


การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน
ที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว



นางชัชฎาพร องอาจ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม

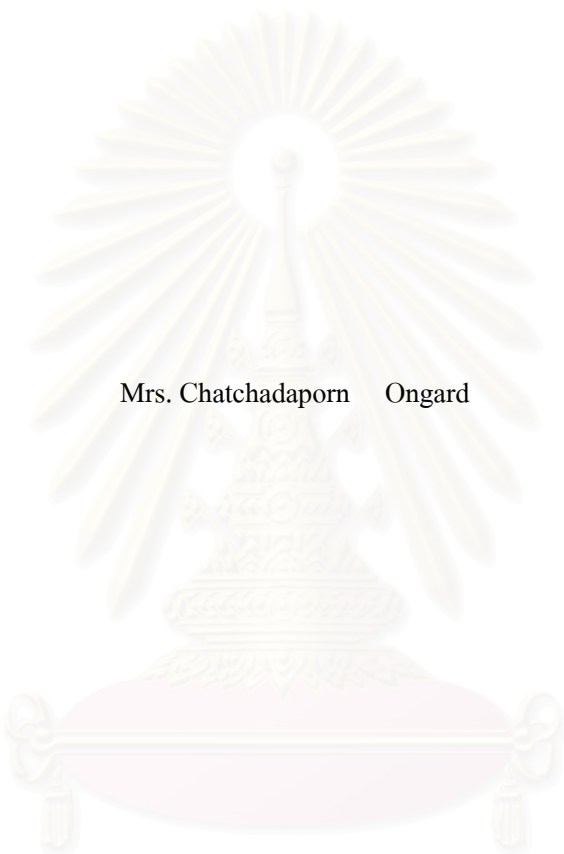
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1445-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON OF HEAVY METAL REMOVAL EFFICIENCY BY ION EXCHANGE RESIN
PREPARED FROM CASSAVA TREE, PINEAPPLE LEAF AND COCONUT HUSK.



Mrs. Chatchadaporn Ongard

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Inter-department of Environmental Science

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1445-9

ชัชฎาพร องอาจ : การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ไบสับปะรด และกาบมะพร้าว.
(COMPARISION OF HEAVY METAL REMOVAL EFFICIENCY BY ION EXCHANGE RESIN PREPARED FROM CASSAVA TREE , PINEAPPLE LEAF AND COCONUT HUSK.

อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, 145 หน้า

ISBN 974-17-1445-9

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ ต้นมันสำปะหลัง ไบสับปะรด และกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ความเข้มข้นของโลหะหนัก (นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี) ที่ทำการศึกษา ได้แก่ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองแบบที่ละเทการวิจัยพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยด้วย ฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพด้วย 1 นอร์มัล กรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลังและไบสับปะรด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสีเฉลี่ยเท่ากับ 67.72%, 22.55% และ 44.78% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง นอกจากนี้ผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 3.930, 4.034 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ากาบมะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพสามารถกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้เฉลี่ย 85.80, 65.13 และ 90.43 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ภาควิชา_สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพแคว้นลุ่ม ลายมือชื่อนิติ.....

สาขาวิชา_วิทยาศาสตร์สุขภาพแคว้นลุ่ม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา_2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4389122020 : MAJOR ENVIRONMENTAL

KEY WORD : HEAVY METAL REMOVAL / ION EXCHANGE RESIN / CASSAVA TREE / PINEAPPLE LEAF / COCONUT HUSK

CHATCHADAPORN ONGARD : COMPARISION OF HEAVY METAL REMOVAL EFFICIENCY BY ION EXCHANGE RESIN PREPARED FROM CASSAVA TREE, PINEAPPLE LEAF AND COCONUT HUSK

THESIS ADVISOR : Assoc. Prof. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 145 pp. ISBN 974-17-1445-9.

This research investigated the comparison of heavy metal removal efficiency by ion exchange resin prepared from cassava tree, pineapple leaf and coconut husk which was both untreated and treated with hydrochloric 1 N, formaldehyde 5% and formaldehyde 37% respectively. The concentration of heavy metals studies (copper, nickel and zinc) was varied at 5,10, 20 and 50 mg/l by using batch experiment. The efficiency of heavy metal removal in synthetic wastewater indicated that the highest efficiency was ion exchange resin made from untreated coconut husk, cassava tree and pineapple leaf, respectively. The highest efficiency was ion exchange resin prepared from untreated, treated with hydrochloric, treated with formaldehyde 5% and treated with formaldehyde 37% respectively. The result indicated that chemical treatment did not enhance the removal efficiency of heavy metal. The aforementioned ion exchange resin had average efficiency of copper, nickel and zinc of 67.72%, 22.55% and 44.78% respectively. Ion exchange resin had the highest efficiency at an initial concentration 5 mg./l. When the concentration of heavy metal in wastewater was increased, the efficiency of heavy metal was decreased. This research also investigated the efficiency of heavy metal removal from industrial wastewater. The initial concentration of copper, nickel and zinc was 3.930, 4.034 and 0.567 mg/l respectively. The result indicated that untreated coconut husk had the average efficiency of copper, nickel and zinc removal at 85.80%, 65.13% and 90.43% respectively.

Inter-department Environmental Science Student's signature.....

Field of study Environmental Science..... Advisor's signature.....

Academic year 2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยนี้ ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยควบคุมดูแลการทำงานตามขอบเขตอย่างเคร่งครัด ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงมาได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความเมตตาของอาจารย์มา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ โปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยาที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัย ตลอดจนเอื้อเฟื้อสถานที่ให้ทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทบวงมหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อทุนอุดหนุนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณบุคลากรทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกให้กับการวิจัยนี้ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีประโยชน์แก่ผู้วิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณทุกคนในครอบครัว ที่มอบกำลังใจ และความช่วยเหลือในทุกด้าน แก่ผู้วิจัยมาตลอด จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐาน.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร	
2.1 โลหะหนัก.....	4
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	6
2.3 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน.....	10
2.3.1 หน้าที่และกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	10
2.3.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	11
2.3.3 การแบ่งเรซินตามลักษณะการใช้งานตาม Functional group.....	13
2.3.4 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน.....	18
2.3.5 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน.....	18
2.3.6 ความชื้นของเรซิน.....	21
2.3.7 ความหนาแน่นของเรซิน.....	21
2.3.8 ขนาดเม็ดเรซิน.....	22
2.3.9 การบวมของเรซิน.....	22
2.3.10 อัตราการแลกเปลี่ยนไอออน.....	22
2.3.11 ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	23
2.3.12 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน.....	24
2.4 สารเซลล์ูโลสแลกเปลี่ยนไอออน.....	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 องค์ประกอบในเซลล์พืช.....	27
2.6 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้วิจัย.....	31
2.6.1 มะพร้าว.....	31
2.6.2 มันสำปะหลัง.....	35
2.6.3 สับปะรด.....	37
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 แผนการวิจัย.....	46
3.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย.....	46
3.1.2 ลำดับขั้นการวิจัย.....	47
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	48
3.2 การดำเนินการวิจัย	
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	49
3.2.2 การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	49
3.2.3 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	50
3.2.4 การหาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	51
3.2.5 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง.....	51
3.2.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	53
3.2.7 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	54
3.2.8 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดโลหะหนัก.....	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 การศึกษาองค์ประกอบของกาบมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด.....	55
4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	56
4.2.1 การศึกษาผลของชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดโลหะหนัก.....	56
4.2.2 การศึกษาผลของการปรับสภาพทางเคมีที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดโลหะหนัก.....	56
4.2.3 การศึกษาผลของชนิดโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก.....	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการกำจัด.....	57
4.2.5 การหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนัก.....	58
4.3 การศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	72
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง.....	72
4.5 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	76
4.5.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	76
4.5.2 พื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	76
4.5.3 ค่าความตึงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	81
4.5.4 การบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	81
4.5.5 ลักษณะ โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	82
4.6 การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย.....	83
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	84
บทที่ 6 ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง.....	88
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก. มาตรฐานปริมาณ โลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	92
ภาคผนวก ข. ภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการวิจัย.....	94
ภาคผนวก ค. ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	96
ภาคผนวก ง. ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง.....	115
ภาคผนวก จ. ผลการศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	119
ภาคผนวก ฉ. ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	121
ภาคผนวก ช. การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย.....	143
ประวัติผู้เขียน.....	145

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆ.....	14
ตารางที่ 2.2 ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารละลายน้ำ.....	19
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Crosslinking กับการเลือกจับไอออนของ Cation exchange resin.....	20
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers.....	26
ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของต้นมันสำปะหลัง ใบสับประรดและกาบมะพร้าว.....	38
ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของต้นมันสำปะหลัง ใบสับประรดและกาบมะพร้าว.....	55
ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	59
ตารางที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	60
ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	61
ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย จากโรงงานชุบโลหะ.....	72
ตารางที่ 4.6 เปอร์เซนต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง.....	73
ตารางที่ 4.7 ปริมาณ โลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง.....	73
ตารางที่ 4.8 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	80
ตารางที่ 4.9 ค่าความถ่วงจำเพาะ และการบวมตัวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	82
ตารางที่ ก.1 มาตรฐานปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	93
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์.....	97
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	100
ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์.....	103
ตารางที่ ค.4 ข้อมูลการหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์.....	106
ตารางที่ ค.5 ข้อมูลการหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์.....	109
ตารางที่ ค.6 ข้อมูลการหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์.....	112
ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียจริง.....	116
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียจริง.....	117
ตารางที่ ง.3 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง.....	118
ตารางที่ จ.1 แสดงความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน.....	120
ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะกาบมะพร้าว.....	122
ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะต้นมันสำปะหลัง.....	123

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ น.3 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะใบสับปะรด	124
ตารางที่ น.4 ข้อมูลการหาค่าการบวมน้ำกาบมะพร้าว	125
ตารางที่ น.5 ข้อมูลการหาค่าการบวมน้ำต้นมันสำปะหลัง.....	125
ตารางที่ น.6 ข้อมูลการหาค่าการบวมน้ำ ใบสับปะรด.....	126
ตารางที่ น.7 แสดงพื้นที่ผิวปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ของเรซินแลกเปลี่ยน	130



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะ โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	12
รูปที่ 2.2 การแลกเปลี่ยน Na^+ ของเรซินแบบกรดแก่กับไอออนบวกทุกตัวในน้ำ.....	15
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงองค์ประกอบในเซลล์พีซี.....	27
รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างของเซลลูโลส.....	28
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของไซแลน AC Acetyl Group.....	29
รูปที่ 2.6 หน่วยย่อยใน โครงสร้างของลิกนิน.....	30
รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของมะพร้าว.....	31
รูปที่ 3.1 แผนผังการแปรชนิดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ชนิดการปรับสภาพ ชนิดโลหะหนัก และความเข้มข้นของโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	52
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	62
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	64
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	65
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณนิกเกิลในน้ำเสียเคราะห์ที่ถูกกำจัด.....	66
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงปริมาณทองแดงในน้ำเสียเคราะห์ที่ถูกกำจัด.....	67
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณสังกะสีในน้ำเสียเคราะห์ที่ถูกกำจัด.....	68
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเข้มข้นนิกเกิลภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	69
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเข้มข้นทองแดงภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	70
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มข้นสังกะสีภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์.....	71
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง.....	74
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง.....	75
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว.....	77
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง.....	78
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากใบสับปะรด.....	79
รูปที่ ข.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว.....	95
รูปที่ ข.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง.....	95
รูปที่ ข.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากใบสับปะรด.....	95
รูปที่ ฉ.1 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว...127	

สารบัญรูป(ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ ฉ.2 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าว...128

รูปที่ ฉ.3 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าว...129



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันนี้ประเทศไทยของเราได้มีการพัฒนาทางภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมส่งออกทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะมีการขุดหิน และตัดผิวโลหะ ทำให้มีสารเคมีและไอออนของโลหะหนักปนเปื้อนออกมากับน้ำเสียที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยออกมาสู่แหล่งน้ำสาธารณะเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มนุษย์เราต้องเผชิญอยู่ทุกวันนี้ ซึ่งโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำเหล่านี้แม้ว่าบางชนิดจะเป็นแร่ธาตุปริมาณน้อยที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปก็อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ และยังสามารถที่จะถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารได้ ทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เพื่อเป็นการป้องกันและลดการเกิดปัญหาภาวะที่เกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการจัดการที่เหมาะสมในการควบคุมกิจกรรมของมนุษย์ที่เป็นต้นเหตุของโลหะหนักเหล่านั้น โดยเฉพาะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เป็นโลหะหนักที่ใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2525 ได้กำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมให้มีปริมาณโลหะทองแดงไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร (กองจัดการคุณภาพน้ำ, 2538) และสังกะสีไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการที่จะกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีโดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี กระบวนการทางชีววิทยา เช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนประจุ การระเหย การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า ค่อนข้างจะมีราคาสูง การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อใช้กำจัดโลหะหนักจึงนับเป็นทางเลือกหนึ่งในการทดแทนการใช้สารเคมีที่มีราคาสูงในการกำจัดโลหะหนักแบบเดิมและเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียลงได้ เนื่องจากเรซินที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นหาง่าย ราคาถูกและมีเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญและมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนคล้ายกับเรซินที่สังเคราะห์มาจากกระบวนการทางเคมี แต่จะมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) แต่โครงสร้างของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) การเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเซลลูโลสทำได้โดยการประสานพันธะทางเคมีในเซลลูโลสโดยใช้สารเคมีชนิดต่างๆ มาปรับสภาพของเซลลูโลสซึ่งจะได้สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนที่มีทั้งแบบกรดและแบบด่างขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว
2. ศึกษาความสามารถและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ทั้งชนิดที่ยังไม่ได้ปรับสภาพและชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารเคมี
3. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าวที่ยังไม่ได้ปรับสภาพและชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารเคมี

1.3 สมมุติฐาน

เรซินที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว สามารถนำมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นได้โดยการปรับสภาพด้วยสารเคมี

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ดังนี้

1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเล็กกว่า 80 เมช (0.177 มิลลิเมตร)
2. กระบวนการปรับสภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ ชนิดที่ยังไม่ได้ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล
3. ชนิดของโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้น 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ทำการวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer : AAS)
5. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะ โครงสร้างของวัสดุ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการที่เหมาะสมในการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย
2. ลดปริมาณขยะที่เกิดจากการทิ้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์
3. ผลการศึกษาที่ได้เป็นแนวทางที่จะประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียมปรอท สังกะสี เป็นต้น และมีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีคุณสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาวสะท้อนแสงได้ดี และเหนียวสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชัน (Oxidation number) ได้หลายค่า จึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food chain) เมื่อโลหะเหล่านี้แพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งจะสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และสิ่งมีชีวิตได้ และมีผลต่อเมตาบอลิซึมของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตซึ่งอาจทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้ (เกศสุชา, 2537)

โลหะหนักถูกใช้ประโยชน์อย่างมากในงานอุตสาหกรรมและยังเป็นต้นกำเนิดในการผลิตโลหะผสมอีกหลายชนิดด้วยกัน โลหะหนักแต่ละชนิดจะถูกปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกัน ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการผลิตของอุตสาหกรรมนั้นๆ โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งโลหะต่างๆ ออกตามคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. โลหะที่ให้คุณสมบัติประโยชน์แก่สิ่งมีชีวิต เช่น เหล็ก และทองแดง เป็นต้น
2. โลหะที่ไม่ก่อประโยชน์และโทษแก่สิ่งมีชีวิต เช่น อะลูมิเนียม
3. โลหะที่สะสมในสิ่งมีชีวิตและก่อให้เกิดโทษ เช่น ปรอท ตะกั่ว และสารหนู เป็นต้น
4. โลหะประเภทที่ก่อประโยชน์ถ้าสิ่งมีชีวิตได้รับเพียงเล็กน้อยแต่ให้โทษถ้าได้รับปริมาณ

ที่สูง

นิกเกิล (Nickel)

นิกเกิลเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.70 จุดเดือด 2,732 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,453 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.908

มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี สามารถนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ ได้เป็นโลหะอัลลอยด์

การใช้ประโยชน์

นิกเกิลจะถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิด ได้แก่ โรงงานชุบโลหะ ซึ่งจะทำได้โลหะที่ทนทานต่อการผุกร่อน ใช้ในการผลิตเหล็กไม่เป็นสนิมและโลหะผสมชนิดอื่นๆ นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ใช้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้โลหะนิกเกิลและแคดเมียม (Nickel cadmium battery) ใช้ผลิตตรงควัดดูในการผลิตสีที่มาจากกาเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล และที่สำคัญมากคือฝุ่นนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำนิกเกิลให้บริสุทธิ์และเป็นสารที่มีพิษร้ายแรงมากซึ่งจะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และใช้ผสมในน้ำมันเบนซินในงานชุบโลหะ

ความเป็นพิษ

จะเกิดเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง กลไกการออกฤทธิ์ คือ ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอด และหัวใจ อาการของผู้ได้รับพิษมีดังนี้ ปวดหัว มึนงง คลื่นไส้ และอาเจียน แน่นหน้าอก ไอแห้ง ถ้าหากมีอาการรุนแรงมากอาจมีเลือดออกในปอด

นอกจากนี้ยังพบว่านิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารชักนำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง คนงานที่ประกอบอาชีพเกี่ยวข้องกับการใช้นิกเกิลมีโอกาสเป็นมะเร็งในช่องจมูกและโพรงจมูกสูงกว่าคนปกติประมาณ 150 เท่า

ทองแดง (Copper)

ทองแดงเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 จุดเดือด 2,595 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.96 มีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 มีคุณสมบัติอ่อน ดัดง่าย นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน

การใช้ประโยชน์

ทองแดงจะถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมหลายชนิด ได้แก่ การนำไปทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร อุปกรณ์และเครื่องจักร และใช้ใน ส่วนประกอบของยาปราบศัตรูพืช ในงานทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใยและเซรามิก

ความเป็นพิษ

ทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมาก ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ คลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิต ถ้ามีความเข้มข้นของทองแดงในดินสูง จะเป็นพิษต่อพืช ไปทำลายปลายยอดของต้นไม้ไม่ให้งอกงามต่อไป

สังกะสี (Zinc)

สังกะสี เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ มีเลขอะตอม 30 น้ำหนักอะตอม 65.37 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 7.14 มีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี

การใช้ประโยชน์

สังกะสีจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ การนำสังกะสีมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมได้ง่าย แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่า นิยมใช้สารประกอบของสังกะสีในอุตสาหกรรมการทำสีย้อม และใช้ในการทำกาวและเรยอน ใช้ผสมกับทองแดงได้เป็นทองเหลือง

ความเป็นพิษ

สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดเป็นพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการผุกร่อนของเยื่อบุทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ซึ่อกและอาจถึงตายได้ (ขวัญเนตร, 2542)

2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมกันมานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกจากน้ำได้ ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธี

ด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธี คือ การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

2.2.1.1 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

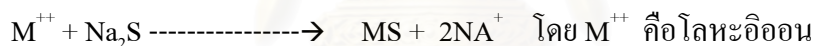
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกิดปฏิกิริยาดังสมการนี้



การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือจะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพีเอชกว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีกถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

2.2.1.2 การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ มักใช้สารเคมีในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการบำบัดเอาซัลไฟด์ออกไปก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคตไอออน เอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออน เอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีนี้จะเหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับน้ำเสียจากโรงงานชุบ

โลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.2.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไฮดรอน(II)ซัลเฟต โซเดียมเบตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ สารเคมีที่ใช้คือคลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ ตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชัน คือการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิลละลายปนอยู่ สารเคมีที่ใช้คือไฮดรอน(II)ซัลเฟต ไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบโครเมต ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 3 จึงต้องเติมกรดซัลฟูริกไปด้วย จากนั้นจึงเติมปูนไลม์ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง การควบคุมระบบบำบัดแบบนี้ ค่าพีเอชมีความสำคัญมากจะต้องปรับพีเอชให้ได้ค่าพอเหมาะปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ ถ้ามีการใช้ไฮโปคลอไรต์หรือปูนไลม์มากเกินไปค่าพีเอชจะเป็นค่าสูง ต้องใช้กรดปรับค่าพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้งไป การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่ต้องการกำจัดก่อนหรือหลังการบำบัด จะเป็นการช่วยให้ทราบถึงประสิทธิภาพของการบำบัดหรือปฏิกิริยาเคมีว่าเกิดขึ้นสมบูรณ์เพียงใด

2.2.4 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semi-permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกไปก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนวิธีนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ ส่วนระบบการบำบัดที่คล้ายกับรีเวิร์สออสโมซิสคือระบบอูลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) โดยมีข้อแตกต่างกันคือระบบรีเวิร์สออสโมซิส จะใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่แรงดันสูง ส่วนอูลตราฟิลเตรชันใช้แยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่แรงดันต่ำ

2.2.5 การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยนํ้าออกนี้เป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีนี้จะได้ผลดีกับนํ้าเสียที่มีปริมาณโลหะหนักมากเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.2.6 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นกระบวนการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดตัวทำละลาย และนํ้าเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนที่เกิดขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนการบำบัดสูงแต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

2.2.7 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.2.8 การดูดซับผิว (Adsorption)

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลพิษสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล และสารดูดซับผิวที่มักใช้ในกระบวนการบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 Å ถึง 20,000 Å กระบวนการนี้สามารถนำกลับมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ผงคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น จนเหลือถึงระดับที่ยอมรับได้ในนํ้าดื่ม

หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆ ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมดังต่อไปนี้ คือ ลักษณะของนํ้าเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของนํ้าทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัดนํ้าเสียทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนํ้าเสีย และการตรวจสอบคุณภาพ ความยากง่ายและความปลอดภัยในการเดินระบบ ความเป็นไปได้ในการนำของเสียหรือกากของเสียที่ต้องกำจัดกลับมาใช้ใหม่

2.3 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน(อนุโมลที่มีประจุ) เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางของเหลวและตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง

2.3.1 หน้าที่และกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

หน้าที่และกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มี 2 ประการ ซึ่งเกิดต่อเนื่องกันคือ

1. การกำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำได้ด้วยแต่ทั้งนี้ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก แบริยม แคดเมียม โคบอลต์ ทองแดง ทอง ตะกั่ว เซเลเนียม เงิน แวนาเดียม และสังกะสี
2. ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมาที่สารละลายรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาณของสารละลายรีเจนเนอเรนต์ต่ำกว่าปริมาณสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออนความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงกว่ามากซึ่งเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายๆ เท่า

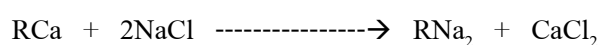
การแลกเปลี่ยนไอออนได้รับการประยุกต์ให้ใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การแก้ความกระด้างของน้ำ (Softener) การทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralizer) การกำจัดสารอินทรีย์ (Organic removal)

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับ Softener อาจเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



เมื่อ R คือตัวกลางของแข็งซึ่งเดิมอยู่ในรูปของโซเดียม (Na^+) เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนตัวกลาง ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ คือ Ca^{2+} ในปริมาณที่สมมูลกัน

สำหรับตัวกลางของแข็งที่อยู่ในรูปของแคลเซียม เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือแกงซึ่งมี Na^+ อยู่เป็นจำนวนมากจึงจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาเป็นตัวกลางที่อยู่ในรูปของโซเดียมอีกทำให้สามารถนำกลับไปใช้กำจัดความกระด้างใหม่ได้อีก เขียนสมการเคมีใหม่ได้ดังนี้



โดยสารละลายเกลือแกงจะต้องมีความเข้มข้นในปริมาณมากเพื่อให้สมดุลย์ของปฏิกิริยากลับทิศทาง

2.3.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงร่างคล้ายตาข่ายสามมิติ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ โครงร่างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่าย เรียกว่า Functional group หมู่ไอออนนี้ส่วนหนึ่งเกาะติดอยู่กับ โครงร่างและไม่เคลื่อนที่ อีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ได้และเป็นส่วนที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในน้ำ โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏและคงรูปอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำและไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติ (รูปที่ 2.1) ที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งใสของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ถ้าปริมาณของตัวประสานมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของตัวประสานน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินกับ โครงร่างของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange capacity) และกำหนดลักษณะอื่นๆ ของเรซินด้วย เช่นความชื้นในเรซิน เป็นต้น กล่าวคือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มี Degree of crosslinkage สูงเกินไปจะมีความพรุนต่ำ ทำให้ความชื้นอยู่ในเรซินน้อยซึ่งจะแตกหักง่าย เรซินที่มี Degree of crosslinkage ต่ำเกินไปจะมีความพรุนมากทำให้มอมน้ำได้มากแต่สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวต่ำ

หมู่ไอออน (Functional group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่นความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงร่าง Matrix มีประจุลบประจำตัว Functional group จะมีประจุบวกเรียกว่าเป็น Cation exchanger คือเป็นสารแลกเปลี่ยนประจุบวก ถ้าโครงร่าง Matrix มีประจุบวก ประจำตัว Functional group จะมีประจุลบ เรียกว่าเป็น Anion exchanger คือเป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ

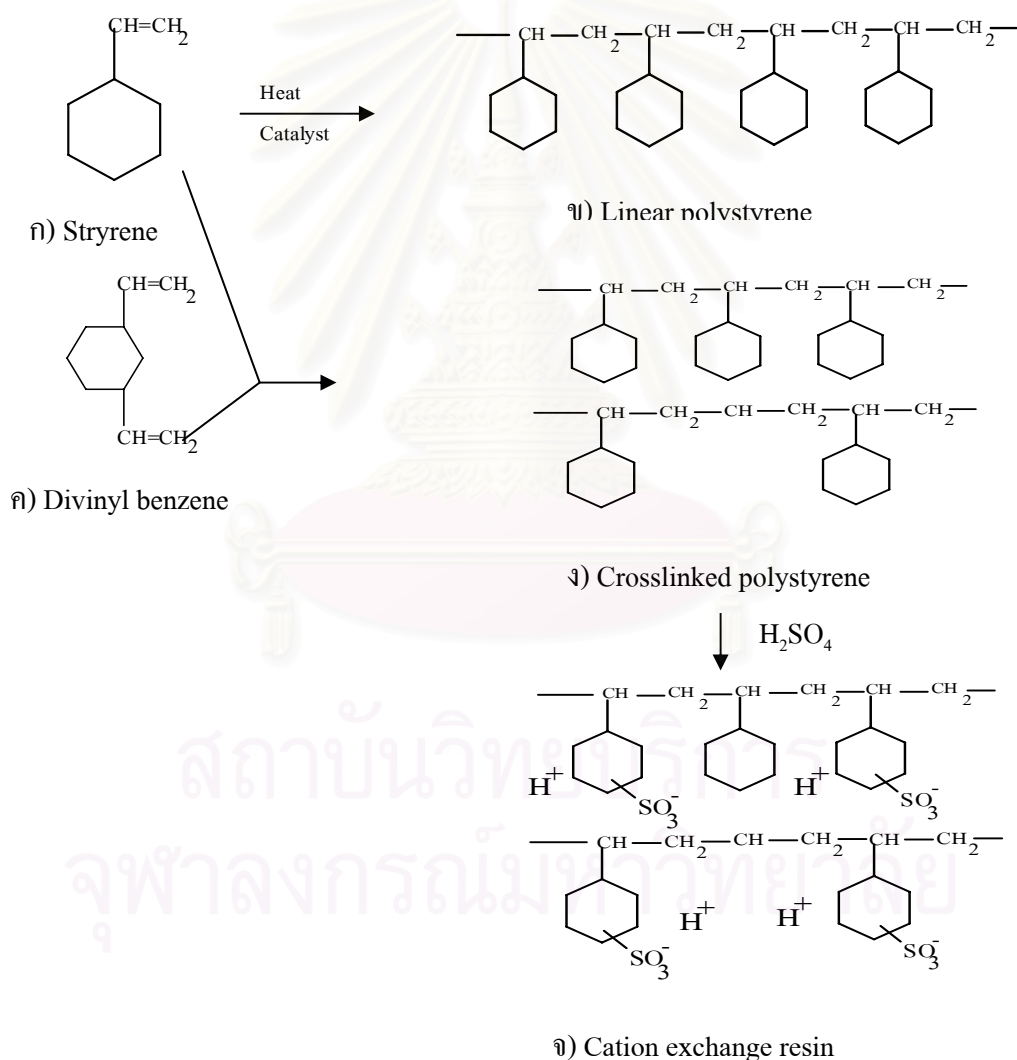
เรซินสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสารพวก Polystyrene ที่รวมตัวอยู่กับ Divinylbenzene โดย Functional group ของ Cation exchanger เป็นพวก Sulphonic , Carboxylic หรือ Phosphonic ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion exchanger) จะเป็นพวกที่มี Functional group เป็นพวก Quarternary ammonium , Primary amine หรือ Secondary amine

โครงร่างของเรซิน (Matrix) อาจแบ่งลักษณะทางฟิสิกส์ได้ 3 ลักษณะ คือ

1. Gel type มีลักษณะนี้คล้ายวุ้นสามารถบรรจุ Functional group ได้มาก แต่รูพรุนมีขนาดเล็กและถี่มาก เป็นพวก Membrane ข้อเสียคือเกิดการอุดตันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าเป็น Strong anion exchanger

2. Macroporous type มีความพรุนมากกว่า คือมีพื้นที่ผิวมากถึง 100 ตารางเมตรต่อกรัม ทำให้ไม่ค่อยอุดตัน เป็นพวก Polystyrene Divinylbenzene แขนโครงร่างมี DVB 8-12% โดยถ้า %DVB น้อย การพองตัวขาดตัวจะมาก การวิ่งเข้าออกของไอออนผ่านเรซินจะดี แต่ความแข็งแรงมีน้อย

3. Opaque gel เป็นโครงร่างที่แข็งแรงแต่สามารถบรรจุ Functional group และขัดหัดได้มากพอสมควร



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

(ภาพ ก.) ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิดคือ Styrene

(ภาพ ข.) เมื่อหลายโมเลกุลมาต่อกันจะเป็นโพลีเมอร์

(ภาพ ค.) เป็นสายยาวการต่อกันเป็นสามมิติเกิดขึ้นได้เมื่อมีตัวประสานคือ Divinylbenzene

(ภาพ ง.) ทำให้ได้โครงร่างของเรซิน ซึ่งยังไม่มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน

(ภาพ จ.) การเติมหมู่ไอออน เช่น SO_3H (ซัลโฟนิก) ทำให้ได้เรซินที่มีอำนาจอย่างสมบูรณ์ (มันลิน, 2535)

2.3.3 การแบ่งเรซินตามลักษณะการใช้งานตาม Functional group

คุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะขึ้นอยู่กับหมู่ไอออนของเรซิน สามารถแบ่งได้เป็น Acidity และ Basicity นอกจากนี้ยังแบ่งย่อยได้เป็น เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger) เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger) เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ไอออน ของเรซินประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.1

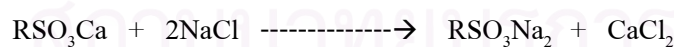
1. เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger)

เรซินแบบกรดแก่คือ พวกที่มี Functional group เป็นพวกกรดแก่ เช่น Sulphonic acid หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่จะใช้ไอออนบวกของตัวเอง (H^+ , Na^+) แลกกับไอออนที่ต้องการจะกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น H^+ หรือ Na^+ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ หมู่ไอออนของเรซิน โดยเรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิก ($-\text{SO}_3$) เป็นหมู่ไอออนซึ่งจับติดอยู่กับโครงไฮโดรคาร์บอน หมู่ซัลโฟนิกนี้จะอยู่ในรูปของ H^+ หรือ Na^+ ก็ได้ (SO_3H^+ , $-\text{SO}_3^-$) $-\text{SO}_3^-$ จะเป็นส่วนที่ไม่ใช้ในการแลกเปลี่ยนแต่มี H^+ หรือ Na^+ ที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ (รูปที่ 2.2)

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี H^+ หรือ Na^+ เป็นดังนี้ คือ



เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะจับไอออนบวกของ Cation ได้ทั้งหมด เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้โดยการทำรีเจนเนอเรชั่น เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วย NaCl



ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ H^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่ (H^+)



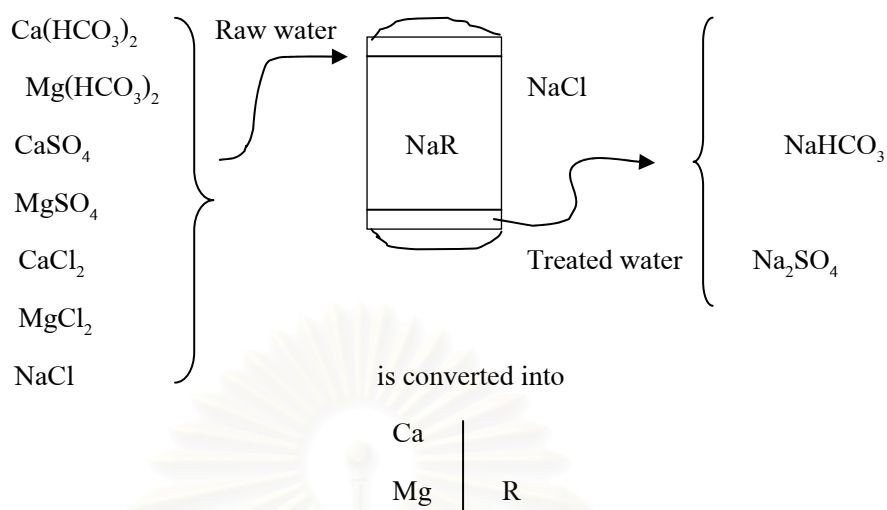
เรซินแบบกรดแก่มีข้อดี คือ

1. ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. สามารถแยก Na^+ จากเกลือแคงได้
3. การรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เกิดขึ้นน้อย
4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็ว
5. มีความคงทน ใช้งานได้นาน โดยมีการสูญเสียอำนาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

6. การเปลี่ยนรูปของ Na^+ ในเรซินเป็น H^+ ทำให้ปริมาณเพิ่มขึ้นเพียง 7 %
7. เหมาะสำหรับการกำจัดความกระด้างหรือในการทำน้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Deminerization)

ตารางที่ 2.1 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆ (มันสิน, 2529)

Dissociation			
Classification	Active Groups	Constant pK_a	Typical Configuration
<u>Cation Exchange Resin</u>			
Strong acid :	Sulfonic	1	
	Methylene Sulfonic	1	
Weak acid :	Carboxylic	4-6	
	Phosphonic	2-3 7-8	
	Phenolic hydroxyl	9-10	
<u>Anion Exchange Resin</u>			
Strong base :	Quarternary ammonium (type I)	13	
	(type II)		
Weak base :	Primary amine	6-9	
	Secondary amine	7-9	
	Tertiary amine		
	(aromatic matrix)	9-11	
	(aliphatic matrix)		



รูปที่ 2.2 การแลกเปลี่ยน Na⁺ ของเรซินแบบกรดแก่กับไอออนบวกทุกตัวในน้ำ (มันสิน, 2529)

เรซินแบบกรดแก่มีข้อเสีย คือ

1. มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตต่ำประมาณ 25-45 % ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรต
2. ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ทำให้เรซินเกิดการบวมและมีความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะเรซินที่มีระดับของการประสาน โครงร่างต่ำ

2. เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger)

เรซินแบบกรดอ่อนคือพวกที่มี Functional group เป็นพวกกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะคริลิก เรซินชนิดนี้แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดทำให้ไม่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนให้กับเกลือที่ได้จากกรดแก่ เช่น NaCl, CaSO₄

การใช้งานของเรซินแบบกรดอ่อน มีข้อจำกัด คือ เมื่อพื้กำลังเรซินด้วยกรดเกลือ เรซินชนิดนี้สามารถจับไอออนประจุบวกที่มีวาเลนซ์ 1 ขึ้นไป ที่จับคู่ (Associate) กับพวกต่างเท่านั้น ดังนั้นจำนวน Cation ที่ถูกขจัดออก (Ca²⁺, Mg²⁺) จะเท่ากับความกระด้างลบจากค่าความเป็นด่าง สำหรับกรณีที่มีความกระด้างทั้งหมดมากกว่าความเป็นด่างทั้งหมด ซึ่งจัดว่าเป็นสภาพน้ำที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเรซินชนิดนี้

ในกรณีที่อัตราส่วนของ Hardness: Alkalinity มากกว่า 1 แสดงว่าต้องมี Permanent Hardness ทำให้เรซินชนิดนี้เริ่มจะไม่ค่อยเหมาะกับการขจัดไอออนเพราะความสามารถในการจับประจุจะลดลง แต่ Cation leakage เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่ค่อยเหมาะเมื่อเทียบกับเรซินแบบกรดแก่

เรซินแบบกรดอ่อนมีข้อดี คือ

1. ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันสูงถึง 90 % โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูป H^+ เพราะเรซินมีความชอบ (Affinity) H^+ สูง
2. จืดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า
3. เรซินทนต่อสารออกซิแดนท์ เช่น คลอรีน ได้ดี
4. เรซินในรูป H^+ สามารถกำจัดความเป็นด่างออกจากน้ำได้โดยไม่ต้องเติมกรด
5. เรซินสามารถใช้รีเจนเนอเรนต์จากการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดแก่ได้
6. มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมรั่วหนีได้มาก

เรซินแบบกรดอ่อนมีข้อเสีย คือ

1. เรซินใช้ได้ภายใต้สภาวะจำกัด เช่น ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชสูง
2. เรซินไม่มีความสามารถในการแยกเกลือ (Salt Splitting)
3. การเปลี่ยนรูป H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า
4. เรซินมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้าและขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำดิบ
5. เรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดลไฮซิสกับน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดการรั่วของไอออนที่ต้องการกำจัดออก

3. เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger)

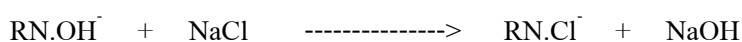
เรซินแบบด่างแก่มีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Quaternary Amine และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนด่างแก่ น้ำที่ของเรซินแบบด่างแก่ คือ ใช้ไอออนลบของเรซินแลกเปลี่ยนกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออกเช่น HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , และ SiO_2

เรซินแบบด่างแก่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Type I มีความเป็นด่างและความคงทนสูง มีความสามารถในการจับ Silica ได้ดี
2. Type II มีจืดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และประสิทธิภาพในการทำ

รีเจนเนอเรชันสูง

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนและรีเจนเนอเรชันเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้ดังนี้ คือ



สารรีเจนเนอเรนต์ อาจใช้โซเดียมคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

เรซินแบบด่างแก่ มีข้อดี คือ

1. ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. สามารถแยก Na^+ จากเกลือแกงได้

3. สามารถแลกเปลี่ยน ไอออนได้รวดเร็ว

เรซินแบบกรดแก่มีข้อเสีย คือ

1. มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรตต่ำเพียง 18-33 % ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรต
2. มีความคงทนต่ำ ทำให้อายุการใช้งานสั้น
3. ในกรณีที่มีน้ำเสียมีกรดชีวมิคจากการเน่าเปื่อยของพืช สามารถทำให้เรซินเสียและไม่สามารถทำรีเจนเนอเรชันได้
4. เรซินเปลี่ยนเป็นด่างอ่อนได้ง่าย ทำให้สูญเสียขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

4. เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger)

เรซินแบบด่างอ่อนมีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Primary , Secondary หรือ Tertiary Amino และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- หรือไม่มีก็ได้ การกำจัดไอออนลบของเรซินนี้จะแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภทเนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น CO_2 , SiO_2 เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน

เนื่องจาก เรซินแบบด่างอ่อนไม่จำเป็นต้องมีไอออนอิสระก็ได้ ดังนั้นกลไกการทำงานของเรซินจะเป็นลักษณะ Absorption ไม่ใช่ลักษณะการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปเรซินแบบด่างอ่อนมักใช้ในการกำจัด Cl^- และ SO_4^{2-}

ข้อดีของเรซินแบบด่างอ่อน คือ

1. มีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงเกือบ 100 %
2. ทนต่อกรดชีวมิค มีประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสูง
3. สารรีเจนเนอเรนต์อาจใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

ข้อเสียของเรซินแบบด่างอ่อน คือ

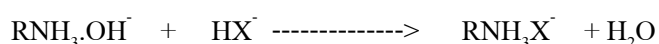
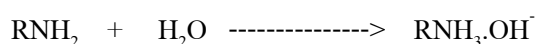
1. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้า
2. ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชต่ำเท่านั้น

ปฏิกิริยาในการจับโมเลกุลของกรดแก่เป็นดังนี้



เมื่อ คือ X^- ไอออนอิสระประจุลบ

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นดังนี้



เมื่อ คือ X^- ไอออนอิสระประจุลบ

2.3.4 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรดและด่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่าเรซินที่จะชอบทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้นๆ ในสารละลาย นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน (Degree of cross linking) ชนิดของ Functional group และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน

1. เรซินสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีวาเลนซ์สูง ได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออน (ตารางที่ 2.2)
2. สำหรับไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน ไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงกว่าสามารถ แลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้ดีกว่าไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมต่ำ เช่น $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$ หรือ $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$
3. เรซินมี Degree of crosslinking สูงความสามารถในการเลือกจับไอออนจะมีมากกว่าเรซินที่มี Degree of crosslinking ต่ำ ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of crosslinking กับการเลือกจับไอออน (ตารางที่ 2.3)


2.3.5 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ต้องมีไอออนอิสระ ที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนในน้ำได้
2. ต้องไม่ละลายน้ำ

ต้องมีช่องว่างภายในโครงไฮโดรคาร์บอนอย่างพอเพียง เพื่อให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่ผ่านเข้าออกได้อย่างสะดวก

ตารางที่ 2.2 ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารละลายน้ำ 1,000 mg/l
(มันสิน, 2529)

ไอออนบวก	ไอออนลบ	ลำดับความชอบ
Fe ³⁺	CrO ₄ ²⁻	<p>มากที่สุด</p>  <p>น้อยที่สุด</p>
Al ³⁺ Ba ²⁺	SO ₄ ²⁻	
Pb ²⁺	SO ₃ ²⁻	
Ba ²⁺	HPO ₄ ²⁻	
Sr ²⁺	CNS ⁻	
Cd ²⁺	CNO ⁻	
Zn ²⁺	NO ₃ ⁻	
Cu ²⁺	NO ₂ ⁻	
Fe ²⁺	Br ⁻	
Mn ²⁺	Cl ⁻	
Ca ²⁺	CN ⁻	
Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	
K ⁺	HSiO ₃ ⁻	
NH ₄ ⁺	OH ⁻	
Ba ⁺	F ⁻	
H ⁺		
Li ⁺		
K ⁺		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Crosslinking กับการเลือกจับไอออนของ Cation exchange resin (Larry, 1982)

ION	% Divinylbenzene		
	4	8	12
	Monovalent Cations		
H	1.0	1.0	1.0
Li	0.9	0.85	0.81
Na	1.3	1.5	1.7
NH ₄	1.6	1.95	2.3
K	1.75	2.5	3.05
Rb	1.90	2.6	3.1
Cs	2.0	2.7	3.2
Cu	3.2	5.3	9.5
Ag	6.0	7.6	12.0
	Divalent Cations		
Mn	2.2	2.35	2.5
Mg	2.4	2.5	2.6
Fe	2.4	2.55	2.7
Zn	2.6	2.7	2.8
Co	2.65	2.8	2.9
Cu	2.7	2.9	3.1
Cd	2.8	2.95	3.3
Ni	2.85	3.0	3.1
Ca	3.4	3.9	4.6
Sr	3.85	4.95	6.25
Hg	5.1	7.2	9.7
Pb	5.4	7.5	10.1
Ba	6.15	8.7	11.6

2.3.6 ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และจะมีความชื้นต่ำถ้ามีช่องว่างน้อย ความสามารถในการเก็บกักน้ำจะแสดงให้เห็นได้จากการบวมน้ำหรือการพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างของเรซินเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากทำให้ไอออนต่างที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับ Degree of Crosslinking ของโครงไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่น ช่องว่างภายในจะมีมาก จึงเก็บกักน้ำได้มากทำให้เรซินมีความชื้นภายในสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ในทางตรงกันข้ามเรซินที่มีแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างภายในเรซินเหลือน้อย การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้า-ออก ได้สะดวกและยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ ในการตรวจสอบระดับการประสานโครงร่าง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน ความชื้นของเรซินมีหน่วยแสดงดังนี้

- % moisture/weight of wet resin
- % moisture/weight of dry resin
- $\frac{\text{weight or mole number of water}}{\text{equivalent of exchange capacity}}$

2.3.7 ความหนาแน่นของเรซิน

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ความหนาแน่นที่ใช้กันทั่วไป คือ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent หรือ Column density) เป็นความหนาแน่นที่วัดหลังจากผ่านการล้างย้อนปล่อยให้จมตัวตกตะกอนและทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว และหมายถึงน้ำหนักเรซินหารด้วยปริมาตรทั้งหมดของเรซิน ซึ่งรวมความพรุนที่เกิดจากการซ้อนกันของเรซิน ความหนาแน่นปรากฏนี้เรียกว่า Bulk Density หรือ Shipping Weight พารามิเตอร์ที่มีความหมายคล้ายกับความหนาแน่นคือ ความถ่วงจำเพาะ โดยปกติเรซินจะมีความถ่วงจำเพาะ ประมาณ 1.3 ซึ่งต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของทรายกรองซึ่งจะประมาณ 2.65 มาก ทั้งนี้เพราะภายในเม็ดเรซินมีน้ำอยู่ประมาณ 40-50 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเกี่ยวกับการคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของเรซิน จะต้องใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet Absolute Density หรือ True Density) โดยใช้ขวด Pyknometer และความหนาแน่นประเภทสุดท้ายคือความหนาแน่นแห้ง (Dry Density)

2.3.8 ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

คุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของเรซินอันได้แก่ การสูญเสียเสกในขณะแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซินในขณะล้างย้อนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดเม็ดเรซิน เม็ดเรซินมีขนาดประมาณ 0.04-1.00 มิลลิเมตร และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) เรซินในขณะแห้งและเปียก ปริมาตรจะไม่เท่ากันเนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากัน เกิดจากการพองตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ความชื้น, Degree of Crosslinking , Functional Group

2.3.9 การบวมของเรซิน (Swelling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้นได้ การบวมของเรซินเกิดจากการไฮเดชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ยึดติดกับโครงร่างและไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมซิส (Osmotic Pressure) การไฮเดชันของไอออนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยไอออนที่มีขนาดเล็กเมื่อแห้ง จะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดไฮเดชัน ถ้าเรซินบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่เมื่อแห้งขณะเกิดไฮเดชันก็จะเกิดการบวมสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจางเรซินจะพยายามบวมตัวเพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัวเพื่อให้สมดุลกับภายนอก ในทางกลับกันเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่า เช่นในขณะการทำรีเจนเนอเรชัน แต่การบวมของเรซิน จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการประสาน โครงร่าง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และชนิดของสารละลาย

2.3.10 อัตราการแลกเปลี่ยนไอออน (Rate of Ion Exchange)

อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ขนาดเม็ดเรซิน อัตราการแพร่กระจายผ่านเม็ดเรซิน และชั้นน้ำรอบเม็ดเรซิน ชนิดและขนาดของไอออนที่จะแลกเปลี่ยน การกวน (Stirring) ความเข้มข้นของสารละลายรอบเม็ดเรซิน ระดับการประสาน โครงร่าง พีเอชและอุณหภูมิของระบบ ความเป็นกรดและด่างของเรซิน และขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในขณะนั้น แต่พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ควบคุมอัตราแลกเปลี่ยนไอออนคือ อัตราการแพร่กระจายผ่านเม็ดเรซิน และชั้นน้ำรอบเม็ดเรซิน ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังเช่นในกรณีของเรซินแบบกรดแก่ที่กำจัดความกระด้าง อัตราไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ในเรซินบางชนิดที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ เป็นผลทำให้ต้องใช้อัตราการไหลต่ำ เพื่อให้มีเวลาพอเพียงสำหรับทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน อีกประการหนึ่งที่ไม่ใช้อัตราการไหลสูงมาก ก็เพื่อไม่ให้มี Heat loss สูงเกินไป

2.3.11 จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Capacity)

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออนหรือคัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ทั้งนี้เพราะพารามิเตอร์นี้มีบทบาทอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพ และราคาของระบบ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินหมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแยกมาจากน้ำ (มักมีหน่วยสมมูล หรือ วัตในหน่วยกิโลกรัมของหินปูนต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตรของเรซิน หน่วยแสดงจิตความสามารถของเรซินจึงอาจเป็นได้หลายแบบ ดังนี้

- ก. หน่วยสมมูลต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/ml , eq/l
- ข. หน่วยสมมูลต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g , eq/g
- ค. หน่วยน้ำหนักในทอมหินปูนต่อปริมาตรของเรซิน เช่น กิโลกรัมต่อลิตร หรือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ฟุต

จิตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งออกเป็นจิตความสามารถสูงสุด (Ultimate or total capacity) และจิตความสามารถในการใช้งาน (Operating or breakthrough capacity)

จิตความสามารถสูงสุด หมายถึง ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนประจุโดยพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดของส่วนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนประจุ ในโครงสร้างตาข่ายโมเลกุลของเรซิน โดยการนำเรซินมาพ่นกำลังด้วยสารเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปไอออนที่มีประจุก่อนแล้วแยกเอาไอออนที่มีประจุออกมาจากเรซิน แล้วนำไปหาปริมาณด้วยการวิเคราะห์ปริมาณทางเคมี ปริมาณไอออนทั้งหมดที่สามารถแลกเปลี่ยน โดยเรซินมีค่าเท่ากับจำนวนหมู่ไอออนที่มีประจุบวกให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนด้วยกรด แล้วแยกเอาไฮโดรเจนออกมาโดยใช้สารละลายเกลือแกง โดยเก็บรวบรวมไฮโดรเจนไอออนที่แยกออกมาจากทุกส่วนให้หมดแล้วนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออน ด้วยการใส่สารละลายมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน ค่า Capacity ส่วนมากมักเรียกเป็น มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัมเรซิน หมายถึงจำนวนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เป็น มิลลิกรัมสมมูลของสารเรซินในสภาพแห้ง 1 กรัม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะแปรผันตามปริมาณ Crosslinkage เรซินมักสามารถแสดงอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนได้น้อยกว่าค่าสูงสุด เนื่องจากสถานะแวดล้อมในการใช้งานมักไม่อำนวยให้

จิตความสามารถในการใช้งาน หมายถึง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ประโยชน์จริงและเกิดจริงในการใช้งาน โดยบรรจุเรซินไว้ในคอลัมน์ แล้วทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนกระทั่งถึงจุดยุติที่กำหนด หรือเมื่อเริ่มปรากฏไอออนที่ไม่ต้องการในน้ำออกมา ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนี้แปรผันตามอัตราการไหล ความสูงของชั้นเรซิน ขนาดของเม็ดเรซิน ระดับรีเจนเนอเรชัน อุณหภูมิ ความเข้มข้น และชนิดของไอออนในน้ำที่ต้องการ

กำจัดออก และลักษณะที่ต้องการของน้ำออก จึงความสามารถนี้ใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานและสภาพของเรซิน

ในระบบที่ต้องการทำน้ำหรือสารละลายให้บริสุทธิ์ จะแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงขีดความสามารถ (Breakthrough) เท่านั้น แต่ระบบที่นำไอออนกลับมาใช้ใหม่ (Recovery) จะแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงขีดความสามารถสูงสุด

2.3.12 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งการทำงานได้ 3 วิธี คือ

1. การทำงานแบบทีละเท (Batch Operation)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด น้ำเสียจะถูกควบคุมผสมกับเรซินในถังปฏิกรณ์ จากนั้นการทำงานแยกเรซินออกโดยการกรองหรือตกตะกอน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ ค่าคงที่สมดุลย์ (Equilibrium constant) ของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

2. การทำงานแบบคอลัมน์ (Column Operation)

วิธีการนี้จะใช้ในการศึกษาชั้นห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และสภาวะที่เหมาะสม ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงอยู่ในช่วง 1:10 1:20

3. การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)

เป็นการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุในถัง และปล่อยน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่อง ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อใช้งานไปนานๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ (Exhausted Resin) ต้องทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรดหรือด่างขึ้นอยู่กับ ชนิดของเรซินที่ใช้

2.4 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (Cellulose Ion Exchanger)

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำโดยการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเซลลูโลสผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย ไฮดรอกซีเซลลูโลส และหมู่คาร์บอกซิล 15 % มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลสจะเป็นไฮโดรฟิลิก แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก เนื่องจากเซลลูโลสมี

คุณสมบัติเป็นไฟเบอร์การยึดเกาะกันของโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนโครงร่างตาข่ายซึ่งมีระยะประมาณ 50 Å

ดังนั้น ไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินแบบสังเคราะห์ได้ จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

จากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมาเกาะอยู่ การจับยึดตำแหน่งที่แน่นอนทำได้ยาก แต่จากการศึกษาทางเคมีของเซลลูโลสพบว่าคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 และ 6 เป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุด สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดประมาณ 15-20 ไมโครเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างของเซลลูโลส และองค์ประกอบอื่นๆ แต่จะไม่มีผลต่อสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน การปรับปรุงลักษณะของโครงสร้าง และหมู่ฟังก์ชันในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น

การเก็บสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำโดยการแช่ในสารละลาย NaH_2PO_4 เข้มข้น 0.5 โมลาร์ และแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 1 นอร์มัล ซึ่งจะสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง (พีเอชต่ำกว่า 4)

ในการทำรีเจนเนอเรชันจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 นอร์มัลหรือบัฟเฟอร์กรดหรือสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง $0.25 - 1 \text{ meq/g dry weight}$

ในการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ปฏิกิริยามักประกอบด้วยเปลี่ยน Alkali cellulose ด้วยสารประกอบคลอรีน ข้อเสียของปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการละลายและการแพร่กระจายของวัสดุ ถึงแม้ว่าจะมีการทำให้ตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะนิ่มคล้ายวุ้น (Gel like Product) ซึ่งจะมีความต้านทานการไหลของสารละลายสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดการพองน้ำของเรซิน สามารถทำได้โดยการ Crosslinking ของในสายของเซลลูโลส ด้วย di-(2-ethylamine) Sulfate, 1,4-butanedisulfate, 1,3 dichoro-2- propanol, divinyl sulfone และ formaldehyde ก่อนการเติมหมู่ไฮดรอกซิล dichoroacetic acid เป็น Crosslinking agent ที่เป็นตัวบอก exchange group

Serva^o Cellulose ion exchanger เป็นสารเซลลูโลสชนิดแรกที่ผลิตขึ้นในเชิงอุตสาหกรรม และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ประกอบด้วยสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดและแบบต่างคุณสมบัติที่สำคัญของ Serva^o Cellulose ion exchanger แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของ Serva Cellulose ion exchangers (Dorfner, 1977)

(CE = Cation exchanger , AE = Anion exchanger)

Name	Ion exchanging group	Properties	Capacity (meq/g)	Prevailing particle size(๓)
CM-Cellulose	$-\text{OCH}_2\text{COOH}$	CE, Weak Acid	0.62๓0.1	50-200
P-Cellulose	$-\text{OPO}_3\text{H}_2$	CE, Medium Acid	0.8-0.9	50-200
SE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$	CE, Strong Acid	0.2-0.3	50-200
DEAE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	AE, Strong Base	0.4-0.5	50-200
TEAE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_5\text{N}^+\text{Br}^-$	AE, Medium Base	0.55-0.75	50-200
PAB-Cellulose	$-\text{OCH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$	AE, Weak Base	0.15-0.2	50-200
AE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{NH}_2$	AE, Weak Base	0.33๓0.1	50-200
BD-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	AE, Medium Base	0.8๓0.05	50-200
CMGE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{NHC}=\text{NH}_2^+\text{CL}^-$	CE, Strong Base	0.2-0.3	50-200
BND-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	CE, Medium Base	0.8๓0.5	50-200

2.5 องค์ประกอบในเซลล์พืช

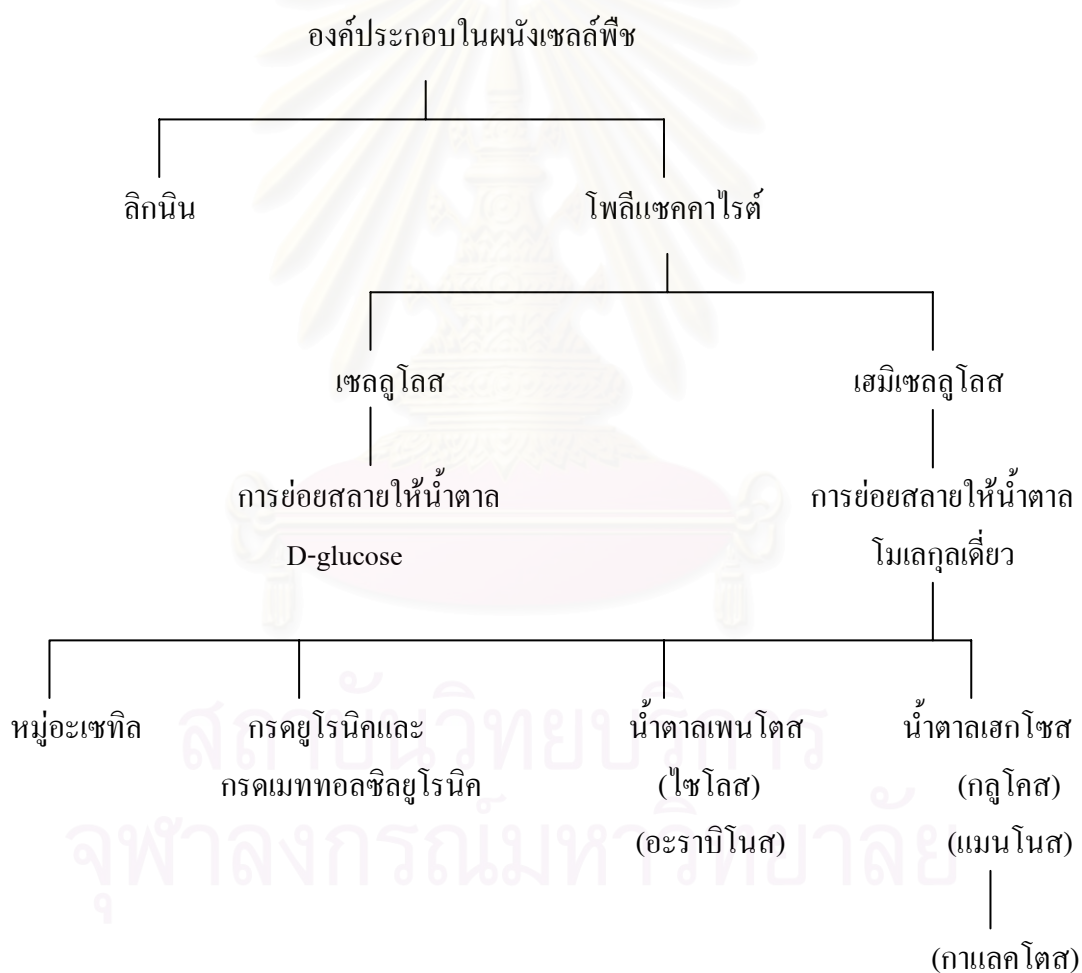
องค์ประกอบสำคัญส่วนใหญ่ในเซลล์พืชแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. ลิกนิน
2. โพลีแซคคาไรด์

โพลีแซคคาไรด์ สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

- เซลลูโลส
- เฮมิเซลลูโลส

แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงองค์ประกอบในเซลล์พืช (ปราณี, 2532)

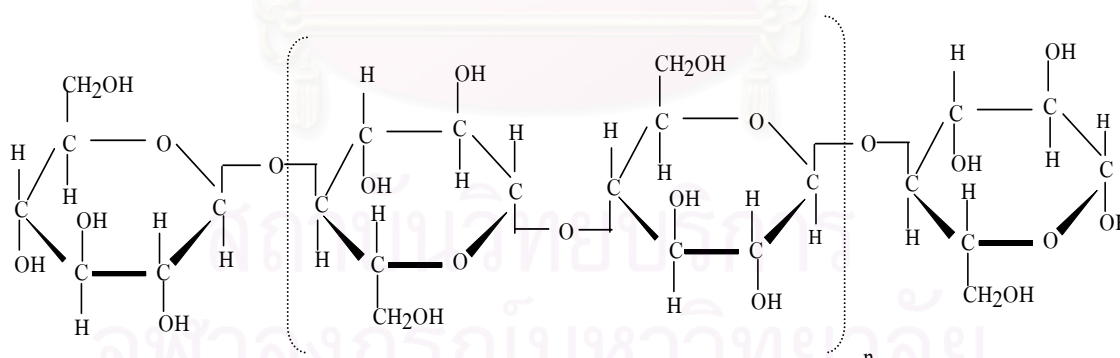
2.5.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์เป็นสารที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช เช่น เนื้อไม้จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 50 % นอกจากนั้นยังเกิดในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์

โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β -glucoside และความยาวของโซ่จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 300-2500 หน่วย ซึ่งถ้าไฮโดรไลต์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลล์ไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลต์เต็มที่จะได้ D-glucose

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรด หรือด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดและด่างได้เป็น 3 ชนิด

1. แอลฟา-เซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5%
2. เบต้า-เซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5%
3. แกมมา-เซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% และสามารถละลายได้ดีในกรดเจือจาง



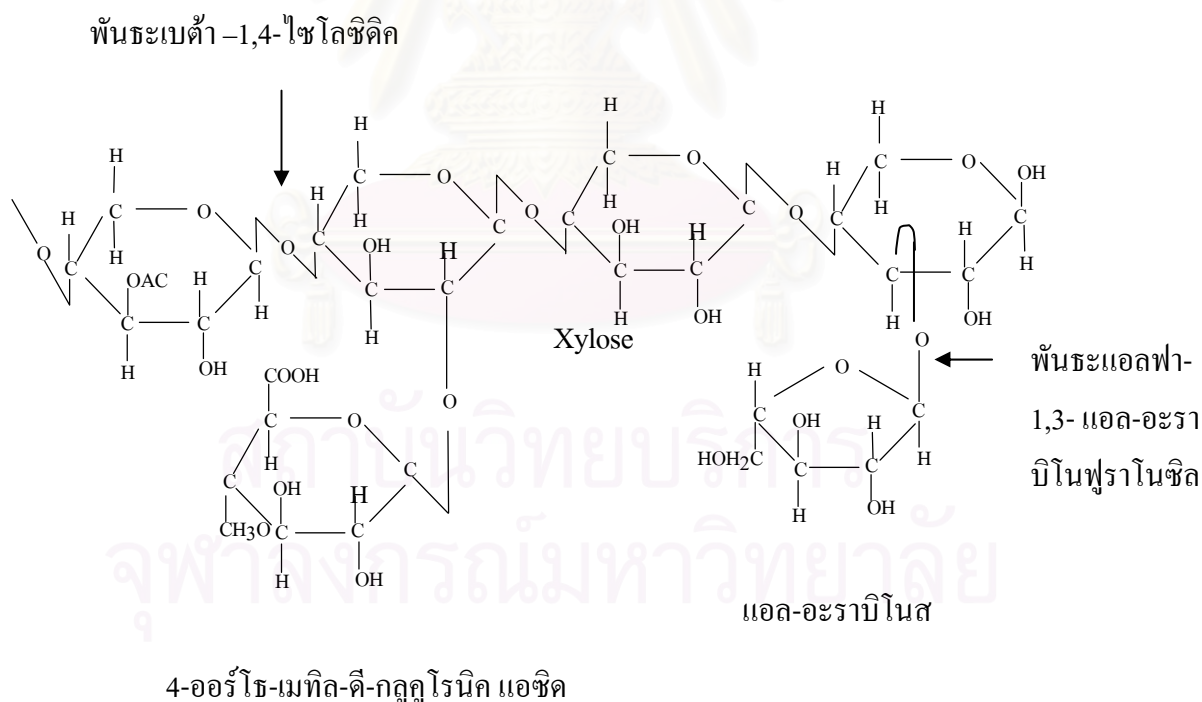
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส (Brown, 1997)

2.5.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ที่มีลักษณะเป็น Heterogenous โดยประกอบด้วยโพลิแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นตรง น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลักคือ Xylan นอกจากนี้ก็ยังมี Glucan, Mannan, Galactan เฮมิเซลลูโลสเมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลเพนโตสและเฮกโซส ได้แก่ ไซโลส แมนโนส กาแลคโตส และอะราบิโนส

สำหรับ Xylan ที่เป็นองค์ประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลดีไซโลสที่ต่อกันด้วยพันธะเบตา 1,4 ไซโลซิดิก (1,4 Xylosidic linkage) อาจเป็นเส้นตรง เฉพาะไซโลสอย่างเดียว หรือมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลิแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ปนอยู่ เช่น (L-arabinofuranose) เชื่อมต่อกับ ดี-ไซโลสที่มีตำแหน่ง 0-3 และ ดี-กลูคูโรนิกแอซิด (0-3 -D-glucuronic acid) หรือ 4-0 และ เมทิล-กลูคูโรนิกแอซิด (4-0-methyl - glucuronic acid) ซึ่งต่อกับดีไซโลสที่มีตำแหน่ง 0-2 ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เฮมิเซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำแต่จะละลายในด่างและถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของไซแลน AC Acetyl Group (ปราณี, 2532)

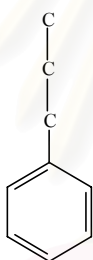
2.5.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogenous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่รอบๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

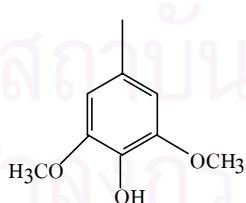
ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ Methyl group (OCH_3), หมู่ Hydroxyl group ($-\text{OH}$) และส่วนที่เป็น Phenolic โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้ คือ

- ฟีนิล โพรเพน (Phenyl Propane)
- ก้าวอะซีล ยูนิค (Guaiacyl Unit)
- ไชรินกิล ยูนิค (Syringyl Unit)
- พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิค (Para-Hydroxyphenyl Unit)

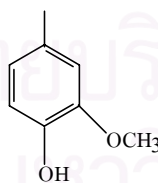
ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน แสดงในรูปที่ 2.6



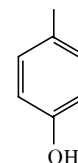
แบบฟีนิล โพรเพน (phenyl propane type)



พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิค



ไชรินกิล ยูนิค



ก้าวอะซีล ยูนิค

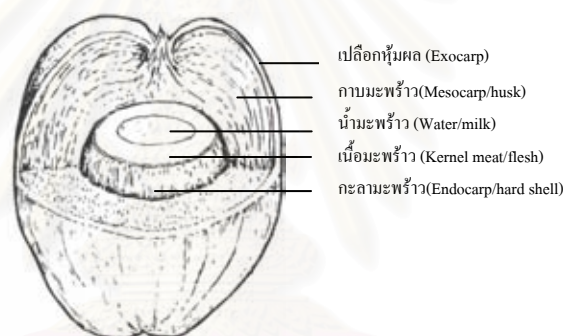
รูปที่ 2.6 หน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน (ปราณี, 2532)

2.6 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่วิจัย

2.6.1 มะพร้าว

มะพร้าวเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลปาล์มชนิดหนึ่ง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Cocos nucifera Linn.* มีแหล่งกำเนิดอยู่บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในแถบบริเวณตั้งแต่แหลมมลายูไปจนถึงนิวกีนิ ในประเทศไทยนิยมปลูกมะพร้าวกันทุกภาค โดยเฉพาะในภาคใต้มีพื้นที่ปลูกมะพร้าวมากกว่าทุกภาค คิดเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่ปลูกมะพร้าวทั่วประเทศ

ซึ่งผลมะพร้าวที่แก่จัดเรานำเนื้อมะพร้าวไปใช้ประโยชน์แล้วก็จะเหลือส่วนไม่ได้ใช้ประโยชน์ที่ทิ้งมากมาย โดยส่วนประกอบของมะพร้าวแสดงดังรูปที่ 2.7 และกาบมะพร้าวก็เป็นวัสดุเหลือทิ้งเช่นเดียวกัน นอกจากจะนำมาใช้ประโยชน์ในการทำเป็นวัสดุในการปลูกต้นไม้ทางการเกษตร ทำปุ๋ยโดยผสมกับดิน เอาเส้นใยไปทำฟูกหรือที่นอนแล้ว ก็ยังมีการวิจัยในการนำกาบมะพร้าวมาใช้ประโยชน์อย่างคุ้มค่า



รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบผลมะพร้าว

ประโยชน์ของมะพร้าว ในบรรดาพืชเศรษฐกิจเมืองร้อนทั้งหลาย มะพร้าวนับเป็นพืชอเนกประสงค์ที่มีประโยชน์มากที่สุด เพราะแทบทุกส่วนของต้นมะพร้าวมีประโยชน์ทั้งสิ้น ตั้งแต่รากจนถึงยอด ดังนี้

1. ราก มีรสฝาด หวาน ใช้เป็นยาสมุนไพร ขับปัสสาวะและแก้ท้องเสีย นอกจากนั้นยังใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเครื่องใช้ในบ้าน เช่น ตะกร้า กระจาด ถาด เป็นต้น

2. ลำต้น ต้นมะพร้าวเมื่อแก่แล้ว ช่วงโคนต้น 4-5 เมตร สามารถแปรรูปเป็นไม้กระดานและไม้เครื่องในการสร้างบ้านได้สวยงาม ที่เมืองแซมโบแองกา ประเทศฟิลิปปินส์ ได้สร้างบ้านสาธิตด้วยมะพร้าวทั้งหลัง นับตั้งแต่ หลังคา ฝา เสา พื้น รวมทั้งเครื่องเรือนด้วย ส่วนลำต้นมะพร้าวที่เหนือ 6 เมตร ขึ้นไป จะมีลักษณะเป็นไม้เนื้ออ่อน นำไปทำเครื่องใช้ต่างๆ ได้ เช่น ถ้วย ชาม ถาด เป็นต้น ส่วนที่เหลือก็ยังนำไปเผาเป็นถ่านใช้หุงต้มได้อีกด้วย

3. ทางมะพร้าว (ส่วนลำก้านที่มีก้านและใบแยกออกจากลำก้านทั้งสองข้าง) ชาวบ้านตามชนบทมักนำไปใช้เป็นรั้วกั้นบริเวณบ้านหรือที่ดินของตน หรือนำทางมะพร้าวมาผ่าครึ่งแล้วถักใบมะพร้าวให้เป็นแผงใช้มุงหลังคาหรือแผงกันลม ใช้ทำซุ้มเพื่อให้ต้นไม้เกาะเลื้อย นำมาทำเป็นพื้ในการประกอบอาหารและเกี่ยวน้ำตาลมะพร้าว หรือในชนบทเล็กๆ จะนำมาเล่นเป็นรถลาก โดยคนนั่งจะนั่งตอน โคน มือจับทางมะพร้าวไว้ คนลากจะลากตอนปลาย เร็วช้าตามกำลัง เป็นของเล่นสนุกสนานจากธรรมชาติอย่างหนึ่ง

4. ก้านมะพร้าว (หรือแกนใบ หรือส่วนที่เป็นกระดูกกลางใบ) นำไปทำไม้กวาด ทำก้านดอกไม้ประดิษฐ์ ร้อยดอกกรัก ดอกมะลิ ทำไม้กัณฑ์ไว้ห่อขนม สานขัดทำเสวียนหม้อ ทำตะกร้ารูปแบบต่างๆ ซึ่งมีการพัฒนารูปแบบจนสวยงามน่าใช้ ผลิตภัณฑ์เป็นที่นิยมถึงขั้นทำเป็นอุตสาหกรรมในครัวเรือน

