



บทที่ 3

การศึกษาด้านเอกสาร

โลหะหนัก

ธาตุต่างๆ ในโลกเท่าที่ค้นพบในปัจจุบันซึ่งมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่มนุษย์สังเคราะห์ ขึ้นรวมกันแล้วมีประมาณ 105 ธาตุ และในจำนวนนี้มีส่วนที่เป็นโลหะหนัก (Heavy Metal) อยู่ 68 ธาตุ

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไปที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาวเหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมตัวกับสาร อื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-compound) ได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทออสูสิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อม โดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศและพืช จากนั้นจะเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีคุณสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี การนำมาใช้ประโยชน์และความเป็นพิษของโลหะหนักที่ศึกษาในการวิจัยนี้ แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน (อนมูลที่มีประจุ) เป็นปรากฏการณ์ชนิดหนึ่งซึ่งมีการสับเปลี่ยนไอออนกลับไปกลับมา (Reversible Interchange) ระหว่างตัวกลาง 2 ชนิด คือ ตัวกลางของเหลวและตัวกลางของแข็ง โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างของตัวกลางของแข็ง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของทองแดง, สังกะสี และนิกเกิล (Bailey, 1986)

ชนิดโลหะหนัก	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	จุดเดือด (°C)	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าความถ่วงจำเพาะ	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี
นิกเกิล	28	58.70	2732	1453	8.908	นิกเกิลเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ II B ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดีสามารถนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ ได้เป็นโลหะอัลลอยด์
ทองแดง	29	63.54	2595	1083	8.96	ทองแดงเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ IB ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +1 และ +2 มีคุณสมบัติอ่อน ดัดง่าย นำไฟฟ้าได้ดี
สังกะสี	30	65.37	906	419.5	7.14	สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ II B ในตารางธาตุ เลขออกซิเดชัน +2 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี

ตารางที่ 22 ประโยชน์และความเป็นพิษของนิกเกิล ทองแดงและสังกะสี (Bailey,1986)

ชนิดโลหะหนัก	การใช้ประโยชน์	ความเป็นพิษ
นิกเกิล	<p>นิกเกิลส่วนใหญ่จะถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์ จะใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินในงานชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก</p>	<p>จะเกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิล และนิกเกิลคาร์บอนิลซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดมะเร็งในมนุษย์และสัตว์</p> <p>การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง</p>
ทองแดง	<p>ทองแดงมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อน มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและง่ายต่อการแปรรูป การใช้ประโยชน์ของทองแดง ได้แก่ การนำไปทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และไฟฟ้า ใช้ในการก่อสร้างอาคาร และเครื่องจักร ใช้เป็นส่วนประกอบของยาปราบศัตรูพืช ทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเส้นใยและเซรามิก</p>	<p>ทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมอยู่ในร่างกายมาก ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องร่วง บัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิตได้</p>
สังกะสี	<p>สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การนำสังกะสีมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่ายแต่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่า สารประกอบสังกะสีใช้ในการทำสี ย้อม กาวและเรซิ่น</p>	<p>สังกะสีจัดเป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดเป็นพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการผุกร่อนของเยื่อทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ซึ้อคและอาจถึงตายได้</p>

ตารางที่ 3.3 ลักษณะและปริมาณน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ 20 โรงงานเขตกรุงเทพมหานคร (TISTR)

Factory Name	Plating Activity	Waste Volume ³ m ³ /d	Waste Characteristic						
			Cr	Ni	Cu	Zn	Au	Al	CN ⁻
1. Jintanasuwan	Cr,Au	15	0.05	275	-	-	0.05	-	-
2. Sangjaroen	Cr	1	403	27.5	-	-	-	-	-
3. Golgen Lamp Co	Ni,Cu	6	-	1.4	-	-	-	-	100
4. Thai-vasco Electro Ltd	Al	8	-	-	-	-	-	345 - 1520	-
5. Suthichai chromium	Cr	8	273	29.0	4.7	-	-	-	-
6. Sermisarapad	Cr,Zn	3.5	22.5	-	-	91	-	-	5.0
7. Kimhuad	Cr	0.5	2.9	10.8	11.0	-	-	-	-
8. Sawinee	Cr	3	0.9	7.0	-	-	-	-	-
9. Theptip-chromium	Cr	3	96.6	21.3	2.3	-	-	-	-
10. Sahajerawat	Cr,Zn	4	-	-	-	0.28	-	-	-
11. Thaijaroenkarnchang	Cr	20	18.6	24.9	10	19.7	-	-	10
12. Ha-senghuad	Zn	4	0.5	2.0	185.5	-	-	-	667
13. Samchai-Usahakarn	Cr	4	-	-	-	467	-	-	1000
14. Yongwatanaplastic	Cr	2	6.3	5.5	0.2	-	-	-	-
15. Hong-senghuad	Cr	2	94.1	420.9	-	-	-	-	-
16. Watanakij	Zn	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	15.0	4.0	-	-	-	-
19. Sangboon	Cr	3.4	14.6	7.5	9.5	-	-	-	-
20. Sew-jeng	Au	1.5	-	18.6	-	-	0.1	-	-
Average		6.34	62	60.1	37.3	144.5	0.75	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

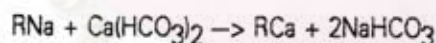
หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการ ซึ่งเกิดต่อเนื่องกัน คือ

1. กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- เป็นต้น นอกจากนี้ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำได้ด้วยแต่ทั้งนี้ต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก แบริยม แคดเมียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง ทอง ตะกั่ว เซเลเนียม เงิน แวนาเดียม สังกะสี

2. ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมากๆ คือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายจะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอแรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอแรชั่น (Regeneration) เนื่องจากปริมาตรของสารละลายรีเจนเนอแรนต์ต่ำกว่าปริมาตรสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออนความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงกว่ามากซึ่งเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมากมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายๆ เท่า

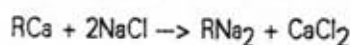
การแลกเปลี่ยนไอออนได้รับการประยุกต์ให้ใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การแก้ความกระด้างของน้ำ (Softener) การทำให้น้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Demineralizer) การกำจัดสารอินทรีย์ (Organic Removal)

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับ Softener อาจเขียนสมการเคมีได้ดังนี้



เมื่อ R คือตัวกลางของแข็งซึ่งเดิมอยู่ในรูปของโซเดียม (Na^+) เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของตัวกลาง ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ คือ Ca^{2+} ในปริมาณที่สมดุลกัน

สำหรับตัวกลางของแข็งที่อยู่ในรูปของแคลเซียม เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือแกงซึ่งมี Na^+ อยู่เป็นจำนวนมากจึงจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนกลับมาเป็นตัวกลางที่อยู่ในรูปของโซเดียมอีกทำให้สามารถนำกลับไปใช้กำจัดความกระด้างใหม่ได้อีก เขียนสมการเคมีได้ดังนี้



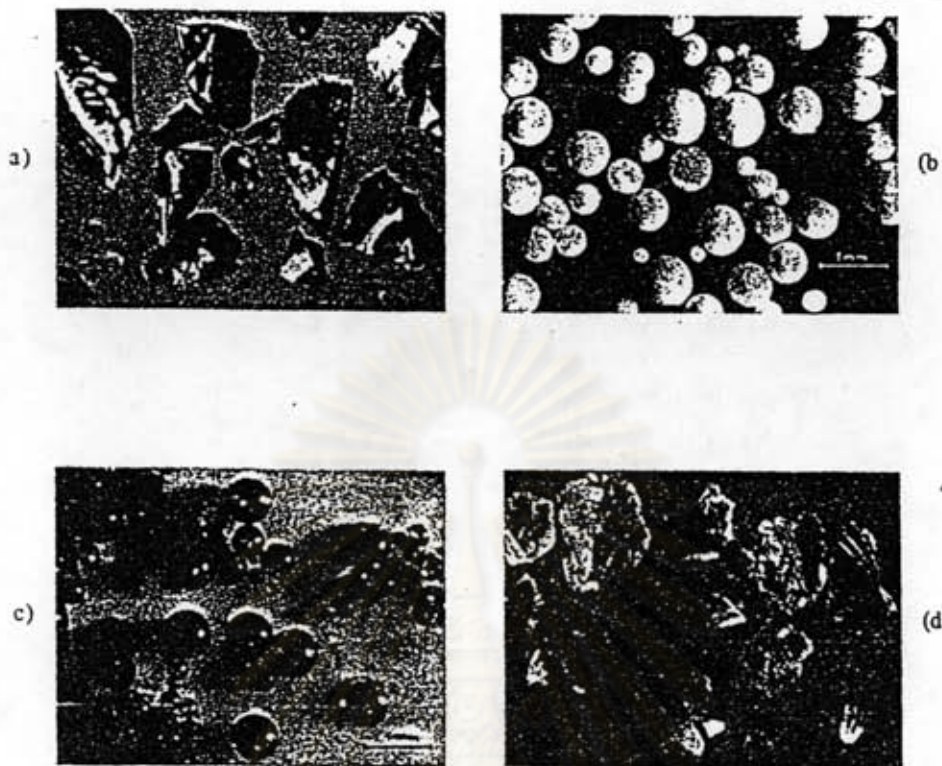
โดยสารละลายเกลือแกงจะต้องมีความเข้มข้นในปริมาณมากเพื่อให้สมดุลย์ของปฏิกิริยากลับทิศทาง

โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดสมรรถภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซิน จะมีโครงสร้างคล้ายตาข่ายสามมิติ โดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายเรียกว่า Functional Group โครงร่างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ (รูปที่ 3.1) และคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำและไม่แตกหักโดยง่าย โครงร่างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากที่เป็นชนิดเดียวกันซึ่งต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติ (รูปที่ 3.2) ที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ถ้าปริมาณของตัวประสานมาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าปริมาณของตัวประสานน้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่นๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นในเรซิน เป็นต้น กล่าวคือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกจึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มี Degree of crosslinkage สูงเกินไปจะมีความพรุนต่ำ ทำให้ความชื้น อยู่ในเรซินน้อยซึ่งจะแตกหักง่าย เรซินที่มี Degree of crosslinkage ต่ำเกินไป จะมีความพรุนมากทำให้ห่อมน้ำได้มากแต่ละลายตัวได้ง่ายเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวต่ำ

หมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงร่าง Matrix มีประจุลบ ประจำตัว Functional Group จะมีประจุบวกเรียกว่าเป็น Cation Exchanger คือเป็นสารแลกเปลี่ยน ประจุบวก ถ้าโครงร่าง Matrix มีประจุบวก Functional Group จะมีประจุลบ คือ สารแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchanger)

เรซินซึ่งสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสารพวก Polystyrene ที่รวมตัวอยู่กับ Divinylbenzene โดย Functional Group ของ Cation Exchanger เป็นพวก Sulphonic, Carboxylic หรือ Phosponic ส่วนเรซินที่นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchanger) จะเป็นพวกที่มี Functional Group เป็นพวก Quarternary ammonium, Primary amine หรือ Secondary amine



- a) Weak acid cation exchanger b) Weak base anion exchanger
c) Strong acid cation exchanger d) Strong base anion exchanger

รูปที่ 3.1 รูปร่างของ Ion Exchanger ชนิดต่างๆ (Dorfner, 1977)

โครงร่างเรซิน (Matrix) อาจแบ่งลักษณะทางฟิสิกส์ได้ 3 ลักษณะคือ

1. Gel type มีลักษณะนิ่มคล้ายวุ้นสามารถบรรจุ Functional Group ได้มาก แต่รูพรุนมีขนาดเล็กและถี่มาก เป็นพวก membrane ข้อเสียก็คือเกิดการอุดตันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าเป็น Strong Anion Exchanger
2. Macroporous Type มีความพรุนมากกว่า คือ มีพื้นที่ผิวมากถึง 100 m^2 /กรัม ทำให้ไม่ค่อยอุดตันโดยจะเป็น Polystyrene Divinylbenzene แขนโครงร่างมี DVB 8-12% โดยทั่วไปถ้ามี % DVB น้อย การพองตัวของตัวจะมีมาก การวิ่งเข้าออกของไอออนผ่านเรซินจะสะดวก แต่ความแข็งแรงมีน้อย
3. Opagne Gel เป็นโครงร่างที่แข็งแรงแต่สามารถบรรจุ Functional Group และยึดหดตัวได้ มากพอสมควร

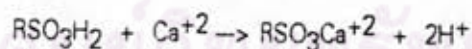
การแบ่งเรซินตามลักษณะการใช้งานตาม Functional Group

คุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน จะขึ้นอยู่กับหมู่ไอออนของเรซิน สามารถแบ่งได้เป็น Acidity และ Basicity นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยได้เป็น เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid ion exchanger) เรซินแบบด่างแก่ (Strong basic ion exchanger) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak basic ion exchanger) หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.4

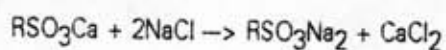
1. เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid ion exchanger)

เรซินแบบกรดแก่ คือ พวกที่มี Functional Group เป็นพวกกรดแก่ เช่น Sulphonic Acid หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่จะใช้ไอออนบวกของตัวเอง (H^+ , Na^+) แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออก จากน้ำ เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} เป็นต้น H^+ หรือ Na^+ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซินโดย เรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิก ($-SO_3$) เป็นหมู่ไอออนซึ่งจับติดอยู่กับโครงไฮโดรคาร์บอน หมู่ ซัลโฟนิกนี้จะอยู่ในรูปของ H^+ หรือ Na^+ ก็ได้ ($-SO_3H^+$, $-SO_3Na^+$) $-SO_3$ จะเป็นส่วนที่ไม่ใช่ในการแลกเปลี่ยนมีแต่ H^+ หรือ Na^+ ที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออน บวกที่อยู่ในน้ำ (รูปที่ 3.3)

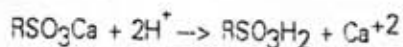
ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี Na^+ และ H^+ เป็นดังนี้คือ

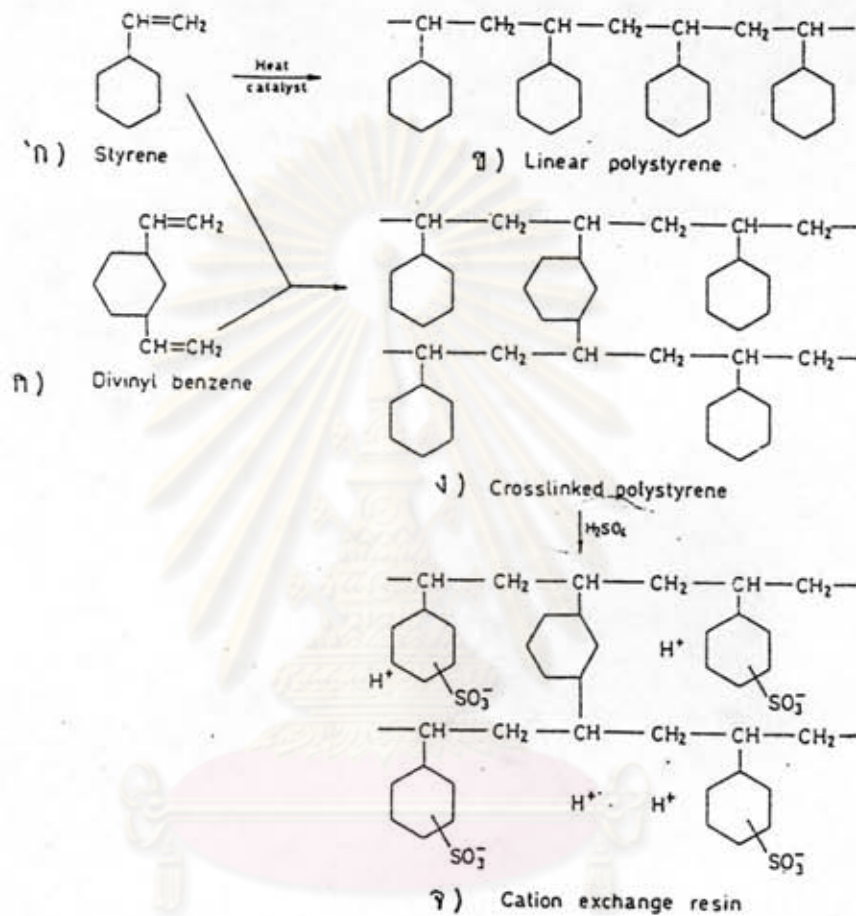


เรซินแบบกรดแก่สามารถที่จะจับไอออนบวกของ Cation ได้ทั้งหมด เมื่อเรซินหมดอำนาจในการแลกเปลี่ยนประจุ สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้โดยการทำรีเจนเนเรชั่น เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วย $NaCl$



ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ H^+ ต้องรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่ (H^+)



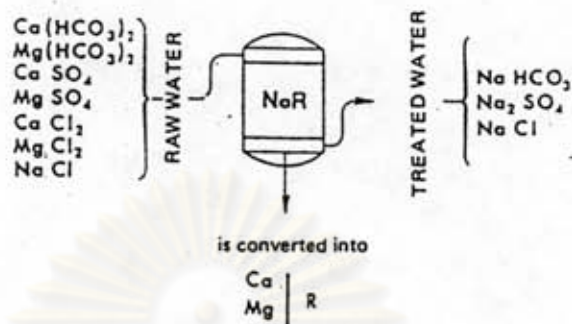


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิด คือ Styrene (ภาพ ก.) เมื่อหลายโมเลกุลมาต่อกันจะเป็น โพลีเมอร์ (ภาพ ข.) เป็นสายยาว การต่อกันเป็นสามมิติ เกิดขึ้นได้เมื่อมีตัวประสาน คือ Divinylbenzene (ภาพ ค.) ทำให้ได้โครงร่างของเรซิน (ภาพ ง.) ซึ่งยังไม่มี อำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน การเติมหมู่ไอออน เช่น $-\text{SO}_3\text{H}$ (ซัลโฟนิก) ทำให้ได้เรซินที่มีอำนาจอย่าง สมบูรณ์ (ภาพ จ.) (มันสิน, 2529)

ตารางที่ 3.4 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่างๆ (มันสัน, 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)		



รูปที่ 3.3 การแลกเปลี่ยน Na^+ ของเรซินแบบกรดแก่กับไอออนบวกทุกตัวในน้ำ (มันสัน, 2529)

