

บทที่ 2



บททวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ จากธาตุต่างๆ เท่าที่ค้นพบ 105 ธาตุ

คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลว) สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมัน วาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ และสะท้อนแสงได้ดี

คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า จึงสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-compound) ได้หลายรูปที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี การนำมาใช้ประโยชน์ และความเป็นพิษ ของโลหะหนักหนักเกิด ทองแดง และสังกะสี ที่ทำการศึกษาในการวิจัยนี้ แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี ของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี (Stanley, 1994)

ชนิดโลหะหนัก	เลขอะตอม	น้ำหนักอะตอม	จุดเดือด (°C)	จุดหลอมเหลว (°C)	ค่าความถ่วงจำเพาะ	เลขออกซิเดชัน	สีของไอออน (M ²⁺) ในน้ำ	หมู่ในตารางธาตุ	คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี
นิกเกิล (Nickel)	28	58.70	2732	1453	8.908	+2, +3	สีเขียว	VIII B	สามารถทนต่อการผุกร่อนได้ดี สามารถนำไปผสมกับโลหะอื่น ๆ ได้ เป็นโลหะอัลลอยด์
ทองแดง (Copper)	29	63.54	2595	1083	8.96	+1, +2	สีน้ำเงิน	I B	เป็นโลหะค่อนข้างอ่อน สีน้ำตาลแดง สามารถดัดให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ง่าย สามารถนำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี
สังกะสี (Zinc)	30	65.37	906	419.5	7.14	+1, +2	ไม่มีสี	II B	เป็นโลหะอ่อนสีเงิน แต่จะหมองคล้ำได้ง่าย เมื่อสัมผัสกับอากาศ ทนต่อการผุกร่อนได้ดี

ตารางที่ 2.2 ประโยชน์และความเป็นพิษของนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี (เกษตรสุชา พูลคำ, 2536)

ชนิด โลหะหนัก	การใช้ประโยชน์	ความเป็นพิษ
นิกเกิล (Nickel)	ส่วนใหญ่จะถูกนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะอัลลอยด์ นิกเกิลบริสุทธิ์ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซินในงานชุบโลหะ ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก	เกิดเนื่องจากฝุ่นของนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบในการทำนิกเกิลบริสุทธิ์ เป็นสารที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งในมนุษย์และสัตว์ การแพร่กระจายของนิกเกิลในแหล่งน้ำจะทำให้เกิดอาการผื่นคันที่ผิวหนัง
ทองแดง (Copper)	นำไปทำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และผลิตกังหันไฟฟ้า ใช้เป็นส่วนประกอบของยาปราบศัตรูพืช ใช้ทำเม็ดสีในอุตสาหกรรมเซรามิก ใช้ผสมกับสังกะสีเป็นทองเหลือง ใช้ผสมกับดีบุกเป็นบรอนซ์	ทำให้เกิดโรค Wilson Disease ซึ่งเป็นความผิดปกติเนื่องจากมีระดับทองแดงสะสมในร่างกายมาก ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุร่างกายได้รับทองแดงเข้าไปมากจะเกิดอาการเป็นพิษเฉียบพลัน คือ อาเจียน ท้องร่วง บัสสาวะเป็นเลือด ความดันโลหิตต่ำ และอาจทำให้เสียชีวิต ถ้ามีความเข้มข้นของทองแดงในดินสูง จะเป็นพิษต่อพืช ไปทำลายปลายยอดของต้นไม้ไม่ให้งอกงามต่อไป
สังกะสี (Zinc)	นำมาใช้เคลือบผิวโลหะที่เกิดสนิมง่าย แต่มีความแข็งแรงทนทานมากกว่า สารประกอบสังกะสีใช้ในการทำสีย้อม กาว และเรยอน ใช้ผสมกับทองแดงเป็นทองเหลือง	เป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่ถ้าได้รับในปริมาณมากจะเกิดเป็นพิษต่อร่างกายได้ คือ เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการผูกของเยื่อทางเดินอาหาร ไตไม่ทำงาน โลหิตจาง ซีด และ อาจถึงตายได้

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

น้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก มักเกิดจากการระบายน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมประเภท การชุบโลหะ การผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ การผลิตท่อเหล็ก และการขัดผิวโลหะ เป็นต้น

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางชีวภาพ ในการบำบัดอาจอาศัยกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง หรือหลายกระบวนการรวมกันก็ได้ แต่กระบวนการทางชีวภาพมักไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีมูลค่าต่อการลงทุน

การบำบัดต่างๆ ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก มีดังต่อไปนี้

1) แบบดั้งเดิม (Conventional) ใช้วิธีการตกตะกอน (Precipitation) ด้วยสารเคมี เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยการเปลี่ยนรูปโลหะหนักจากโลหะหนักที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ โดยกระบวนการทางเคมี การกำจัดโลหะหนักจึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกผลึกของแข็งเสียก่อน โลหะบางชนิดมีความเป็นพิษสูงและละลายน้ำได้ดี ต้องทำการรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นพิษแล้วจึงตกตะกอน เช่น Cr^{6+} รีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของ Cr^{3+} แล้วตกตะกอนเป็น $Cr(OH)_3$ ปฏิกริยาการรีดิวซ์ และการตกตะกอนจะเกิดขึ้นหรือไม่ ขึ้นอยู่กับพีเอช ปริมาณและชนิดของสารเคมี ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือ ในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสีย ต้องตกตะกอนโลหะหนักทีละชนิด จึงต้องใช้เวลาาน และต้องนำกากตะกอนไปฝังกลบ นอกจากนี้ยังไม่สามารถที่จะลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียที่มีอยู่ในปริมาณน้อยให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานได้ และประการสำคัญคือ สูญเสียโลหะที่มีค่า และน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งไม่ต้องทำการสร้างตะกอนแข็งในการกำจัดโลหะหนักต่างๆ แต่เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) ที่มีประจุเหมือนกับที่มีอยู่ในสารละลายกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด มีความชอบหรือถูกดูดซับ โดยเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุภาคในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด วิธีการนี้มีข้อดีคือ เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน จะได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบโลหะสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องค่าใช้จ่าย เนื่องจากเรซินสังเคราะห์มีราคาแพงมาก ดังนั้นวิธีการนี้

จึงเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำต่ำ หรือมีความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณของ แคลเซียมคาร์บอเนต ไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลย์ต่อลิตร เช่น น้ำทิ้งจาก โรงงานชุบโลหะ (Alleman และ Kavanagh, 1982 : อ้างถึงใน พุทธิสาร ชัยพันธ์, 2538)

3) การระเหย (Evaporation) เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไป ทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้น หรือกลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้ทำให้เกิดความร้อนมาจาก เชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อน หรือใช้ความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำเสียที่ทำจากบำบัดด้วยวิธีนี้ ต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่ความเข้มข้นโลหะหนักสูง สามารถนำไปใช้งาน ร่วมกับการแลกเปลี่ยนไอออน แต่จะทำให้ต้นทุนการดำเนินการสูง

4) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยใช้ แรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้น้ำ และสารบางตัวผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง น้ำเสียที่จะ นำไปบำบัดด้วยวิธีนี้ต้องผ่านการบำบัดขั้นต้นด้วยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงออก และกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการ บำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า ซึ่งมีอุณหภูมิของกระบวนการสูง

5) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่านกัมมันต์ ในการดูดซับมลสารไว้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับ น้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆ ถูกจับไว้ในช่องรูพรุน ทำให้น้ำทิ้งสะอาด

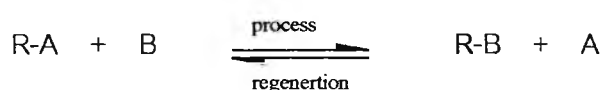
หลักเกณฑ์ในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆ ต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม ดังต่อไปนี้

- ลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งหมด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และการตรวจสอบคุณภาพ
- ความยากง่าย และความปลอดภัย ในการเดินระบบ
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียหรือกากของเสียที่ต้องกำจัด กลับมาใช้ใหม่

