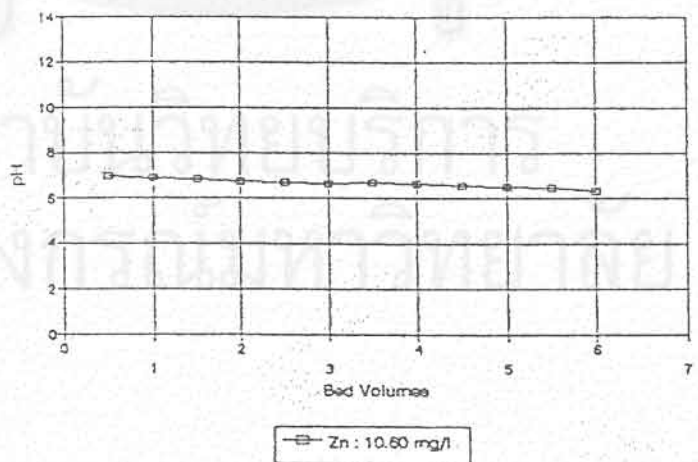
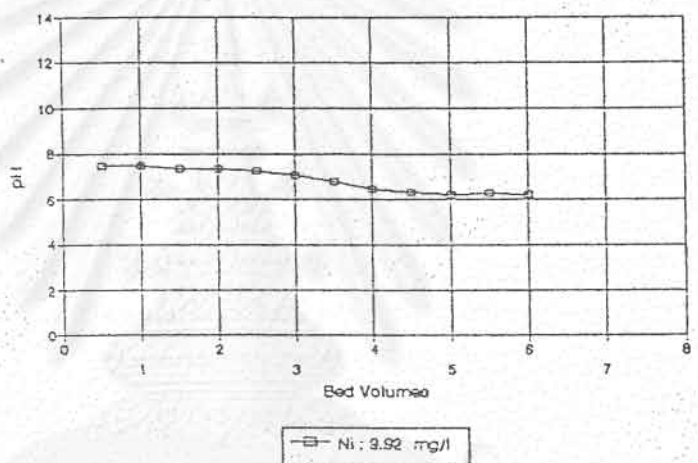
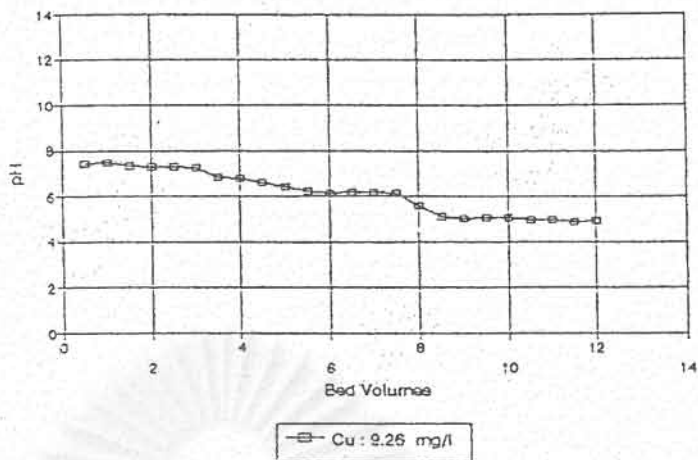
รูปที่ 5.53 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



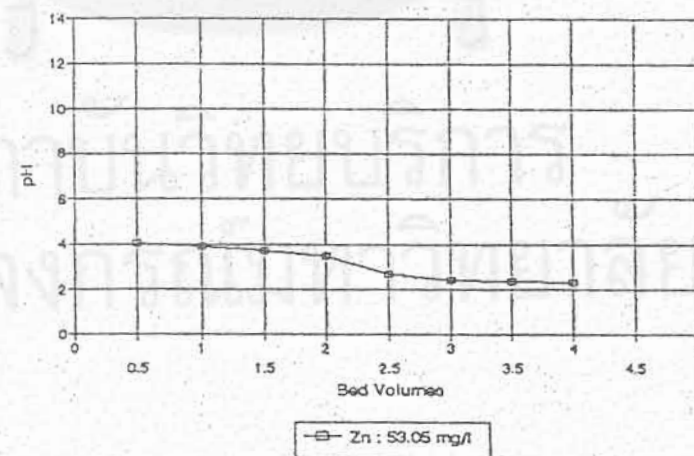
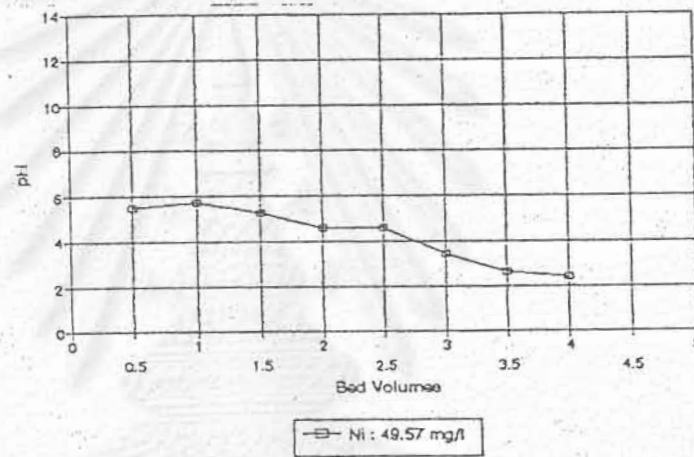
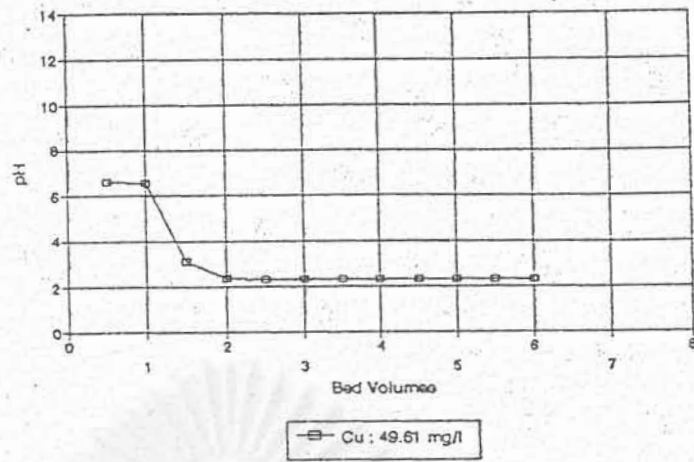
รูปที่ 5.54 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



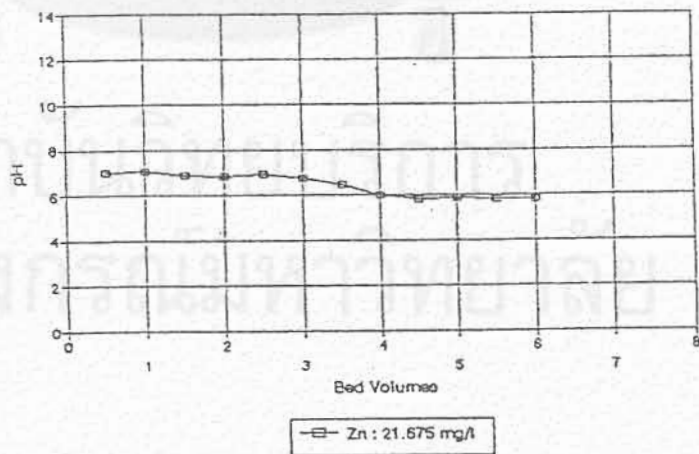
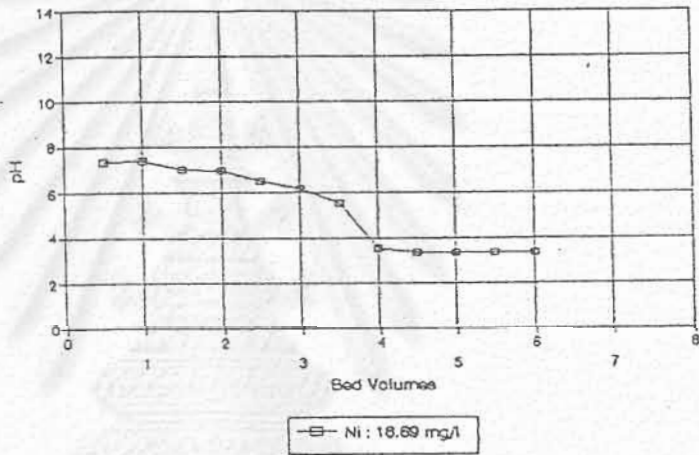
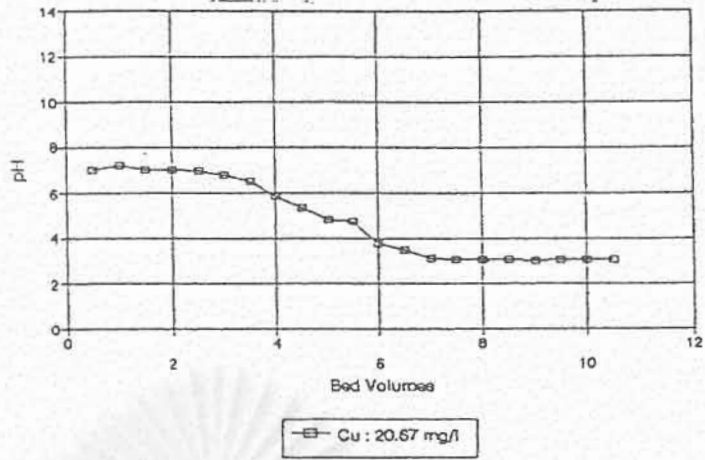
รูปที่ 5.55 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขี้เถ้าที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.56 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

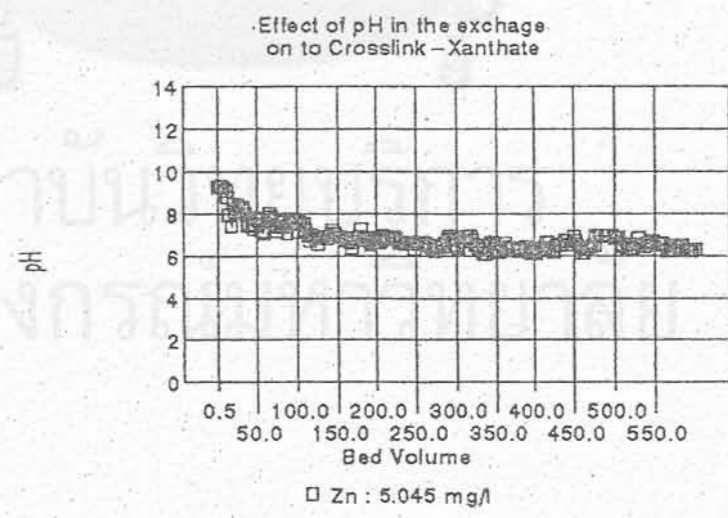
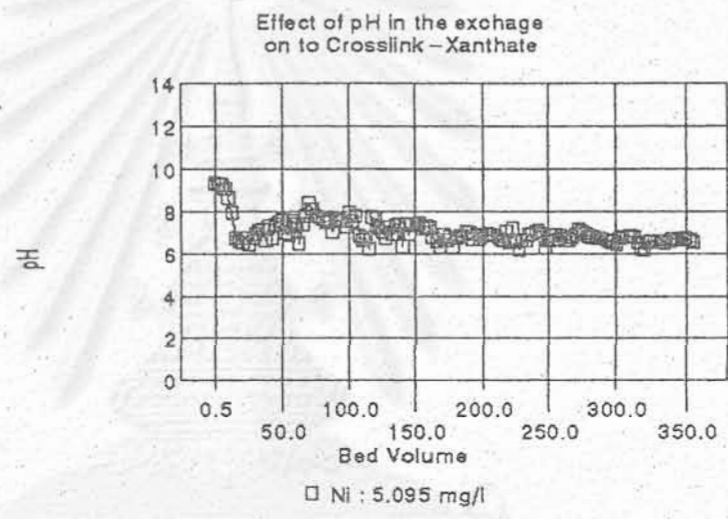
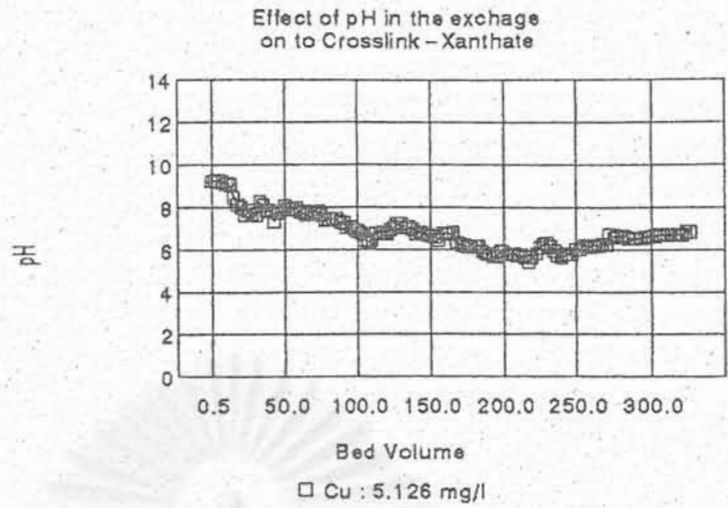


รูปที่ 5.57 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ซันอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



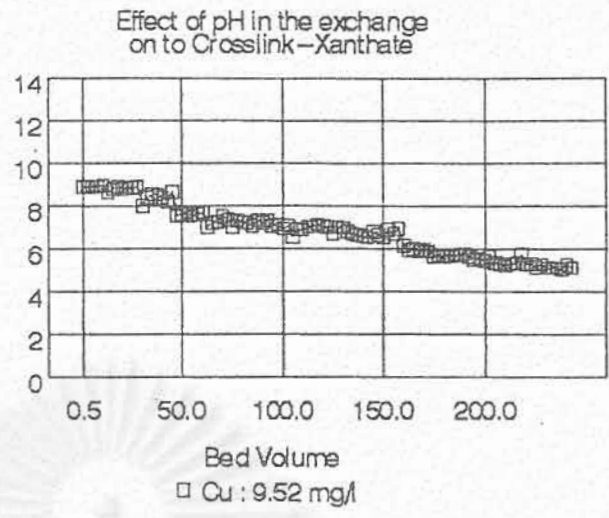
รูปที่ 5.58 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



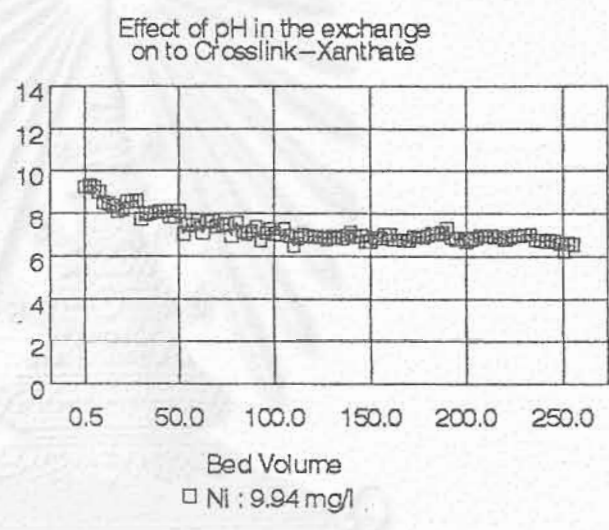


รูปที่ 5.59 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสีย มีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร

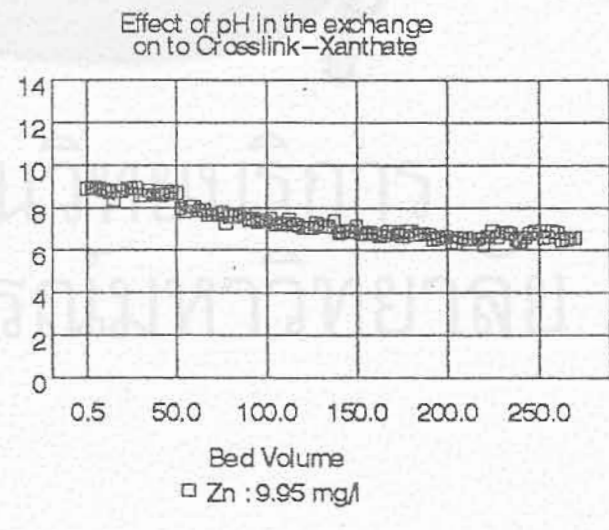
๕



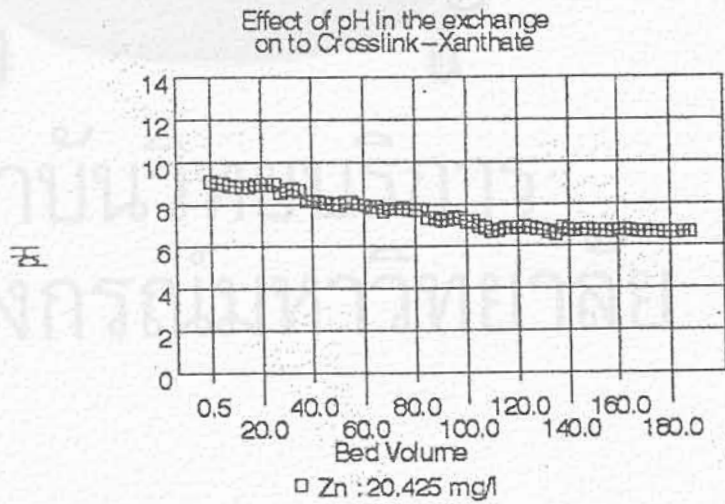
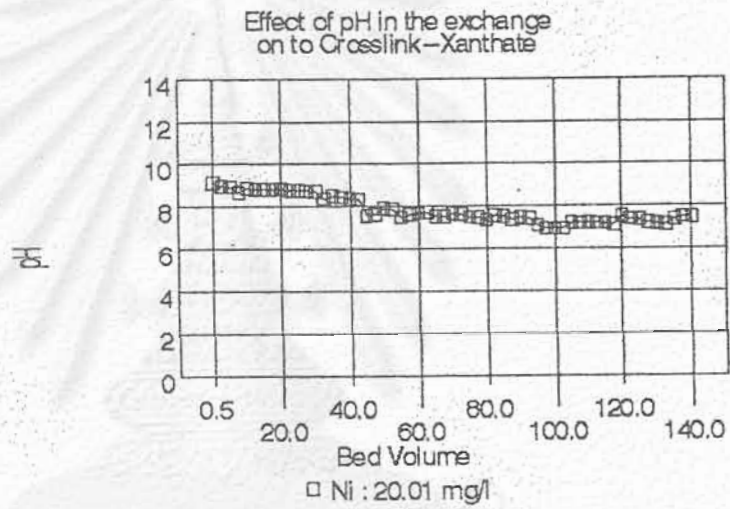
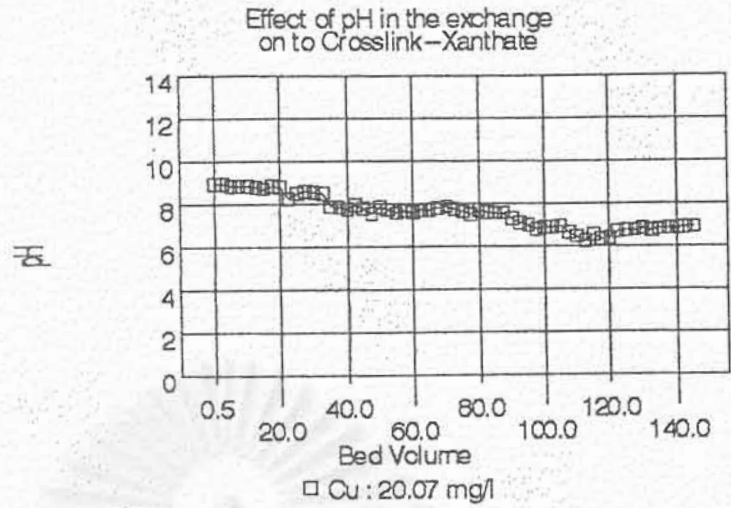
๕



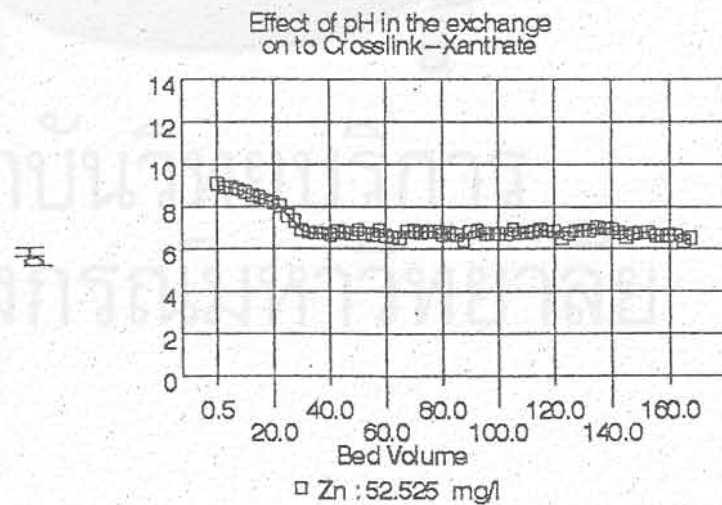
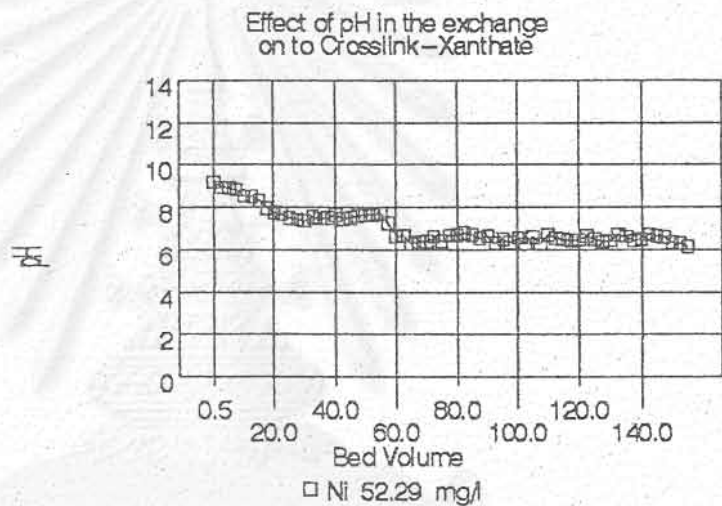
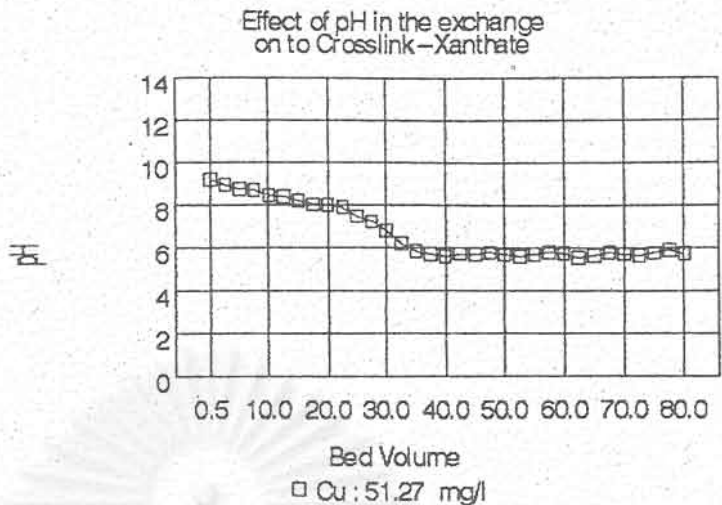
๕



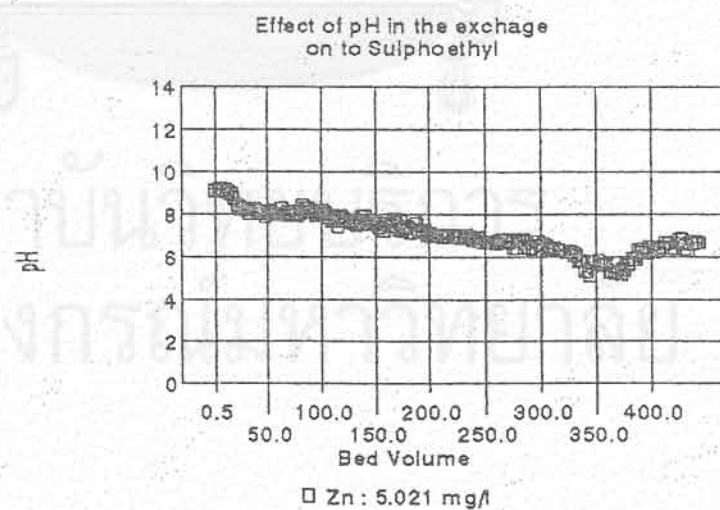
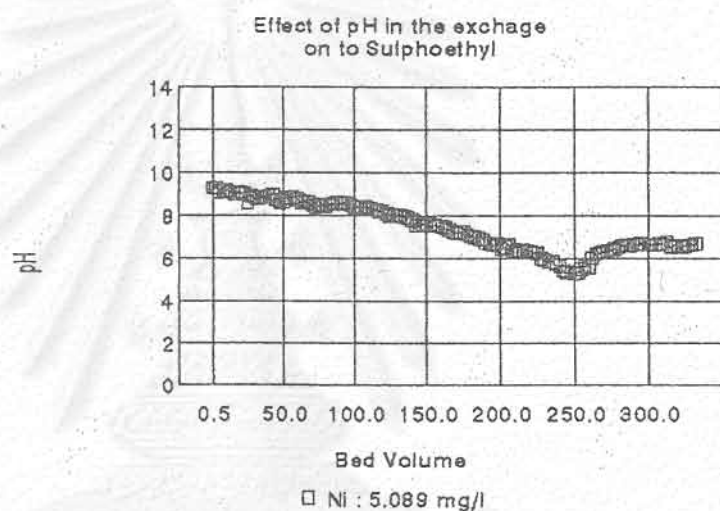
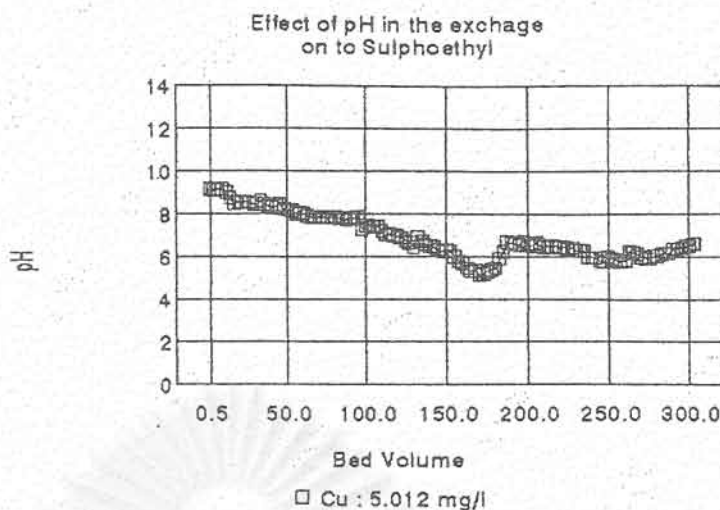
รูปที่ 5.60 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



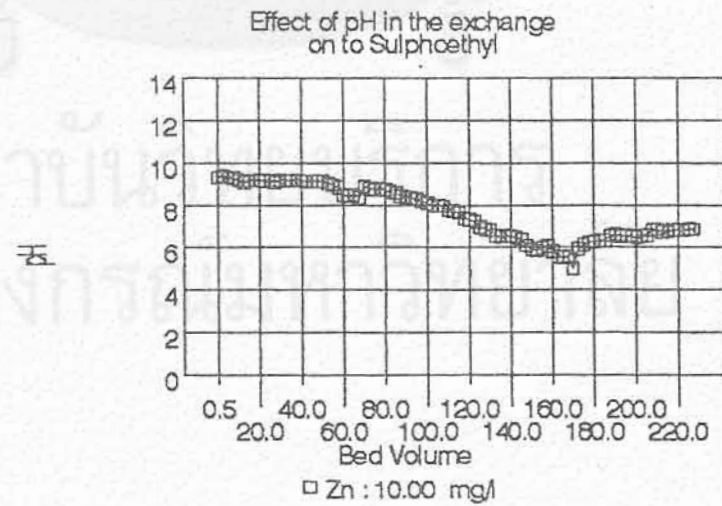
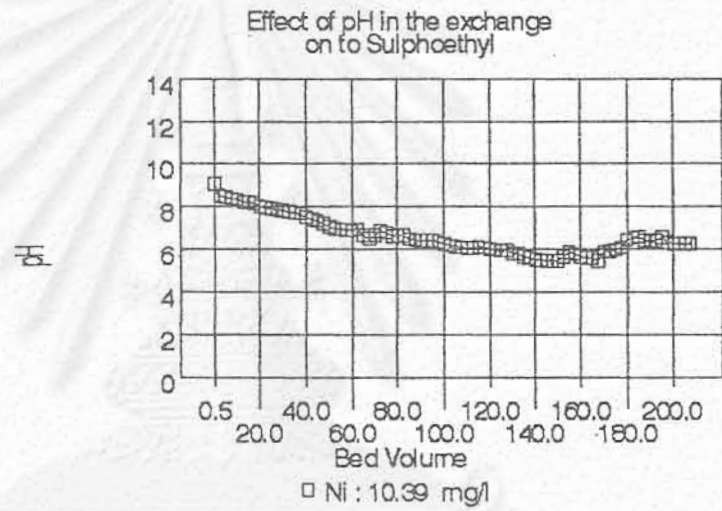
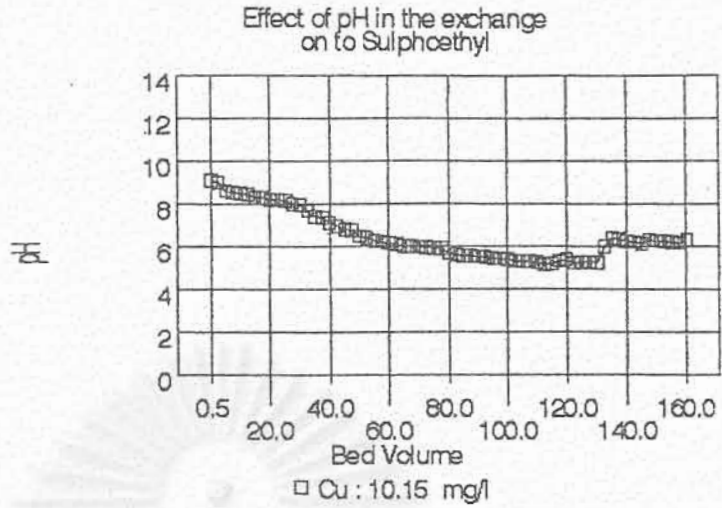
รูปที่ 5.61 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสีย มีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



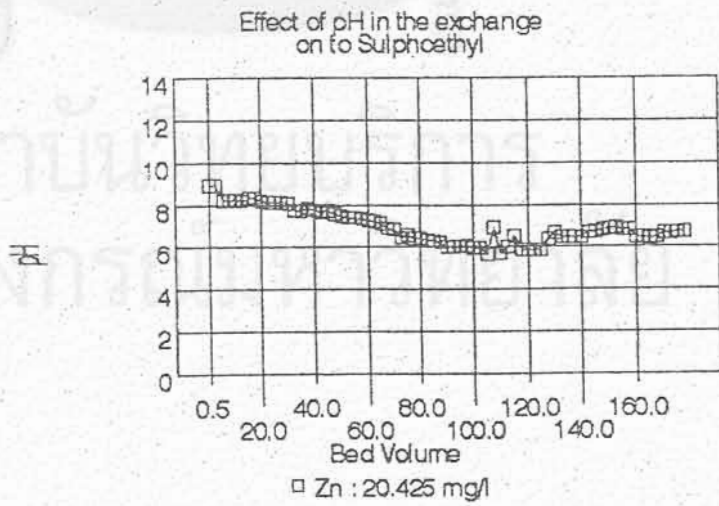
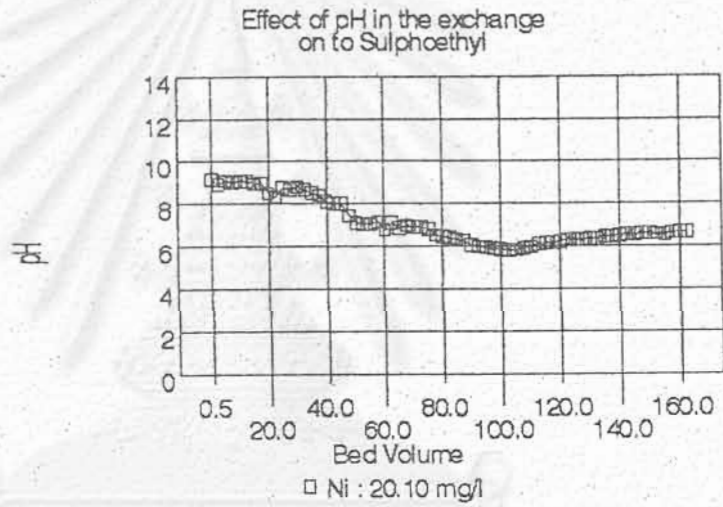
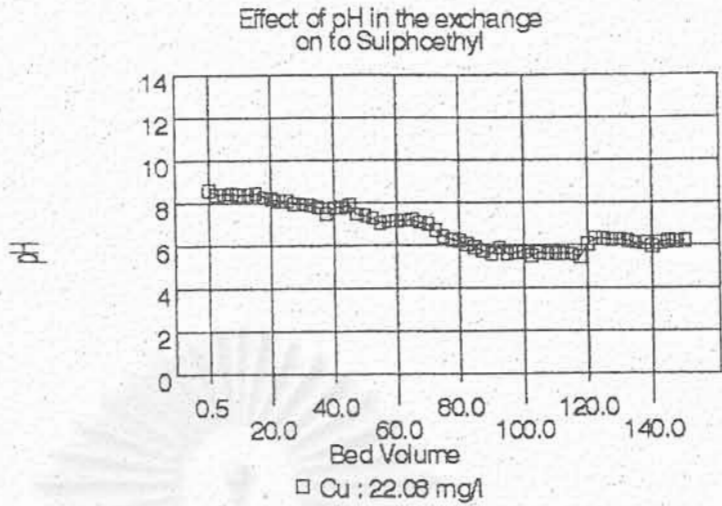
รูปที่ 5.62 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดครอสลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



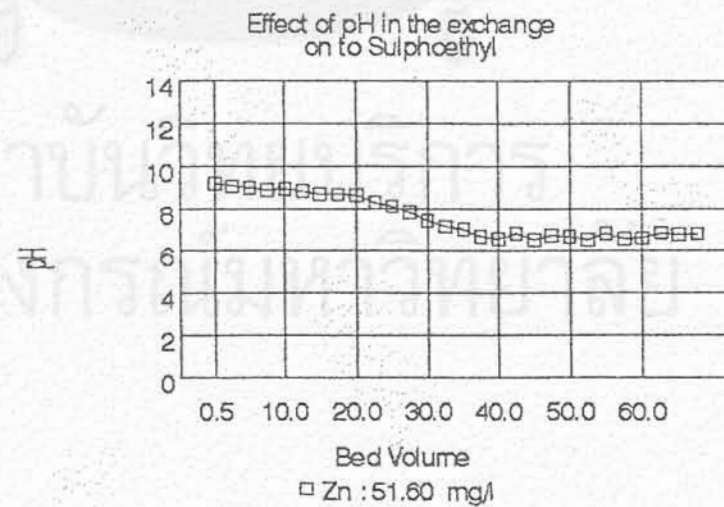
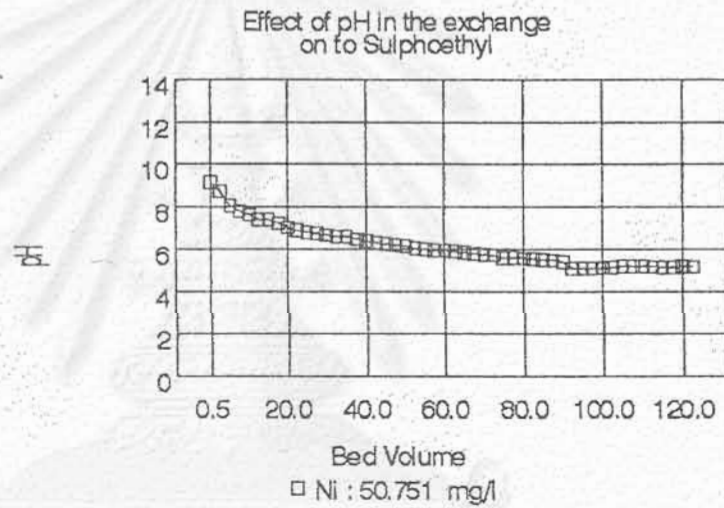
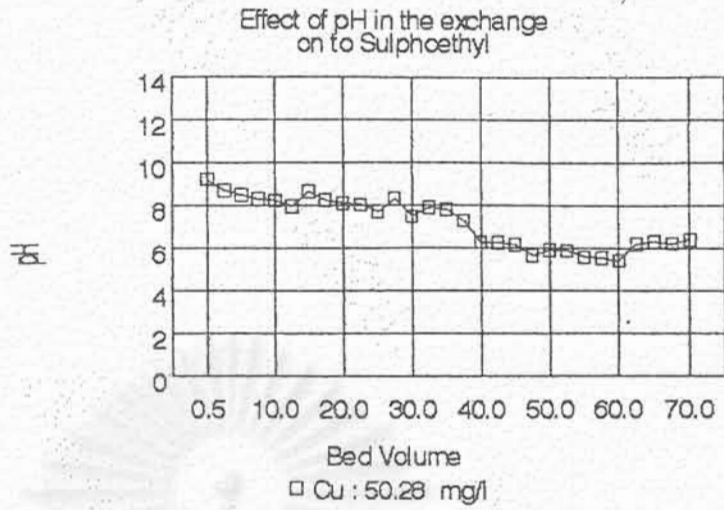
รูปที่ 5.63 ค่าที่เอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.64 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

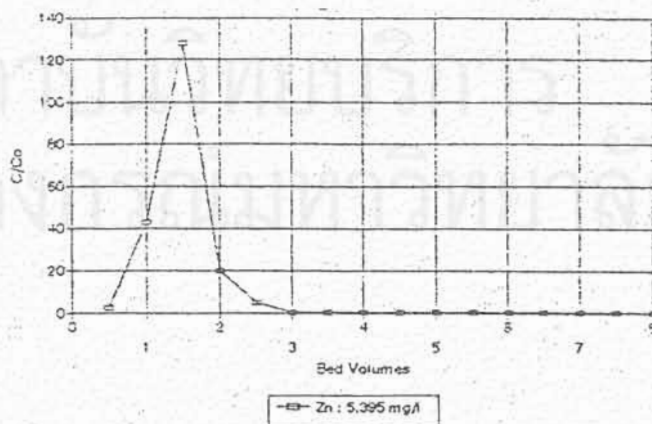
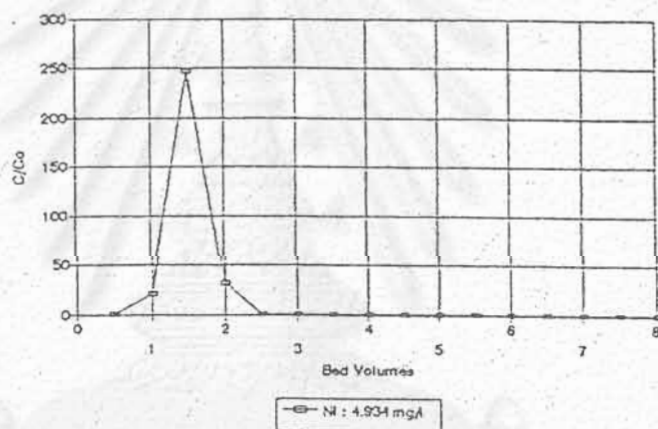
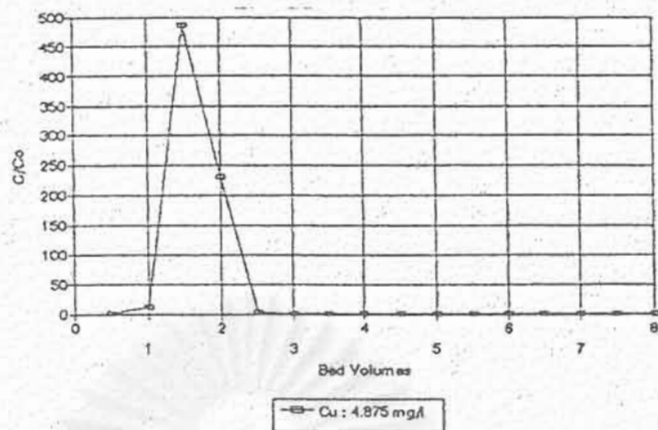


รูปที่ 5.65 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร

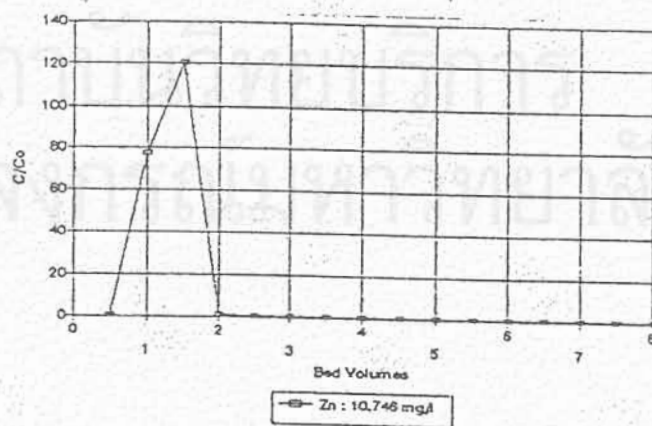
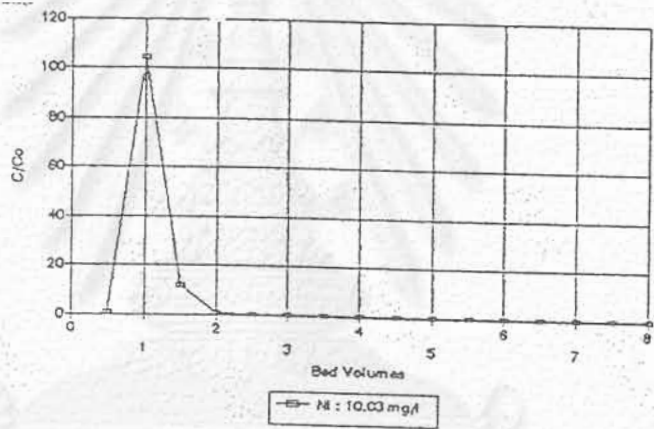
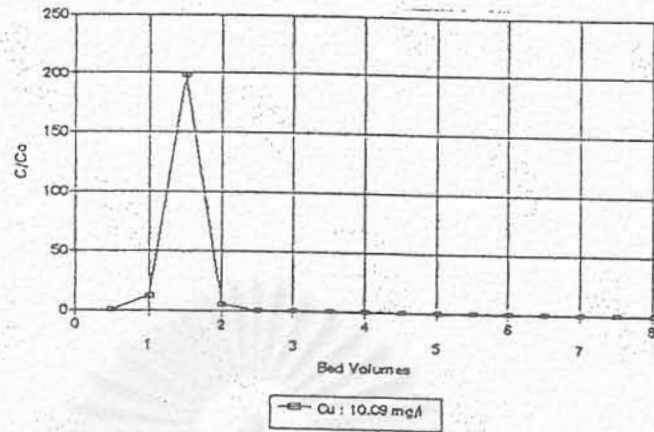


รูปที่ 5.66 ค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร

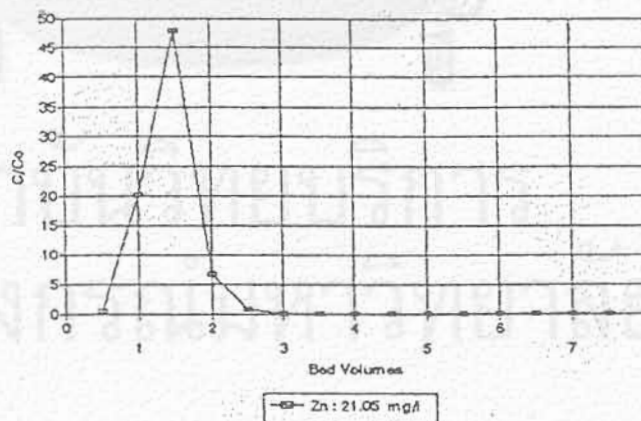
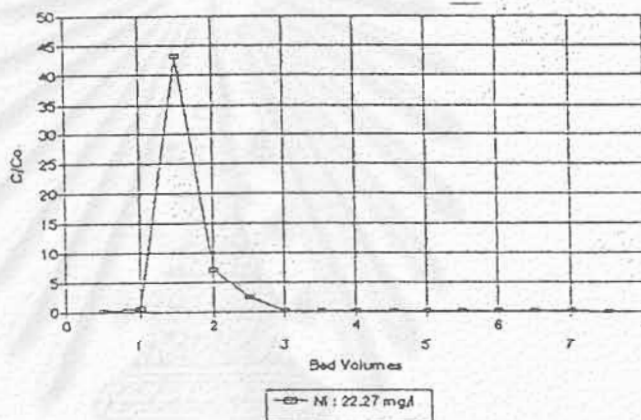
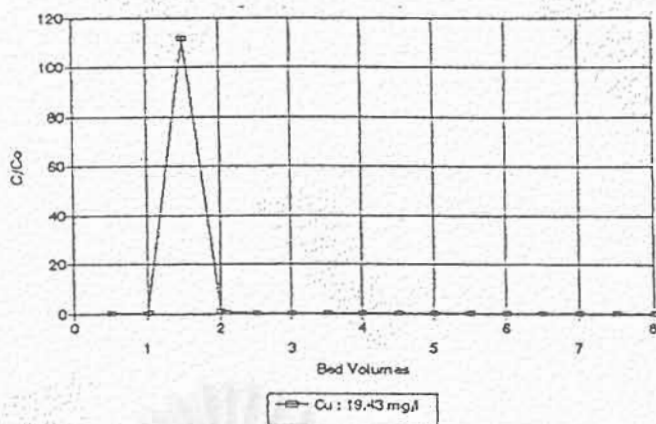




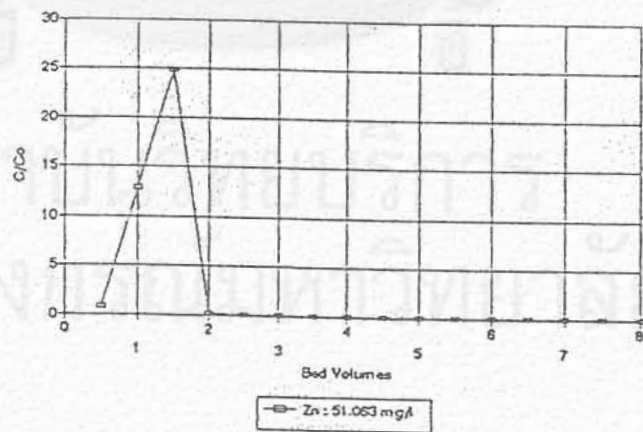
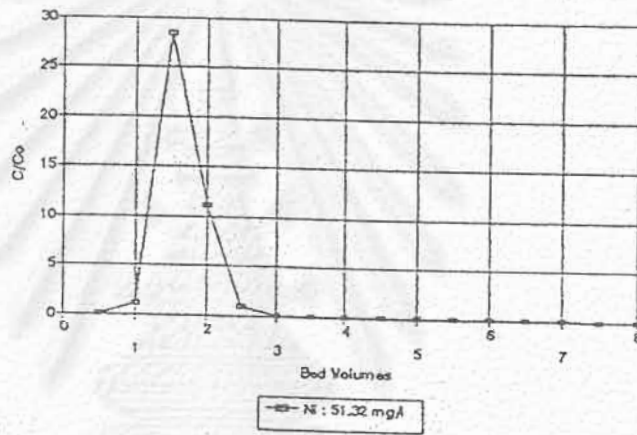
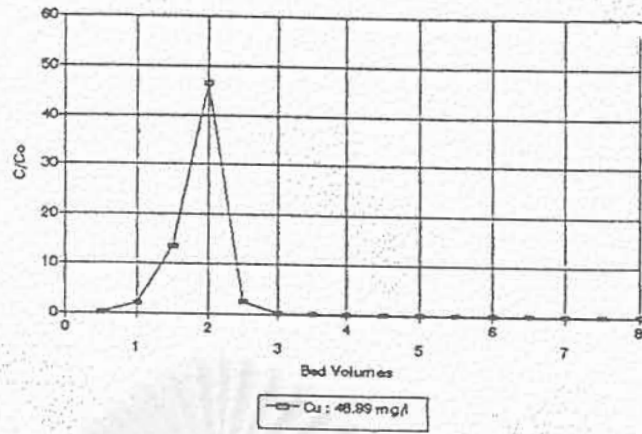
รูปที่ 5.67 ระดับการรีเจเนเรชั่นของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



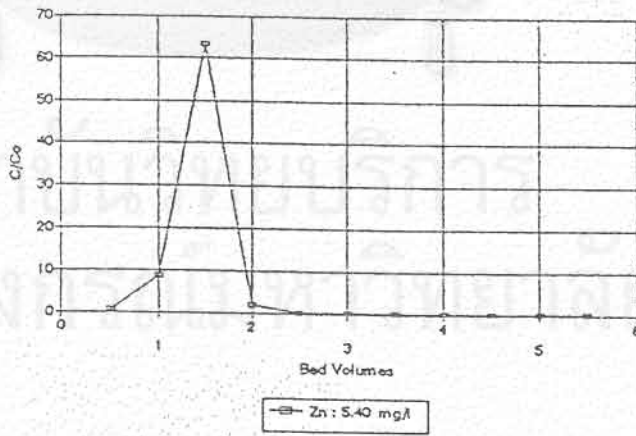
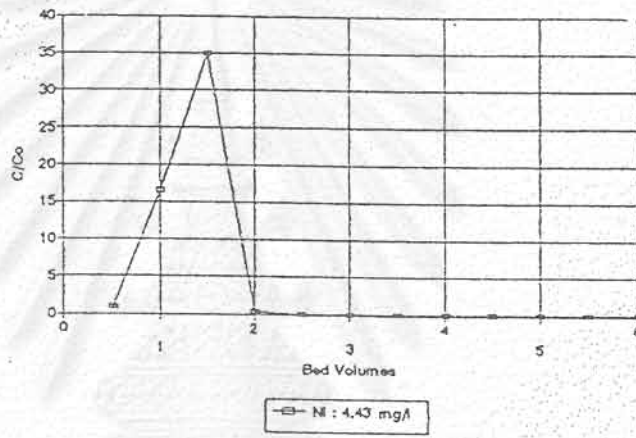
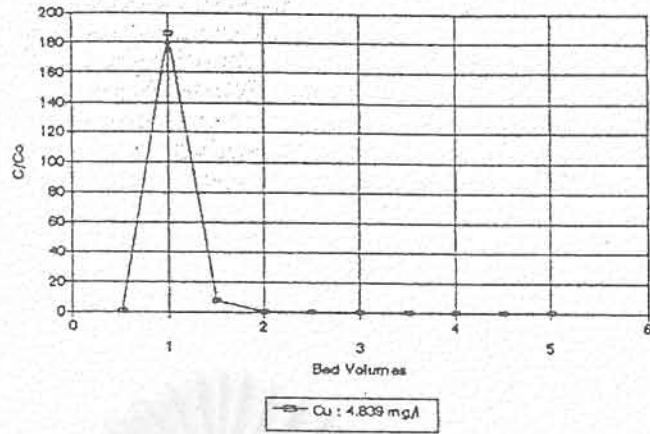
รูปที่ 5.68 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



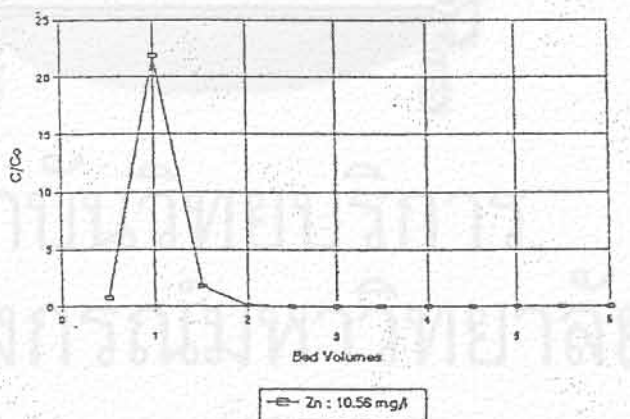
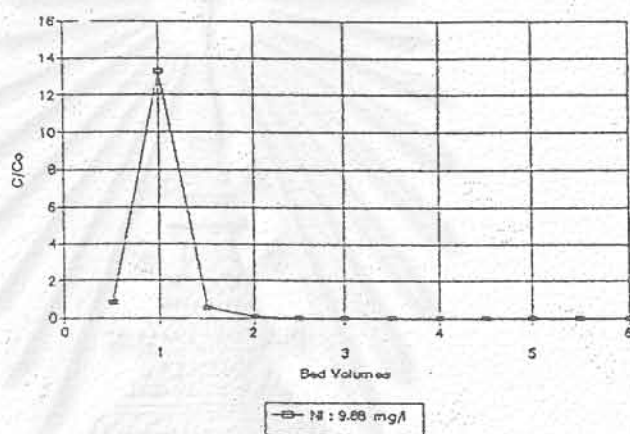
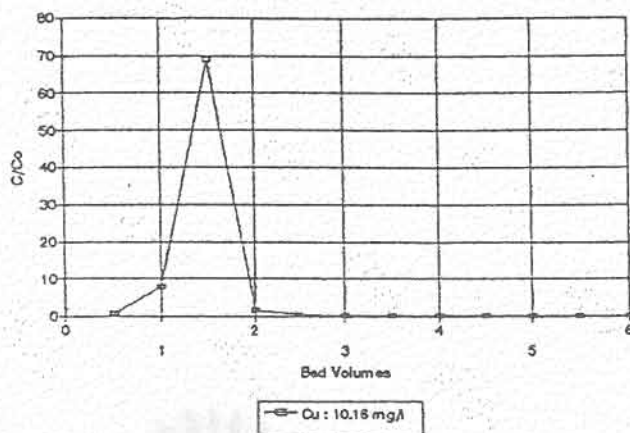
รูปที่ 5.69 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา  
ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



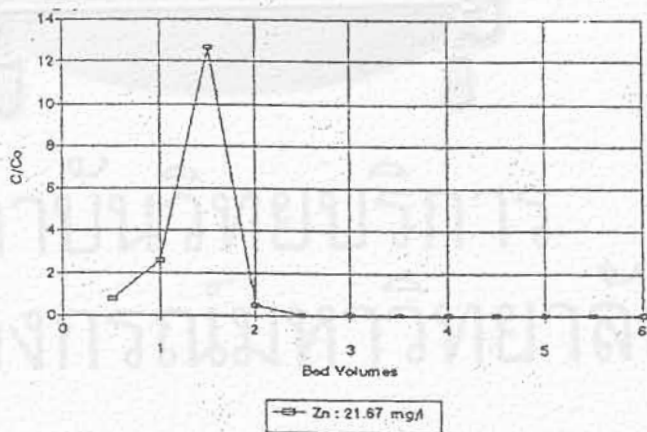
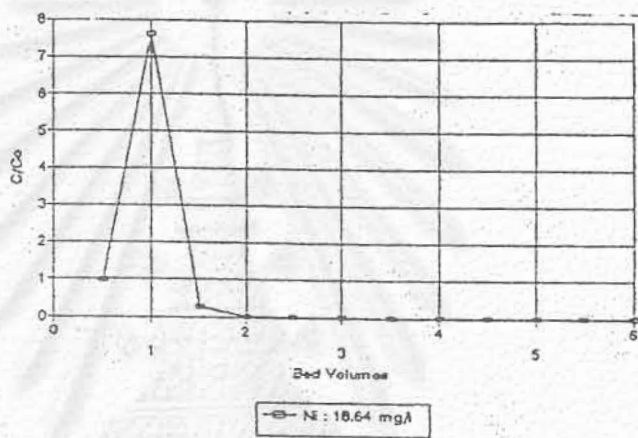
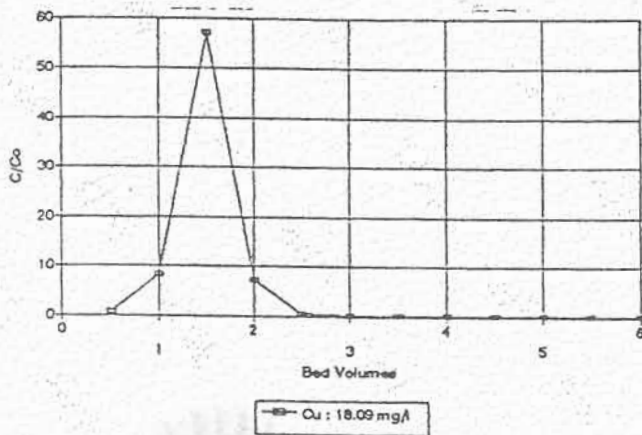
รูปที่ 5.70 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา  
ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



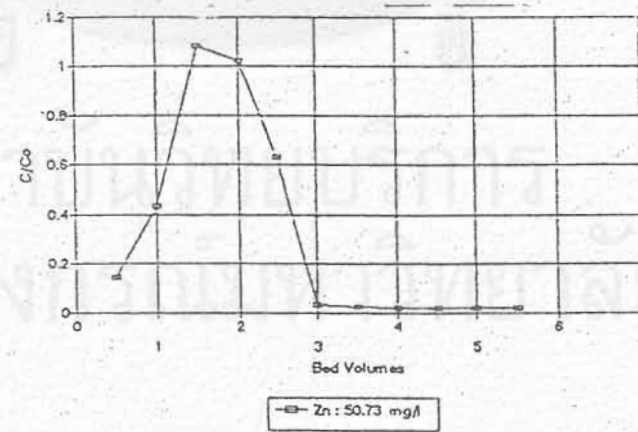
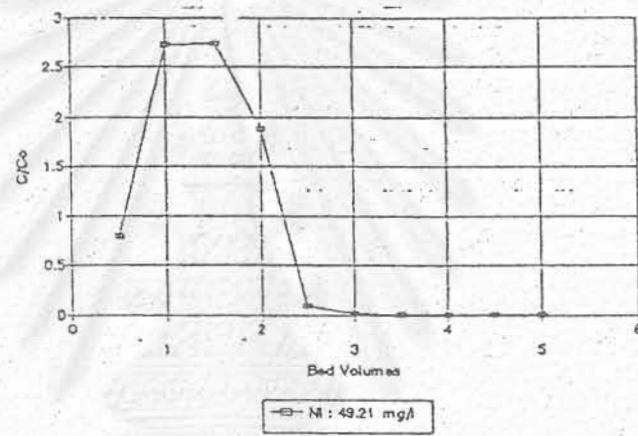
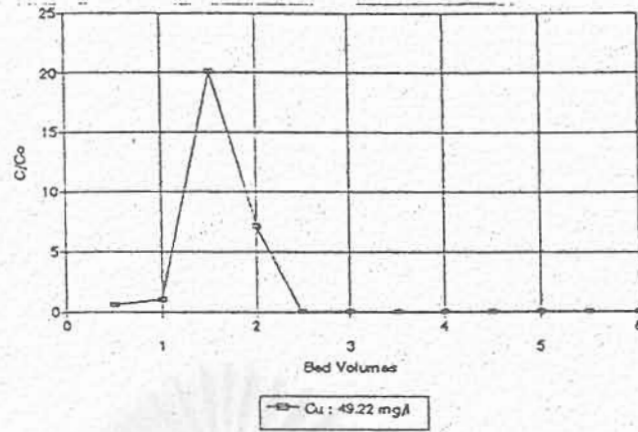
รูปที่ 5.71 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.72 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

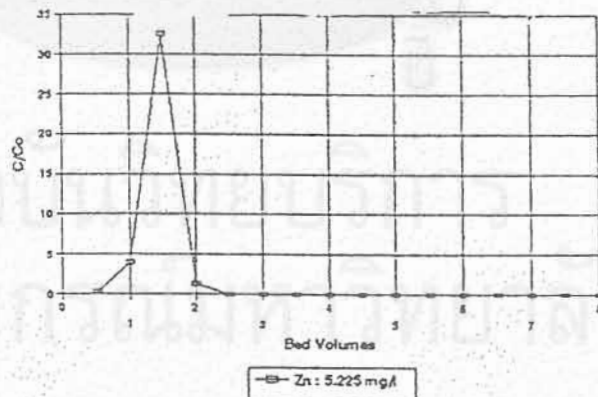
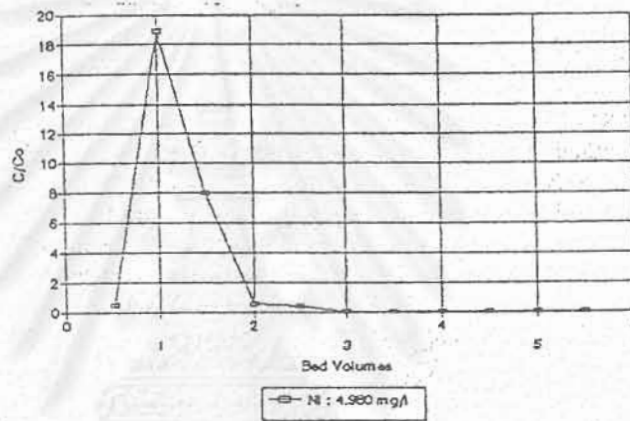
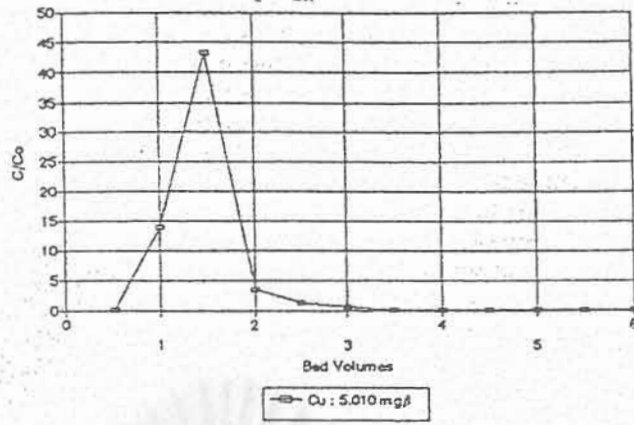


รูปที่ 5.73 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร

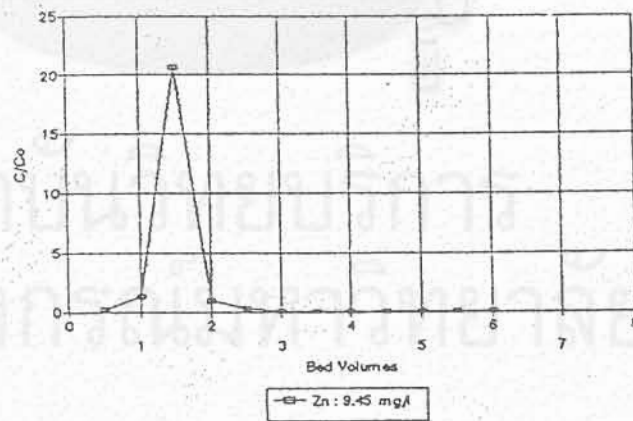
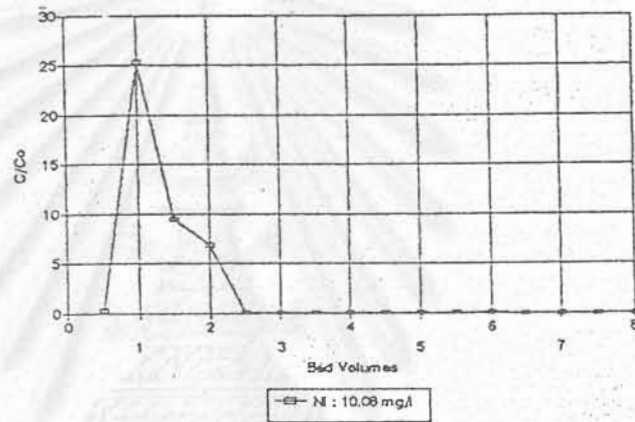
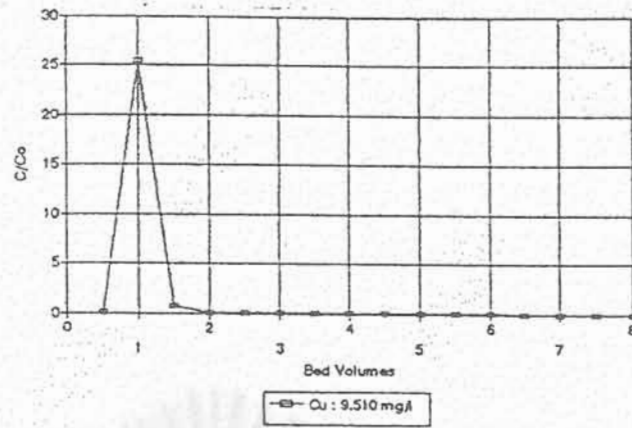


รูปที่ 5.74 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ผักตบชวา ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl treated Water hyacinth) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร

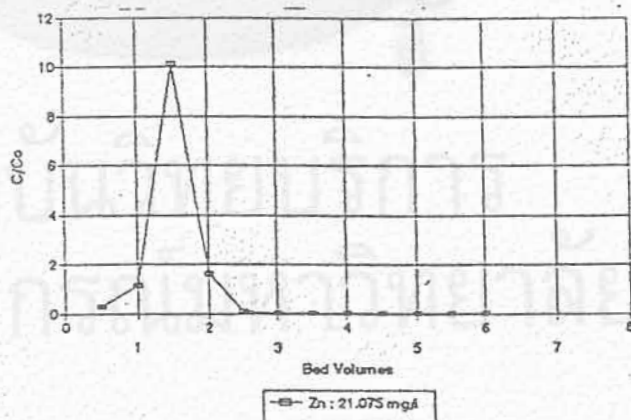
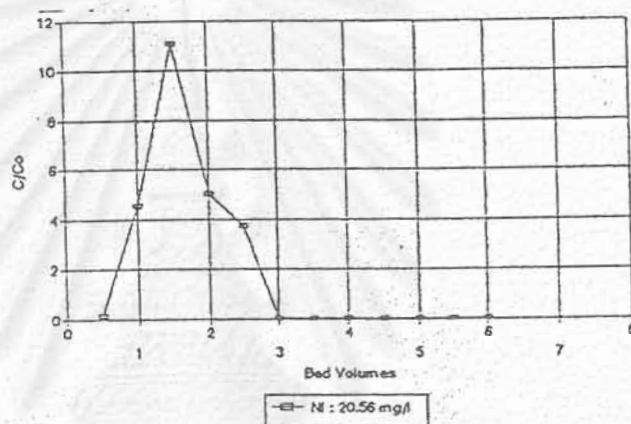
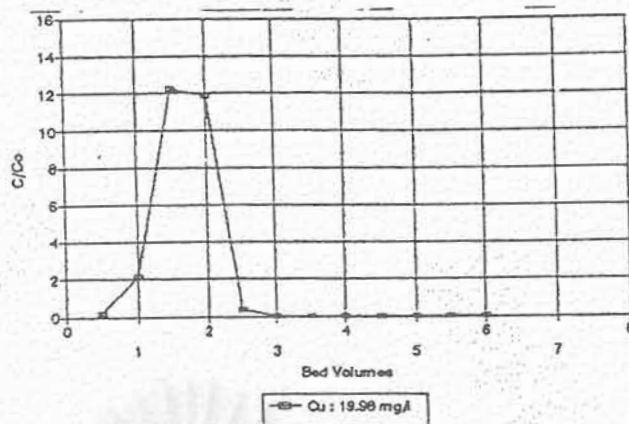




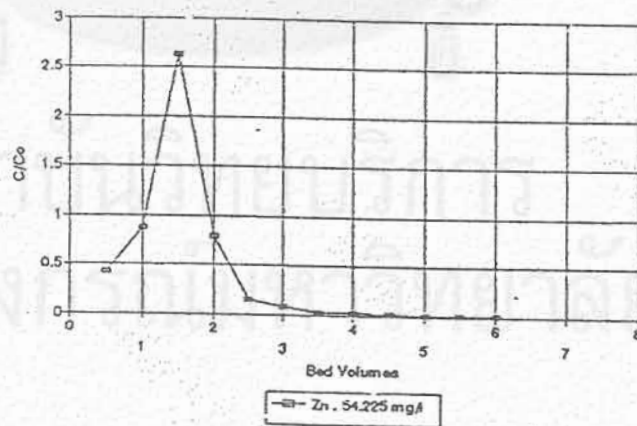
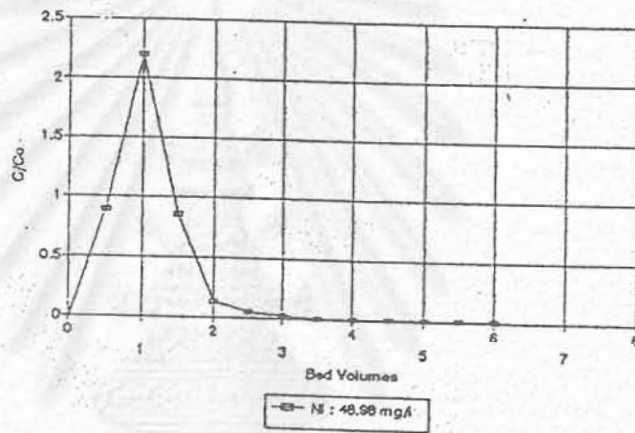
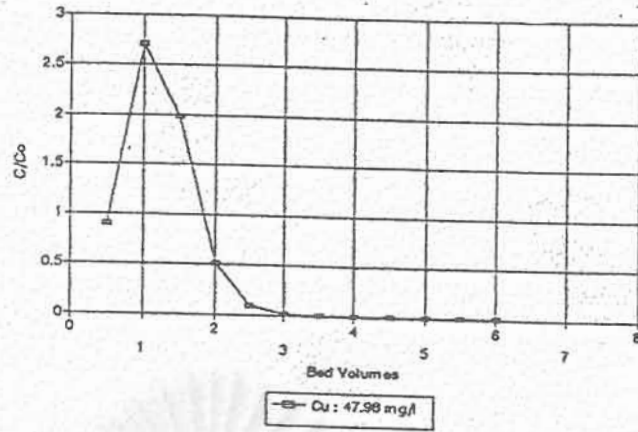
รูปที่ 5.75 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



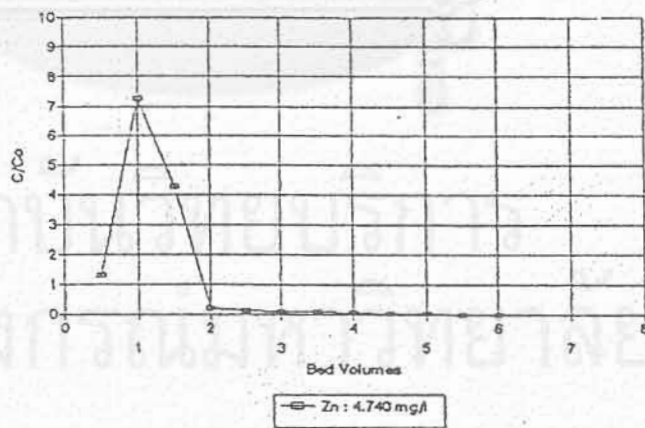
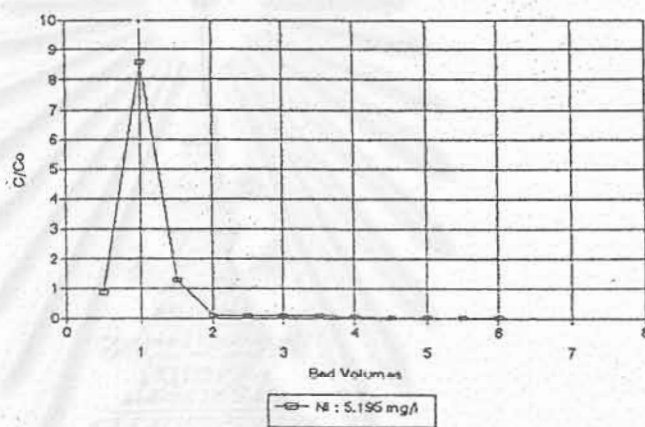
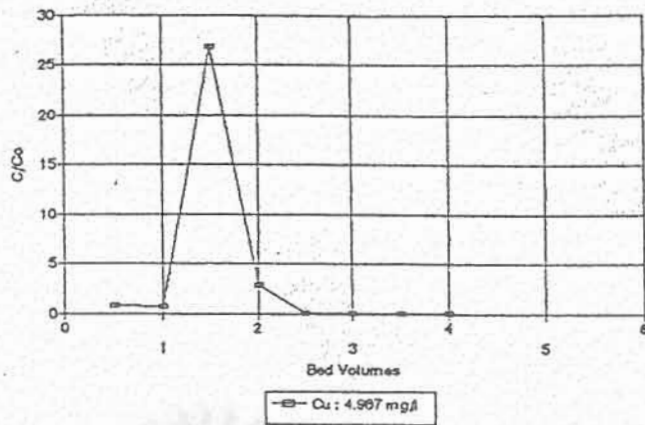
รูปที่ 5.76 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



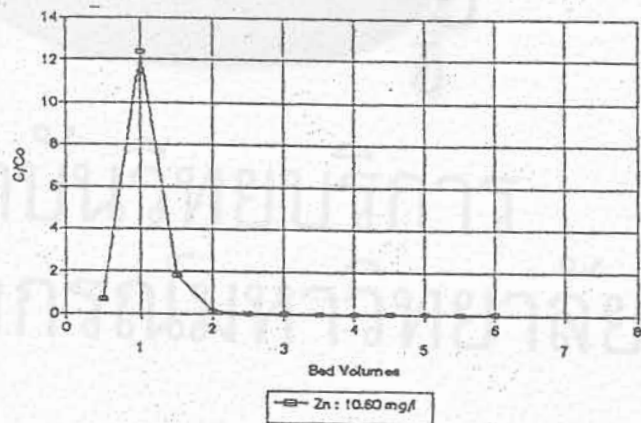
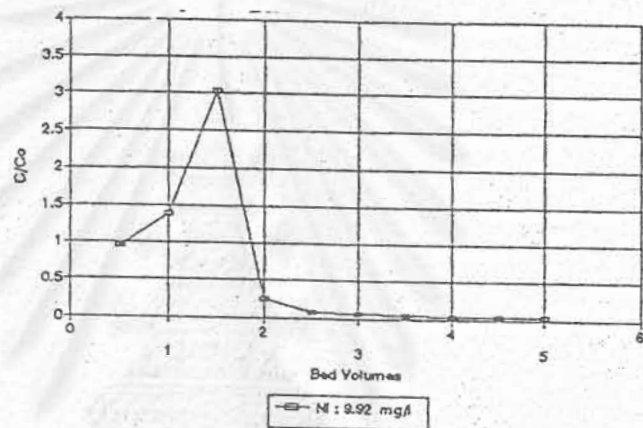
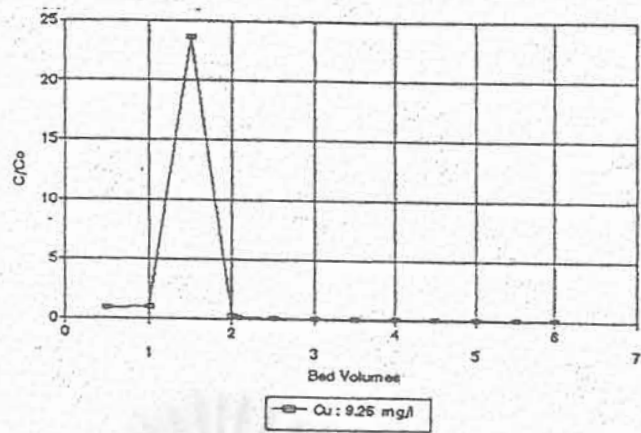
รูปที่ 5.77 ระดับการรีเจเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



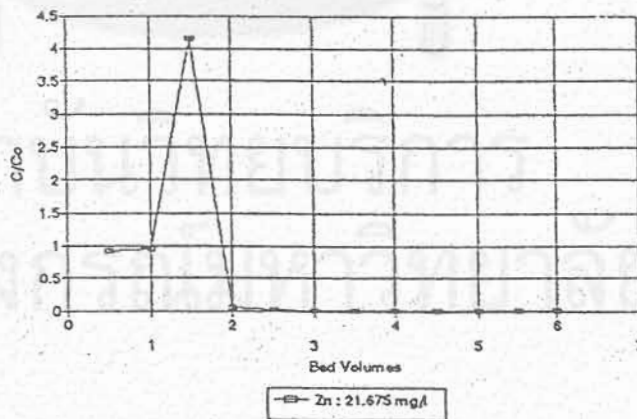
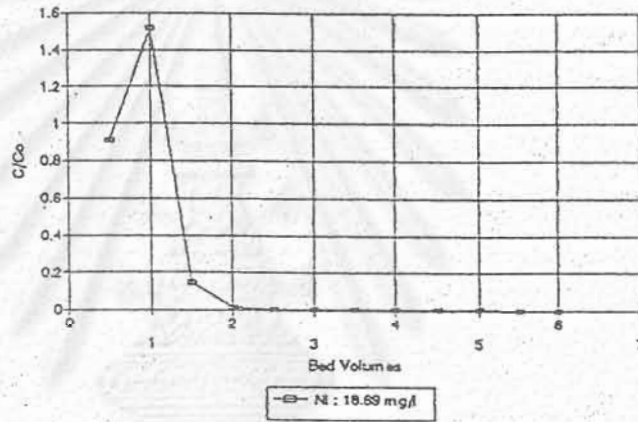
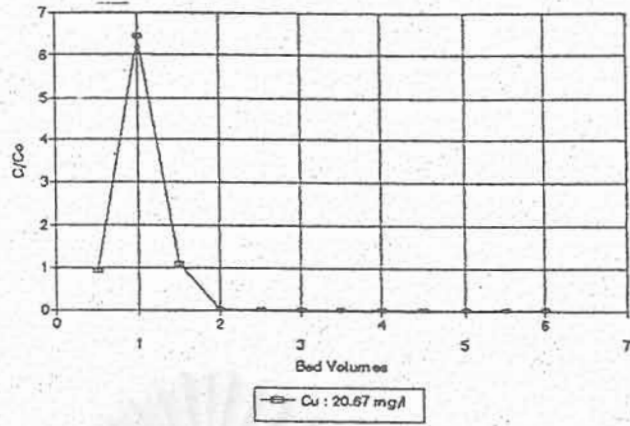
รูปที่ 5.78 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ซันอ้อย  
ที่ไม่ได้ปรับสภาพ (Untreated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



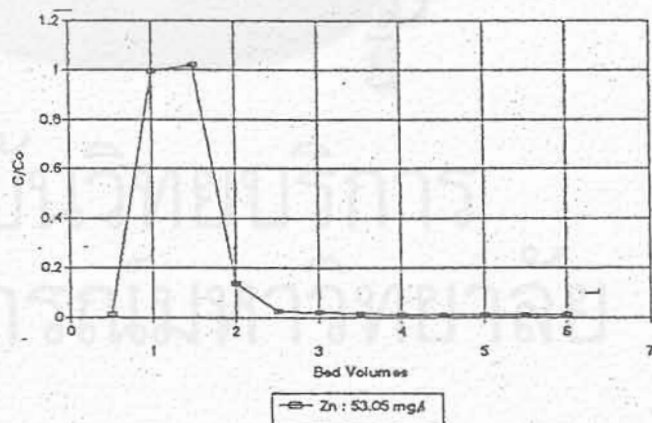
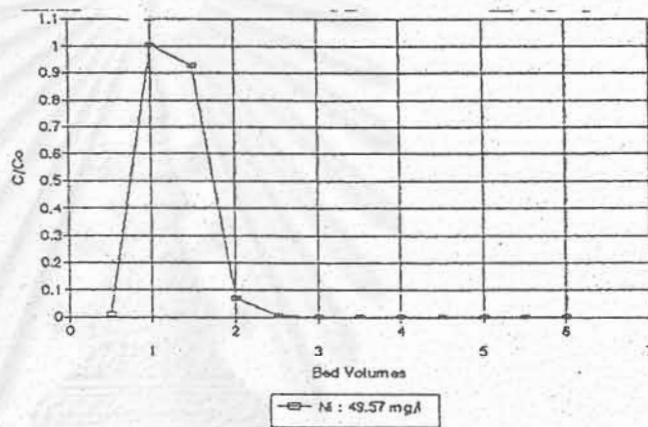
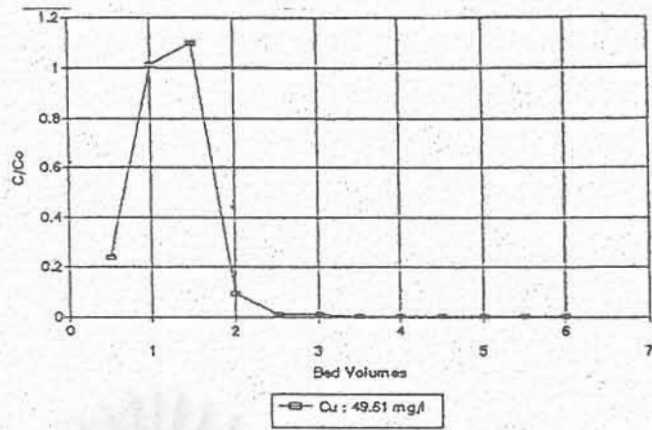
รูปที่ 5.79 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.80 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ขาน้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

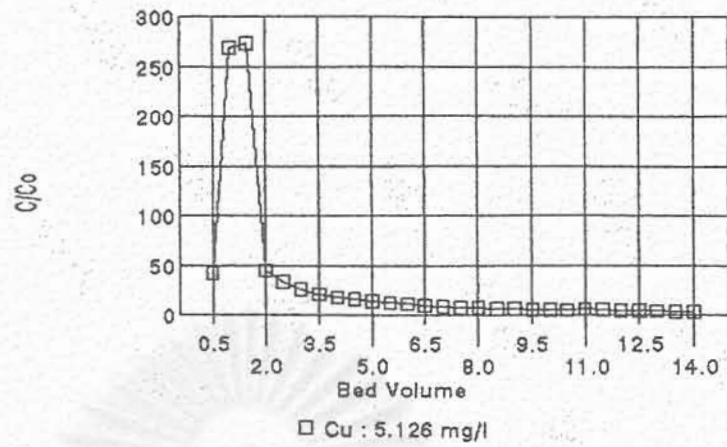
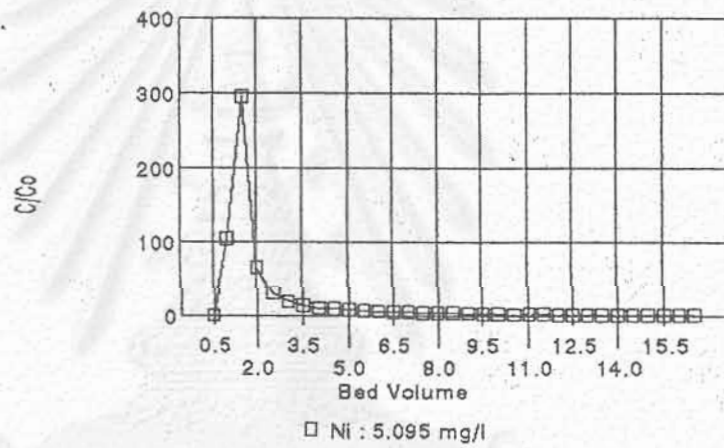
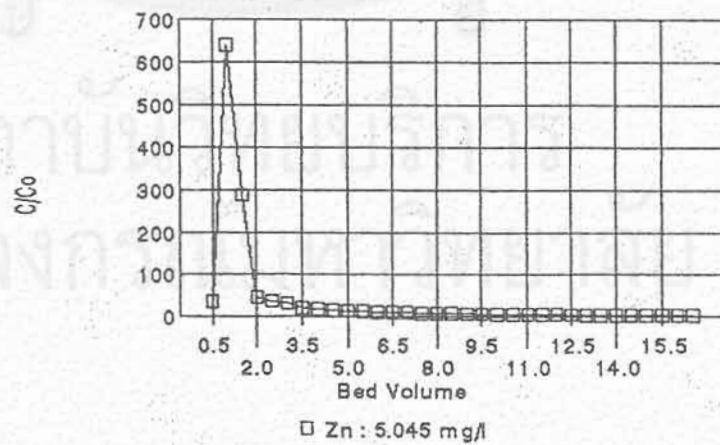


รูปที่ 5.81 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ซันอ้อย ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร

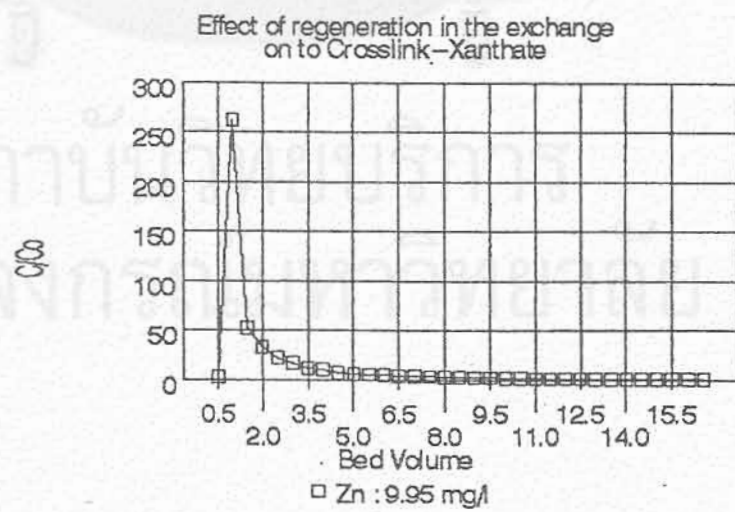
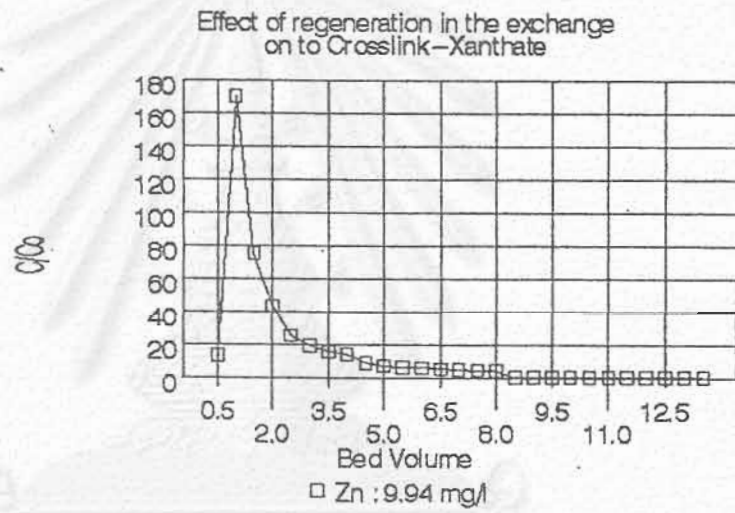
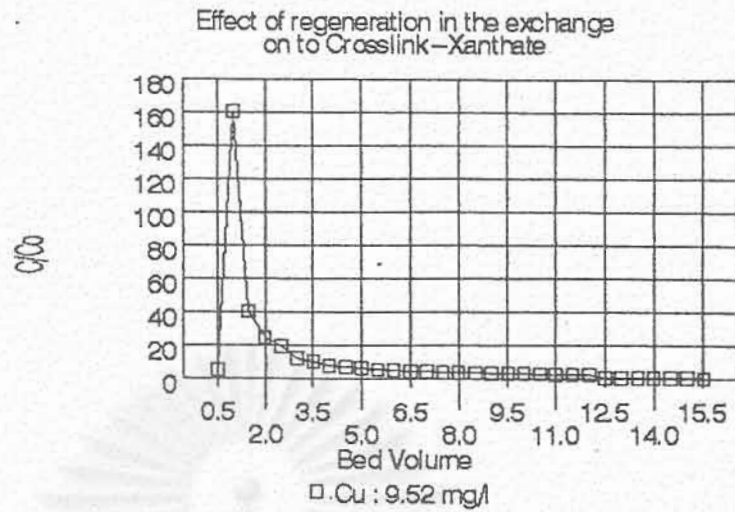


รูปที่ 5.82 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ชานอ้อย ที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl-treated bagasse) เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



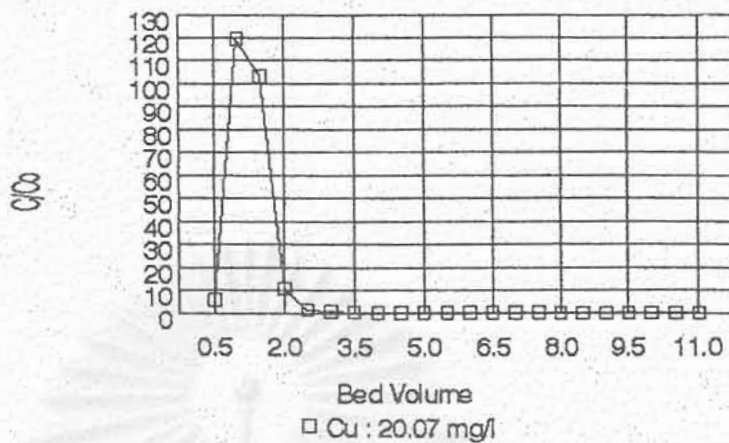
Effect of regeneration in the exchange  
on to Crosslink-XanthateEffect of regeneration in the exchange  
on to Crosslink-XanthateEffect of regeneration in the exchange  
on to Crosslink-Xanthate

รูปที่ 5.83 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้  
สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดคลอซลลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา  
เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร

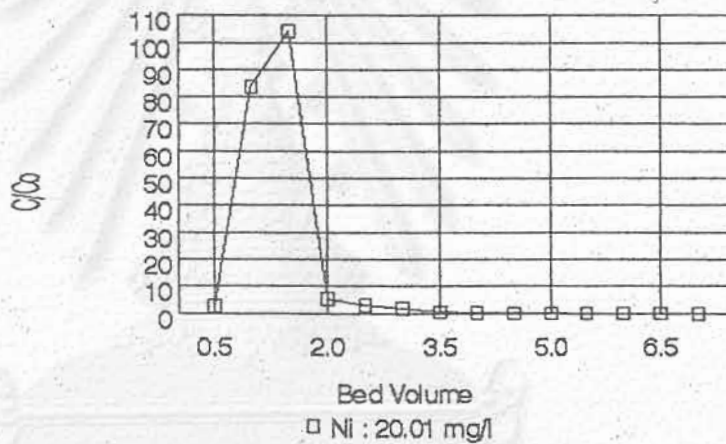


รูปที่ 5.84 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดคลอซลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร

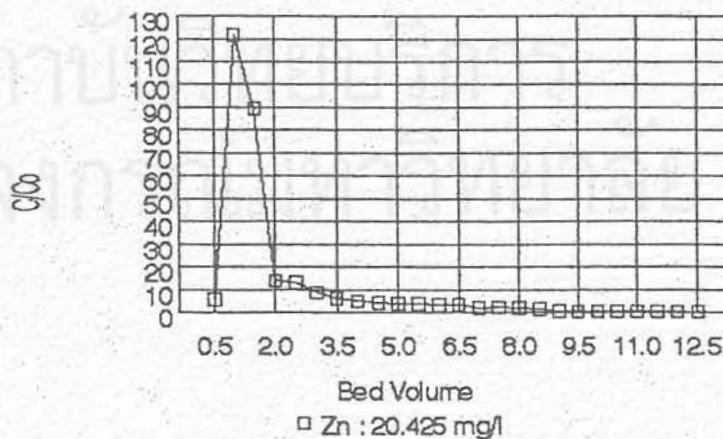
Effect of regeneration in the exchange on to Crosslink-Xanthate



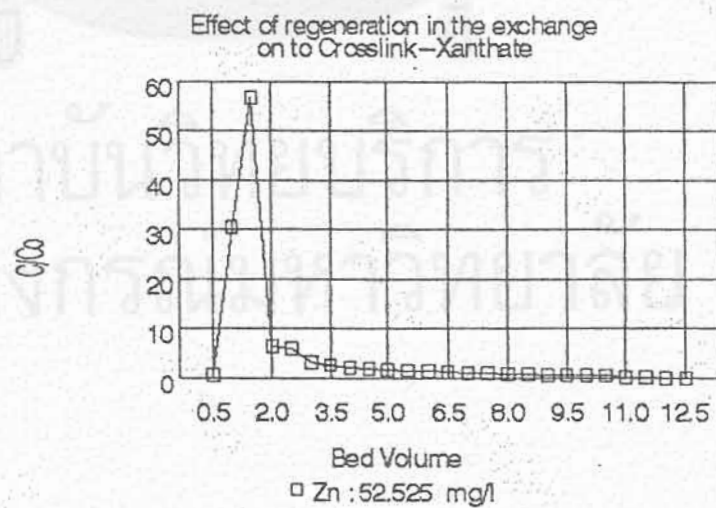
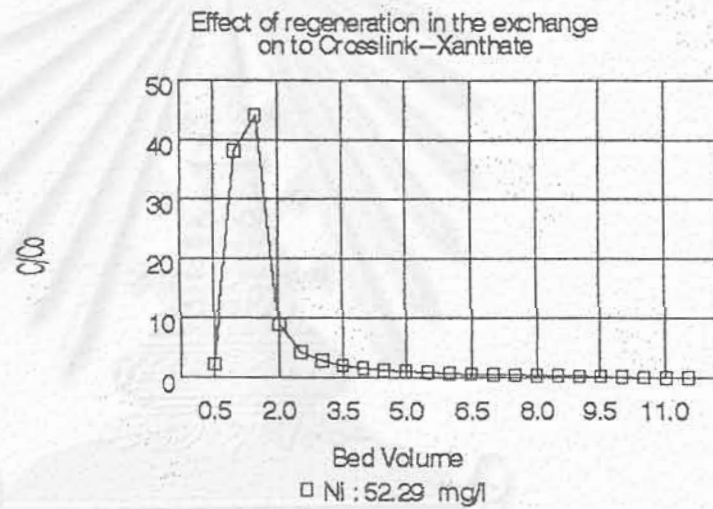
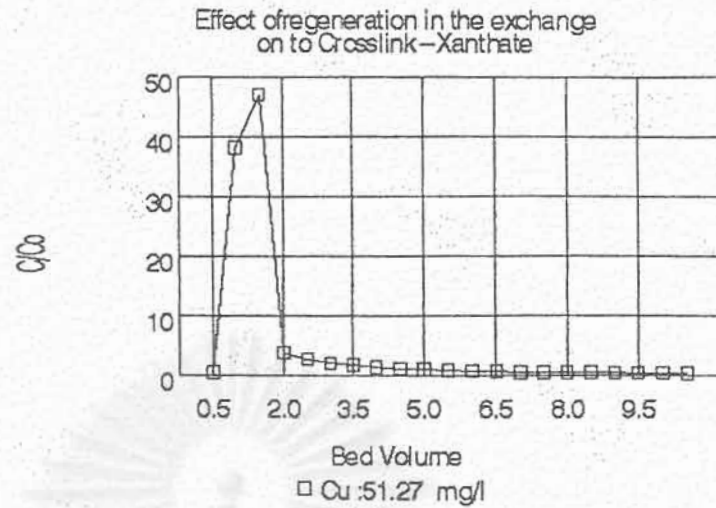
Effect of regeneration in the exchange on to Crosslink-Xanthate



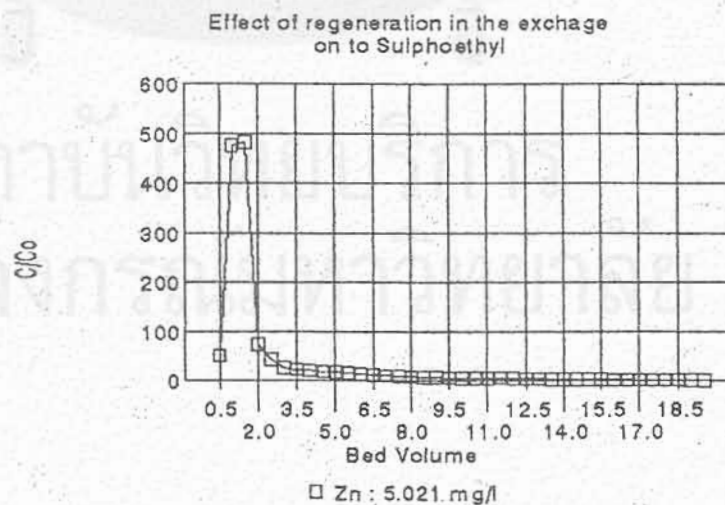
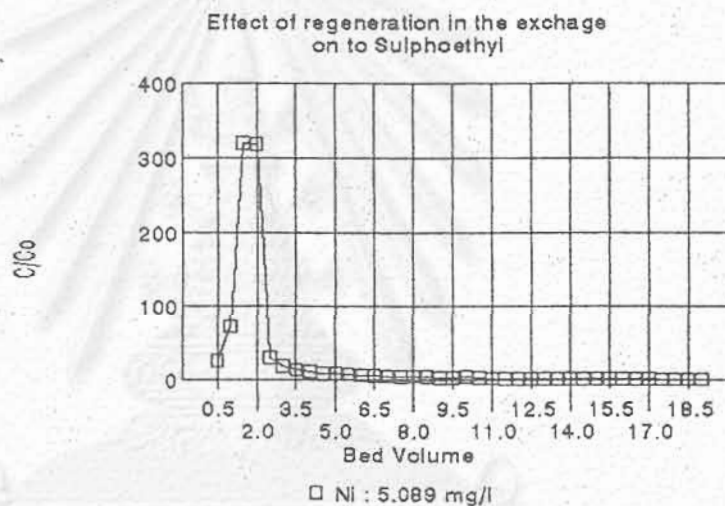
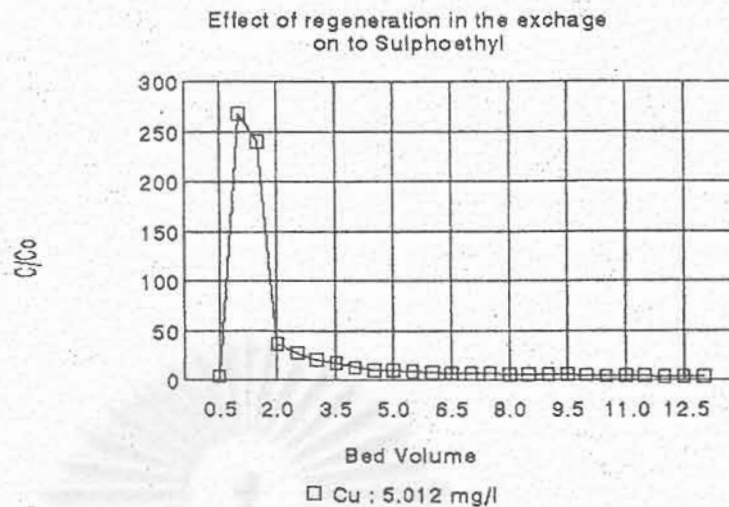
Effect of regeneration in the exchange on to Crosslink-Xanthate



รูปที่ 5.85 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้  
 สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดคอลลอยด์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา  
 เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร

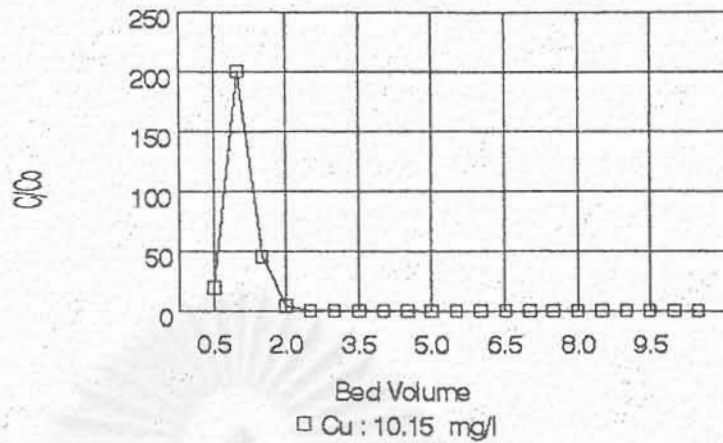


รูปที่ 5.86 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดคลอซลิงค์-แซนเทต (Crosslink-Xanthate) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร

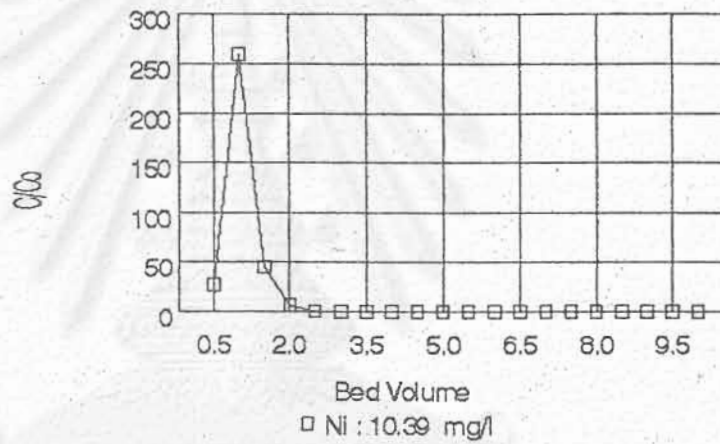


รูปที่ 5.87 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 5 มิลลิกรัม/ลิตร

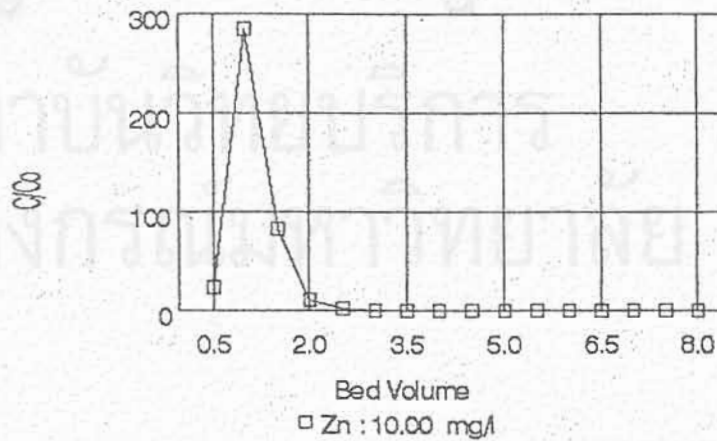
Effect of regeneration in the exchange on to Sulphoethyl



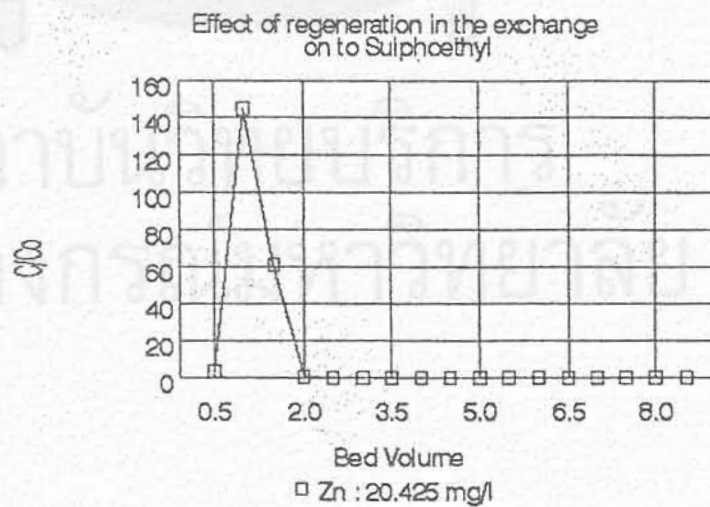
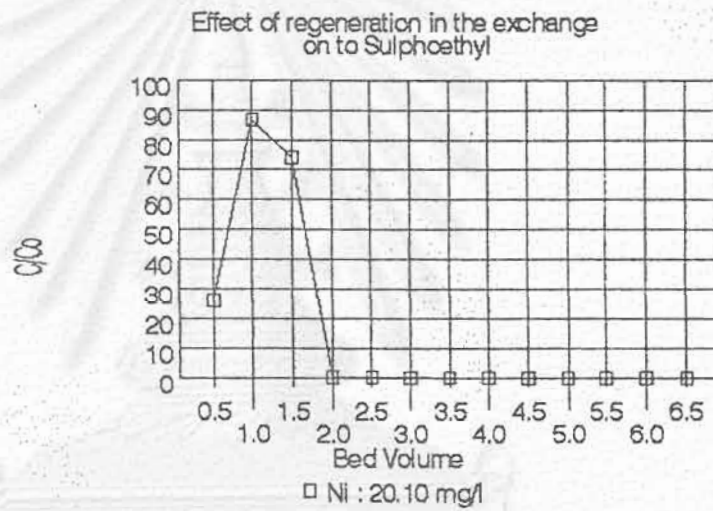
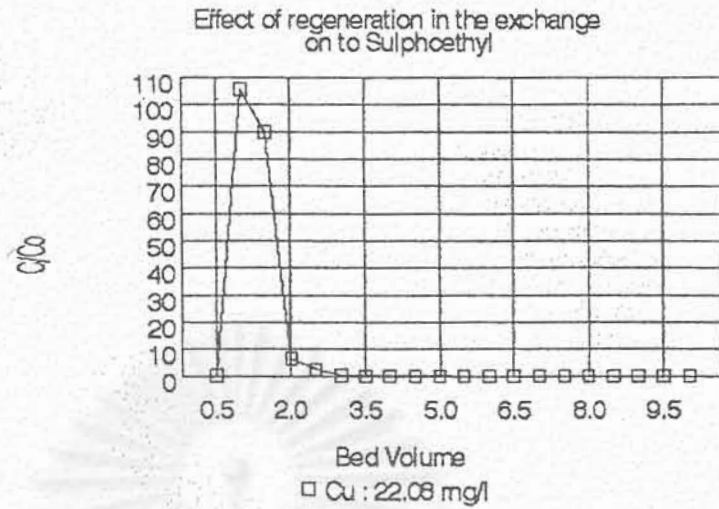
Effect of regeneration in the exchange on to Sulphoethyl



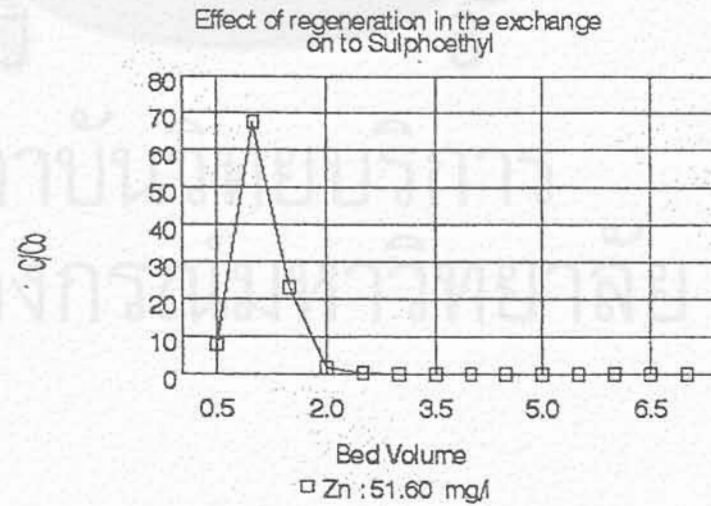
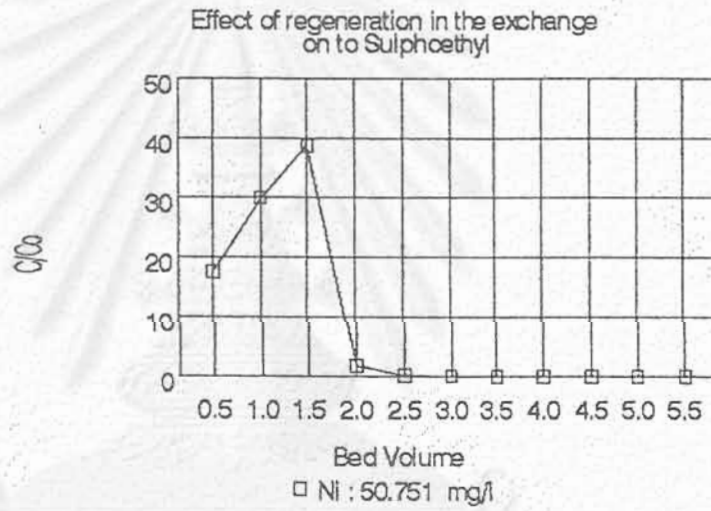
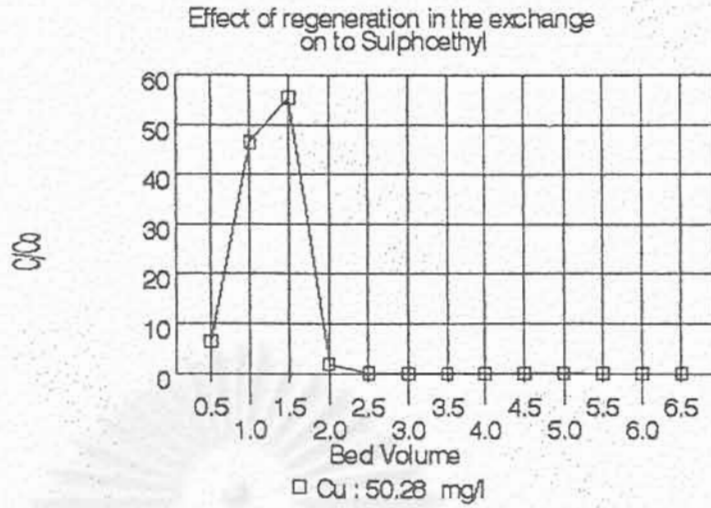
Effect of regeneration in the exchange on to Sulphoethyl



รูปที่ 5.88 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 10 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.89 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน - โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 20 มิลลิกรัม/ลิตร



รูปที่ 5.90 ระดับการรีเจนเนอเรชันของน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (Sulphoethyl) ที่ทำจากผักตบชวา เมื่อน้ำเสียมีปริมาณโลหะหนัก 50 มิลลิกรัม/ลิตร



## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้เป็นการทดลอง เพื่อศึกษาความสามารถและสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ผักตบชวาและขานอ้อย จากผลการทดลองสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

1. จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของผักตบชวาและขานอ้อย พบว่าผักตบชวา และขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีมีความหนาแน่นกว่าผักตบชวาและขานอ้อยที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทั้งความหนาแน่นและความหนาแน่นปรากฏ ส่วนเปอร์เซ็นต์ความชื้น (เรซินเปียก) จริงของผักตบชวาและขานอ้อยที่ปรับสภาพมีค่าต่ำกว่าที่ไม่ได้ปรับสภาพ

2. จากการศึกษาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า Untreated Water hyacinth มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุดมีค่าประมาณ 0.686-0.809 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม รองลงมา คือ Crosslink-Xanthate Water hyacinth มีค่าประมาณ 0.279-0.595 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม Sulphoethyl มีค่าประมาณ 0.233-0.503 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม และ Carboxymethyl Water hyacinth มีค่าประมาณ 0.33-0.496 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม ตามลำดับ ส่วนขานอ้อย พบว่า Untreated bagasse มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนประมาณ 0.065-0.086 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม และ Carboxymethyl-treated bagasse มีค่าประมาณ 0.052-0.069 มิลลิอิกิวาเลนท์/กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า ผักตบชวามีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าขานอ้อย ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปรับสภาพเซลล์ด้วยกระบวนการทางเคมีที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ ไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้น

3. Untreated Water-hyacinth, Untreated bagasse, Carboxymethyl-treated Water hyacinth และ Carboxymethyl-treated bagasse มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนเรียงจากมากไปหาน้อย คือ ทองแดง, สังกะสี และนิกเกิล โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสีประมาณ 2-5 เท่า สำหรับ Crosslink-xanthate และ Sulphoethyl Water-hyacinth พบว่ามีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนจากมากไปหาน้อย คือ สังกะสี, นิกเกิลและทองแดง โดยประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีมีค่าสูงกว่านิกเกิลและทองแดงประมาณ 1-2 เท่า และ 0.2-0.5 เท่าตามลำดับ

4. ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ด้วยผักตบชวาและขานอ้อย

4. ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ด้วยผักตบชวาและชานอ้อย แบบ Carboxymethyl และแบบที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสีย อยู่ในช่วง 3-4 ส่วนค่าพีเอชของน้ำทิ้งที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยผักตบชวาแบบ Crosslink-Xanthate และ Sulphoethyl พบว่าค่าพีเอชของน้ำทิ้งอยู่ในช่วง 5-9

5. ปริมาณสารรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้มีค่าประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน

6. วัสดุที่เหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดน้ำเสีย คือ ผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีและน้ำเสียที่ใช้ควรมีปริมาณโลหะหนักไม่เกิน 10 มิลลิกรัม/ลิตร ในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณ โลหะหนักเข้มข้นสูงควรที่จะบำบัดด้วยกระบวนการทางเคมีก่อนแล้วจึงนำมาผ่านด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา

## บทที่ 7

## ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยเพิ่มเติม

จากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ยังมีสิ่งที่น่าสนใจควรที่จะศึกษาเพิ่มเติม มีดังนี้

1. ศึกษาผลของอัตราเร็วการไหลของน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก
2. ศึกษาผลของกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผักตบชวา เช่น การใช้ฟอสเฟต, ฟอรัมาลดีไฮด์ เป็นต้น
3. ศึกษาถึงอายุการใช้งานที่เหมาะสมของสารแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากผักตบชวา
4. ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้วัสดุทางการเกษตรอื่น ๆ เปรียบเทียบกับผักตบชวา
5. ศึกษาผลของชั้นความสูงของสารแลกเปลี่ยนไอออน ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก
6. ศึกษาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดรวมด้วยกัน

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

## ภาษาไทย

- เกษร พะลัง. เคมีอินทรีย์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช, 2532
- มันสิน ตัดทูลเวศม์. วิศวกรรมกระดาษ เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532
- ปราณี สติรพิพัฒน์กุล. การผลิตอะซีโตน-บิวทานอล จากผักตบชวาที่ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532
- ปรีชา เกียรติกระจาย. การให้ประโยชน์จากขาน้อย. วารสารน้ำตาล, ฉบับที่ 5 ปีที่ 25, 2532 : 13-18
- บังอร นวลจันทร์. การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำตาล. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2533
- สนธิ กิตติกรณ์. รายชื่อพืชทั่วไป. เอกสารทางวิชาการ เล่มที่ 2 กองพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2523

## ภาษาอังกฤษ

- Adelina E. Manas. Utilization of Coconut Coir Dust for Removing Heavy Metal Ions from Solutions. Supervising Science Research Specialist, FPRDI, College, Laguna, 1988 : 19-36
- Bailey, J.E., and Ollis, D.F. Biochemical Engineering Fundamentals. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Book Co.Ltd., 1986
- Bhargave, D.S, Gupta, M.S., and Varshhney, B.S. Use of Sawdust for The Adsorption of Heavy Metals. Asian Environmental, 1985 : 29-37
- Dorfer, K. Ion Exchanger Properties and Application. 3<sup>th</sup> ed. Michigan : Ann Arbor Science Publisher Inc., 1977
- Helfferich, F. Ion Exchange. New York : McGraw-Hill Book Co.Ltd., 1962
- Krishnan, S.S., Canalla, A., and Jervis, R.E. Waste Water Treatment for Heavy Metal Toxins using Plant and Hair as Absorbents, The Science of the Total Environment, 68, 1988: 267-273
- Kumar, Pawan., and Dara, S.S Binding Heavy Metal Ions with Polymerized Onion Skin, Journal of Polymer Science, 1981 : 397-402

- Kunin, R. Ion Exchange Resin. New York : John Wiley Larry & Sons, Inc., 1963
- Larry, D.B., Joseph, F.J., and Barron, L.W. Process Chemistry for Water and Wastewater Treatment. New Jersey : Prentice-Hall, Inc., 1982
- Lee, C.K. and Low, K.S. Removal of Copper from Solution using Moss . Environmental Technology letters , 10 1989 : 395-404
- Low, K.S., Lee, C.K., and Lee K.P. Sorption of Copper by Dye-Treated Oil-pals Fibres, Bioresource Technology, 1993 : 109-112
- Macchi, G., Marani. D., and Tiravanti. G. Uptake of Mercury by Exhausted Coffee Grounds. Environmental Technology Letters, 7, 1986 : 431-444
- Maranon, E., and Sastre, H. Heavy Metal Removal in Packed Beds using Apple Wastes . Bioresource Technology , 30, 1991 : 39-43
- Nakajima , A., and Sakaguchi, T. Recovery and Removal of Uranium by using Plant Wastes . Biomass, 21,1990 : 55-63
- Odozi,T.O.,Okeke,S.,andLartey,R.B. Studies on Binding Metal Ions with Polymerized Corn Cob and a Composite Resin with Sawdust and Onion Skin . Agricultural Wastes , 12 1985 : 13-21
- Okieiman, F.E., and Onyenkpa, V.U. Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions with Melon Seed Husks, Biological Wastes, 1989 : 11-16
- Peska, J., Stambery, J., and Hradil, J. Chemical Transformation of Polymers.XIX. Ion Exchange Derivatives of Bead Cellulose. Dic Angewandte Makromolekulare Chemie, 53, 1976 : 73-80
- Peterson, E.A., and Sober, H.A. Chromatography of Proteins. I. Cellulose Ion Exchange. J. Amer. Chem.Soc., 78, 1956 : 751-755
- Shukla, S.R., and Sakhardande, V.D. Column Studies on Metal Ion Removal by Dyed Cellulose Materials, Journal of Applied Polymer Science, 44 , 1986 : 903-910
- Srivastava, H.C.P., Mathur, R.P., and Mehrotra, I. Removal of Chromium from Industrial Effluents by Adsorption on Sawdust. Environmental Technology Letter , 7 ,1986 : 55-63
- Tan, W.T., Ooi, S.T., and Lee, C.K. Removal of Chromium (VI) from Solution by Coconut Husk and Palm Pressed Fibres. Environmental Technology , 14, 1993 : 277-282
- Tan Wee Tee, Abol. Rahman Majid Khan. Removal of Lead Cadmium and Zinc by Waste Tea Leaves. Environmental Technology letter , 9, 1988 : 1223-1232

Thailand Institute of Scientific and Technological Research, TISTR. Recovery of Heavy Metals from Electroplating Wastes. Report Submitted to UNEP, 1982

Wing, R.E., Doane, W.M., and Russell, C.R., Insoluble Starch Xanthate :use in Heavy Metal Removal. Journal of Applied Polymer Science, 19, 1975 : 847-854



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ข้อมูลจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี  
ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-1 ผลการทดลองหา Dry moisture content ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	Untreated Water hyacinth	Carboxymethyl-treated Water hyacinth	Sulphoethyl-treated Water hyacinth	Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth	Untreated bagasse	Carboxymethyl-treated bagasse
(a). น้ำหนักก่อนอบ,(g)	5.0654	3.4320	1.0057	1.0032	2.5057	3.4789
(b). น้ำหนักหลังอบ,(g)	4.6335	3.1191	0.9273	0.9285	2.3713	3.1381
%moisture content	9.321	10.032	8.045	8.455	5.668	10.860
= $\frac{(a)-(b)}{(b)}$						



ตารางที่ ผ-2 ผลการทดลองหาความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก ผักตบชวาและ  
ชานอ้อย

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยน ไอออน	Untreated Water hyacinth	Carboxymethyl- treated Water hyacinth	Sulphoethyl- treated Water hyacinth	Crosslink-Xanthate- treated Water hyacinth	Untreated bagasse	Carboxymethyl- treated bagasse
(a). น้ำหนักเปียก,(g)	4.6335	3.1191	7.2066	7.5349	2.3713	3.1381
(b). ปริมาตรหลังทิ้งให้ ตกตะกอน,(ml)	14.7899	19.1882	21.98	23.707	14.3810	21.9929
ความหนาแน่นปรากฏ = น้ำหนักเปียก, g/ml ปริมาตร	0.227	0.274	0.328	0.318	0.240	0.367

ตารางที่ ผ-3 ผลการทดลองหาความหนาแน่นจริง (True density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยน  
ไอออนที่ทำจากผักตบชวาและขาน้อยแบบ Untreated และแบบ Carboxyethyl

	Flask			Calibration		
(a) Trial No.	1	2	3	4	5	6
(b) Temperature °C	25	30	35	40	45	50
(c) Flask+Water (g)	152.2468	152.0182	151.9872	151.8664	151.6170	151.4465

True density determination

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยน ไอออน	Untreated Water hyacinth	Untreated bagasse	Carboxymethyl- treated Water hyacinth	Carboxymethyl- treated bagasse
1. Temperature, °C	30.5	30.5	30.5	30.5
2. Flask+Water+Resin (g)	152.1044	151.7021	152.1809	152.3509
3. Dry Resin (g)	1.7935	1.4662	1.3872	1.3476
4. True density (g/ml) = (3)/(c+3-2)	0.9752	0.7660	1.0228	1.1752

ตารางที่ ผ-4 ผลการทดลองหาความหนาแน่นจริง (True density) ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและขานอ้อยแบบ Sulphoethyl และแบบ Crosslink-Xanthate

	Flask			Calibration		
(a) Trial No.	1	2	3	4	5	6
(b) Temperature °C	25	30	35	40	45	50
(c) Flask+Water (g)	152.6201	152.4275	152.3253	152.1070	151.7560	151.6785

True density determination

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	Sulphoethyl-treated Water hyacinth	Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth
1. Temperature, °C	30.5	30.5
2. Flask+Water+Resin (g)	153.0213	153.0228
3. Dry Resin (g)	1.5181	1.4959
4. True density (g/ml) = (3)/(c+3-2)	1.661	1.680

ตารางที่ ผ-5 ผลการทดลองหา %Void volume ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	Untreated Water hyacinth	Carboxymethyl-treated Water hyacinth	Sulphoethyl-treated Water hyacinth	Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth	Untreated bagasse	Carboxymethyl-treated bagasse
%Void volume						
(a) Apparent density (g/ml)	0.227	0.274	0.328	0.318	0.240	0.367
(b) True density (g/ml)	0.9752	1.0228	1.661	1.680	0.7660	1.1752
(c) %Void volume = $(1-a/b) * 100$	76.72	73.21	80.253	81.071	68.67	68.77

ตารางที่ ๘-6 ผลการทดลองหา %Moisture content/wet resin ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา และชานอ้อย

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	Untreated Water Hyacinth	Carboxymethyl Water Hyacinth	Sulphoethyl Water Hyacinth	Crosslink-Xanthate Water Hyacinth	Untreated Bagasse	Carboxymethyl Bagasse
%Moisture content						
(d) Wt. of paper, (g)	0.1991	0.1992	0.1986	0.1965	0.2010	0.1981
(e) Wt. of wet resin+ paper, (g)	14.9890	19.3874	7.7097	7.8778	14.5820	22.1910
(f) Wt. of dry resin+paper, (g)	3.2450	5.2354	3.1176	3.1685	2.7840	5.5860
(g) Wt. of wet resin, (g)	14.7899	19.1882	7.5111	7.6813	14.3810	21.9929
(h) Wt. of dry resin, (g)	3.0459	5.0362	2.919	2.972	2.5830	5.3879
(l) % Moisture content = $\frac{(g)-(h)}{(g)} * 100$	79.406	73.7537	61.138	61.309	82.0388	75.5016

ตารางที่ ๗-7 ผลการทดลองหา Swelling ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาและชานอ้อย

ชนิดสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน	Untreated Water hyacinth	Carboxymethyl-treated Water hyacinth	Sulphoethyl-treated Water hyacinth	Crosslink-Xanthate-treated Water hyacinth	Untreated bagasse	Carboxymethyl-treated bagasse
<u>Swelling</u>						
(j) Wt. of paper, (g)	0.1991	0.1992	0.1979	0.1978	0.2010	0.1981
(k) Wt. of dry resin+paper, (g)	3.2450	5.2354	6.3129	5.5878	2.7850	5.5860
(l) Wt. of dry resin, (g)	3.0459	5.0362	6.115	5.390	2.5830	5.3879
(m) Volume of resin, (ml)	65	70	65	65	60	60
(n) Swelling, (ml/dry. g)	21.3	23.2	10.8	12.2	13.9	11.2
= (m)/(l)						



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย