

บททวนเอกสาร

การชุบโลหะที่เกิดด้วยไฟฟ้า

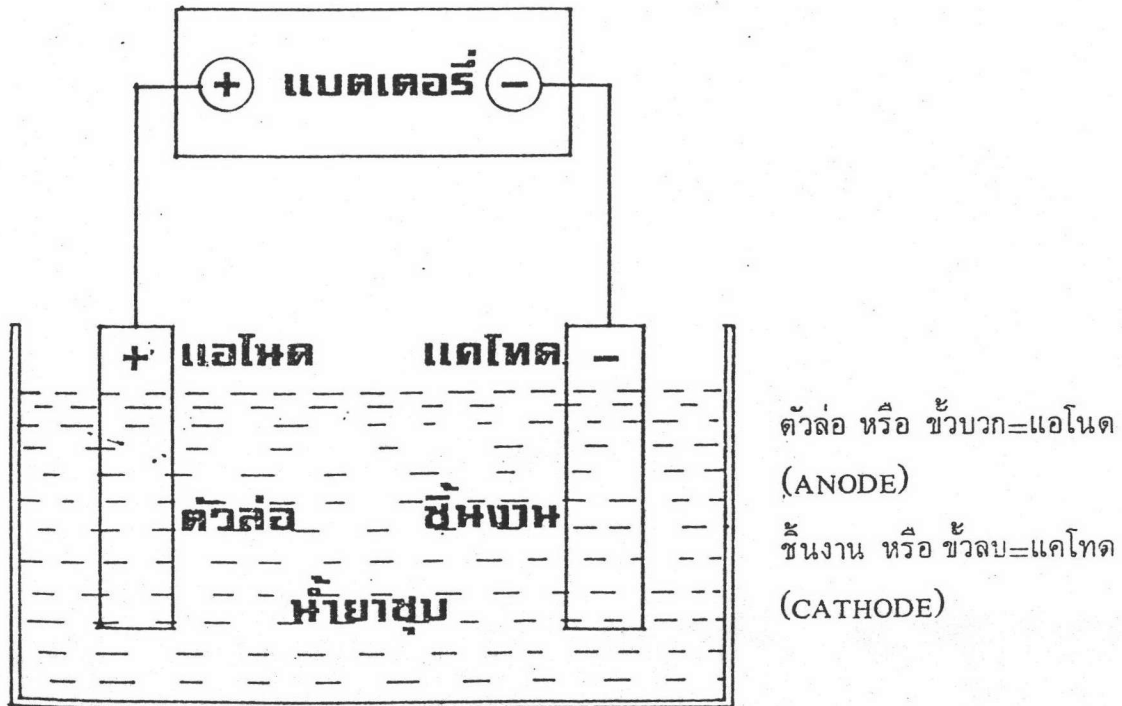
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า(Electroplating) คือกระบวนการไฟฟ้า-เคมีที่ใช้เคลือบผิวโลหะด้วยโลหะอีกชนิดหนึ่ง ชั้นของโลหะที่เคลือบนี้จะมีความหนาอย่างน้อย 10 ไมครอนเพื่อไม่ให้เกิดการลอกออกได้ (มัทชีโอะ.2525)

ประโยชน์ของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะทำให้ชิ้นงาน

- 1 ทนต่อการสึกกร่อนเนื่องจากสนิมและแรงเสียดทาน
- 2 สวยงามมาใช้
- 3 ผิวที่เป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถสื่อไฟฟ้าได้

1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

กระบวนการของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในสารละลายชุบโลหะ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบหรือไอออนลบ (Anion) จะวิ่งไปทางขั้วบวกหรือแอโนด(Anode) ส่วนอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกหรือไอออนบวก (Cation) จะวิ่งไปทางขั้วลบหรือคาโทด(Cathode) ซึ่งชิ้นงานตั้งอยู่ ตามรูป 3.1 ชิ้นงานนี้จะจุ่มอยู่ในน้ำยาชุบโลหะซึ่งมีเกลือของโลหะสารเคลือบละลายอยู่ นอกจากนี้อาจมีการเจือเกลือชนิดอื่นๆ กรด หรือด่างลงในสารละลายเพิ่มเติม เพื่อควบคุมกระบวนการให้เป็นไปด้วยดี



รูปที่ 3.1 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (พิชิต,2525)

น้ำยาชุบโลหะ (Electrolytes) สามารถแบ่งได้เป็น 2 พวกตามลักษณะของตัวนำไฟฟ้า ดังนี้

1. พวกที่นำไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น โลหะต่างๆ
2. พวกที่นำไฟฟ้าได้โดยการแตกตัวออกเป็นอนุภาคเล็กๆ เช่น สารละลายเกลือต่างๆ ซึ่งพวกนี้จะมีความสำคัญในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (อนันต์,2527)

ตามปกติแล้วขั้วบวกจะเป็นโลหะชนิดเดียวกับไอออนในน้ำยาชุบโลหะ ซึ่งจะต้องมีความบริสุทธิ์มาก ไอออนของโลหะที่มีประจุบวกจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วงานซึ่งเป็นขั้วลบ ไอออนของโลหะจะได้รับอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบทำให้กลายเป็นโลหะธรรมดาณขั้วลบขั้วงานกลายเป็นผิวเคลือบ

การเตรียมขั้วงานเพื่อให้การชุบได้ผลดีนั้นจะต้องขัดผิวโลหะให้เรียบร้อยแล้วล้างออกใช้ด่างด้วยกรด จากนั้นล้างด้วยสารละลายที่เป็นด่างหรือน้ำยาล้างเพื่อล้างเอาน้ำมันออก ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งจะแสดงกระบวนการของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และของเสียที่ออกมาจากแต่ละกระบวนการ

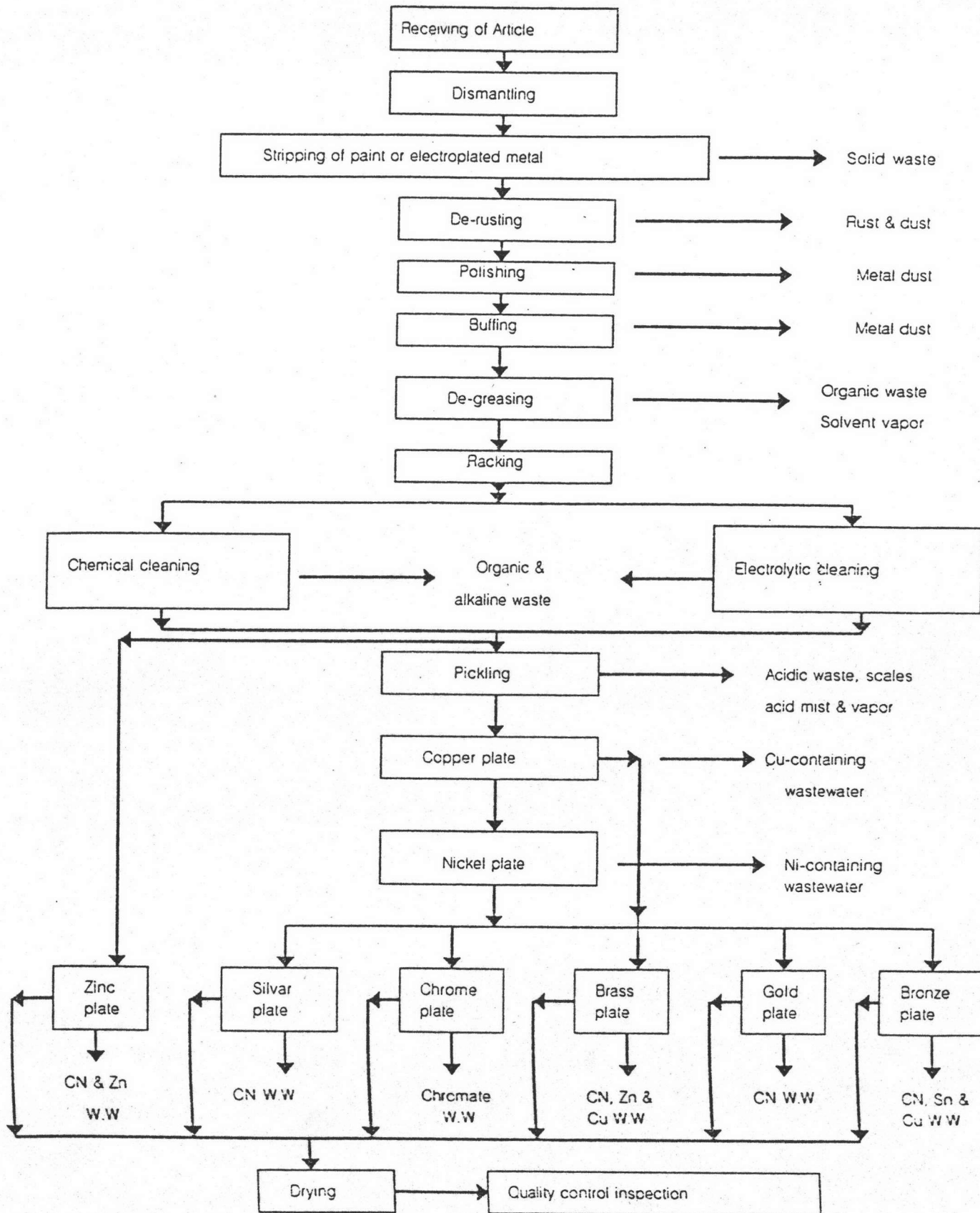
## 2 การชุบนิกเกิล (Nickel Electroplating)

นิกเกิลมีสัญลักษณ์ Ni เป็นธาตุโลหะหนักสีขาวด้านที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 28 น้ำหนักอะตอมเท่ากับ 58.70 มีจุดเดือดที่ 2732 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลวที่ 1453 องศาเซลเซียส มีความแข็ง 80-120 Brinell มีความถ่วงจำเพาะ 8.908 เป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IIB ในตารางธาตุ มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี

ส่วนผสมของน้ำยาชุบนิกเกิลมีอยู่หลายชนิดดังตารางที่ 3.2 เป็นส่วนประกอบที่สำคัญต่อประสิทธิภาพของการชุบโลหะ โดยน้ำยาชุบโลหะนิกเกิลที่รู้จักกันดีมีชื่อว่า "Watts bath" ประกอบไปด้วยนิกเกิลซัลเฟต นิกเกิลคลอไรด์ และกรดบอริก นอกจากนี้แล้วยังอาจเจือสารอื่นๆ อีก เช่น สารประเภท wetting agent เพื่อป้องกันการเกิดรูเล็กๆ บนผิวเคลือบ สารประเภท sulfonate และ sulfoamides เพื่อช่วยลด stress บนผิวเคลือบ โลหะบางชนิดเช่น cobalt ทำให้ผิวเป็นมันยิ่งขึ้น และยังมีสารอื่นๆ อีกเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพพื้นผิว สารละลาย watts bath นี้จะใช้กระแสไฟฟ้าที่ current density 50 amp/sq ft. โดยใช้เนื้อที่ผิวขั้วลบเป็นหลัก จะต้องมีการกรองสารละลายอย่างต่อเนื่องโดยให้สารละลายทั้งอ่างผ่านไส้กรองอย่างน้อย 2 ครั้งต่อชั่วโมง การกรองจะช่วยให้เกิดการไหลเวียน ส่วนผสมของสารละลายจะต้องได้รับการวิเคราะห์ เช่น จะต้องตรวจสอบปริมาณ nickel ions, chloride ions และ boric acid สัปดาห์ละ 2 ครั้งเป็นอย่างน้อย ควรจัดให้มีการล้างและเทือนของขั้วบวกด้วยเพื่อให้การชุบมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ความหนาของผิวเคลือบจะขึ้นอยู่กับเวลาในการชุบ และ current density ของกระแสไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ของชิ้นงาน คือถ้าใช้เวลาในการชุบมาก และ current density สูง ผิวเคลือบจะหนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระบบการระบุคุณภาพ การชุบ nickel เพื่อการป้องกันผิวนั้น มีความหนาระหว่าง 0.0001-0.002 นิ้ว ซึ่งนับว่าเป็นการชุบหนา ส่วนการชุบ cadmium หนา 0.0005-0.0002 นิ้ว จัดว่าเป็นการชุบบาง ในกรณีที่โลหะเคลือบมีความทนทานกว่าโลหะชิ้นงาน และต้องการให้ผิวเคลือบปกป้องคุ้มครองชิ้นงาน จะต้องชุบผิวเคลือบให้หนา และไม่ให้มีโพรงอากาศเกิดขึ้น ถ้าเป็นการชุบบางโดยไม่ต้องการความแข็งแรงของสารเคลือบมากนัก การจะมีโพรงอากาศหรือไม่ก็ไม่สำคัญมากนัก (ศุภโชค, 2530)

ความเป็นพิษของนิกเกิลจะเกิดเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง



รูปที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Nguyen, 2536)



ตารางที่ 3.2 แสดงส่วนผสมของน้ำยาชุบนิกเกิลชนิดต่างๆ (Pinner และคณะ, 2507)

Type	Ingredients <sup>a, b</sup>	Concentration, g/l	pH (electrometric)	Temperature, C
Watts	Nickel sulfate, NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	330	1.5-4.5	45-65
	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	45		
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	38		
Hard	Nickel sulfate, NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	180	5.6-5.9	43-60
	Ammonium chloride, (NH <sub>4</sub> )Cl	25		
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30		
Chloride	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	300	2.0	50-70
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	38		
Chloride-Sulfate	Nickel sulfate, NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	200	1.5-2.0	45
	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	175		
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	40		
Chloride-Acetate	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	135	4.5-4.9	30-50
	Nickel acetate, Ni(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	105		
Nickel-Cobalt	Nickel sulfate, NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	240	4.7	40
	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	22.5		
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30		
	Ammonium sulfate, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.5		
	Nickel formate, Ni(CHO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	15		
	Cobalt sulfate, CoSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	2.6		
Fluoborate	Nickel (as fluoborate)	75	2.0-3.5 (colorimetric)	40-80
	Free fluoboric acid, HBF <sub>4</sub>	3.7-37.5		
	Free boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30		
Sulfamate	Nickel sulfamate, Ni(NH <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	450	3.0-5.0	40-60
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30		
Sulfamate-Chloride	Nickel sulfamate, Ni(NH <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	300	3.5-4.2	28-60
	Nickel chloride, NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	6		
	Boric acid, H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30		

นิกเกิลส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่นๆเป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก ใช้กันแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังจะเห็นได้จากปริมาณของน้ำเสียที่มีส่วนผสมของนิกเกิลอยู่เป็นปริมาณมาก ดังตารางที่ 3.3 ใช้นิกเกิลชุบรองพื้นบนชิ้นงานก่อนชุบโครเมียม ชุบทอง หรือชุบเงิน ใช้ในการชุบแม่พิมพ์หนังสือ



### กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินมีไฮโดรคาร์บอนหลายๆโมเลกุลประสานต่อกันเป็นโครงร่างคล้ายตาข่ายสามมิติที่เรียกว่า Matrix โดยมีหมู่ไอออนซึ่งทำให้เรซินมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนประจุเกาะอยู่ตามตำแหน่งต่างๆบนตาข่ายเรียกว่า Functional group หมู่ไอออนนี้ส่วนหนึ่งเกาะติดอยู่กับโครงร่างและไม่เคลื่อนที่ อีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ได้และเป็นส่วนที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในน้ำดังรูปที่ 3.3

#### 1. วัฏจักรการทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

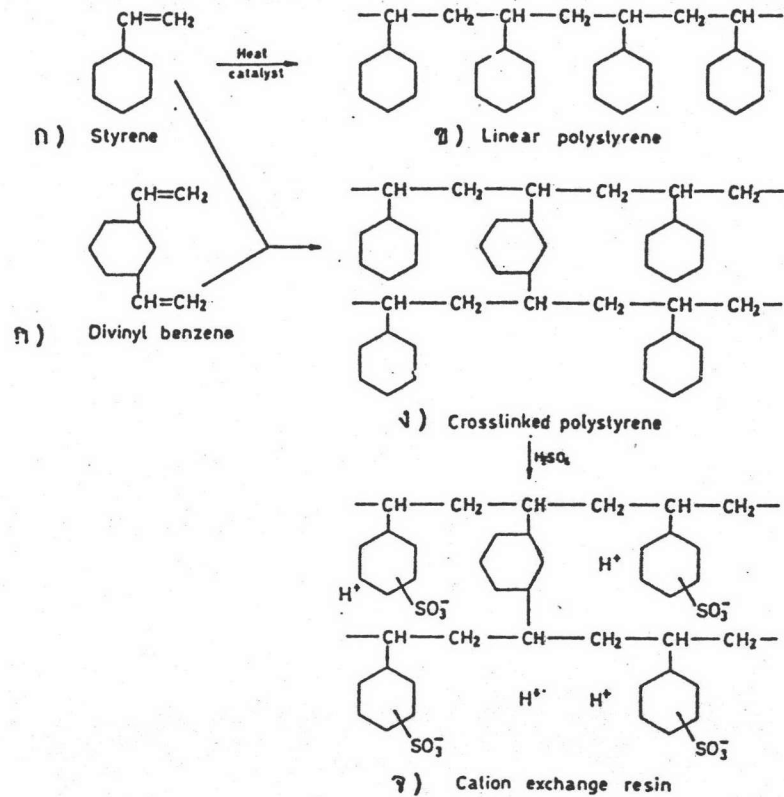
ระบบแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำงานแบบทีละเท (Batch) หรือแบบต่อเนื่องก็ได้ การทำงานแบบต่อเนื่องนี้หมายถึงการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุอยู่ในถัง และปล่อยให้ น้ำดิบไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่องทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา ถึงเรซินมี การทำงานต่อเนื่องกัน 4 ขั้นตอนคือ

1.1 การแลกเปลี่ยนไอออนหรือการบริการ (Service) ขั้นตอนนี้ถือเป็นหน้าที่หลักของเรซิน กล่าวคือ ไอออนอิสระที่เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วในเรซินจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นๆใน น้ำดิบ ทำให้ได้น้ำสะอาดตามต้องการ ขั้นตอนนี้จะยุติลงเมื่อมีไอออนอิสระในเรซินเหลือน้อย จนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆในน้ำดิบได้ อายุในแต่ละวัฏจักรของเรซินขึ้นอยู่กับ ปริมาณไอออนในน้ำดิบและขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

1.2 การล้างย้อน (Backwash) หลังจากเรซินหมดอำนาจแล้ว แต่ยังไม่เสีย ต้องทำ การล้างย้อนเพื่อให้ชั้นเรซินมีการขยายตัวเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการทำลายการจับตัวเป็นก้อน ของเรซิน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อล้างความขุ่นหรือตะกอน แหวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน เพื่อกำจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นและค้างอยู่ในชั้นเรซิน เพื่อทำให้ มีการเรียงชั้นใหม่ของเรซิน ซึ่งช่วยให้การกระจายน้ำผ่านชั้นเรซินเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอใน ระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน

ตารางที่ 3.3 ลักษณะและปริมาณของน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ (TISTR, 1982)

Factory Name	Plating Activity	Waste Volume m <sup>3</sup> /d.	Waste characteristics, mg/l.						
			Cr	Ni	Cu	Zn	Au	Al	Cl <sup>-</sup>
1. Jintanasawan	Cr, Au	15	0.05	27.5	-	-	0.05	-	-
2. Sangjaroen	Cr	1	40.3	27.5	-	-	-	-	-
3. Golden Lamp Co.	Ni, Cu	6	-	1.4	-	-	-	-	100
4. Thal-vasco, Electro. Ltd.	Al	0	-	-	-	-	-	345-1,520	-
5. Suthichai chromium	Cr	8	27.3	29.0	4.7	-	-	-	-
6. Sexmsarapad	Cr, Zn	3.5	22.5	-	-	91	-	-	5.0
7. Kimhuad	Cr	0.5	2.9	10.0	11.0	-	-	-	-
8. Sawmee	Cr	3	0.9	7.0	-	-	-	-	-
9. Theptip-chromium	Cr	3	96.6	21.3	2.3	-	-	-	-
10. SahaJerawat	Zn	4	-	-	-	0.20	-	-	-
11. Thaijaroenkarnchang	Cr, Zn	20	18.6	24.9	10	19.7	-	-	10
12. Ha-senghuad	Cr	4	0.5	2.0	105.5	-	467	-	667
13. Samchai-Usahakam	Zn	4	-	-	-	-	-	-	1,000
14. Yongwatanaplastic	Cr	2	6.3	5.5	0.2	-	-	-	-
15. Hong-senghuad	Cr	2	94.1	420.9	-	-	-	-	-
16. Watanaki	Cr	1	12.0	37.0	-	-	-	-	-
17. P.T.I. Battery	Cr	25-30	14.7	57.3	108.4	-	-	-	30
18. D.Bunnag	Cr	6.7	447.9	15.0	4.0	-	-	-	-
19. Sangboon	Cr	3-4	146	7.5	9.5	-	-	-	-
20. Sew-jeng	Au	1.5	-	10.6	-	0.1	-	-	-
Average		6.34	62	60.1	37.3	144.5	0.75	933	302
Range		0.5-30	0.05-447.9	1.4-420.9	0.2-185.5	0.20-467	0.05-0.1	345-1,520	5-1,000



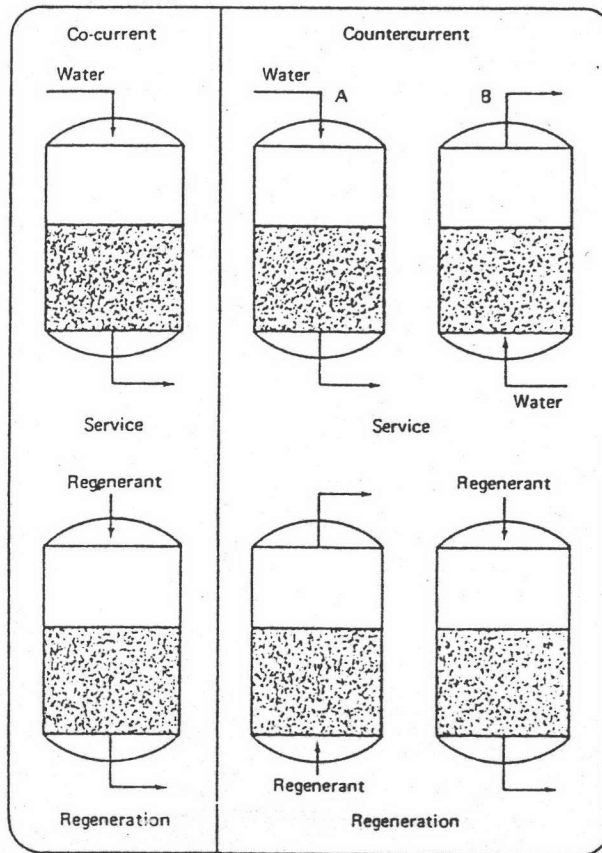
รูปที่ 3.3 โยโคคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิดคือ Styrene (รูป ก.) เมื่อหลายโมเลกุลมาต่อกัน จะเป็นโพลีเมอร์ (รูป ข.) เป็นสายยาว การต่อกันเป็นสามมิติ เกิดขึ้นได้เมื่อมีตัวประสานคือ Divinyl benzene (รูป ค.) ทำให้ได้โครงร่างของเรซิน (รูป ง.) ซึ่งยังไม่มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน การเติมหมู่ไอออน เช่น  $-\text{SO}_3\text{H}$  (ซัลโฟนิก) ทำให้เรซินมีอำนาจอย่างสมบูรณ์ (รูป จ.)

1.3 การฟื้นอำนาจ (Regeneration) รีเจนเนอเรชันหมายถึงการทำให้เรซินที่หมดอำนาจไป แล้วกลับฟื้นตัวขึ้นมา มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่อีก การที่เรซินหมดอำนาจชั่วคราวเป็นเพราะว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นในน้ำจนหมดสิ้น การทำรีเจนเนอเรชันคือการขับไล่ไอออนในเรซินที่แลกเปลี่ยนมาจากรีเจนเนอเรชันทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิมและมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งหนึ่ง สารเคมีที่ใช้เติมไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้ว เรียกว่าสารรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ดังตารางที่ 3.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนอาจแบ่งเป็น cocurrent และ countercurrent ตามลักษณะการไหลของการบริการและการฟื้นอำนาจตามรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ชนิดของสารรีเจนเนอแรนต์ที่ใช้ในการฟื้นอำนาจให้กับเรซิน (Dortner, 1977)

Ion exchanger type	Desired ionic form	Regenerating agent	Required amount	
		(approx. 1N solution)	Regenerating agent, meq	Ion exchanger, meq
Strong acid cation exchanger	$H^+$	HCl	3-5	1
	$H^+$	$H_2SO_4$	3-5	1
	$Na^+$	NaCl	3-5	1
Weak acid cation exchanger	$H^+$	HCl	1.5-2	1
	$H^+$	$H_2SO_4$	1.5-2	1
	$Na^+$	NaOH	1.5-2	1
Strong base anion exchanger, type I	$OH^-$	NaOH	1.5-2	1
	$Cl^-$	NaCl	4-5	1
	$Cl^-$	HCl	4-5	1
	$SO_4^{--}$	$Na_2SO_4$	4-5	1
	$SO_4^{--}$	$H_2SO_4$	4-5	1
Strong base anion exchanger, type II	$OH^-$	NaOH	3-4	1
Weak base anion exchanger	free base	NaOH	1.5-2	1
	free base	$NH_4OH$	1.5-2	1
	free base	$Na_2CO_3$	1.5-2	1
	$Cl^-$	HCl	1.5-2	1
	$SO_4^{--}$	$H_2SO_4$	1.5-2	1





รูปที่ 3.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไหลตามและไหลสวนทาง (Larry,2525)

ในทางปฏิบัติ มักนิยมทำรีเจนเนอเรชันเพื่อเรียกอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินให้กลับคืนมาบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันของเรซินมักมีค่าต่ำ ทำให้การเรียกอำนาจทั้งหมดที่มีอยู่กลับคืนมาต้องสิ้นเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์อย่างมหาศาล และจัดว่าไม่คุ้มค่ากับผลตอบแทนที่ได้รับ

1.4 การชะล้างสารเคมี (Rinse) หลังจากผ่านขั้นตอนรีเจนเนอเรชันแล้ว ย่อมมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่ในชั้นเรซิน จึงต้องใช้น้ำสะอาดชะล้างเรซินเพื่อขับไล่หรือแทนที่สารรีเจนเนอเรนต์ให้หลุดออกจากชั้นเรซิน การชะล้างเรซินมี 2 ขั้นตอนคือ การชะล้างอย่างช้า (Slow Rinse หรือ Displacement Rinse) และการชะล้างอย่างรวดเร็ว (Fast Rinse) การชะล้างอย่างช้าจะทำก่อนโดยปล่อยให้ น้ำประมาณ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน (Bed Volume) ไหลผ่านชั้นเรซินในอัตราเดียวกับการทำรีเจนเนอเรชัน น้ำล้างในขั้นตอนนี้ถือเป็นน้ำเสียเพราะ มีสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้วปนอยู่มาก และต้องนำไปทำการกำจัดพร้อมกับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้ว การชะล้างอย่างรวดเร็วกระทำ เพื่อขับไล่สารรีเจนเนอเรนต์ที่ยังตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซินให้หมด เนื่องจากมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่น้อย จึงอาจชะล้างให้เร็วขึ้นได้

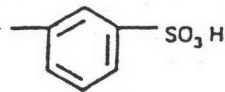
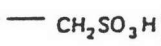
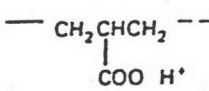
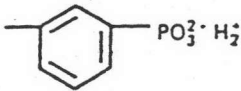
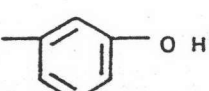
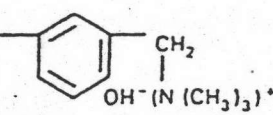
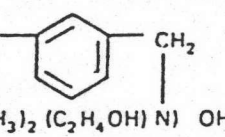
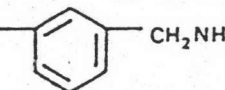
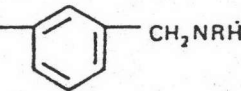
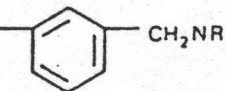
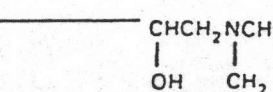
## 2 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะขึ้นอยู่กับหมู่ไอออน ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้เป็น เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger), เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger), เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger), เรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆแสดงในตารางที่ 3.5

หมู่ไอออนของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงร่างตาข่ายมีประจุลบประจำตัว หมู่ไอออนจะมีประจุบวกเรียกว่า Cation Exchanger คือ เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุบวก ถ้าโครงร่างตาข่ายมีประจุบวก หมู่ไอออนจะมีประจุลบ เรียกว่า Anion Exchanger คือ เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ

2.1 เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger) คือเรซินที่มีหมู่ไอออนเป็นพวกกรดแก่ เช่น sulfonic acid จับติดอยู่กับโครงร่างตาข่าย หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่จะใช้ไอออนบวกของตัวเอง แลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะจับไอออนบวกของ cation ได้ทั้งหมด แต่มีความชอบในการจับแต่ละไอออนแตกต่างกัน โดยเรซินแบบกรดแก่นั้นชอบจับไอออนที่มีประจุสูงๆและมีขนาดใหญ่ๆตามตารางที่ 3.6 เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนประจุ สามารถเรียกอำนาจกลับคืนได้โดยการทำรีเจนเนอเรชัน เรซินที่อยู่ในรูปของ  $\text{Na}^+$  ต้องรีเจนเนอเรตด้วย  $\text{NaCl}$  ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ  $\text{H}^+$  ต้องรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่ ( $\text{H}^+$ )

ตารางที่ 3.5 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆ (มันสัน, 2527)

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)		

ตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ของเรซินแบบกรดแก่ในการจับไอออนบวกต่างๆ (Brown, 2532)

Monovalent	Ag>Cu>K>NH <sub>4</sub> >Na>H
Divalent	Pb>Hg>Ca>Ni>Cd>Cu>Zn>Fe>Mg>Mn
Trivalent	Fe>Al

ข้อดีของเรซินแบบกรดแก่คือ ใช้ได้ดีกับน้ำที่มี pH ทุกระดับ สามารถแยก Na<sup>+</sup> จากเกลือแคงได้ การรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัดเกิดขึ้นน้อย สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็ว มีความคงทน ใช้งานได้นาน โดยมีการสูญเสียอำนาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย การเปลี่ยนรูปของ Na<sup>+</sup> ในเรซินเป็น H<sup>+</sup> ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียง 7 % (พองน้ำ) เหมาะสำหรับใช้กำจัดความกระด้างหรือในการทำน้ำบริสุทธิ์ (Deminerization) ข้อเสียคือมีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชั่นที่ประมาณ 25-45 % ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชั่น

2.2 เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger) คือเรซินที่มีหมู่ไอออนเป็นพวกกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะคริลิก เรซินชนิดนี้แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นกรด เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้เมื่อสารละลายของเสียมี pH < 4 จึงทำให้ไม่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนให้กับเกลือที่ได้จากกรดแก่ เช่น NaCl CaSO<sub>4</sub> เป็นต้น

การใช้งานของเรซินแบบกรดอ่อน มีข้อจำกัดคือ เมื่อพื้นกำลังเรซินด้วยกรดเกลือ เรซินชนิดนี้สามารถใช้จับไอออนประจุบวกที่มีวาเลนซ์ 1 ขึ้นไปที่จับคู่กับพวกต่างเท่านั้น ดังนั้นจำนวน Cation ที่ถูกขจัดออกจะเท่ากับความกระด้างลบจากค่าความเป็นด่าง สำหรับกรณีที่ความเป็นด่างทั้งหมดมากกว่าความกระด้างทั้งหมดนี้จัดว่าเป็นสภาพน้ำที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเรซินชนิดนี้

ในกรณีที่อัตราส่วนของ Hardness Alkalinity มากกว่า 1 แสดงว่าจะต้องมีความกระด้างถาวร ทำให้เรซินชนิดนี้เริ่มจะไม่ค่อยเหมาะกับการขจัดไอออน เพราะความสามารถในการจับประจุจะลดลง แต่ประจุบวกที่หลุดออกไปมีมากขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพจึงต่ำเมื่อเทียบกับเรซินแบบกรดแก่

ปัจจุบันมีเรซินชนิดใหม่เรียกว่า chelating resin ซึ่งคล้ายๆกับเรซินแบบกรดอ่อน โดยมีหมู่ไอออนชนิด iminodiacetate functionality เรซินชนิดนี้จะมีคุณสมบัติอย่างสูงในการเลือกจับโลหะบางชนิด เช่น ทองแดง, ปรอท, นิกเกิล และตะกั่ว ตามตารางที่ 3.7 แต่จะแลกเปลี่ยนไอออนด้วยอัตราเร็วในการไหลที่น้อยกว่า และจะไม่สามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะที่  $\text{pH} < 3$  หรือ 4 chelating resins ซึ่งมีหมู่ไอออน picolylamine functionality กำลังได้รับการพัฒนาสำหรับการเลือกจับ copper ที่  $\text{pH}$  ต่ำกว่า 1 (Brown,2532)

ตารางที่ 3.7 การเลือกจับโลหะของ Chelating-Resin (Brown,2532)

Ion	Selectivity coefficient	Ion	Selectivity coefficient
Hg <sup>++</sup>	2,800	Cd <sup>++</sup>	15
Cu <sup>++</sup>	2,300	Co <sup>++</sup>	6.7
Pb <sup>++</sup>	1,200	Fe <sup>++</sup>	4.0
Ni <sup>++</sup>	57	Mn <sup>++</sup>	1.2
Zn <sup>++</sup>	15	Ca <sup>++</sup>	1.0

ข้อดีของเรซินแบบกรดอ่อนคือประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันสูงถึง 90 % โดยมีกรดแก่หรือกรดอ่อน หรือเกลือแกงเป็นตัวรีเจนเนอเรนต์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า และทนต่อสารออกซิแดนท์ (เช่น คลอรีน) ได้ดี มีการหนีของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมหนีได้มาก ถ้าเปลี่ยนเรซินที่มี  $\text{Na}^+$  ให้เป็น  $\text{H}^+$  ปริมาณจะเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากการพองน้ำ

2.3 เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger) คือเรซินที่มีหมู่ไอออนเป็นพวกด่างแก่ ได้แก่ Quaternary Amine หน้าที่ของเรซินแบบด่างแก่คือ การใช้ไอออนลบแลกไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}^-$  เป็นต้น ในกรณีที่พื้นกำลังเรซินด้วยโซดาไฟ จะทำให้เรซินมีความสามารถในการจับกรดได้ทั้งกรดแก่และกรดอ่อน ส่วนในกรณีที่พื้นกำลังเรซินด้วยเกลือแกง สามารถใช้กำจัดไอออนลบของเกลือได้ เช่น ใช้กำจัดไบคาร์บอเนต ในเตรตซิลเฟต โดยแลกเปลี่ยนกับคลอไรด์



เรซินแบบต่างแถมสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

1. Type I เป็นเรซินที่ทนความร้อนได้ถึง 60 °C มีความคงทนดีกว่า Type II และมีความสามารถในการจับ Silica ได้ดีกว่า Type II

2. Type II เป็นเรซินที่มี Capacity ในการใช้งานสูงกว่า Type I ประมาณ 20% ต่อปริมาณ การใช้สารเคมีพื้นกำลังที่เท่าๆกัน

เรซินแบบต่างแถมสามารถใช้ได้ดีที่ pH ทุกระดับ และมีความสามารถในการแยกเกลือด้วย แต่ประสิทธิภาพในการรีเจเนอเรชั่นต่ำประมาณ 18-23 % ทำให้ต้องเปลี่ยนสารรีเจเนอแรนต์มาก นอกจากนี้เรซินแบบต่างแถมมีความคงทนต่ำ ทำให้มีอายุการใช้งานสั้น ก่อให้เกิดปัญหาจากการเน่าเปื่อยของพีช สามารถทำให้เรซินเสียและไม่สามารถทำรีเจเนอเรชั่นได้

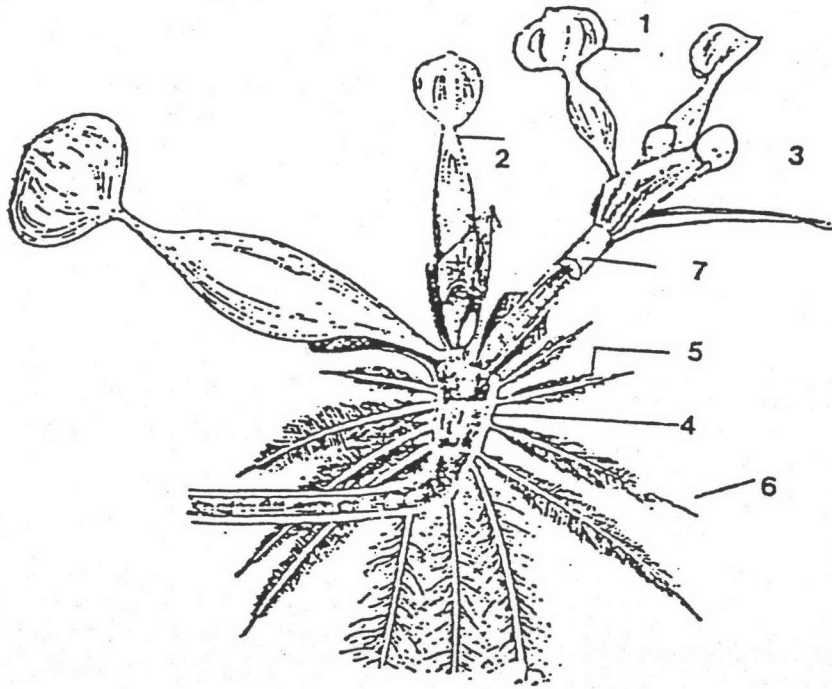
2.4 เรซินแบบต่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ไอออนของเรซินชนิดนี้จะ เป็นพวกต่างอ่อน ได้แก่พวก Primary, Secondary และ Tertiary Amino การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินนี้ กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> ออกจากน้ำ และไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน

ดังนั้นเรซินชนิดนี้จึงไม่จำเป็นต้องมีไอออนอิสระก็ได้ กลไกการทำงานของเรซินแบบต่างอ่อนจะเป็นลักษณะ Absorption ไม่ใช่ลักษณะการแลกเปลี่ยนประจุโดยปกติเรซินแบบต่างอ่อนมักใช้ในการกำจัด Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ซัลไฟต์หลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการทำรีเจเนอเรชั่นสูงเกือบ 100 % ทำให้เปลี่ยนสารเคมีน้อย รีเจเนอแรนต์อาจเป็น NaOH หรือ Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> หรือ NH<sub>4</sub>OH ก็ได้

ผักตบชวา (Water Hyacinth, Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms.)

ผักตบชวาเป็นวัชพืชที่ขึ้นน้ำชนิดหนึ่งที่สามารถขึ้นในน้ำนิ่งหรือน้ำไหลถ่ายเทกลับไปกลับมาอย่างช้าๆได้ จัดเป็นประเภทลอยน้ำ (floating plant) โดยปกติรากจะไม่ยึดติดกับพื้นดิน แต่ถ้าน้ำตื้นแล้ว รากจะหยั่งยึดติดกับพื้นดินได้ ลำต้นมีสีม่วงแดง เป็นลำต้นที่มีหัวราก (rhizomatous system) ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) แต่ละต้นจะมีใบประมาณ 5-10 ใบ ก้านใบมีลักษณะกลม เรียบ อวบน้ำ ถ้าผักตบชวาเจริญอยู่ห่างๆกัน ก้านใบจะพองออกเป็นท่อนลอยน้ำ (buoyancy leaf) ที่โคนก้านใบจะมีกาบใบ (sheath) ซึ่งเชื่อมติดต่อกันโดยมีไหล (stolon) เป็นลำต้นที่ทอดไปตามผิวน้ำช่วยให้ติดกับต้นเดิมและเกิดเป็นกอขึ้น ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอย (fibrous root) มีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่างๆที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้า ลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอก แต่ละดอกมี 5-6 กลีบ หลังจากที่ยอดบานได้ 48 ชั่วโมงและไม่มีแมลงมาช่วยผสมเกสร จะเกิดการผสมตัวเอง หลังจากนั้นจะโรยกลายเป็นผลซึ่งพร้อมกันนั้นช่อดอกจะอ่อนโค้งงอลง แต่จะไม่หลุดจนกระทั่งผลแตก ถ้าผลไม่ติดช่อดอกก็จะเน่าไปในที่สุด ดังรูปที่ 3.5

ผักตบชวาจัดเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (Vegetative Propagation) และแบบใช้เพศ (Sexual Reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกไหลเป็นต้นใหม่ที่ติดอยู่กับต้นแม่เป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นกอใหญ่ หลังจากต้นอ่อนเกิดรากและใบของตนเองได้ภายในเวลาเพียงไม่กี่วัน ต้นอ่อนเหล่านี้ก็จะเริ่มสร้างต้นอ่อนต่อไปเป็นช่วงที่สาม ผักตบชวาจะใช้เวลาในการเจริญเติบโตจากต้นเล็กๆจนโตเต็มที่ประมาณ 105 วัน กำลังผลิต (Productivity) สูงสุดประมาณ 7.4-22.0 กรัมน้ำหนักแห้งต่อตารางเมตรต่อวัน ได้มีผู้รายงานว่า ต้นผักตบชวาเพียง 2 ต้น สามารถสร้างลูกหลานได้เป็นจำนวนถึง 300 ต้นภายในเวลาเพียง 20 วัน และเพิ่มเป็น 1200 ต้นภายใน 4 เดือน แต่ในสภาพธรรมชาติมีผู้สังเกตว่าผักตบชวาจะเพิ่มปริมาณเป็นสองเท่าภายใน 10 วัน ถ้าหากสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ต้นผักตบชวา 10 ต้น จะสร้างลูกหลานได้ถึง 600,000 ต้นภายในเวลา 8 เดือน



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบต่างๆของผักตบชวา (ปราณี, 2532)

- |            |                 |
|------------|-----------------|
| 1. แฉกใบ   | 2. ท่อนพุงลำต้น |
| 3. ลิเกวล์ | 4. เหน้ง        |
| 5. ขนราก   | 6. หมวกราก      |
| 7. ลำต้น   |                 |

#### 1. องค์ประกอบของผักตบชวา

ผักตบชวาจะมีสีเขียวของคลอโรฟิลล์เป็นจำนวนมากทั่วทั้งต้นซึ่งแสดงว่าผักตบชวามีอัตราการสังเคราะห์แสงสูงมาก และถ้าจะเปรียบเทียบผักตบชวากับพืชน้ำชนิดอื่นๆแล้วจะพบว่า ในพื้นที่ที่เท่ากันอัตราการสังเคราะห์แสงของผักตบชวาจะสูงกว่าพืชน้ำชนิดอื่น

ผักตบชวา 100 กก. หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กก. คิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพบว่าผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และแร่ธาตุอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.8

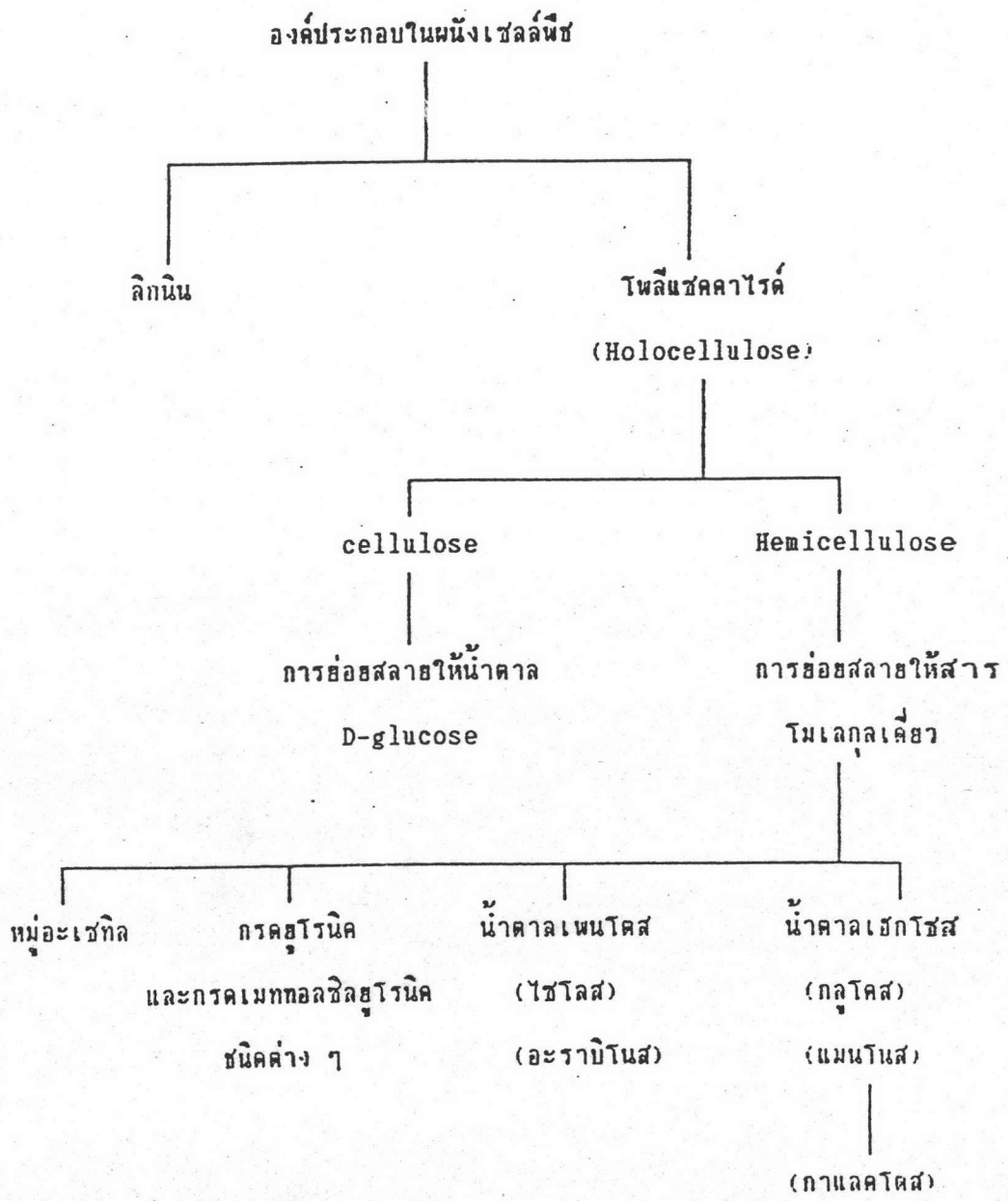


ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบในผักตบชวา (ปราณี, 2532)

<u>องค์ประกอบ</u>	<u>สัดส่วน (%)</u>
ลิกนิน	12-13
เซลลูโลส	43-44
เพนโทแซน	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

## 2. องค์ประกอบในเซลล์พืช

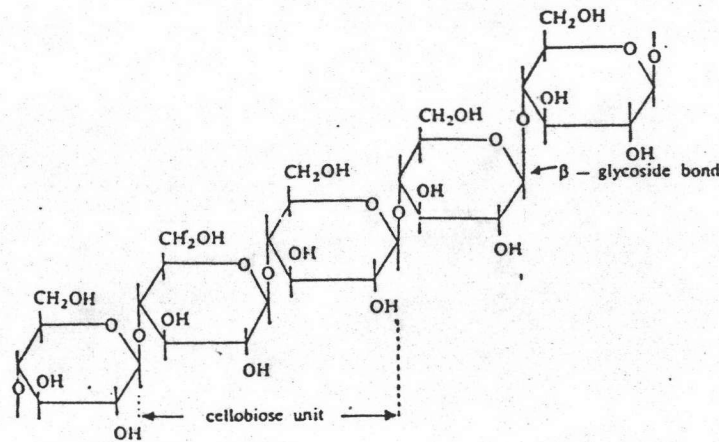
องค์ประกอบในเซลล์พืชส่วนใหญ่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ Lignin และ Halocellulose ซึ่ง Halocellulose สามารถแบ่งย่อยได้เป็น Cellulose และ Hemicellulose ดังแผนภาพในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช (ปราณี, 2532)



2.1 เซลลูโลส (Cellulose) เซลลูโลสเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดในธรรมชาติเพราะมีอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบของพืชทั้งหมด โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ในรูปแบบต้า-ดี-กลูโคไพราโนส (B-D-glucopyranose) เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวๆ ด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) เซลลูโลส 1 โมเลกุล จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 300 ถึง 2500 หน่วยดังรูปที่ 3.7 ซึ่งถ้าไฮโดรไลซ์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลไบโอส แต่ถ้าไฮโดรไลส์เต็มที่จะได้ D-glucose รูปแบบ (conformation) ของการจัดเรียงตัวจะอยู่ในลักษณะ chair form แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Intra molecule H-bond) และเชื่อมตอระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (Intermolecule H-bond) สารเซลลูโลสที่เรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบเรียกว่า คริสตัลไลน์ไมเซล (Crystalline Micelles) แต่ละไมเซลประกอบด้วย เซลลูโลสประมาณ 100 โมเลกุล 10-20 ไมเซล จะมาเรียงตัวเป็นโครงสร้างใหญ่ขึ้นเรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril)



รูปที่ 3.7 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส (Bailey, 1986)

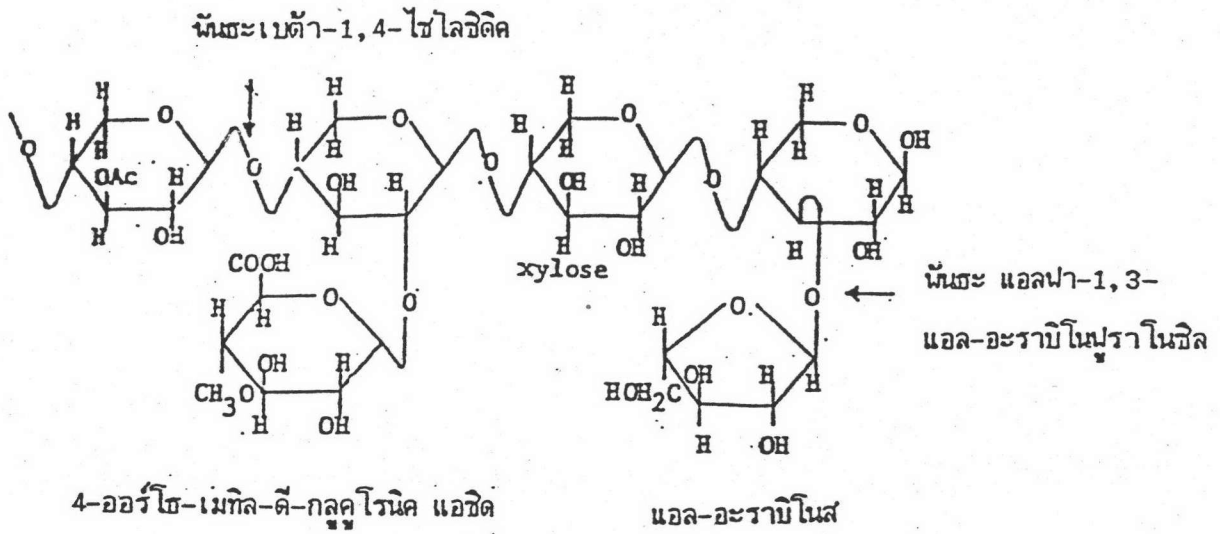
คุณสมบัติของเซลลูโลสคือ ไม่ละลายในน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์หรือในสารละลายต่างอ่อน แต่สามารถละลายได้ดีในกรด หรือด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างได้เป็น 3 ชนิด

1. Alpha-cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 %
2. Beta-cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 %
3. Gamma-cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 % และสารละลายกรดเจือจาง

2.2 Hemicellulose เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentoses) ที่มีลักษณะเป็น Heterogenous โดยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดมารวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแตกต่างจาก Cellulose ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง น้ำหนักโมเลกุลของ Hemicellulose จะต่ำกว่า Cellulose ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลักคือ Xylan นอกจากนี้ก็ยังมี glucon, mannan, galactan

Hemicellulose จะไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในด่างและถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า cellulose เมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตสและเฮกโซส ได้แก่ ไชโลส, แมนนิส, กาแลคโตส, อะราบิโนส

สำหรับ Xylan ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ Hemicellulose นั้นเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาล ไชโลสที่ต่อกันด้วยพันธะเบตา-1,4-ไชโลซิดิก (B-1,4-xylosidic linkage) อาจเป็นเส้นตรงเฉพาะ ไชโลสอย่างเดียวหรือมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆปนอยู่ เช่น L-arabinofuranose เชื่อมต่อกับ ดี-ไชโลส ที่ตำแหน่ง 0-3 และ กรด ดี-กลูคูโรนิก หรือ กรด 4-O-เมทิล-กลูคูโรนิก ซึ่งต่อกับ ดี-ไชโลส ที่ตำแหน่ง 0-2 ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างของไซแลน Ac = Acetyl Group (ปราณี, 2532)

2.3 ลิกนิน (Lignin)

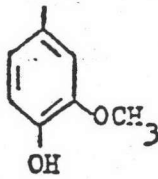
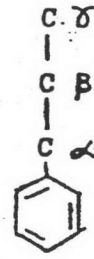
ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous Organic Polymer มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและสารอินทรีย์ชนิดใด จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่รอบๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ methoxyl group, -OCH<sub>3</sub>, หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น phenolic โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งแต่ละสายประกอบด้วยหน่วยย่อยเหล่านี้คือ

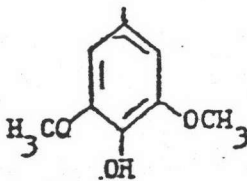
- ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane)
- กัวอีอะซิล ยูนิต (Guaiacyl Unit)
- ไซริงกิล ยูนิต (Syringyl Unit)
- พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิต (Para-Hydroxyphenyl Unit)

ลักษณะหน่วยย่อยในโครงสร้างของลิกนินแสดงในรูปที่ 3.9

แบบฟีนิล โพรเพน (phenyl propane type)



กัวอะซิล ยูนิต



ไซริงกิล ยูนิต



พารา-ไฮดรอกซี ฟีนิล ยูนิต

รูปที่ 3.9 หน่วยย่อยในโครงสร้างลิกนิน (ปราณี, 2532)

3. สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย Hydroxycelluloses และ COOH-group มีลักษณะเป็นผงไม่ละลายน้ำ สามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนได้

เรซินที่ได้จากเซลลูโลสจะมีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี แต่จะมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของเซลลูโลสจะเป็น Hydrophilic แต่โครงสร้างของเรซินสังเคราะห์จะเป็น Hydrophobic ผลจากคุณสมบัติของไฟเบอร์ในเซลลูโลสพบว่ามีสารประสานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน หมู่ไอออนส่วนมากจะอยู่ตามตำแหน่งต่างๆบนตาข่ายของโครงร่าง ซึ่งมีระยะประมาณ 50° ซึ่งหมู่ของไอออนไม่สามารถที่จะลอดผ่านรูพรุนของโครงร่างของเรซินได้



จากลักษณะของโครงสร้างของเซลลูโลสพบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมี Hydroxyl group ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2,3 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมู่ไฮดรอกซิลมาเกาะจับอยู่ การจับออกตำแหน่งที่แน่นอนจะทำได้ยาก แต่จากการศึกษาทางเคมีของเซลลูโลสพบว่าคาร์บอนอะตอมที่ 2 และ 6 เป็นส่วนที่จะเกิดการทำปฏิกิริยามากที่สุด อนุภาคของเซลลูโลสมีขนาด 15-20 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลลูโลส การปรับปรุงลักษณะของโครงสร้างและฟังก์ชันกรุปในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น การเก็บรักษาเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนทำได้โดยการแช่ในสารละลาย  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  เข้มข้น 0.5 N และ  $\text{NaOH}$  เข้มข้น 1 N ซึ่งจะสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง ในการทำรีเจนเนอเรชันจะใช้สารละลาย  $\text{NaOH}$  เข้มข้น 0.5 N หรือ acid buffers หรือสารละลาย  $\text{HCl}$  เช็อง ความสามารถในการใช้งานของสารแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.25-1.00 meq/g dry weight

ในการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ปฏิบัติการมักจะประกอบด้วย การเปลี่ยน alkali cellulose ด้วยสารประกอบคลอรีน ข้อเสียของปฏิบัตินี้จะทำให้เกิดการละลายและการแพร่กระจายของวัสดุ ถึงแม้ว่าจะมีการทำให้ตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะนิ่มคล้ายวุ้น (Gellike Product) ซึ่งจะมีความต้านทานการไหลของสารละลายสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดการพองน้ำของเรซิน สามารถทำได้โดยการ Crosslinking ของ Cellulose chains ด้วย di-2-ethylamine sulfate, 1,4-butanodisulfate, 1,3-dichloro-2-propanal, divinyl sulfone และ formaldehyde ก่อนการเติมหมู่ไฮดรอกซิล dichloroacetic acid เป็น cross-linking agent ที่ใช้เป็นตัวบวกรับแลกเปลี่ยน group

Serva Cellulose Ion Exchangers เป็นสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแรกทีผลิตขึ้นและสามารถจำหน่ายได้ในปริมาณมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการยอมรับและความสำเร็จในการนำไปใช้งานของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน คุณสมบัติที่สำคัญของ Serva Cellulose Ion Exchangers แสดงในตารางที่ 3.9



ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchanges (Dorfner, 1977)

(CE = cation exchanger, AE = anion exchanger)

Name	Ion exchanging group	Properties	Capacity meq/g	Prevailing particle size $\mu$
CM-Cellulose	$-\text{OCH}_2\text{COOH}$	CE, weak acid	$0.62 \pm 0.1$	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 -0.55	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 baes	$0.8 \pm 0.05$	50-200
GE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{NH}^+\text{C}=\text{NH}_2\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$	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

## งานวิจัยที่ผ่านมา

Odozi, Okeke และ Larty (2528) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ซังข้าวโพดบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักละลายอยู่ การศึกษาได้แบ่งเป็น 2 กรณีคือ การใช้ซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลอย่างเดียวกับซังข้าวโพดรวมกับซีลี้อย และเปลือกหัวหอมที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลและฟอรัลดีไฮด์ สำหรับชนิดของโลหะหนักที่ศึกษา ได้แก่ นิกเกิล ทองแดง แมงกานีส และตะกั่ว ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ 150 และ 300 mm.

จากผลการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดที่ใช้ประกอบด้วยฟังก์ชันกรุป 2 หมู่คือ  $\text{SO}_3\text{H}$  และ phenolic OH การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูง ดังนั้นพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์จะอยู่ในช่วง 5.6-8.2 และเมื่อน้ำเสียไหลผ่านเรซินที่เตรียมไว้ปรากฏว่าค่าพีเอชลดลงอยู่ในช่วง 2.8-5.9 ปฏิกริยาเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า เรซินที่ใช้มีคุณสมบัติเป็นเรซินกรดเมื่อมีการแลกเปลี่ยนไอออนจะปล่อยไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น จึงทำให้พีเอชของน้ำที่ผ่านเรซินต่ำกว่าน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักอยู่ในช่วง 60-90 % คือสามารถกำจัดตะกั่วได้ 92.5 % และ 90.0 % สำหรับซังข้าวโพดที่มีขนาด 150 mm และ 300 mm ส่วนโลหะหนักที่กำจัดได้น้อยที่สุดคือ ทองแดง สามารถกำจัดได้ 59.1 % และ 57.3 % ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสามารถเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้คือ  $\text{Pb}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$  นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่า เรซินที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าเรซินขนาดใหญ่ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า

การทดลองศึกษา ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่าง สังกะสี กับ แคลเซียม เรซินที่ใช้คือ ซังข้าวโพด และวัสดุผสม (ซังข้าวโพด, ซีลี้อย, เปลือกหัวหอม) พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 1.5-1.8 meq.M<sup>2+</sup> ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของวัสดุผสมมากกว่าการใช้ซังข้าวโพดอย่างเดียว และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมได้ดีกว่าสังกะสี

Macchi, Marani และ Tiravanti (2529) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากกาแฟ (Exhausted Coffee Grounds; ECG) กำจัดปรอทออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้ทำการทดลองแบบทีละเท และแบบคอลัมน์ การเตรียมกากกาแฟที่ใช้ในการทดลองทำได้โดยนำไปกวนในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 M นาน 1 ชั่วโมงแล้วนำมากรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปกวนในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.5 M นาน 0.5 ชั่วโมง นำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น วิธีนี้จะสามารถกำจัดสีของกากกาแฟออกได้

ในการทดลองได้ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดปรอทโดยใช้กากกาแฟ ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของปรอท จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทได้ 99.9 % ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 11 ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทได้ 99 % ความสามารถในการกำจัดปรอทของกากกาแฟมีค่าเท่ากับ 80 mg/g เมื่อสารละลายปรอทมีความเข้มข้น 10 mg/l ในกรณีที่น้ำเสียมีปริมาณคลอไรด์สูง พีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดปรอทจะอยู่ในช่วง 10-11

การนำกลับปรอทที่ถูกดูดซับด้วยกากกาแฟจะทำโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 M ซึ่งจะใช้ปริมาณกรดในการทำรีเจนเนอเรชันประมาณ 16 BV จากผลการทดลองพบว่า ที่พีเอชเท่ากับ 3 สามารถรีเจนเนอเรชันได้ประมาณ 85 % ส่วนที่พีเอชเท่ากับ 11 ได้ประมาณ 70 %

Srivastava, Mathur และ Mehrotra (2529) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ซีลีเนียมกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โครเมียมที่ศึกษาเป็นโครเมียมที่มีประจุบวกหก ทำการวิจัยแบบทีละเท ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของโครเมียม ปริมาณของซีลีเนียม ความเข้มข้นของโครเมียมที่ศึกษาคือ 1, 5, 10, 15, 25 และ 50 mg/l ปริมาณซีลีเนียมที่ใช้คือ 1, 5, 10, 25 และ 50 g ทำการทดลองโดยใช้วิธีจาร์เจสคือ นำซีลีเนียมใสในน้ำเสียจากนั้นกวนด้วยอัตราเร็ว 50 rpm นาน 6 ชั่วโมง เก็บน้ำตัวอย่างที่ 0, 30, 60, 180 และ 360 นาที หลังจากนั้นจึงเสร็จสิ้นการกวน

จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำคือพีเอชเท่ากับ 2.8 สามารถดูดซึมโครเมียมได้ 0.415 mg/g ส่วนที่พีเอช 6.35 ความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.379 น้ำเสียที่ไหลผ่านซีลีเนียมจะมีพีเอชที่เพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 8.5-9.0 ในกรณีพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปริมาณโครเมียมกับปริมาณของซีลีเนียมพบว่า เมื่อน้ำเสียมีปริมาณความเข้มข้นต่ำคือ 1.0-5.0 mg/l การเพิ่มปริมาณของซีลีเนียมจะทำให้ความสามารถในการกำจัดโครเมียมเพิ่มสูงขึ้น เช่น น้ำเสียที่มีปริมาณโครเมียม 1 mg/l เมื่อใช้ซีลีเนียม 1.0 mg/l สามารถกำจัดโครเมียมได้ 20% ถ้าใช้ซีลีเนียม 10 g จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึง 80 % ในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของโครเมียมสูงๆพบว่า การแปรเปลี่ยนปริมาณซีลีเนียม (1-50g) ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะมีค่าได้ใกล้เคียงกัน



Tan และ Rahman (2531) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชาในการกำจัดตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ออกจากน้ำเสีย ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ พีเอช, ความเข้มข้นของโลหะในน้ำเสีย, อัตราการไหล, ขนาดของใบชาที่ใช้ทดลองมี effective size 60-80 mesh ใบชาที่จะใช้ในการทดลองจะนำไปต้มในน้ำร้อนประมาณ 10 นาที จากนั้นนำไปแช่ในกรดไนตริกเข้มข้น 0.10 M นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปกรองและล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบที่อุณหภูมิ 110 °C นาน 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองเกี่ยวกับอิทธิพลของพีเอชต่อการกำจัดโลหะหนัก พบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและแคดเมียมคือพีเอช 6-7 ส่วนตะกั่วพีเอชที่เหมาะสมคือ 4-7 สำหรับอิทธิพลเนื่องจากปริมาณของวัสดุพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณใบชา ความสามารถในการกำจัดโลหะต่างๆออกจากน้ำเสียจะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับโลหะเพิ่มมากขึ้น และความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหล จะทำการทดลองโดยใช้ column method จากผลการทดลองอัตราการไหลที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักคือ 8.3 ml/min ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักประมาณ 90 % และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลมีผลต่อการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสีย น้อยกว่า แคดเมียม และสังกะสี

ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพต่างกัน คือ ความสามารถในการกำจัดตะกั่วจะมีมากกว่าแคดเมียม ส่วนสังกะสีจะมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

Lee และ Low (2532) ได้ทำการวิจัยโดยใช้พืชประเภทตะไคร่น้ำ (*Moss, Calymperes delessertii* Besch) กำจัดทองแดงออกจากน้ำเสีย โดยได้ทำการทดลองแบบที่ละเท และแบบคอลัมน์ ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัยคือ ปริมาณของ Moss, ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสีย, ผลกระทบเนื่องจากโลหะอื่นๆ, อุณหภูมิ, เวลาสัมผัสระหว่างสารละลายทองแดงและวัสดุที่ใช้ทดลอง, ความสูงของชั้นวัสดุ, อัตราการไหล, ขนาดของ moss ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 250-1700 Mm.

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณของ moss เพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นตาม และถ้าใช้น้ำเสียที่มีปริมาณทองแดงเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการกำจัดทองแดงของ moss จะลดลง ส่วนการศึกษาอิทธิพลของโลหะชนิดอื่นที่มีปนในน้ำเสีย พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วของมอสมีค่าใกล้เคียงกับทองแดง ส่วนแคดเมียม สังกะสี และนิกเกิลจะน้อยลงตามลำดับ สำหรับผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิพบว่าที่อุณหภูมิสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ โดยได้ทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 0, 40 และ 60 °C

สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์จะทำการศึกษานผลของความสูงของชั้นวัสดุ และอัตราการไหลของน้ำเสีย จากผลการทดลองอิทธิพลของความสูงของชั้นวัสดุ 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

Nakajima และ Sakaguchi (2533) ได้ทำการวิจัยความสามารถในการกำจัดยูเรเนียมออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล โดยใช้กากพืชชนิดต่างๆ 7 ชนิด ได้แก่ เปลือกลูกนัท ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่ว หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น ซึ่งจะทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพ และกากพืชที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาดีไฮด์ และกรดซัลฟูริก ขนาดวัสดุที่ใช้ทดลองจะมีขนาดเล็กกว่า 60 mesh

จากผลการทดลองความสามารถในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำทะเลโดยใช้กากพืชที่ไม่ได้ปรับสภาพ พบว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีปริมาณโครเมียม 10 mg/l และปรับพีเอชเท่ากับ 5 เปลือกลูกนัทมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ 81 % ส่วนผิวด้านในลูกนัท ผิวด้านในถั่ว หัวหอม เปลือกส้ม เปลือกองุ่น เท่ากับ 79.4, 73.9, 72.0, 81.2 และ 77.3 % ตามลำดับ เปลือกถั่วจะมีความสามารถในการดูดซับโครเมียมได้ค่อนข้างต่ำคือ 48.4 % ในกรณีน้ำทะเลซึ่งมีปริมาณโครเมียม 10 mg/l และมีพีเอชเท่ากับ 8 พบว่า มีเพียงเปลือกลูกนัทและผิวด้านในลูกนัทเท่านั้นที่สามารถดูดซับโครเมียมได้คือ 59.7 และ 79.6 % ตามลำดับ

ในกรณีของกากพืชที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาดีไฮด์และกรดซัลฟูริกพบว่าความสามารถในการดูดซับโครเมียมจะเพิ่มขึ้นทั้งในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล ดังแสดงในตารางที่ 3.10



ตารางที่ 3.10 ผลการทดลองความสามารถในการกำจัดโครเมียมของพืชชนิดต่างๆ  
(Nakajima,2533)

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

Maranon และ Sastre (2534) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอปเปิ้ลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะที่ทำการศึกษาคือ แคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ในการทดลองได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ทดลอง การปรับสภาพของกากแอปเปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมี ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ในการศึกษาองค์ประกอบของกากแอปเปิ้ลที่นำมาใช้ในการทดลอง พบว่าประกอบด้วยเซลลูโลส 20 % ลิกนิน 19 % และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แทนนินเรซิน, reducing sugars, colouring agents

สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพกากแอปเปิ้ลคือ phosphation reaction และ crosslinking and xanthation reaction

จากการทดลองศึกษาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนพบว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพโดย phosphation reaction (P-AR) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง 1.6 meq/g ส่วนกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วย crosslinking and xanthation reaction (CLX-AR) มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 1.1 meq/g และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 0.4 meq/g สำหรับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับนิกเกิลและสังกะสีของ P-AR CLX-AR และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพเท่ากับ 1.1, 0.6, 0.3 meq/g ตามลำดับ

ในการศึกษาอิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง พบว่ากากแอมป์เปิลที่มีขนาด 0.2-0.4 มม. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4-0.63 มม. ส่วนการศึกษาทางด้านขบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอมป์เปิล พบว่ากากแอมป์เปิลที่ปรับสภาพด้วย phosphation reaction สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่ากากแอมป์เปิลที่ปรับสภาพด้วย crosslinking and xanthation reaction และกากแอมป์เปิลที่ไม่ได้ปรับสภาพประมาณ 2 และ 5-6 เท่า ตามลำดับ สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักพบว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

การรีเจนเนอเรชัน ได้ทำการทดลองโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 N พบว่าปริมาณกรดที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชันประมาณ 3 bed volume

Maranon และ Sastre (2535) ได้ทำการศึกษาโดยใช้กากแอมป์เปิลจากขบวนการผลิตน้ำแอมป์เปิล กำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกากแอมป์เปิลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพและกากแอมป์เปิลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีคือ phosphation reaction ในการทดลองได้ทำการศึกษายับยั้งที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักคือ อิทธิพลของพีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการศึกษากำจัดโลหะในน้ำทะเล โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง เรซินแบบ Cation (Amberlite IR-120) กับกากแอมป์เปิลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักที่ศึกษาคือ ทองแดง และนิกเกิล ส่วนน้ำทะเลเป็นน้ำตัวอย่างจากทะเลคาริเบียน โลหะหนักที่ศึกษา คือ ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และปรอท

จากการทดลองพบว่า อิทธิพลของพีเอชมีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของกากแอมป์เปิลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพและที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอมป์เปิลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพคือ มากกว่า 3.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99 % โดยควบคุมอัตราการไหล 10 ml/min ส่วนกากแอมป์เปิลที่ปรับสภาพโดยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมคือมากกว่า 2.5 สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99 % อัตราการไหล 10 ml/min ในกรณีที่น้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล พีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 5 ซึ่งรวมถึงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติม EDTA สำหรับอิทธิพลของอัตราการไหลได้ทำการศึกษาโดยมีการแปรค่าอัตราการไหล 3 ค่าคือ 10 20 และ 30 ml/min จากผลการทดลองพบว่า กากแอมป์เปิลที่ไม่ได้ปรับคุณภาพ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99 % ที่อัตราไหล 10 และ 20 ml/min ส่วนที่อัตราการไหล 30 ml/min สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้เพียง 58 %

ส่วนกากแอปเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99 % ที่อัตราไหล 10 20 และ 30 ml/min ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการ phosphation reaction สามารถรับอัตราไหลที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง

ส่วนการศึกษาศักยภาพความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเปรียบเทียบกันระหว่าง เรซินแบบสังเคราะห์ และกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพมีความสามารถกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินแบบสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิล แคดเมียม และตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีกว่ากากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพ

Tan, Ooi, และ Lee (2536) ได้ทดลองใช้เยื่อเลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำปาล์ม ใช้ในการกำจัดโครเมียมที่มีประจุ 6 ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยได้ทำการทดลองแบบที่ละเท และแบบคอลัมน์ เยื่อเลือกมะพร้าว และเม็ดปาล์มที่จะนำมาใช้ทดลองจะถูกนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 °C แล้วทำให้ละเอียด และร่อนคัดขนาด โดยใช้ขนาดของเยื่อเลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์มอยู่ในช่วง 0.30-0.85 มม. จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5-1 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกวนใน NaOH 1.5 M นำไปล้างด้วย HNO<sub>3</sub> 2 M และน้ำกลั่นตามลำดับ นำไปอบให้แห้งก่อนที่จะใช้ในการทดลอง

ในการทดลอง ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมโดยใช้เยื่อเลือกมะพร้าวและเม็ดปาล์ม คือ เวลาสัมผัสระหว่างสารละลายโครเมียมกับวัสดุที่ใช้ทดลองอิทธิพลของพีเอชและความสามารถในการกำจัดโครเมียม โดยจะทำการทดลองแบบที่ละเท ส่วนในการทดลองแบบคอลัมน์จะศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงของวัสดุที่ใช้ และระดับการรีเจนเนอเรชัน

จากผลการทดลองอิทธิพลของเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายโครเมียมกับวัสดุที่ใช้ทดลองพบว่า ในช่วง 20 นาทีแรกสามารถกำจัดโครเมียมได้ประมาณ 80 % จากนั้นความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้อีกต่อไป สำหรับอิทธิพลของพีเอชพบว่า ช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับเยื่อเลือกมะพร้าว คือ 1.5-5 และเม็ดปาล์มอยู่ในช่วง 1.5-3 ความสามารถในการกำจัดโครเมียมประมาณ 70 %

ความสามารถในการดูดติดผิวของเยื่อเลือกมะพร้าวเท่ากับ 5 และ 29 mg.Cr/g ที่พีเอช 3.00 และ 2.05 ส่วนเม็ดปาล์มมีความสามารถในการดูดติดผิวเท่ากับ 5 และ 14 mg.Cr/g ที่พีเอช 3.00 และ 2.05



สำหรับอิทธิพลของความสูงของวัสดุพบว่า ที่อัตราไหลเดียวกัน ชั้นความสูงที่มากกว่าจะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่า เนื่องจากมีปริมาณของวัสดุที่สามารถดูดโครเมียมมากกว่า การรีเจนเนอเรชันจะใช้ NaOH เข้มข้น 0.05 M หรือ HNO<sub>3</sub> 0.1 M

อรุณี, จตุรงค์, และ นพคุณ (2536) ได้ทำการวิจัยโดยใช้เรซินชนิดพิเศษชนิดกรดอ่อนในการนำนิกเกิลจากถังน้ำล้างใบที่ 3 ในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ โดยให้น้ำเสียไหลผ่านเรซินแล้ววนกลับไปสู่ถังเดิมด้วยอัตราเร็ว 20 BV/Hr หลังจากนั้นจึงฟื้นอำนาจเรซินแบบไหลสวนทาง (Counter current regeneration) ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 9% ด้วยอัตราไหล 4.5 BV/Hr การทดลองนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ 1. น้ำเสียจะผ่านเฉพาะเรซินแบบกรดอ่อน 2. น้ำเสียจะผ่านทั้งเรซินชนิดกรดอ่อนและเรซินชนิดต่างแก่ รวมทั้งยังมีการศึกษาถึงค่าใช้จ่ายและความเหมาะสมในการนำโลหะนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่

จากการทดลองสรุปได้ว่า การทดลองส่วนที่ 2 จะนำนิกเกิลกลับมาได้มากกว่าการทดลองส่วนที่ 1 ถึง  $116-68=48$  กรัม แต่เปอร์เซ็นต์การนำกลับมาใช้จะต่ำกว่าถึง  $98-78=20$  % น้ำเสียสุดท้ายในถังของการทดลองที่ 1 สูงมากถึง 179 mg/l ซึ่งมากกว่าการทดลองที่ 2 ถึง  $179-56=123$  mg/l ส่วนค่าใช้จ่ายสามารถคืนทุนภายในเวลา 10 ปี

ทิพย์ (2537) ได้ทำการวิจัยการนำโลหะนิกเกิลในระหว่างการล้างชิ้นงานกลับมาใช้ใหม่จากกระบวนการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า โดยในการวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ในขั้นแรกจะทำการเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออน และความสามารถในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ระหว่างแคทไอออนเรซินชนิดธรรมดาที่มีหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปเป็นชนิดซัลโฟนิกแอซิด กับแคทไอออนเรซินชนิดพิเศษที่มีหมู่ฟังก์ชันนอลกรุปเป็นชนิดอิมมิโนไดอะเซติกแอซิด การทดลองขั้นนี้ใช้น้ำสังเคราะห์ที่มีเฉพาะโลหะนิกเกิลความเข้มข้น 200 และ 300 มก./ล. และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ตัวแทนน้ำเสียจริงที่มีโลหะนิกเกิลความเข้มข้น 200 และ 300 มก./ล. ขั้นที่ 2 จะทำการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการนำโลหะนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ในขั้นตอนการฟื้นอำนาจเรซินที่เป็นตัวแทนในการทดลองจากการทดลองขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการล้างด้วยกรด 3, 4.5 และ 6 ปริมาตรชั้นเรซินต่อชั่วโมง (BV/Hr) ที่ความเข้มข้นของกรดที่ 3, 5, 7, 9 และ 12 % โดยน้ำหนัก

จากการทดลองขั้นแรกพบว่าเรซินชนิดพิเศษจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออน และประสิทธิภาพในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่าเรซินชนิดธรรมดา ทุกค่าความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดใดๆ เช่น น้ำเสียสังเคราะห์แทนน้ำเสียจริง

ความเข้มข้นของนิกเกิล 300 มก./ล. เรซินชนิดพิเศษสามารถแลกเปลี่ยนนิกเกิลได้ 73909 มก./ล. เรซิน เทียบเท่าความจุรวม  $2.51 \text{ eq.Ni}^{2+}/\text{l.resin}$  และช่วงการฟื้นฟูอำนาจเรซินสามารถนำโลหะ นิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ที่อัตราการล้างกรด 4.5 BV/Hr ความเข้มข้นกรด 3 % โดยน้ำหนัก ได้ นิกเกิล 72772 มก./ลิตรเรซิน คิดเป็นประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้เมื่อล้างเรซินจนหมดเท่ากับ 98 % ส่วนเรซินชนิดธรรมดาที่สภาวะเดียวกัน สามารถแลกเปลี่ยนนิกเกิลได้ประมาณ 66533 มก./ล.เรซินเทียบเท่าความจุรวม  $1.16 \text{ eq.Ni}^{2+}/\text{l.resin}$  และนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ 52274 มก./ล.เรซิน คิดเป็นประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่เมื่อล้างเรซินจนหมดเท่ากับ 78.5 %

ในการทดลองครั้งที่ 2 ซึ่งใช้เรซินชนิดพิเศษทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ ค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก 9 % โดยน้ำหนัก อัตราการล้างด้วยกรดที่ 4.5 BV/Hr ได้ ปริมาณนิกเกิลรวม 80800 มก./ล.เรซิน ได้ค่าความเข้มข้นรวมสูงสุดที่ 25937 มก./ล. ที่ปริมาตร กรดล้าง 2.63 BV เทียบเท่าประสิทธิภาพในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่กับปริมาณกรดที่ใช้ 45.2 %

การทดลองโดยประยุกต์ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานมาทำการทดลอง โดยใช้เรซินชนิด พิเศษ โดยสามารถนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ที่ปริมาณ 58065 มก./ล.เรซิน ความเข้มข้นสูงสุด 19359 มก./ล. ปริมาตรกรดล้าง 2.25 BV

เกศสุชา (2537) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ผักตบชวาและขานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยน ไอออน องค์ประกอบในผักตบชวามีเซลลูโลส 43-44 % ลิกนิน 12-15 % แพนโตแซน 14-15 % และสารอื่นๆ ส่วนองค์ประกอบในขานอ้อยมี ไฮโดรเซลลูโลส 82.52 % แอลฟาเซลลูโลส 44 % ลิกนิน 19.78 % แพนโนแซน 27.21 % และสารอื่นๆ โลหะหนักที่ทำการศึกษา ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพผักตบชวาและขาน อ้อย ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ ปรับสภาพอยู่ในช่วง 0.686-0.809 meq/g และผักตบชวาที่ปรับสภาพ (carboxymethyl water hyacinth) อยู่ในช่วง 0.330-0.496 meq/g ส่วนขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการ แลกเปลี่ยนไอออนมีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 meq/g และขานอ้อยที่ปรับสภาพ (carboxymethyl bagasse) มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 meq/g นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมี ค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสี สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า น้ำเสียที่มีโลหะหนักน้อย มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ปริมาณกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 0.5 N สำหรับการรีเจนเนอเรชั่นใช้ประมาณ 3 BV



นันทนา (2538) ได้ทำการศึกษาความสามารถสูงสุดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทีล (ที่มีหมู่ไอออน คือ หมู่ซัลเฟนิก) และครอสสลิ่ง-แซนเทต (ที่มีหมู่ไอออน คือ หมู่แซนเทต) ที่ทำจากผักตบชวา ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี การทดลองที่ใช้เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 ซม. น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งมีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20, 50 มก./ล. ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราไหล 3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผักตบชวาและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลโฟเอทีลอยู่ในช่วง 0.233-0.503 meq/g และ 0.279-0.585 meq/g สำหรับครอสสลิ่ง-แซนเทต นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับสังกะสีมีค่าสูงกว่า นิกเกิลและทองแดง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อย สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้สารรีเจนเนอเรนต์เข้มข้น 0.5 N ประมาณ 3 ปริมาตรเรซิน