2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

2.3.1 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนที่อยู่ในเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับของเหลว ซึ่งไอออนที่อยู่ในเรซินเป็นประจุที่ไม่ติดแน่น สามารถแลกเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ โดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุภาคในโครงสร้างทางกายภาพของเรซินแต่อย่างใด อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิด มีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน และเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วสามารถเปลี่ยนแปลงกลับมาอยู่ในรูปของไอออนเดิมได้ โดยผ่านสารละลายที่มีไอออนเช่นเดียวกับไอออนเริ่มต้นของเรซิน เรียกขั้นตอนนี้ว่า การรีเจนเนอเรต (Regeneration) และสารที่ใช้เรียกว่า รีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) การแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังสมการ



สารที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบที่ได้จากธรรมชาติ และแบบที่สังเคราะห์ขึ้น ในปัจจุบันสารประเภทหลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก แต่ทั้งสองแบบจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้ เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย

2.3.2 การทำงานของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแบ่งการทำงานได้ 3 วิธี คือ

1) การทำงานแบบทีละเท (Batch Operation)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่ง่ายที่สุด น้ำเสียจะถูกกวนผสมกับเรซินในถังปฏิกิริยา จากนั้นทำการแยกเรซินออกโดยการกรองหรือตกตะกอน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ ค่าคงที่สมดุล (Equilibrium Constant) ของระบบแลกเปลี่ยนไอออน

2) การทำงานแบบคอลัมน์ (Column Operation)

วิธีการนี้จะใช้ในการศึกษาขั้นห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และสภาวะที่เหมาะสม ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับความสูงอยู่ในช่วง 1:10 – 1:20

3) การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)

เป็นการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุในถัง และปล่อยน้ำทิ้งไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่อง ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา เมื่อใช้งานไปนานๆ เรซินจะหมดประสิทธิภาพ (Exhausted Resin) ต้องทำการฟื้นฟูประสิทธิภาพโดยใช้สารละลายกรดหรือด่าง ขึ้นอยู่กับ ชนิดของเรซินที่ใช้

2.3.3 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

โครงสร้างของเรซินมีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินจะมีโครงร่างคล้ายตาข่ายสามมิติ โดยมีกลุ่มไอออนที่มีประจุตามตำแหน่งต่างๆ บนตาข่าย เรียกว่า Matrix ส่วนหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้าที่อยู่บนตำแหน่งต่างๆ ของตาข่าย เรียกว่า หมู่ไอออน (Functional Group) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมของเรซิน โครงสร้างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้เรซินมีรูปร่างอย่างที่ปรากฏ และคงรูปร่างอยู่ได้ โดยไม่ละลายน้ำหรือแตกหักง่าย โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก และชนิดเดียวกันต่อกันเป็นสายยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสาน เพื่อให้เกิดเป็นรูปสามมิติที่มีความโปร่งหรือความพรุน

ความโปร่งหรือความพรุนของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ถ้าปริมาณของตัวประสานน้อย โครงสร้างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่นๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นของเรซิน เป็นต้น เรซินจะต้องมีความพรุนเพียงพอที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวก จึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มีระดับการประสานโครงร่างต่ำเกินไป จะมีความพรุนมาก ทำให้อมน้ำได้มาก แต่สลายตัวได้ง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงประสานต่ำ

การบวมหรือการพองน้ำของเรซิน (Swelling) เรซินที่ทำจากสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มีความสามารถดูดน้ำหรือของเหลวรอบตัวมันได้ และทำให้เรซินขยายตัวหรือบวมขึ้น การบวมของเรซินเกิดจากการไฮเดรชัน (Hydration) ของหมู่ไอออนที่ยึดติดกับโครงร่าง และไอออนอิสระ และเกิดจากความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) การไฮเดรชันของไอออนแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ถ้าเรซินบรรจุไอออนที่มีขนาดใหญ่(ขณะไฮเดรชัน) ก็จะทำให้เกิดการบวมตัวสูง เช่นเดียวกับเรซินที่มีอยู่ในสารละลายเจือจางเรซินจะบวมตัว เพื่อพยายามลดความเข้มข้นภายใน เพื่อให้สมดุลกับภายนอก ในทางกลับกันเรซินจะหดตัวเมื่อสารละลายภายนอกมีความเข้มข้นสูงกว่า

เช่น ในขณะที่การทำรีเจนเนอเรชัน แต่การบวมของเรซินจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชนิดของสารละลาย และระดับการประสาน โครงร่างเรซินที่มีระดับการประสาน โครงร่างต่ำๆ จะทำให้ปริมาตรของเรซินเพิ่มขึ้นได้มาก ดังนั้นความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออนที่มีเทียบต่อปริมาตรจึงมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้น ตามการลดหรือเพิ่มของระดับการประสาน โครงร่าง

หมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซินเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถในการฟื้นอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น ถ้าส่วนโครงสร้าง Matrix มี ประจุลบประจำตัว หมู่ไอออนจะมีประจุบวก เรียกว่า Cation Exchanger คือสารแลกเปลี่ยนประจุ บวก ถ้าโครงสร้าง Matrix มีประจุบวกประจำตัว หมู่ไอออนจะมีประจุลบ คือเป็นสารแลกเปลี่ยน ไอออนประจุลบ เรียกว่า Anion Exchanger

เรซินสังเคราะห์โดยกระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ มีโครงสร้างเป็นสารพวก Polystyrene ที่รวมตัวอยู่กับ Divinylbenzene โดยหมู่ไอออนของ สารแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก จะเป็นพวก Sulfonic, Carboxylic หรือ Phosphonic ส่วนเรซินที่ นำไปใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchanger) จะเป็นพวกมีหมู่ไอออนเป็นพวก Quaternary Ammonium, Primary Amine หรือ Secondary Amine

2.3.4 โครงร่างเรซิน

อาจแบ่งตามลักษณะทางฟิสิกส์ได้ 3 ลักษณะ คือ

1) Gel Type มีลักษณะนิ่มคล้ายวุ้นสามารถบรรจุหมู่ไอออนได้มาก แต่รูพรุนเล็ก และถี่มาก (เป็น membrane) ข้อเสียคือ เกิดการอุดตันได้ง่าย โดยเฉพาะถ้าเป็น Strong Anion Exchanger

2) Macroporous Type มีความพรุนมากกว่า คือ มีพื้นที่ผิวมากถึง 100 ตารางเมตร ต่อกกรัม ทำให้ไม่ค่อยอุดตัน โดยจะเป็น Polystyrene Divinylbenzene แขนโครงสร้างมี Divinylbenzene (DVB) 8-12% โดยทั่วไปถ้า %DVB น้อย การพองตัวหดตัวจะมีมาก การวิ่งเข้า วิ่งออกของไอออนผ่านเรซินจะสะดวก แต่ความแข็งแรงก็จะน้อยลง

3) Opaque Gel มีโครงสร้างที่แข็งแรง แต่สามารถบรรจุหมู่ไอออน และยึดหดตัวได้ มากพอสมควร

2.3.5 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

การจำแนกประเภทเรซินตามความเป็นกรดหรือต่าง เรซินแต่ละชนิดสามารถเปรียบเทียบได้กับกรดหรือต่าง ทำให้มีการแบ่งประเภทของเรซินตามความเป็นกรดหรือต่างได้ 4 ชนิด คือ เรซินแบบกรดแก่ (Strong Acid Resin) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak Acid Resin) เรซินแบบด่างแก่ (Strong Basic Resin) และเรซินแบบด่างอ่อน (Weak Basic Resin)

1) เรซินแบบกรดแก่ (Strong Acid Resin)

มีหมู่ซัลโฟนิก (SO_3^-) เป็นหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า โดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นไอออนอิสระ หน้าที่ของเรซินแบบกรดแก่ จะใช้ไอออนบวกของตัวเองแลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดซัลฟูริก หรือกรดไฮโดรคลอริก

เรซินแบบกรดแก่ มีข้อดี คือ

1. เรซินใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. เรซินในรูป H^+ สามารถแยก Na^+ จากเกลือแ่งได้ (Salt Splitting)
3. การร่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เช่น Ca^{2+} เกิดขึ้นน้อย
4. เรซินมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนรวดเร็ว
5. เรซินมีความคงตัว และทนอุณหภูมิได้สูงถึง 100-120 องศาเซลเซียส และอาจใช้ได้ถึง 20 ปี หรือมากกว่า โดยมีการสูญเสียความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย
6. การเปลี่ยนรูปของ Na^+ ในเรซินเป็น H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้น (พองน้ำ) 7 %
7. เหมาะสำหรับใช้ในการกำจัดความกระด้าง หรือใช้ในการทำน้ำบริสุทธิ์

เรซินแบบกรดแก่ มีข้อเสีย คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันต่ำ ประมาณ 25-45% ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชัน
2. เรซินถูกออกซิไดส์ได้ง่าย และทำให้เรซินเกิดการบวมและมีความชื้นสูงขึ้น โดยเฉพาะเรซินที่มีระดับของการประสานโครงร่างต่ำ

2) เรซินแบบกรดอ่อน (Weak Acid Resin)

เรซินแบบกรดอ่อนมีหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^-$) เป็นหมู่ที่มีประจุลบ โดยมี H^+ หรือ Na^+ เป็นไอออนอิสระ เรซินแบบนี้มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก และกรดอะคริลิก เป็นต้น มีหน้าที่ใช้ไอออนบวกของเรซิน (H^+ หรือ Na^+) แลกเปลี่ยนกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ

เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อดี คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงถึง 90% โดยเฉพาะถ้าเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของ H^+ เพราะเรซินมีความชอบ (Affinity) H^+ สูง
2. ซีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ ประมาณ 2 เท่า
3. เรซินทนต่อสารออกซิแดนท์ เช่น คลอรีน ได้ดี
4. เรซินในรูป H^+ สามารถกำจัดความเป็นต่างออกจากน้ำได้โดยไม่ต้องเติมกรด
5. เรซินสามารถใช้รีเจนเนอเรนต์จากการรีเจนเนอเรชันของเรซินแบบกรดแก่ได้
6. มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมรั่วหนีได้มาก

เรซินแบบกรดอ่อน มีข้อเสีย คือ

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

3) เรซินแบบต่างแก่ (Strong Basic Resin)

เรซินแบบต่างแก่มีหมู่ไอออนที่มีประจุชนิด Quaternary Amine และไอออนอิสระ มักเป็น Cl^- หรือ OH^- มีปฏิกิริยาทางเคมีเหมือนต่างแก่ หน้าที่ของเรซินแบบต่างแก่ คือ ใช้ไอออนลบของเรซินแลกเปลี่ยนกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO_3^- , SO_4^{2-} และ Cl^-

เรซินแบบต่างแก็งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. Type 1 มีความเป็นต่าง และความคงทนสูง มีความสามารถในการจับซิลิกาได้ดี
2. Type 2 มีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและประสิทธิภาพการทำรีเจนเนอเรชันสูง

เรซินแบบต่างแก็ง มีข้อดี คือ

1. เรซินใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
2. เรซินมีความสามารถในการแยกเกลือ (Salt Splitting)
3. มีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็ว

เรซินแบบต่างแก็ง มีข้อเสีย คือ

1. เรซินมีประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันต่ำ ทำให้เปลืองสารรีเจนเนอแรนท์
2. มีความคงทนต่ำ ทำให้อายุการใช้งานสั้น
3. ในกรณีที่น้ำเสียมีกรดฮิวมิกจากการเนาเปื้อยของพีช สามารถทำให้เรซินเสียและไม่สามารถทำรีเจนเนอเรชันได้
4. เปลี่ยนเป็นต่างอ่อนได้ง่าย ทำให้สูญเสียขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน

4) เรซินแบบต่างอ่อน (Weak Basic Resin)

เรซินแบบต่างอ่อนมีหมู่ไอออนที่มีประจุเป็น Primary, Secondary หรือ Tertiary Amino และไอออนอิสระมักเป็น Cl^- หรือ OH^- หรือไม่มีก็ได้ การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้จะต่างจากเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากกลไกการทำงานเป็นลักษณะ Adsorption ไม่ใช่การแลกเปลี่ยนประจุ เรซินชนิดนี้จะกำจัดได้เฉพาะกรดแก็ง เช่น HCl , H_2SO_4 หรือ HNO_3 เป็นต้น และไม่สามารถกำจัดกรดอ่อน เช่น CO_2 และ SiO_2 เป็นต้น การกำจัดกรดแก็งเกิดขึ้นจากการที่กรดแก็งทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน โดยทั่วไปเรซินชนิดนี้มักใช้กำจัด Cl^- และ SO_4^{2-}

เรซินแบบต่างอ่อน มีข้อดี คือ

1. ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงเกือบ 100% ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย
2. สารรีเจนเนอแรนต์อาจใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมคาร์บอเนต หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
3. สามารถทนต่อกรดฮิวมิกได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง

เรซินแบบต่างอ่อน มีข้อเสีย คือ

1. ใช้ได้กับน้ำที่มีพีเอชต่ำเท่านั้น
2. มีอัตราในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ

2.3.6 ลำดับความชอบในการเลือกจับไอออนของเรซิน (Selectivity)

เรซินทั้งแบบกรดและด่าง มีความชอบไม่เท่ากันในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยความชอบในการจับไอออนของเรซิน ขึ้นอยู่กับ จำนวนประจุ น้ำหนักโมเลกุล และปริมาณความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับการคุณสมบัติของเรซิน เช่น ขนาดของเรซิน Degree of Crosslinkage ชนิดของหมู่ไอออน และระยะเวลาสัมผัสกับเรซิน

2.3.7 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ต้องมีไอออนอิสระ ที่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนในน้ำ
- ต้องไม่ละลายน้ำ
- ต้องมีช่องว่างในโครงไฮโดรคาร์บอนอย่างพอเพียง เพื่อให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนผ่านเข้าออกได้อย่างสะดวก

2.3.8 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion Exchange Capacity)

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออน หรือ คัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะสมกับงาน สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน หมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแยกมาจากน้ำ หน่วยแสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน อาจมีได้หลายแบบ เช่น

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

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน แบ่งได้ดังนี้

1) ความสามารถทั้งหมด (Total Capacity)

หมายถึง ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนประจุ โดยพิจารณาจากจำนวนทั้งหมดของส่วนที่มีไว้สำหรับแลกเปลี่ยนประจุ ในโครงร่างตาข่ายโมเลกุลของเรซิน โดยการนำเรซินมาพื้นกำลังด้วยสารเคมี เพื่อเปลี่ยนรูปให้อยู่ในไอออนที่มีประจุก่อน แล้วจึงแยกเอาไอออนที่มีประจุออกมาจากเรซิน และนำไปหาปริมาณด้วยการวิเคราะห์ปริมาณทางเคมี เช่น นำเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจนไอออนออกมา โดยใช้สารละลายเกลือแกง เก็บรวบรวมไฮโดรเจนไอออนที่แยกออกมานี้จากทุกส่วนให้หมด แล้วนำไปไตเตรตหาปริมาณไฮโดรเจนไอออนด้วยการใช้สารละลายมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน

2) ความสามารถในการใช้งาน (Operating Capacity)

หมายถึง ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้ประโยชน์จริงๆ และเกิดจริงในการใช้งาน ภายในเงื่อนไขข้อจำกัดต่างๆ ของงานนั้นๆ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับระดับปริมาณสารเคมีที่ใช้พื้นสภาพ องค์ประกอบส่วนผสมของสารละลายที่นำมาใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินนั้น โดยทั่วไปความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ใช้งานของเรซินจะแตกต่างจากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดของเรซิน

2.3.9 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (cellulose Ion Exchanger)

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลส จะเป็นไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์ การยึดเกาะกันของโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่างๆบนโครงร่างตาข่าย ดังนั้นไอออนที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินสังเคราะห์ได้ จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

จากลักษณะโครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซี ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดการทำปฏิกิริยามากที่สุด สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดประมาณ 15-20 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างของเซลลูโลส และองค์ประกอบอื่นๆ แต่จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน การปรับปรุง

ลักษณะโครงสร้างและหมู่ไอออนในเซลลูโลส สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น

Serva Cellulose Ion Exchangers เป็นสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแรกที่เกิดขึ้น และสามารถจำหน่ายได้ แสดงให้เห็นถึงการยอมรับ และความสำเร็จในการนำไปใช้งานของสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน คุณสมบัติที่สำคัญของ Serva Cellulose Ion Exchangers แสดงในตารางที่ 2.3

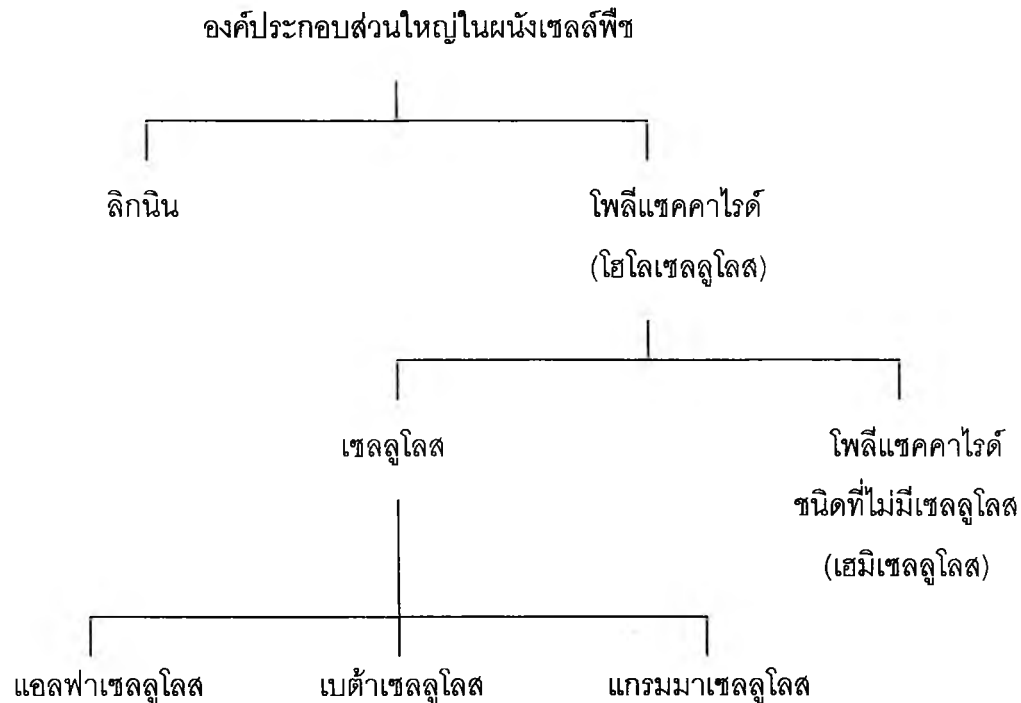
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของ Serva Cellulose Ion Exchangers (Dorfner, 1977)

(CE = Cation Exchanger, AE = Anion Exchanger)

Name	Ion Exchanging Group	Properties	Capacity (meq/g.)	Particle Size (mm.)
CM-Cellulose	$-\text{CO}_2\text{H}_2\text{COOH}$	CE, weak acid	0.62 ± 0.1	50 - 200
P-Cellulose	$-\text{OPO}_3\text{H}_2$	CE, medium acid	0.80 - 0.90	50 - 200
SE-Cellulose	$-\text{CO}_2\text{H}_2\text{SO}_3\text{H}$	CE, strong acid	0.20 - 0.30	50 - 200
DEAD-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	AE, strong base	0.40 - 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 - 0.20	50 - 200
AE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{NH}_2$	AE, weak base	0.33 ± 0.1	50 - 200
BD-Cellulose	$-\text{CO}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	AE, medium base	0.80 ± 0.05	50 - 200
GE-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{NH}^+\text{C}=\text{NH}_2^+\text{Cl}^-$	CE, strong base	0.20 - 0.30	50 - 200
BND-Cellulose	$-\text{OC}_2\text{H}_4\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	CE, medium base	0.80 ± 0.05	50 - 200

2.4 องค์ประกอบในเซลล์พืช

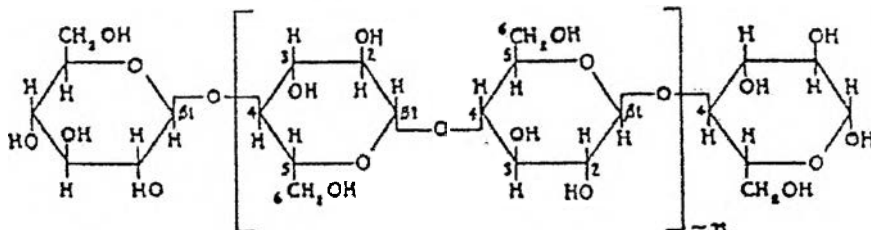
พืชส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโดยปกติปริมาณของสารประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกัน ตามชนิด อายุของพืช และยิ่งขึ้นกับว่าเป็นส่วนประกอบส่วนใดของพืช



รูปที่ 2.1 แสดงการแยกองค์ประกอบในเซลล์พืช

2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบทั้งหมดของพืช โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช เช่น ไม้ จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 50 นอกจากนั้นอาจเกิดอยู่ในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย ซึ่งจัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์



รูปที่ 2.2 แสดงสูตรโครงสร้างของเซลลูโลส

(Roy และ James, 1970 : อ้างถึงใน ลัดดา ยาวิรัตน์, 2544)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ชนิดหนึ่งที่มีมากในผนังของเซลล์พืช ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของดี-กลูโคส (D-glucose) ในรูปแบบตัว-ดี-กลูโคไพราโนส (β -D-glucopyranose) เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 กับ คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ในโมเลกุลถัดไป

สูตรโครงสร้างของเซลลูโลสอาจเขียนแทนด้วยสูตร $[C_6H_{10}O_5]_n$ ซึ่ง n แทนด้วยจำนวนหน่วยของโมเลกุลที่มาต่อเข้าด้วยกัน มีค่าตั้งแต่ 1,000 ถึง 3,000 ดังนั้นเซลลูโลสทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุล 160,000 ถึง 480,000

เซลลูโลสมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ หรือสารละลายต่างอ่อน แต่จะละลายในกรดแก่และด่างแก่ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งชนิดของเซลลูโลสตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่างได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1) แอลฟาเซลลูโลส (α -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5%

2) เบต้าเซลลูโลส (β -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5%

3) แกมมาเซลลูโลส (γ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5% และสารละลายกรดเจือจาง

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentoses) ที่มีลักษณะเป็น Heterogenous โดยประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดรวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลักคือ ไซแลน นอกจากนี้ยังมีกลูแคน (glucane) แมนแนน (mannan) กาแลคแตน เฮมิเซลลูโลส เมื่อถูกย่อยสลายได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตส และเฮกซอส ได้แก่ ไทโลส แมนโนส กาแลคโตส อะราบิโนส และเฮมิเซลลูโลส จะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในด่าง และถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซิล (methoxyl group, $-OCH_3$) หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, $-OH$) และส่วนที่เป็นฟีนอลิก (phenolic) โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาว ซึ่งมีอยู่หลายแบบประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้ คือ

- ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane)
- กัวอีอะซี ยูนิต (Guaiacyl Unit)
- ไสรินเกิล ยูนิต (Syringyl Unit)
- พารา-ไฮดรอกซีฟีนิล ยูนิต (Para-Hydroxyphenyl Unit)

ลักษณะการจับ (Link) ของหน่วยฟีนิลโพรเพน อาจเชื่อมกันที่ตำแหน่งแอลฟา เบต้า หรือแกมมา กับ Side Chain ของหน่วยอื่น หรือที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ของวงแหวนฟีนิล (phenyl ring) ได้ เป็นรูปร่างเส้นตรง วงกลม หรือมีกิ่งก้านสาขาก็ได้

ลิกนินไม่ละลายน้ำ และสารอินทรีย์ชนิดใด จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่รอบๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

2.5 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

2.5.1 ชังข้าวโพด

ข้าวโพดมีชื่อสามัญว่า คอรัน (corn) ส่วนชื่อทางพฤกษศาสตร์เรียกว่า ซีไมส์ (Zea mays) ข้าวโพดเป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้า ข้าวโพดต้นหนึ่งๆ อาจมีฝักได้มากกว่า 1 ฝัก (ear) ข้าวโพดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย โดยมีการผลิตข้าวโพดปีละประมาณ 4,000,000 ตันต่อปี แหล่งเพาะปลูกข้าวโพด ในประเทศไทย จำแนกได้ดังนี้

ภาคเหนือ ได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครสวรรค์ พิษณุโลก

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา ศรีสะเกษ ชัยภูมิ

ภาคตะวันออก ได้แก่ จังหวัดสระแก้ว จันทบุรี

ภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดสระบุรี ลพบุรี

ภาคตะวันตก ได้แก่ จังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี

ข้าวโพด 1 ฝัก ประกอบไปด้วย เมล็ดข้าวโพด และ ชังข้าวโพด โดยจะมีชังข้าวโพด ปริมาณ 1 ใน 3 ของผลผลิตข้าวโพด ชังข้าวโพดประกอบด้วยเซลลูโลสและสารเพนโตซาน (pentosans) ซึ่งเป็นสารประกอบของแป้งและน้ำตาลเป็นส่วนใหญ่

ชังข้าวโพดเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นหลังจากนำเมล็ดข้าวโพดไปใช้ ประโยชน์แล้ว ซึ่งหากสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในอุตสาหกรรม ก็จะมีวัตถุประสงค์ที่เหลือทิ้งจากการ เกษตรที่หาได้ไม่ยากและมีปริมาณมากพอ การนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็น วัสดุผสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา ใช้เป็นวัสดุในการเพาะเห็ด ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิต ยาเกี่ยวกับโรคผิวหนัง ใช้เป็นส่วนประกอบในการทำแป้งฝุ่นโรยตัว ใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์สำหรับ สัตว์ประเภทเคี้ยวเอื้อง เช่น โค กระบือ หมักเป็นอาหารยีสต์หรือใช้ ผสมทำปุ๋ย

การใช้ประโยชน์จากข้าวโพด

1) ใช้เป็นอาหารมนุษย์ ได้แก่ การใช้เมล็ดข้าวโพดเป็นอาหารประจำวัน เช่น การทูป เมล็ดให้แตกแล้วหุงต้มรับประทาน หรือใช้ทำเป็นแป้งข้าวโพดเพื่อใช้ทำเป็นขนนิงโรตี ประชาชน ที่รับประทานข้าวโพดในรูปเมล็ดและแป้ง ได้แก่ ประเทศอินเดีย อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ ปากีสถาน เม็กซิโก สเปน อิตาลี โปรตุเกส อเมริกาใต้ และหลายประเทศในยุโรป

2) ใช้เป็นอาหารสัตว์ เมล็ดข้าวโพดเป็นธัญพืชที่มีคุณค่าอาหารสูงเป็นที่นิยมใช้ในการ อุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์ในหลายประเทศ เช่น อเมริกา ออสเตรเลีย และเดนมาร์ก เป็นต้น สำหรับประเทศที่มีพลเมืองหนาแน่นทำให้ไม่มีพื้นที่ว่างพอที่จะปลูกข้าวโพดเพื่อเอาไปเลี้ยงสัตว์ จึงจำเป็นต้องมีการนำเข้าเมล็ดข้าวโพดจากประเทศอื่น ประเทศเหล่านี้ ได้แก่ ญี่ปุ่น สิงคโปร์ ไต้หวัน และประเทศทางตะวันออกกลาง เป็นต้น สำหรับประเทศที่ปลูกข้าวโพดเองสามารถให้ข้าว โพดเลี้ยงสัตว์ในรูปแบบต่างๆกันคือ เมล็ด ชัง ต้นสด ต้นแก่ และผลพลอยได้อื่นๆจากโรงงาน อุตสาหกรรมข้าวโพด ได้แก่ เปลือกเมล็ด กาก และ รำ เป็นต้น ในประเทศไทยปัจจุบันมีโรงงาน อาหารสัตว์ได้ใช้ข้าวโพดเป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของอาหารสัตว์ ดังนั้นความต้องการข้าวโพด ของโรงงานเหล่านี้จึงมีปริมาณสูงมาก

3) ใช้ในอุตสาหกรรม แป้งข้าวโพดเป็นแป้งที่มีคุณภาพดี และนิยมใช้ใน อุตสาหกรรมการประกอบอาหารในรูปแบบต่างๆ ได้มากมายหลายชนิด สำหรับผลพลอยได้จาก เมล็ดข้าวโพดได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อาหารกระป๋อง อาหารแป้ง อาหารแห้ง น้ำมัน น้ำตาล น้ำเชื่อม แอลกอฮอล์ น้ำส้ม เวชภัณฑ์ น้ำหอม น้ำมันใส่ผม แบตเตอร์ อุปกรณ์กัน ความร้อน เครื่องเคลือบ สารแทนทาลัม สารเคมี สารระเบิด และอุตสาหกรรมกระดาษแผ่นใย อัดแน่น เป็นต้น ส่วนชังใช้ในการทำจุกก๊อก กล้องสุบยา และวัตถุดิบนวนไฟฟ้า

2.5.2 เปลือกถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ Glycine Max (L) Merrill ซึ่งเป็นพืชในตระกูลของ Leguminosae, subfamily papilionoideae ซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วที่รู้จักกันดี โดยเฉพาะเป็นพืชดั้งเดิมของคนในแถบเอเชีย เช่น จีน เกาหลี ญี่ปุ่น ตลอดจนของคนไทยของเรา มีถิ่นกำเนิดกระจายอยู่ตั้งแต่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และหมู่เกาะต่างๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิก จนถึงทวีปออสเตรเลีย โดยได้มีการปลูกและนำมาบริโภคเป็นอาหารพื้นเมืองนานาชนิด

ในประเทศไทยมีการผลิตถั่วเหลืองประมาณ 340,000 – 530,000 ตันต่อปี โดยแหล่งผลิตถั่วเหลืองในปัจจุบันได้กระจายไปทุกภาคของประเทศไทย จากสถิติการเกษตร ปี 2539/2540 พบว่า ภาคเหนือมีพื้นที่ปลูกถั่วเหลืองมากที่สุด คือ 1,618,846 ไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 73.82 รองลงมา ได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคอื่นๆ คิดเป็นร้อยละ 15.3 3.77 และ 7.11 ตามลำดับ

ในเมล็ดถั่วเหลือง มีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ เปลือก ปริมาณ 7 % ใบเลี้ยง 90 % และ ยอดอ่อน 3 % โดยน้ำหนัก มีขนาดน้ำหนักเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 0.1 – 0.2 กรัม สีของเปลือกมี หลายสี เช่น สีเหลืองใช้ในอุตสาหกรรมทำอาหารของคนทั่วไป สีดำใช้ในอุตสาหกรรมโรงงานสกัดน้ำมันพืชสีเขียวและสีน้ำตาลไม่นิยมใช้กันมากนัก จมูกของถั่วเหลืองมักมีสีน้ำตาลบางพันธุ์มี จมูกเป็นสีขาว ใบเลี้ยงซึ่งมีสองใบอยู่ภายใต้เปลือกมักมีสีเขียวและสีเขียว มีลักษณะโครงสร้างและลักษณะทั่วไปเป็นรูปเมล็ดกลมรี ในส่วนของใบเลี้ยงซึ่งเป็นส่วนที่สะสมอาหารต่างๆ และเป็นส่วนที่จะนำมาใช้ประโยชน์จะมีลักษณะเป็นสีเขียวในขณะที่ถัวยังไม่แก่ แต่ก็ไม่นิยมนำมาใช้ กันในประเทศไทย ลักษณะของเปลือกถั่วเหลืองมีหลายสี เช่น สหรัฐอเมริกา จะนิยมปลูกเฉพาะถั่วเหลืองเปลือกเหลือง ในขณะที่ถั่วเหลืองเปลือกดำมีปลูกในประเทศอินเดีย จมูกของถั่วเหลือง (Hilum) มีหลายสี เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีเหลืองเป็นต้นซึ่งเชื่อกันว่าสีของจมูกถั่วเหลืองเป็นปัจจัยหลักที่จะใช้ในการบ่งบอกถึงพันธุ์ เมล็ดถั่วเหลืองจะอยู่ในฝักถั่วเหลืองซึ่งมีสีดำหรือน้ำตาล ในขณะที่แก่เต็มที่ และ 1 ฝักจะบรรจุเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 3 เมล็ด (สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 2527 : อ้างถึงใน บุญญฤทธิ์ ปัญญาภิญาญผล, 2543)

การใช้ประโยชน์จากถั่วเหลือง

1) ส่วนต่างๆของถั่วเหลือง คือ ใบ ลำต้น และเปลือก เมื่อเก็บเกี่ยวและนวดเรียบร้อยแล้ว และไถกลบลงสู่ดินรวมทั้งปมที่ตกค้างในดินจะเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ดีที่สุด ในส่วนของเปลือกถั่วเหลืองนำมากรวมกันใช้เพาะเห็ดเรียกว่า "เห็ดถั่วเหลือง" นำมาทำอาหารรับประทานได้

2) การนำไปผสมอาหารสัตว์ซึ่งจะมีผู้มารับซื้อจากโรงงานในราคา กิโลกรัมละ 3 บาท

3) เมล็ดถั่วเหลืองนำมาใช้เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเมล็ดถั่วเหลืองจะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆมากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์

ตารางที่ 2.4 ส่วนประกอบโดยประมาณของถั่วเหลืองและส่วนของถั่วเหลือง (ปรียาพร ชุนดี และสุมาลี จันทะ, 2540 : อ้างถึงใน บุญยฤทธิ์ ปัญญาภิญญาผล, 2543)

ถั่วเหลืองและส่วนของถั่วเหลือง	โปรตีน(%)	ไขมัน(%)	คาร์โบไฮเดรต(%)	เถ้า(%)
ถั่วเหลืองทั้งเมล็ด	40	21	34	4.9
ใบเลี้ยง	43	23	29	5.0
เปลือกถั่ว	8.8	1	86	4.3
ยอดอ่อน	41	11	43	4.4

2.5.3 ก้านดอกทานตะวัน

ทานตะวันมีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Helianthus Annuus L* อยู่ในตระกูล *compositac* เป็นพืชที่สามารถปลูกได้ทุกปี สามารถทนต่อความแห้งแล้ง ทนต่อแมลงและโรคได้ดี มีช่วงอายุ ประมาณ 100 – 120 วัน ที่ลำต้นทานตะวันจะมีลักษณะเป็นลายยาวและมีขนหยาบๆ สามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่มีแสงแดดมากและในดินหลายชนิด โดยปลูกเป็นพืชที่ 2 หรือพืชปลายนฤดูฝนในพื้นที่ปลูกพืชหลังการปลูกข้าวโพดหรือพืชตระกูลถั่ว ในพื้นที่ที่เป็นดินร่วน หรือดินเหนียว เพราะทานตะวันเป็นพืชที่มีรากลึกจึงช่วยให้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ค่อนข้างแห้งแล้ง นอกจากนี้ยังปลูกได้ดีในดินเกือบทุกสภาพ ยกเว้นดินที่มีสภาพเป็นกรดจัดและมีน้ำท่วมขัง มีปัญหาที่สำคัญคือ ยังเป็นพืชที่ค่อนข้างใหม่สำหรับเกษตรกรทั่วไปและเมล็ดพันธุ์มีราคาค่อนข้างสูงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แต่อย่างไรก็ตามการผลิตทานตะวันยังเป็นสิ่งจำเป็น เพราะทุกปีประเทศไทยต้องนำเข้าเมล็ดและผลิตภัณฑ์จากทานตะวันปีละไม่ต่ำกว่า 700 ล้านบาท ถ้ามีการส่งเสริมการปลูกทานตะวันได้อย่างเพียงพอนอกจากจะทดแทนการนำเข้าแล้วยังสามารถส่งออกไปจำหน่ายต่างประเทศได้อีกด้วย ในประเทศไทยมีแหล่งทานตะวันปริมาณมาก ประมาณ 300,000 ไร่ และมีผลผลิต 45,900 ตันต่อปี แต่ความต้องการผลผลิตเมล็ดทานตะวันของโรงงานสกัดน้ำมันและอุตสาหกรรมอาหารปีละประมาณ 100,000 ตัน แหล่งเพาะปลูกมีดังนี้

ภาคเหนือ ได้แก่ จังหวัดนครสวรรค์ เพชรบูรณ์ อุทัยธานี พะเยา ตาก เชียงราย
เชียงใหม่ แพร่ น่าน

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา ศรีสะเกษ หนองบัวลำภู
ขอนแก่น

ภาคตะวันออก ได้แก่ จังหวัดสระแก้ว จันทบุรี ปราจีนบุรี

ภาคกลาง ได้แก่ จังหวัดสระบุรี ลพบุรี

ภาคตะวันตก ได้แก่ จังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี

ก้านดอกทานตะวันเป็นส่วนของลำต้นของทานตะวัน มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูงถึง 71 % (Sun, 1997) หลังจากต้นแก่และเก็บเมล็ดทานตะวันแล้ว ลำต้นจะแห้งและถูกบดผสมกับดินเป็นปุ๋ยสำหรับการปลูกพืชต่อไป หรือนำไปทำฟืน ในต่างประเทศมีการนำรากทานตะวันไปทำแป้ง เมล็ดทานตะวันสามารถนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันพืชได้ ซึ่งน้ำมันที่ได้จะเป็นน้ำมันที่สามารถย่อยได้ง่ายและไม่สะสมในร่างกาย ส่วนกากที่เหลือจากการสกัดน้ำมันสามารถนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ได้เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง

การใช้ประโยชน์เมล็ดทานตะวัน

1) ใช้บริโภคโดยตรง เช่น ใช้เมล็ดมาคั่วอบเกลือหรือนำเมล็ดที่สมบูรณ์มาแกะเปลือกออกเอาเนื้อไปปรุงแต่งรสชาติ

2) ภาคอุตสาหกรรม น้ำมันทานตะวันสำหรับบริโภค ทำสบู่ อุตสาหกรรมฟอกสี เคลือบผิวผลไม้ในลักษณะขี้ผึ้ง เช่น ทำเทียนไข หรือเครื่องสำอางค์ และนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เนยเทียม น้ำมันสกัด ครีม และนมที่มีไขมัน

3) นำไปทำเลซิทิน (Lecithin) เพื่อใช้ในทางการแพทย์ ในการลดโคเลสเตอรอลในคนไข้ที่มีโคเลสเตอรอลในเส้นเลือดสูง

คุณประโยชน์ของเมล็ดทานตะวัน

- 1) ป้องกันและต่อต้านสารเคมีที่เป็นพิษที่ก่อให้เกิดมะเร็งในปาก
- 2) ป้องกันการเกาะตัวของเกล็ดเลือด
- 3) เพิ่มการไหลเวียนของโลหิตได้ดีขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pawan และ Dara, 1982 ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ทำการศึกษาคือ ชานอ้อย ที่นำไปปรับสภาพด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 8% และ เปลือกไม้ ที่ถูกปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 39% และ 0.2 N กรดซัลฟูริก การศึกษาสภาพที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบตช์ พบว่า ชานอ้อย และเปลือกไม้สามารถกำจัดตะกั่ว โปรท ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าพีเอชน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยชานอ้อยมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเปลือกไม้มีค่าพีเอชลดลง ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนชานอ้อย และเปลือกไม้ เพิ่มมากขึ้น ถึงแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ของโลหะหนักที่ถูกกำจัดจะลดลง จากการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ความสามารถสูงสุดของวัสดุสำหรับโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือมากกว่า 1 meq/g. ของวัสดุ จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้ทดแทน เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียให้มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้

สุมาลี สถิตชัยเจริญ และสุจิน มาลานุสรณ์, 2533 ศึกษาการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวา เปลือกถั่วลิสง และกากมะพร้าว ในรูปกรด และ Xanthate เทียบกับที่ไม่มี การปรับปรุง พบว่า ผักตบชวาในรูป Xanthate บำบัดนิกเกิล กับสังกะสี ได้ดีกว่าในรูปกรด และธรรมชาติ แต่ผักตบชวาในรูปกรด สามารถบำบัดทองแดง กับโครเมียม ได้ดีกว่าในรูป Xanthate และธรรมชาติ ส่วนกากมะพร้าวรูป Xanthate สามารถบำบัดโลหะหนักทุกชนิดได้ถึง 80.0-99.8% โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และเปลือกถั่วลิสงในรูป Xanthate สามารถบำบัดสังกะสี และทองแดง ได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

Nakajima และ Sakaguchi, 1990 ได้ทำการวิจัยศึกษาการกำจัดยูเรเนียมจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล โดยใช้วัสดุ 7 ชนิด คือ เปลือกถั่วลิสง ผักตบชวาในรูปผง เปลือกถั่วลิสงทั้งด้านนอกและด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม และเปลือกองุ่น ไปทำการปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์และกรดซัลฟูริก พบว่าวัสดุที่ผ่านการปรับสภาพมีความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นจากวัสดุที่ไม่ได้ปรับสภาพ

Maranon และ Sastre, 1991 ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอปเปิ้ลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของวัสดุที่ใช้ทดลอง การปรับสภาพของกากแอปเปิ้ลด้วยกระบวนการทางเคมี และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย

สังเคราะห์ ในการศึกษาองค์ประกอบของกากแอปเปิ้ลที่นำมาใช้ในการทดลอง พบว่า ประกอบด้วยเซลลูโลส 20% เฮมิเซลลูโลส 10% ลิกนิน 10% และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แแทนนินเรซิน reducing sugars และ colouring agents เป็นต้น สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพ กากแอปเปิ้ล คือ Phosphation Reaction และ Crosslinking and Xanthation Reaction ซึ่งจากการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงของกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพโดย Phosphation Reaction (P-AR) 1.6 meq/g. ที่ปรับสภาพโดย Crosslinking and Xanthation Reaction (CLX-AR) 1.1 meq/g และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ 0.4 meq/g ส่วนความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของนิกเกิลของ P-AR เท่ากับ 1.1 meq/g, CLX-AR 0.6 meq/g และกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ 0.3 meq/g อิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง พบว่า ขนาด 0.2 – 0.4 mm. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4 – 0.63 mm. ส่วนการศึกษาทางด้านกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอปเปิ้ล พบว่า P-AR สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี กว่า CLX-AR และ กากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ ประมาณ 2 และ 5 – 8 เท่าตามลำดับ อิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

Maranon และ Sastre, 1992 ได้ทำการศึกษากการใช้กากแอปเปิ้ลจากกระบวนการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ กับที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphation reaction ในการทดลองได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ พีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการศึกษากำจัดน้ำเสียโลหะหนักในน้ำทะเล โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเรซินแบบ Cation Resin (Amberlite IR-120) กับ กากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะหนักที่ศึกษา คือ ทองแดง และนิกเกิล ส่วนน้ำทะเลเป็นตัวอย่างจากทะเลคาริเบียน โลหะหนักที่ศึกษา คือ ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และปรอท จากผลการทดลอง พบว่า อิทธิพลของพีเอช มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอปเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 3.5 โดยสามารถกำจัดทองแดง และนิกเกิลได้ 99% โดยควบคุมอัตราการไหล 10 มล./ล. ส่วนกากแอปเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีพีเอชที่เหมาะสม คือ มากกว่า 2.5 โดยสามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99% โดยควบคุมอัตราการไหล 10 มล./นาที ในกรณีนี้ น้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล พีเอชที่เหมาะสม คือ 5 ซึ่งรวมถึงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติม EDTA สำหรับอิทธิพลของอัตราการไหลได้ทำการศึกษาโดยมีการ

แปรค่าอัตราการไหล 3 ค่า คือ 10 20 และ 30 ml./min. จากผลการทดลองพบว่า กากแอมเปิ้ลที่ไม่ได้ปรับสภาพ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99% ที่อัตราการไหล 10 และ 20 มล./นาที่ ส่วนที่อัตราการไหล 30 มล./นาที่ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 58% ส่วนกากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99% ที่อัตราการไหล 10 20 และ 30 มล./นาที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี Phosphation Reaction สามารถรับอัตราการไหลที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง ส่วนการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักเปรียบเทียบกันระหว่างเรซินแบบสังเคราะห์ และกากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพ พบว่า กากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพมีความสามารถในการกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินแบบสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิล แคลเดียม และตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์ สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีกว่ากากแอมเปิ้ลที่ปรับสภาพ

Tan, Ooi และ Lee, 1993 ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมประจุบวก (Cr^{+6}) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ใยเปลือกมะพร้าว และเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ได้ทำการทดลองแบบแบตช์ และแบบคอลัมน์ วัสดุที่นำมาใช้ต้องนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ แล้วทำให้ละเอียด และร่อนคัดขนาด โดยให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.30 – 0.85 มม. จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5 – 1.0 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกวนใน 1.5 M NaOH นำไปล้างด้วย 2 M HNO_3 และตามด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งก่อนที่จะใช้ในการทดลอง จากผลการทดลองอิทธิพลของเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับวัสดุ พบว่า ระยะเวลา 20 นาทีแรก สามารถกำจัดโครเมียมได้ประมาณ 80% จากนั้น ความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้อีกต่อไป สำหรับอิทธิพลของพีเอช พบว่า พีเอชที่เหมาะสมสำหรับใยเปลือกมะพร้าว คือ 1.5–5 และเมล็ดปาล์ม คือ 1.5–3 มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมประมาณ 70% ความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) ของใยเปลือกมะพร้าวเท่ากับ 5 และ 29 มก.Cr /ก. ส่วนเมล็ดปาล์มมีความสามารถในการดูดติดผิว เท่ากับ 5 และ 14 มก.Cr/ก. ที่พีเอช 3.00 และ 2.05 ตามลำดับ อิทธิพลของความสูงของวัสดุ พบว่า ที่อัตราการไหลเดียวกัน ชั้นความสูงที่มากกว่าจะสามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณของวัสดุที่สามารถดูดโครเมียมมากกว่า สารเคมีที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน ได้แก่ 0.05 M NaOH หรือ 0.1 M HNO_3

Omar และคณะ, 1993 ศึกษาการนำ bambara nut และกลบ มาใช้ในการกำจัดไอออนโลหะหนัก ได้แก่ นิกเกิล และทองแดง โดยวัสดุที่นำมาใช้ต้องนำไปตากแห้ง จากนั้นบด และคัดขนาด ให้มีขนาดประมาณ 400 μm . ผลการศึกษา พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ดูดซับไอออน

โลหะหนักได้ดีที่สุด คือ 120 นาที โดยมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับทองแดง เท่ากับ 6.8 มก./100 มล. สำหรับผลของชนิดโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ทองแดงถูกดูดซับได้ดีกว่า นิกเกิล และการดูดซับของวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

เกศสุชา พูลคำ, 2536 ได้ทำการวิจัยโดยการใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก ชานอ้อย และผักตบชวา ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพ ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย การทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพ อยู่ในช่วง 0.686–0.809 meq/g. และผักตบชวาที่ปรับสภาพ (carboxymethyl water hyacinth) อยู่ในช่วง 0.330–0.496 meq/g. ส่วนชานอ้อยที่ไม่ปรับสภาพ 0.065–0.086 meq/g. และชานอ้อยที่ปรับสภาพ (carboxymethyl bagasse) 0.052–0.069 meq/g. นอกจากนี้พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสี ความเข้มข้นของโลหะหนักปริมาณน้อยในน้ำเสีย มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปริมาณมาก และปริมาณ 0.5N HCl สำหรับการรีเจนเนอเรชัน ใช้ประมาณ 3 bed volumes

นันทนา อธิพิรโกวิท, 2537 ทำการศึกษา การกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดซัลโฟเอทีล และครอสลิง-เซนเทตที่ทำจากผักตบชวา ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี การทดลองที่ใช้เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 ซม. น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5 10 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราการไหล 3 Bed volumes/h. ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผักตบชวา และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากการทดลองพบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลโฟเอทีล และ ครอสลิง-เซนเทต อยู่ในช่วง 0.233–0.503 meq/g. และ 0.279–0.595 meq/g. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสี ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียน้อย มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักมาก และสำหรับการรีเจนเนอเรชัน ใช้สารรีเจนเนอเรนต์ เข้มข้น 0.5N ประมาณ 2 bed volumes

ขจรศักดิ์ โกศลมนตรี, 2538 ได้ทำการวิจัยโดยการใช้ผักตบชวาในการนำโลหะหนักที่อยู่ในน้ำล้างชิ้นงานจากกระบวนการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ การทำวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออนด้วยผักตบชวาที่ผ่านการแลกเปลี่ยนนิกเกิลไอออนมาแล้วกับผักตบชวาใหม่ โดยทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 10 และ 100 มก./ล. ขั้นตอนที่สอง แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการ

ทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาด้วยอัตราเร็วในการไหล 3 6 และ 9 bed volumes/h. ของน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 100 และ 250 มก./ล. การทดลองส่วนที่ 2 เปรียบเทียบความสามารถในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่โดยการพ่นอำนาจด้วย HCl 0.25 0.50 และ 0.75 N และอัตราเร็วในการไหลผ่านผักตบชวาของ HCl 3 6 และ 9 bed volumes/h. หลังจากที่ผักตบชวาผ่านน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 100 และ 250 มก./ล. จากการทดลองขั้นแรกพบว่า ถ้าน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลมีความเข้มข้น 10 มก./ล. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลต่ำกว่าครั้งแรก แต่ถ้าน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลมีความเข้มข้น 100 มก./ล. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนิกเกิลในแต่ละครั้งจะไม่แตกต่างกัน จากการทดลองขั้นสอง พบว่า อัตราการไหลผ่านของน้ำเสียไม่มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และประสิทธิภาพในการพ่นอำนาจการแลกเปลี่ยนไอออนมากที่สุด 83% ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.75 N ที่อัตราเร็ว 3 ชั้นเวซินต่อชั่วโมง ที่นิกเกิลความเข้มข้น 100 มก./ล. จากการทดลองกับน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 677 มก./ล. พบว่า สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ 2937.1 มก. ซึ่งมากกว่าผลการทดลองกับน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 445 มก./ล. ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ 2191.5 มก.

พิธี กระสินธุ์ศรี, 2539 ได้ทำการวิจัยการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโน-เซลลูโลสฟอर्मัลดีไฮด์ที่ทำจากผักตบชวา โดยนำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสารละลายฟอर्मัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้น 2 5 10 20 30 และ 37% (V/V) พบว่า การปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวาด้วยฟอर्मัลดีไฮด์ 5% ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนของโลหะหนักโดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยฟอर्मัลดีไฮด์ 5% เท่ากับ 1.0962 0.6932 และ 1.0375 meq/g. สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิลและสังกะสี หลังจากคอลัมน์หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนของโลหะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ 0.5 N HCl ประมาณ 1 bed volume หลังจากการล้างคอลัมน์ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน สามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ใหม่ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าสัมประสิทธิ์สหพันธ์ของ Person สำหรับไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี คือ -0.85 -1.00 และ -0.78 ตามลำดับ จากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้นพบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักลง จะมีผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่าคอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้เป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขวัญเนตร สบายใจ, 2542 ทำการศึกษาการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพ ด้วยสี้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 กับที่ไม่ได้ปรับสภาพ จากการ ทดลองแบบแบตช์ พบว่า การปรับสภาพด้วยสี้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้น 0.002 และ 0.001 % ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยน ไอออนเพิ่มขึ้น และพบว่าผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนทองแดงมากกว่าสังกะสี และนิกเกิล จากการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบสังกะสีพบว่า สามารถกำจัดสังกะสีออก จากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Marshall และคณะ, 1999 ทำการศึกษาการใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรด ซิตริก ในการกำจัดทองแดง โดยนำเปลือกถั่วเหลืองมาสกัดด้วย 0.1 N NaOH จากนั้นทำการปรับ สภาพด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.1-1.2 M พบว่า เปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.6 M และมากกว่า มีความสามารถในการดูดซับ มากกว่า 1.7 มิลลิโมลทองแดงต่อ กรัมของเปลือกถั่วเหลือง ซึ่งสูงกว่าของเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ปรับสภาพ (0.39 มิลลิโมลต่อกรัม) เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกจะเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลให้กับเปลือกถั่วเหลือง ดังนั้นเปลือก ถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีความเหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดทองแดงออกจากน้ำเสีย

Beker และคณะ, 1999 ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน ไอออนที่ทำจาก Hydroxyethyl cellulose ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสีย จากการทดลองแบบแบตช์ และคอลัมน์ พบว่า เรซินมีการบวมตัวเฉลี่ย ร้อยละ 75.94 และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน เท่ากับ 2.57 meq/g ของเรซินแลกเปลี่ยน ไอออน ดังนั้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ในการกำจัดโลหะหนักใน น้ำเสียได้ และจากการศึกษาแบบคอลัมน์พบว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดนี้ มีข้อดีคือ มี ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสูง และ เป็นสารเคมีที่คงสภาพดี

Yin และคณะ, 2001 ศึกษาการใช้สาหร่ายทะเล (*Laminaria Japonica*) กำจัด แคลเซียม โดยนำสาหร่าย ที่มีขนาดระหว่าง 300 ถึง 600 μm . มาปรับสภาพด้วยแคลเซียม จาก การทดลองแบบแบตช์ เกี่ยวกับผลของระยะเวลาสัมผัสด พบว่า 90% ของการดูดซับเกิดขึ้นใน 20 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูด ซับ พบว่า ความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1.3 mmol/g.(น้ำหนักแห้ง) ที่พีเอชของน้ำเสีย เท่ากับ 6 และผลของการปรับสภาพด้วยแคลเซียม พบว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น และช่วยให้ตกตะกอนได้ง่ายขึ้น การทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับการ

ทดลองแบบเบดท์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสาหร่ายทะเล (*Laminaria Japonica*) สามารถใช้กำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

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

เพชรพร เขวกิจเจริญ และ คณะ, 2545 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง และขาน้อย ที่มีขนาด 20-40 เมช และเล็กกว่า 80 เมช และสามารถแบ่งการปรับสภาพวัสดุได้ 3 ชนิด คือ ชนิดไม่ปรับสภาพ ชนิดปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และชนิดปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากเปลือกถั่วเหลือง ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลสูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากก้านดอกทานตะวัน และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่มีขนาดเล็กกว่า 80 เมช มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากกว่า ที่มีขนาด 20-40 เมช และผลของการปรับสภาพวัสดุ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากที่สุด