เรซินแบบกรดแก่ มีข้อดี คือ

1. ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีพีเอช ทุกระดับ
2. สามารถแยก Na^+ จากเกลือแกงได้
3. การรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เกิดขึ้นน้อย
4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็ว
5. มีความคงทน ใช้งานได้นาน โดยมีการสูญเสียอำนาจเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย
6. การเปลี่ยนรูปของ Na^+ ในเรซินเป็น H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียง 7% (พองน้ำ)
7. เหมาะสำหรับใช้กำจัดความกระด้างหรือในการทำน้ำบริสุทธิ์ปราศจากแร่ธาตุ (Deminerization)

เรซินแบบกรดแก่ มีข้อเสีย คือ

1. มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชั่นต่ำประมาณ 25-45% ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชั่น
2. ถูกออกซิไดส์ได้ง่าย ทำให้เรซินเกิดการบวมและมีความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะเรซินที่มีระดับของการประสานโครงร่างต่ำ

2. เรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid cation exchanger)

เรซินแบบกรดอ่อน คือ พวกที่มี Functional group เป็นพวกกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอกซิลิก กรดอะคริลิก เรซินชนิดนี้แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้ไม่สามารถใช้แลกเปลี่ยนเป็นไอออนให้กับเกลือที่ได้จากกรดแก่ เช่น NaCl , CaSO_4

การใช้งานของเรซินแบบกรดอ่อน มีข้อจำกัด คือ เมื่อพื้กำลังเรซินด้วยกรดเกลือ เรซินชนิดนี้สามารถจับไอออนประจุบวกที่มีวาเลนซ์ 1 ขึ้นไป (หรือ Hardness) ที่จับคู่ (Associate) กับพวกต่างเท่านั้น ดังนั้นจำนวน Cation ที่ถูกขจัดออก (Ca^{2+} , Mg^{2+}) จะเท่ากับความสามารถจากค่าความเป็นต่างสำหรับกรณีที่มีความกระด้างทั้งหมดมากกว่าความเป็นต่างทั้งหมด ซึ่งจัดว่าเป็นสภาพน้ำที่เหมาะสมที่สุด สำหรับเรซินชนิดนี้

ในกรณีที่อัตราส่วนของ Hardness : Alkalinity มากกว่า 1 แสดงว่าจะต้องมี Permanent Hardness จะทำให้เรซินชนิดนี้เริ่มจะไม่ค่อยเหมาะกับการขจัดไอออนเพราะความสามารถในการจับ ประจุจะลดลง แต่ Cation leakage เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงไม่ค่อยเหมาะเมื่อเทียบกับเรซินแบบกรดแก่

เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อดี คือ

1. ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชั่นสูงถึง 90% โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูป H^+ เพราะเรซินมีความชอบ (Affinity) H^+ สูง
2. ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า
3. เรซินทนต่อสารออกซิแดนซ์ เช่น คลอรีน ได้ดี
4. เรซินในรูป H^+ สามารถกำจัดความเป็นต่างออกจากน้ำได้โดยไม่ต้องเติมกรด
5. เรซินสามารถใช้รีเจนเนอแรนต์จากการทำรีเจนเนอเรชั่นของเรซินแบบกรดแก่ได้
6. มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมรั่วหนีได้มาก

เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อเสีย คือ

1. เรซินใช้ได้ภายใต้สภาวะจำกัด เช่น ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชสูง
2. เรซินไม่มีความสามารถในการแยกเกลือ (Salt Splitting)
3. การเปลี่ยนรูป H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่า

4. เรซินมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้าและขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำดิบ
 5. เรซินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำได้ง่าย ทำให้เกิดการรั่วของไอออนที่ต้องการกำจัดออก
3. เรซินแบบต่างแก่ (Strong basic anion exchanger)

เรซินแบบต่างแก่ คือ เรซินที่มี Functional Group เป็นพวกต่างแก่ Quaternary Ammonium หน้าที่ของเรซินแบบต่างแก่ คือ ใช้ไอออนลบแลกเปลี่ยนไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- เป็นต้น

เรซินแบบต่างแก่ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. Type I
2. Type II

เนื่องจาก Functional Group เป็นต่างแก่ ในกรณีที่พื้นกำลังเรซินด้วยโซดาไฟจึงมีความสามารถในการจับกรดได้ทุกชนิด ทั้งกรดแก่และกรดอ่อน ส่วนในกรณีที่พื้นกำลังเรซินด้วยเกลือแกงสามารถใช้กำจัดไอออนลบของเกลือได้ เช่น ใช้กำจัดโบคาร์บอเนต ในเตรต ซัลเฟต โดยแลกเปลี่ยนกับคลอไรด์

สำหรับ Type I เป็นเรซินที่ทนความร้อนได้ถึง 60 องศาเซลเซียส มีความคงทนดีกว่า Type II และมีความสามารถในการจับ Silica ได้ดีกว่า Type II แต่ Type II จะมี Capacity ในการใช้งานสูงกว่า Type I ประมาณ 20% ต่อปริมาณการใช้สารเคมีพื้นกำลังที่เท่าๆ กัน

เรซินแบบต่างแก่ มีข้อดี คือ

1. สามารถใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. มีความสามารถในการแยกเกลือด้วย (Salt Splitting)
3. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว

เรซินแบบต่างแก่ มีข้อเสีย คือ

1. ประสิทธิภาพในการรีเจเนอชั่นต่ำ ประมาณ 18-33% ทำให้ต้องเปลืองสารรีเจเนอแรนต์มาก
2. มีความคงทนต่ำจึงทำให้มีอายุการใช้งานสั้น
3. ในกรณีที่น้ำเสียมีกรดฮิวมิกที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของพืช สามารถทำให้เรซินเสียและไม่สามารถทำรีเจเนอชั่นได้
4. เรซินแบบต่างอ่อน (Weak basic anion exchanger)

เรซินแบบต่างอ่อน คือ เรซินที่มี Functional Group เป็นพวกต่างอ่อน ได้แก่ พวก Primary Secondary หรือ Tertiary Amino การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H₂SO₄, HNO₃ ออกจากน้ำและไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO₂, SiO₂ เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน



เนื่องจากเรซินชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีไอออนอิสระก็ได้ ดังนั้นกลไกการทำงานของเรซินจะเป็นลักษณะ Absorption ไม่ใช่ลักษณะการแลกเปลี่ยนประจุ

เรซินแบบต่างอ่อน มีข้อดี คือ

1. ประสิทธิภาพในการทำรีเจเนอชั่นสูงเกือบ 100% ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย
2. ทนต่อกรดฮิวมิกได้
3. ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง

เรซินแบบต่างอ่อน มีข้อเสีย คือ

1. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนช้า
2. ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชต่ำเท่านั้น

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นดังนี้

Service	$\text{HNO}_3 + \text{R} \rightarrow \text{RHNO}_3$
Regenerate ด้วย NaOH	$\text{RHNO}_3 + \text{NaOH} \rightarrow \text{R} + \text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Regenerate ด้วย Na_2CO_3	$2\text{RHNO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow 2\text{R} + 2\text{NaNO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรดและด่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออน จากการศึกษาปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน พบว่า เรซินเลือกที่จะชอบทำปฏิกิริยากับไอออนบางชนิดมากกว่าชนิดอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุลและปริมาณความเข้มข้นของไอออน ในสารละลาย ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออน ดังแสดงในตารางที่ 3.5

นอกจากนี้การจับไอออนของเรซินยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน Degree of Cross-linking (ตารางที่ 3.6) ชนิดของ Functional Group และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

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

ตารางที่ 3.5 ลำดับความชอบไอออนของเรซินชนิดซัลโฟนิคในน้ำ (มันสัน,2529)

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ในการเลือกจับไอออนของ Sulphonic Acid Exchanger กับ Degree of Cross-linking (Dorfner,1977)

Cation	Cross-linking		
	4%	8%	10%
Li	1.00	1.00	1.00
H	1.30	1.26	1.45
Na	1.49	1.88	2.23
NH ₄	1.75	2.22	3.07
K	2.09	2.63	4.15
Rb	2.22	2.89	4.19
Cs	2.37	2.91	4.15
Ag	4.00	7.36	19.4
Te	5.20	9.66	22.2

* Percent of Divinylbenzene as cross-linking agent.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ความชื้นของเรซิน (Moisture Content)

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินที่มีความชื้นสูงจะเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มากและมีความชื้นต่ำถ้ามีช่องว่างน้อย ความสามารถในการเก็บกักน้ำ จะแสดงให้เห็นได้จากการบวมหรือพองน้ำของเรซิน เมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างของเรซินเป็นสิ่งที่จำเป็น เนื่องจากทำให้ไอออนต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำสามารถซึมเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออน อิสระของเรซิน ระดับความชื้นของเรซินขึ้นอยู่กับ Degree of Crosslinkage ของโครงไฮโดรคาร์บอนซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่นช่องว่างภายในจะมีมากจึงเก็บกักน้ำได้มาก ทำให้เรซินมีความชื้นภายในสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ ส่วนเรซินที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูงจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนสูงและมีความชื้นน้อย แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวสูงเกินไปจะทำให้ช่องว่างภายในเรซินเหลือน้อย การแลกเปลี่ยนไอออนอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวกและยังอาจทำให้เรซินแตกได้ง่าย

ความชื้นเรซิน มีหน่วยแสดงในรูป

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

2. ความหนาแน่นปรากฏ (Bulk Density)

ความหนาแน่นของเรซิน เป็นความหนาแน่นปรากฏที่วัดหลังจากผ่านการล้างย้อนตกตะกอนและทิ้งให้สะเด็ดน้ำแล้ว และ หมายถึงน้ำหนักของเรซินหารด้วยปริมาตรทั้งหมดของเรซิน ซึ่งรวมความพรุนที่เกิดจากการซ้อนกันของเรซิน ความหนาแน่นปรากฏนี้เรียกว่า Bulk Density

3. ขนาดสัมฤทธิ์และสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ

ขนาดของเรซินสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ

1. ขนาดสัมฤทธิ์ (Effective Size)
2. สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Uniformity Coefficient)

โดยทั่วไปขนาดของเรซินที่ใช้ จะอยู่ในช่วง 0.04-1 มม. การหาขนาดของเรซินจะใช้ความมาตรฐานเบอร์ของตะแกรงร่อน

เรซินในขณะแห้งและเปียก จะมีปริมาตรไม่เท่ากันเนื่องจากขนาดของเรซินไม่เท่ากัน อันเนื่องจากการพองตัวของเรซินซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้น Degree of Cross-linking และ Functional Group

ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion Exchange Capacity)

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออนหรือคัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน หมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแยกมาจากน้ำ หน่วยแสดงขีดความสามารถของเรซินจึงอาจมีได้หลายแบบ เช่น

1. หน่วยสมมูลต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/ml, eq/l
2. หน่วยสมมูลต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g.

ตารางที่ 3.7 A.S.T.M. Standard Sieves (Cookson Ceramists Handbook, 1987)

Sieve No.	Normal Sieve Opening
10	2.000
20	1.700
25	0.710
30	0.600
35	0.500
40	0.425
45	0.355
50	0.300
60	0.25
70	0.212
80	0.180
100	0.150
120	0.125
140	0.106
170	0.090
200	0.075
230	0.063
270	0.053
325	0.045
400	0.038

ตารางที่ 3.8 British Standard Sieves (Cookson Ceramists Handbook,1987)

Mesh No.	Norminal Aperture Size (mm)
10	1.700
22	0.710
30	0.500
36	0.425
44	0.355
52	0.300
60	0.250
72	0.212
85	0.180
100	0.150
120	0.125
150	0.106
170	0.090
200	0.075
240	0.063
300	0.053
350	0.045
400	0.038

ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน แบ่งได้ดังนี้

1. ความสามารถทั้งหมด (Total Capacity)

ความสามารถทั้งหมด หมายถึง ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนประจุ โดยพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดของส่วนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนประจุ ในโครงร่างตาข่ายโมเลกุลของเรซินโดย การนำเรซินมาพื้นกำลังด้วยสารเคมีเพื่อเปลี่ยนรูปให้อยู่ในไอออนที่มีประจุก่อน แล้วจึงแยกเอาไอออน ที่มีประจุออกมาจากเรซิน แล้วนำไปหาปริมาณด้วยการวิเคราะห์ปริมาณทางเคมี เช่น นำเรซินที่ ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกให้อยู่ในของไฮโดรเจนไอออนออกมา โดยใช้สารละลายเกลือแกง โดยเก็บรวบรวมไฮโดรเจนไอออนที่แยกออกมานี้จากทุกส่วนให้หมด แล้วนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออนด้วยการใช้สารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน

2. ความสามารถใช้งาน (Operating Capacity)

ความสามารถใช้งาน หมายถึง เป็นค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ประโยชน์จริงๆ และเกิดจริงในการใช้งานโดยบรรจุไว้ใน column แล้วทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนจริงๆ ภายในเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ ของงานนั้นๆ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับระดับปริมาณสาร เคมีที่ใช้พื้นกำลัง องค์ประกอบส่วนผสมของสารละลายที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินนั้น อัตราการไหลของสารละลายผ่านเรซิน ขนาดของเรซิน ตัวอย่าง เช่น ในการกำจัดความกระด้างของน้ำโดยใช้เรซินพวกซัลไฟไนต์มาตรฐาน เมื่อใช้ระดับปริมาณสารเคมีในการพื้นกำลังที่แตกต่างกัน พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้งานของจริงของเรซินจะแตกต่างกัน

สมดุลการพองตัว (Swelling Equilibrium)

สมดุลการพองตัว หมายถึง ความสามารถของสารเรซินในการจะเก็บกักสารตัวละลายไว้ภายใน ตัวทำละลายที่ถูกเก็บกักนี้สามารถถูกปลดปล่อยออกไปแล้วถูกเก็บกลับใหม่ได้ ปริมาณสารตัวทำละลายซึ่งจะถูกเก็บกักที่จุดสมดุลนั้น จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุภาคมีประจุ รูปแบบอนุภาคมีประจุที่อยู่ในสารเรซินที่จะใช้แลกเปลี่ยน ชนิดของสารตัวทำละลาย องค์ประกอบส่วนผสมของสารละลายที่มาทำปฏิกิริยากับสารเรซิน ปริมาณ Crosslinkage ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิ การพองตัวเนื่องจากเก็บกักน้ำไว้ในตัวของสารเรซิน คือ การเกิดปฏิกิริยา Hydration ของกลุ่มอนุภาคที่มีประจุในโครงร่างตาข่ายของเรซิน



ดังนั้นปริมาณน้ำที่จะถูกเก็บกักไว้หรือปริมาณการพองตัว จึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้น
ของความสามารถในการแลกเปลี่ยนอนุผลของเรซิน การเพิ่มปริมาณการพองตัวจะสามารถเพิ่มขึ้นไป
ได้เรื่อยๆ จนถึงขอบเขตที่ถูกยับยั้งไม่ให้เพิ่มต่อไปจากโครงสร้างของโมเลกุล



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 ชนิดของสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้ในการฟื้นฟ้อำนาจให้กับเรซิน (Dorfner,1977)

Ion Exchanger type	Desired ionic form	Regenerating agent (approx. 1 N solution)	Required amount	
			regenerating agent (meq)	Ion Exchanger (meq)
Strong acid cation exchanger	H ⁺	HCl	3-5	1
	H ⁺	H ₂ SO ₄	3-5	1
	Na ⁺	NaCl	3-5	1
Weak acid cation exchanger	H ⁺	HCl	3-5	1
	H ⁺	H ₂ SO 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 ²⁻	H ₂ SO ₄	4-5	1
	SO ₄ ²⁻	H ₂ SO ₄	4-5	1
Strong base anion exchanger, type II	OH ⁻	H ₂ SO ₄	3-4	1
Weak base anion exchanger	free base	NaOH	1.5-2	1
	free base	NH ₄ OH	1.5-2	1
	free base	Na ₂ CO ₃	1.5-2	1
	Cl ⁻	HCl	1.5-2	1
	SO ₄ ²⁻	H ₂ SO ₄	1.5-2	1

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (Cellulose Ion Exchanger)

โครงสร้างของเซลลูโลสในธรรมชาติจะมีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ จึงทำให้เซลลูโลสมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน การสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้โดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย Hydroxycelluloses และ COOH-group 15% มีลักษณะเป็นผงไม่ละลายน้ำสามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนได้

เรซินที่ได้จากเซลลูโลส จะมีคุณสมบัติคล้ายกับเรซินสังเคราะห์จากกระบวนการทางเคมี แต่จะมีลักษณะบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างของเซลลูโลสจะเป็น Hydrophilic แต่โครงสร้างของเรซินสังเคราะห์จะเป็น Hydrophobic ผลจากคุณสมบัติของไฟเบอร์ในเซลลูโลส พบว่ามีการประสานกันด้วยพันธะไฮโดรเจน หมู่ไอออนส่วนมากจะอยู่ตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่ายของโครงสร้าง ซึ่งมีระยะประมาณ 50 Å ซึ่งหมู่ของไอออนไม่สามารถที่จะลอดผ่านรูพรุนของโครงสร้างของเรซินได้

จากลักษณะของโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่า โมเลกุลของเซลลูโลสมี Hydroxyl group ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีหมู่ไอออนมาเกาะจับอยู่ การที่บอกระดับตำแหน่งที่แน่นอนจะทำได้ยาก แต่จากการศึกษาทางเคมีของเซลลูโลสพบว่าคาร์บอนอะตอมที่ 2 และ 6 เป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุด อนุภาคของเซลลูโลส มีขนาด 15-20 μ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของเซลลูโลส การปรับปรุงลักษณะของโครงสร้างและฟังก์ชันกรุปในเซลลูโลส สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น การเก็บรักษาสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำโดยการแช่ในสารละลาย NaH_2PO_4 เข้มข้น 0.5 M และ NaOH เข้มข้น 1 N ซึ่งจะสามารถเก็บไว้ได้นานหลายเดือน ควรหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสัมผัสกับสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง ในการทำรีเจนเนอเรชันจะใช้สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 N หรือ acid buffers หรือ สารละลาย HCl เจือจาง ความสามารถในการใช้งานของสารแลกเปลี่ยนไอออนอยู่ในช่วง 0.25-1.00 meq/g dry wt. ในการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนจะให้คอลัมน์ ที่มีความยาวตั้งแต่ 40 เซนติเมตรขึ้นไป (อัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความยาวเป็น 1:10 ถึง 1:20)

ในการเตรียมสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ปฏิบัติมักจะต้องประกอบด้วยกระบวนการเปลี่ยน Alkali cellulose ด้วยสารประกอบคลอรีน ข้อเสียของปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดการละลายและการแพร่กระจายของวัสดุ ถึงแม้ว่าจะมีการทำให้ตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีลักษณะนุ่ม

คล้ายวุ้น (Gellike Product) ซึ่งจะมีความต้านทานการไหลของสารละลายสูง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการลดการพองน้ำของเรซิน สามารถทำได้โดยการ Crosslinking ของ Cellulose chains ด้วย di- (2-ethylamine) Sulfate, 1,4-butanedisulfate, 1,3 dichloro-2- propanol, divinyl Sulfone และ formaldehyde ก่อนการเติมหมู่ไอออน dichloroacetic acid เป็น cross-linking agent ที่ใช้เป็น ตัวบอก exchange group Serva Cellulose Ion Exchangers เป็นสารเซลลูโลส แลกเปลี่ยนไอออนชนิดแรกที่เกิดขึ้นและสามารถจำหน่ายได้ในปริมาณมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการ ขอมรับและความสำเร็จในการนำไปใช้งานของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน คุณสมบัติที่สำคัญ ของ Serva Cellulose Ion Exchangers แสดงในตารางที่ 3.10

องค์ประกอบในเซลล์พืช

องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเซลล์พืชสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. lignin
2. Holocellulose

Holocellulose สามารถแบ่งย่อยได้เป็น

- ก. Cellulose
- ข. Hemicellulose

1. เซลลูโลส

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

โครงสร้างของเซลลูโลสจะประกอบด้วยโมเลกุลของ D-glucose ซึ่งจะเชื่อมกันด้วยพันธะ β -glycoside และความยาวของโซ่จะประกอบด้วย D-glucose ตั้งแต่ 300 ถึง 2500 หน่วยซึ่งถ้าไฮโดรไลส์เซลลูโลสเพียงบางส่วนจะได้เซลโบไอโอสแต่ถ้าไฮโดรไลส์เต็มที่จะได้ D-glucose

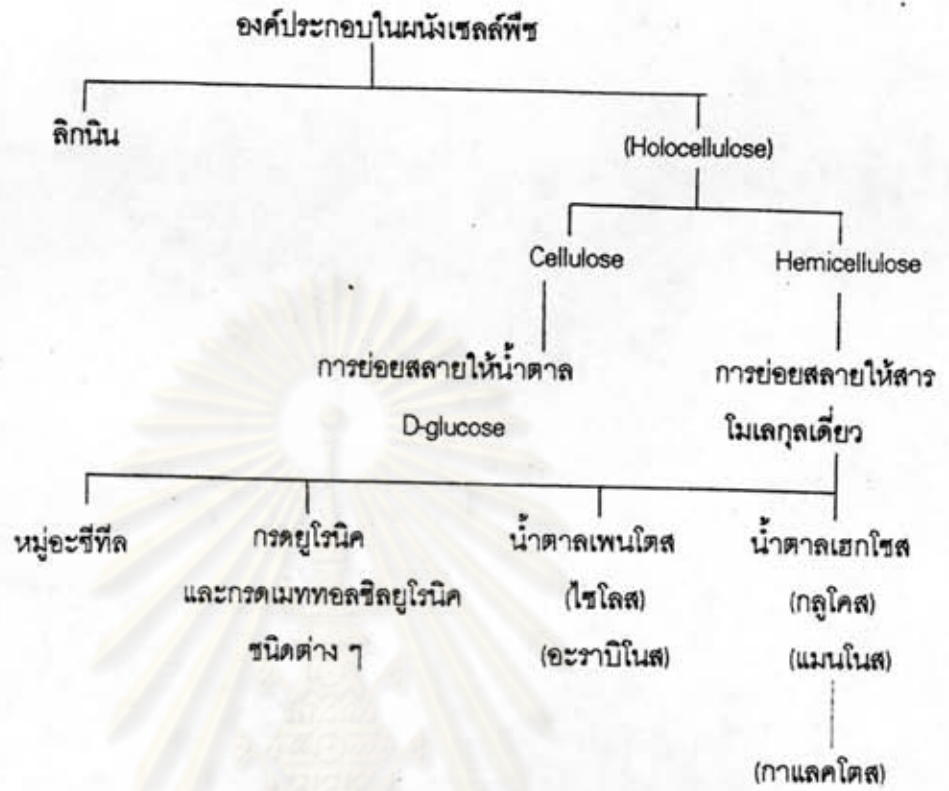
ตารางที่ 3.10 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers (Dorfner, 1977)

(CE = cation exchanger, AE = anion exchanger)

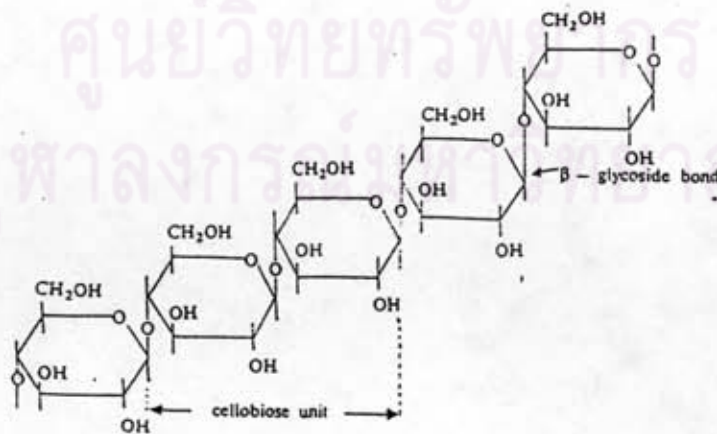
Name	Ion Exchanging group	Properties	Capacity (meq/g)	Prevailing particle size (mm)
CM-Cellulose	-CO ₂ HCOOH	CE, weak acid	0.62±0.1	50-200
P-Cellulose	-OPO ₃ H ₂	CE, medium acid	0.8-0.9	50-200
SE-Cellulose	-CO ₂ H ₂ SO ₃ H	CE, strong acid	0.2-0.3	50-200
DEAD-Cellulose	-OC ₂ H ₄ N(C ₂ H ₅) ₂	AE, strong base	0.4-0.55	50-200
TEAE-Cellulose	-OC ₂ H ₅ N ⁺ Br ⁻	AE, medium base	0.55-0.75	50-200
PAB-Cellulose	-OCH ₂ C ₆ H ₄ NH ₂	AE, weak base	0.15-0.2	50-200
AE-Cellulose	-OC ₂ H ₄ NH ₂	AE, weak base	0.33±0.1	50-200
BD-Cellulose	-CO ₂ H ₄ N(C ₂ H ₅) ₂	AE, medium base	0.8±0.05	50-200
GE-Cellulose	-OC ₂ H ₄ NH ⁺ C=NH ₂ ⁺ Cl ⁻	CE, strong base	0.2-0.3	50-200
BND-Cellulose0	-OC ₂ H ₄ N(C ₂ H ₅) ₂	CE, medium base	0.8±0.05	50-200

คุณสมบัติของเซลลูโลส คือ ไม่ละลายน้ำ, ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือ สารละลายต่างอ่อน แต่สามารถได้ดีในกรดหรือด่างแก่ จึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างได้เป็น 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. α -cellulose เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายไฮดรอกไซด์ 17.5%
2. β -cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายไฮดรอกไซด์ 17.5 %
3. γ -cellulose เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายไฮดรอกไซด์ 17.50 % และสารละลายกรดเจือจาง



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช (ปราณี, 2532)



รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส (Bailey, 1986)

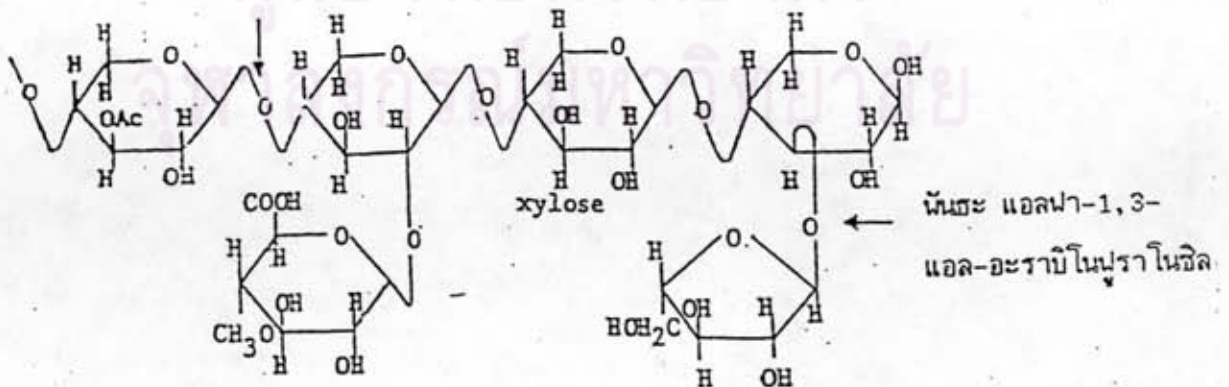
2. Hemicellulose

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

Hemicellulose เมื่อถูกย่อยสลายจะได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตสและเฮกโซส ได้แก่ ไซโลส แมนโนส กาแลคโตส อะราบิโนส สำหรับ xylan ที่เป็นองค์ประกอบหลักของ Hemicellulose นั้น เป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลไซโลสที่ต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1,4-ไซโลซิดิก (β -1,4-xylosidic linkage) เป็นเส้นตรงเฉพาะไซโลสอย่างเดียวหรือมีกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดอื่นๆ ปนอยู่ เช่น L-arabinofuranose เชื่อมต่อกับ ดี-ไซโลสที่มี ตำแหน่ง 0-3 และ ดีกลูคูโรนิก แอซิด (D-glucuronic acid) หรือ 4-O-เมทิล-กลูคูโรนิก แอซิด (4-O-methyl-glucuronic acid) ซึ่งต่อกับ ดี-ไซโลส ที่ตำแหน่ง 0-2 ดังแสดงในรูป 3.6

Hemicellulose จะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในด่างและถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่า Cellulose

พันธะเบต้า-1,4-ไซโลซิดิก



4-ออริโอ-เมทิล-ดี-กลูคูโรนิก แอซิด แอล-อะราบิโนส

รูปที่ 3.6 โครงสร้างของไซแลน Ac = Acetyl Group (ปราณี, 2532)

3. Lignin

ลิกนินจัดอยู่ในพวก Heterogeneous organic polymer จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืชโดยอยู่รอบๆ เซลลูโลสและป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่ methoxylgroup-OCH₃, หมู่ hydroxyl group-OH และส่วนที่เป็น phenolic โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่า ลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ ทั้งนี้เนื่องจาก ลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียวแต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบซึ่งประกอบด้วยหน่วย เหล่านี้ คือ

- ก. ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane)
- ข. กัวไออะซิล ยูนิต (Guaiacyl Unit)
- ค. ไสโนกิล ยูนิต (Syringly Unit)
- ง. พารา-ไฮดรอกซีฟีนิล ยูนิต (Para-Hydroxyphenly Unit)

องค์ประกอบของผักตบชวา

ผักตบชวา (Water Hyacinth, Eichhornia Crassipes (Mart.) Solms.) เป็นวัชพืชลอยน้ำซึ่งจัดเป็น พืชประเภทใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในตระกูล Pontederiaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ในประเทศบราซิล ทวีปอเมริกาใต้ พบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2367 โดย Karl Von Martins และมีการแพร่ระบาดไปยังประเทศไทย เนื่องจากมีการนำเข้ามาจากประเทศอินโดนีเซียในปี พ.ศ. 2444 และพบว่าปัจจุบันในการแพร่กระจายของ ผักตบชวามีอยู่ทั่วไปตามแหล่งน้ำต่าง ๆ

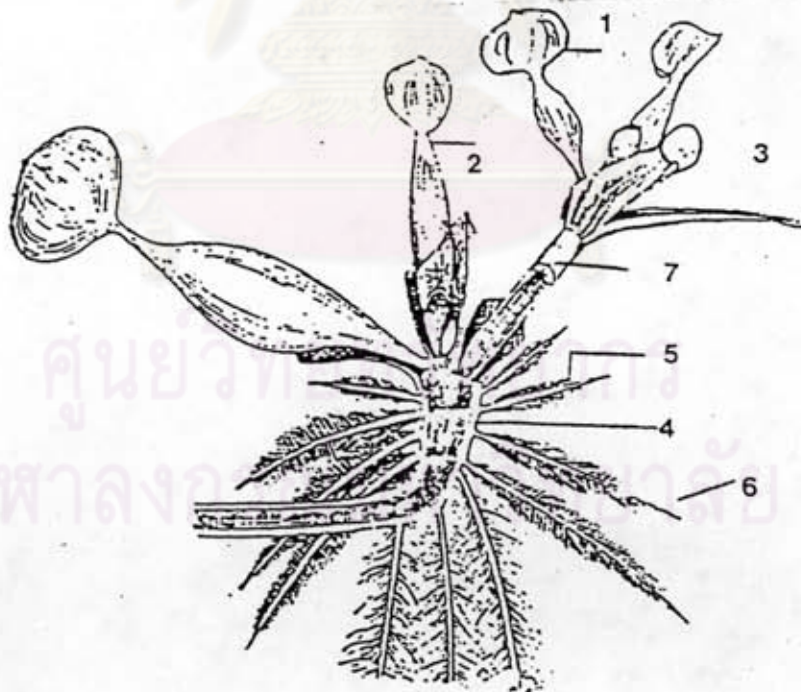
1. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักตบชวา

ผักตบชวาเป็นวัชพืชข้ามปี ประกอบด้วยลำต้นที่มีราก (Rhizomation System) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-6 ซม. และยาวประมาณ 30 ซม. ลำต้นมีสีม่วงแดง มีขนาดแตกต่างกัน ประกอบด้วยกลุ่มใบเรียงกันเป็นกลีบชั้น (Rosettes) ก้านใบมีลักษณะกลม พองออก ภายในมีเนื้อพูน คล้ายฟองน้ำเป็นเครื่องพยุงให้ต้นลอยน้ำได้ ผักตบชวามีระบบรากเป็นรากฝอยโดยแตกออกจากข้อบน

ลำต้น มีความยาวตั้งแต่ 10-90 ซม. และมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซึมธาตุอาหารต่าง ๆ ที่ปะปนในน้ำ ส่วนดอกมีสีม่วงฟ้าลักษณะเป็นช่อดอกมีประมาณ 6-12 ดอก ดังแสดงรายละเอียดดังรูป 37

ผักตบชวาจัดเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้เร็วที่สุด โดยสามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งแบบไม่ใช้เพศ (Vegetative Propagation) และแบบใช้เพศ (Sexual Reproduction) แต่โดยทั่วไปมักจะขยายพันธุ์โดยการแตกหน่อเป็นต้นใหม่ โดยสามารถเพิ่มการครอบคลุมพื้นที่ได้เป็น 2 เท่าทุกระยะเวลา 62 วันหรือเพิ่มจำนวนจาก 10 ต้นเป็น 6 แสนต้น ภายในเวลาเพียง 8 เดือน สำหรับการขยายพันธุ์โดยใช้เพศจะผสมเกสรภายในตัวเอง (Self Pollination) แต่บางครั้งสามารถผสมข้ามต้นได้ โดยจะเกิดขึ้นเฉพาะในฤดูแล้งเท่านั้น

เนื่องจากผักตบชวาเป็นพืชน้ำที่โตเร็วจึงก่อให้เกิดปัญหาต่างๆต่อแหล่งน้ำ ปัจจุบันจึงมีการดำเนินการควบคุมได้ 2 วิธีการ ดังนี้



รูปที่ 37 ส่วนประกอบต่างๆ ของผักตบชวา (ปราณี, 2532)

- | | |
|------------|-----------------|
| 1. แผ่นใบ | 2. ท่อนพองลำต้น |
| 3. ลิเกวล์ | 4. เหง้า |
| 5. ขนราก | 6. หมวกราก |
| 7. ลำต้น | |

1. การทำลายโดยตรง ได้แก่ การใช้สารเคมี การใช้วิธีกลและใช้ระบบชีวภาพ

1.1 การใช้สารเคมี สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด เช่น Dalapon, Diquat, Paraquat เป็นต้น เป็นวิธีที่ได้ผลรวดเร็วแต่ก่อให้เกิดปัญหาทางมลภาวะ โดยสารเคมีสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำ ตลอดจนการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่น ๆ

1.2 การใช้วิธีกล โดยการใช้แรงงานคน หรือเครื่องจักรกล วิธีการนี้มีปัญหา คือ สิ้นเปลืองแรงงานและเสียเวลามาก เหมาะสำหรับใช้ในพื้นที่แคบ ๆ เท่านั้น

1.3 การใช้วิธีชีวภาพ โดยการใช้แบคทีเรีย, รา, ไวรัส และแมลง เป็นต้น แม้ผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อย แต่ยังไม่ประสบความสำเร็จถึงขั้นนำมาใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งต้องคำนึงถึงปัญหาด้านค่าใช้จ่ายด้วย

2. การควบคุมโดยการนำไปใช้ประโยชน์

2.1 ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดมลสาร (Pollutants) ต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ สารอินทรีย์, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส, โลหะหนักและสารพิษ

2.2 ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas)

2.3 ใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืช

2.4 ใช้เป็นอาหารสัตว์

2.5 ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารที่มีประโยชน์ เช่น ใช้ในการผลิตเอนไซม์-เซลลูโลส หรือนำมาแปรรูปโดยการย่อยสลายไม่ว่าจะเป็นโดยวิธีการเคมีหรือเอนไซม์ จะได้น้ำตาลชนิดต่างๆ ซึ่งใช้ในการหมักโดยจุลินทรีย์เพื่อผลิตกรดออกซาลิก เอธิลแอลกอฮอล์ วิตามิน ยาปฏิชีวนะ ฯลฯ

2.6 ใช้ทำเครื่องจักรสาน

2. องค์ประกอบของผักตบชวา

ต้นผักตบชวา 100 กก. หลังจากตากให้แห้งจะมีน้ำหนักเหลือประมาณ 5 กก. คิดเป็นน้ำหนักของกากแห้งเฉลี่ยร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด จากการวิเคราะห์องค์ประกอบ พบว่า ผักตบชวาประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินและแร่ธาตุอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 องค์ประกอบในผักตบชวาแห้ง (ปราณี, 2532)

องค์ประกอบ	สัดส่วน(%)
ลิกนิน	12-13
เซลลูโลส	43-44
เพนโตเซน	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

การศึกษาที่ผ่านมา

การนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับประเทศกำลังพัฒนา เนื่องจากประเทศเหล่านี้มีการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรต่าง ๆ มาก ดังนั้นจึงมีกากสารอินทรีย์ที่เหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด

วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

- 1 เปลือกไม้ (Bark)
- 2 ฟางข้าว (Rice Straw)
- 3 เปลือกมะพร้าว (Coconut Husk)
- 4 ไม้เลื่อย (Sawdust)
- 5 ใบชา (Tea Leaves)
- 6 ชานอ้อย (Bagasse)
- 7 เปลือกถั่วลิสง (Peanut Skin)
- 8 เปลือกเมล็ดแตงโม (Melon Seed Husk)

9. เปลือกหอมแดง (Red Onion Skin)
10. ชังข้าวโพด (Corn Cob)
11. เส้นใยลูกปาล์ม (Palm Pressed Fibres)

Kumar และ Dara, 1981 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกหอมแดง กำจัด Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Hg^{2+} และ Pb^{2+} ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย การกำจัดสีของเปลือกและการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพทำได้ โดยนำเปลือกหอมแดงที่ทำให้แห้งแล้วและบดเป็นผง 1 ส่วน แช่ใน 5 ส่วนของ Formaldehyde 39% และ 20 ส่วนของ $0.2 \text{ H}_2\text{SO}_4$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจน Filtrate มี pH 4-5 จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch และ Column Method โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 3 ปริมาตรเรซิน ต่อชั่วโมง ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 40, 100, 130 และ 220 มก/ล

จากผลการทดลองพบว่าโลหะหนัก ถูกกำจัดได้ 63-99.87% และความจุสูงสุด (Maximum Capacity) ของเปลือกหอมแดงที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพทางเคมี สามารถกำจัด Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} และ Hg^{2+} ได้ 1.62, 1.35, 1.22, 1.55, 1.3 และ 0.82 meq/g เรซิน ตามลำดับ

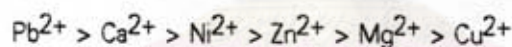
Bhargava และ คณะ, 1985, ได้ทำการวิจัยโดยใช้ขี้เลื่อย (Sawdust) ในการกำจัดโครเมียม ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสีย การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiment โดยทำการแปรค่าตัวแปรดังนี้ ความเข้มข้นของน้ำเสีย 1, 5, 10, 25, และ 50 มก/ล. ขี้เลื่อยที่ใช้มีขนาด 0.42-1.0 มม. ปริมาณ 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม โดยใช้ความเร็วในการกวน 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 5, 30, 60, 180 และ 360 นาที ทำการกรองเพื่อแยกขี้เลื่อยออกแล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นต่ำ (1-5 มก/ล.) โครเมียมถูกกำจัดได้ประมาณ 90-99.9%, ตะกั่ว 80-98.5%

เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้น 10-25 มก/ล. โครเมียมถูกกำจัดได้ประมาณ 55-75% ตะกั่ว 6-30% และแคดเมียมกำจัดได้สูงเพียง 9 % เท่านั้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณขี้เลื่อยที่ใช้และเวลาที่ใช้ในการทดลอง

Odozi และ คณะ, 1985 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ซังข้าวโพด (Corn Cob), ชี้เลื่อย (Sawdust) และเปลือกหอมแดง (Red Onion Skin) กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} และ Ca^{2+} การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch และ Column Experiments โดยใช้ Column ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เรซินขนาด 150 μ บรรจุเรซินที่ทำจากซังข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลลงใน Column และอีก Column บรรจุเรซิน ที่ทำจากส่วนผสมของซังข้าวโพด, ชี้เลื่อยและเปลือกหอมแดงที่ปรับสภาพด้วยฟีนอลและฟอร์มัลดีไฮด์ น้ำเสียที่ใช้จำนวน 1 ลิตร โดยควบคุมอัตราการไหล 2-3 ปริมาตรเรซิน/ชั่วโมง ส่วน Batch Experiment ทำการทดลองโดยใช้เรซินที่มีขนาด 150 และ 300 μ

จากผลการทดลองพบ ว่า ซังข้าวโพด ชี้เลื่อยและเปลือกหอมแดงที่ผ่านการปรับคุณภาพ ด้วยกระบวนการทางเคมีมีคุณสมบัติเป็น Cation Exchange Resin และพบว่า เรซินที่มีขนาด (Particle size) เล็กกว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าเรซินที่มีขนาดใหญ่ เรซินที่ทำมาจากส่วนผสมของซังข้าวโพด ชี้เลื่อยและเปลือกหอมแดงสามารถกำจัดโลหะหนักได้ 76-88% ซึ่งสูงกว่าเรซินที่ทำจากซังข้าวโพดเพียงอย่างเดียว ซึ่งสามารถกำจัดโลหะหนักได้ 65-79% ส่วนความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของเรซินทั้ง 2 ชนิด เป็น ดังนี้



Macchi และ คณะ, 1986 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากกาแฟ (Exhausted Coffee Grounds) กำจัดปรอทในน้ำเสีย การกำจัดสีของกากกาแฟสามารถทำได้โดยนำกากกาแฟแช่ในสารละลาย NaOH เข้มข้น 0.5 M 1 ลิตร กวนนาน 60 นาที กรองแล้วทำซ้ำอีก 2 ครั้ง จากนั้นจึงนำไปแช่ในสารละลาย HCl เข้มข้น 0.5 M, 1 ลิตร กวนนาน 30 นาที กรองและล้างด้วยน้ำ การวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Experiments โดยมีการควบคุมพีเอชที่ 3 และ 11 ความเข้มข้นของ Hg อยู่ในช่วง 0.05-0.5 มก/ล

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัด Hg ได้ 99.9% ที่พีเอช 3 และสามารถกำจัด Hg ได้ 99% ที่พีเอช 11 สารละลายปรอทมีค่า Ionic Strength 0.1 M $NaNO_3$ หรือ 0.1 M NaCl การทำ Elution สามารถทำได้โดยใช้ HCl 1 M ใช้ปริมาณ 16 เท่าของ Bedvolume จากการทดลองพบว่าสามารถกำจัด Hg ได้ 70% ที่ พีเอช 11 และ 85% ที่ พีเอช 3

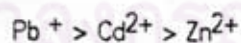
Srivastava และ คณะ, 1986 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ชี้เลื่อย (Sawdust) กำจัดโครเมียม ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การวิจัยเลือกใช้แบบ Batch Test โดยมีการแปรผัน

ความเข้มข้นของน้ำเสียและปริมาณซีลีเนียม ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้มี Cr (VI) 1, 5, 10, 25 และ 50 มก./ล ปริมาณซีลีเนียมที่ใช้ในการวิจัย 1, 5, 10, 25 และ 50 กรัม ผสมน้ำเสียกับซีลีเนียมแล้วกวน โดยความเร็ว 50 รอบ/นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ 30,60,180 และ 360 นาที นำไปกรองด้วย Whatman Filter Paper No.42 เพื่อแยกซีลีเนียมออก

จากผลการทดลองพบว่า โครเมียมถูกกำจัดออกไปได้ประมาณ 30-90% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ปริมาณของซีลีเนียมที่ใช้และเวลาที่ใช้การทดลอง ส่วนการดูดซึม Cr(VI) ด้วยซีลีเนียมขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำเสีย

Tan และ Rahman , 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชา (Tealeaves) กำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียมและสังกะสี ใบชาที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นใบชาที่เหลือทิ้งจากระบวนการแปรรูปการเกษตร การวิจัยเลือกใช้ Column Method บรรจุเมล็ดใบชา ขนาด 60-80 mesh กากใบชาที่ใช้ ในการทดลองนี้จะถูกนำไปต้มในน้ำร้อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่ใน HNO_3 ที่มีความเข้มข้น 0.1 M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า โลหะหนักถูกกำจัดเกือบ 100% เมื่อใช้ใบชา 1.87 กรัม และน้ำเสียมีความเข้มข้น 10 มก./ล ของ Cd (II), และ 50 มก./ล ของ Zn (II) โดยควบคุมพีเอชให้เท่ากับ 6 ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย อัตราไหลของน้ำเสียที่ไหลผ่าน Column จะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก ประสิทธิภาพในการกำจัด โลหะหนักประมาณ 90% เมื่อมีอัตราการไหล 8.3 มล/นาที เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง จากผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดโลหะหนักได้ ดังนี้



Adelina, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ผงกาบมะพร้าว (Coconut Coir Dust) ในการกำจัดโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว แมงกานีส สังกะสี แมกนีเซียม นิกเกิล แคดเมียมและทองแดงในน้ำเสีย การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiments น้ำเสียที่ใช้มีความเข้มข้น 1 meq, ขนาดของผงกาบมะพร้าวที่ใช้ 24, 40 และ 60 mesh ซึ่งไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี ทำการทดลองโดยนำ ผงกาบมะพร้าวที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง มาผสมกับน้ำเสีย แล้วทำการเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัด Cu^{2+} ได้ 87% , Pb^{2+} , Mn^{2+} และ Mg^{2+} 95%, Ni^{2+} ได้ 98% และ Cd^{2+} ได้ 99% เมื่อใช้เวลา 1 ชั่วโมงและถ้าใช้เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสามารถ กำจัด Mg^{2+} ได้ 88%, Cu^{2+} ได้ 95-98% และ Zn^{2+} ได้ 98-99%

Okieimen และ Onyenikpa, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เปลือกเมล็ดแตงโม (Melon Seed Husk) กำจัด Cd^{2+} และ Pb^{2+} ในน้ำเสียการวิจัยเลือกใช้ Batch และ Column Method เปลือกแตงโมที่ใช้มีขนาด 300-425 μ โดย

- Batch Method ใช้ทดสอบการกำจัด Cd^{2+} , Cu^{2+} และ Ni^{2+} ด้วยเปลือก เมล็ดแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีและใช้เปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีด้วย Ethylenediamine tetraacetic acid (EDTA) ในการกำจัด Cu^{2+} และ Cd^{2+} น้ำเสียที่ใช้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มก./100 มล.

- Column Method ใช้ทดสอบการกำจัด Pb^{2+} ด้วยเปลือกเมล็ดแตงโมที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมีโดยใช้ Column ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ซม. ยาว 35 ซม. ควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสีย 1 มล./นาที ความเข้มข้น 100 มก./ล. และแปรผันปริมาตรของน้ำเสียที่ใช้ 50, 100, 400, 800 และ 1000 มล.

ผลการทดลอง พบว่า เปลือกเมล็ดแตงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมีสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางเคมี ตามตารางที่ 3.12

จาก Column Method พบว่า สามารถกำจัด Pb^{2+} ได้ 62-92% และการทำ Recovery โดยใช้ HNO_3 (2% VM) สามารถ Recovery Pb^{2+} ได้ถึง 70%

Krishnan และ คณะ, 1988 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ใบไม้ต้นธูปฤาษีและเส้นผมของคน ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ แคดเมียม ปรอทและตะกั่ว การวิจัยนี้เลือกใช้ Batch Experiments โดยมีการแปรค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย 1-100 มก./ล. ปริมาณใบธูปฤาษีและเส้นผมที่ใช้ 50-200 มก. โดยใบธูปฤาษีที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกตัดให้มีความยาว 5 ซม.และอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นผมที่ใช้จะถูกตัดให้มีความยาว 0.5 ซม. จากนั้นนำไปแช่ใน Ether นาน 30 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำ

ตารางที่ 3.12 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเรซินที่ทำจากเปลือกแดงโม 29 °C
(Okieimen, 1988)

ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น (mg/100ml)	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับ (mg/g เรซิน)			
	CD(II)	Cu(II)	Pb(II)	Ni(II)
10	2.1(2.8)	1.5(2.1)	2.4	1.6
20	3.6(5.0)	2.2(3.5)	-	-
30	4.3(6.6)	3.2(4.8)	6.0	3.4
40	5.4(8.3)	5.1(7.6)	-	-
50	6.2(9.4)	6.0(8.5)	6.8	5.9

* ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้โดยเปลือกแดงโมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแสดงในวงเล็บ

จากผลการทดลองพบว่าไบอูปรูทารี สามารถกำจัด Cd^{2+} ได้ 21-73%, Hg^{2+} ได้ 43-54% และ Pb^{2+} ได้ 50-68% ส่วนเส้นผมสามารถกำจัด Hg^{2+} ได้เพียงอย่างเดียวโดยกำจัดได้ประมาณ 74-83%

Maranon และ Sastre, 1991 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอปเปิ้ลซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล กำจัดโลหะหนักซึ่งละลายอยู่ในน้ำ การวิจัยเลือกใช้ Column Method โดยใช้ Column ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ยาว 40 ซม. ภายในบรรจุกากแอปเปิ้ลที่นำไปบดมีขนาด 0.20-0.63 มม. ในการทดลองจะศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดของกากแอปเปิ้ล การปรับสภาพกากแอปเปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมีและความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอปเปิ้ล คือ Phosphotation Reaction และ Crosslinking-Xanthation Reaction และทำการควบคุมอัตราไหลของน้ำเสีย 3 ปริมาตรเรซินชั่วโมง

จากผลการทดลอง พบว่า กากแอปเปิ้ลสามารถใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ ทองแดง สังกะสีและนิกเกิล กากแอปเปิ้ลที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่ากากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทางเคมี

เรซินที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักมีคุณสมบัติเป็น Cation Exchanger และน้ำเสียไหลผ่าน Column มีความเข้มข้นของโลหะหนักประมาณ 5 มก./ล. ผลการทดลองแสดงใน ตารางที่ 3.13

เมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนหมด สามารถทำการรีเจนเนอเรชั่น เพื่อฟื้นอำนาจให้กับ Apple Residues โดยใช้ HCl เข้มข้น 0.5 N

ตารางที่ 3.13 Cation Exchange Capacities of the Apple Residues (Maranon, 1990)

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

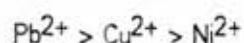
AR : Apple Residues

CLX - AR : Crosslinked Xanthated Apple Residues

P-AR : Phosphatation Apple Residues

Low และ คณะ, 1993 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เส้นใยลูกปาล์ม (Oil-Palm Fibres) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำมันปาล์ม ในการกำจัดทองแดง(Cu²⁺) ซึ่งละลายอยู่ในน้ำเสีย การวิจัยเลือกใช้ Batch Experiments และมีการปรับปรุงคุณภาพในการกำจัดโลหะหนักของเส้นใยลูกปาล์มโดยวิธีการทางเคมีด้วยสีย้อม

จากผลการทดลอง พบว่า เส้นใยลูกปาล์มสามารถใช้ในการกำจัด Cu²⁺ ได้โดยเส้นใยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัด Cu²⁺ ได้ 90% ส่วนการดูดซึม Cu²⁺ ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำเสีย ณ จุดเริ่มต้น และถ้าน้ำเสียที่ใช้ประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิด จากการทดลอง พบว่า สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้



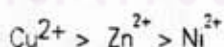
และที่ pH สูงจะกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าที่ pH ต่ำ

Shukla และ Sakhardane, 1993 ได้ทำการวิจัยโดยใช้เยื่อไม้ไผ่ (Bamboo Pulp) เส้นใย ปอกระเจา (Jute Fibre) และซีเลื่อย (Sawdust) มาทำการฟอกขาวและแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ย้อมสีและ ไม่ย้อมสี เพื่อใช้ในการกำจัด Cu^{2+} , Hg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} และ Ni^{2+} ในการ วิจัยนี้เลือกใช้ การทดลองแบบ Batch และ Column Experiments

จากผลการทดลอง พบว่า เยื่อไม้ไผ่ เส้นใยปอกระเจาและซีเลื่อยที่ไม่ได้ย้อมสี สามารถ กำจัดโลหะหนักได้ประมาณ 17-35%, 17-48% และ 17-30% ตามลำดับ สำหรับเยื่อไม้ไผ่ เส้นใย กระเจาและซีเลื่อยที่ย้อมสี สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าคือประมาณ 8-76%, 28-69% และ 34-97% ตามลำดับ และพบว่าสารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าสารแลกเปลี่ยนไอออนที่ไม่ได้ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี

เกษตรสุชา พูลคำ , 1994 ได้ทำการวิจัยโดยใช้ชานอ้อยและผักตบชวา ในการกำจัด Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Zn^{2+} โดยทำการวิจัยแบบ Column Method และ Column ที่ใช้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ซม. ยาว 40 ซม. วัสดุที่ใช้มีขนาด 0.18-0.212 มม. ในการทดลองจะทำการศึกษาถึงอิทธิพลของการ ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีและความเข้มข้นของน้ำเสีย กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพ คือ Carboxymethylation Reaction และ สารเซลล์ูโลสอีกชนิดหนึ่งที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี โดยมีการควบคุมอัตราไหลของน้ำเสีย 3 ปริมาตรเรซินชั่วโมง โดยให้ไหลผ่านชั้นสาร แลกเปลี่ยนไอออนสูง 20 ซม.

จากผลการทดลอง พบว่าเรซินที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมีมีประสิทธิภาพใน การกำจัดโลหะหนักน้อยกว่าเรซินที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพทางเคมีดังตารางที่ 3.14 และสารเซลล์ูโลสมี ลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้



ตารางที่ 3.14 Cation Exchange Capacity of the Bagasse and Water Hyacinth (เกษตรฯ,2537)

Exchanger	CEC (meq/g)		
	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Zn ²⁺
Untreated-B	0.086	0.065	0.069
CM-B	0.069	0.052	0.056
Untreated-W	0.809	0.686	0.705
CM-W	0.496	0.346	0.330

- Untreated-B : Untreated-Bagasse Residues
 CM-B : Carboxymethyl-Bagasse Residues
 Untreated-W : Untreated-Water Hyacinth Residues
 CM-W : Carboxymethyl-Water Hyacinth Residues

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย