

บทที่ 3

บทกวนเอกสาร

3.1 โลหะหนัก

ธาตุต่าง ๆ ในโลกเท่าที่ค้นพบในปัจจุบัน มีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น รวมกันแล้วมีประมาณ 105 ธาตุ ในจำนวนนี้มีส่วนที่เป็นโลหะหนัก (Heavy Metal) อยู่ 68 ธาตุ

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น ๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex - compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับ สารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนใน ดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าสู่สมออยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ และเคมี การนำมาใช้ประโยชน์ และความเป็นพิษของโลหะหนักที่ศึกษาแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของ ทองแดง , สังกะสี และ นิกเกิล

ชนิดโลหะหนัก	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	จุดเดือด c	จุดหลอมเหลว c	ค่าความถ่วงจำเพาะ	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี
ทองแดง	29	63.54	2595	1083	8.96	ทองแดงเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่ม IB ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +1 และ +2 มีคุณสมบัติอ่อน ดัดง่าย นำไฟฟ้าได้ดี
สังกะสี	30	65.37	906	419.5	7.14	สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่ม IIB ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี
นิกเกิล	28	58.70	2732	1453	8.908	นิกเกิลเป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่ม IIB ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี สามารถนำไปผสมกับโลหะอื่น ได้โลหะอัลลอยด์

ตารางที่ 3.2 ประโยชน์และความเป็นพิษของ ทองแดง ,สังกะสี และ นิกเกิล

ชนิดโลหะหนัก	การใช้ประโยชน์	ความเป็นพิษ
ทองแดง	ทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและนำความร้อน มีความต้านทานการกัดกร่อนและง่ายต่อการแปรรูป การใช้ประโยชน์ของทองแดง ได้แก่ นำไปทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และผลิตกังหันไฟฟ้าใช้ในการก่อสร้างอาคาร อุปกรณ์และเครื่องจักร ใช้เป็นส่วนประกอบของยาปราบศัตรูพืช ทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใยและเซรามิก	ความเป็นพิษของทองแดงที่สำคัญคือทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมในร่างกายมาก ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับปริมาณทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องร่วง ปัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิตได้
สังกะสี	สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การนำเอาสังกะสีมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่าย แต่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่า สารประกอบสังกะสีจะใช้ในการทำสีย้อม ใช้ในการทำกาวและเรซิ่น	สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดเป็นพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการสีกกร่อนของเยื่อบุทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ซีด และ อาจถึงตายได้
นิกเกิล	นิกเกิลส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ เป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์จะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำเบนซิน ใช้ในงานชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก	ความเป็นพิษของนิกเกิลจะเกิดเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง

ตารางที่ 3.3 ลักษณะและปริมาณน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ 20 โรงในเขตกรุงเทพมหานคร
(TISTR, 1982)

Factory Name	Plating Activit	waste Volum m ³ /d	Waste characteristics , mg/l						
			Cr	Ni	Cu	Zn	Au	Al	CN
1. Jintanasuwan	Cr,Au	15	0.05	275	-	-	0.05	-	-
2. Sangjarone	Cr	1	40.3	27.5	-	-	-	-	-
3. Golden Lamp Co.	Ni,Cu	6	-	1.4	-	-	-	-	100
4. Thai-vasco.Electro.Ltd	Al	8	-	-	-	-	-	345-15	-
5. Suthichai chromium	Cr	8	27.3	29	4.7	-	-	-	-
6. Sermsarapad	Cr,Zn	3.5	22.5	-	-	91	-	-	5
7. Kimhuad	Cr	0.5	2.9	10.8	11	-	-	-	-
8. Sawimee	Cr	3	0.9	7	-	-	-	-	-
9. Theptip-chromium	Cr	3	96.6	21.3	2.3	-	-	-	-
10. Sahajerawat	Zn	4	-	-	-	0.28	-	-	-
11. Thaijaroenkarnchang	Cr,Zn	20	18.6	24.9	10	19.7	-	-	10
12. Ha-senghuad	Cr	4	0.5	2	185.5	-	-	-	667
13. Samchai-Usahakam	Zn	4	-	-	-	467	-	-	1000
14. Yongwatanaplastic	Cr	2	6.3	5.5	0.2	-	-	-	-
15. Hong-senghuad	Cr	2	94.1	420.9	-	-	-	-	-
16. Watanakij	Cr	1	12.8	37.8	-	-	-	-	-
17. P.T.I. Battery	Cr	25-30	14.7	57.3	108.4	-	-	-	30
18. D. Bunnag	Cr	6.7	447.9	15	4	-	-	-	-
19. Sangboon	Cr	3-4	146	7.5	9.5	-	-	-	-
20. Sew-jeng	Au	1.5	-	18.6	-	-	0.1	-	-
Average		6.34	62	60.1	37.3	144.5	0.075	933	302
Range		0.5- 30	0.05- 447.9	1.4- 420.9	0.2- 185.5	0.28- 467	0.05- 0.1	345- 1520	5- 1000

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์มาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
(ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 12)

ชนิดของโลหะหนัก	ค่ามาตรฐาน
สังกะสี (ZINC)	ไม่มากกว่า 5.00 mg/l
โครเมียม (CHROMIUM)	ไม่มากกว่า 0.50 mg/l
อาร์เซนิก (ARSENIC)	ไม่มากกว่า 0.25 mg/l
ทองแดง (COPPER)	ไม่มากกว่า 1.00 mg/l
ปรอท (MERCURY)	ไม่มากกว่า 0.005 mg/l
แคดเมียม (CADMIUM)	ไม่มากกว่า 0.03 mg/l
แบเรียม (BARIUM)	ไม่มากกว่า 0.02 mg/l
เซเลเนียม (SELENIUM)	ไม่มากกว่า 0.02 mg/l
ตะกั่ว (LEAD)	ไม่มากกว่า 0.02 mg/l
นิกเกิล (NICKEL)	ไม่มากกว่า 0.02 mg/l
แมงกานีส (MANGANESE)	ไม่มากกว่า 5.00 mg/l

3.2 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible Interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือตัวกลางของเหลว และตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง

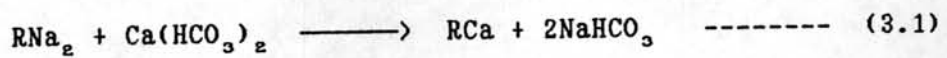
หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

1. กำจัดไอออนต่าง ๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{+2} , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่าง ๆ ออกจากน้ำได้ด้วย แต่ทั้งนี้ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก แบเรียม แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ทอง ตะกั่ว เซเลเนียม เงิน วานาเดียม สังกะสี นิกเกิล

2. ทำให้ไอออนต่าง ๆ มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมาที่สารละลายรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาณของสารละลายรีเจนเนอแรนต์ต่ำกว่าปริมาณ สารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงกว่ามาก ดังนั้นจึงเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมาก มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลาย ๆ เท่า

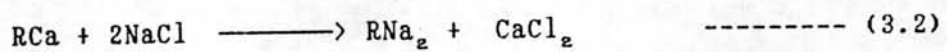
กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ใช้มากที่สุดในการแก้ความกระด้างของน้ำ และในการทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralization) เพื่อใช้ในการทำไอน้ำ และในงานอุตสาหกรรมบางชนิด สำหรับในการกำจัดน้ำที่นั่นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนใช้กันมากในการกำจัดน้ำที่มาจากโรงงานขุบโลหะ และใช้ในการกำจัดแอมโมเนีย

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับ Softener อาจเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



เมื่อ R เป็นหมู่ไอออนของเรซิน ซึ่งมี Na^+ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซิน ให้แลกเปลี่ยนไอออนพวกที่อยู่ในน้ำคือ Ca^{2+} ในปริมาณที่สมดุลกัน

เรซินเมื่อใช้ไปชั่วระยะหนึ่งจะหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้โดยการทำรีเจนเนอเรชั่น สำหรับเรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง ($NaCl$) ซึ่งมี Na^+ อยู่เป็นจำนวนมาก เรซินที่ผ่านการรีเจนเนอเรชั่นแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีก สมการเคมีเขียนได้ดังนี้



โดยสารละลายเกลือแกงจะต้องมีความเข้มข้นในปริมาณมาก เพื่อให้สมดุลกับปฏิกิริยากลับทิศทาง

3.2.1 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งการทำงานได้ 3 วิธี คือ

1. การทำงานแบบทีละเท (Batch Operation)
2. การทำงานแบบคอลัมน์ (Column Process)
3. การทำงานแบบต่อเนื่อง (Contineous Process)

3.2.1.1 การทำงานแบบทีละเท (Batch Operation)

การทำงานแบบทีละเทเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด น้ำทิ้งจะกวนผสมกับเรซินในถังปฏิริยา จากนั้นจึงแยกเรซินออกโดยการกรอง หรือตกตะกอน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวุ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ของระบบการแลกเปลี่ยนไอออน

3.2.1.2 การทำงานแบบคอลัมน์ (Column Process)

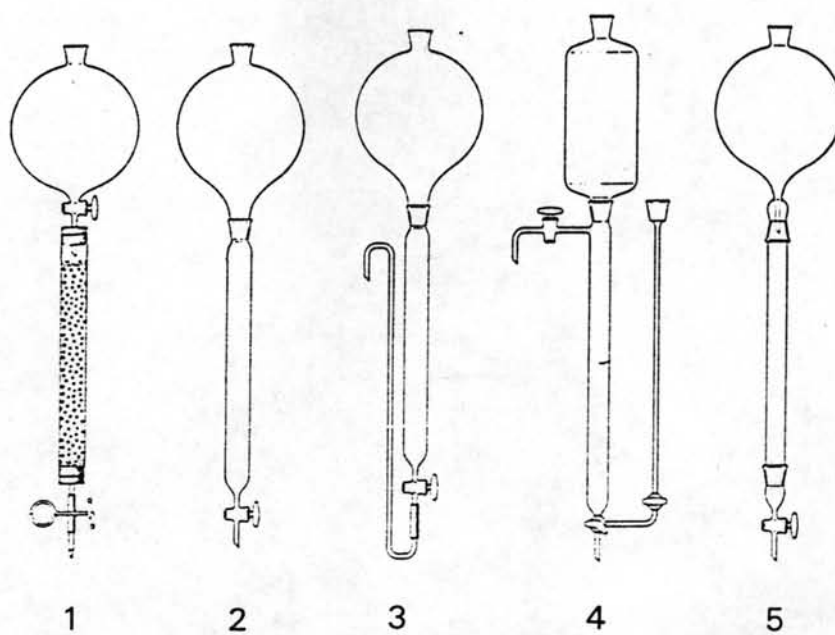
การทำงานแบบคอลัมน์ จะใช้ในการศึกษาขั้นห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและสภาวะที่เหมาะสมขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางกับความสูงอยู่ในช่วง 1:10-1:20 รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของคอลัมน์ที่ประยุกต์ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.2.1.3 การทำงานแบบต่อเนื่อง (Contineous Process)

การทำงานแบบต่อเนื่อง คือการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุอยู่ในถัง และปล่อยน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่องทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อใช้งานไปนาน ๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ (Exhausted Resin) จะต้องฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรด หรือ ด่าง แล้วแต่ชนิดของเรซิน

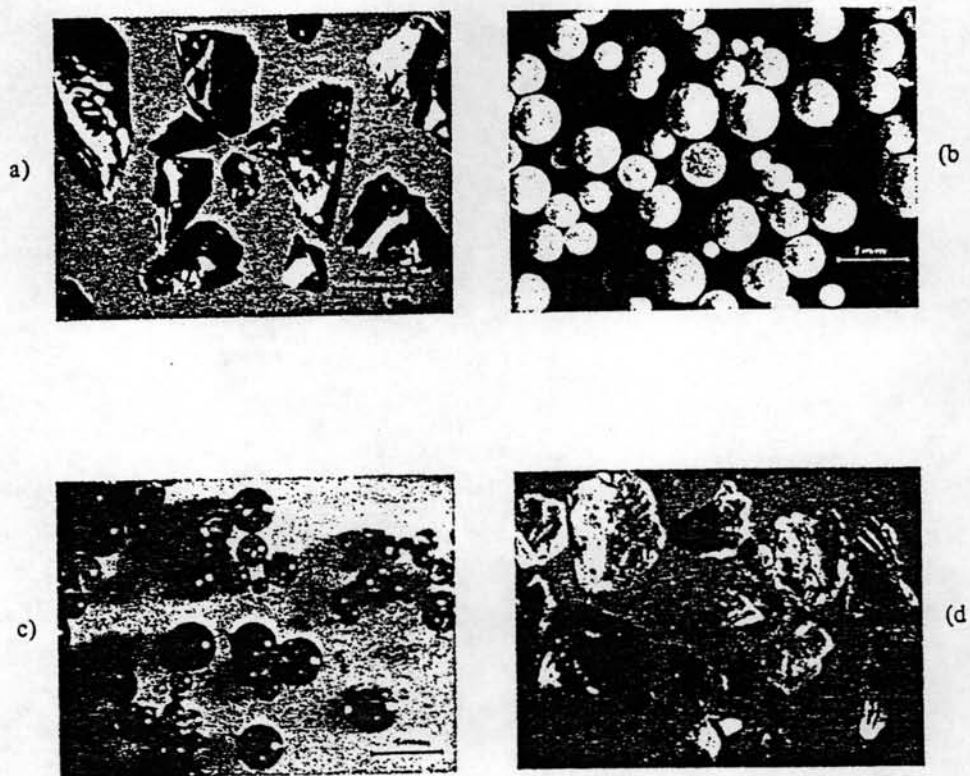
3.2.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนด ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงร่างคล้ายตาข่ายสามมิติ โดยมีกลุ่มไอออน ที่มีประจุอยู่ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนตาข่ายเรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่บนตำแหน่งต่าง ๆ ของตาข่ายเรียกว่า Function Group ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่าง ๆ ของเรซิน โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างที่ปรากฏ และรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักโดยง่าย (รูปที่ 3.2) โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จำนวนมาก และชนิดเดียวกัน ซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสาน เพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่ง หรือความพรุน (รูปที่ 3.3) ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ถ้าปริมาณของตัว



1. simple homemade ion exchange column
2. ion exchange column with ground joint
3. ion exchange column with overflow
4. countercurrent ion exchange column
5. wickbold inversion column

รูปที่ 3.1 คอลัมน์ที่ใช้ศึกษาในระดับมัธยมศึกษา (Dorfer, 1977)



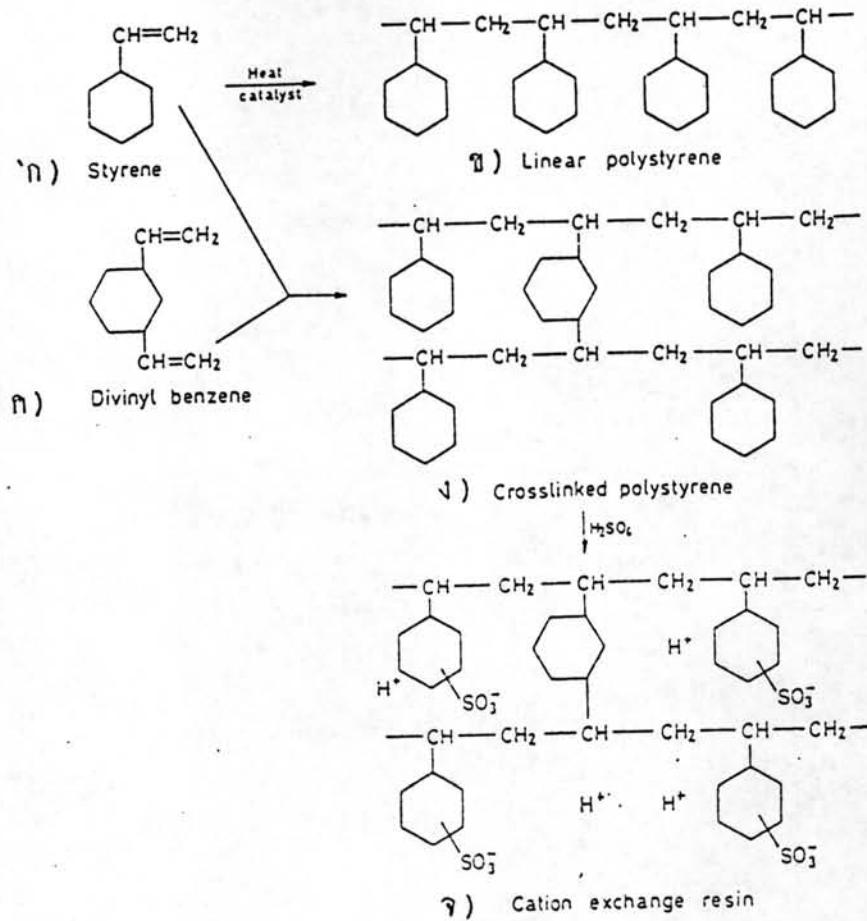
a. weak acid cation exchange

b. weak base anion exchange

c. strong acid cation exchange

d. strong base anion exchange

รูปที่ 3.2 รูปร่างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Dorfer, 1977)



รูปที่ 3.3 ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิด คือ Styrene (ภาพ ก.) เมื่อมีหลายโมเลกุลมาต่อกันจะเป็นโพลีเมอร์สายยาว (ภาพ ข.) การต่อกันเป็นสามมิติเกิดขึ้นได้เมื่อมีตัวประสาน คือ Divinylbenzene (ภาพ ค.) ทำให้ได้โครงร่างของเรซิน (ภาพ ง.) ซึ่งยังไม่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน การเติมหมู่ไอออน เช่น $-SO_3H$ ทำให้เรซินมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (ภาพ จ.) (มันสิน, 2529)

ประสานมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบแต่ถ้าปริมาณของตัวประสานน้อย โครงสร้างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง

ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่น ๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นในเรซิน เป็นต้น คือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่าง ๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มี Degree of cross-linkage ต่ำเกินไป จะมีความพรุนมาก ทำให้อมน้ำได้มาก แต่สลายตัวได้ง่ายเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงประสานต่ำ

การบวมหรือการพองน้ำของเรซินที่มี Degree of Crosslinkage ต่ำๆ ทำให้ปริมาตรของเรซินเพิ่มขึ้นได้มาก ดังนั้นความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่คิดต่อปริมาตร (เช่น meq/ml) จึงมีค่าลดหรือเพิ่มตามการลดหรือเพิ่มของ Degree of Crosslinkage

หมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงสร้าง Matrix มีประจุลบประจำตัว Functional Group จะมีประจุบวกเรียกว่า เป็น Cation Exchanger คือเป็นสารแลกเปลี่ยนประจุบวก ถ้าโครงสร้าง Matrix มีประจุบวกประจำตัว Functional Group จะมีประจุลบ คือ เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ เรียกว่า Anion Exchanger

เรซินที่สังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน จึงมีโครงสร้างเป็นสารพวก Polystyrene ที่รวมตัวอยู่ร่วมกับ Divinylbenzene โดย Function Group ของ Cation Exchanger จะเป็นพวก Sulfonic, Carboxylic หรือ Phosphonic ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange) จะเป็นพวกที่มี Function Group เป็นพวก Quarternary Ammonium, Primary Amine, Secondary Amine.

3.2.3 โครงร่างเรซิน (Matrix) อาจแบ่งลักษณะทางฟิสิกส์ได้ 3 ลักษณะคือ

ก. Gel Type มีลักษณะนุ่มคล้ายขี้ผึ้งสามารถบรรจุ Function Group ได้มากแต่รูพรุนและเล็กและถี่มาก (เป็น Membrane) ข้อเสียคือ เกิดการอุดตันได้ง่ายโดยเฉพาะถ้าเป็น Strong Anion

ข. Macroporous Type มีความพรุนมากกว่าคือมีพื้นที่ผิวมากถึง 100 ม²/กรัม ทำให้ไม่ค่อยอุดตันโดยจะเป็น Polystyrene Divinylbenzene แทนโครงร่างมี DVB 8-12% โดยทั่วไปถ้า % DVB น้อย การพองตัวหดตัวจะมีมากการวิ่งเข้าออกของไอออนผ่านเรซินจะสะดวก แต่ความแข็งแรงก็จะน้อยลง

ค. Opaque Gel มีโครงร่างที่แข็งแรง แต่ก็สามารถรับ Functional Group ได้มากพอสมควรและยึดหดตัวได้มากพอสมควร

3.2.4 การแบ่งเรซินตามลักษณะการใช้งานตาม Function Group

คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะขึ้นอยู่กับหมู่ไอออน ซึ่ง Functional Group สามารถแบ่งได้เป็น acidity และ basicity นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยเป็น เรซินแบบ กรดแก่ (Strong acid ion exchanger) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger) เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ของเรซินประเภทต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.5

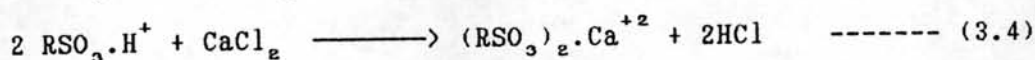
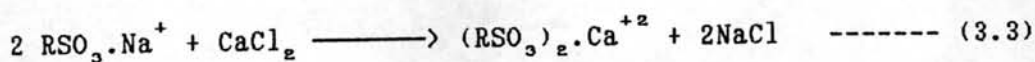
ก. เรซินแบบกรดแก่ (Strong Acid Ion Exchanger)

เรซินแบบกรดแก่มีหมู่ซัลโฟนิก (SO_3^-) เป็นหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า โดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นไอออนอิสระ หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่ จะใช้ไอออนบวกของตัวเอง แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{+2} , Mg^{+2} เป็นต้น เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดซัลฟูริกหรือกรดไฮโดรคลอริก

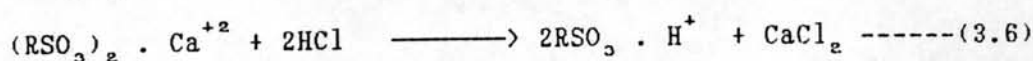
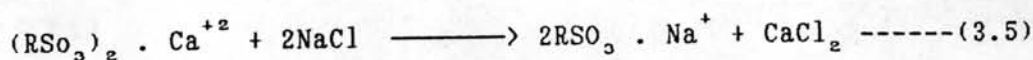
ตารางที่ 3.5 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่าง ๆ (มันลีน, 2529)

Classification	Active Groups	Dissociation Constant pK_a	Typical configuration
<u>Cation Exchange Resins</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 Resins</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)		

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออน ของเรซินแบบกรดแก่ในรูป Na^+ และ H^+ เป็นดังนี้คือ



เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะจับไอออนบวกของ Cation ได้ทั้งหมด เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้ โดยการทำให้เรซินที่อ่อนเรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจนเนอเรชันด้วยโซเดียมคลอไรด์ ส่วนในรูป H^+ ต้องรีเจนเนอเรชันด้วยกรดซัลฟูริก กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดไนตริก ดังนี้ คือ



เรซินแบบกรดแก่มีข้อดี คือ

1. เรซินใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. เรซินในรูป H^+ สามารถแยก Na^+ จากเกลือแองได้อ่านาจเช่นนี้เรียกว่า Salt Splitting
3. การรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เช่น Ca^{+2} เป็นต้น เกิดขึ้นน้อย
4. เรซินมีอัตราแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว
5. เรซินมีความคงตัว และทนอุณหภูมิได้สูงถึง 100-120 องศาเซลเซียส และอาจใช้ได้นานถึง 20 ปี หรือมากกว่า โดยมีการสูญเสียความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย
6. การเปลี่ยนรูปของ Na^+ ในเรซินเป็น H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียง 7 %
7. เหมาะสำหรับใช้กำจัดความกระด้างหรือในการทำน้ำบริสุทธิ์ (Demineralization)

เรซินแบบกรดแก่ มีข้อเสีย คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชั่นต่ำ ประมาณ 25-45 % ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชั่น
2. เรซินถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และทำให้เรซินเกิดการบวม และมีความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะเรซินที่มีระดับของการประสานโครงสร้างต่ำ

ข. เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger)

เรซินแบบกรดอ่อนมีหมู่คาร์บอกซิลิก (COO^-) เป็นหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าโดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นไอออนอิสระ เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดอะคริลิก มีหน้าที่ใช้ไอออนบวกของเรซิน (H^+ หรือ Na^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อดี คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชั่น สูงถึง 90% โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูป H^+ เพราะเรซินมีความชอบ (Affinity) H^+ สูง
2. ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า
3. เรซินทนต่อสารออกซิแดนท์ เช่น คลอรีน ได้ดี
4. เรซินในรูป H^+ สามารถกำจัดความเป็นด่างออกจากน้ำได้โดยไม่ต้องเติมกรด
5. เรซินสามารถใช้รีเจนเนอเรชั่นจากการทำรีเจนเนอเรชั่นของเรซินแบบกรดแก่ได้
6. มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมรั่วหนีได้มาก

เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อเสีย คือ

1. เรซินใช้ได้ภายใต้สภาวะจำกัด เช่น ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชสูงเท่านั้น
2. เรซินไม่มีความสามารถในการแยกเกลือ (Salt Splitting) แต่แยกเกลือของกรดอ่อนได้ เช่น NaHCO_3
3. การเปลี่ยนรูป H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเกือบถึง 2 เท่า
4. เรซินมีอัตราแลกเปลี่ยนไอออนช้า และขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำดิบ
5. เรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดการรั่ว (Leakage)

ของไอออนที่ต้องการกำจัดออก

ค. เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic anion exchanger)

เรซินแบบด่างแก่มีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Quaternary Amine และ ไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนด่างแก่ หน้าที่ของเรซินแบบด่างแก่คือ ใช้ไอออนลบของเรซินแลกกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออกเช่น HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_2 และ SiO_2

เรซินแบบด่างแก่แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Type I มีความเป็นด่างและความคงทนสูง มีความสามารถในการจับ Silica ได้ดี
2. Type II มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชั่นสูง

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนและรีเจนเนอเรชั่นเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้ดังนี้ คือ



สารรีเจนเนอเรนต์ อาจใช้โซเดียมคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เรซินแบบด่างแก่ มีข้อดี คือ

1. เรซินใช้ได้กับน้ำที่มี พีเอชทุกกระดับ
2. เรซินมีความสามารถในการแยกเกลือ (Salt splitting)
3. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว

เรซินแบบด่างแก่ มีข้อเสีย คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชั่นต่ำ เพียง 18-33 % ทำให้สิ้นเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์
2. มีความคงทนต่ำ ทำให้อายุการใช้งานสั้น

3. ในกรณีที่น้ำเสียมักกรดชีวมิติจากการเน่าเปื่อยของพืช สามารถทำให้เรซินเสียม และไม่สามารถทำรีเจนเนอเรชันได้
4. เรซินเปลี่ยนเป็นด่างอ่อนได้ง่าย ทำให้สูญเสียขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

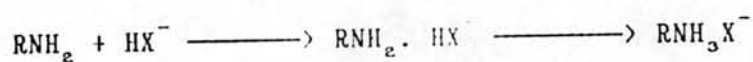
ง. เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic anion exchanger)

เรซินแบบด่างอ่อนมีหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเป็น Primary , Secondary หรือ Tertiary Amino และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- หรือไม่มีก็ได้ การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภทเนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl_2 , H_2SO_4 , HNO_3 ออกจากน้ำและไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO_2 , SiO_2 เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน

เนื่องจาก เรซินแบบด่างอ่อนไม่จำเป็นต้องมีไอออนอิสระก็ได้ ดังนั้นกลไกการทำงานของเรซินจะเป็นลักษณะ Absorption ไม่ใช่ลักษณะการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปเรซินแบบด่างอ่อนมักใช้ในการกำจัด Cl^- และ SO_4^{2-} หัวดีของเรซินแบบด่างอ่อนคือ ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงเกือบ 100% ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย ทนต่อกรดชีวมิติได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง สารรีเจนเนอเรนต์อาจจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์โซเดียมคาร์บอเนต หรือ แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์

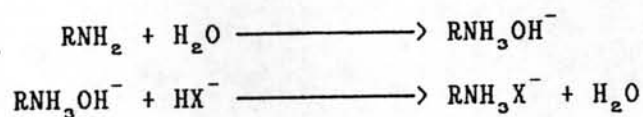
ข้อเสียของเรซินแบบด่างอ่อน คือ มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้า ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชต่ำเท่านั้น

ปฏิกิริยาในการจับโมเลกุลของกรดแก่เป็นดังนี้



เมื่อ X^- คือ ไอออนอิสระประจุลบ

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นดังนี้



3.2.5 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรด และด่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่าเรซินเลือกที่จะชอบทำปฏิกิริยาหรือเลือกทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับ จำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล และยิ่งขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของไอออนนั้น ๆ ในสารละลาย นอกจากนี้การแลกเปลี่ยนไอออนยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน (degree of cross-linking) ชนิดของ Functional Group และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ระหว่างไอออนกับการเลือกจับไอออนของเรซิน

1. เรซินสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีวาเลนซ์สูง ได้ดีกว่าไอออนที่มีวาเลนซ์ต่ำ ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงในตารางที่ 3.6
2. สำหรับไอออนที่มีวาเลนซ์เท่ากัน ไอออนที่มีน้ำหนักอะตอมสูงสามารถ 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 กับการเลือกจับไอออนแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 ลำดับความชอบไอออนของเรซินในน้ำที่มีสารละลายน้ำ 1,000 มก./ล.
(มันลิน , 2529)

<u>ไอออนบวก</u>	<u>ไอออนลบ</u>	<u>ลำดับความชอบ</u>
✓ Fe ⁺³	CrO ⁻²	<div style="text-align: center;"> <p>มากที่สุด</p> <p>↑</p> <p>↓</p> <p>น้อยที่สุด</p> </div>
Al ⁺³	SO ⁻² ₄	
Pb ⁺²	SO ⁻² ₃	
Ba ⁺²	HPO ⁻² ₄	
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 ⁺		

ตารางที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง Degree of Crosslinking กับการเลือกจับไอออนของ cation exchange resin (Larry, 1982)

ION	% Divinylbenzene		
	4	8	12
<u>Monovalent Cations</u>			
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
<u>Divalent Cations</u>			
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

3.2.6 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ก. ต้องมีไอออนอิสระ ที่สามารถใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนในน้ำ
- ข. ต้องไม่ละลายน้ำ
- ค. ต้องมีช่องว่างภายในโครงไฮโดรคาร์บอนอย่างพอเพียง เพื่อให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่ผ่านเข้าออกได้อย่างสะดวก

3.2.6.1 ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และจะมีความชื้นต่ำถ้ามีช่องว่างน้อย ความสามารถในการเก็บกักน้ำ จะแสดงให้เห็นได้จากการบวมหรือพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้า และออกจากช่องว่างของเรซินเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากทำให้ไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ สามารถซึมเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมขึ้นอยู่กับ Degree of Crosslinking ของโครงไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่น ช่องว่างภายในจะมีมาก จึงเก็บกักน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นภายในสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ในทางตรงกันข้ามเรซินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูง มีความชื้นน้อยแต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างภายในเรซินเหลือน้อย การแลกเปลี่ยนไอออนไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้า - ออก ได้สะดวกและยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย ความชื้นของเรซินมีประโยชน์สำหรับใช้เป็นพารามิเตอร์ ในการตรวจสอบระดับการประสานโครงร่าง และการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติของเรซิน ความชื้นของเรซิน มีหน่วยแสดงในรูป

- % moisture / weight of wet resin
- % moisture / weight of dry resin
- weight or mole number of water
equivalent of exchange capacity

3.2.6.2 ความหนาแน่นของเรซิน (Density)

ความหนาแน่นของเรซินแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (Kunin , 1963) ความหนาแน่นของเรซินที่ใช้ทั่วไป คือ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent หรือ Column density) เป็นความหนาแน่นที่วัดหลังจากผ่านการล้างย้อม ปล่อยให้จมน้ำ และทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว

แต่ถ้าเกี่ยวกับการคำนวณทางด้านเซลล์ศาสตร์ของเรซิน จะต้องใช้ความหนาแน่นเปียก (Wet Absolute density หรือ True density) โดยใช้ขวด Pyknometer ความหนาแน่นประเภทสุดท้าย คือ ความหนาแน่นแห้ง (Dry density)

3.2.6.3 ขนาดของเม็ดเรซิน (Particle Size)

คุณสมบัติทางด้านเซลล์ศาสตร์ของเรซินอันได้แก่ การสูญเสียเซลล์ในขณะแลกเปลี่ยนไอออน และการขยายตัวของชั้นเรซินในขณะล้างย้อม มีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดเม็ดเรซิน เม็ดเรซินมีขนาดประมาณ 0.04 ถึง 1.00 มิลลิเมตร และสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size) และสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient) เรซินในขณะแห้งและเปียก ปริมาตรจะไม่เท่ากันเนื่องจากขนาดเรซินไม่เท่ากัน เกิดจากการพองตัวของเรซิน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้น, Degree of Crosslinking , Functional Group.

3.2.6.4 การบวมของเรซิน (Swelling)

เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ มีความสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมของเรซิน เกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ติดติดกับโครงร่าง และไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) การไฮเดรชันของไอออน แต่ละชนิดจะแตกต่างกันโดยไอออนที่มีขนาดเล็ก (เมื่อแห้ง) จะมีขนาดใหญ่เมื่อเกิดไฮเดรชัน ถ้าเรซินบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่ (ขณะไฮเดรชัน) ก็จะทำให้เกิดการบวมสูง เช่นเดียวกับเรซินที่อยู่ในสารละลายเจือจาง

เรซินจะบวมตัวเพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายในตัวเพื่อให้สมดุลกับภายนอก ในทางกลับกันเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่า เช่นในขณะการทำรีเจนเนอเรชัน แต่การบวมตัวของเรซินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับการประสานโครงร่าง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชนิดของสารละลาย

3.2.6.5 อัตราแลกเปลี่ยนไอออน (Rate of Ion Exchange)

อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ขนาดเม็ดเรซิน อัตราการแพร่กระจายผ่านเม็ดเรซิน และชั้นน้ำรอบเม็ดเรซิน ชนิดและขนาดของไอออนที่จะแลกเปลี่ยน การกวน (Stirring) ความเข้มข้นของสารละลายรอบเม็ดเรซิน ระดับการประสานโครงร่าง พีเอชและอุณหภูมิของระบบ ความเป็นกรด และค่าของเรซิน และขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในขณะนั้น แต่พารามิเตอร์สำคัญที่ควบคุมอัตราแลกเปลี่ยนไอออนคือ อัตราการแพร่กระจายผ่านเม็ดเรซิน และชั้นน้ำรอบเม็ดเรซิน ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังเช่น ในกรณีของเรซินแบบกรดแก่ที่กำจัดความกระด้าง อัตราไหลของน้ำที่ผ่านชั้นเรซินมีอิทธิพลน้อยมากต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน แต่ในเรซินบางชนิดที่มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำเป็นผลทำให้ต้องใช้อัตราการไหลต่ำ เพื่อให้มีเวลาพอเพียงสำหรับปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออน อีกประการหนึ่งที่ไม่ใช้อัตราไหลสูงมาก ก็เพื่อไม่ให้มี Head loss สูงเกินไป

3.2.6.6 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Capacity)

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออน หรือคัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ทั้งนี้เพราะพารามิเตอร์นี้มีบทบาทอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพ และราคาของระบบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน หมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแยกมาจากน้ำ (มักมีหน่วยสมมูลย์ หรือวัตในหน่วยกิโลเกรนของหินปูน) ต่อหน่วยน้ำหนักหรือหน่วยปริมาตรของเรซิน หน่วยแสดงขีดความสามารถของเรซิน จึงอาจเป็นได้หลายแบบ ดังนี้

- ก. หน่วยสมมูลต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/ml, eq/l
 ข. หน่วยสมมูลต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g
 ค. หน่วยน้ำหนัก ในเทอมหินปูนต่อปริมาตรของเรซิน เช่น กิโลเกรนต่อลิตรหรือ
 กิโลเกรนต่อ ลบ.ฟุต

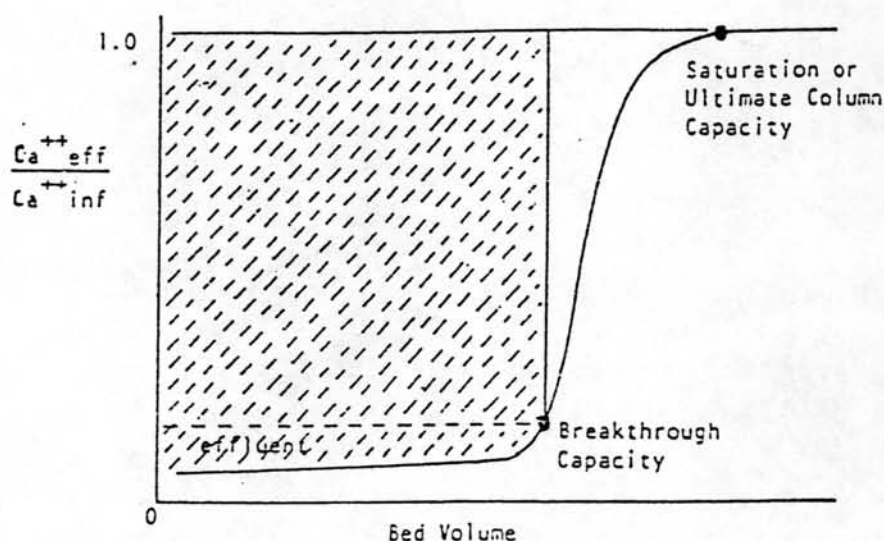
ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งออกเป็นขีดความสามารถสูงสุด (Ultimate or total capacity) และขีดความสามารถใช้งาน (Operating or Breakthrough Capacity)

ขีดความสามารถสูงสุด หมายถึง ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนประจุโดยพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดของส่วนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนประจุ ในโครงร่างตาข่ายโมเลกุลของเรซิน โดยการนำเรซินมาพ่นกำลังด้วยสารเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปให้อยู่ในไอออนที่มีประจุก่อนแล้วแยกเอาไอออนที่มีออกมาจากเรซิน แล้วนำไปหาปริมาณด้วยการวิเคราะห์ปริมาณทางเคมี ปริมาณของไอออนทั้งหมดที่สามารถแลกเปลี่ยนโดยเรซินมีค่าเท่ากับจำนวนหมู่ไอออน (Functional Group) ที่จับอยู่กับโครงร่างของเรซิน เช่น นำเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนด้วยกรด แล้วแยกเอาไฮโดรเจนไอออนออกมาโดยการใช้น้ำสารละลายเกลือแกง โดยเก็บรวบรวมไฮโดรเจนไอออนที่แยกออกมานี้จากทุกส่วนให้หมดแล้วนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออน ด้วยการใช้น้ำสารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน ค่า Capacity ส่วนมากมักเรียกเป็น มิลลิกรัมสมมูล/กรัมของเรซิน หมายถึง จำนวนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เป็นมิลลิกรัมสมมูลของสารเรซินในสภาพแห้ง 1 กรัม ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะแปรผันตามปริมาณ Crosslinkage เรซินมักสามารถแสดงอำนาจแลกเปลี่ยนได้น้อยกว่าค่าสูงสุด เนื่องจากสภาวะแวดล้อมในการใช้งานมักไม่อำนวยให้

ขีดความสามารถใช้งาน หมายถึง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ประโยชน์จริง และเกิดจริงในการใช้งาน โดยบรรจุเรซินไว้ในคอลัมน์ แล้วทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจนกระทั่งถึงจุดยุติที่กำหนด หรือเมื่อเริ่มปรากฏไอออนที่ไม่ต้องการในน้ำออก ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนี้แปรผันตามอัตราการไหล ความสูงของชั้นเรซิน ขนาดของเม็ดเรซิน ระดับรีเจนเนอเรชัน อุณหภูมิ ความเข้มข้น และชนิดของไอออน

ในน้ำที่ต้องการกำจัดออก และลักษณะสมบัติที่ต้องการของน้ำออก ชีตความสามารถนี้ใช้ตรวจ
สอบประสิทธิภาพการทำงานและสภาพของเรซิน

ในระบบที่ต้องการทำน้ำหรือสารละลายให้บริสุทธิ์ จะแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงขีด
ความสามารถ Breakthrough เท่านั้น แต่ระบบที่นำไอออนกลับมาใช้ใหม่ (Recovery)
จะแลกเปลี่ยนไอออนจนถึงขีดความสามารถสูงสุด



รูปที่ 3.4 ชีตความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ponswad, 1975)

3.2.7 การทำรีเจนเนอเรชั่นหรือการฟื้นอำนาจ (Regeneration)

การทำรีเจนเนอเรชั่น หมายถึง การทำให้เรซินที่หมดอำนาจไปแล้วกลับฟื้นตัวขึ้น
มา มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีก การที่เรซินหมดอำนาจ (ชั่วคราว) เป็นเพราะ
ว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นในน้ำจนหมดสิ้น การทำรีเจนเนอเร
ชั่นคือการขับไล่ไอออนในเรซินที่แลกเปลี่ยนมา และเติมไอออนอิสระให้กับเรซิน ทำให้
เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิมและมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งหนึ่ง สารเคมีที่ใช้เติม
ไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้ว เรียกว่า สารรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant)
ตัวอย่างของสารรีเจนเนอเรนต์ ได้แก่ NaCl ซึ่งใช้เติม Na^+ หรือ Cl^- ให้กับเรซิน
หรือ H_2SO_4 ซึ่งใช้เติม H^+ ให้กับเรซิน เป็นต้น

ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration Efficiency) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนสมมูลของไอออนในเรซินที่เสื่อมแล้ว และจำนวนสมมูลของไอออนในสารรีเจนเนอเรนต์ ที่นำมาแลกเปลี่ยน การแลกเปลี่ยนไอออนจากเรซินที่เสื่อมแล้ว มักต้องใช้ไอออน จำนวนมากกว่าสารรีเจนเนอเรนต์ คือ ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันมักมีค่าไม่ถึง 100%

อัตราการไหลในการทำรีเจนเนอเรชัน มักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-1 แกลลอน / นาที - ล.บ. ฟุต (2.8 ปริมาตรเรซิน / ชม.) สารรีเจนเนอเรนต์มีหลายชนิด (ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน) เช่น เกลือแกง โซดาไฟ โซดาแอช แอมโมเนีย กรดเกลือ และกรดกำมะถัน อัตราการใช้รีเจนเนอเรนต์หรือระดับการทำรีเจนเนอเรชันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบมากมาย ได้แก่ชนิดของเรซิน อัตราไหลในการทำรีเจนเนอเรชัน อุณหภูมิ ชนิด และความเข้มข้นของรีเจนเนอเรนต์ ความบริสุทธิ์ของรีเจนเนอเรนต์และเวลาสัมผัส ในทางปฏิบัตินิยมทำรีเจนเนอเรชันให้เรซินกลับมาใช้อ่านาจเพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากการทำให้เรซินกลับมาใช้อ่านาจสูงสุด ต้องสิ้นเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์สูงกว่าปริมาณตามสโตยชิโอ-เมตริกมาก

วิธีการทำรีเจนเนอเรชันมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

1. การทำรีเจนเนอเรชันแบบไหลตาม (Co-Current Regeneration) เป็นการทำรีเจนเนอเรชันที่มีทิศทางเดียวกับการแลกเปลี่ยนไอออน
2. การทำรีเจนเนอเรชันแบบไหลสวนทาง (Counter-Current Regeneration) เป็นการทำรีเจนเนอเรชันที่มีทิศทางตรงกันข้ามกับการแลกเปลี่ยนไอออน

ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรด และด่างก็มีค่าต่ำกว่าของแบบกรด และด่างอ่อน หรืออีกความหมายก็คือ เรซินแบบกรดและด่างอ่อนใช้ปริมาณรีเจนเนอเรนต์น้อยกว่า ปริมาณสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้ เรียกว่า Regeneration Level มีหน่วยเป็นมวลของสารรีเจนเนอเรนต์ต่อปริมาณของเรซิน

3.3 สารเซลลูโลสเปลี่ยนไอออน (Cellulose Ion Exchanger)

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นจึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันเซลลูโลส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย hydroxy-Celluloses และ COOH - Groups 15% มีลักษณะเป็นผง ไม่ละลายน้ำมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน เหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลสจะเป็น Hydrophilic แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็น Hydrophobic เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์การยึดเกาะกันของโครงตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่าง ๆ บนโครงร่างตาข่าย ซึ่งมีระยะประมาณ 15 Å

ดังนั้นไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินแบบสังเคราะห์ได้ จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลส-แลกเปลี่ยนไอออน

จากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมี Hydroxyl Group ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการทำปฏิกิริยามากที่สุด สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดประมาณ 15-20 μ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างของเซลลูโลส และองค์ประกอบอื่น ๆ แต่จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนการปรับปรุงลักษณะของโครงสร้าง และฟังก์ชันกรุปในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น

การเก็บสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำได้โดยการแช่ในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง (มี pH ต่ำกว่า 4)

ในการทำรีเจนเนอเรชั่น จะใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 N หรือ acid buffer หรือ สารละลาย HCl เจือจาง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสาร เซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.25 - 1 meq/g dry. weight.

ในการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ เกี่ยวกับสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน จะใช้คอลัมน์ที่มีความยาวตั้งแต่ 40 เซนติเมตรขึ้นไป โดยมีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางกับความยาวเท่ากับ 1 : 10 ซึ่งสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน 10 g ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 ml ซึ่งภายในใส่ตัวทำละลายหรือบัฟเฟอร์ เชื้อยาให้ทั่วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นกวนให้เข้ากัน แล้วจึงเทใส่ในคอลัมน์ ทิ้งให้ตกตะกอน อัตราการไหลที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-25 ml /min.

ในการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ปฏิกริยาจะประกอบด้วย การเปลี่ยน alkali cellulose ด้วยสารประกอบคลอรีน การเพิ่มความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ทำโดยการประสานพันธะของเซลลูโลสด้วย di-(2 - ethylamine) sulfate, 1,4 - butanedisulfate, 1,3 - dichloro - 2 - propanal , divinyl sulfone, และ formaldehyde ซึ่งจะเป็นหมู่ไอออนที่เกาะจับอยู่บนโครงร่าง (active group) โดยมี dichloroacetic acid เป็น cross - link agent. ที่ใช้เป็นตัวแสดง exchang group.

การสังเคราะห์ Quaternary cellulose ion exchanger สามารถทำได้โดยใช้ methyl iodide หรือ ethyl bromide ซึ่งละลายในเมทิลแอลกอฮอล์ ทำปฏิกริยากับ DEAE Cellulose การนำสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนไปใช้งานส่วนมาก จะใช้ในการแยกโปรตีน nucleic acids, oligonucleotides, polysaccharides, lipids, nucleosides, purines และ pyrimidines

Serva - Cellulose ion exchanger เป็นสารเซลลูโลสชนิดแรกที่เกิดขึ้นในเชิงอุตสาหกรรม และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ประกอบด้วยสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดและแบบด่าง คุณสมบัติที่สำคัญของ Serva Cellulose Ion Exchange แสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers (Dorfner, 1977)

(CE = cation exchanger, AE = anion exchanger)

Name	Ion exchanging group	Properties	Capacity meq/g	Prevailing particle size μ
CM-Cellulose	- OCH_2COOH	CE, weak acid	0.62 \pm 0.1	50-200
P-Cellulose	- OPO_3H_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	0.33 \pm 0.1	50-200
BD-Cellulose	- $\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	AE, medium base	0.8 \pm 0.05	50-200
GE-Cellulose	- $\text{OC}_2\text{H}_4\text{NH C}=\text{NH}_2\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$	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	0.8 \pm 0.05	50-200

3.4 องค์ประกอบในเซลล์พืช

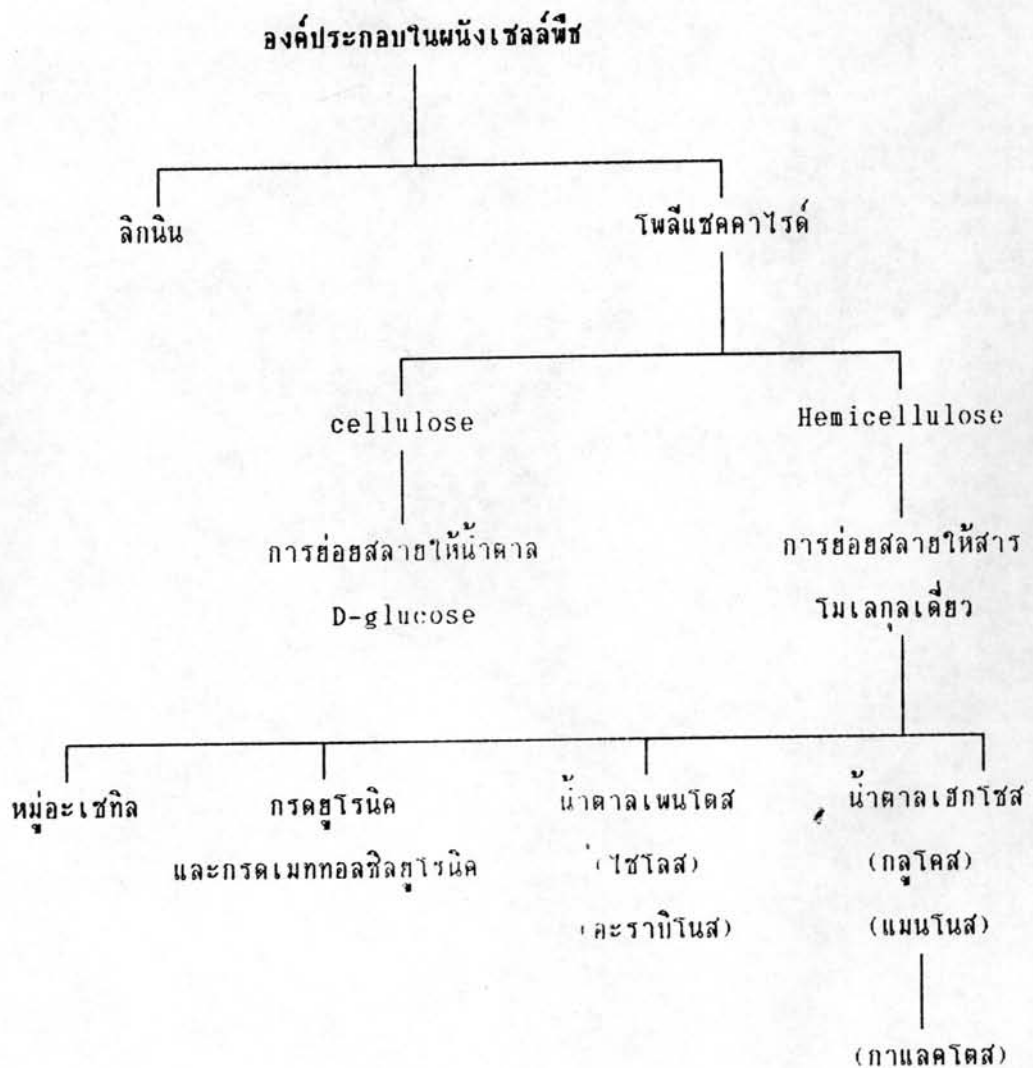
องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเซลล์พืชสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. lignin
2. Holocellulose

Holocellulose สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

- Cellulose
- hemicellulose

แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช (ปราณี ,2532)

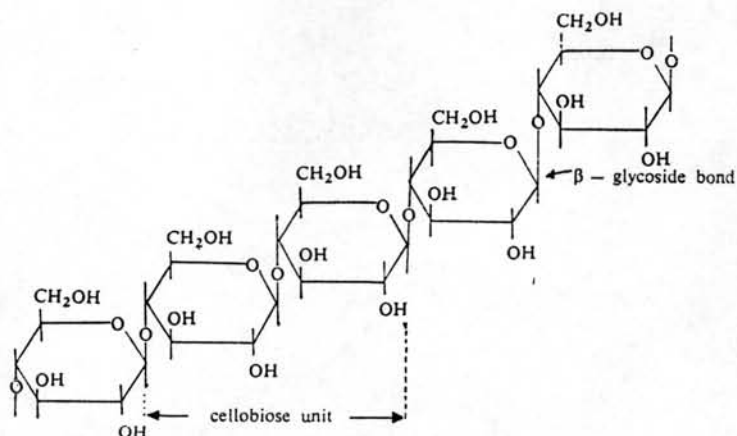
3.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ สารประกอบที่มีมากที่สุดในธรรมชาติเพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช ตัวอย่าง เช่น เนื้อไม้จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 50% นอกจากนั้นยังเกิดในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย จัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์

โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β -glucoside และความยาวของโซ่จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 300 ถึง 2500 หน่วย ซึ่งถ้าไฮโดรไลส์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลส์เต็มที่จะได้ D-glucose

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือไม่ละลายน้ำ, ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือ สารละลายด่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรด หรือ ด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างได้เป็น 3 ชนิด

1. α -cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 %
2. β -cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 %
3. γ -cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% และสามารถละลายได้ดีในกรดเจือจาง



รูปที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส (Bailey , 1986)

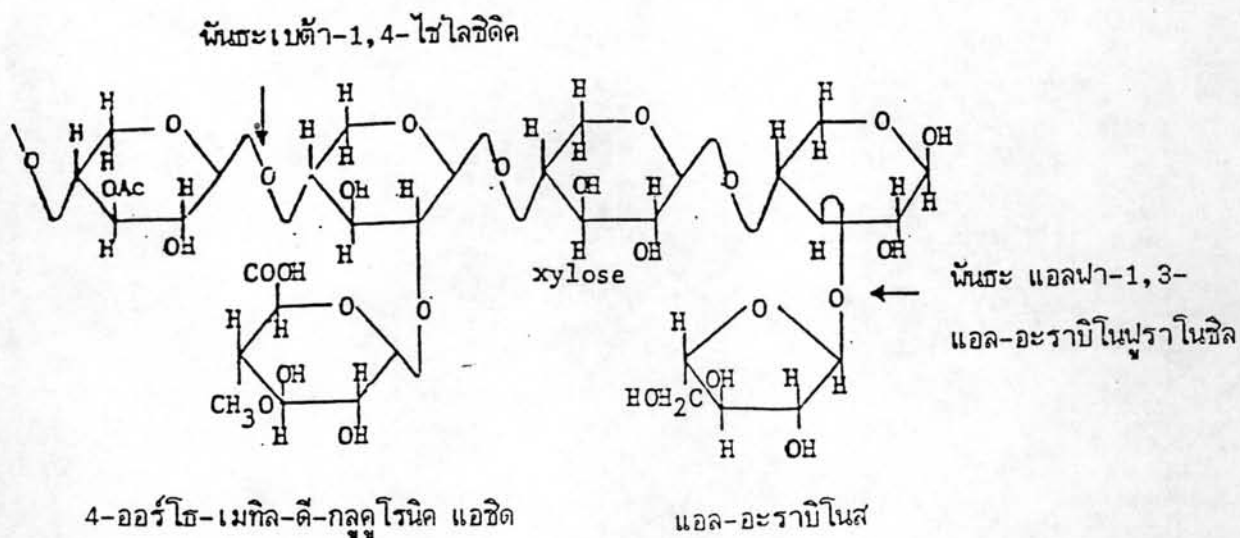
3.4.2 Hemicellulose

เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentoses) ที่มีลักษณะเป็น Heterogenous โดยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้าน สาขาคือแตกต่างจาก cellulose ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง น้ำหนักโมเลกุลของ Hemi-cellulose จะต่ำกว่า Cellulose ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีส่วนประกอบหลักคือ Xylan นอกจากนี้ยังมี glucan, mannan, galactan Hemicellulose เมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตสและเฮกโซส ได้แก่ ไซโลส, แมนโนส, กาแลคโตส, อะราบิโนส

สำหรับ xylan ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ Hemicellulose นั้นเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลลิไซโลสที่ต่อกันด้วยพันธะเบตา -1, 4- ไซโลซิดิก (-1, 4 xylosidic linkage) อาจเป็นเส้นตรงเฉพาะไซโลสอย่างเดี่ยว หรือมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่น ๆ ปรนอยู่ เช่น L-arabinofuranose เชื่อมต่อกับ ดี-ไซโลสที่มีตำแหน่ง 0-3

และดี-กลูคูโรนิกแอซิด (D-glucuronic acid) หรือ 4-O- เมทิล-กลูคูโรนิก แอซิด (4-O-methyl-glucuronic acid) ซึ่งต่อกัน ดี-ไซโลส ที่ตำแหน่ง 0-2 ดังแสดง ในรูป 3.7

Hemicellulose จะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในด่างและถูกย่อยสลายได้ ง่ายกว่า Cellulose



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของไซแลน AC = Acetyl Group (ปราณี , 2532)

3.4.3 Lignin

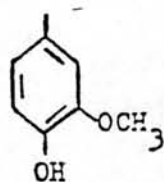
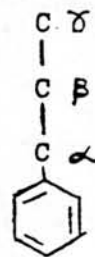
ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืชโดยอยู่รอบ ๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ methoxyl group-OCH₃, หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น phenolic โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้ คือ

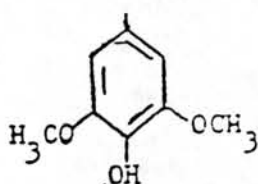
- ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane)
- กัวอีอะซิล ยูนิต (Guaiacyl Unit)
- ซิงกริล ยูนิต (Syringyl Unit)
- พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิต (Para-Hydroxyphenyl Unit)

ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนิน แสดงในรูปที่ 3.8

แบบฟีนิล โพรเพน (phenyl propane type)



กัวอีอะซิล ยูนิต



ซิงกริล ยูนิต



พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิต

ลักษณะการจับ (link) ของหน่วยฟีนิล โพรเพน อาจเชื่อมกันที่ตำแหน่ง α, α หรือ β กับ side chain ของหน่วยอื่น หรือที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ของวงแหวนฟีนิล (phenyl ring) ได้เป็นรูปร่างเส้นตรง , วงกลม หรือมีกิ่งก้านสาขาก็ได้

3.5 องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ในทดลอง

3.5.1 ผักตบชวา

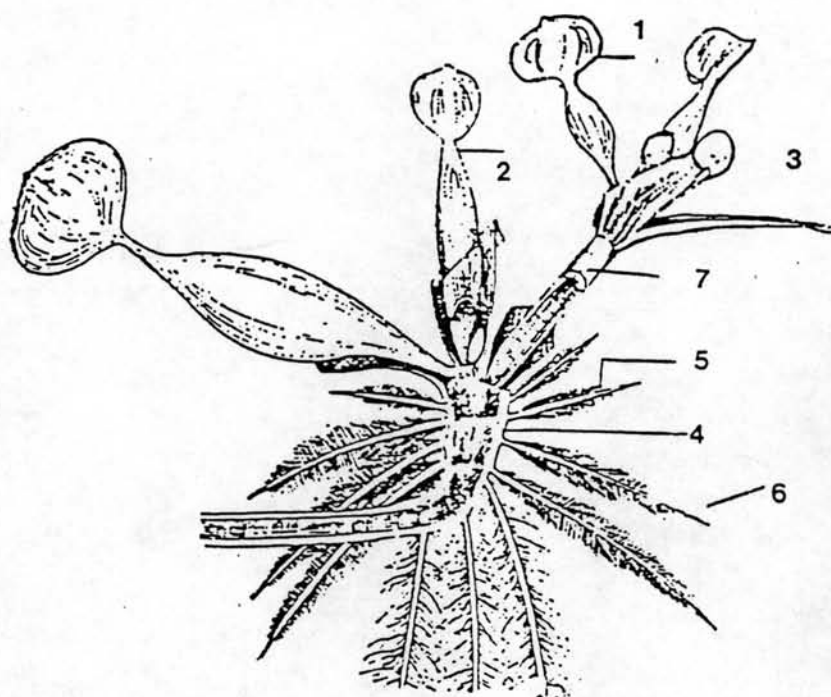
ผักตบชวา (Water Hyacinth , Eichornia Crassipes (Mart.) Solems. เป็นพืชพืชน้ำลอยน้ำ ซึ่งจัดเป็นพืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในตระกูล Pontederiaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ พบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2367 โดย Karl Von Martins และมีการแพร่ระบาดไปยังประเทศไทยด้วย เนื่องจากมีการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปีพ.ศ.2444 พบว่าปัจจุบันมีการแพร่กระจายของผักตบชวา อยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ ใน 74 จังหวัดทั่วประเทศ

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นพืชพืชน้ำปี ประกอบด้วยลำต้นที่มีราก (Rhizomatons System) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 ซม. และยาวประมาณ 30 ซม. ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลม พองออก ภายในมีเนื้อพูนคล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องฟุ้งให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบเป็น รากฝอย โดยแตกออกจากข้อบนลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10-90 ซม.และมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้า ลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอกดังแสดงรายละเอียดดังรูป 3.9

ผักตบชวาจัดเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (Vegetative Propagation) และแบบใช้เพศ (Sexual Reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อเป็นต้นใหม่ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่า ทุกๆระยะเวลา 62 วัน หรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้นเป็น 6 แสนต้น ภายใน

เวลาเพียง 8 เดือน สำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (Self Pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบต่างๆ ของผักตบชวา (ปราณี , 2532)

- | | |
|------------|-----------------|
| 1. แผ่นใบ | 2. ก้านพองลำต้น |
| 3. ลิแกวล์ | 4. เหง้า |
| 5. ชนราก | 6. หมวกราก |
| 7. ลำต้น | |

เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่โตเร็วจึงก่อให้เกิดปัญหาต่าง ๆ ต่อแหล่งน้ำ ปัจจุบันจึงมีการดำเนินการควบคุมได้ 2 วิธีการหลัก

1. การทำลายโดยตรง ได้แก่ การใช้สารเคมี การใช้วิธีกล และใช้ระบบชีวภาพ

1.1 การใช้สารเคมี สารเคมีที่ใช้หลายชนิด เช่น Dalapon, Diquat, Paraquat เป็นต้น เป็นวิธีที่ได้ผลรวดเร็วแต่ก่อให้เกิดปัญหาทางมลภาวะ โดยสารเคมีสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำตลอดจนการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ

1.2 การใช้วิธีกล โดยการใช้แรงงานคน หรือ เครื่องจักรกล วิธีการนี้มีปัญหา คือ สิ้นเปลืองแรงงานและเสียเวลามาก เหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่แคบ ๆ เท่านั้น

1.3 การใช้วิธีชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรีย, รา, ไวรัสและแมลง เป็นต้น แม้ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จถึงขั้นมาใช้ประโยชน์ได้อีกทั้งต้องคำนึงถึงปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้วย

2. การควบคุมโดยการนำไปใช้ประโยชน์

2.1 ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดมลสาร (Pollutants) ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย อันได้แก่ สารอินทรีย์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โลหะหนัก และสารพิษ

2.2 ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas)

2.3 ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืช

2.4 ใช้เป็นอาหารสัตว์

2.5 ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารที่มีประโยชน์ เช่น ใช้ในการผลิตเอนไซม์-เซลลูโลสหรือนำมาแปรรูปโดยการย่อยสลาย ไม่ว่าจะเป็นโดยวิธีการเคมีหรือเอนไซม์ จะได้น้ำตาลชนิดต่าง ๆ ซึ่งใช้ในการหมักโดยจุลินทรีย์ เพื่อผลิตกรดออกซาลิก เอซิลแอลกอฮอล์ วิตามิน ฮาปโทซีวณะ ฯลฯ

องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กก. หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กก. คือ เป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่า ผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และแร่ธาตุอื่น ดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 องค์ประกอบในผักตบชวาแห้ง (ปราณี , 2532)

<u>องค์ประกอบ</u>	<u>สัดส่วน (%)</u>
ลิกนิน	12 - 13
เซลลูโลส	43 - 44
เพนแซน	14 - 15
เถ้า	20 - 21
คาร์บอน	32 - 35
ไฮโดรเจน	5.4 - 5.8
ไนโตรเจน	2.8 - 3.5
โซเดียม	1.5 - 2.5
โปแตสเซียม	2.0 - 3.5
แคลเซียม	0.6 - 1.3

3.5.2 ชานอ้อย

ชานอ้อยเป็นผลพลอยได้จากโรงงานน้ำตาล ในหนึ่ง ๆ มีชานอ้อยที่ผลิตได้ในประเทศไทยไม่ต่ำกว่า 4 ล้านตัน ซึ่งร้อยละ 30 ของชานอ้อยเหล่านี้เป็นพลังงานความร้อนในโรงงานน้ำตาล ชานอ้อยที่เหลืออีกจำนวนมากเป็นแหล่งใหญ่ของไฟเบอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนไม้ใบกว้างในอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุได้หลายประเภท เช่น การผลิตเยื่อกระดาษ การผลิตแผ่นไม้ประดิษฐ์ เป็นต้น นอกจากนี้ ชานอ้อยสามารถใช้ผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น ใช้ผลิตไฟฟ้า เป็นชานอ้อยอัดแท่ง ถ่านอัดแท่งและผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว เป็นต้น

1. การใช้ประโยชน์จากชานอ้อย

สำหรับประเทศไทยมีชานอ้อยเหลืออยู่หลังจากทำเป็นพลังงานแล้วหลายล้านตันในแต่ละปี จึงได้มีการศึกษาการใช้ประโยชน์ของชานอ้อยในรูปแบบอื่น ๆ ได้แก่

- 1.1 การทำกระดาษ
- 1.2 การทำแผ่นไม้ประดิษฐ์
- 1.3 การทำ α -cellulos เพื่อผลิตเรยอน
- 1.4 การทำพลาสติกจากกลีซินของชานอ้อย
- 1.5 การสกัด Xylitol
- 1.6 ใช้เป็นอาหารสัตว์

2. องค์ประกอบทางเคมีและฟิสิกส์ของชานอ้อย

ลำต้นอ้อยประกอบด้วยข้อและปล้องเป็นระยะ ๆ สลับกัน ภายในลำต้นอ้อยประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ประเภท คือ

1. เนื้อเยื่อที่อยู่รอบนอก ได้แก่ Epidermis, Cortex และ Pericycle
2. เนื้อเยื่อประเภทท่อลำเลียง ได้แก่ Vascular Fiber Bundles
3. เนื้อเยื่อประเภทสะสมอาหาร ได้แก่ Parenchyma

เมื่ออ้อยเข้าหีบในโรงงาน จะถูกสกัดเอาน้ำอ้อยออก ส่วนที่เหลือคือชานอ้อยซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำไฟเบอร์และมีสารที่ละลายน้ำได้ (Soluble Solid) ปนอยู่นิดหน่อย ส่วนประกอบพวกนี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของอ้อย การตัดและประสิทธิภาพของโรงงาน

ค่าเฉลี่ยของส่วนประกอบเหล่านี้ มี

ความชื้น (Moisture)	46-52 %
ไฟเบอร์ (Fiber)	43-52 %
Soluble Solid (ส่วนใหญ่เป็นน้ำตาล)	2-6 %

ส่วนประกอบที่เป็นไฟเบอร์จะไม่ละลายน้ำ ประกอบด้วย Cellulos , Pentosans และ Lignin ขนาดของไฟเบอร์และพาแรงคิจแตกต่างกันไปตามแหล่งของอ้อย ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ค่าเฉลี่ยของความยาวไฟเบอร์อยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.7 มม. ส่วนความยาวของพาแรงคิจมีค่าประมาณ 0.2 ถึง 0.4 มม.

ขนาดของไฟเบอร์จากอ้อย เมื่อเปรียบเทียบกับพืชชนิดอื่น ๆ

<u>ชนิดของพืช</u>	<u>ขนาดของไฟเบอร์เฉลี่ย</u>	
	<u>ความยาว (มม.)</u>	<u>เส้นผ่าศูนย์กลาง (ไมโครรอน)</u>
ชานอ้อย	1.2-1.7	20
ฟางข้าว	0.5	8.5
ไม้ไผ่	3.0-4.0	14
ไม้ใบกว้าง	0.7-1.6	20-40

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ใช้วิธีวิเคราะห์ของ Technical Association of The Pulp and Paper Industry Standard ชานอ้อยที่จะนำมาวิเคราะห์จะถูกบดจนป่นและเลือกเอาขนาด 40-60 msh. ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบทางเคมีของชานอ้อย (ปรีชา , 2532)

<u>องค์ประกอบ</u>	<u>สัดส่วน (% ON THE EVEN-DAY BASIC</u>
Holocellulose	82.52
α -Cellulose	44.05
Pentosans	27.21
Lignin (ash free)	19.78
Ash	1.60
Alcohol Benzene solubility	3.06

3.6 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดโลหะหนักโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Tan, Ooi, และ Lee (1993) ได้ทดลองใช้ใยเปลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์มที่ผ่านขบวนการผลิตน้ำปาล์ม ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่มีประจุบวกหก (Cr^{+6}) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch-Test) และแบบคอลัมน์ (Column Test) ใยเปลือกมะพร้าว และเม็ดปาล์มที่จะนำมาใช้ทดลองจะถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 C แล้วทำให้ละเอียด และร่อนคัดขนาด โดยใช้ขนาดของใยเปลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์มอยู่ในช่วง 0.30-0.85 mm. จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5-1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกวนใน NaOH 1.5 M, นำไปล้างด้วย HNO_3 2 M และน้ำกลั่นตามลำดับ นำไปอบให้แห้งก่อนที่จะใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมโดยใช้ใยเปลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์ม คือ เวลาสัมผัสระหว่างสารละลายโครเมียมกับวัสดุที่ใช้ทดลองอิทธิพลของพีเอช และความสามารถในการกำจัดโครเมียม โดยจะทำการทดลองแบบทีละเท ส่วนในการทดลองแบบคอลัมน์จะศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงของวัสดุที่ใช้ ระดับการรีเจนเนอเรชัน

จากผลการทดลองอิทธิพลของเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายโครเมียมกับวัสดุที่ใช้ทดลองพบว่าในช่วง 20 นาทีแรกสามารถกำจัดโครเมียมได้ประมาณ 80 % จากนั้น ความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้อีกต่อไป สำหรับอิทธิพลของพีเอชพบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับใยเปลือกมะพร้าว คือ 1.5-5 และ เมล็ดปาล์มอยู่ในช่วง 1.5-3 ความสามารถในการกำจัดโครเมียม ประมาณ 70 %

ความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ของใยเปลือกมะพร้าวเท่ากับ 5 และ 29 mg Cr/g ที่พีเอช 3.00 และ 2.05 ส่วนเมล็ดปาล์มมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 5 และ 14 mg Cr/g ที่พีเอช 3.00 และ 2.05

สำหรับอิทธิพลของความสูงของวัสดุ พบว่า ที่อัตราการไหลเดียวกัน ชั้นความสูงที่มากกว่า จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่า เนื่องจากมีปริมาณของวัสดุที่สามารถดูดโครเมียมมากกว่า การรีเจนเนอเรชันจะใช้ NaOH เข้มข้น 0.05 M หรือ HNO₃ 0.1 M.

Maranon และ Sastre (1992) ได้ทำการศึกษาโดยใช้กากแอปเปิ้ลจากขบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพและกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphation reaction ในการทดลองได้ทำการศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ อิทธิพลของพีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการศึกษากำจัดโลหะในน้ำทะเล โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง เรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะหนักที่ศึกษาคือ ทองแดง และนิกเกิล ส่วนน้ำทะเลเป็นน้ำตัวอย่างจากทะเลคาริเบียน โลหะหนักที่ศึกษา คือ ทองแดง, นิกเกิล, แคดเมียม และปรอท

จากผลการทดลอง พบว่า อิทธิพลของพีเอช มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพและที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพ คือ มากกว่า 3.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99% โดยควบคุมอัตราการไหล 10 ml/min. ส่วนกากแอปเปิ้ลที่

ปรับสภาพโดยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมคือมากกว่า 2.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99% อัตราการไหล 10 ml/min. ในกรณีที่มีน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล พีเอชที่เหมาะสม คือ พีเอช 5 ซึ่งรวมถึงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติม EDTA สำหรับอิทธิพลของอัตราการไหลได้ทำการศึกษาโดยมีการแปรค่าอัตราการไหล 3 ค่า คือ 10, 20 และ 30 ml/min จากผลการทดลองพบว่า กากแอมป์เปิ้ลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99% ที่อัตราการไหล 10 และ 20 ml/min ส่วนที่อัตราการไหล 30 ml/min สามารถกำจัดทองแดง และนิกเกิลได้เพียง 58% ส่วนกากแอมป์เปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัดทองแดง และนิกเกิลได้ประมาณ 99% ที่อัตราการไหล 10, 20 และ 30 ml/min ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการ Phosphation Reaction สามารถรับอัตราการไหลที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง

ส่วนการศึกษาศามารถในการกำจัดโลหะหนักเปรียบเทียบกันระหว่าง เรซินแบบสังเคราะห์ และกากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่ากากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพมีความสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินแบบสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิล แคลเมียม และตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์ และกากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่ากากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพมีความสามารถกำจัดทองแดง ได้ดีกว่าเรซินแบบสังเคราะห์ ส่วน นิกเกิล แคลเมียม และตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีกว่ากากแอมป์เปิ้ลที่ปรับสภาพ

Maranon และ Sastre (1991) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอมป์เปิ้ลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำแอมป์เปิ้ล ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โลหะที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง, นิกเกิล และ สังกะสี ในการทดลองได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ทดลอง, การปรับสภาพของกากแอมป์เปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมี, ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ในการศึกษาองค์ประกอบของกากแอมป์เปิ้ลที่นำมาใช้ในการทดลอง พบว่าประกอบด้วยเซลลูโลส 20% เฮมิเซลลูโลส 10% , ลิกนิน 10% และส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น แทนนิน เรซิน, reducing sugars, colouring agents

สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพกากแอมเปิ้ล คือ Phosphation Reaction และ Crosslinking and Xanthation Reaction

จากผลการทดลองศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่ากากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพ โดย Phosphation Reaction (P-AR) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง 1.6 meq/g ส่วนกากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย Crosslinking and Xanthation Reaction (CLX-AR) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 1.1 meq/g และกากแอมเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 0.4 meq/g สำหรับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับนิกเกิล และสังกะสีของ P-AR, CLX-AR และกากแอมเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 1.1, 0.6 และ 0.3 meq/g ตามลำดับ

ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง พบว่ากากแอมเปิ้ลที่มีขนาด 0.2-0.4 มม. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4-0.63 มม. ส่วนการศึกษาทางด้านกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอมเปิ้ล พบว่ากากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพประมาณ 2 และ 5-8 เท่าพบว่ากากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย Phosphation Reaction สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่ากากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย Crosslinking and Xanthation Reaction และ กากแอมเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ ประมาณ 2 และ 5-8 เท่าตามลำดับ สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

การรีเจนเนอเรชัน ได้ทำการทดลองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 N พบว่า ปริมาณกรดที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน ประมาณ 3 Bed Volumes.

Nakajima และ Sakaguchi (1990) ได้ทำการวิจัยความสามารถในการกำจัดยูเรเนียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำทะเล โดยใช้กากพืชชนิดต่าง ๆ 7 ชนิด ได้แก่ เปลือกลูกนัท (Chestnut outer shell), ผิวด้านในลูกนัท (Chestnut inner skin), เปลือกถั่ว (Peanut inner skin), หัวหอม (Onion Skin), เปลือกส้ม (Orange Peel), เปลือกองุ่น (Grapefruit Peel) ซึ่งจะทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพ และกากพืชที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาดีไฮด์ และกรดซัลฟูริก

ขนาดวัสดุที่ใช้ทดลองจะมีขนาดเล็กกว่า 60 mesh

จากผลการทดลองความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และ น้ำทะเลโดยใช้กากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพ พบว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีปริมาณโครเมียม 10 mg/l และปรับพีเอชเท่ากับ 5 เปลือกถั่วที่มีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ 81.0 % ส่วนผิวด้านในถั่ว, หัวหอม, เปลือกส้ม, เปลือกถั่ว กับ 79.4, 73.9, 72.0, 81.2, และ 77.3 % ตามลำดับ เปลือกถั่วจะมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ค่อนข้างต่ำคือ 48.4% ในกรณีน้ำทะเลซึ่งมีปริมาณโครเมียม 10 mg/l และ มีพีเอชเท่ากับ 8 พบว่ามีเพียงเปลือกถั่ว และผิวด้านในถั่วเท่านั้นที่สามารถดูดซับโครเมียมได้ คือ 59.7 และ 79.6% ตามลำดับ

ในกรณีของกากพืชที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาดีไฮด์และกรดซัลฟูริกพบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มขึ้นทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล ดังแสดงในตาราง 3.11

ตารางที่ 3.11 ผลการทดลองความสามารถในการกำจัดโครเมียมของพืชชนิดต่างๆ

Plant Waste	Uranium adsorbed (%)	
	Uranium Solution	Seawater
Chestnut outer shell	88.2 ± 1.4	75.5 ± 1.5
Chestnut inner skin	73.6 ± 1.5	81.1 ± 1.6
Peanut outer shell	90.9 ± 1.8	1.7 ± 1.5
Peanut inner skin	91.8 ± 2.6	60.7 ± 2.5
Onion Skin	97.9 ± 1.8	53.5 ± 1.5
Orange peel	96.0 ± 1.4	3.0 ± 1.8
Grapefruit peel	73.4 ± 3.8	0.00

Lee และ Low (1989) ได้ทำการวิจัยโดยใช้พืชประเภทตะไคร่น้ำ (*Moss, Calymperes delessertii* Besch) กำจัดทองแดงออกจากริ่่น้ำเสีย โดยได้ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch test) และแบบคอลัมน์ (Column test) ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย คือ ปริมาณของ Moss, ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสีย, ผลกระทบเนื่องจากโลหะอื่น ๆ, อุณหภูมิ, เวลาสัมผัสระหว่างสารละลายทองแดงและวัสดุที่ใช้ทดลอง, ความสูงของชั้นวัสดุ, อัตราการไหลขนาดของ moss ที่ใช้ในการทดลอง มีขนาด 250-1700 μm .

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณของ Moss เพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นตาม และถ้าใช้น้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มมากขึ้นความสามารถในการกำจัดทองแดงของ moss จะลดลง ส่วนการศึกษาอิทธิพลของโลหะชนิดอื่นที่มีปนในน้ำเสีย พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของมอส มีค่าใกล้เคียงกับทองแดงส่วนแคดเมียม, สังกะสี และนิกเกิลจะน้อยลงตามลำดับ สำหรับผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิสูงสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยได้ทำการศึกษา ที่อุณหภูมิ 0, 40 และ 60 °C

สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์จะทำการศึกษาผลของความสูงของชั้นวัสดุ และ อัตราการไหลของน้ำเสีย จากผลการทดลองอิทธิพลของความสูงชั้นวัสดุ พบว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นสามารถกำจัดทองแดงออกได้มากขึ้นคือ ที่ความสูง 15 ซม. Breakthrough Curve เท่ากับ 24 BV ส่วนความสูง 10 และ 5 ซม. Breakthrough Curve เท่ากับ 20 และ 16 BV ตามลำดับ โดยควบคุมอัตราการไหลเท่ากับ 20 ml/min ส่วนในการศึกษาผลจากอัตราการไหล พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดทองแดงจะลดลง

Tan และ Rahman (1988) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชาในการกำจัด ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ออกจากน้ำเสีย ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ พีเอช, ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย, อัตราการไหล ขนาดของใบชาที่ใช้ทดลองมี Effective Size 60-80 mesh. ใบชาที่จะใช้ในการทดลองจะนำไปต้มในน้ำร้อนประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปแช่ในกรดไนตริก เข้มข้น 0.10 M นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปกรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของพีเอชต่อการกำจัดโลหะหนัก พบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและแคดเมียมคือพีเอช 6-7 ส่วนตะกั่วพีเอชที่เหมาะสมคือ 4-7 สำหรับอิทธิพลเนื่องจากปริมาณของวัสดุ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไบซา ความสามารถในการกำจัดโลหะต่าง ๆ ออกจากน้ำเสี้ยวจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจาก พื้นที่ผิวในการดูดซับโลหะเพิ่มมากขึ้น และ ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสี้ยว

การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหล จะทำการทดลองโดยใช้ Column Method จากผลการทดลองอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักคือ 8.3 ml/min ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักประมาณ 90% และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมีผลต่อการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสี้ยวน้อยกว่า แคดเมียม และ สังกะสี

ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสี้ยวจะมีประสิทธิภาพต่างกัน คือ ความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะมีมากกว่าแคดเมียม ส่วนสังกะสีจะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

Macchi, Marani และ Tiravanti (1986) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากกาแฟ (Exhausted Coffee Grounds; ECG) กำจัดปรอทออกจากน้ำเสี้ยวสังเคราะห์ โดยได้ทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Test) และ แบบคอลัมน์ (Column Test) การเตรียมกากกาแฟที่ใช้ในการทดลองทำได้โดยนำไปกวนในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 M นาน 1 ชั่วโมง นำมากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปกวนในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.5 M นาน 0.5 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น วิธีนี้จะสามารถกำจัดสีของกากกาแฟออกได้

ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดปรอทโดยใช้กากกาแฟ ได้แก่ พีเอช, ความเข้มข้นของปรอท จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทได้ 99.9% ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทได้ 99% ความสามารถในการกำจัดปรอทของกากกาแฟ มีค่าเท่ากับ 80 mg/g เมื่อสารละลายปรอทมีความเข้มข้น 10 mg/l ในกรณีที่มีน้ำเสี้ยวมีปริมาณคลอไรด์สูงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดปรอทจะอยู่ในช่วง 10-11

การนำกลับปรอทที่ถูกดูดซับด้วยกากกาแฟ จะทำโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 M ซึ่งจะใช้ปริมาณกรดในการทำรีเจนเนอเรชันประมาณ 16 Bed Volumes จากผลการทดลองพบว่า ที่ พีเอชเท่ากับ 3 สามารถรีเจนเนอเรชัน ได้ประมาณ 85% ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 11 ได้ประมาณ 70%

Srivastava, Mathur และ Mehrotra (1986) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ ฝุ่น (Sawdust) กำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โครเมียมที่ศึกษาเป็นโครเมียมที่มีประจุบวกหก ทำการวิจัยแบบทีละเท (Batch test) ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช, ความเข้มข้นของโครเมียม, ปริมาณของฝุ่น ความเข้มข้นของโครเมียมที่ศึกษาคือ 1, 5, 10, 25 และ 50 mg/l ปริมาณฝุ่นที่ใช้คือ 1, 5, 10, 25 และ 50 g ทำการทดลองโดยใช้วิธีจาร์เจสต์ คือ นำฝุ่นใส่ในน้ำเสียจากนั้นกวนด้วยอัตราเร็ว 50 rpm. นาน 6 ชั่วโมง เก็บน้ำตัวอย่างที่ 0, 30, 60, 180 และ 360 นาที หลังจากเสร็จสิ้นการกวน

จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะเกิดได้ดีที่ พีเอชต่ำคือที่พีเอชเท่ากับ 2.8 สามารถในการดูดซับโครเมียม ได้ 0.415 mg/g ส่วนที่พีเอช 6.35 ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.379 น้ำเสียที่ไหลผ่านฝุ่นจะมีพีเอชที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ในช่วง 8.5-9.0 ในกรณีพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณโครเมียมกับปริมาณของฝุ่น พบว่าเมื่อน้ำเสียมีปริมาณความเข้มข้นต่ำคือ 1.0-5.0 mg/l การเพิ่มปริมาณของฝุ่นจะทำให้ความสามารถในการกำจัดโครเมียมเพิ่มสูงขึ้น เช่น น้ำเสียที่มีปริมาณโครเมียม 1mg/l เมื่อใช้ฝุ่น 1.0 mg/l. สามารถกำจัดโครเมียมได้ 20% ถ้าใช้ฝุ่น 10g จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึง 80% ในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของโครเมียมสูง ๆ พบว่า การแปรเปลี่ยน ปริมาณฝุ่น (1-50g) ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะมีค่าได้ใกล้เคียงกัน

Odozi, Okeke และ Larty (1985) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ขี้วัวโศดบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักละลายอยู่ การศึกษาได้แบ่งเป็น 2 กรณี คือ การใช้ขี้วัวโศดที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลอย่างเดี่ยว กับใช้ขี้วัวโศดรวมกับฝุ่นและเปลือกหัวหอมที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลและฟอร์มาลดีไฮด์ สำหรับชนิดของโลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ นิกเกิล, ทองแดง,

แมงกานีส, สังกะสี และตะกั่ว ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ 150 และ 300 μm .

จากผลการทดลองพบว่า ซิงค์ขาวโพดที่ใช้ประกอบด้วยฟังก์ชันกรุป 2 หมู่ คือ SO_3H และ phenolic OH การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูง ดังนั้นพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์จะอยู่ในช่วง 5.6-8.2 และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านเรซินที่เตรียมไว้ปรากฏว่าค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 2.8-5.9 ปฏิกริยาเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า เรซินที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นเรซินแบบกรด เมื่อมีการแลกเปลี่ยนไอออนจะปล่อยไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นจึงทำให้พีเอชของน้ำที่ผ่านเรซินต่ำกว่าน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักอยู่ในช่วง 60-90% คือสามารถกำจัดตะกั่วได้ 92.5% และ 90.0% สำหรับซิงค์ขาวโพดที่มีขนาด 150 μm และ 300 μm ส่วนโลหะหนักที่กำจัดได้น้อยที่สุด คือ ทองแดง สามารถกำจัดได้ 59.1 % และ 57.3% ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ คือ $\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า เรซินที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าเรซินขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวมากกว่า

การทดลองศึกษาขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง สังกะสี กับ แคลเซียม เรซินที่ใช้คือ ซิงค์ขาวโพด และวัสดุผสม (ซิงค์ขาวโพด, ซีลีออส, เปลือกหัวหอม) พบว่าขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 1.5-1.8 meq. M^{2+} ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุผสมมากกว่าการใช้ซิงค์ขาวโพดอย่างเดียว และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมได้ดีกว่า สังกะสี