5. ใบมะพร้าว ใช้ห่อขนมจาก (แทนใบจาก) ใช้ทำเตี๋ยห่อขนม (ขนมใส่ไส้ ขนมกล้วย) สานเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทหมวก กระดาษใส่ผลไม้สดแทนชะลอม สานเป็นรูปต่างๆ สำหรับเป็นของเล่นตกแต่ง (เช่น ปลาตะเพียน นก ตะกร้อ) ในชนบทใช้มุงหลังคาบ้าน ทำรั้วบ้าน ใช้บังแดดให้ต้นกล้า

6. รกมะพร้าว (เยื่อหุ้มคอมะพร้าว ผิวรกมะพร้าวค่อนข้างหยาบแต่ก็มีความงามที่แปลกไปจากวัสดุอื่นๆ จึงนำมาทำงานหัตถกรรมบางอย่างได้สวยงาม เช่น กล่องใส่กระดาษเช็ดปาก ที่ใส่ของจดหมาย ถังขยะแห้ง หมวกสุภาพสตรี

7. จั่น (หรือวง หรือช่อดอก) ขณะที่ช่อดอกมะพร้าวใกล้จะบานชาวสวนจะค่อยๆ นวดและใช้เชือกมัดจั่นให้ห้อยลงมา ฉีกเปลือกหุ้มจั่นมัดปลายจั่นให้รวบเข้าหากัน เลื่อนปลายจั่น นำกระป๋องหรือกระบอกไม้ไผ่รมควันผูกเชือกห้อยรองน้ำตาลสด เหมาะสำหรับดื่มแทนเครื่องดื่มแต่เนื่องจากน้ำตาลสดมีรสหวาน ย่อยต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย ชาวสวนจึงป้องกันน้ำตาลสดบูดโดยการใส่เปลือกไม้รั้ว (จำพวกไม้เคี่ยมซึ่งเป็นไม้ขนาดใหญ่ มีมากในภาคใต้) หรือไม้พะยอม (เป็นไม้ขนาดใหญ่ ดอกสีขาว มีกลิ่นหอม) ลงในกระบอกเล็กน้อย สารที่อยู่ในเปลือกไม้จะยับยั้งกระบวนการหมักไม่ให้เกิดขึ้น ถ้านำน้ำตาลสดไปเคี่ยวก็จะได้น้ำตาลปีบ น้ำตาลปึก เมื่อกรองน้ำตาลสดใส่ขวด ตั้งตากแดด 7-10 วันจะได้น้ำตาลส้มสายชู หรือเผาเปลือกตะเคียนหรือรากมะเกลือสัก 2-3 ชิ้นรองก้นกระป๋องหรือกระบอก ใช้มีดปาดจั่นตอนเช้า ปล่อยให้ น้ำตาลสดทำปฏิกิริยากับเปลือกไม้ ตอนเย็นปลดกระป๋องลง น้ำตาลสดจะเปลี่ยนเป็นน้ำตาลเมา หรือที่ชาวบ้านเรียกว่า “ไอ้ไอ้ ไอ้เป้” นอกจากนี้ดอกมะพร้าวนำไปประดิษฐ์เป็นดอกไม้สำหรับตกแต่งบ้านได้สวยงาม ก้านช่อดอกนำไปจัดในแจกันร่วมกับดอกไม้จากรกมะพร้าว กาบมะพร้าว จุกมะพร้าว ดูสวยงามแบบธรรมชาติ กาบหุ้มจั่นนำไปออกแบบตกแต่งเป็นรูปเรือใบสำหรับใส่ผลไม้ทำโครงเรือและที่ใส่ของจดหมาย และที่ใส่กระดาษเช็ดปากได้อีกด้วย

8. ผลมะพร้าว มะพร้าวหนึ่งผลสามารถนำทุกส่วนมาทำประโยชน์ได้มากมายดังต่อไปนี้

8.1 ผลมะพร้าว ผลอ่อนใช้รับประทานน้ำมะพร้าวแก่กระหาย ส่วนผลแก่ เนื้อใช้ประกอบอาหารคาวหวานและอาหารว่างได้มากมายหลายชนิด (โดยเฉพาะขนมไทย กะทิ คือหัวใจสำคัญในการทำขนมไทยให้ดีมีรสชาติอร่อย) และนำจากผลแก่ใช้น้ำส้มสายชู หรือใช้ดองผักให้ มีรสเปรี้ยว

8.2 เนื้อมะพร้าวแห้ง ใช้น้ำมันพืช เนยเทียม สบู่ เป็นส่วนประกอบของผงซักฟอก เครื่องสำอาง แชมพู ทำอาหารแปรรูป (กะทิผงสำเร็จรูป) กากของเนื้อมะพร้าวยังใช้เป็นอาหารสัตว์ ได้อีกด้วย

8.3 เปลือกมะพร้าว เปลือกมะพร้าวทั้งถูกนำมาดัดแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทป็นน้ำชา (ภาชนะสำหรับใส่กากน้ำชา) แต่ต้องเลือกมะพร้าวที่แก่จัด ใบโตๆ ผิวสวยงาม รูปร่างไม่บิดเบี้ยว ถ้านำเปลือกมะพร้าวไปแช่น้ำแล้วสางเป็นเส้นใยมะพร้าว ใช้น้ำที่นอน ทำบาะ ผูกทำเป็นไม้กวาดประกอบหวาย ทำพรมปูพื้น พรมเช็ดเท้า เชือกที่ใช้ในการประมง และทำแท่งเพาะชำ ขุยมะพร้าวผสมดินปลูกไม้กระถาง ทำให้ดินอุ้มน้ำได้ดี รากเดินดี หรือถ้ามีกาบมะพร้าวมากให้นำไปฝังดินก็จะให้ปุ๋ยที่ดีเพราะมีแร่ธาตุ โปแทสเซียมมาก นอกจากนี้ยังใช้เป็นเชื้อเพลิง ขี้เถ้าจากกาบมะพร้าวให้สีดำ ใช้น้ำขุ่นมเปียกปูน

8.4 กะลามะพร้าว กะลาอ่อน(เหม็ง) นำไปทำแกงเผ็ด หรือแกงคั่วเหม็งมะพร้าวอ่อนได้ กะลามะพร้าวแก่เป็นสินค้าอย่างหนึ่งเพราะถ่านกะลามะพร้าวมีคุณภาพดี ให้ความร้อนสูง ถ่านกะลามะพร้าวใช้ในการฟอกสีน้ำตาลและน้ำมันพืช ใช้บ่มเหล้าไวน์ ใช้กรองน้ำเสียโรงงาน (เพราะถ่านกะลามะพร้าวยังมีคุณภาพดูดกลิ่นได้ดี) ในด้านหัตถกรรม กะลามะพร้าวถูกนำไปเป็นภาชนะใส่ของ ใส่อาหาร ของมนุษย์มาตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์ เครื่องใช้จากกะลามะพร้าวในสมัยก่อนพบในชนบท เช่น กระบวยตักน้ำ ทัพพี ฯลฯ ปัจจุบันมีผู้เห็นคุณค่านำกะลามะพร้าวกลับมาใช้อย่างแพร่หลาย มีวางขาย และส่งออกไปยังต่างประเทศด้วย

รูปแบบของงานหัตถกรรมจากกะลามะพร้าวมีมากมายหลายชนิดและมีลวดลายสวยงาม ตั้งแต่เป็นของใช้ในครัวเรือน เช่น ถ้วย ชาม กาน้ำ แก้วน้ำ ขันน้ำ ส้อม ที่คนน้ำหวาน ทัพพี ตะหลิว ฯลฯ เครื่องประดับ เช่น สร้อยคอ เข็มขัด ที่ติดเสื้อ ที่ติดผม กระดุม ฯลฯ นอกจากนี้กะลามะพร้าวยังใช้ทำเครื่องดนตรีไทย เช่น ซอสามสาย ซออู้ สะล้อ รวมทั้งของเล่นเด็กๆ ในชนบท โดยใช้เชือกร้อยที่กะลาด้านที่มีรู (กะลาตัวผู้) ใช้ทำเหยียบ มือถือเชือกแล้วเดินกุกกัก บางท้องถิ่นเรียกว่า เล่นม้ากระโหลก

8.5 ยอดมะพร้าวอ่อน ใช้ประกอบอาหารเพราะมีรสชาติอร่อยเป็นที่นิยมกันมาก เช่น ผัดยอดมะพร้าวอ่อนกุ้งหรือเนื้อหมู แกงส้มยอดมะพร้าว ร้านอาหารใหญ่มักใส่รายการอาหารประเภทยอดมะพร้าวไว้ จนทำให้ชาวสวนมะพร้าวปลูกมะพร้าวเพื่อตัดยอดขายเพียงอย่างเดียว เพราะเพียง 2 ปี ก็ตัดยอดขายได้

8.6 กากมะพร้าว กากมะพร้าวที่เหลือจากโรงงานผลิตกะทิสำเร็จรูปมีปริมาณมาก สามารถนำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้หลายอย่าง นอกจากใช้เป็นอาหารสัตว์แล้ว ยังนำมาทำเป็นแป้งมะพร้าว (coconut flour) เพื่อใช้เป็นส่วนประกอบในการทำผลิตภัณฑ์อาหารประเภทขนมอบ เช่น คุกกี้ เค้ก โดนัท เพิ่มคุณค่าทางอาหารและลดปริมาณการใช้แป้งสาลี ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้ประหยัดเงินตราได้เป็นจำนวนมาก

8.7 น้ำมะพร้าว ในสมัยก่อนใช้ดองผักให้มีรสเปรี้ยว ปัจจุบันน้ำมะพร้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานมะพร้าวตากแห้ง หรือจากร้านซูดมะพร้าว สามารถนำไปทำวุ้นน้ำมะพร้าวได้ โดยการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Acetobacter xylium* จะได้วุ้นที่มีลักษณะเป็นเยื่อเหนียว แผ่นวุ้นนี้สามารถแปรรูปเป็นอาหารคาวหวานได้มากมายหลายชนิด วุ้นน้ำมะพร้าวมีชื่อเรียกหลายอย่าง เช่น วุ้นสวรรค์ วุ้นน้ำส้ม ลูกมะพร้าว หรือเห็ดรัสเซีย ลักษณะและรสชาติเหมือนลูกตาลหรือลูกชิด วุ้นน้ำมะพร้าวเป็นผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตรที่น่าสนใจ สามารถผลิตได้ง่ายทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับอุตสาหกรรม ต้นทุนต่ำเพราะใช้น้ำมะพร้าวแก่ที่เหลือทิ้งซึ่งมีอยู่ทั่วไป

ประโยชน์ของมะพร้าวอีกด้านหนึ่งคือเป็นยาสมุนไพร ซึ่งคงเกิดจากครอบครัวไทยที่มักปลูกมะพร้าวในบริเวณบ้าน สามารถนำส่วนต่างๆ ของมะพร้าวมาทดลองใช้ได้ไม่ยากนัก ตำรายาสมุนไพรจากมะพร้าว จึงเกิดขึ้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. เปลือก ต้น เผาเป็นเถ้า ใช้ประพูนแก้ปวดฟัน
2. ราก ต้มกิน ขับปัสสาวะ แก้โรคเกี่ยวกับทางเดินปัสสาวะ หนองใน หลอดลมอักเสบ โรคตับ บิด ตกขาว ตกเลือด ส่วนรากอ่อน ใช้ฝาดสมานชงน้ำร้อน หรือต้มน้ำอมบ้วนปาก กลั้วคอ แก้เจ็บคอ
3. น้ำหวานที่ได้จากช่อดอก น้ำหวานหรือน้ำตาลสดนำมาต้ม ทำให้สดชื่น และขับปัสสาวะ ถ้าหมักไว้กินเป็นยาระบาย น้ำหวานที่รองจากช่อดอกใหม่ๆ ผสมแป้งข้าวเจ้าอุ่นให้ร้อน ใช้ฟอกแก้แผลเน่าเปื่อยเรื้อรัง และฝีฝีักบัวได้ผลดี
4. ผลอ่อน มีรสฝาด ต้มเอาน้ำอมบ้วนปากกลั้วคอ แก้อาการเจ็บคอในเด็ก
5. น้ำมะพร้าวอ่อนมีรสหวานหอมชื่นใจ ดื่मแก้กระหาย ทำให้สดชื่น แก้ไข้ อาการผิดปกติเกี่ยวกับทางเดินปัสสาวะ และแก้ไอเจียนได้ดี ดื่มน้ำมะพร้าวอ่อนครั้งละหลายๆ แก้อาการปัสสาวะกะปริบกะปรอย ถ้าดื่มตอนท้องว่าง 1-2 ผลช่วยให้ระบายได้ดี น้ำมะพร้าวแก่มีโพแทสเซียมมาก ดังนั้นถ้าดื่มมากก็จะเป็นยาขับปัสสาวะ นอกจากนี้ บางตำรากล่าวไว้ว่า ถ้าดื่มน้ำมะพร้าวมากพอเหมาะเป็นประจำ จะช่วยรักษาโรคหัวใจล้มเหลวได้
6. เนื้อมะพร้าว เนื้อมะพร้าวอ่อนคั้นเป็นของเหลวข้นขาว มีคุณค่าทางอาหารมาก มีฤทธิ์ขับปัสสาวะ ขับพยาธิ แก้ไข้ และอาการผิดปกติเกี่ยวกับทางเดินปัสสาวะ เนื้อมะพร้าวแก่มีฤทธิ์ขับพยาธิ โดยเฉพาะพยาธิตัวตืด ให้กินเนื้อมะพร้าวชูด 1 ผล ต่อมาสัก 30 นาที อาจกินยาถ่ายน้ำมันระหู่ตามหรือไม่ก็ได้

7. น้ำมันมะพร้าว อาจให้เด็กที่ผอมแห้งหรือเป็นโรคเกี่ยวกับปอดกินเพราะน้ำมันจากเนื้อมะพร้าวจะช่วยบำรุงร่างกาย โดยให้กินครั้งแรก 20-30 หยด วันละ 3 ครั้ง แล้วให้ค่อยๆ เพิ่มขนาดขึ้นจนถึง 4 มิลลิลิตร นอกจากนี้ น้ำมันมะพร้าวยังใช้ทาแผลไฟไหม้น้ำร้อนลวก ทำน้ำมันใส่ผม ใช้เป็นน้ำมันทาหรือผสมยาอื่นๆ ทาแก้โรคผิวหนัง และทาแก้ผิวหนังแห้งในฤดูหนาวได้ดี
8. น้ำมันที่ได้จากการเผาอะลา มีสารจำพวกฟีนอลอยู่จำนวนมากมีฤทธิ์ฆ่าเชื้อ ใช้ทาแก้โรคผิวหนัง กลาก ผื่นคัน
9. รากและดอกมะพร้าว มีรสหวาน ต้มน้ำกินแก้ท้องเสีย อมบัววนปาก แก้ปากเจ็บ และเจ็บคอ
10. สารสีน้ำตาลได้ใบ สารสีน้ำตาลที่ย่อยแข็งอยู่ใต้ใบ มีรสฝาด ใช้ห้ามเลือดบาดแผลได้
11. เปลือกหุ้มรากมะพร้าว นำไปตากแห้ง รักษาโรคคอติดได้ เด็กใช้ 30 กรัม ผู้ใหญ่ใช้ 60 กรัม ต้มกับน้ำตาลทรายขาว ต้มทุกวันประมาณ 1 สัปดาห์ (เกสร, 2544)

2.6.2 มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีถิ่นฐานกำเนิดในอเมริกาใต้ แถว ๆ ประเทศเปรู แมกซิโก กัวเตมาลา และ ฮอนดูรัส สันนิษฐานว่ามีการปลูกมันสำปะหลังในแมกซิโกเมื่อ 2,100 ปีมาแล้ว และมีการปลูกในประเทศเปรูเมื่อ 4,000 ปีมาแล้ว จากถิ่นนี้ได้แพร่ขยายไปทั่วทวีปอเมริกาแถบร้อนโดยชาวอินเดียนและขยายไปสู่แหล่งอื่น ๆ ของโลกโดยชาวโปรตุเกสและสเปน มันสำปะหลังเข้าสู่เอเชียโดยนำเข้ามาในประเทศอินเดีย ศรีลังกา มาเลเซีย อินโดนีเซีย ประมาณคริสต์ศตวรรษที่ 17

สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานที่แน่นอนว่ามีการนำเข้ามาปลูกเมื่อใด คาดว่าคงจะเข้ามาในระยะเดียวกับที่เข้าสู่ประเทศศรีลังกา ฟิลิปปินส์ คือราว พ.ศ. 2329-2383 เดิมเรียกว่า มันสำโรง มันไม้ ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือเรียกมันต้นเตี้ย ภาคใต้เรียกมันเทศ (เรียกมันเทศว่ามันหลา) ปัจจุบันคนส่วนใหญ่เรียก มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังเป็นพืชที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศมากมีเนื้อที่เพาะปลูกทั่วประเทศ ในปี 2523 ประมาณ 7.3 ล้านไร่ นับเป็นพืชที่มีเนื้อที่ปลูกมากเป็นอันดับสามรองจากข้าว ข้าวโพด เป็นพืชที่ทำรายได้ให้แก่เกษตรกรโดยตรงปีละ กว่า 12,000 ล้านบาท ประมาณ 97% ของผลผลิตจากมันสำปะหลัง (หัวมันสด) ถูกส่งเข้าโรงงานทำการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังมากมายหลายชนิด ในจำนวนนี้ประมาณ 70% ของผลผลิตมันสำปะหลังได้ใช้ในการแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ ส่วนที่เหลือใช้ในอุตสาหกรรมอื่น จึงนับว่าผลผลิตจากมันสำปะหลังนอกจากจะทำรายได้ให้แก่เกษตรกรแล้ว ยังทำรายได้ให้กับวงการอุตสาหกรรมภายในประเทศอย่างเดียว เป็นการทำได้ให้เกษตรกรอีกส่วนหนึ่ง ผลสุดท้ายผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่แปรรูปแล้วได้ส่งเป็นสินค้าออกมากเป็นอันดับสองรองจากข้าวในปี 2524

แหล่งปลูกมันสำปะหลังของประเทศไทย เดิมปลูกมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจนกลายเป็นประเทศต่อมาได้มีการขยายพื้นที่ปลูกมันสำปะหลังไปในภาคตะวันออกเฉียงเหนือจนกลายเป็นแหล่งปลูกมากที่สุดของประเทศ มันสำปะหลังเป็นพืชที่เจริญได้ดีในอากาศค่อนข้างร้อนและทนทานต่อความแห้งแล้งได้พอสมควร แต่ก็ต้องการฝนตกในต้นฤดูปลูกและมีการกระจายของฝนอย่างสม่ำเสมอตลอดฤดู เช่นเดียวกับพืชอื่นๆ เพื่อช่วยให้มีผลผลิตมากและคุณภาพดี หากลมฟ้าอากาศมีช่วงแห้งแล้งนานเกินไปหัวมันจะเป็นเสี้ยน ส่วนสภาพของดิน มันสำปะหลังเป็นพืชที่ไม่ค่อยพิถีพิถันในเรื่องสมรรถนะของดินมากนัก เพียงแต่เป็นดินที่ร่วนซุย และระบายน้ำได้ดี เพราะส่วนที่ใช้ประโยชน์อยู่ที่หัวหรือราก ถ้าดินเหนียวเกินไปหัวมันจะไม่ค่อยเจริญเติบโต และเก็บเกี่ยวยาก

โดยปกติมันสำปะหลังไม่ค่อยมีโรคและศัตรูระบาดทำลายเสียหาย แหล่งปลูกที่เหมาะสม แต่เดิมคือจังหวัด ชลบุรี ระยอง แต่ในปัจจุบัน ได้มีการขยายพื้นที่ปลูกกันอย่างกว้างขวางในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่จังหวัด นครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น อุดร อุบลราชธานี มหาสารคาม กาฬสินธุ์ และถ้ายังมีการขยายตัวอย่างนี้คาดว่าจะการขยายพื้นที่ปลูกกระจายทั่วไปทั้งประเทศ และจะเป็นพืชตัวการสำคัญในการทำลายป่าอีกพืชหนึ่ง เช่นเดียวกับข้าวโพด ข้าวไร่ ปอ

พันธุ์มันสำปะหลังที่ปลูกกันในประเทศไทยขณะนี้มีอยู่หลายพันธุ์แต่ไม่ค่อยมีคุณสมบัติเด่นที่แตกต่างกันชัดเจนนัก พันธุ์พื้นเมืองหรือพันธุ์ยอดขาวบางคนเรียกพันธุ์สิงคโปร์ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความนิยมสูง เพราะเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมกับสภาพดินฟ้าอากาศของประเทศไทย และมีปริมาณแป้งสูงเฉลี่ยประมาณ 15-40 % อาจแบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ได้ 2 ชนิด คือ

1. ชนิดหัวใช้รับประทาน ชนิดนี้มีเนื้อละเอียด และมีรสหวานมากกว่าขมนำมาใช้เป็นอาหารสำหรับบริโภคโดยตรง เช่น ทำมันสำปะหลังปิ้ง และของหวานอื่นๆ
2. ชนิดที่ใช้หัวสำหรับทำแป้งมันและอาหารสัตว์ มันชนิดนี้มีเนื้อหยาบ ไม่เหนียวและมีรสค่อนข้างขม สาเหตุที่ทำให้มีรสขมเพราะมีกรดไซยานิก (Cyanic acid) ซึ่งเป็นสารพิษกรดชนิดนี้พบในเปลือกมากกว่าเนื้อของหัวมันที่ยังสดอยู่

ตามปกติเราสามารถขูดหัวมันเอาหัวมันสำปะหลังมาใช้ได้เมื่ออายุประมาณ 6 เดือน แต่ถ้าขูดในระยะนี้ผลผลิตต่อไร่จะต่ำมาก เพราะผิวของมันยังอ่อนอยู่ ยังอาจเกิดอันตรายแก่ผู้บริโภคเนื่องจากหัวมันอ่อนมีเปอร์เซ็นต์กรดไซยานิกสูงควรเก็บเกี่ยวมันเมื่อมีอายุ 10-13 เดือน ในระยะนี้หัวมันจะมีน้ำหนักมาก มีปริมาณแป้งสูง และไม่มีเส้นใยมากนัก

เนื่องจากผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังที่ใช้เป็นอาหารสัตว์หรือแปรรูปชนิดต่างๆ ตามต้องการของตลาดทั้งภายในและต่างประเทศ ที่สำคัญและมีการผลิตกันในปัจจุบัน ได้แก่

1. มันสำปะหลังแห้งหรือมันเส้น ผลิตจากหัวมันสำปะหลังสด ที่ล้างสะอาด โดยใช้เครื่องจักรหั่นหรือฟานเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากแดดบนลานซีเมนต์ หรืออาจทำให้แห้งโดยการใส่เตาอบ มีความชื้นไม่เกิน 15 %

2. มันสำปะหลังอัดเม็ด หรือมันสำปะหลังแท่ง ผลิตจากหัวมันสำปะหลังแห้ง บางที่ก็มีกากมันผสมอยู่ด้วย กรรมวิธีการผลิต คือนำเอาวัตถุดิบดังกล่าวผ่านเครื่องร่อน เมื่อแยกดินทรายออกแล้ว นำมาล้างเข้าเครื่องอัดเม็ด ผ่านจานอัดซึ่งมีลักษณะเป็นรูปกลมจำนวนมาก มันสำปะหลังอัดเม็ดมีลักษณะเป็นแท่งกลมๆ

3. แป้งมันสำปะหลัง ผลิตโดยนำหัวมันสดมาอ่อนเอาดินทรายออก แล้วผ่านเครื่องล้างและเครื่องชูดต่อนั้นจะผ่านเครื่องบดหัวมันโดยใช้น้ำผสม เมื่อละเอียดแล้วเมื่อละเอียดแล้วจึงผ่านเครื่องกรองเพื่อแยกกากและน้ำออกจากกัน น้ำแป้งที่ผ่านเข้าเครื่องฟอกและเครื่องแยกน้ำและแป้งเอาแป้งไปตากให้แห้งด้วยเครื่องจักร อัตราการแปรรูปจากหัวมันสำปะหลังสดเป็นแป้งมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์แป้งในหัวมันและฤดูกาลที่เก็บเกี่ยว (ปัญญา, 2530)

2.6.3 สับปะรด

สับปะรดมีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ สับปะรดที่เราปลูกกันอยู่ทุกวันนี้ไม่มีสภาพป่าโดยแท้จริง แต่อาจพบสับปะรดชนิดอื่นๆ ในสกุล *Ananas* และ *Pseudananas* ได้ในป่าพื้นที่ราบสูงอันแห้งแล้งของป่าใหญ่ที่เรียกว่า *Matto Grosso* ในบราซิล ปารากวัย และโบลิเวีย แหล่งกำเนิดดั้งเดิมของสับปะรดอยู่ในบริเวณตอนกลางและตอนใต้ของบราซิล ตอนเหนือของอาร์เจนตินา และตอนเหนือของปารากวัย ในบริเวณละติจูดที่ 15-30 องศาใต้ และลองจิจูดที่ 40-60 องศาตะวันตก

ชาวอินเดียพื้นเมืองของบราซิลปลูกสับปะรดกันตามบริเวณชายทะเลฝั่งตะวันออกและตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้ และตามริมฝั่งมหาสมุทรแอตแลนติกและแปซิฟิกของอเมริกากลาง ตลอดจนหมู่เกาะต่างๆ ในแถบตะวันตก นักเดินเรือชาวสเปนและโปรตุเกสเป็นผู้เผยแพร่พันธุ์สับปะรดไปยังประเทศต่างๆ ในภาคตะวันออกไกล ในปี ค.ศ. 1600 มีการปลูกกันในอินเดียตอนใต้ ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และประเทศอื่นๆ รวมทั้งประเทศไทยใน พ.ศ. 2213-2243 ซึ่งอยู่ในสมัยของสมเด็จพระนารายณ์มหาราชจึงอาจสันนิษฐานได้ว่าชาวโปรตุเกสซึ่งเข้ามาติดต่อกับค้าขายกับประเทศไทยเป็นผู้นำสับปะรดเข้ามา สับปะรดพันธุ์ปัตตาเวียซึ่งเป็นพันธุ์ที่ปลูกกันมากในปัจจุบันในบริเวณภาคตะวันตกเช่น ประจวบคีรีขันธ์ เพชรบุรี เชื่อกันว่ามีผู้นำพันธุ์เข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียและปลูกไว้ที่อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ส่วนแหล่งปลูกในภาคตะวันออกเช่น ชลบุรี ระยอง เชื่อว่ามีผู้นำพันธุ์มาจากประเทศอินเดียและนำไปปลูกไว้ที่อำเภอศรีราชา ปราณบุรีและสับปะรดศรีราชา ซึ่งปัจจุบันบริเวณภาคตะวันตกและภาคตะวันออกก็เป็นแหล่งผลิตสับปะรดที่ใหญ่เป็นลำดับที่หนึ่งและสองของประเทศ ผลผลิตที่ได้ใช้เพื่อรับประทานผลสด และทำอุตสาหกรรมสับปะรดกระป๋อง ทั้งใช้บริโภคภายในประเทศและส่งเป็นสินค้าออก

นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้จากสับปะรดซึ่งอาจได้จากเศษเหลือของผลในระหว่างการทำอุตสาหกรรมบรรจุกระป๋องเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังได้จากส่วนต้นและใบสับปะรดอีกด้วย

แต่ก็ถือว่าเป็นส่วนน้อยทั้งนี้เพราะงานด้านการค้นคว้าวิจัยทางด้านนี้ยังไม่เจริญรุดหน้าเท่าที่ควร ผลพลอยได้จากเศษเหลือของสับปะรดเช่น

1. น้ำเชื่อมที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง บรอมมีเลน และแอลกอฮอล์ เป็นผลพลอยได้จากเศษเหลือของสับปะรดเช่น ก้าน เปลือก เศษจุก เปลือกติดเนื้อ เศษเนื้อ และตาสับปะรด ซึ่งจะถูกนำไปบีบคั้นเอาน้ำออก เพื่อให้มีน้ำหนักรวมในการขนไปทิ้ง น้ำที่คั้นได้พบว่ามีคุณค่าสามารถเอาไปทำ Sugagr-syrup สกัดบรอมมีเลนซึ่งเป็นเอนไซม์ย่อยโปรตีนสามารถสกัดเอาบรอมมีเลนออกจากน้ำสับปะรด และนำมาผลิตแอลกอฮอล์ได้
2. น้ำส้มสายชูและไวน์จากสับปะรด ใช้ผลที่แก่จัด ผลที่มีรอยช้ำหรือผลที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือจะเป็นส่วนแกน ส่วนเนื้อติดเปลือก ส่วนเศษที่ปาดทิ้งก็ได้
3. อาหารสำหรับเลี้ยงวัว ต้นสับปะรดและกาก เศษเหลือของผลที่เหลือในโรงงานหลังจากคั้นน้ำออกแล้ว ก็อาจนำไปทำเป็นอาหารเลี้ยงวัวได้หลายชนิด เช่นที่เรียกว่า รำสับปะรด (pineapple bran) และ pineapple crown feed
4. กรดอินทรีย์ เป็นผลพลอยได้จากสับปะรดและผลสับปะรดมีอยู่ 3 ชนิด คือ กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแอสคอร์บิก กรดที่สามารถสกัดและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายที่สุดก็คือกรดซิตริก
5. ทำเชื้อกระดากจากใบสับปะรด โดยใช้เส้นใยที่ทำจากใบสับปะรด ซึ่งจะต้องใช้ฝีมือแรงงานจากมนุษย์ตั้งแต่เลือกใบ ตัดใบ ลอกเอาเส้นใยออก นับว่ายุ่งยากและสิ้นเปลืองแรงงาน ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูง

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว (รัชนิย์, 2544)

องค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง		
	ต้นมันสำปะหลัง	ใบสับปะรด	กาบมะพร้าว
Alcohol-benzene solubility	6.6	14.3	3.8
Lignin (ash corrected)	17.1	11.6	22.6
Holocellulose	53.0	39.2	47.5
Alpha-cellulose	28.2	25.6	28.8
Beta-cellulose	8.9	7.5	4.6
Gamma-cellulose	15.9	6.1	14.1

จากการพิจารณาคูณสมบัติของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่นำมาวิจัยดังตารางที่ 2.5 พบว่า ต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณที่

ต่างกันคือ 53.0%, 39.2% และ 47.5% ตามลำดับซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนได้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีดังนี้

Nakajima และ Sakaguchi (1990) ศึกษาการกำจัดยูเรเนียมจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล โดยใช้กากพืช 7 ชนิด คือ เปลือกลูกนัท ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่วทั้งด้านนอกด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น โดยเปรียบกากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพกับที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์และกรดซัลฟูริก พบว่าความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล โดยกากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพ เปลือกลูกนัท สามารถดูดซับได้ 81.0% ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่วทั้งด้านนอกด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น เท่ากับ 79.4, 73.9, 72.0, 81.2 และ 77.3% ตามลำดับ ส่วนน้ำทะเลพบว่ามีเพียงเปลือกลูกนัท และผิวด้านในลูกนัทเท่านั้นที่สามารถดูดซับยูเรเนียมได้ คือ 59.7 และ 79.6 % ตามลำดับ

ในกากพืชที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์และกรดซัลฟูริก พบว่าความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมจะเพิ่มขึ้นทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล เปลือกลูกนัท ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่วทั้งด้านนอกด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น สามารถดูดซับได้ 88.2, 73.6, 90.9, 91.8, 97.9, 96.0 และ 73.4% ตามลำดับ ส่วนน้ำทะเลพบว่ามีเปลือกลูกนัท ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่วทั้งด้านนอกด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น สามารถดูดซับได้ 75.5, 81.1, 1.7, 60.7, 53.5, 3.0 และ 0.00% ตามลำดับ

Maranon และ Sastra (1991) ได้วิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้กากแอปเปิ้ลจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ ขนาดของวัสดุ การปรับสภาพกากแอปเปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมี และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะที่ศึกษาคือ ทองแดงและนิกเกิล กระบวนการทางเคมีที่ใช้ คือ phosphatation reaction(P-AR) และ Crosslinking and Xanthation Reaction(CLX-AR) พบว่า P-AR มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดง 1.6 meq/g ส่วน CLX-AR มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดง 1.1 meq/g และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทองแดง 0.4 meq/g ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลและสังกะสีทองแดง ของ P-AR และ CLX-AR และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 1.1, 0.6 และ 0.3

meq/g และพบว่ากากแอปเปิ้ลที่มีขนาด 0.2-0.4 mm. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4-0.63 mm. ส่วนการศึกษาด้านกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอปเปิ้ล พบว่า กากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพประมาณ 2 และ 5.8 เท่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย phosphatation reaction สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าแบบ Crosslinking and Xanthation Reaction และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักพบว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

Maranon และ Sastra (1992) ได้วิจัยการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้กากแอปเปิ้ลจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ลโดยทดลองเปรียบเทียบระหว่างกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพกับกากแอปเปิ้ลที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphatation reaction ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ พีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารละลายคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียสังเคราะห์โลหะที่ศึกษาคือ ทองแดงและนิกเกิล และศึกษาการกำจัดโลหะหนักในทะเลโดยเปรียบเทียบระหว่างเรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีน้ำทะเลจากทะเลคาริเบียน โลหะที่ศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิล แคลเมียมและปรอท พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 3.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99% อัตราการไหล 10 ml/min ส่วนกากแอปเปิ้ลที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีว่า พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 2.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99% อัตราการไหล 10 ml/min ในกรณีของน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล และที่เติม EDTA พีเอชที่เหมาะสมคือ 5 สำหรับอัตราการไหลพบว่ากากแอปเปิ้ลที่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphatation reaction สามารถรับอัตราการไหลที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง ส่วนการศึกษาเทียบระหว่างเรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพมีความสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิลแคลเมียมและตะกั่วเรซินแบบสังเคราะห์สามารถกำจัดได้ดีกว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ

Low และคณะ (1993) ศึกษาการกำจัดทองแดงโดยใช้เส้นใยปาล์มน้ำมันที่ปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Yellow 2 ด้วยการทดลองแบบทีละเท พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม มีค่า 1.62 ± 0.30 และ 6.67 ± 0.20 mg/g ตามลำดับ และที่ พีเอชมากกว่า 4 จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงที่สุด และพบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทองแดงมากขึ้นความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง จากการศึกษาเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าเกิดการเกิด

แลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก และความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะพบว่าตะกั่วมีค่าสูงกว่า ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ตามลำดับ

Shukla และคณะ (1993) ทำวิจัยโดยใช้เยื่อไม้มัน ปอกระเจา และจีล็ดเยี่ยมมาทำการฟอกขาวและแบ่งเป็นเยื่อสีและไมเยื่อสี เพื่อในกำจัดไอออนของโลหะหนัก คือ ทองแดง โปรท เหล็ก ตะกั่ว สังกะสีและนิกเกิล โดยทำการทดลองแบบ Batch และแบบ Column พบว่าใช้เยื่อไม้มัน ปอกระเจา และจีล็ดเยี่ยมที่ไม่ได้เยื่อสีสามารถกำจัดโลหะหนักได้ประมาณ 17-35%, 17-48% และ 17-30% ตามลำดับ สำหรับเยื่อไม้มัน ปอกระเจา และจีล็ดเยี่ยมที่เยื่อสีสามารถกำจัดโลหะหนักได้ประมาณ 8-76%, 28-69% และ 34-97% ตามลำดับ

Tan และคณะ (1993) ทำการวิจัยโดยใช้กาบมะพร้าว และเม็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม มากำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองทั้งแบบ Batch Test และแบบ Column Test โดยนำวัสดุไปอบที่อุณหภูมิ 100 °C และบดให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.3-0.85 mm. นำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5-1 ชั่วโมง แล้วนำไปกวนใน NaOH 1.5 M แล้วล้างออกด้วย HNO₃ 2 M และล้างด้วยน้ำกลั่นตามลำดับ แล้วอบให้แห้ง ในการวิจัยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียม คือ ระยะเวลาในการสัมผัส อิทธิพลของพีเอช และความสามารถในการกำจัดโครเมียม โดยทำการทดลองแบบ Batch Test ส่วนแบบ Column Test ศึกษาอิทธิพลของความสูงของวัสดุที่ใช้ ระดับการรีเจนเนอเรชั่นพบว่า 20 นาทีแรกสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึง 80% และจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดได้อีกเมื่อเวลาผ่านไป อิทธิพลของพีเอชพบว่าช่วงพีเอชของกาบมะพร้าว คือ 1.5-5 และเม็ดปาล์มอยู่ในช่วง 1.5-3 สามารถกำจัดได้ 70 % และที่อัตราไหลเดียวกันความสูงที่มากกว่าสามารถกำจัดได้ดีกว่าเนื่องจากมีปริมาณวัสดุมากกว่าการรีเจนเนอเรชั่นใช้ NaOH 0.05 M หรือ HNO₃ 0.1 M

Low และคณะ (1995) ได้ศึกษาผลของการปรับสภาพกาบมะพร้าวด้วยสีเยื่อที่มีต่อความสามารถในการดูดซับทองแดง โดยทดลองกับสี 3 ตัว คือ Reactive Yellow 2, Acid Blue 29 และ Acid Blue 25 พบว่ากาบมะพร้าวที่ไม่ได้ปรับสภาพสามารถดูดซับทองแดงได้ 11% ส่วนกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสี Acid Blue 29 และ Acid Blue 25 มีค่าเพิ่มเป็น 40% ส่วนกาบมะพร้าวที่ปรับสภาพด้วยสี Reactive Yellow 2 มีค่าความสามารถดูดซับสูงสุดคือ 60% โดยถ้าความเข้มข้นของโลหะเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการดูดซับของกาบมะพร้าวทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพก็จะลดลง

Beker และคณะ (1999) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก Hydroxyethyl cellulose ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสีย จากการทดลองแบบแบตช์ และคอลัมน์ พบว่า เรซินมีการบวมตัวเฉลี่ย ร้อยละ 75.94 และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เท่ากับ 2.57 meq/g ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ดังนั้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้และจากการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดนี้ มีข้อดีคือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสูง และเป็นสารเคมีที่คงสภาพดี

Zoumpoulakis และ Simitzis (2001) ศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตขึ้นมาจากเมล็ดมะกอก โดยนำเมล็ดมะกอกมาทำการไฮโดรไลซิสในสถานะที่เป็นด่าง (alkaline hydrolysis) ได้เป็น Kraft lignin (KRL) และหากนำ KRL มาทำการ hydroxymethylated โดยสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ จะได้เป็น KRLH สำหรับ Novolac resin (N) สามารถสังเคราะห์ได้จากฟีนอล และฟอร์มัลดีไฮด์ ภายใต้สภาวะกรด นอกจากนี้ถ้านำ KRL หรือ KRLH มารวมกับฟีนอล/ฟอร์มัลดีไฮด์ ในระหว่างการโพลีเมอร์ไรเซชัน จะได้เป็น N-KRL หรือ N-KRLH ผลิตภัณฑ์จากการโพลีเมอร์ไรเซชัน (N,N-KRL,N-KRLH) ได้มาจากการซัลโฟเนต โดย H_2SO_4 เข้มข้น ในอัตราส่วน 1:3 w/w (-S1) หรือ 1:6 w/w (-S2) มี H_2SO_4 มากเกินพอ จากนั้นคลออสลิงค์ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ดังนั้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่จะใช้ในการทดลอง คือ N-S1, N-S2, N-KRL-S1, N-KRL-S2, N-KRLH-S1 และ N-KRLH-S2 จากการศึกษาพบว่า เมล็ดมะกอกที่ผ่านการปรับสภาพที่อัตราส่วน H_2SO_4 1:6 w/w (S2) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเมล็ดมะกอก ที่ผ่านการปรับสภาพโดยที่อัตราส่วน 1:3 w/w (-S1) และยังพบว่า N-KRL-S2 และ N-KRLH-S2 มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 2.6 และ 2.7 meq/g. ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า N-S2 ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 2.4 meq/g. ทั้งที่ อัตราเดียวกันและที่อัตราเร็วกว่า การศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนโลหะ โดยไอออนโลหะที่ทำการศึกษาคือ Co^{2+} Ni^{2+} และ Cu^{2+} พบว่า วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัด Co^{2+} ได้มากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบ N-KRL-S2 และ N-KRLH-S2 กับ สารแลกเปลี่ยนไอออนสังเคราะห์ (Phenolic Resin) พบว่า มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ Phenolic Resin

เกศสุชา (2536) ในการวิจัยนี้ใช้ผักตบชวาและชานอ้อย เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน องค์ประกอบในผักตบชวามีเซลลูโลส 43-44% ลิกนิน 12-15% แพนโตแซน 14-15% และสารอื่นๆ ส่วนองค์ประกอบในชานอ้อยมีไฮโลเซลลูโลส 82.52% แอลฟาเซลลูโลส 44% ลิกนิน 19.78% แพนโนแซน 27.21% และสารอื่นๆ โลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวาและชานอ้อย ความเข้มข้นของ

โลหะหนักในน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ ผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพอยู่ในช่วง 0.686-0.809 meq/g และผักตบชวาที่ปรับสภาพ (carboxymethyl water hyacinth) อยู่ในช่วง 0.330-0.496 meq/g ส่วนชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 meq/g และชานอ้อยที่ปรับสภาพ (Carboxymethyl bagasse) มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 meq/g นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสีสำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า น้ำเสียที่มีโลหะหนักน้อยมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ปริมาณกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 N สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้ประมาณ 3 ปริมาตรเรซิน

นันทนา (2537) การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถสูงสุดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล (ที่มีหมู่ไอออน คือ หมู่ซัลโฟนิค) และครอสส์ลิง-แซนเทต (ที่มีหมู่ไอออน คือ หมู่แซนเทต) ที่ทำจากผักตบชวาชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี การทดลองที่ใช้เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 ซม. น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20, 50 มก./ล. ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราไหล 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ ผักตบชวาและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลโฟเอทิลอยู่ในช่วง 0.233-0.503 meq/g และ 0.279-0.595 meq/g สำหรับครอสส์ลิง แซนเทต นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับสังกะสีมีค่าสูงกว่านิกเกิลและทองแดง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อย สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ประมาณ 2 ปริมาตรเรซิน

พิธิ (2539) นำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 2, 5, 10, 20, 30, และ 37% (v/v) พบว่าการปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวากับฟอร์มาลดีไฮด์ 5% เท่ากับ 1.0962, 0.6983 และ 1.0375 meq/g สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิลและสังกะสี หลังจากคอลัมน์หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ประมาณ 1 ปริมาตรเรซิน หลังจากการล้างคอลัมน์ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน ก็สามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ได้ใหม่โดยไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pearson สำหรับไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสี คือ 0.85, -1.00 และ 0.78 ตามลำดับจากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้น พบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักลง จะมีผลทำให้ความสามารถ

แลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่าคอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดไอออนของโลหะได้เป็นที่น่าพอใจจากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% มาใช้แทนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดไอออนของโลหะหนักจากน้ำเสียชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประภค (2539) ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนของโลหะในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าวและขุยมะพร้าว ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนของโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนัก พิเศษของน้ำเสีย ชนิดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ปริมาณวัสดุที่ใช้ เวลาที่สัมผัสน้ำเสีย การหาปริมาณของโลหะที่เหลือจากการกำจัดของซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว จะใช้วิธีไทเทรตกับอีดีทีเอ ผลการกำจัดไอออนตะกั่วและไอออนปรอทด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าวและขุยมะพร้าว ซึ่งเป็นการศึกษาแบบทีละเท พบว่าขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถในการกำจัดไอออนตะกั่วและไอออนปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์กำจัดได้ 80% และ 78% และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว พบว่าขุยมะพร้าวมีความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะหนักได้ดีกว่าซีลีเนียมและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3-0.7 ppm พบว่าซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าวสามารถกำจัดไอออนของตะกั่วได้เกือบ 100 %

ขวัญเนตร (2542) ศึกษาการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา โดยปรับสภาพผักตบชวาด้วยสีย้อม 2 ชนิดคือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 เปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ปรับสภาพ โดยทำการทดลองแบบทีละเทกับน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก 10, 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเรซินที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ความเข้มข้น 0.002 และ 0.001 % ตามลำดับ ทำให้ผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาถึงผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นทำให้ผักตบชวาทั้งที่ไม่ได้ปรับสภาพกับที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง และพบว่าผักตบชวาที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมากกว่า สังกะสีและนิกเกิล ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อศึกษาการใช้ผักตบชวาในปริมาณที่แตกต่างกันในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยสีย้อมทั้ง 2 ชนิด ปริมาณ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์จนมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ และจากการทดลองบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสีพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียได้อย่างมี

ประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังทดลองกับขี้เถ้าของไม้ตะเคียนทอง ไม้เต็งและไม้ยาง ซึ่งพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าผักตบชวา

เพชรพร และคณะ (2545) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง และชานอ้อย ที่มีขนาด 20-40 เมช และเล็กกว่า 80 เมช และสามารถแบ่งการปรับสภาพวัสดุได้ 3 ชนิด คือ ชนิดไม่ปรับสภาพ ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลสูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากชานดอกทานตะวัน และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีขนาดเล็กกว่า 80 เมช มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากกว่า ที่มีขนาด 20-40 เมช และผลของการปรับสภาพวัสดุ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากที่สุด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการวิจัยโดยอาศัยห้องปฏิบัติการของโปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา ซึ่งให้ความอนุเคราะห์ทั้งสถานที่และเครื่องที่ใช้ในการวิจัยตลอดการวิจัย โดยมีแผนการวิจัยซึ่งได้กำหนดให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย ดังนี้

3.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการวิจัย

	พารามิเตอร์
- ตัวแปรอิสระ	
1. ชนิดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	- กาบมะพร้าว - ตันมันสำปะหลัง - ใบสับประรด
2. การปรับสภาพวัสดุโดยกระบวนการทางเคมี	- ไม่ได้ปรับสภาพ - ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก - ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% - ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37%
3. ชนิดของโลหะหนัก	- นิกเกิล - ทองแดง - สังกะสี
4. ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์	- 5 มิลลิกรัม/ลิตร - 10 มิลลิกรัม/ลิตร - 20 มิลลิกรัม/ลิตร - 50 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย

	พารามิเตอร์
- ตัวแปรคงที่	
1. ขนาดของวัสดุที่ใช้	< 0.177 มิลลิเมตร (80 mesh.)
2. ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์	5
3. ปริมาณวัสดุที่ใช้	2.0 กรัม
4. ปริมาณน้ำเสีย	400 มิลลิลิตร
5. ความเร็วรอบในการกวน	120 รอบ/นาที
6. ระยะเวลาในการกวน	120 นาที
- ตัวแปรตาม	
1. ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด	- ปริมาณโลหะหนัก - พีเอช
2. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน	ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก(%)

3.1.2 ลำดับขั้นการวิจัย

การวิจัยแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน ได้แก่

- 1) การเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย
 - การเตรียมวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
 - การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากกากมะพร้าว ตันมันสำปะหลัง และไบสับปะรด โดยจะทำการปรับสภาพ 4 ชนิด คือ ชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37%
- 2) การศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนตามค่าตัวแปรที่กำหนด ตามตารางที่ 3.1
- 3) การศึกษาหาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดที่ได้จากการศึกษาตามข้อที่ 2
- 4) การศึกษาหาความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจริง จากโรงงานอุตสาหกรรม

- 5) การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
- 6) การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
- 7) ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสีย

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
- ขวดรูปชมพู่
- ขวดเก็บตัวอย่าง
- เครื่องบดวัสดุ
- ตะแกรงคัดขนาด (Sieve) เบอร์ 80 และ เครื่องเขย่าคัดขนาด (Sieve Shaker)
- เครื่องชั่งวัสดุ
- Hot Plate Stirrer
- เครื่องกวน (Jar test)
- เครื่องวัดพีเอช
- เตาอบวัสดุ
- ชุดเครื่องกรอง
- กระดาษกรองใยแก้ว
- เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
(ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน, SEM
(ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
- เครื่องมืออินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์, FT-IR
(ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา)
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว, BET Surface Area Analyzer Model Micromeritics ASAP 2000 (ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (Analytical Reagent Grade)
 - นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulphate : $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
 - คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (Copper (II) sulphate : $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

- ซิงค์ (II) ซัลเฟต (Zinc (II) sulphate : $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- 2) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย (Analytical Reagent Grade)
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCl) 37%
 - กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid : H_2SO_4) 95-97%
 - ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde : CH_2O) 37% V/V
- 3) สารเคมีอื่นๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย
- กรดไนตริก (Nitric acid : HNO_3) 69-71%
 - โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide : NaOH)
 - โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride : NaCl)
 - ฟีนอล์ฟธาเร็นอินดิเคเตอร์

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ สามารถเตรียมได้จาก $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ โดยเตรียมให้มีระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร และทำการปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ให้มีค่าเท่ากับ 5

3.2.2 การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

- 1) การเตรียมวัสดุที่จะนำมาเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน
 - นำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (กากมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด) ล้างด้วยน้ำหลายๆ ครั้ง จนสะอาด
 - ทำให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง
 - นำวัสดุที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น
 - คัดขนาดของวัสดุด้วยตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 80
- 2) การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ได้ปรับสภาพ (พีธี, 2539)
 - นำวัสดุที่เตรียมไว้ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนพีเอชน้ำทิ้งประมาณ 6-7
 - นำไปอบในเตาอบให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3) การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Maranon และ Sastre, 1991)

- นำวัสดุที่เตรียมไว้ใส่ในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 นอร์มัล
- ทำการกวนนาน 30 นาที
- เมื่อครบ 30 นาที นำไปกรอง
- ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จนพีเอชของน้ำทิ้งประมาณ 4-5
- นำไปอบให้แห้งในเตาอบที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

4) การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% (พีธี, 2539)

- นำวัสดุที่เตรียมไว้มาใส่ในฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) 5% (V/V) และสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 0.4 นอร์มัล ในอัตราส่วน วัสดุ : CH_2O : H_2SO_4 เท่ากับ 1 : 12 : 40
- ทำการกวนนาน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- นำมากรอง เพื่อให้เหลือเฉพาะส่วนของวัสดุที่ต้องการ
- นำวัสดุที่เตรียมได้มาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จนมีพีเอชประมาณ 4-5
- นำไปอบให้แห้งในเตาอบที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

5) การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37% (พีธี, 2539)

- นำวัสดุที่เตรียมไว้มาใส่ในฟอร์มัลดีไฮด์ (CH_2O) 37% (V/V) และสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) 0.4 นอร์มัล ในอัตราส่วน วัสดุ : CH_2O : H_2SO_4 เท่ากับ 1 : 12 : 40
- ทำการกวนนาน 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส
- นำมากรอง เพื่อให้เหลือเฉพาะส่วนของวัสดุที่ต้องการ
- นำวัสดุที่เตรียมได้มาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน จนมีพีเอชประมาณ 4-5
- นำไปอบให้แห้งในเตาอบที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

3.2.3 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

- 1) ใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณ 2.0 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
- 2) ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 0.4 ลิตร ลงในบีกเกอร์
- 3) ทำการกวนด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำมากรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกจากน้ำเสีย

5) นำน้ำเสียที่เหลือไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่องอะตอมมิค แอปซอบชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ และบันทึกผลการวิจัย

6) ทำการวิจัยซ้ำ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 4.1

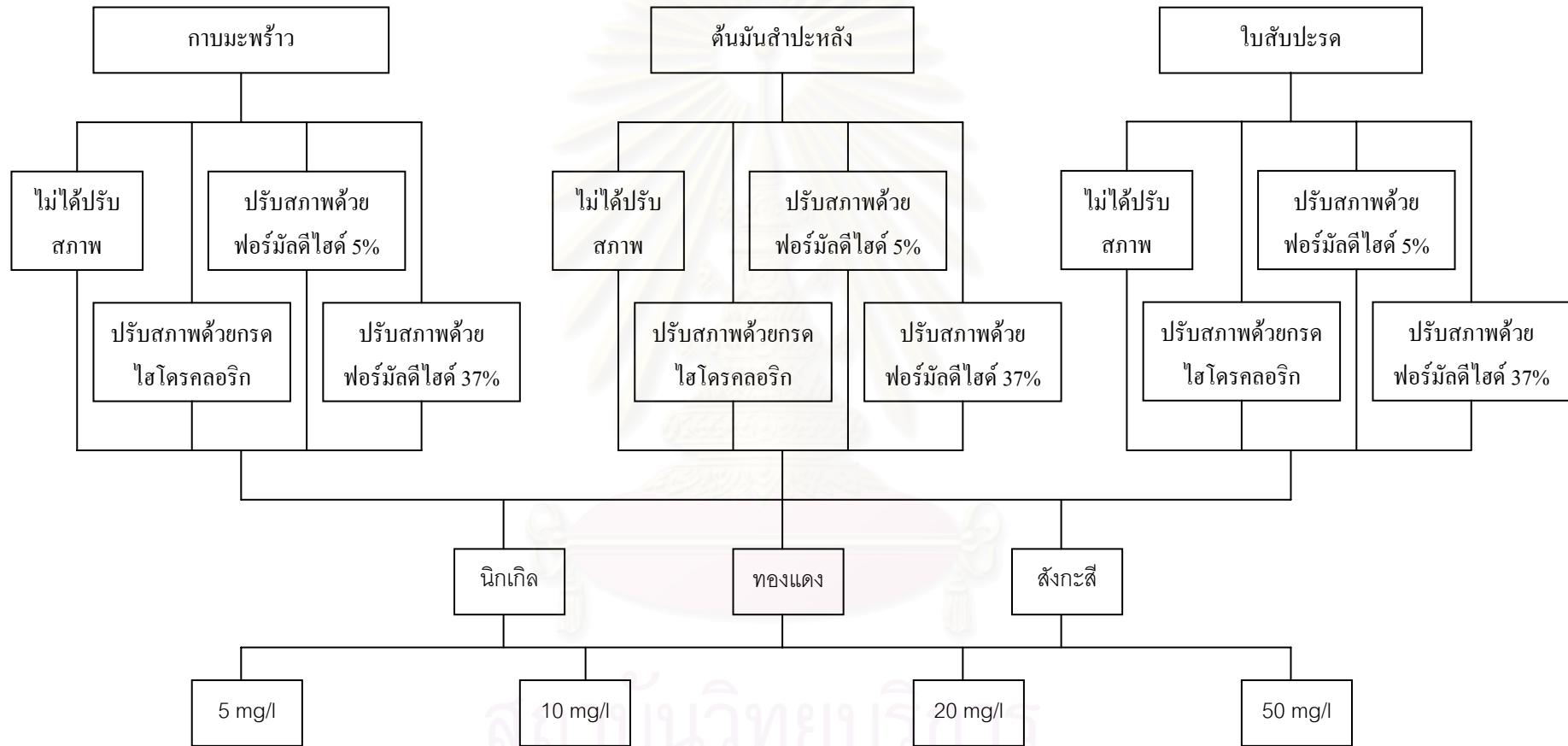
3.2.4 การหาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน

- 1) นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่
- 2) เติมสารละลายกรดไนตริก เข้มข้น 1 นอร์มัล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร
- 3) ทำการกวน ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) นำมากรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกจากสารละลาย
- 5) นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ให้มีพีเอชน้ำที่ 6-7
- 6) เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล ในโซเดียมคลอไรด์ 5% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1 คืน
- 7) กรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกจากสารละลาย
- 8) นำสารละลายมา 50 มิลลิลิตร เติมฟีนอล์ฟธาเรอินอินดิเคเตอร์ แล้วทำการไตเตรทด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก เข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- 9) สามารถคำนวณความสามารถทั้งหมดได้จาก

$$\text{ความสามารถทั้งหมด (Total Capacity, meq/g)} = \frac{(200 * N_{NaOH}) - 4(ml_{H_2SO_4} * N_{H_2SO_4})}{V_{NaOH} - 4V_{H_2SO_4}}$$

3.2.5 การหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

- 1) นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณ 2.0 กรัม ลงในบีกเกอร์
- 2) ใส่น้ำเสียจริงปริมาณ 0.4 ลิตร ลงในบีกเกอร์
- 3) ทำการกวนด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เมื่อทำการกวนครบ 2 ชั่วโมง นำมากรองเพื่อแยกวัสดุออกจากน้ำเสีย
- 5) นำน้ำเสียที่เหลือไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่องอะตอมมิค แอปซอบชันสเปคโตรโฟโตมิเตอร์
- 6) หาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของวัสดุ



รูปที่ 3.1 แผนผังการแปรชนิดของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ชนิดการปรับสภาพ ชนิดโลหะหนัก และ ความเข้มข้นของโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.6 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุ

นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ไปตรวจสอบลักษณะพื้นที่ผิว การหาค่าความถ่วงจำเพาะ การบวมน้ำของวัสดุ ปริมาณพื้นที่ผิว และลักษณะโครงสร้าง

1) ลักษณะพื้นที่ผิว

นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ไปตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) รุ่น JEOL JSM-5410 LV (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ที่กำลังขยาย 200 และ 1500 เท่า

2) การหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific density) โดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์

- นำขวดพิคโนมิเตอร์มาชั่งน้ำหนักขวดเปล่าพร้อมฝาขวด (A)
- ใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลงไปในขวด แล้วชั่งน้ำหนักขวดและวัสดุ (B)
- ใส่น้ำจนเต็มขวดแล้วปิดฝา น้ำที่เกินจะล้นออกด้านบนฝาขวด เช็ดขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก (C)
- ล้างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกแล้วใส่น้ำให้เต็ม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (D)
- Specific density ของวัสดุ = $\frac{(B - A)}{(D - C)}$

3) การหาค่าการบวมน้ำ

- นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนมาตวงปริมาตร (A)
- ใส่น้ำให้ท่วมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
- วัดปริมาตรเรซินแลกเปลี่ยนไอออนหลังจาก 24 ชั่วโมง (B)
- การบวมน้ำ (ml เปียก / ml แห้ง) = $\frac{B}{A}$

4) การหาปริมาณพื้นที่ผิว

นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา ไปวิเคราะห์หาปริมาณพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง BET Surface Area Analyzer Model Micromeritics ASAP 2000 (ศูนย์เครื่องมือ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.2.7 การศึกษาลักษณะโครงสร้างของวัสดุ

นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้ไปตรวจสอบด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectra 2000 เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของวัสดุ (ศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา)

3.2.8 ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดโลหะหนัก

คำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในหน่วยของราคาต่อกรัมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และประมาณการค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนักในน้ำ ในหน่วยของราคาต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ กาบมะพร้าว ต้นมัน ลำปะหลัง และใบสับปะรด มาปรับสภาพด้วยสารเคมีเพื่อใช้เป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ซึ่งสามารถแบ่งการปรับสภาพได้ 4 ชนิด คือ ไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37% และทำการทดลองหาความสามารถและประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยการทดลองแบบแบตช์ โลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี

4.1 การศึกษาองค์ประกอบของกาบมะพร้าว ต้นมันลำปะหลัง และใบสับปะรด

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการหาปริมาณองค์ประกอบของกาบมะพร้าว ต้นมัน ลำปะหลัง และใบสับปะรด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า วัสดุทั้ง 3 ชนิด มีปริมาณเซลลูโลสแตกต่างกัน พบว่า กาบมะพร้าว ต้นมันลำปะหลัง และใบสับปะรด มีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณที่ต่างกันคือ 47.5%, 53.0% และ 39.2% ตามลำดับ เซลลูโลสและโฮโลเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบของวัสดุที่สำคัญในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยจะประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันกรุป คล้ายกับเรซินสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี จึงเป็นส่วนทำให้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินสังเคราะห์ ดังนั้นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ต้นมัน ลำปะหลัง และใบสับปะรด น่าจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนได้เหมือนกับเรซินสังเคราะห์

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของต้นมันลำปะหลัง ใบสับปะรด และ กาบมะพร้าว (รัชนิย์, 2544)

องค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักอบแห้ง		
	ต้นมันลำปะหลัง	ใบสับปะรด	กาบมะพร้าว
Alcohol-benzene solubility	6.6	14.3	3.8
Lignin (ash corrected)	17.1	11.6	22.6
Holocellulose	53.0	39.2	47.5
Alpha-cellulose	28.2	25.6	28.8
Beta-cellulose	8.9	7.5	4.6
Gamma-cellulose	15.9	6.1	14.1

4.2 การศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วย 0.1 นอร์มัล กรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ทำการทดลองแบบแบตช์ โดยโลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น เท่ากับ 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 400 มิลลิตร และใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ปริมาณ 2 กรัม โดยนำไปทำการกวนด้วยเครื่องจาร์เทสต์ ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดมากรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออก แล้วจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดแล้ว ไปวัดปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วย เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

4.2.1 การศึกษาผลของชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 และรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 22.55%, 67.72% และ 44.78% ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.65% 61.04% และ 35.79% ตามลำดับ สำหรับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากใบสับปะรด มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.00%, 48.67% และ 28.58% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี มากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับปะรด พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ไม่ได้แปรตามปริมาณของไฮโดรเซลลูโลส แต่จะแปรตามปริมาณของแอลฟาเซลลูโลส และปริมาณของลิกนิน

4.2.2 การศึกษาผลของการปรับสภาพทางเคมีที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษา พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 19.73%, 67.73% และ 46.06% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 14.21%, 56.62% และ 33.66% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% เท่ากับ 14.13%, 64.36% และ 32.63% ตามลำดับ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาล

ดีไฮด์ 37% เท่ากับ 13.53%, 47.87% 33.18% ตามลำดับ จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดงและสังกะสีสูงที่สุด เมื่อเทียบกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ปรับสภาพด้วยสารเคมีชนิดอื่นๆ แสดงว่ากระบวนการทางเคมีที่เลือกมาใช้ในการปรับสภาพในการศึกษานี้ ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นได้อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% เทียบกับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% พบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% มีประสิทธิภาพสูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ในทุกชนิดโลหะหนักที่ทำการศึกษาทุกความเข้มข้นของโลหะหนักที่ทำการศึกษา และทุกชนิดวัสดุที่ทำการศึกษาซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (พิริ, 2539) สรุปว่าที่ปรับสภาพด้วยด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% มีประสิทธิภาพสูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

4.2.3 การศึกษาผลของชนิดโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด

จากตารางที่ 4.2 4.3 และ 4.4 และรูปที่ 4.4 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษา มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงได้ดีที่สุด รองลงมาคือสังกะสี และนิกเกิลมีประสิทธิภาพในการกำจัดต่ำที่สุด ซึ่งความแตกต่างของประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนั้นอาจขึ้นอยู่กับรัศมีไอออนิก (Ionic Radius) ที่แตกต่างกัน (รัศมีไอออนิกของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 0.69 0.73 และ 0.74 Å ตามลำดับ) อิทธิพลธรรมชาติของการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนโลหะหนัก กับเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

4.2.4 การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก

จากรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน และรูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 กราฟแสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการทดลอง มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดงและสังกะสี ได้ดีที่สุดในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

จากรูปที่ 4.8 4.9 และ 4.10 เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ ภายหลังการกำจัด โลหะหนัก พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีแวนโวนัมสามารถนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักให้มีปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้ง ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ (มาตรฐานน้ำทิ้ง แสดงไว้ในตารางที่ ก.1) คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ โดยสามารถบำบัดน้ำเสีย ที่มีความเริ่มต้นของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี น้อยกว่า 5, 20 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้

4.2.5 การหาความสามารถสูงสุดในการกำจัดโลหะหนัก

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น และปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) โดยมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1.00 สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ มีสมการดังนี้

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{Q} b + \frac{C}{Q}$$

เรซินแลกเปลี่ยนไอออนเป็นไปตามสมการแบบแลงมัวร์ และบางชนิดวัสดุแต่ละการปรับสภาพก็ไม่เป็นไปตามสมการแลงมัวร์ คือค่า R^2 ไม่เข้าใกล้ 1.00 แสดงให้เห็นว่าในการกำจัดโลหะหนัก นอกจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วยังอาจเกิดกลไกการดูดซับประกอบด้วย ซึ่งก็ไม่ทุกชนิดเสมอไป โดยกลไกการดูดซับเป็นลักษณะผิวชั้นเดียว (Monolayer) คือ ทำปฏิกิริยาเฉพาะ active site แต่ผลของไอโซเทอมการดูดซับอาจมีความคลาดเคลื่อน เนื่องจาก เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการทดลองทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีความซับซ้อน และอาจมีหลาย active site บนผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Prakasham และคณะ, 1999)

ความสามารถสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ มีความสามารถสูงสุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 0.127 meq/g ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%
กาบ มะพร้าว	5	77.80	46.49	48.39	48.01
	10	20.37	13.68	14.84	13.97
	20	16.96	9.82	10.43	9.06
	50	9.35	7.91	7.32	6.45
	ช่วง	9.35-77.80	7.91-46.49	7.32-48.39	6.45-48.01
	ค่าเฉลี่ย	31.12	19.47	20.24	19.37
	ส่วนเบี่ยงเบน	31.46	18.17	19.01	19.34
ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	ช่วง	6.45-77.80			
	ค่าเฉลี่ย	22.55			
	ส่วนเบี่ยงเบน	20.91			
ต้นมัน สำปะหลัง	5	36.81	28.65	29.79	26.57
	10	12.32	8.15	8.15	9.12
	20	6.68	5.62	8.05	6.33
	50	5.50	5.58	2.28	2.75
	ช่วง	5.50-36.81	5.58-28.65	2.28-29.79	2.75-26.57
	ค่าเฉลี่ย	15.33	12.00	12.07	11.19
	ส่วนเบี่ยงเบน	14.63	11.17	12.13	10.58
ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	ช่วง	2.28-36.81			
	ค่าเฉลี่ย	12.65			
	ส่วนเบี่ยงเบน	11.05			
ใบสับปะรด	5	31.31	28.08	22.96	22.39
	10	10.67	8.73	8.73	9.70
	20	3.70	3.59	6.28	5.06
	50	5.25	4.19	2.35	2.98
	ช่วง	5.25-31.31	4.19-28.08	2.35-22.96	2.98-22.39
	ค่าเฉลี่ย	12.73	11.15	10.08	10.03
	ส่วนเบี่ยงเบน	12.74	11.52	8.98	8.70
ช่วง ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน	ช่วง	2.35-31.31			
	ค่าเฉลี่ย	11.00			
	ส่วนเบี่ยงเบน	9.57			
รวม	ช่วง	5.25-77.8	4.19-46.49	2.28-43.39	2.75-48.01
	ค่าเฉลี่ย	19.73	14.21	14.13	13.53
	ส่วนเบี่ยงเบน	21.09	13.25	13.48	13.12

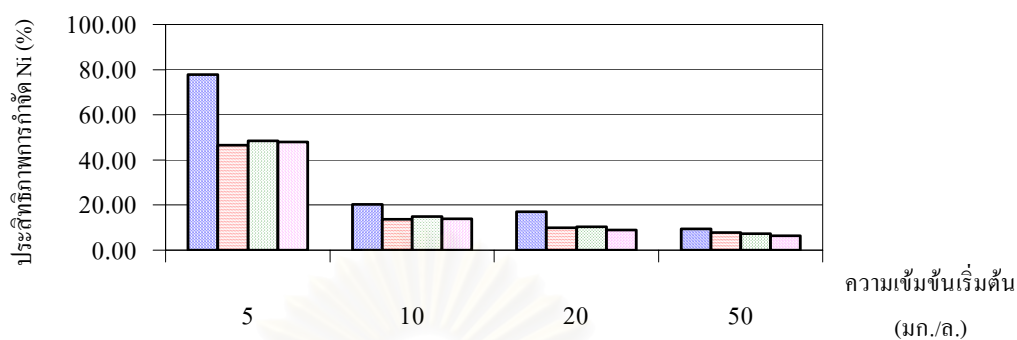
ตารางที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%
กาบ มะพร้าว	5	97.71	92.91	97.25	87.64
	10	93.56	81.70	90.80	71.57
	20	92.24	58.82	72.56	43.86
	50	37.06	23.49	25.84	16.51
	ช่วง	37.06-97.71	23.49-92.91	25.84-97.25	16.51-87.64
	ค่าเฉลี่ย	80.14	64.23	71.61	54.90
	ส่วนเบี่ยงเบน	28.82	30.64	32.26	31.33
ช่วง		16.51-97.71			
ค่าเฉลี่ย		67.72			
ส่วนเบี่ยงเบน		29.16			
ต้นมัน สำปะหลัง	5	85.58	91.53	96.57	81.01
	10	84.97	80.16	88.34	62.58
	20	79.11	51.06	66.02	36.56
	50	27.17	17.04	17.77	9.11
	ช่วง	27.17-85.58	17.04-91.53	17.77-96.57	9.11-81.01
	ค่าเฉลี่ย	69.21	59.95	67.68	47.32
	ส่วนเบี่ยงเบน	28.18	33.30	34.45	31.32
ช่วง		9.11-96.57			
ค่าเฉลี่ย		61.04			
ส่วนเบี่ยงเบน		29.90			
ใบสับปะรด	5	78.95	81.46	91.30	72.31
	10	72.80	59.10	71.68	50.00
	20	44.80	33.13	39.53	31.72
	50	18.77	9.04	12.64	11.53
	ช่วง	18.77-78.95	9.04-81.46	12.64-91.30	11.53-72.31
	ค่าเฉลี่ย	53.83	45.68	53.79	41.39
	ส่วนเบี่ยงเบน	27.70	31.42	34.76	25.92
ช่วง		9.04-91.30			
ค่าเฉลี่ย		48.67			
ส่วนเบี่ยงเบน		27.52			
รวม	ช่วง	18.77-97.71	9.04-92.91	12.64-97.25	11.53-87.64
	ค่าเฉลี่ย	67.73	56.62	64.36	47.87
	ส่วนเบี่ยงเบน	27.92	29.94	31.63	27.42

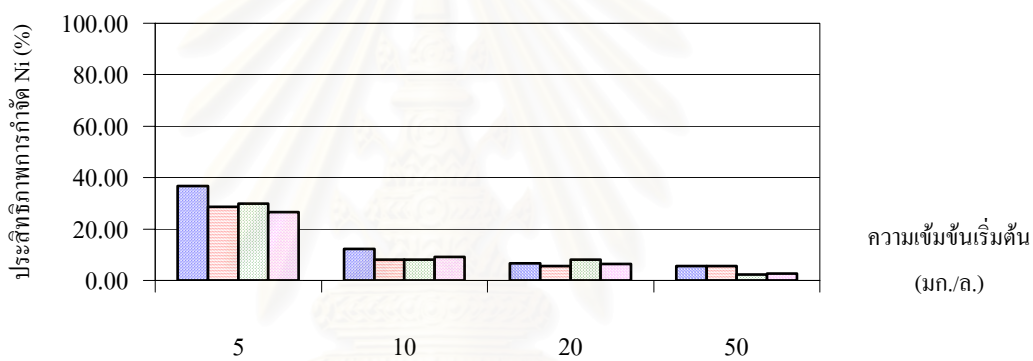
ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสัคงกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดการปรับสภาพ			
		ไม่ปรับสภาพ	ไฮโดรคลอริก	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%
กาบ มะพร้าว	5	99.44	82.19	84.43	84.85
	10	67.71	27.73	21.94	30.40
	20	37.03	26.74	29.56	27.70
	50	37.52	18.60	18.70	21.94
	ช่วง	37.03-99.44	18.60-82.19	18.70-84.43	21.94-84.85
	ค่าเฉลี่ย	60.42	38.81	38.66	41.22
	ส่วนเบี่ยงเบน	29.70	29.21	30.85	29.30
	ช่วง	18.60-99.44			
	ค่าเฉลี่ย	44.78			
	ส่วนเบี่ยงเบน	28.24			
ต้นมัน สำปะหลัง	5	85.27	76.16	81.77	80.79
	10	32.18	24.39	19.71	19.60
	20	28.04	20.97	20.29	20.52
	50	20.92	15.31	12.69	14.00
	ช่วง	2.092-85.27	15.31-76.16	12.69-81.77	14.00-80.79
	ค่าเฉลี่ย	41.60	34.21	33.62	33.73
	ส่วนเบี่ยงเบน	29.48	28.22	32.29	31.50
	ช่วง	12.69-85.27			
	ค่าเฉลี่ย	35.79			
	ส่วนเบี่ยงเบน	27.42			
ใบสับปะรด	5	75.04	70.97	73.49	69.71
	10	27.51	15.92	10.13	11.36
	20	25.16	15.66	12.61	9.16
	50	16.93	9.31	6.17	8.19
	ช่วง	16.93-75.04	9.31-70.97	6.17-73.49	8.19-69.71
	ค่าเฉลี่ย	36.16	27.96	25.60	24.60
	ส่วนเบี่ยงเบน	26.31	28.83	32.04	30.10
	ช่วง	6.17-75.04			
	ค่าเฉลี่ย	28.58			
	ส่วนเบี่ยงเบน	26.71			
รวม	ช่วง	16.93-99.44	9.31-82.19	6.17-84.43	8.19-84.85
	ค่าเฉลี่ย	46.06	33.66	32.63	33.18
	ส่วนเบี่ยงเบน	28.01	26.42	29.25	28.32

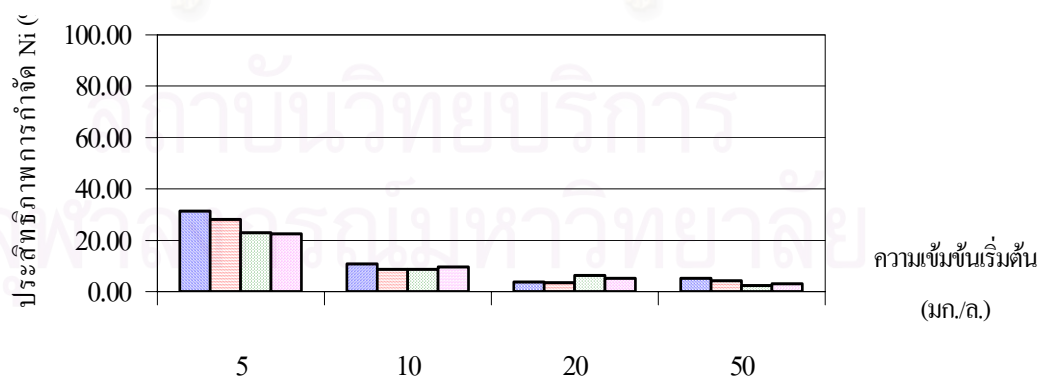
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง

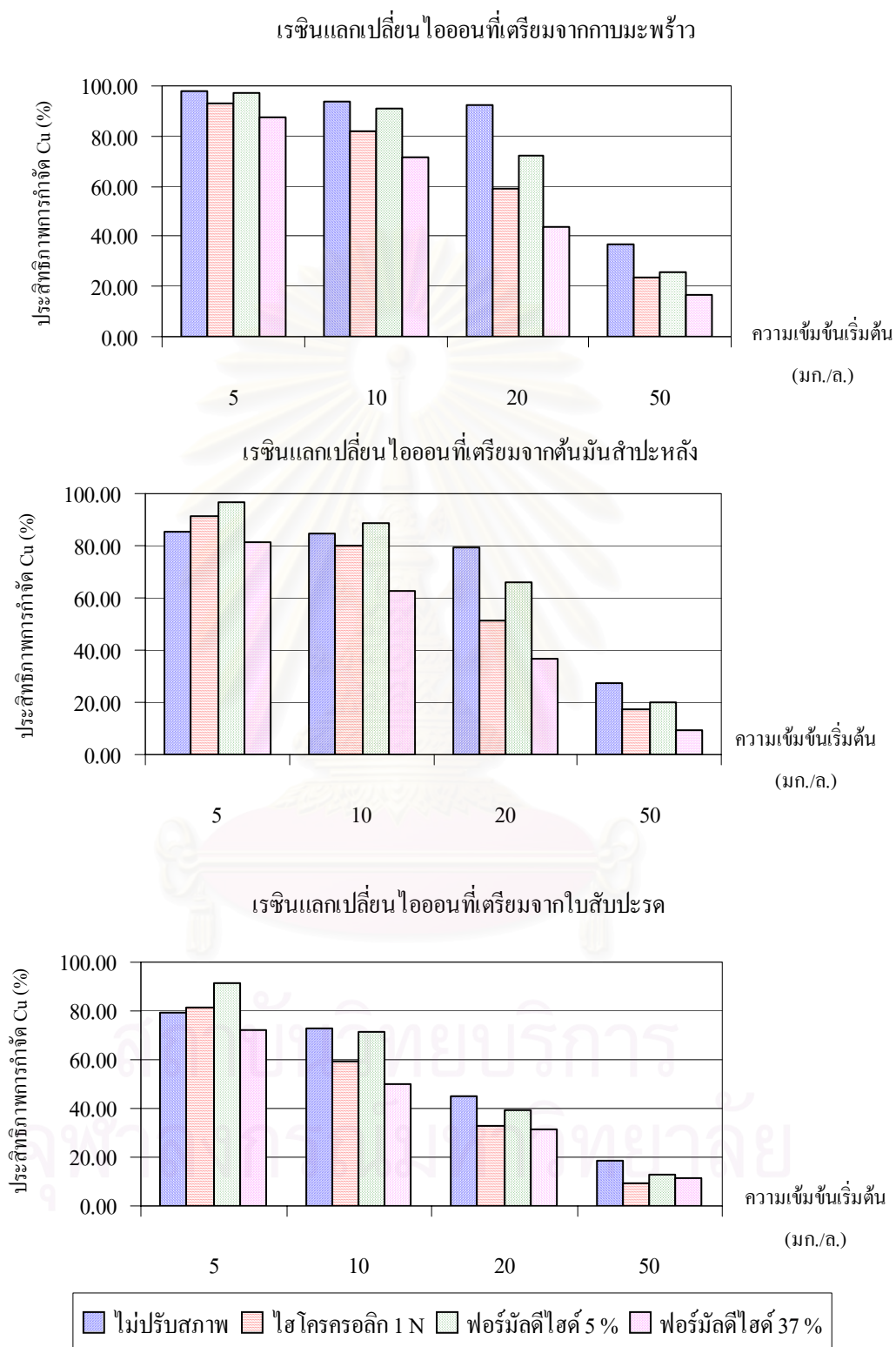


เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด

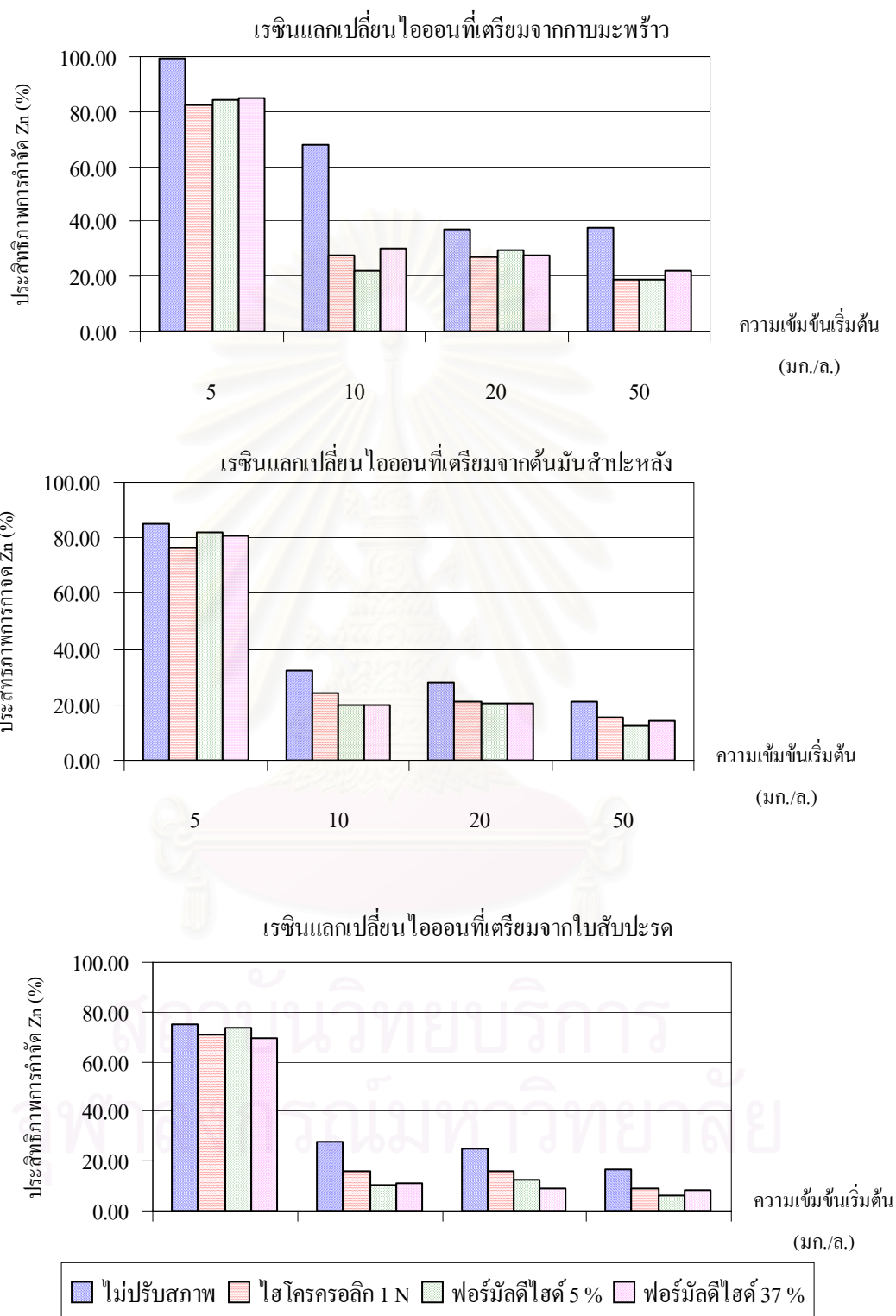


■ ไม่ปรับสภาพ
 ■ ไฮโครครอลิก 1 N
 ■ ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%
 ■ ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

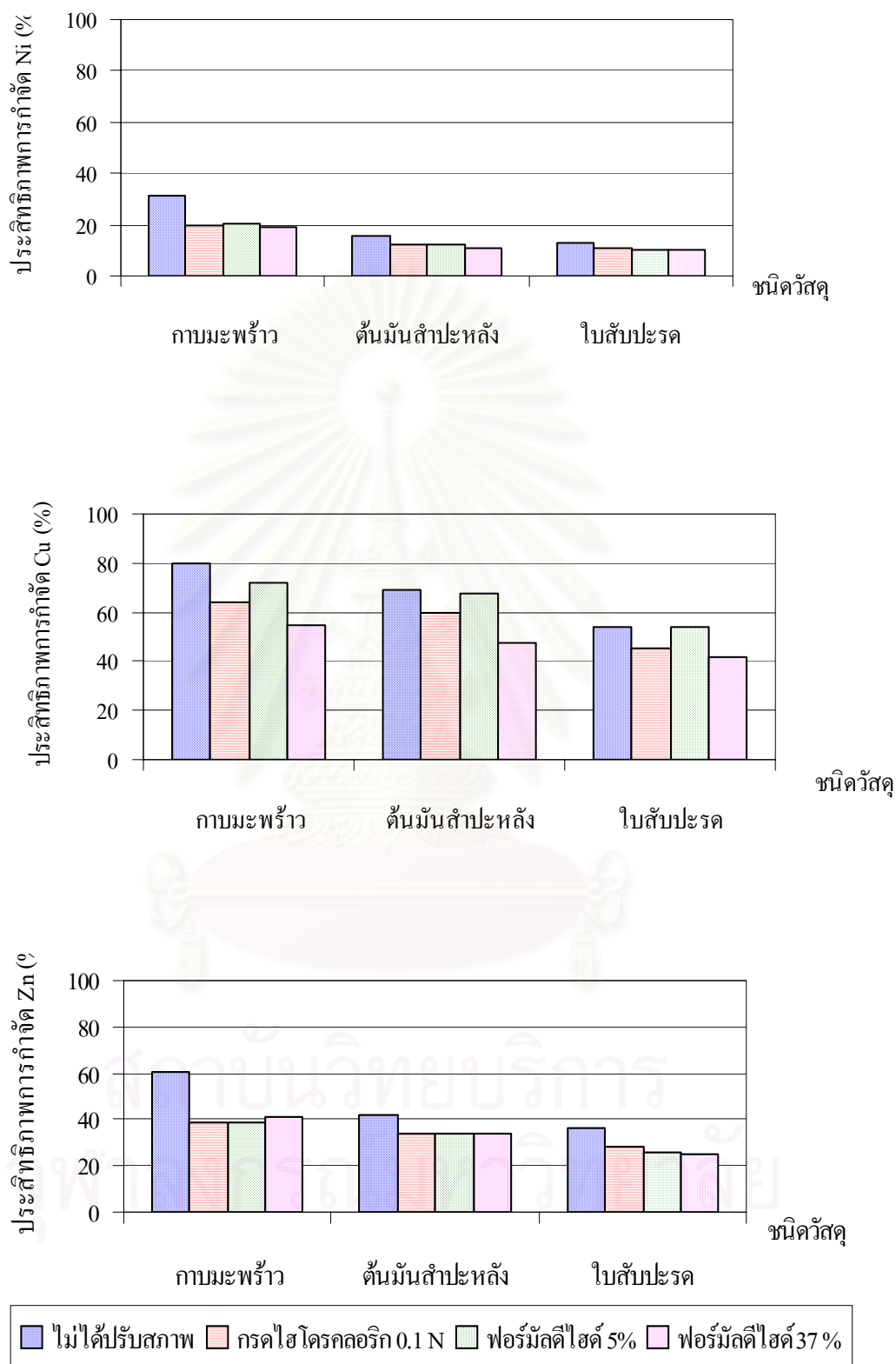
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์



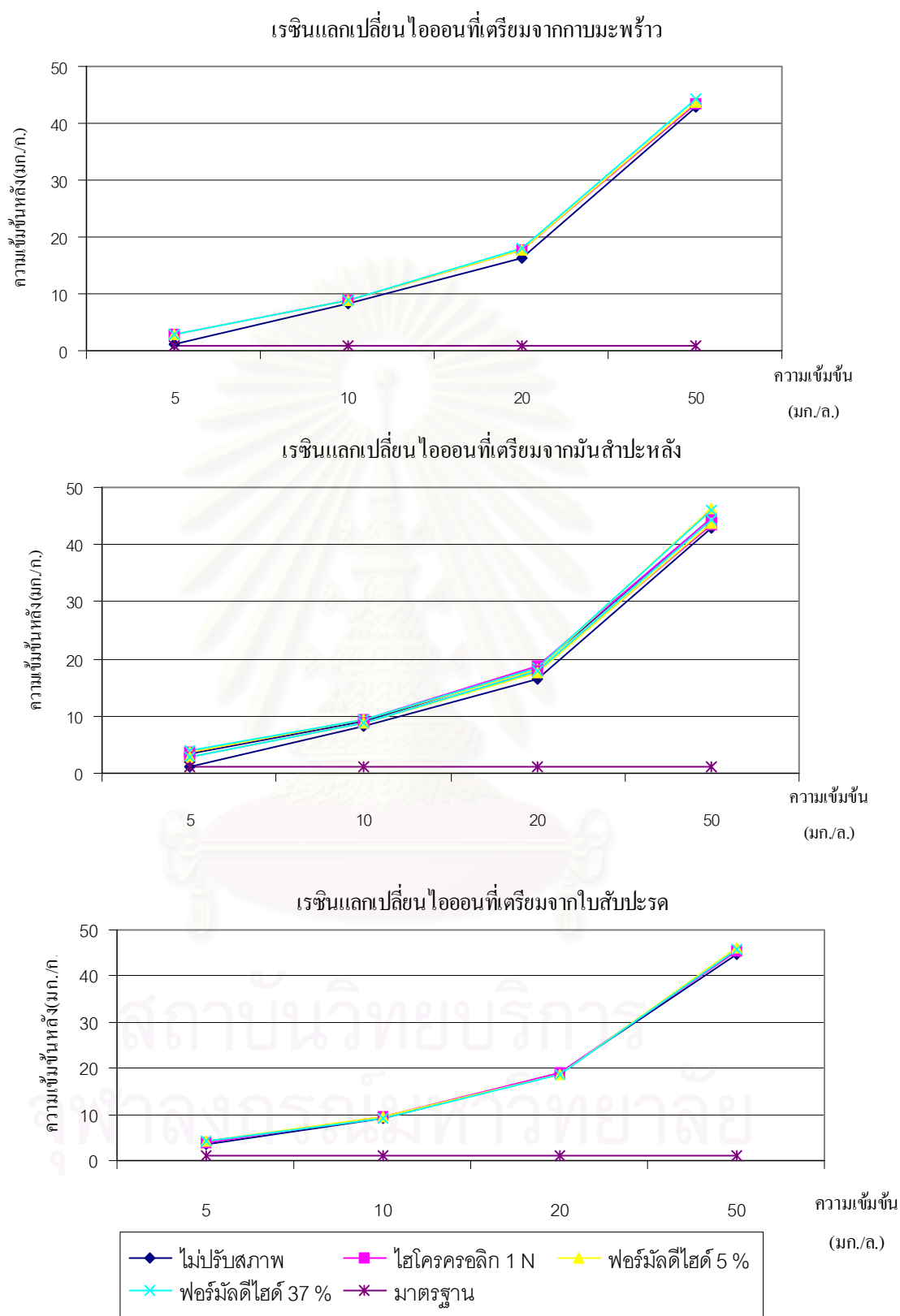
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์

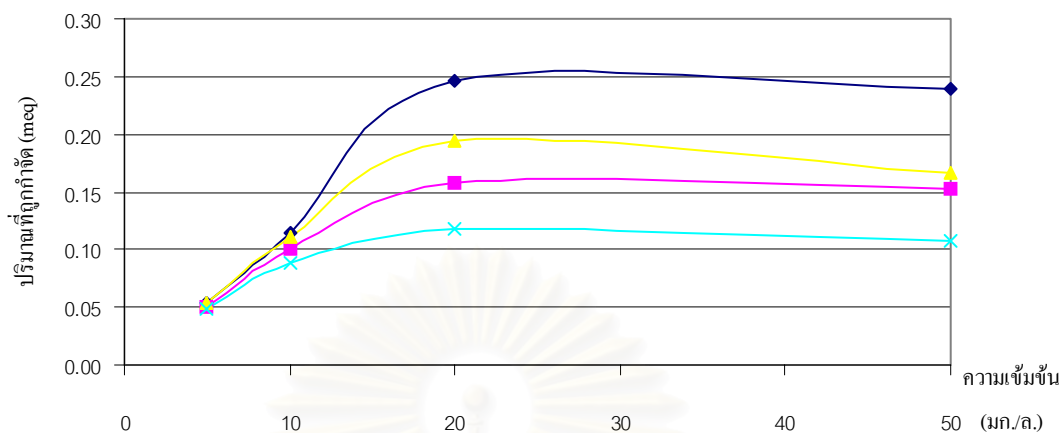


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

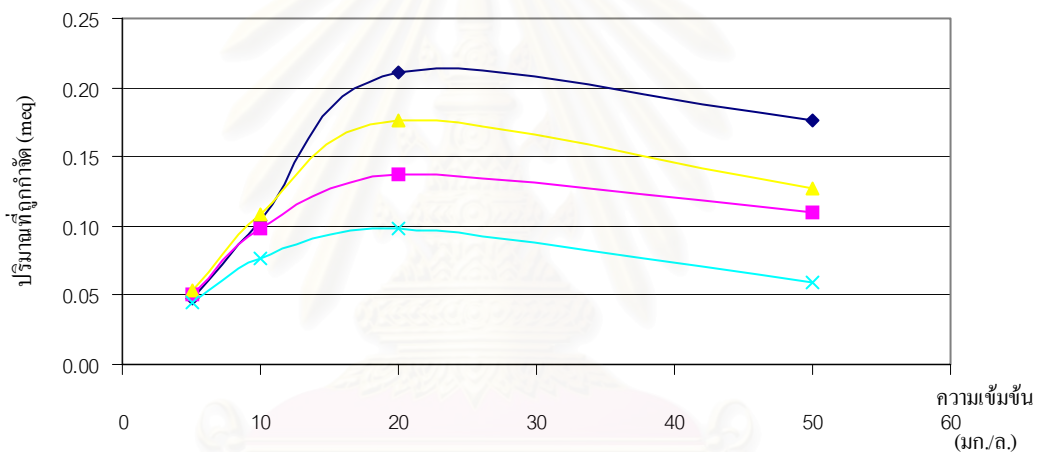


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกลำจัด

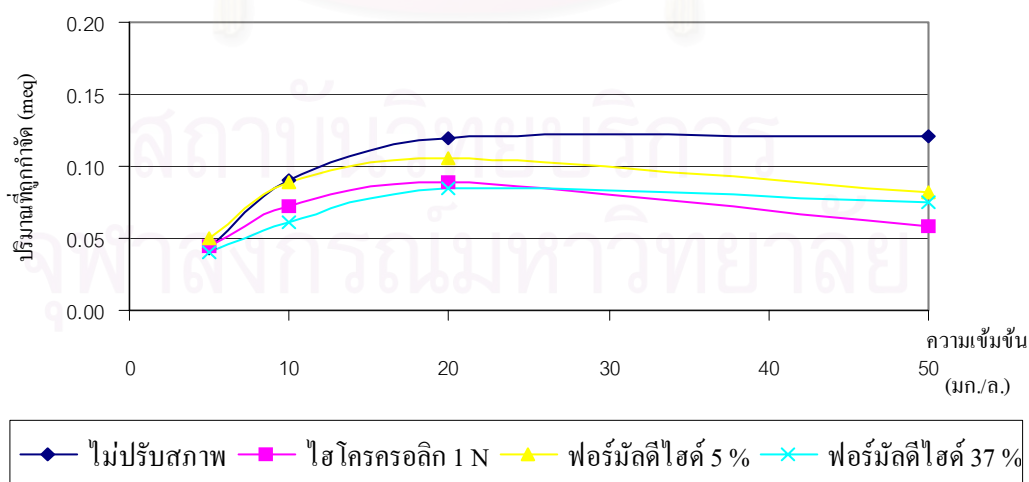
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง

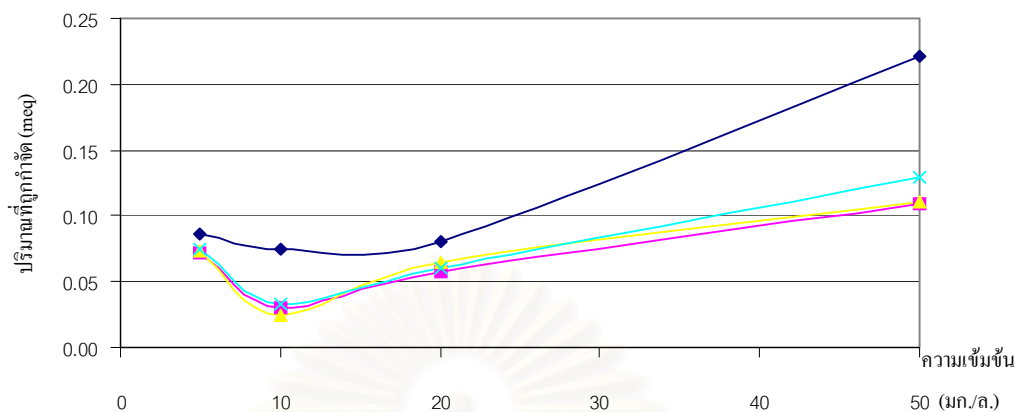


เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด

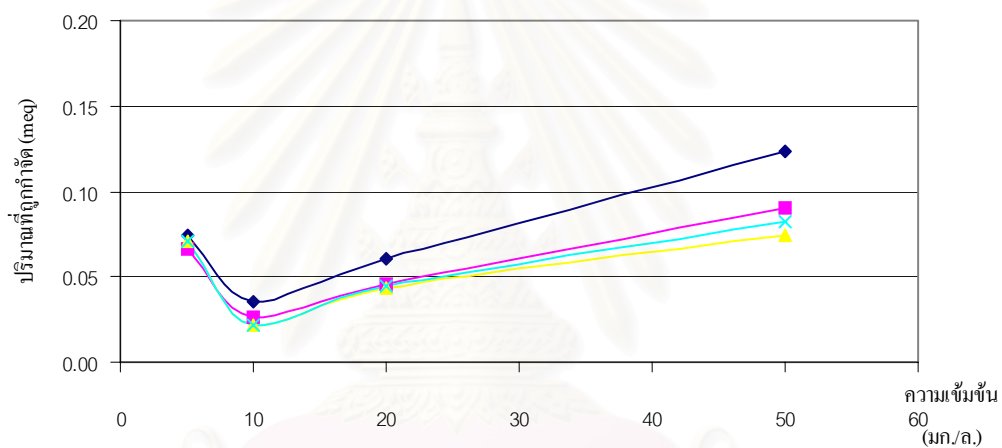


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด

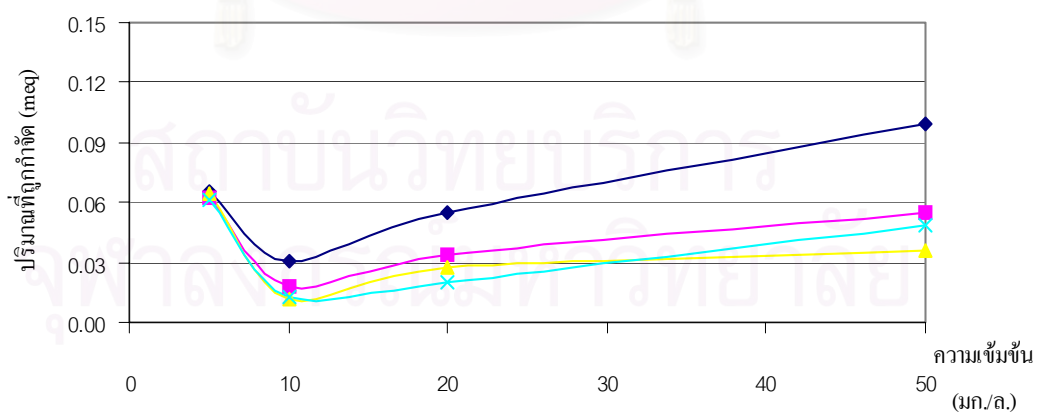
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว



เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง



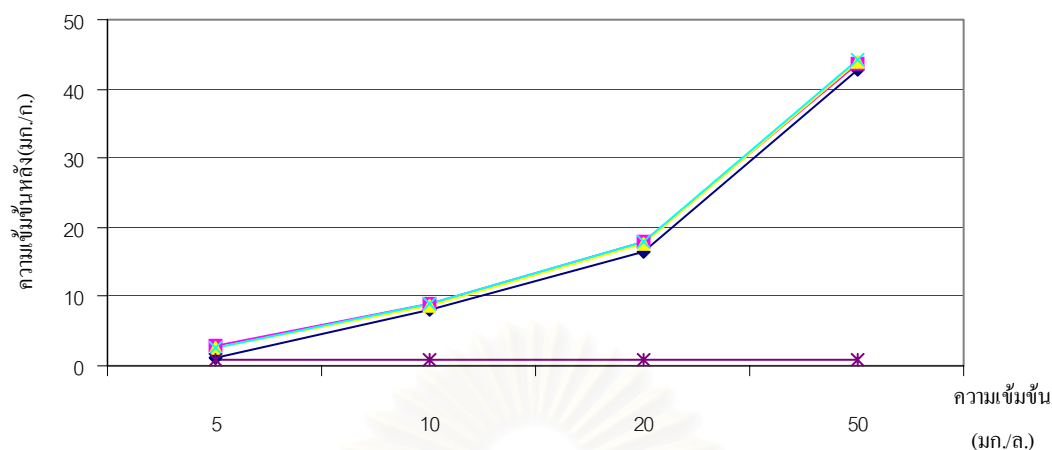
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับปะรด



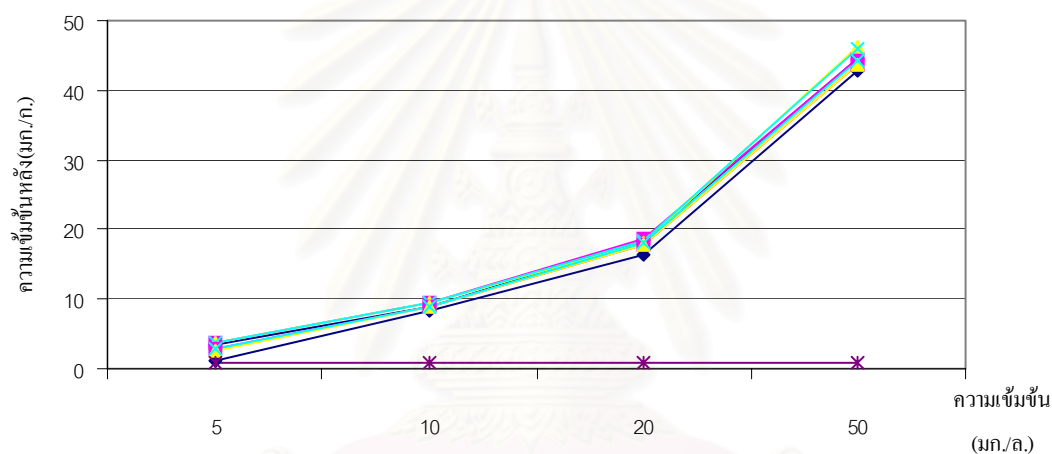
◆ ไม่ปรับสภาพ
 ■ ไฮโครครอลิก 1 N
 ▲ ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%
 × ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ถูกกำจัด

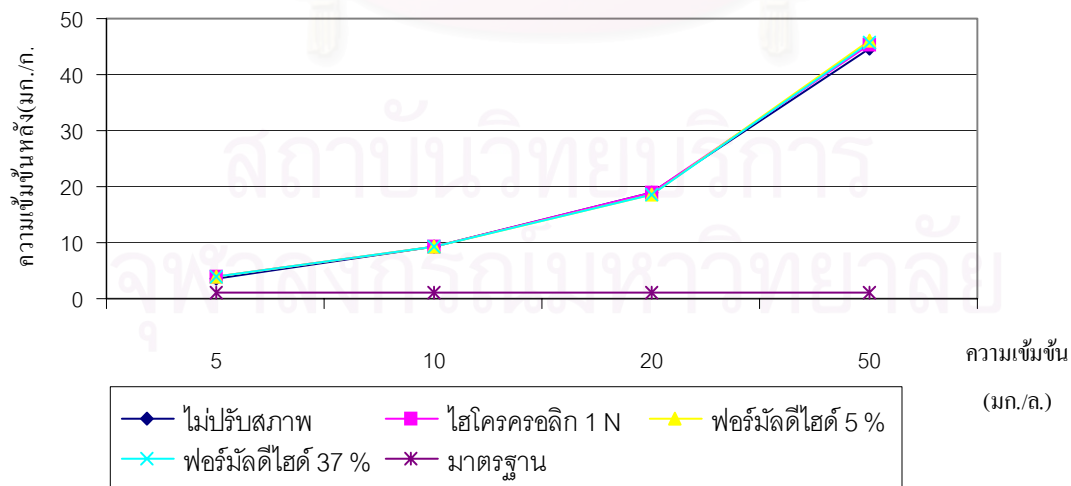
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว



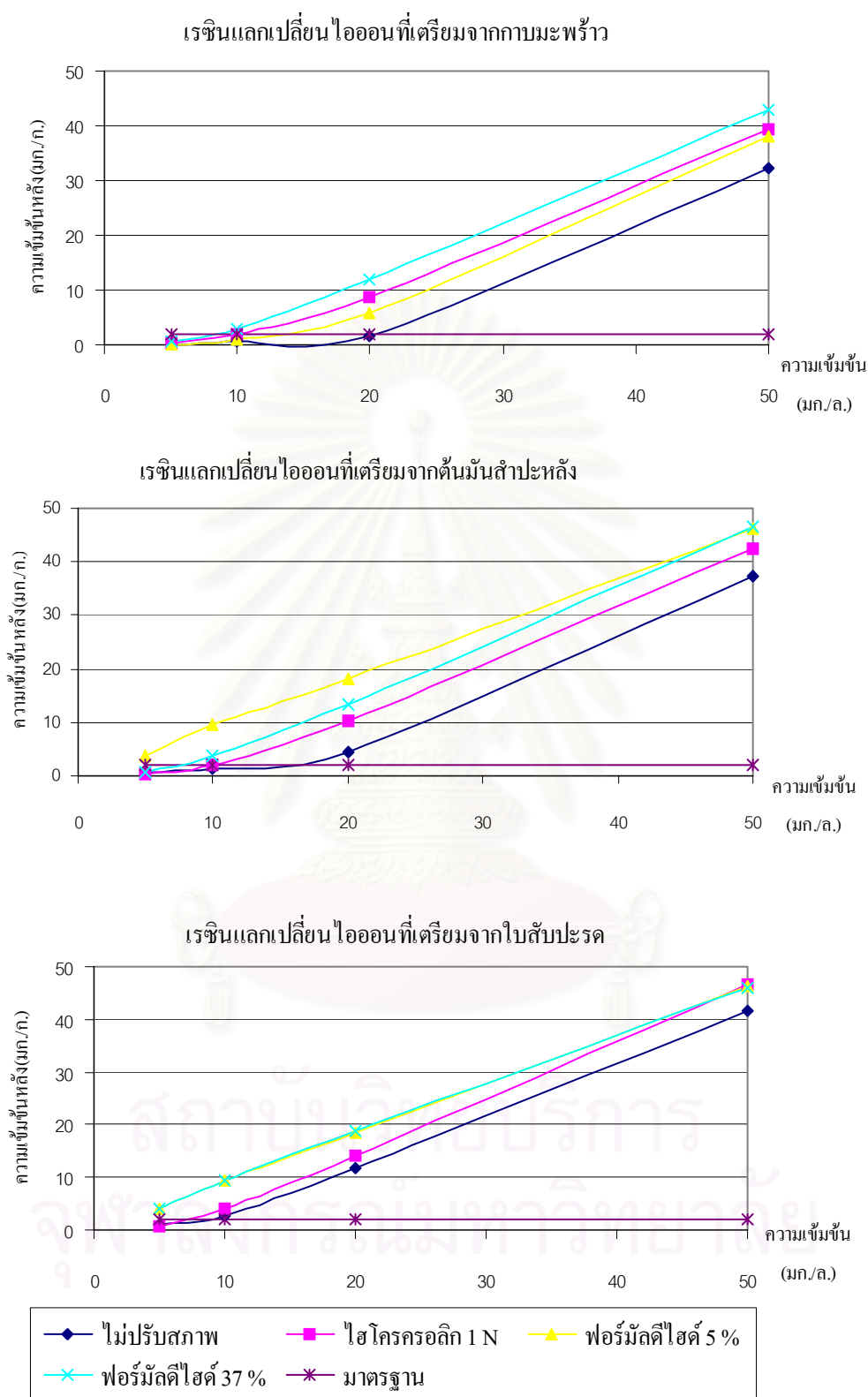
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากมันสำปะหลัง



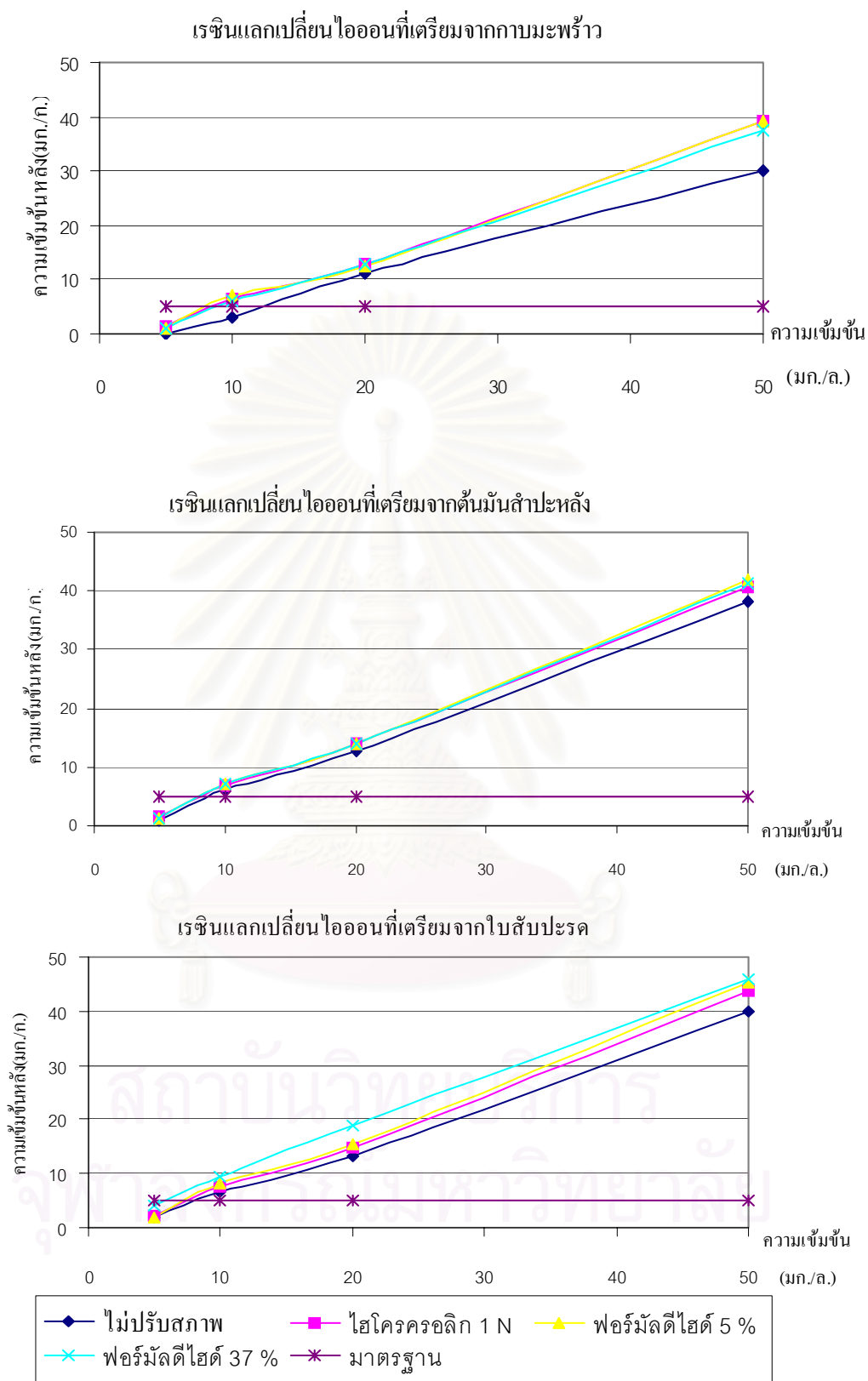
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับปะรด



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความเข้มข้นนิกเกิลภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความเข้มข้นทองแดงภายหลังการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความเข้มข้นสัณกะสีภายหลังการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

4.3 การศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน จะเห็นว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ จึงได้นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนดังกล่าว มาศึกษาหาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการเปลี่ยนไอออนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนให้อยู่ในรูปไฮโดรเจนไอออน แล้วจึงนำไปไทเทรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออน ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก จ.

จากผลการทดลอง พบว่าความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ เท่ากับ 4.91 meq/g.

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

ศึกษาการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนไปใช้ในการกำจัดน้ำเสียจริง โดยนำมาจากกระบวนการล้างชิ้นงาน ของโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง ซึ่งมีลักษณะสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 การทดลองทำโดยนำน้ำเสียปริมาตร 400 มิลลิลิตร มาปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 (เท่ากับ พีเอชที่ใช้ในการทดลองหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์) แล้วไปทำการทดลองแบบแบตช์ ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นกรองแยกเรซินแลกเปลี่ยนไอออนออกจากน้ำทิ้ง แล้วจึงนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดไปวัดหาความเข้มข้นโลหะที่เหลือ ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอนาไลเซอร์แบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย จากโรงงานชุบโลหะ

พารามิเตอร์	น้ำเสีย	เกณฑ์มาตรฐาน
พีเอช	9.62	5.5-9.0
นิเกิล (มก./ล.)	4.034	< 1.0
ทองแดง (มก./ล.)	3.930	< 2.0
สังกะสี (มก./ล.)	0.567	< 5.0

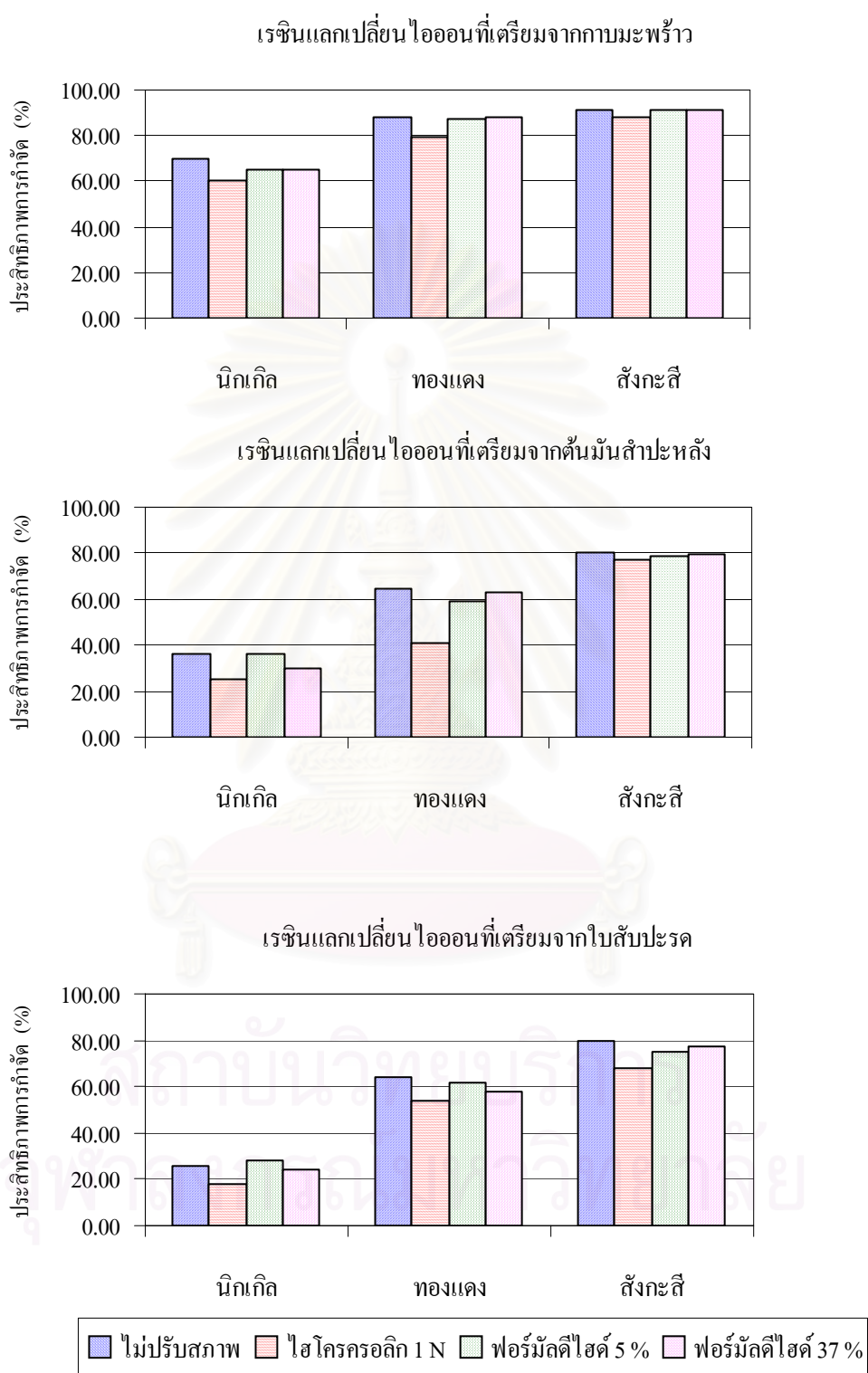
ผลของการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสียจริง แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงที่สุด เมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล และสังกะสี ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ในน้ำเสียสังเคราะห์ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดของโลหะหนักแต่ละชนิดต่ำกว่า เมื่อเทียบกับผลที่ได้มาจากการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 4.6 เปรูเซ็นต์ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

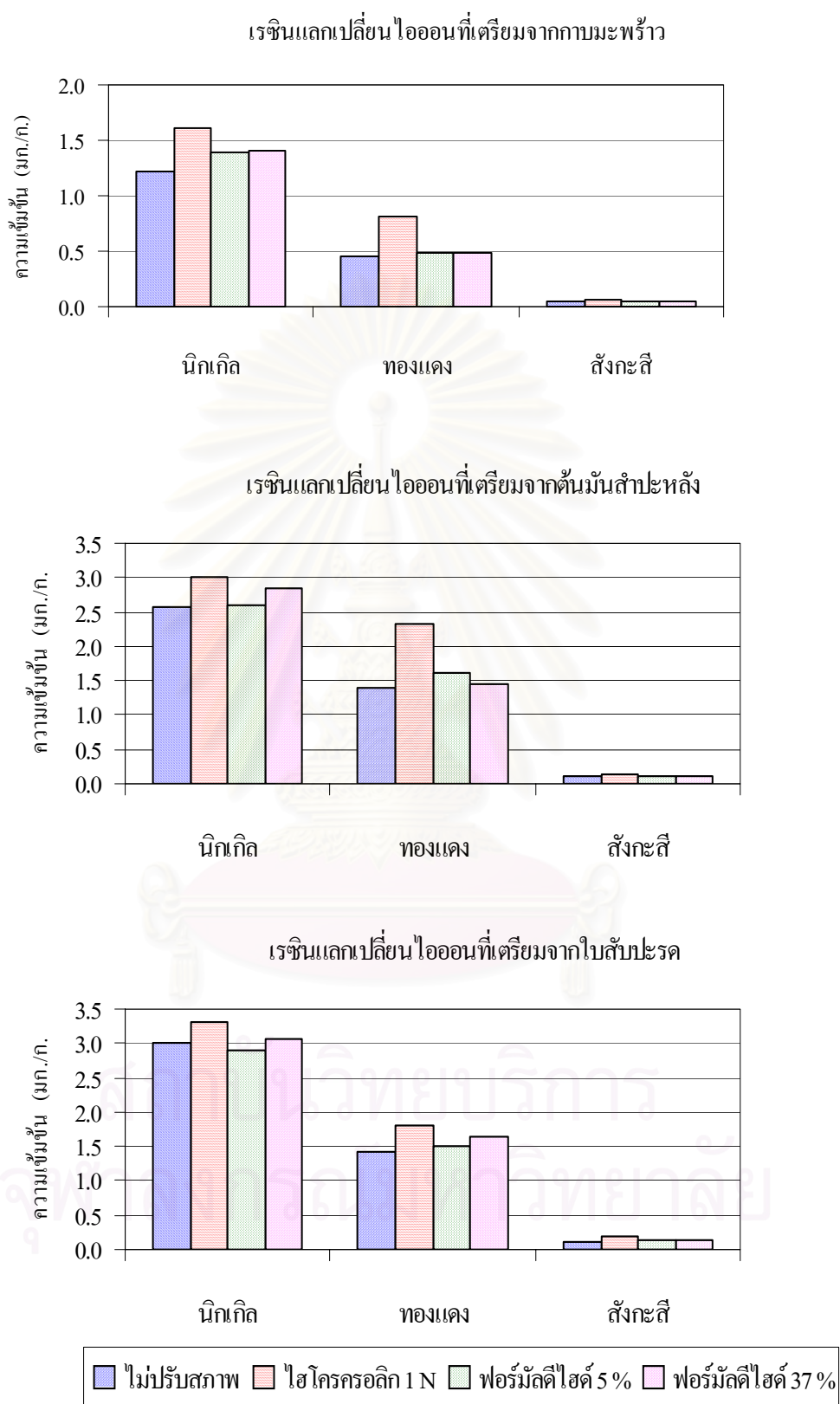
ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	69.76	88.47	91.18
	ไฮโครครอลิก 1 N	60.29	79.47	88.18
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	65.42	87.53	91.18
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	65.07	87.71	91.18
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	36.59	64.63	80.60
	ไฮโครครอลิก 1 N	25.36	40.71	77.07
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	35.89	58.78	78.84
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	29.72	63.36	79.37
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	25.53	63.87	79.37
	ไฮโครครอลิก 1 N	18.02	54.12	68.25
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	28.14	61.58	75.31
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	24.29	58.09	77.07

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือหลังจากกำจัดในน้ำเสียจริง

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	นิกเกิล	ทองแดง	สังกะสี
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	1.22	0.453	0.050
	ไฮโครครอลิก 1 N	1.602	0.807	0.067
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	1.395	0.490	0.050
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	1.409	0.483	0.050
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.558	1.390	0.110
	ไฮโครครอลิก 1 N	3.011	2.330	0.130
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.586	1.620	0.120
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.835	1.440	0.117
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	3.004	1.420	0.117
	ไฮโครครอลิก 1 N	3.307	1.803	0.180
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.899	1.510	0.140
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	3.054	1.647	0.130



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณโลหะหนักที่เหลือในเสี้ยวจริง

เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำทิ้ง ดังสรุปในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.12 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ทุกชนิดการปรับสภาพ สามารถกำจัดทองแดง ให้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน น้ำทิ้งได้ แต่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิดไม่สามารถกำจัดนิกเกิลให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนปริมาณสังกะสีที่มีอยู่ในน้ำเสียจริงมีปริมาณน้อยมาก และผ่านเกณฑ์มาตรฐานอยู่แล้ว

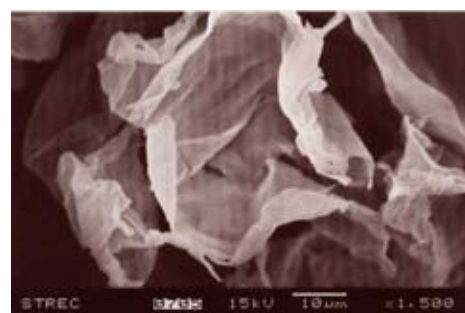
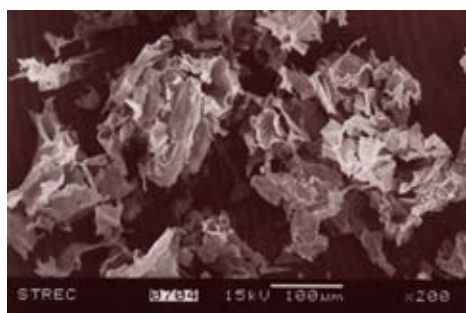
4.5 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

4.5.1 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

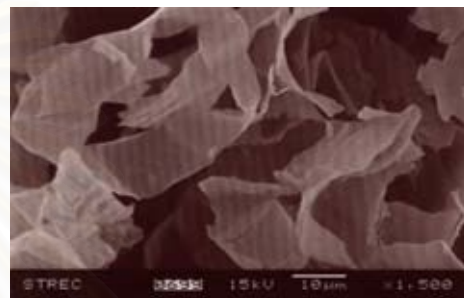
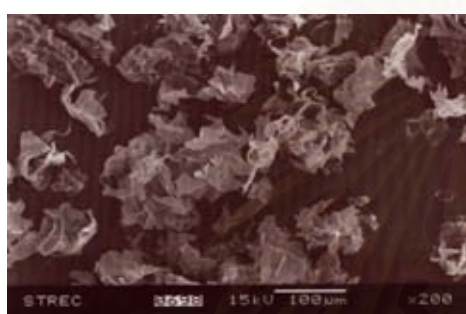
ผลการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ต้นมัน ลำปะหลัง และใบสับปะรด ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพ ด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่กำลังขยาย 200 และ 1500 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 รูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว มีลักษณะพื้นที่ผิวที่บางมาก และมียอดลึกลงไปข้างในมากกว่า ต้นมันลำปะหลัง และใบสับปะรด และจากการพิจารณาถึงชนิดของการปรับสภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งสามชนิดที่นำมาทำการปรับสภาพจะพบว่าชนิดที่เป็นผงบดละเอียดโดยที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพใดๆ จะมีลักษณะหนาและร่องไม่ลึกมาก แต่เมื่อนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนซึ่งคือชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพจะเห็นว่าขนาดจะเล็กลงและบางมากขึ้นรวมทั้งมีลักษณะของร่องลึกกว่าที่ยังแห้งอยู่ และลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุที่ปรับสภาพทั้ง 3 ชนิด จะพบว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย 5% สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ และปรับสภาพด้วย 37% สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ จะมีลักษณะร่องลึกกว่าและบางกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย 1 N HCl จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่น้อยกว่าที่ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนอย่างเดียว การที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมแสดงว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนก็มีพื้นที่ในการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนย่อมมากกว่าวัสดุที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

4.5.2 พื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

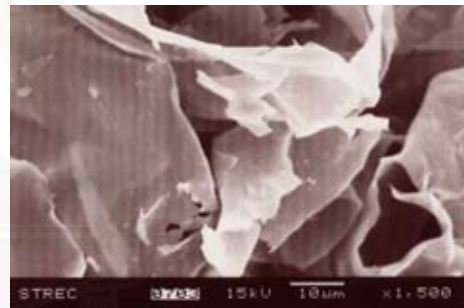
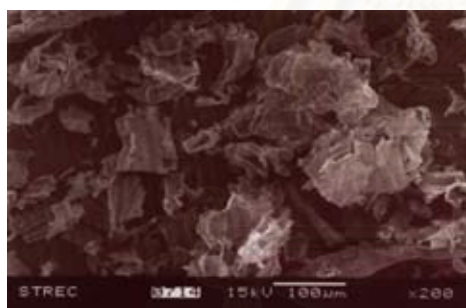
ผลการศึกษาหาปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยน โดยใช้ BET Method และ BJH Method ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า พื้นที่ผิวที่ได้จาก BET Method มีค่าพื้นที่ผิวสูงกว่า BJH Method เพราะ BET Method คิดค่ากระจายรูพรุนทั้งหมด ใช้หลักการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนผิวของแข็ง โดยที่ก๊าซไนโตรเจนมีขนาดโมเลกุล 2.1976 \AA^0 ดังนั้นค่าพื้นที่ผิวที่ได้จาก BET Method จึงเป็นค่าจากขนาดรูพรุนตั้งแต่ 2.1976 \AA^0 ขึ้นไป ส่วนพื้นที่ผิวที่ได้



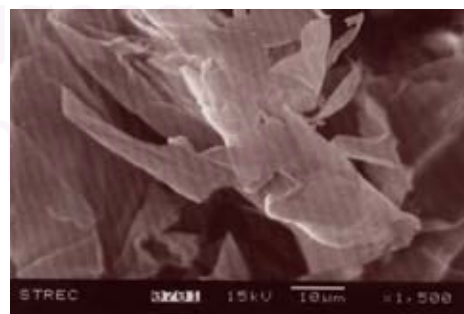
ไม่ได้ปรับสภาพ



ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก



ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

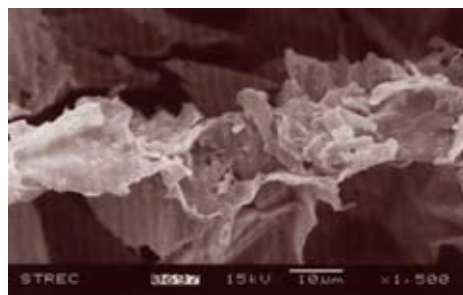
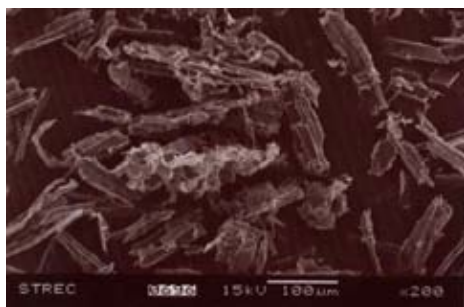


ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

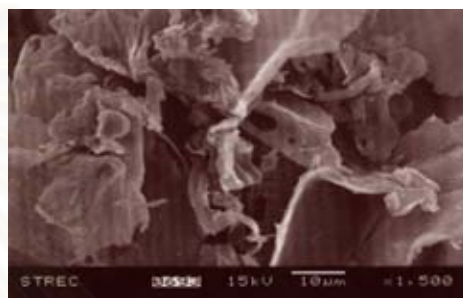
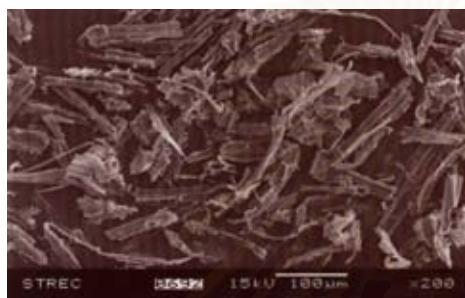
กำลังขยาย 200 เท่า

กำลังขยาย 1500 เท่า

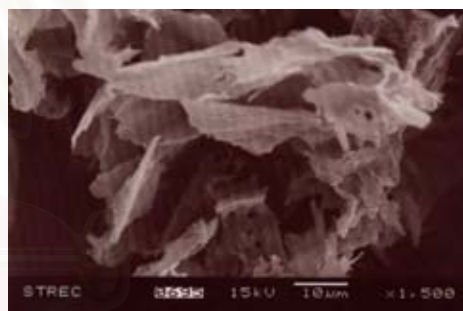
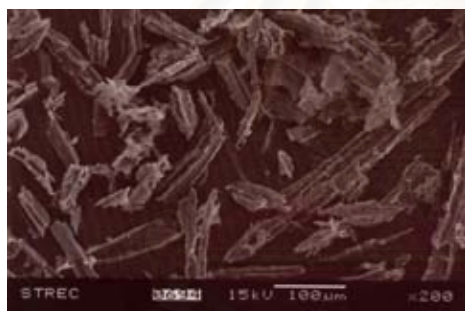
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกามมะพร้าว



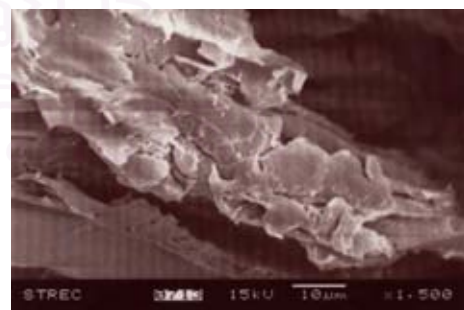
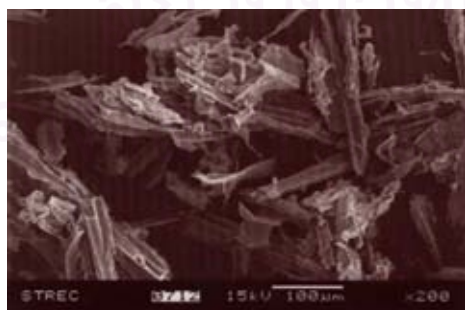
ไม่ได้ปรับสภาพ



ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก



ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

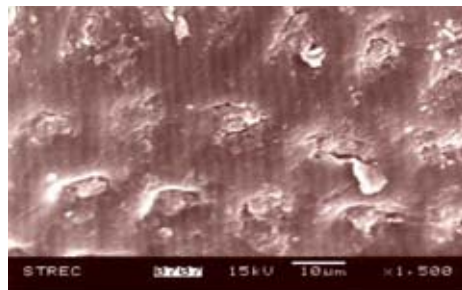
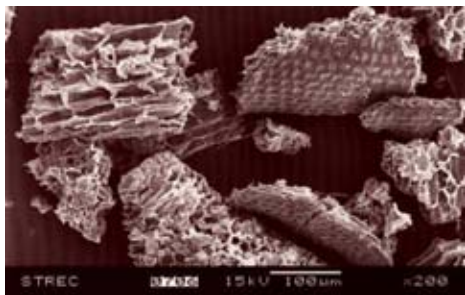


ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

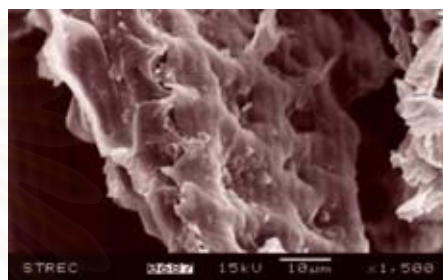
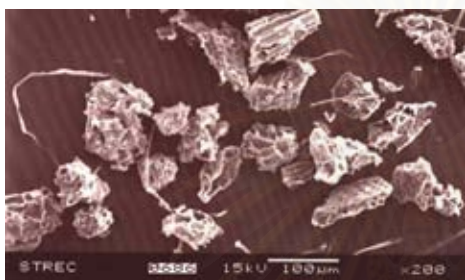
กำลังขยาย 200 เท่า

กำลังขยาย 1500 เท่า

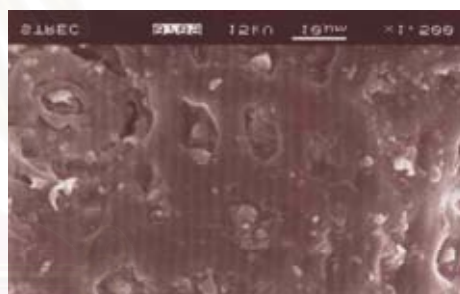
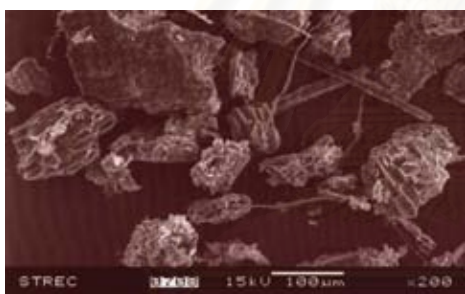
รูปที่ 4.14 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำต้นมันสำปะหลัง



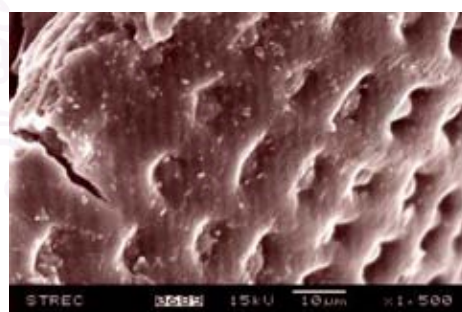
ไม่ได้ปรับสภาพ



ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก



ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 5%



ปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

กำลังขยาย 200 เท่า

กำลังขยาย 1500 เท่า

รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำไบสับประรด

ตารางที่ 4.8 ปริมาณพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	1*	2*	3*	4*	5*
กาบ มะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	6.6818	4.6729	4.7691	55.5226	67.1383
	กรดไฮโดรคลอริก	6.5684	4.6894	4.7807	58.2516	69.4148
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	7.8396	5.74447	6.3670	64.6857	77.3700
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	5.8877	7.9055	8.0854	68.2843	53.3943
ต้นมัน ลำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	4.4336	3.0884	3.0955	52.8060	63.6959
	กรดไฮโดรคลอริก	6.3500	4.4813	4.5793	54.5998	65.4536
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	4.9860	3.5924	3.6765	59.2948	70.5350
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	5.7855	4.1355	4.1915	56.6938	57.5765
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	4.1155	2.6853	2.7779	46.9122	57.7765
	กรดไฮโดรคลอริก	4.8633	3.2743	3.2888	47.6007	57.7122
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	4.4461	3.1029	3.1247	50.5423	59.2619
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	4.5761	3.1165	3.1861	49.2986	59.4889

1* หมายถึง BET Surface Area, sq.m./g.

2* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Surface Area, sq.m./g.

3* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Pore Volume, cc/g.

4* หมายถึง Average Pore Diameter (4V/A By BET), A⁰

5* หมายถึง BJH Adsorption Average Pore Diameter (4V/A), A⁰

จาก BJH Method ไม่คิดค่าการกระจายในรูพรุนขนาดเล็ก คือ วัดการกระจายในรูพรุนขนาดระหว่าง 17-3000 A⁰

จากตารางที่ 4.8 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เนื่องจากกระบวนการในการกำจัดโลหะหนักเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ไม่ได้เป็นการดูดซับโลหะหนักซึ่งสอดคล้องกับผลของไอโซเทอมที่กล่าวมาแล้ว แสดงให้เห็นว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมีกลไกหลักคือเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย แต่ก็มีกลไกการดูดซับเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย

4.5.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ผลการศึกษาหาค่าความถ่วงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ในตารางที่ จ.1-3) โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง และนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9 เมื่อพิจารณาค่าความถ่วงจำเพาะในแต่ละการปรับสภาพ จะเห็นว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว มีค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากดินมันสำปะหลัง และไบสับปะรด และเมื่อพิจารณาผลของการปรับสภาพที่มีต่อค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการปรับสภาพด้วยสารเคมี ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงไปของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน อาจเนื่องมาจากสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ ทำให้เกิดการครอสลิงค์ (crosslink) ในโครงสร้างของเซลลูโลส จึงทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น

4.5.4 การบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากตารางที่ 4.9 พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพมีค่าการบวมน้ำมากที่สุด ในทุกชนิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการปรับสภาพจะทำให้การบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลดลง และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ มีการบวมน้ำสูงที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี และผลการทดลองหาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ การพองตัวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน จะขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ถ้าการพองตัวเกิดจากการเก็บน้ำไว้ในตัวของสารเรซิน กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration) ของไอออนในโครงสร้างตาข่ายของเรซิน ดังนั้นปริมาณของน้ำที่ถูกเก็บกักไว้ หรือการบวมน้ำ จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (นันทนา, 2538) นอกจากนี้ การบวมน้ำยังขึ้นอยู่กับ ชนิดของสารตัวทำละลาย สารที่เข้าทำปฏิกิริยากับเรซิน ปริมาณการ ครอสลิงค์ (crosslink) ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ เป็นต้น

ตารางที่ 4.9 ค่าความถ่วงจำเพาะ และการบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดวัสดุ	การปรับสภาพ	ความถ่วงจำเพาะ	การบวมน้ำ
กามมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	1.0022	1.735
	กรดไฮโดรคลอริก	1.0025	1.745
	ฟอร์мальดีไฮด์ 5%	1.0037	1.650
	ฟอร์мальดีไฮด์ 37%	1.0045	1.646
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	1.0019	1.416
	กรดไฮโดรคลอริก	1.0020	1.403
	ฟอร์мальดีไฮด์ 5%	1.0035	1.360
	ฟอร์мальดีไฮด์ 37%	1.0040	1.323
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	1.0014	1.384
	กรดไฮโดรคลอริก	1.0018	1.363
	ฟอร์мальดีไฮด์ 5%	1.0033	1.316
	ฟอร์мальดีไฮด์ 37%	1.0042	1.286

4.5.5 ลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การศึกษาลักษณะโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกามมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์мальดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์мальดีไฮด์ 37% ด้วยเครื่อง FT-IR แสดงถึงผลของการปรับสภาพที่มีต่อหมู่ฟังก์ชันของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (รูปที่ ๑.1 - ๑.3)

ผลการศึกษาโครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุ ทั้ง 3 ชนิด และทุกชนิดการปรับสภาพมีหมู่โครงสร้างหลัก เหมือนกันคือ หมู่ -OH (3753-3000) C-H stretching (3000-2853) $-\text{COO}^-$ (1707-1582) C-C multiple bond stretching (1573-1493) และ C-O-C (100-914) เมื่อพิจารณาความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชัน พบว่า หมู่โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งแสดงว่าการปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างน้อย และการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR ไม่สามารถแสดงความแตกต่างของหมู่ฟังก์ชันของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างชัดเจน ซึ่งถ้าจะใช้ปริมาณบอกความแตกต่างนั้น จะต้องทำกราฟมาตรฐานและต้องทราบน้ำหนักวัสดุที่ใช้อย่างแน่นอน แต่จากการทดลองไม่ได้ทำเพื่อที่จะหาปริมาณแต่ทำเพื่อหาโครงสร้างของสารแต่ละชนิดเท่านั้น

4.6 การประมาณการค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

จากผลการศึกษา พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มในการนำไปใช้ในการกำจัดทองแดง และสังกะสี ที่ความเข้มข้นต่ำได้ จึงได้นำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว มาคำนวณหาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ (คิดเฉพาะค่าสารเคมี และค่าน้ำปราศจากไอออน ที่ใช้ในการล้าง) ประมาณ 20 บาทต่อกิโลกรัมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน จากการทดลองใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 2 กรัม ในการบำบัดน้ำเสีย 400 มิลลิลิตร ดังนั้น ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ประมาณ 100 บาท (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ช.)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยจะทดลองเปรียบเทียบชนิดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้และชนิดของการปรับสภาพของวัสดุที่ใช้ทดลองนี้ คือ กาบมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด โดยทำการทดลองเปรียบเทียบทั้งชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพคือจะล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนอย่างเดียวกับชนิดที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล ชนิดที่ปรับสภาพด้วย สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 37% โดยทำการทดลองแบบ Batch โลหะที่นำมาศึกษา คือ ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. จากผลการศึกษาลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในการวิจัยนี้พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ทั้งหมดคือ กาบมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด จะพบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวของกาบมะพร้าวจะมีลักษณะที่บางมากๆ และมีร่องลึกลงไปข้างในมากกว่า ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด และจากการพิจารณาถึงชนิดของการปรับสภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งสามชนิดที่นำมาทำการปรับสภาพจะพบว่าชนิดที่เป็นผงบดละเอียดโดยที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพใดๆ จะมีลักษณะหนาและร่องไม่ลึกมาก แต่เมื่อนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจะเห็นว่าขนาดจะเล็กลงและบางมากขึ้นรวมทั้งมีลักษณะของร่องลึกกว่าที่ยังแห้งอยู่ และพื้นที่ผิวของที่ปรับสภาพทั้ง 3 ชนิด จะพบว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 37% จะมีลักษณะร่องลึกกว่าและบางกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่ก็น้อยกว่าที่ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนอย่างเดียว

2. ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

2.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากที่สุด รองลงมาคือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรดตามลำดับ

2.2 ผลการปรับสภาพ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากกว่าชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

2.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนทุกชนิด สามารถกำจัดทองแดงได้มากที่สุด รองลงมาคือ สังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ โดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 22.55%, 67.72% และ 44.78% ตามลำดับ

2.4 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสียเพิ่มขึ้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงที่สุด และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง

2.5 กลไกในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน มีกลไกหลักคือ การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน กับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย ทำให้พีเอชของน้ำที่ผ่านการกำจัดโลหะหนักเปลี่ยนแปลงไป และอาจมีกลไกการดูดซับผิวเกิดร่วมด้วย โดยกลไกการดูดซับผิวเป็นไปตามสมการไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

3. จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของถั่วมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด เปรียบเทียบชนิดในการปรับสภาพจะพบว่าชนิดที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล ซึ่งพบว่าถั่วมะพร้าวมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง สังกะสีและนิกเกิล ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่ากับ 97.71% 99.4% และ 77.80% ตามลำดับ ต้นมันสำปะหลังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง สังกะสีและนิกเกิล เท่ากับ 85.58%, 85.27% และ 36.81% ตามลำดับ และใบสับปะรดมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง สังกะสีและนิกเกิล เท่ากับ 78.95%, 75.04% และ 31.31% ตามลำดับ

4. การนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากกระบวนการล้างชิ้นงานของโรงงานชุบโลหะ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากถั่วมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด ทุกชนิดการปรับสภาพ สามารถกำจัดทองแดง ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 3.930 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (2 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่ไม่สามารถกำจัดนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 4.034 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้

5. ลักษณะของพื้นผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างก่อนและหลังการนำไปปรับสภาพ มีการเปลี่ยนแปลงคือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากถั่วมะพร้าว มีลักษณะพื้นที่ผิวที่บางมาก และร่องลึกลงไปข้างในมากกว่า ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด และจากการพิจารณาถึงชนิดของการปรับสภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทั้งสามชนิดที่นำมาทำการปรับสภาพจะ

พบว่าชนิดที่เป็นผงบดละเอียดโดยที่ยังไม่ได้ทำการปรับสภาพใดๆ จะมีลักษณะหนาและร่องไม่ลึกมาก แต่เมื่อนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนซึ่งคือชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพจะเห็นว่าขนาดจะเล็กลงและบางมากขึ้นรวมทั้งมีลักษณะของร่องลึกกว่าที่ยังแห้งอยู่ และลักษณะพื้นที่ผิวของวัสดุที่ปรับสภาพทั้ง 3 ชนิด จะพบว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วยสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วย สารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ 37% จะมีลักษณะร่องลึกกว่าและบางกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล จึงทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่ก็น้อยกว่าที่ล้างด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนอย่างเดียว การที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าย่อมแสดงว่าเรซินแลกเปลี่ยน ไอออนก็มีพื้นที่ในการเกิดการแลกเปลี่ยน ไอออนย่อมมากกว่าวัสดุที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

6. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีแนวโน้มในการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียได้ คือ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ โดยมีค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซิน ประมาณ 20 บาทต่อกิโลกรัม และมีค่าใช้จ่ายในการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ประมาณ 100 บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า วัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย คือ กาบมะพร้าวชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ และน้ำเสียควรมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำๆ ไม่ควรเกิน 10 mg/l และในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นมากๆ ควรจะใช้กระบวนการทางเคมีบำบัดก่อน แล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

บทที่ 6

ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยนี้ พบว่า ยังมีสิ่งที่น่าสนใจควรศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจากการทดลองแบบแบตช์ที่ดี มีแนวโน้มสามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นควรทำการศึกษาหาประสิทธิภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ต่อไป
2. ศึกษาผลของความชอบในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี ในรูปสารประกอบต่างๆ และผลของการกำจัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหลายชนิดรวมกัน ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว
3. ศึกษาการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง โดยนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ หรือน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมาแล้ว แต่ยังคงมีปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง
4. ศึกษาความสามารถในการฟื้นอำนาจของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกาบมะพร้าว ที่ผ่านการนำไปกำจัดโลหะหนักแล้ว รวมทั้งศึกษาการนำโลหะหนักที่ได้จากการฟื้นอำนาจกลับไปใช้ใหม่
5. นำผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษาไปเปรียบเทียบกับ ผลการศึกษาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการปรับสภาพอื่นๆ เพื่อหาวัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่มีเหมาะสมที่สุดในการนำไปทดแทนเรซินสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกสร สุนทรเสรี. 2544. มะพร้าวต้นไม้แห่งชีวิต. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช.
- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ขวัญเนตร สบายใจ. 2542. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสีย้อม. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นันทนา อธิธิพรโกวิท. 2538. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลไฟเอทิล และโครอสส์ลิง-แซนเทตที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกฤต เลิศจรุสร่วมดี. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เลื่อยฟางข้าว และขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราณี พันธุสินชัย. 2532. มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ปัญญา ปรีชาพงศ์. 2530. การปลูกพืชไร่เมืองร้อน. กรมส่งเสริมการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์. กรุงเทพฯ .
- พิธิ กระสินธุ์ศรี. 2539. การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโนเซลลูโลสลิคพอร์มัลดีไฮน์ที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพชรพร เขาวกิจเจริญ, นิธิรัชต์ สงวนเดือน, เบญจพร บุญชยา, ปรีดา โรจนวิรุพห์ และ กิตติพงษ์ พงษ์กิตติหล้า. 2545. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาของประเทศไทย ครั้งที่ 3 18-19 กรกฎาคม 2545 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา : 435-436.

- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2529. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รัชนีย์ รุกขชาติ. 2544. การกำจัดสีในน้ำเสียโดยใช้ควอเตอร์ไนซ์โครอสส์ลิงก์เซลลูโลสที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับประด และกาบมะพร้าว. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Beker U.G., Guner F. S., Dizman M., and Erciyes A. T. 1999. Heavy metal removal by ion exchanger based on hydroxyethyl cellulose. Journal of Applied Polymer Science 74: 3501-3506.
- Brown Lamay Bursten. 1977. Chemistry The Central Science, Seventh edition. Prentice-Hall Inc.
- Dorfner, K. 1977. Ion Exchanger Properties and Application. AnnArbor Science,
- Larry, D.B., Joseph, F.J., and Barron, L.W. 1982. Process Chemistry for water and waste water treatment. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Marnon E., Sastre H. 1991. Heavy metal removal in packed beds using apple waste. Bioresource Technology 38 : 39 - 43.
- Marnon E., Sastre H. 1992. Preconcentration and removal of trace metals from water by apple waste. Bioresource Technology 40 : 73 76.
- Nakajima Akira, and Sakaguchi Takashi. 1990. Recovery and removal of uranium by using plant wastes. Biomass 21: 55-63.
- Tan W. T., Ooi S. T., and Lee C. K. 1993. Removal of Chromium(VI) from solution by coconut husk and plam pressed fibres. Environmental Technology 14: 227-282.
- Zoumpoulakis L, and Smitzis J. 2001. Ion exchange resins from phenol/formaldehyde resin-modified lignin. Polymer International 50 : 277 283.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กรมวิชาการเกษตร. 2526. มันสำปะหลัง. กรุงเทพมหานคร : กรมวิชาการเกษตร.
- ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี. 2538. การนำโลหะหนักเกิดกลับมาใช้ใหม่โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จารุพันธ์ ทองแถม. 2526. สับปะรดและอุตสาหกรรมสับปะรดในประเทศไทย. ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- จินดารัฐ วีระวุฒิ. 2541. สับปะรดและสารวิทยาการเจริญเติบโตของสับปะรด. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์เกษตรศาสตร์.
- ปราณี พันธุสินชัย. 2536. มลพิษอุตสาหกรรมเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธิศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2532. วิศวกรรมประปา. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Kruk-Othmer. 1981. Ion Exchange. 3rd ed. Encyclopedia of Chemical Technology 13 : 678 - 704.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

มาตรฐานปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
(ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2, 2539)

ลักษณะน้ำทิ้ง	ค่ามาตรฐาน
สังกะสี	ไม่มากกว่า 5.00 มก./ล.
โครเมียมประจุบวกหก	ไม่มากกว่า 0.25 มก./ล.
โครเมียมประจุบวกสาม	ไม่มากกว่า 0.75 มก./ล.
สารหนู	ไม่มากกว่า 0.25 มก./ล.
ทองแดง	ไม่มากกว่า 2.00 มก./ล.
ปรอท	ไม่มากกว่า 0.005 มก./ล.
แคดเมียม	ไม่มากกว่า 0.03 มก./ล.
แบเรียม	ไม่มากกว่า 1.00 มก./ล.
เซลเนียม	ไม่มากกว่า 0.02 มก./ล.
ตะกั่ว	ไม่มากกว่า 0.20 มก./ล.
นิกเกิล	ไม่มากกว่า 1.00 มก./ล.
แมงกานีส	ไม่มากกว่า 5.00 มก./ล.
อาร์เซนิก	ไม่มากกว่า 0.25 มก./ล.



ภาคผนวก ข.

ภาพเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ในการวิจัย

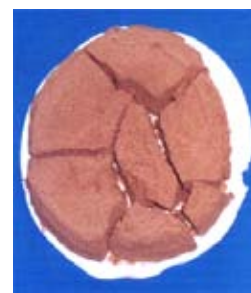
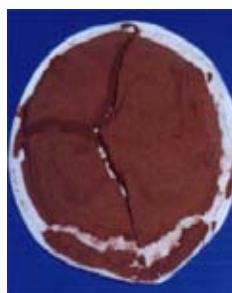
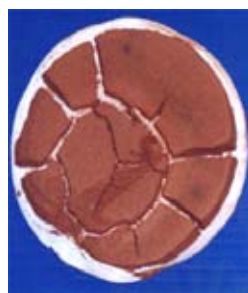
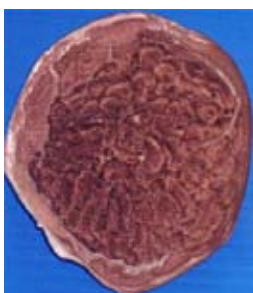
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ไม่ได้ปรับสภาพ

กรดไฮโดรคลอริก

ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%



รูปที่ ข.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากาบมะพร้าว

ไม่ได้ปรับสภาพ

กรดไฮโดรคลอริก

ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%



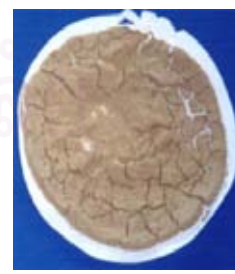
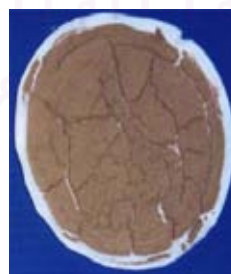
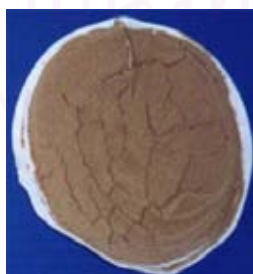
รูปที่ ข.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง

ไม่ได้ปรับสภาพ

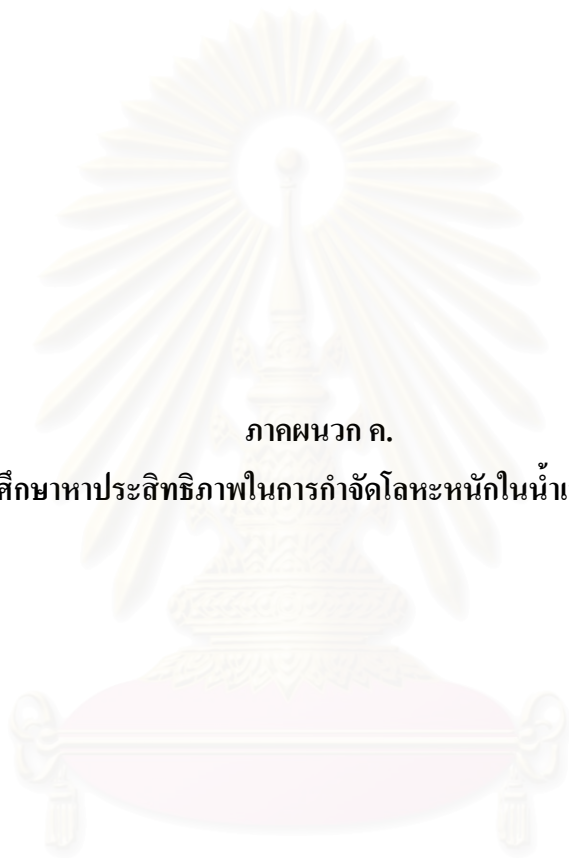
กรดไฮโดรคลอริก

ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%



รูปที่ ข.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากใบสับปะรด



ภาคผนวก ค.

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0072	5.27	1.17	0.0559	0.0278	77.80
		2.0004	10.31	8.21	0.0286	0.0143	20.37
		2.0027	19.75	16.4	0.0456	0.0228	16.96
		2.0007	47.28	42.86	0.0602	0.0301	9.35
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0048	5.27	2.82	0.0334	0.0167	46.49
		2.0000	10.31	8.9	0.0192	0.0096	13.68
		2.0168	19.75	17.81	0.0264	0.0131	9.82
		2.0046	47.28	43.54	0.0510	0.0254	7.91
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0061	5.27	2.72	0.0347	0.0173	48.39
		2.0010	10.31	8.78	0.0208	0.0104	14.84
		2.0111	19.75	17.69	0.0281	0.0140	10.43
		2.0062	47.28	43.82	0.0471	0.0235	7.32
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0034	5.27	2.74	0.0345	0.0172	48.01
		2.0064	10.31	8.87	0.0196	0.0098	13.97
		2.0114	19.75	17.96	0.0244	0.0121	9.06
		2.0112	47.28	44.23	0.0416	0.0207	6.45

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ดินมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0054	5.27	3.33	0.0264	0.0132	36.81
		2.0109	10.31	9.04	0.0173	0.0086	12.32
		2.0066	19.75	18.43	0.0180	0.0090	6.68
		2.0101	47.28	44.68	0.0354	0.0176	5.50
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0018	5.27	3.76	0.0206	0.0103	28.65
		2.0135	10.31	9.47	0.0114	0.0057	8.15
		2.0000	19.75	18.64	0.0151	0.0076	5.62
		2.0036	47.28	44.64	0.0360	0.0180	5.58
	ฟอรั้มลดีไฮด์ 5 %	2.0056	5.27	3.7	0.0214	0.0107	29.79
		2.0094	10.31	9.47	0.0114	0.0057	8.15
		2.0013	19.75	18.16	0.0217	0.0108	8.05
		2.0276	47.28	46.20	0.0147	0.0073	2.28
	ฟอรั้มลดีไฮด์ 37 %	2.0006	5.27	3.870	0.0191	0.0095	26.57
		2.0177	10.31	9.370	0.0128	0.0063	9.12
		2.0006	19.75	18.500	0.0170	0.0085	6.33
		2.0219	47.28	45.98	0.0177	0.0088	2.75

ตารางที่ ค.1 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	2.0000	5.27	3.62	0.0225	0.0112	31.31
		2.0028	10.31	9.21	0.0150	0.0075	10.67
		2.0096	19.75	19.02	0.0099	0.0049	3.70
		2.0126	47.28	44.8	0.0338	0.0168	5.25
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0017	5.27	3.79	0.0202	0.0101	28.08
		2.0202	10.31	9.41	0.0123	0.0061	8.73
		2.0204	19.75	19.04	0.0097	0.0048	3.59
		2.0209	47.28	45.3	0.0270	0.0134	4.19
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %	1.9981	5.27	4.06	0.0165	0.0083	22.96
		2.0076	10.31	9.41	0.0123	0.0061	8.73
		2.0315	19.75	18.51	0.0169	0.0083	6.28
		2.0088	47.28	46.17	0.0151	0.0075	2.35
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %	2.0031	5.27	4.09	0.0161	0.0080	22.39
		2.0038	10.31	9.31	0.0136	0.0068	9.70
		2.0059	19.75	18.75	0.0136	0.0068	5.06
		2.0031	47.28	45.87	0.0192	0.0096	2.98

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0013	4.37	0.1	0.0538	0.0269	97.71
		1.999	9.78	0.63	0.1152	0.0576	93.56
		2.0017	21.25	1.65	0.2468	0.1233	92.24
		1.9084	51.35	32.32	0.2396	0.1255	37.06
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0002	4.37	0.31	0.0511	0.0256	92.91
		2.0004	9.78	1.79	0.1006	0.0503	81.70
		2.0039	21.25	8.75	0.1574	0.0785	58.82
		2.011	51.35	39.29	0.1518	0.0755	23.49
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %	2.0015	4.37	0.12	0.0535	0.0267	97.25
		1.9925	9.78	0.9	0.1118	0.0561	90.80
		2.002	21.25	5.83	0.1941	0.0970	72.56
		2.0007	51.35	38.08	0.1671	0.0835	25.84
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %	1.9998	4.37	0.54	0.0482	0.0241	87.64
		2.0043	9.78	2.78	0.0881	0.0440	71.57
		2.0043	21.25	11.93	0.1173	0.0585	43.86
		2.0035	51.35	42.87	0.1068	0.0533	16.51

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ดินมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0081	4.37	0.63	0.0471	0.0234	85.58
		2.001	9.78	1.47	0.1046	0.0523	84.97
		2.0047	21.25	4.44	0.2116	0.1056	79.11
		2.0028	51.35	37.4	0.1756	0.0877	27.17
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.001	4.37	0.37	0.0504	0.0252	91.53
		2.0041	9.78	1.94	0.0987	0.0493	80.16
		2.0023	21.25	10.4	0.1366	0.0682	51.06
		2.0269	51.35	42.6	0.1102	0.0544	17.04
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %	2.0029	4.37	0.15	0.0531	0.0265	96.57
		2.001	9.78	1.14	0.1088	0.0544	88.34
		2.0012	21.25	7.22	0.1766	0.0883	66.02
		2.0026	51.35	41.2	0.1278	0.0638	19.77
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %	2.0013	4.37	0.83	0.0446	0.0223	81.01
		2.0048	9.78	3.66	0.0771	0.0384	62.58
		2.0039	21.25	13.48	0.0978	0.0488	36.56
		1.7143	51.35	46.67	0.0589	0.0344	9.11

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	2.0006	4.37	0.92	0.0434	0.0217	78.95
		2.0005	9.78	2.66	0.0896	0.0448	72.80
		2.2493	21.25	11.73	0.1199	0.0533	44.80
		2.002	51.35	41.71	0.1214	0.0606	18.77
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0002	4.37	0.81	0.0448	0.0224	81.46
		1.9973	9.78	4	0.0728	0.0364	59.10
		2.0065	21.25	14.21	0.0886	0.0442	33.13
		2.0009	51.35	46.71	0.0584	0.0292	9.04
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0044	4.37	0.38	0.0502	0.0251	91.30
		1.9994	9.78	2.77	0.0883	0.0441	71.68
		1.3653	21.25	12.85	0.1058	0.0775	39.53
		2.008	51.35	44.86	0.0817	0.0407	12.64
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0036	4.37	1.21	0.0398	0.0199	72.31
		2.0048	9.78	4.89	0.0616	0.0307	50.00
		2.0047	21.25	14.51	0.0849	0.0423	31.72
		2.0076	51.35	45.43	0.0745	0.0371	11.53

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0346	7.13	0.04	0.0868	0.0426	99.44
		2.0732	8.98	2.90	0.0744	0.0359	67.71
		2.0538	17.69	11.14	0.0802	0.0390	37.03
		2.0001	48.13	30.07	0.2210	0.1105	37.52
	ไฮโครรอลิก 1 N	2.0661	7.13	1.27	0.0717	0.0347	82.19
		2.0718	8.98	6.49	0.0305	0.0147	27.73
		2.0769	17.69	12.96	0.0579	0.0279	26.74
		2.0228	48.13	39.18	0.1095	0.0541	18.60
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.019	7.13	1.11	0.0737	0.0365	84.43
		2.0789	8.98	7.01	0.0241	0.0116	21.94
		2.12	17.69	12.46	0.0640	0.0302	29.56
		2.0929	48.13	39.13	0.1101	0.0526	18.70
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0035	7.13	1.08	0.0740	0.0370	84.85
		2.0342	8.98	6.25	0.0334	0.0164	30.40
		2.0211	17.69	12.79	0.0600	0.0297	27.70
		2.0737	48.13	37.57	0.1292	0.0623	21.94

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.1152	7.13	1.05	0.0744	0.0352	85.27
		2.0999	8.98	6.09	0.0354	0.0168	32.18
		2.0232	17.69	12.73	0.0607	0.0300	28.04
		2.0249	48.13	38.06	0.1232	0.0609	20.92
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.130	7.13	1.7	0.0665	0.0312	76.16
		2.1248	8.98	6.79	0.0268	0.0126	24.39
		2.0291	17.69	13.98	0.0454	0.0224	20.97
		2.0145	48.13	40.76	0.0902	0.0448	15.31
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0875	7.13	1.3	0.0713	0.0342	81.77
		2.0258	8.98	7.21	0.0217	0.0107	19.71
		2.0099	17.69	14.1	0.0439	0.0219	20.29
		2.019	48.13	42.02	0.0748	0.0370	12.69
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0301	7.13	1.37	0.0705	0.0347	80.79
		2.1825	8.98	7.22	0.0215	0.0099	19.60
		2.0785	17.69	14.06	0.0444	0.0214	20.52
		2.0300	48.13	41.39	0.0825	0.0406	14.00

ตารางที่ ค.3 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
ใบสับประรด	ไม่ปรับสภาพ	2.1163	7.13	1.78	0.0655	0.0309	75.04
		2.0275	8.98	6.51	0.0302	0.0149	27.51
		2.0334	17.69	13.24	0.0545	0.0268	25.16
		2.05	48.13	39.98	0.0997	0.0487	16.93
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0643	7.13	2.07	0.0619	0.0300	70.97
		2.2998	8.98	7.55	0.0175	0.0076	15.92
		2.0353	17.69	14.92	0.0339	0.0167	15.66
		2.0942	48.13	43.65	0.0548	0.0262	9.31
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.0172	7.13	1.89	0.0641	0.0318	73.49
		2.0693	8.98	8.07	0.0111	0.0054	10.13
		2.0587	17.69	15.46	0.0273	0.0133	12.61
		2.0039	48.13	45.16	0.0363	0.0181	6.17
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0009	7.13	2.16	0.0608	0.0304	69.71
		2.0236	8.98	7.96	0.0125	0.0062	11.36
		2.0298	17.69	16.07	0.0198	0.0098	9.16
		2.0386	48.13	44.19	0.0482	0.0237	8.19

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียดังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0072	5.27	1.17	0.0278	42.04	0.9429	Y=30.33X+169.34	0.033
		2.0004	10.31	8.21	0.0143	573.94			
		2.0027	19.75	16.4	0.0228	719.51			
		2.0007	47.28	42.86	0.0301	1423.75			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0048	5.27	2.82	0.0167	169.35	0.7693	Y=32.49X+448.21	0.031
		2.0000	10.31	8.9	0.0096	926.45			
		2.0168	19.75	17.81	0.0131	1358.77			
		2.0046	47.28	43.54	0.0254	1712.64			
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %	2.0061	5.27	2.72	0.0173	157.04	0.8744	Y=37.10X+355.85	0.027
		2.0010	10.31	8.78	0.0104	842.70			
		2.0111	19.75	17.69	0.0140	1267.41			
		2.0062	47.28	43.82	0.0235	1864.63			
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %	2.0034	5.27	2.74	0.0172	159.23	0.8760	Y=43.16X+378.44	0.023
		2.0064	10.31	8.87	0.0098	906.99			
		2.0114	19.75	17.96	0.0121	1481.06			
		2.0112	47.28	44.23	0.0207	2140.40			

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0054	5.27	3.33	0.0132	252.62	0.8024	Y=50.05X+529.12	0.020
		2.0109	10.31	9.04	0.0086	1050.45			
		2.0066	19.75	18.43	0.0090	2056.05			
		2.0101	47.28	44.68	0.0176	2535.01			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0018	5.27	3.76	0.0103	365.81	0.5627	Y=41.32X+955.26	0.024
		2.0135	10.31	9.47	0.0057	1665.88			
		2.0000	19.75	18.64	0.0076	2464.76			
		2.0036	47.28	44.64	0.0180	2486.30			
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 5 %	2.0056	5.27	3.7	0.0107	346.87	0.9649	137.79X-157.75	0.007
		2.0094	10.31	9.47	0.0057	1662.49			
		2.0013	19.75	18.16	0.0108	1677.46			
		2.0276	47.28	46.20	0.0073	6365.35			
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 37 %	2.0006	5.27	3.870	0.0095	405.85	0.9914	Y=110.72X+174.46	0.009
		2.0177	10.31	9.370	0.0063	1476.01			
		2.0006	19.75	18.500	0.0085	2172.92			
		2.0219	47.28	45.98	0.0088	5248.16			

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ใบสับประรด	ไม่ปรับสภาพ	2.0000	5.27	3.62	0.0112	322.02	0.3540	Y=50.71X+1044.1	0.020
		2.0028	10.31	9.21	0.0075	1230.63			
		2.0096	19.75	19.02	0.0049	3842.55			
		2.0126	47.28	44.8	0.0168	2668.12			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0017	5.27	3.79	0.0101	376.18	0.5075	Y=64.31X+1077.3	0.016
		2.0202	10.31	9.41	0.0061	1550.11			
		2.0204	19.75	19.04	0.0048	3976.20			
		2.0209	47.28	45.3	0.0134	3393.13			
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	1.9981	5.27	4.06	0.0083	492.02	0.9925	Y=130.94X+39.31	0.008
		2.0076	10.31	9.41	0.0061	1540.45			
		2.0315	19.75	18.51	0.0083	2225.48			
		2.0088	47.28	46.17	0.0075	6131.91			
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0031	5.27	4.09	0.0080	509.53	0.9649	Y=89.52X+433.63	0.011
		2.0038	10.31	9.31	0.0068	1369.07			
		2.0059	19.75	18.75	0.0068	2760.15			
		2.0031	47.28	45.87	0.0096	4782.27			

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียดังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0013	4.37	0.1	0.0269	3.7226	0.9997	Y=7.87X+3.13	0.127
		1.999	9.78	0.63	0.0576	10.9317			
		2.0017	21.25	1.65	0.1233	13.3839			
		1.9084	51.35	32.32	0.1255	257.4300			
ไฮดรอกไซด์ 1 N		2.0002	4.37	0.31	0.0256	12.1302	0.9993	Y=13.03X+6.49	0.077
		2.0004	9.78	1.79	0.0503	35.5943			
		2.0039	21.25	8.75	0.0785	111.4118			
		2.011	51.35	39.29	0.0755	520.3601			
ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %		2.0015	4.37	0.12	0.0267	4.4885	0.9991	Y=11.94X+0.07	0.084
		1.9925	9.78	0.9	0.0561	16.0393			
		2.002	21.25	5.83	0.0970	60.1181			
		2.0007	51.35	38.08	0.0835	456.0004			
ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %		1.9998	4.37	0.54	0.0241	22.3944	0.9984	Y=18.55X++3.97	0.054
		2.0043	9.78	2.78	0.0440	63.2218			
		2.0043	21.25	11.93	0.0585	203.7720			
		2.0035	51.35	42.87	0.0533	804.4595			

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0081	4.37	0.63	0.0234	26.8665	0.9966	Y=11.13X+8.61	0.090
		2.001	9.78	1.47	0.0523	28.1139			
		2.0047	21.25	4.44	0.1056	42.0554			
		2.0028	51.35	37.4	0.0877	426.4736			
ไฮโครครอลิก 1 N	ไฮโครครอลิก 1 N	2.001	4.37	0.37	0.0252	14.7010	0.9964	Y=18.38X-6.63	0.054
		2.0041	9.78	1.94	0.0493	39.3879			
		2.0023	21.25	10.4	0.0682	152.4369			
		2.0269	51.35	42.6	0.0544	783.7744			
พอร์มัลดีไฮด์ 5 %	พอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0029	4.37	0.15	0.0265	5.6545	0.9970	Y=15.75X-7.19	0.063
		2.001	9.78	1.14	0.0544	20.9699			
		2.0012	21.25	7.22	0.0883	81.7951			
		2.0026	51.35	41.2	0.0638	645.6284			
พอร์มัลดีไฮด์ 37 %	พอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0013	4.37	0.83	0.0223	37.2687	0.9909	Y=29.28X-31.59	0.034
		2.0048	9.78	3.66	0.0384	95.2265			
		2.0039	21.25	13.48	0.0488	276.1227			
		1.7143	51.35	46.67	0.0344	1357.8006			

ตารางที่ ค.5 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	2.0006	4.37	0.92	0.0217	42.3727	0.9995	Y=15.93X+25.43	0.063
		2.0005	9.78	2.66	0.0448	59.3605			
		2.2493	21.25	11.73	0.0533	220.1231			
		2.002	51.35	41.71	0.0606	687.9937			
ไฮโครครอลิก 1 N		2.0002	4.37	0.81	0.0224	36.1465	0.9880	Y=34.69X-53.10	0.029
		1.9973	9.78	4	0.0364	109.7824			
		2.0065	21.25	14.21	0.0442	321.6754			
		2.0009	51.35	46.71	0.0292	1599.8324			
ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %		2.0044	4.37	0.38	0.0251	15.1619	0.9788	Y=24.89X-41.39	0.040
		1.9994	9.78	2.77	0.0441	62.7507			
		1.3653	21.25	12.85	0.0775	165.8858			
		2.008	51.35	44.86	0.0407	1102.3906			
ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %		2.0036	4.37	1.21	0.0199	60.9350	0.9959	Y=26.39X+10.93	0.038
		2.0048	9.78	4.89	0.0307	159.2312			
		2.0047	21.25	14.51	0.0423	342.7789			
		2.0076	51.35	45.43	0.0371	1223.6450			

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์

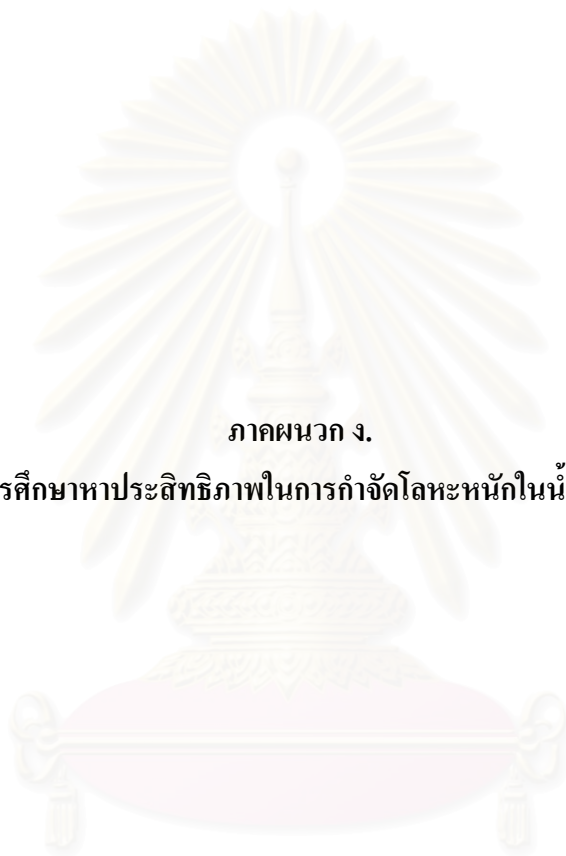
ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.0346	7.13	0.04	0.0426	0.938	0.6267	Y=8.26X+68.60	0.121
		2.0732	8.98	2.90	0.0359	80.802			
		2.0538	17.69	11.14	0.0390	285.424			
		2.0001	48.13	30.07	0.1105	272.117			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0661	7.13	1.27	0.0347	36.589	0.7407	Y=14.51X+199.29	0.069
		2.0718	8.98	6.49	0.0147	441.247			
		2.0769	17.69	12.96	0.0279	464.995			
		2.0228	48.13	39.18	0.0541	723.574			
	ฟอรั้มลดีไฮด์ 5 %	2.019	7.13	1.11	0.0365	30.419	0.5701	Y=13.92X+239.95	0.072
		2.0789	8.98	7.01	0.0116	604.469			
		2.12	17.69	12.46	0.0302	412.706			
		2.0929	48.13	39.13	0.0526	743.540			
	ฟอรั้มลดีไฮด์ 37 %	2.0035	7.13	1.08	0.0370	29.224	0.6982	Y=12.45X+181.38	0.080
		2.0342	8.98	6.25	0.0164	380.539			
		2.0211	17.69	12.79	0.0297	431.073			
		2.0737	48.13	37.57	0.0623	602.853			

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.1152	7.13	1.05	0.0352	29.849	0.5709	Y=13.05X+171.33	0.077
		2.0999	8.98	6.09	0.0168	361.582			
		2.0232	17.69	12.73	0.0300	424.301			
		2.0249	48.13	38.06	0.0609	625.362			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.130	7.13	1.7	0.0312	54.493	0.7392	Y=17.60X+253.77	0.057
		2.1248	8.98	6.79	0.0126	538.310			
		2.0291	17.69	13.98	0.0224	624.777			
		2.0145	48.13	40.76	0.0448	910.379			
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.0875	7.13	1.3	0.0342	38.036	0.7759	Y=21.99X+267.66	0.045
		2.0258	8.98	7.21	0.0107	674.291			
		2.0099	17.69	14.1	0.0219	645.041			
		2.019	48.13	42.02	0.0370	1134.592			
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0301	7.13	1.37	0.0347	39.455	0.6442	Y=18.69X+132.62	0.054
		2.1825	8.98	7.22	0.0099	731.589			
		2.0785	17.69	14.06	0.0214	657.835			
		2.0300	48.13	41.39	0.0406	1018.638			

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ในน้ำเสียดังเคราะห์

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ความเข้มข้นหลัง (Ce) (mg/l)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g)	Ce/q	Langmuir		
							R ²	Y=aX+b	Qmax
ใบสับประรด	ไม่ปรับสภาพ	2.1163	7.13	1.78	0.0309	57.535	0.8185	Y=16.61X+197.17	0.060
		2.0275	8.98	6.51	0.0149	436.650			
		2.0334	17.69	13.24	0.0268	494.355			
		2.05	48.13	39.98	0.0487	821.727			
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0643	7.13	2.07	0.0300	69.005	0.7741	Y=31.16X+374.90	0.032
		2.2998	8.98	7.55	0.0076	992.178			
		2.0353	17.69	14.92	0.0167	895.790			
		2.0942	48.13	43.65	0.0262	1667.297			
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0172	7.13	1.89	0.0318	59.452	0.7735	Y=45.98X++492.34	0.022
		2.0693	8.98	8.07	0.0054	1499.492			
		2.0587	17.69	15.46	0.0133	1166.235			
		2.0039	48.13	45.16	0.0181	2489.786			
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0009	7.13	2.16	0.0304	71.058	0.5648	Y=32.33X+649.87	0.031
		2.0236	8.98	7.96	0.0062	1290.405			
		2.0298	17.69	16.07	0.0098	1645.291			
		2.0386	48.13	44.19	0.0237	1868.307			



ภาคผนวก ง.

ผลการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg./l.)	ความเข้มข้นหลัง (mg./l.)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g.)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กากมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.1199	4.034	1.22	0.0383	0.0181	69.76
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0322	4.034	1.602	0.0331	0.0163	60.29
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 5 %	2.0308	4.034	1.395	0.0360	0.0177	65.42
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 37 %	2.0035	4.034	1.409	0.0358	0.0179	65.07
ดินมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0076	4.034	2.558	0.0201	0.0100	36.59
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.1634	4.034	3.011	0.0139	0.0064	25.36
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 5 %	2.0204	4.034	2.586	0.0197	0.0098	35.89
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 37 %	2.0725	4.034	2.835	0.0163	0.0079	29.72
ใบสับประรด	ไม่ปรับสภาพ	2.1608	4.034	3.004	0.0140	0.0065	25.53
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.03	4.034	3.307	0.0099	0.0049	18.02
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 5 %	2.0324	4.034	2.899	0.0155	0.0076	28.14
	ฟอร์มัดดีไฮด์ 37 %	2.0009	4.034	3.054	0.0134	0.0067	24.29

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียจริง

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg./l.)	ความเข้มข้นหลัง (mg./l.)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g.)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.1199	3.930	0.453	0.0438	0.0207	88.47
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0322	3.930	0.807	0.0393	0.0193	79.47
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.0308	3.930	0.490	0.0433	0.0213	87.53
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0035	3.930	0.483	0.0434	0.0217	87.71
ดินมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0076	3.930	1.390	0.0320	0.0159	64.63
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.1634	3.930	2.330	0.0201	0.0093	40.71
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.0204	3.930	1.620	0.0291	0.0144	58.78
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0725	3.930	1.440	0.0314	0.0151	63.36
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	2.1608	3.930	1.420	0.0316	0.0146	63.87
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0300	3.930	1.803	0.0268	0.0132	54.12
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 5 %	2.0324	3.930	1.510	0.0305	0.0150	61.58
	ฟอรั่มลดีไฮด์ 37 %	2.0009	3.930	1.647	0.0287	0.0144	58.09

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลการหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	น้ำหนักวัสดุ (g.)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg./l.)	ความเข้มข้นหลัง (mg./l.)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq)	โลหะที่ถูกกำจัด (meq/g.)	เปอร์เซ็นต์การกำจัด (%)
กาบมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	2.1199	0.567	0.050	0.0063	0.0030	91.18
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.0322	0.567	0.067	0.0061	0.0030	88.18
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0308	0.567	0.050	0.0063	0.0031	91.18
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0035	0.567	0.050	0.0063	0.0032	91.18
ดินมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	2.0076	0.567	0.110	0.0056	0.0028	80.60
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.1634	0.567	0.130	0.0054	0.0025	77.07
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0204	0.567	0.120	0.0055	0.0027	78.84
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0725	0.567	0.117	0.0055	0.0027	79.37
ใบสับประรด	ไม่ปรับสภาพ	2.1608	0.567	0.117	0.0055	0.0026	79.37
	ไฮโครครอลิก 1 N	2.03	0.567	0.180	0.0047	0.0023	68.25
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	2.0324	0.567	0.140	0.0052	0.0026	75.31
	ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	2.0009	0.567	0.130	0.0054	0.0027	77.07



ภาคผนวก จ.

ผลการศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออน

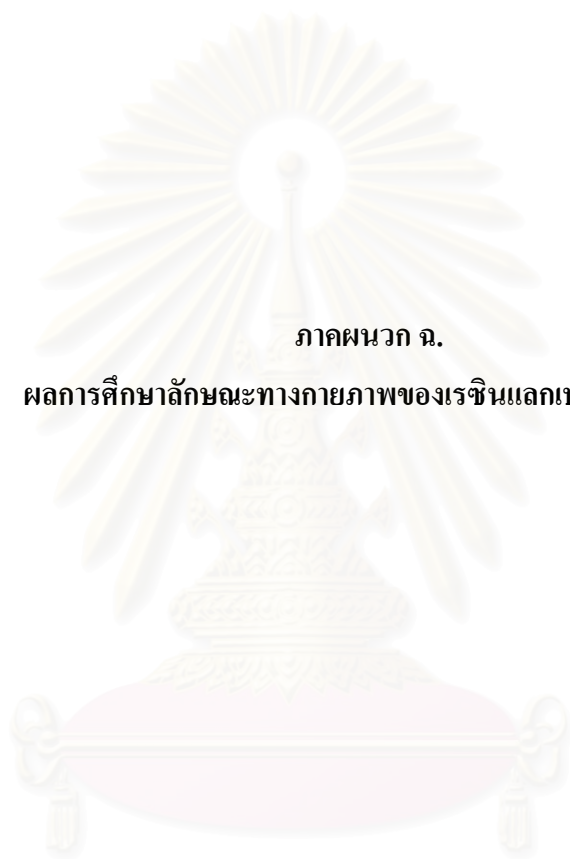
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการศึกษาความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก
กากมะพร้าว

ตารางที่ จ.1 แสดงความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่
ทำจากกากมะพร้าว

ครั้งที่	น้ำหนักเรซิน แลกเปลี่ยน ไอออน(g)	ความเข้มข้น ของ NaOH (N)	ความเข้มข้น ของ H ₂ SO ₄ (N)	ปริมาณสารละลาย H ₂ SO ₄ ที่ใช้ไทเทรต(ml)	ความสามารถ ทั้งหมด (meq/g)
1	1.0054	0.100	0.099	37.60	5.19
2	1.0021	0.100	0.099	38.05	4.96
3	1.0008	0.100	0.099	38.95	4.59
ค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน					4.91 \pm 0.30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ.

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะ
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว

ชนิดการปรับสภาพ	น.น. ขวดเปล่า	น.น. ขวด+วัสดุ	น.น. ขวด+วัสดุ+น้ำ	น.น. ขวด+น้ำ	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าเฉลี่ย(%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	8.9812	9.5301	18.5120	19.0589	1.0037	1.0022	0.0013
	8.6733	9.2169	18.2465	18.7893	1.0015		
	8.8733	9.4702	17.7774	18.3734	1.0015		
ไฮโครครอลิก 1 N	8.6733	9.2534	18.2100	18.7889	1.0021	1.0025	0.0009
	8.9812	9.5492	18.4923	19.0592	1.0019		
	8.6733	9.2420	18.2222	18.7889	1.0035		
ฟอร์มันดีไฮด์ 5 %	8.8733	9.4118	17.8445	18.3812	1.0034	1.0037	0.0004
	8.6733	9.2587	18.2059	18.7889	1.0041		
	8.9812	9.5364	18.5058	19.05898	1.0036		
ฟอร์มันดีไฮด์ 37 %	8.6733	9.2400	18.2256	18.7892	1.0055	1.0045	0.0011
	8.8733	9.4708	17.7886	18.38328	1.0047		
	8.9812	9.5484	18.4939	19.0592	1.0034		

ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะ
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง

ชนิดการปรับสภาพ	น.น. ขวดเปล่า	น.น. ขวด+วัสดุ	น.น. ขวด+วัสดุ+น้ำ	น.น. ขวด+น้ำ	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าเฉลี่ย(%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	8.9812	9.5060	18.5349	19.0590	1.0013	1.0019	0.0006
	8.6733	9.2256	18.1287	18.6796	1.0025		
	8.8733	9.3931	17.8644	18.3833	1.0017		
ไฮโครครอลิก 1 N	8.6733	9.2108	18.2524	18.7889	1.0019	1.0020	0.0002
	8.9812	9.4994	18.5420	19.0592	1.0019		
	8.6733	9.2645	18.1990	18.7889	1.0022		
ฟอร์มันดีไฮต์ 5 %	8.8733	9.4702	17.7876	18.3818	1.0045	1.0035	0.0009
	8.6733	9.2149	18.2490	18.7889	1.0031		
	8.9812	9.5239	18.5179	19.0590	1.0030		
ฟอร์มันดีไฮต์ 37 %	8.6733	9.2401	18.2243	18.7893	1.0032	1.0040	0.0007
	8.8733	9.4538	17.8062	18.3842	1.0043		
	8.9812	9.5239	18.5187	19.0590	1.0044		

ตารางที่ ๓.3 ข้อมูลการหาค่าความถ่วงจำเพาะ
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด

ชนิดการปรับสภาพ	น.น. ขวดเปล่า	น.น. ขวด+วัสดุ	น.น. ขวด+วัสดุ+น้ำ	น.น. ขวด+น้ำ	ความถ่วงจำเพาะ	ค่าเฉลี่ย(%)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	8.9812	11.0047	17.0375	19.05898	1.0010	1.0014	0.0011
	8.6733	10.7281	16.7354	18.7891	1.0005		
	8.8733	10.9665	16.2951	18.3828	1.0026		
ไฮโครครอลิก 1 N	8.6733	10.8323	16.6279	18.7858	1.0005	1.0018	0.0019
	8.9812	11.1807	16.8618	19.05901	1.0010		
	8.6733	10.6813	16.7891	18.7892	1.0039		
ฟอร์มาลดีไฮด์ 5 %	8.6733	10.9021	16.5701	18.7889	1.0045	1.0033	0.0010
	8.6733	10.7831	16.0784	18.1822	1.0029		
	8.9812	11.1352	16.9107	19.0591	1.0026		
ฟอร์มาลดีไฮด์ 37 %	8.6733	10.8949	16.5857	18.7893	1.0082	1.0042	0.0035
	8.8733	11.1143	16.1473	18.3824	1.0026		
	8.9812	11.0921	16.9539	19.061	1.0018		

ตารางที่ น.4 ข้อมูลการบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว

ชนิดการปรับสภาพ ของวัสดุ	ปริมาตรวัสดุ (มล.)	ปริมาตรวัสดุหลัง 24 ชั่วโมง (มล.)	ค่า การบวมน้ำ	ค่าเฉลี่ย(%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน(%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	8.00	13.00	1.63	1.735	0.103
	10.00	18.30	1.83		
	9.00	15.75	1.75		
ไฮโครครอลิก 1 N	9.00	15.40	1.71	1.741	0.051
	10.05	17.20	1.71		
	10.00	18.00	1.80		
ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	10.05	17.30	1.72	1.650	0.075
	10.50	16.50	1.57		
	10.10	16.75	1.66		
ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	10.00	17.00	1.70	1.646	0.055
	9.95	16.40	1.65		
	9.90	15.75	1.59		

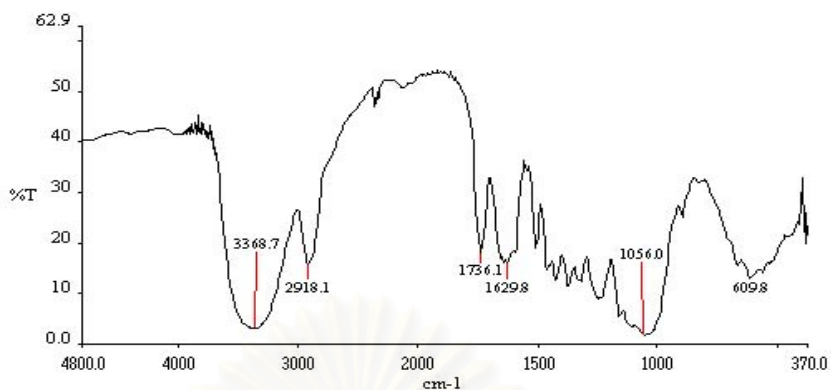
ตารางที่ น.5 ข้อมูลการบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากมันสำปะหลัง

ชนิดการปรับสภาพ ของวัสดุ	ปริมาตรวัสดุ (มล.)	ปริมาตรวัสดุหลัง 24 ชั่วโมง (มล.)	ค่า การบวมน้ำ	ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน(%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	9.90	12.15	1.23	1.416	0.175
	10.00	14.50	1.45		
	10.05	15.80	1.57		
ไฮโครครอลิก 1 N	9.90	14.85	1.50	1.403	0.084
	9.75	13.25	1.36		
	10.00	13.50	1.35		
ฟอร์มัลดีไฮด์ 5 %	10.00	13.70	1.37	1.360	0.104
	10.05	14.65	1.46		
	9.95	12.45	1.25		
ฟอร์มัลดีไฮด์ 37 %	9.90	12.05	1.22	1.323	0.118
	10.10	13.15	1.30		
	10.00	14.50	1.45		

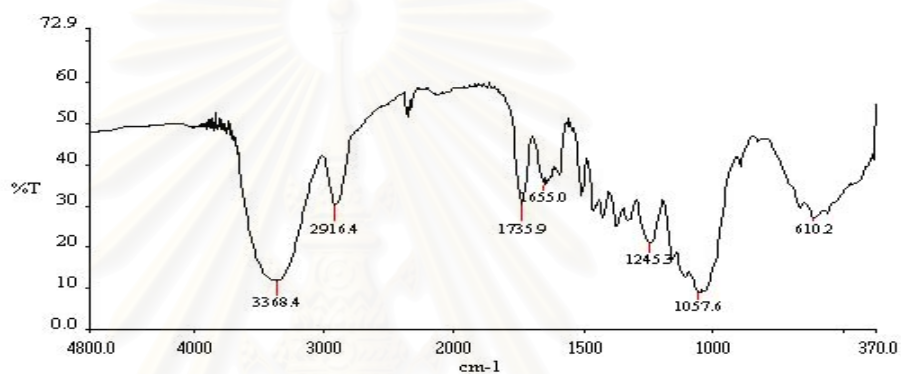
ตารางที่ ๖.6 ข้อมูลการบวมน้ำของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด

ชนิดการปรับสภาพ ของวัสดุ	ปริมาตรวัสดุ (มล.)	ปริมาตรวัสดุหลัง 24 ชั่วโมง (มล.)	ค่า การบวมน้ำ	ค่าเฉลี่ย (%)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน(%)
ไม่ได้ปรับสภาพ	8.00	11.55	1.44	1.384	0.069
	9.05	11.85	1.31		
	9.00	12.60	1.40		
ไฮโครครอลิก 1 N	8.00	11.00	1.38	1.363	0.099
	9.90	12.45	1.26		
	10.00	14.55	1.46		
ฟอร์มัดดีไฮด์ 5 %	9.20	12.50	1.36	1.316	0.040
	10.05	12.85	1.28		
	10.10	13.25	1.31		
ฟอร์มัดดีไฮด์ 37 %	9.80	12.85	1.31	1.286	0.023
	9.70	12.30	1.27		
	9.90	12.65	1.28		

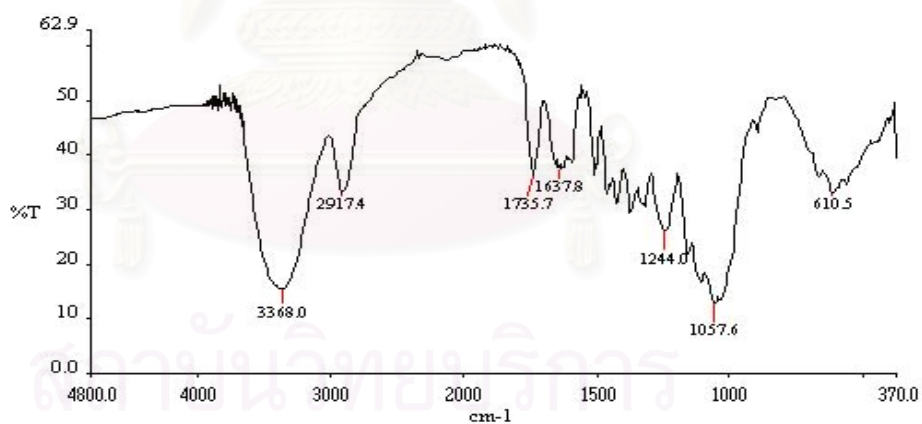
ไม่ได้ปรับสภาพ



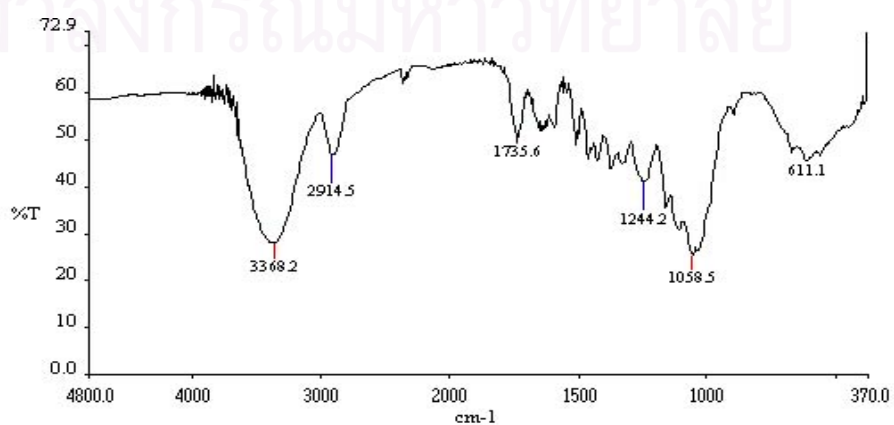
กรดไฮโดรคลอริก



ฟอร์มัลดีไฮด์ 5%

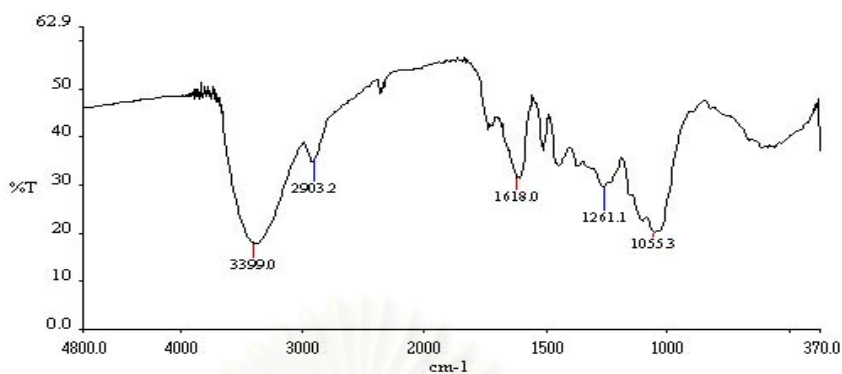


ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

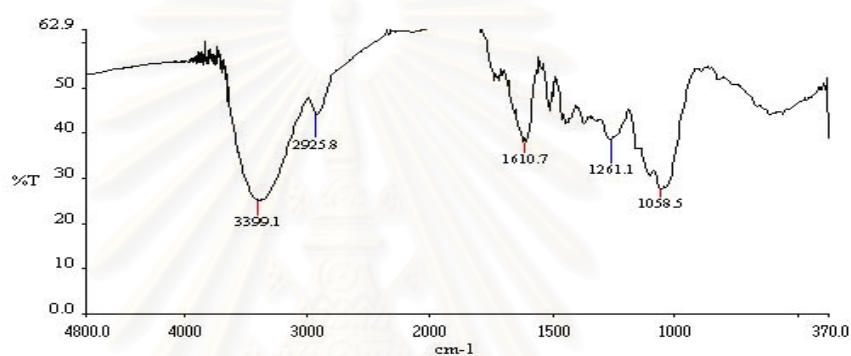


รูปที่ ๑.๑ แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากกามมะพร้าว

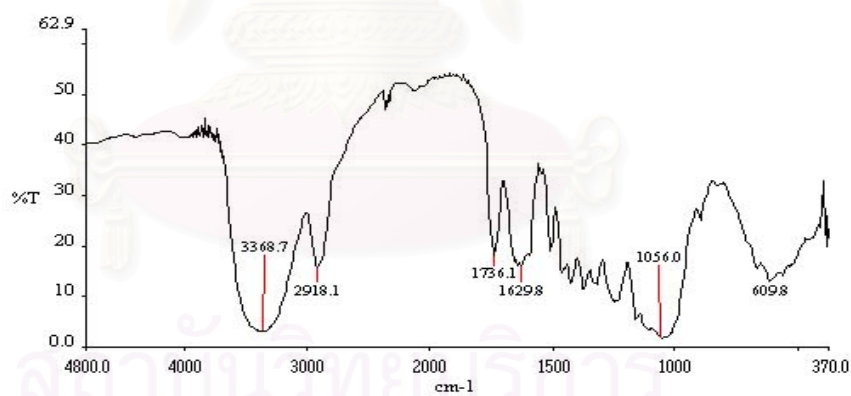
ไม่ได้ปรับสภาพ



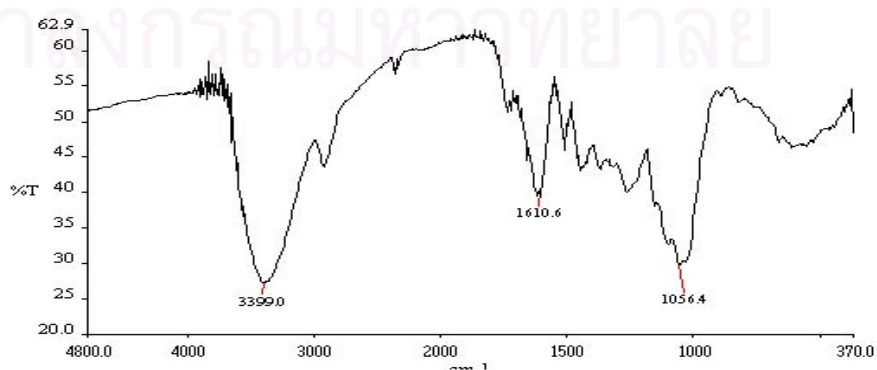
กรดไฮโดรคลอริก



ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%

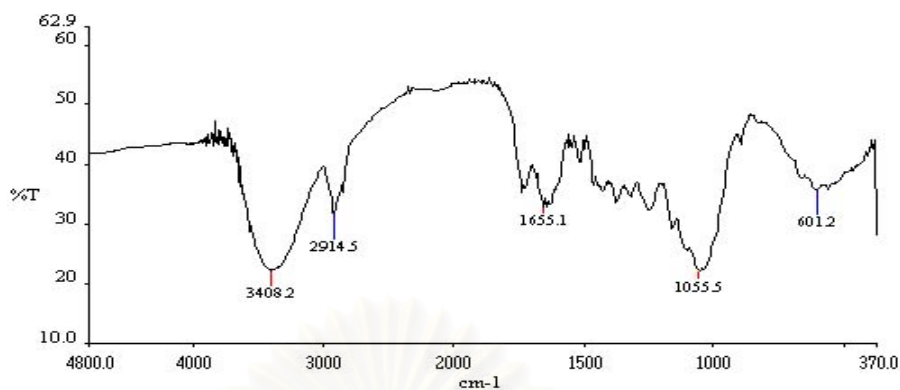


ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

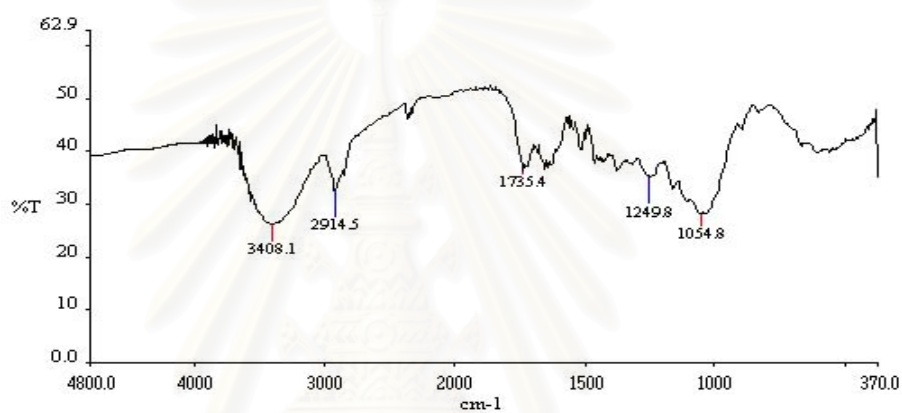


รูปที่ ๓.2 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากต้นมันสำปะหลัง

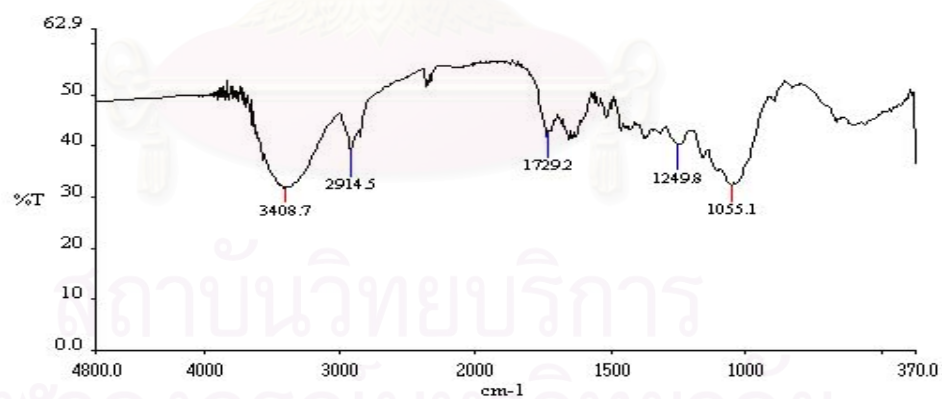
ไม่ได้ปรับสภาพ



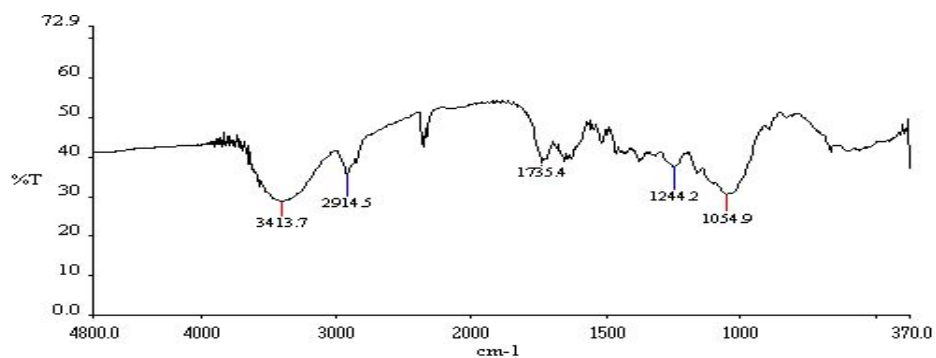
กรดไฮโดรคลอริก



ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%



ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%



รูปที่ ๓.3 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากใบสับปะรด

ตารางที่ ๗.7 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ชนิดวัสดุ	ชนิดการปรับสภาพ	พื้นที่ผิว			ปริมาตรรูพรุน		ขนาดรูพรุน		
		1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*	8*
กามมะพร้าว	ไม่ปรับสภาพ	6.6816	4.6729	4.7691	0.007843	0.007212	55.5226	67.1383	60.4927
	กรดไฮโดรคลอริก	6.5684	4.6894	4.7807	0.008138	0.007469	58.2516	69.4148	62.4931
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	7.8396	5.7447	6.3670	0.011112	0.010410	64.6857	77.3700	65.4003
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	5.8707	7.9055	8.0854	0.010022	0.009883	68.2843	53.3943	48.8911
ต้นมันสำปะหลัง	ไม่ปรับสภาพ	4.4336	3.0884	3.0955	0.004918	0.004450	52.8060	63.6959	57.5071
	กรดไฮโดรคลอริก	6.3500	4.4813	4.5793	0.007333	0.006703	54.5998	65.4536	58.5535
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	4.9860	3.5924	3.6765	0.006335	0.005805	59.2948	70.5350	63.1602
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	5.7855	4.1355	4.1915	0.006987	0.006391	56.6938	57.5765	60.9942
ใบสับปะรด	ไม่ปรับสภาพ	4.1155	2.6853	2.7779	0.003879	0.003601	46.9122	57.7765	51.8514
	กรดไฮโดรคลอริก	4.8633	3.2743	3.2888	0.004724	0.004339	47.6007	57.7122	52.7786
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 5%	4.4461	3.1029	3.1247	0.004597	0.004208	50.5423	59.2619	53.8671
	ฟอร์มาลดีไฮด์ 37%	4.5761	3.1165	3.1861	0.004635	0.004286	49.2986	59.4889	53.8061

1* หมายถึง BET Surface Area, sq.m./g.

2* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Surface Area, sq.m./g.

3* หมายถึง BJH Cumulative Desorption Surface Area, sq.m./g.

4* หมายถึง BJH Cumulative Adsorption Pore Volume, cc/g.

5* หมายถึง BJH Cumulative Desorption Pore Volume, cc/g.

6* หมายถึง Average Pore Diameter (4V/A By BET), A⁰7* หมายถึง BJH Adsorption Average Pore Diameter (4V/A), A⁰8* หมายถึง BJH Desorption Average Pore Diameter (4V/A), A⁰

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าวชนิดไม่
ปรับสภาพ

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03	A	PAGE 13
SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS/26		START 13 : 35 : 47 02/13/02
SAMPLE ID : Un-Coconut Husk		COMPL 15 : 27 : 04 02/13/02
SUBMITTER :		REPRT 15 : 29 : 00 02/13/02
OPERATOR : Chatchada		SAMPLE WT : 0.4359 g
UNIT NUMBER : 1		FREE SPACE : 55.8132 cc
ANALYSIS GAS : Nitrogen		EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA :		6.6816	sq. m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 :		4.7322	sq. m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES			
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :		4.6729	sq. m/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES			
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :		4.7691	sq. m/g
MICROPORE AREA :		-4.3762	sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN			
1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 :		0.009274	cc/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES			
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :		0.007843	cc/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES			
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :		0.007212	cc/g
MICROPORE VOLUME :		-0.002730	cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) :		55.5226	A
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) :		67.1383	A
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) :		60.4927	A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS/31

START 14 : 30 : 56 02/15/02

SAMPLE ID : HCl-Coconut Husk

COMPL 16 : 02 : 55 02/15/02

SUBMITTER :

REPRT 09 : 02 : 34 02/15/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.4193 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 54.4772 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 6.5684 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 4.7678 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.6894 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.7807 sq. m/g

MICROPORE AREA : -4.1811 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.009566 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.008138 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.007469 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.002581 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 58.2516 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 69.4148 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 62.4931 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าว ชนิดปรับสภาพด้วย ฟอรั่มลดีไฮด์ 5%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS/24

START 13 : 50 : 18 02/12/02

SAMPLE ID : 5% Coconut Husk

COMPL 16 : 06 : 28 02/12/02

SUBMITTER :

REPRT 16 : 47 : 49 02/12/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.3363 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 56.3312 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA :	7.8396	sq. m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 :	5.6663	sq. m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES		
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :	5.7447	sq. m/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES		
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :	6.3670	sq. m/g
MICROPORE AREA :	-4.9963	sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN		
1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 :	0.0126678	cc/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES		
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :	0.011112	cc/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES		
BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER :	0.010410	cc/g
MICROPORE VOLUME :	-0.003089	cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) :	64.6857	A
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) :	77.3700	A
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) :	65.4003	A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าว ชนิดปรับสภาพด้วยกรดฟอร์มัลดีไฮด์ 37%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A PAGE 13
 SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS/35 START 11 : 27 : 47 02/19/02
 SAMPLE ID : 37% Coconut Husk COMPL 13 : 31 : 52 02/19/02
 SUBMITTER : REPRT 13 : 33 : 51 02/19/02
 OPERATOR : Chatchada SAMPLE WT : 0.4360 g
 UNIT NUMBER : 1 FREE SPACE : 54.6644 cc
 ANALYSIS GAS : Nitrogen EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 5.8707 sq. m/g
 SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 4.3836 sq. m/g
 BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES
 BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 7.9055 sq. m/g
 BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES
 BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 8.0854 sq. m/g
 MICROPOROUS AREA : -3.6870 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN
 1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.010022 cc/g
 BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES
 BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.010553 cc/g
 BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES
 BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.009883 cc/g
 MICROPOROUS VOLUME : -0.002222 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 68.2843 A
 BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 53.3943 A
 BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 48.8911 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ชนิดไม่
ปรับสภาพ

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 32

START 12 : 46 : 22 02/18/02

SAMPLE ID : Un-Cassava

COMPL 14 : 27 : 01 02/18/02

SUBMITTER :

REPRT 11 : 32 : 15 02/19/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.6109 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 55.2355 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.4336 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 2.8074 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.0884 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.0955 sq. m/g

MICROPORE AREA : -2.7010 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.005853 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004918 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004450 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.001871 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 52.8060 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 63.6959 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 57.5071 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 29

START 14 : 35 : 07 02/14/02

SAMPLE ID : HCL Cassava

COMPL 16 : 09 : 19 02/14/02

SUBMITTER :

REPRT 09 : 07 : 04 02/15/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.3928 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 54.2692 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 6.3500 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 4.0548 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.4813 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.5793 sq. m/g

MICROPORE AREA : -3.9156 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.008668 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.007333 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.006703 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.002690 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 54.5998 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 65.4536 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 58.5535 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 27

START 15 : 57 : 40 02/13/02

SAMPLE ID : 5% Cassava

COMPL 18 : 01 : 22 02/13/02

SUBMITTER :

REPRT 09 : 04 : 18 02/14/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.4919 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 54.3029 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.9860 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 3.4369 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.5924 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.6765 sq. m/g

MICROPORE AREA : -3.2152 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.007391 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.006335 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.005805 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.002059 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 59.2948 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 70.5350 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 63.1602 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 34

START 16 : 48 : 19 02/18/02

SAMPLE ID : 37% Cassava

COMPL 18 : 21 : 57 02/18/02

SUBMITTER :

REPRT 09 : 25 : 16 02/19/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.4512 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 55.6542 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 5.7855 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 3.8384 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.1355 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 4.1915 sq. m/g

MICROPORE AREA : -3.6655 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.008200 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.006987 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.006391 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.002426 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 56.6938 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 67.5765 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 60.9942 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด ชนิดไม้
ปรับสภาพ

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS/25

START 09 : 20 : 56 02/13/02

SAMPLE ID : Un-Pine

COMPL 11 : 02 : 19 02/13/02

SUBMITTER :

REPRT 11 : 35 : 13 02/13/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.4506 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 54.2555 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.1156 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 2.5731 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 2.6853 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 2.7779 sq. m/g

MICROPORE AREA : -2.5217 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.014827 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.003879 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.003601 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.001754 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 46.9122 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 57.7765 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 51.8514 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 30

START 12 : 32 : 12 02/15/02

SAMPLE ID : HCL Pine

COMPL 14 : 14 : 20 02/15/02

SUBMITTER :

REPRT 14 : 47 : 06 02/15/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.4766 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 55.5492 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.8633 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 2.9498 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.2743 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.2888 sq. m/g

MICROPORE AREA : -2.8905 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.005787 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004724 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004339 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.002048 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 47.6007 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 57.7122 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 52.7786 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 42

START 12 : 43 : 05 02/14/02

SAMPLE ID : 5 Pine

COMPL 14 : 16 : 31 02/14/02

SUBMITTER :

REPRT 08 : 46 : 03 02/15/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.5080 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 55.5905 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.4461 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 2.8450 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.1029 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.1247 sq. m/g

MICROPORE AREA : -2.8056 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.005618 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004597 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004208 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.001906 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 50.5423 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 59.2619 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 53.8671 A

ผลการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากใบสับประรด ชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37%

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A

PAGE 13

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER : ANALYSIS / 33

START 14 : 50 : 27 02/18/02

SAMPLE ID : 37% Pine

COMPL 16 : 33 : 07 02/18/02

SUBMITTER :

REPRT 11 : 15 : 27 02/19/02

OPERATOR : Chatchada

SAMPLE WT : 0.5257 g

UNIT NUMBER : 1

FREE SPACE : 53.9115 cc

ANALYSIS GAS : Nitrogen

EQUIL INTRVL : 10 SEC

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA : 4.5716 sq. m/g

SINGLE POINT SURFACE AREA AT P / Po 0.1999 : 2.8136 sq. m/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.1165 sq. m/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 3.1861 sq. m/g

MICROPORE AREA : -2.7808 sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORE LESS THAN

1229.7822 A DIAMETER AT AT P / Po 0.9840 : 0.005640 cc/g

BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004635 cc/g

BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES

BETWEEN 17.000 AND 3000.000 A DIAMETER : 0.004286 cc/g

MICROPORE VOLUME : -0.001966 cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A BY BET) : 49.2986 A

BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 59.4889 A

BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V / A) : 53.8061 A



ภาคผนวก ช.

การประมาณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

- ค่าวัสดุ(ได้แก่กัมมะพร้าว ต้นมันสำปะหลัง และใบสับปะรด)ไม่นำมาคิดเป็นค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
- ค่าใช้จ่ายที่คำนวณยังไม่รวมถึงค่าไฟฟ้า ที่เกิดจากการบดวัสดุ และค่าแรงงาน ที่ใช้ในการเตรียม
- คำนวณเฉพาะค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ เพราะสามารถที่จะนำไปใช้ได้ในวันเสียดัง

ราคาน้ำล้างและสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

น้ำปราศจากไอออน	0.10	บาท/ลิตร
กรดไฮโดรคลอริก 37%	180	บาท/ลิตร
ฟอร์มัลดีไฮด์ 37%	200	บาท/ลิตร
กรดซัลฟูริก 96%	160	บาท/ลิตร

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพ

ปริมาณ	1.00	กิโลกรัม
ปริมาณน้ำปราศจากไอออน	200	ลิตร
ปริมาณสารเคมีที่ใช้		
ไม่มีสารเคมีที่ต้องใช้		
ค่าใช้จ่าย	$= (200 * 0.10)$	
	$= 20$	บาท/กิโลกรัม

ค่าใช้จ่ายในการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก

ปริมาณ	1.00	กิโลกรัม
ปริมาณน้ำปราศจากไอออน	300	ลิตร
ปริมาณสารเคมีที่ใช้		
กรดไฮโดรคลอริก 37%	1.66	ลิตร
ค่าใช้จ่าย	$= (300 * 0.10) + (1.66 * 180)$	
	$= 329$	บาท/กิโลกรัม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางชัชฎาพร องอาจ เกิดเมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา เมื่อปีการศึกษา 2538 และได้รับราชการเป็นอาจารย์อยู่ที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏพระนครศรีอยุธยา และได้ลาศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย