

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไปโดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไลน์ (alkaline) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมในช่วง 23 ถึง 92 และอยู่ในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ โลหะหนักจึงมีทั้งหมด 68 ธาตุจากจำนวนธาตุที่เป็นโลหะทั้งหมด 83 ธาตุ ซึ่งจะอยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน (transition) เช่น โครเมียม แมงกานีส เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล แคดเมียม และปรอท เป็นต้น และในกลุ่มของธาตุเรพรีเซนต์ (representative element) เช่น ตะกั่ว อาร์เซนิก ซิลิเนียมและพลวง เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ มีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ สามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) ได้หลายรูปแบบที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะเมื่อรวมกับสารอินทรีย์ เนื่องจากโลหะหนักมีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นเมื่อโลหะหนักเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมโดยการปนเปื้อนในดิน น้ำ และอากาศ จะเกิดการสะสมและถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้ในที่สุดโดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ซึ่งโลหะหนักและสารประกอบของโลหะหนักเกือบทุกชนิดเป็นพิษ จึงเป็นอันตรายต่อร่างกายโดยอาจทำให้เจ็บป่วย พิการหรือตายได้ ถ้าได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากเกินไป

โลหะหนักที่ทำการศึกษาประกอบกรวิจัยนี้ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และตะกั่ว ซึ่งโลหะหนักแต่ละชนิดมีแหล่งกำเนิด การนำมาใช้ประโยชน์ การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมและความเป็นพิษ ดังนี้ (พรพิมล ห่อสุวรรณชัย, 2542)

##### 2.1.1 แคดเมียม

แคดเมียม (Cd) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน โดยมีเลขอะตอม 48 มวลอะตอม 112.40 มีจุดหลอมเหลวที่ 321 องศาเซลเซียสและจุดเดือดที่ 765 องศาเซลเซียส

มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 2+ แคดเมียมเป็นโลหะอ่อน สีเงิน ตัดง่ายและตีแผ่ได้ ละลายได้ในกรด โดยเฉพาะกรดไนตริกและละลายได้มากในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท

1) แหล่งกำเนิด ในธรรมชาติจะพบแคดเมียมในปริมาณที่น้อยประมาณ 0.1 ถึง 0.2 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เมื่อเทียบกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ โดยจะพบอยู่ในรูปสินแร่ greenockite (CdS) และปะปนอยู่กับสินแร่อื่นๆ เช่น พรอท ทองแดง สังกะสีและตะกั่ว ซึ่งจะพบอยู่ในรูปสินแร่ สังกะสีประมาณร้อยละ 0.3 ถึง 1.0 และอาจมากถึงร้อยละ 3 เช่น ปะปนอยู่กับสินแร่ sphalerite (ZnS) หรือ calamine ( $ZnCO_3$ ) ในหินอัคนีและหินแปรมีแคดเมียมไม่เกิน 1 ส่วนในล้านส่วน ส่วน หินตะกอนมีแคดเมียมอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 ส่วนในล้านส่วน ดังนั้นแคดเมียมที่อยู่ในดินชนิดต่างๆ จึง มีปริมาณแคดเมียมที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดของดินนั้นสลายมาจากหินชนิดใด เช่น ดินที่สลายจาก หินอัคนีจะมีแคดเมียมประมาณ 0.1 ถึง 0.3 ส่วนในล้านส่วน ดินที่สลายจากหินแปรมีแคดเมียม ประมาณ 0.1 ถึง 1 ส่วนในล้านส่วน และดินที่สลายจากหินตะกอนมีแคดเมียมประมาณ 0.3 ถึง 11 ส่วนในล้านส่วน ในแหล่งน้ำธรรมชาติมีแคดเมียมในช่วง 0.5 ถึง 14.6 ส่วนในล้านส่วน ในบุนทรีย์ก็มี แคดเมียมอยู่เช่นกัน ซึ่งประมาณว่าบุนทรีย์ 1 มวนจะให้แคดเมียม 1.3 ไมโครกรัม โดยส่วนใหญ่จะ ปะปนอยู่กับควนบุนทรีย์และบางส่วนจะเข้าสู่ร่างกายของผู้สูบบุนทรีย์นั้น

2) การนำมาใช้ประโยชน์ แคดเมียมถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรโดยเป็น องค์ประกอบหนึ่งของสารกำจัดวัชพืช สารกำจัดราและเป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต ทางด้านอุตสาหกรรม แคดเมียมถูกใช้ในอุตสาหกรรมทำสีทาบ้าน สีชุบโลหะเพื่อป้องกันการ กัดกร่อน ทำหน้าที่เป็น stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก นำมาทำเป็นโลหะผสมกับอลูมิเนียม พรอท แมกนีเซียม นิกเกิล แพททินัม เป็นต้น ซึ่งจะนำไปทำท่ออ เครื่องป้องกันไฟ เข้าหลอม ส่วนประกอบของรถยนต์ แบตเตอรี่ โลหะบัดกรี ลวดโทรศัพท์ นอกจากนี้แคดเมียมยังถูกใช้ในการ ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยโลหะที่ถูกชุบแล้วจะนำไปใช้ทำน็อต ตะปู แหนบ เป็นต้น

3) การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม แคดเมียมสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมทั้งจาก ธรรมชาติได้แก่ การระเบิดของภูเขาไฟ หายน้ำฟ้าและการพังทลายหรือสึกกร่อนของเปลือกโลก หรือหินต้นกำเนิด จากการเกษตรโดยการใช้สารปราบศัตรูพืช โดยดินในการเกษตรนั้นพบว่ามี แคดเมียมเฉลี่ย 0.88 ส่วนในล้านส่วน แต่ส่วนใหญ่แคดเมียมมาจากการใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น การทำเหมืองสังกะสี เนื่องจากแคดเมียมมักปะปนอยู่กับสินแร่สังกะสี ดังนั้นบริเวณใกล้ๆ กับ เหมืองสังกะสีจึงมีแคดเมียมในดินมาก โดยอยู่ในช่วง 1 ถึง 25 ส่วนในล้านส่วน นอกจากนี้ อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง แบตเตอรี่ โลหะผสมและการชุบโลหะได้ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของ แคดเมียมสู่บรรยากาศ ดินและแหล่งน้ำเช่นเดียวกัน สำหรับกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การสูบบุนทรีย์ทำ

ให้แคดเมียมแพร่กระจายออกสู่บรรยากาศและตัวผู้สูบเอง การกำจัดขยะอย่างไม่ถูกสุขลักษณะ ซึ่งส่วนใหญ่วัสดุอุปกรณ์เกือบทุกชนิดมีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบอยู่ บริเวณที่กำจัดขยะจึงมีแคดเมียมสลายตัวออกจากวัสดุต่างๆ และแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ในที่สุด

4) **ความเป็นพิษ** แคดเมียมก่อให้เกิดอันตรายต่อสัตว์ได้มาก แต่สำหรับพืชที่สะสมแคดเมียมมักไม่แสดงอาการเป็นพิษ โดยรบกวนการทำงานของเอนไซม์และโปรตีนที่มีโลหะประกอบ (metallo-protine, metallo-enzyme) และฟอสโฟไลปิด (phospholipid) เช่น สามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ carboxypeptidase ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของเพปไทด์ (peptide) ความเป็นพิษของแคดเมียมในมนุษย์จะมีผลทั้งเฉียบพลันและเรื้อรังโดยเข้าสู่ร่างกายโดยทางระบบทางเดินหายใจและระบบทางเดินอาหาร ใน 1 วันแคดเมียมจะถูกเก็บสะสมในร่างกายประมาณ 10 ถึง 30 ไมโครกรัม และจะสะสมในร่างกายในปริมาณที่มากตามอายุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีการประมาณว่าคนทั่วไปที่มีอายุ 50 ปีมีแคดเมียมสะสมในร่างกาย 10 มิลลิกรัม ถึง 60 มิลลิกรัม ขึ้นกับโอกาสที่คนนั้นจะได้รับแคดเมียมจากแหล่งต่างๆ ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมจะทำให้เกิดอาการปวดหัวและปวดท้องอย่างแรง เสมหะมาก เจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก อาเจียน อาจทำให้ช็อค หมดสติและตายได้ภายใน 24 ชั่วโมงหรือภายใน 1 ถึง 2 สัปดาห์ สำหรับความเป็นพิษเรื้อรังเนื่องจากได้รับแคดเมียมติดต่อกันเป็นเวลานานจะก่อให้เกิดผลเสียต่อการสร้างกระดูกโดยจะไปลดการสะสมของแคลเซียม ทำให้กระดูกผุกร่อน เสียวรูปและทำให้เจ็บปวดมาก เรียกอาการลักษณะนี้ว่า โรคิไต-อิไต (Itai-Itai) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง ไตทำงานผิดปกติ ปอด ตับ ตับอ่อน ระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาทส่วนกลางและเส้นประสาทถูกทำลาย

### 2.1.2 ตะกั่ว

ตะกั่ว (Pb) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มธาตุเรฟริเซนเตดิว โดยมีเลขอะตอม 82 มวลอะตอม 207.19 มีจุดหลอมเหลวที่ 324.4 องศาเซลเซียส จุดเดือดที่ 1,740 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันคือ 2+ และ 4+ แต่ส่วนใหญ่จะมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ 2+ ตะกั่วเป็นโลหะที่อ่อน สามารถทุบ รีด หลอมได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ทนต่อกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไนตริกและละลายได้บ้างในสารประกอบอะซิเตท

1) แหล่งกำเนิด ตะกั่วเป็นธาตุที่มีการกระจายทั่วไปในธรรมชาติ ที่เปลือกโลกมีตะกั่วโดยเฉลี่ยประมาณ 10 ถึง 15 ส่วนในล้านส่วน แต่ปรากฏเป็นธาตุอิสระน้อยมาก ตะกั่วที่พบในเปลือกโลกจึงอยู่ในรูปสารประกอบเป็นสินแร่ต่างๆ เช่น galena (PbS), cerussite (PbCO<sub>3</sub>),

anglesite ( $\text{PbSO}_4$ ), minium ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ), wulfenite ( $\text{PbMnO}_4$ ) และ crocite ( $\text{PbCrO}_4$ ) เป็นต้น หรือพบ ตะกั่วรวมอยู่กับโลหะอื่นๆ เช่น ทองแดง สังกะสี เงินและแคดเมียม ตะกั่วในธรรมชาติมี แหล่งกำเนิดมาจากหินประเภทต่างๆ เช่น หินอัคนี หินชั้นและหินแปร เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบ ตะกั่วในดิน พืช น้ำ อากาศโดยในดินมีปริมาณตะกั่วตั้งแต่ 1.5 ถึง 189 ส่วนในล้านส่วน โดย ค่าเฉลี่ยสูงสุดไม่เกิน 70 ส่วนในล้านส่วน และค่าเฉลี่ยของตะกั่วในดินชนิดต่างๆ มีค่าระหว่าง 22 ถึง 29 ส่วนในล้านส่วน สำหรับในพืชมีปริมาณตะกั่วประมาณ 0.5 ถึง 3 ส่วนในล้านส่วน ในน้ำ ประมาณ 13.1 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) ในอากาศประมาณ 36 ส่วนในพันล้านส่วน

2) การนำมาใช้ประโยชน์ ตะกั่วถูกนำมาใช้ประโยชน์ใน 2 รูปแบบ คือ ในรูปของ โลหะโดยใช้ทำขั้วไฟฟ้าในแบตเตอรี่ ทำสายเคเบิลและในรูปสารประกอบทางเคมี เช่น สารผสม เพื่อเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน ทำเม็ดสี ทำพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ตะกั่วยังถูกนำมาใช้ใน ปุ๋ยและสารเคมีที่ใช้ในการเพิ่มผลผลิตและปราบศัตรูพืชและนำมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม ทั่วไป เช่น ทำโลหะผสมทองเหลือง ทองบรอนด์ ฟิวส์ ลูกปืน หมึกพิมพ์ เครื่องเคลือบ สีทาบ้าน เป็นต้น

3) การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม ตะกั่วสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้จาก ธรรมชาติโดยการพังทลายของเปลือกโลกและการเกิดภูเขาไฟ และจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงรถยนต์ทำให้เกิดไอที่มีสารประกอบตะกั่วสู่บรรยากาศแล้วเกิดการสะสม ในดินและน้ำ การทิ้งกากตะกอนของน้ำเสีย มูลสัตว์ การใช้ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช แบตเตอรี่ที่ เสื่อมสภาพและขยะมูลฝอยลงสู่ดินทำให้เกิดการแพร่กระจายของตะกั่วลงสู่ดินและแหล่งน้ำ นอกจากนี้การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การทำเหมืองและการถลุงแร่ การทำแบตเตอรี่ทำให้เกิดฝุ่น ควันและน้ำเสียที่มีตะกั่วปะปนอยู่ สิ่งเหล่านี้เมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมย่อมทำให้เกิด การปนเปื้อนและสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีทำการเกษตรในเมืองและ ชุมชนที่มีการจราจรหนาแน่นและบริเวณใกล้เคียง โรงงานอุตสาหกรรม

4) ความเป็นพิษ ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางอากาศและการรับประทาน อาหารและน้ำ ซึ่งเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ในอวัยวะต่างๆ เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม และที่ มากที่สุดคือที่กระดูก ซึ่งจะอยู่ในร่างกายได้ยาวนานถึง 16 ถึง 27 ปีและจะก่อให้เกิดพิษแก่ระบบ ต่างๆ ในร่างกาย เช่น ระบบเลือด ทำให้เม็ดเลือดน้อย เม็ดเลือดแดงผิดปกติและแตกง่าย เลือดอาจ เกิดอาการอ่อนเพลียและเป็นลมง่าย ระบบประสาท โดยตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาท ทำให้เนื้อ สมองบวมและทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ประสาท เกิดอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ชัก เดินเซ นอน ไม่ค่อยหลับ อารมณ์แปรปรวน เชื่องซึม ความจำเสื่อม ระบบไตทำให้เกิดภาวะไตวายและไตพิการ

ผลต่อระบบสืบพันธุ์ คือ ทำให้อสุจิของเพศชายและไข่ของเพศหญิงผิดปกติ เป็นหมัน เป็นต้น การที่ตะกั่วทำให้เกิดความเป็นพิษได้เนื่องจากตะกั่วสามารถป้องกันการเกิดฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ของร่างกายโดยไปขัดขวางการสังเคราะห์สารที่เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตฮีโมโกลบินเรียกว่า prophyrin และยังสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์บางชนิดที่มีหมู่ -SH อยู่ด้วย เช่น โคเอนไซม์ เอ

### 2.1.3 นิกเกิล

นิกเกิล (Ni) เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มของธาตุทรานซิชัน โดยมีเลขอะตอม 28 มวลอะตอม 58.71 มีจุดหลอมเหลวที่ 1,455 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่ 2,840 องศาเซลเซียส มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า คือ 0, 1+, 2+, 3+ และ 4+ แต่โดยส่วนใหญ่จะมีเลขออกซิเดชัน 2+ นิกเกิลเป็นโลหะสีชาวล้ำเงิน มีความอ่อนสามารถตัดหรืองอได้ เป็นสารพาราแมกเนติก (ferromagnetic) ทนต่อการกัดกร่อนของด่างได้ดี แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดเจือจาง เช่น กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ละลายได้เร็วในกรดไนตริก

1) แหล่งกำเนิด นิกเกิลมีอยู่ทั่วไปในเปลือกโลกในสภาพสินแร่ pentlandite และ pyrrhotite ซึ่งอยู่ในรูปซัลไฟด์ของเหล็กและนิกเกิล ((Ni, Fe)<sub>x</sub>S<sub>y</sub>) สินแร่ gamierite ((Ni, Mg)SiO<sub>3</sub>.nH<sub>2</sub>O) หรือสินแร่อื่นๆ เช่น niccolite (NiAs) millerite (NiS) และ breithauptite (NiSb) เป็นต้น นอกจากนี้ นิกเกิลยังเป็นธาตุที่ปรากฏอยู่เป็นปริมาณน้อยคือ 0.1 ถึง 6 ส่วนในล้านส่วน ในแหล่งน้ำธรรมชาติ น้ำทะเล พืช สัตว์ ปีโตรเลียมและถ่านหิน

2) การนำมาใช้ประโยชน์ นิกเกิลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย โดยนิกเกิลบริสุทธิ์ใช้เป็นขั้ว anode ในตัวต้านทานของวิทยุและหลอดอิเล็กทรอนิกส์ และเนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะสีชาวล้ำเงินและทนการกัดกร่อนได้ดี นิกเกิลจึงถูกนำมาใช้ในการชุบและเคลือบโลหะ เพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะที่ถูกชุบนั้นให้อยู่ได้นานและแลดูสวยงามยิ่งขึ้น ในด้านอื่นๆ นิกเกิลถูกนำมาใช้ในการทำแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิล-แคดเมียม หัวเทียน แผงวงจรไฟฟ้า เซรามิก เครื่องสำอาง สีทาบ้าน นอกจากนี้นิกเกิลยังถูกนำมาทำโลหะผสม เช่น นิกเกิลผสมโครเมียม ใช้ทำเครื่องยนต์หนัก ยานพาหนะ เครื่องยนต์ของเครื่องบิน ไอพ่น นิกเกิลผสมอลูมิเนียม ใช้เป็นตัวคะตะไลต์ในการทำให้เกิดไฮโดรเจนชั้นของน้ำมัน นิกเกิลผสมทองแดงใช้ทำเหรียญกษาปณ์ นิกเกิลผสมโครเมียมและเหล็กใช้ทำโลหะสแตนเลส เป็นต้น

3) การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม การแพร่กระจายของนิกเกิลเข้าสู่สิ่งแวดล้อมไม่ว่าในดิน น้ำ หรือ อากาศ โดยส่วนใหญ่เกิดจากการใช้นิกเกิลในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมชุบโลหะ แบตเตอรี่ โลหะผสมและการถลุงนิกเกิล จากการกระทำของมนุษย์ เช่น การสูบบุหรี่ การนำขยะซึ่งเป็นเครื่องใช้ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ไม่ใช่แล้วและผลิตจากวัสดุคืบที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบไปกำจัดโดยการฝังกลบไว้ในดิน การทำเหมืองแร่และจากธรรมชาติ เช่น การกัดเซาะพังทลายของดินในธรรมชาติและการสลายตัวของสินแร่ กิจกรรมต่างๆ เหล่านี้ได้ทำให้เกิดฝุ่น ก๊าซและน้ำเสียที่มีนิกเกิลปะปนอยู่ ซึ่งจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อมเกิดการปนเปื้อนและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตต่อไป

4) ความเป็นพิษ นิกเกิลเป็นสารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อมนุษย์ สัตว์และพืช โดยจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ แต่เป็นสารที่อันตรายไม่รุนแรงมากนักในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้ในปริมาณที่ต่ำ สำหรับมนุษย์นิกเกิลสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งทางผิวหนัง การหายใจและการรับประทาน ซึ่งอาจแสดงพิษอย่างเฉียบพลันโดยมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้และเจ็บหน้าอกเกิดขึ้นภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง หลังจากนั้น 12 ถึง 33 ชั่วโมงหรือมากกว่า 5 วันจะมีอาการโรคเกี่ยวกับปอดอย่างร้ายแรง หัวใจเต้นแรง อ่อนเพลียและตายภายใน 4 ถึง 13 วันหรืออาจเกิดการสะสมในร่างกายเป็นเวลานานจนถึงระดับหนึ่งค่อยแสดงพิษออกมาโดยมีผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจ การทำงานของปอด สมออง ดับ ไคและม้าม สารประกอบของนิกเกิลที่เป็นพิษต่อมนุษย์มากที่สุดคือ นิกเกิลคาร์บอนิก ( $\text{NiCO}_3$ ) ซึ่งเป็นของเหลวไม่มีสีกลายเป็นไอง่าย ใช้ประโยชน์ในการทำปิโตรเลียมให้บริสุทธิ์ ความเข้มข้นที่อนุญาตให้หายใจในอากาศคือ 1 ส่วนในล้านส่วน

#### 2.1.4 โครเมียม

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุในหมู่ธาตุทรานซิชัน มีเลขอะตอม 24 น้ำหนักอะตอม 51.996 จุดหลอมเหลว 1,900 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,642 องศาเซลเซียส เป็นธาตุที่มีสมบัติอิเล็กโทรโพสิทีฟน้อย ทำให้บริสุทธิ์ยาก และหากไม่บริสุทธิ์จะเปราะ มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ที่สำคัญได้แก่ 2+ 3+ และ 6+ ซึ่งสามารถเกิดสารประกอบต่างๆ ที่มีสีได้ เช่น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  มีสีเขียว  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$  มีสีม่วง  $\text{CrF}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{CrF}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ที่มีสีเขียว เป็นต้น จึงเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของเมทัล โลหะโครเมียมสามารถทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ เช่น กรดไนตริก กรดฟอสฟอริก กรดคลอริก และกรดเปอร์คลอริก ทำให้เกิดออกไซด์ชั้นบางๆ เคลือบที่ผิว และส่งผลให้โลหะที่อยู่ข้างในไม่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือทำปฏิกิริยากับกรดอ่อนทั่วไปได้ ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า โครเมียมออกไซด์เหล่านี้ สามารถต้านการผุกร่อนโลหะชนิดอื่นได้เป็นอย่างดี (ศิริพร เผ่าพงษ์จันทร์, 2544)

1) แหล่งกำเนิด โครเมียมส่วนใหญ่จะพบในรูปของแร่โครไมต์ ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ )

2) การนำมาใช้ประโยชน์ โครเมียมเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับโลหะผสมระหว่างโครเมียม เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ ไทเทเนียม และโลหะผสมธรรมดา เพื่อป้องกันการเกิดสนิม เพื่อความสวยงาม ทนทาน และคงทนต่อการผุกร่อน โลหะโครเมียม ใช้ในการชุบโครเมียมด้วยไฟฟ้า เช่น ชุบชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า สารประกอบโครเมียมชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในการพาณิชย์มี 2 วาเลนซ์ คือ ชนิดวาเลนซ์ 3+ (โครมิกออกไซด์และโครมิกซัลเฟต) ใช้ในโลหะผสมและอุตสาหกรรมฟอกหนัง ชนิดวาเลนซ์ 6+ ใช้ในการผลิตเม็ดสี สารประกอบโครเมตของสารตะกั่ว สังกะสี และแบเรียม เรียกว่า “chrome pigment” ใช้ในการทำสีต่างๆ ใช้ทำพรมน้ำมัน ใช้ทำยาง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผาและอุตสาหกรรมสี เป็นต้น (เอกชัย ประสาทมงคล, 2546)

3) การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม จากการที่มีการนำโครเมียมมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ ทำให้โครเมียมมีการปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม การปนเปื้อนของโครเมียมที่เกิดจากอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการระบายน้ำทิ้งของโรงงานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่ได้ผ่านการบำบัดที่ถูกต้อง ก่อให้เกิดปัญหาสภาพแหล่งน้ำเสื่อมโทรม โรงงานที่มักปล่อยสารมลพิษลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติในปัจจุบันได้แก่ โรงงานประเภทชุบโลหะ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาดเล็ก และมักไม่มีการบำบัดน้ำเสียหรือการกำจัดโลหะหนักก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

4) ความเป็นพิษ สารประกอบโครเมียมที่มีวาเลนซ์ 3+ มีอันตรายและความเป็นพิษน้อยกว่าสารประกอบโครเมียมที่มีวาเลนซ์ 6+ สารประกอบที่มีวาเลนซ์ 6+ เป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคือง และมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางเดินหายใจ ผิวหนัง และทางเดินอาหาร สารโครเมตเป็นทั้งสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (mutation) และสารก่อมะเร็ง (carcinogen) พิษของโครเมียมจะทำอันตรายต่อคนได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับอนุมูลของโครเมียม กล่าวคือ  $Cr^{6+}$  ที่ร่างกายได้รับเข้าไป แม้จะมีในปริมาณเล็กน้อยก็สามารถทำให้โปรตีนในร่างกายตกตะกอน และเกิดการระคายเคืองที่ใด อันเป็นเหตุให้ไตอักเสบจนถึงแก่ความตายได้  $Cr^{6+}$  ที่ซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง จะถูกรีดักชันเป็น  $Cr^{3+}$  ซึ่ง  $Cr^{3+}$  จะทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกาย เกิดเป็นสารแอนติเจนและแอนติบอดีเชิงซ้อน (antigen-antibody complex) ทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง

## 2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมักอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยอาจใช้วิธีการทางเคมี ได้แก่ การตกตะกอนผลึกทางเคมี การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี วิธีการทางกายภาพเคมี ได้แก่ การดูดซับด้วยถ่าน การแลกเปลี่ยนประจุ ออสโมซิสผกกลับ และการแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง และการใช้วิธีทางธรรมชาติ ซึ่งเป็นทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาประกอบกัน การบำบัดโลหะหนักด้วยวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2539)

### 1) การตกตะกอนผลึกทางเคมี (chemical precipitation)

เป็นการเปลี่ยนสภาพไอออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในสภาพที่ไม่ละลาย โดยการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เพอริกคลอไรด์ เพอริกซัลเฟต เป็นต้น ซึ่งเมื่อผสมเข้ากันดีแล้วจะเกิดการจับตัวกันระหว่างสารเคมีกับสารละลาย ทำให้สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ เช่น ตะกอน  $AsCl_2$ ,  $Cd(OH)_2$ ,  $Ni(OH)_2$ ,  $Pb(OH)_2$  เป็นต้น การเกิดการตกตะกอนผลึกให้ได้ผลดีต้องพิจารณาค่าพีเอชหลังจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว โดยทั่วไปต้องมีค่าพีเอชสูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี

### 2) การเกิดออกซิเดชัน-รีดักชันทางเคมี (chemical oxidation-reduction)

เป็นการเปลี่ยนสภาพของสารประกอบของโลหะหนักที่มีพิษ ไปเป็นสารประกอบของโลหะหนักที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนได้ โดยการเติมสารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเกี่ยวกับการสูญเสียอิเล็กตรอน และปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเกี่ยวกับการเพิ่มอิเล็กตรอน สารเคมีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศหรือออกซิเจน โอโซน โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) คลอรีนหรือไฮโปคลอไรต์ คลอรีนไดออกไซด์ ( $ClO_2$ ) โลหะหนักที่สามารถบำบัดได้โดยวิธีการนี้ เช่น สังกะสี เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ เพอร์ซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โซเดียมเมตาไบซัลเฟต โซเดียมไบซัลเฟต โลหะหนักที่สามารถบำบัดโดยวิธีนี้ เช่น โครเมียม ทองแดง พรอทเงิน เป็นต้น

### 3) การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption)

เป็นการบำบัดโลหะหนักที่ละลายปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยใช้หลักการดูดซับด้วยถ่าน (carbon) ถ่านที่ใช้มี 2 ลักษณะ คือ แบบเป็นเม็ด และแบบเป็นผง ซึ่งนิยมเรียกรวมกันว่า activated carbon ทำมาจากเมล็ดของ almond, walnut hulls ไม้อื่นๆ หรือถ่านทั่วไป โดยถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงมาก และพยายามทำให้ได้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมากๆ โดยทั่วไปมีขนาดพื้นที่ผิวตั้งแต่ 500 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม โลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่น ปรอท เงิน ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น

### 4) การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange)

เป็นการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนหรือประจุของโลหะหนักในน้ำเสียบกับไอออนในสารที่เป็นของแข็งที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับไอออนได้ ซึ่งสารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้นี้เรียกว่า เรซิน มี 2 แบบ คือ เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange resin) ซึ่งมีทั้งชนิดกรดแก่ และชนิดกรดอ่อน และเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchange resin) ซึ่งมีทั้งชนิดต่างแก่และชนิดต่างอ่อน โลหะหนักที่สามารถบำบัดด้วยวิธีนี้ เช่น ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล เป็นต้น

### 5) ออสโมซิสผกกลับ (reverse osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักจากน้ำเสียโดยการกรองผ่านแผ่นเยื่อกรองแบบเยื่อกึ่งซึมผ่านได้ (semipermeable membrane) ที่ความดันสูงกว่าความดันออสโมซิส เพื่อเยื่อกรองจะยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน โดยปกติจะมีความดันตั้งแต่ความดันบรรยากาศจนถึง 6,900 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร แผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ เซลลูโลสอะซีเตต และไนลอน

### 6) การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (electrodialysis)

เป็นการแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยกระแสไฟฟ้าและเยื่อกรองแบบ permeable membrane ที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ เยื่อกรองประจุบวกจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบ และปล่อยสารที่มีประจุบวกผ่านไป และเยื่อกรองที่มีประจุลบ จะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวก และปล่อยสารที่มีประจุลบผ่านไป แต่โมเลกุลของน้ำจะอยู่ช่องตรงกลาง ไหลผ่านออกไปได้ยาก

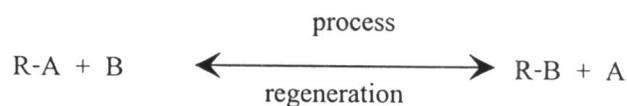
## 7) การใช้วิธีธรรมชาติ (natural treatment)

เป็นทั้งวิธีการทางกายภาพ เคมี และชีววิทยาประกอบกัน มาปรับสภาพน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ให้ลดน้อยลง โดยนำน้ำเสียมาร่วมพื้นที่ชุ่มน้ำ ซึ่งประกอบด้วย น้ำ ดิน พืช จุลินทรีย์ และบรรยากาศ โลหะหนักจะถูกจับไว้โดยอาศัยการดูดซับ การตกผลึก และการแลกเปลี่ยนประจุ โดยทั่วไปจะต้องมีค่าพีเอชของน้ำเสียหรือบริเวณพื้นที่บำบัดน้ำเสียมากกว่า 7 จึงจะได้ประสิทธิภาพในการบำบัดอยู่ในระดับสูง แต่ถ้าค่าพีเอช ต่ำกว่า 7 จะเกิดปัญหาโดยโลหะหนักจะละลายปนกับน้ำออกจากระบบได้

## 2.3 การแลกเปลี่ยนไอออน

### 2.3.1 ลักษณะทั่วไป

การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนที่อยู่ในสถานะของแข็งกับของเหลว ซึ่ง ไอออนที่อยู่ในสถานะของแข็งเป็นประจุที่ไม่ติดแน่นสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ ซึ่งเกิดจากแรงอิเล็คโตรสแตติก (electrostatic force) บนผิวของเรซิน (resin) และเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุเหมือนกันในสารละลายที่ไหลผ่านเรซินโดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากันหรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุมูลในโครงสร้างทางกายภาพของแข็งแต่อย่างใด (ASCE, 1969 อ้างถึงใน จีรศักดิ์ อาจณรงค์ฤทธิ์, 2547) สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนที่มีประจุลบและไอออนที่มีประจุบวก เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของไอออนเดิมโดยผ่านสารละลายที่มีไอออนเช่นเดียวกับไอออนเริ่มต้นเรียกขั้นตอนนี้ว่า การรีเจนเนอเรต (regenerate) และสารที่ใช้เรียกว่า รีเจนเนอเรนต์ (regenerant) การแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังสมการ



อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนบนผิวของเรซินกับไอออนในสารละลายควบคุมด้วยอัตราการไหลของสารละลายที่อัตราการไหลช้าจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าอัตราการไหลเร็ว

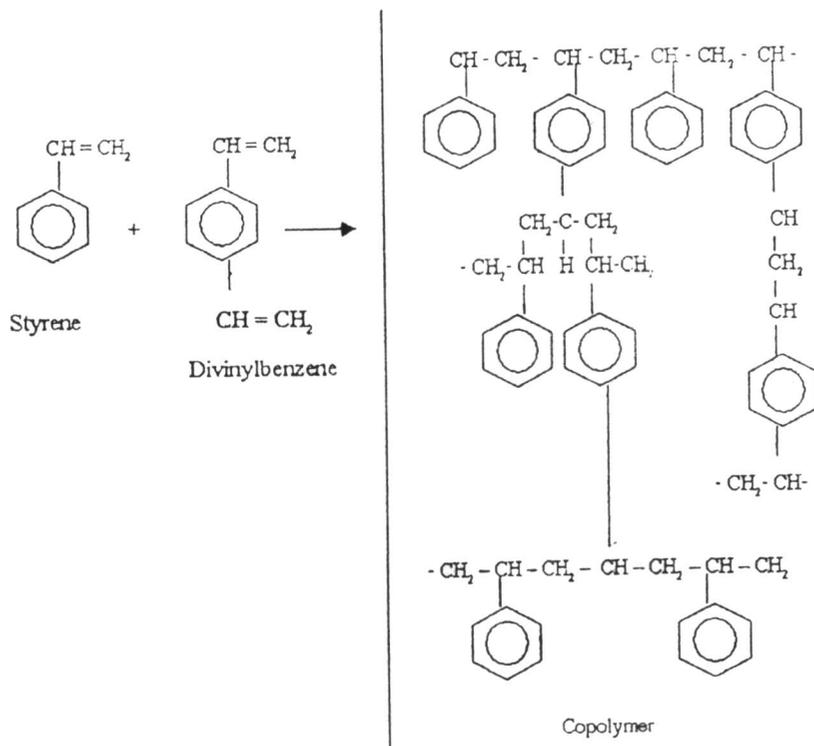
การแลกเปลี่ยนไอออนนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับปรับปรุงคุณภาพ เช่น กำจัดความกระด้างของน้ำ (softening) ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ที่ทำให้น้ำกระด้างกับไอออนของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) ของเรซินและการกำจัดไอออนต่างๆที่อยู่ในน้ำ (deionization) เพื่อให้ได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่าการกลั่นมาก เนื่องจากวัสดุที่ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้

สารที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออน มีทั้งแบบที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น คลินอพลีโอไลท์ (clinoptilolite;  $[(\text{Ca}, \text{Na}_2)(\text{AlSi}_7\text{O}_{16})]6\text{H}_2\text{O}$ ) ปูนมวลหรือทรายเขียว (green sand) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น  $[(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_2(\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10}(\text{OH})_4]$  สารที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนจากธรรมชาติมีข้อจำกัดการใช้งานในช่วงพีเอชแคบ ไม่สามารถใช้งานได้ในสภาพที่ความเป็นกรดหรือด่างสูงมาก และมีปัญหาจากการละลายของสารแลกเปลี่ยนเองในขณะใช้งาน

สารแลกเปลี่ยนไอออนทั้งแบบชนิดที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย ดังนั้นการเรียกชนิดของสารแลกเปลี่ยนไอออนจะเรียกตามชนิดของประจุที่เกิดการแลกเปลี่ยน ถ้ามีการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (cation exchanger) หรือแคทไอออนเรซิน (cation resin) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบจะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (anion exchanger) หรือแอนไอออนเรซิน (anion resin)

ปี ค.ศ 1945 D'Allelio ได้จดสิทธิบัตรการสังเคราะห์สารอินทรีย์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชันระหว่างสารสไตรีน (styrene) กับไดไวนิลเบนซีน (divinylbenzene, DVB) (จอร์จ คัด อางณรงค์ฤทธิ์, 2547) มีโครงสร้างดังภาพที่ 2-1 โดยมีลักษณะเป็นของแข็งที่มีการเชื่อมต่อของโมเลกุล โดยโมเลกุลของสไตรีนเป็นโครงสร้างพื้นฐานและมี DVB เชื่อมต่อแบบไขว้สามมิติ (three dimension cross linking) ทำให้สารโพลีเมอร์ที่ได้ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ และมีความเหนียว อัตราของสไตรีนต่อ DVB อยู่ระหว่างร้อยละ 1-20 โดยน้ำหนักมีผลต่อโครงสร้างของเรซิน อัตราการเชื่อมโยงแบบสามมิติ (degree of cross linking) และความพรุนของเรซินและเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของเรซินแต่ละชนิด ทำให้เรซินแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางด้านกายภาพและทางด้านเคมีแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น (density) การดูดซึมน้ำ (hydration) การพองตัว (swelling) ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงออสโมติกอย่างกะทันหัน (osmotic shock) การซึมผ่าน (diffusion) และรูพรุน (relative porosity) ของเรซิน รูพรุนของเรซินมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน โดยทั่วไปจะใช้อัตราส่วนของสไตรีนต่อ DVB ประมาณร้อยละ 8 เรซินสังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็น

เจล (gel) การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดจากการที่ไอออนซึมผ่านช่องของโครงสร้างเรซินและเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่เกาะอยู่บนเรซิน เรซินแบบนี้ไม่สามารถใช้ได้กับสารที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่กว่า 40 อังสตรอม (°A) ต่อมาได้มีการสังเคราะห์เรซินที่เรียกว่า แมคโคพอร์ส (macroporous) ลดขนาดของช่องว่างภายในเล็กน้อย แต่มีขนาดของรูพรุนใหญ่ขึ้นประมาณ 1,300 อังสตรอม โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมของสไตรีนกับ DVB นอกจากนี้ยังทำให้เรซินมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงออสโมซิส ทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้มากขึ้นและมีอัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเร็วขึ้น



ภาพที่2-1 โครงสร้างสารที่ได้จากการโพลิเมอไรซ์ระหว่างสไตรีนกับไดไวนิลเบนซีน

สารโพลิเมอร์ที่ได้ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์เรซินสำหรับแลกเปลี่ยนไอออนทั้งชนิดแคทไอออนเรซินและแอนไอออนเรซิน โดยนำสารโพลิเมอร์มาทำปฏิกิริยากับสารเคมีกรดหรือด่าง เพื่อให้ได้หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนโครงสร้างของเรซินตามต้องการ เช่น การทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน (sulfonation) จะได้เรซินที่มีคุณสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่

(strong acid cation exchanger) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟนิก ( $\text{HSO}_3^-$ ) เกาะติดกับโครงสร้างของเรซิน ไอออนของไฮโดรเจน ( $\text{H}^+$ ) ในหมู่ฟังก์ชันของซัลโฟนิกจะเป็นไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับแคทไอออนที่อยู่ในสารละลาย

### 2.3.2 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ความสามารถของเรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนและจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนเรซินนั้น ชนิดของไอออนที่เกาะบนเรซินที่มีผลต่อความสมดุล (equilibrium) และความเฉพาะเจาะจง (selectivity) ต่อเรซินมี 2 ชนิด คือชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchanger) และชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchanger) และเมื่อแบ่งตามหมู่ฟังก์ชันสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือ

2.3.2.1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่ (strong acid cation exchanger) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่ซัลโฟนิก ( $\text{SO}_3\text{H}$ ) ฟอสโฟนิก ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) เรซิน SAC สามารถแลกเปลี่ยนกับโซเดียมในเกลือธรรมชาติ (natural salt) ได้ดังสมการ



R : โครงสร้างของเรซิน

ความสามารถเช่นนี้เรียกว่า การแยกเกลือ (salt splitting) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ SAC ที่แตกต่างไปจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดอ่อน โดยทั่วไปจะใช้ SAC ในการทำงานในลักษณะของการแลกเปลี่ยนไอออนไฮโดรเจนกับไอออนอื่นในสารละลาย (hydrogen cycle) ซึ่งจะทำให้การรีเจนเนอเรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) หรือถ้าใช้งานในการแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียม (sodium cycle) จะรีเจนเนอเรตด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) การแลกเปลี่ยนไอออนของไฮโดรเจนใช้ในกระบวนการกำจัดแร่ธาตุออกจากน้ำ (demineralization) ดังสมการ

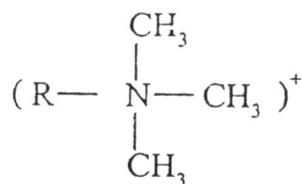


ตัวอย่างการใช้งานแบบแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมที่ใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำ (softening) เพื่อกำจัดไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ดังสมการ

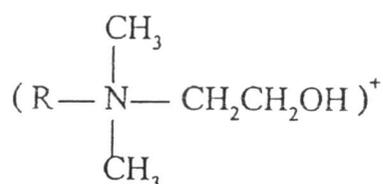


2.3.2.2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดอ่อน (weak acid cation exchange, WAC) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (carboxyl,  $\text{COO}^-$ ) เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารโพลีเมอร์ของ styrene-DVB กับกรดคาร์บอกซิลิก ( $\text{R-COOH}$ ) เรซินแบบ WAC มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน (weak acid) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไฮโดรเจนต่ำกว่าแบบ SAC แต่มีข้อดีที่การรีเจนเนอเรต WAC ทำได้ง่ายกว่าแบบ SAC เพราะไม่ต้องใช้สารเคมีความเข้มข้นสูงเพื่อเปลี่ยน  $\text{H}^+$  ได้สูงถึงร้อยละ 90 ที่ความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่เรซินแบบ SAC ต้องใช้สารรีเจนเนอเรตมากเกินไปเพื่อรีเจนเนอเรตให้ได้ร้อยละ 75-60 เนื่องจาก WAC ทำงานได้ดีในช่วงพีเอชสูงกว่า 4 หรือ 5 และใช้งานได้ดีกับน้ำที่มีความกระด้างสูง แต่ประสิทธิภาพจะลดลง เมื่อน้ำมีคาร์บอนไดออกไซด์และโซเดียมละลายอยู่สูง ดังนั้นจึงใช้ WAC สำหรับกระบวนการ softening และ dealkalinity หรือใช้งานร่วมกับ SAC เพื่อลดค่าใช้จ่ายสำหรับรีเจนเนอเรต

2.3.2.3 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบด่างแก่ (strong basic anion exchanger, SBA) ได้แก่เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันของเอมีน (amine) ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาเมทิลเลชัน (methylation) ของโพลีเมอร์กับสารไตรเมทิลามีน (trimethylamine) เกิดเป็น SBA type I หรือกับสารไดเมทิลเอทานอลามีน (dimethyl ethanolamine) เกิดเป็น SBA type II ดังในภาพที่ 2-2



Type I



Type II

ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของเรซินแบบ SBA type I และ type II

เรซิน SBA type I มีความเสถียรต่อสารเคมี โดยเฉพาะที่พีเอชสูงๆ และน้ำที่ผ่านเรซินชนิดนี้มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนในสารละลายได้ดี ส่วนเรซิน SBA type II มีประสิทธิภาพต่อการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ทำให้รีเจนเนอเรชั่นง่าย ทำให้ต้นทุนการดำเนินการต่ำ

2.3.2.4 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบค่างอ่อน (weak basic anion exchanger, WBA) ได้แก่ เรซินที่มีหมู่เอมีนแบบเซกนดารีเอมีน (secondary amine,  $\text{CH}_2\text{NH}_2(\text{CH}_3)'$ ) หรือเทอร์ติารีเอมีน (tertiary amine:  $\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$ ) WBA มีคุณสมบัติคล้ายกับ WAC แบบตรงข้ามกัน สามารถรีเจนเนอเรตดีกว่าแบบ SBA โดยทั่วไปจะใช้งานร่วมกับ SBA ในการกำจัดแร่ธาตุออกจากน้ำเพื่อลดต้นทุนการรีเจนเนอเรต

### 2.3.3. คุณสมบัติของเรซิน

ประสิทธิภาพของเรซินที่ได้จากการสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเรซินที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมี เช่น การออกซิเดชัน การไฮโดรไลซิส หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของเรซินมีดังนี้

2.3.3.1 อัตราการเชื่อมต่อแบบไขว้ (degree of cross-linking) อัตราส่วนของสไตรีนต่อ DVB มีผลต่อคุณสมบัติของเรซิน โดยถ้าอัตราส่วนของ DVB ต่ำกว่าร้อยละ 2 สารโพลีเมอร์ที่ได้จะไม่ทนต่อแรงเค้นในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรขณะใช้งาน แต่ถ้ามีอัตราส่วนของ DVB มากกว่าร้อยละ 16 โครงสร้างของเรซินจะต้านการพองตัว

2.3.3.2 การพองตัว (swelling) การดูดซับความชื้น (moisture content) และความหนาแน่น (density) มีความสัมพันธ์กับอัตราการเชื่อมต่อแบบไขว้ เรซินจะพองตัวเมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากแรงดันออสโมติกภายในโครงสร้างของเรซิน ซึ่งการพองตัวนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเรซินและหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่ เรซินที่มีอัตราการเชื่อมต่อต่ำจะมีการพองตัวมากกว่าเรซินที่มีอัตราการเชื่อมต่อสูง ในขณะที่การดูดซับความชื้นขึ้นอยู่กับชนิดของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะบนเรซิน หมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดการแทนที่ได้ดีจะมีคุณสมบัติการดูดซับน้ำได้สูง เช่นเรซินแบบ SAC และ SBA ซึ่งทำให้โครงสร้างพองตัวมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อมีหมู่ฟังก์ชันของ  $\text{H}^+$  และ  $\text{Na}^+$  จะพองตัวสูงสุด ส่วน WAC และ WBA จะมีคุณสมบัติตรงข้ามและจะพองตัวเมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือ ผลของการพองตัวจะทำให้แรงดันภายในระบบหรือคอลัมน์ลดลง (pressure drop) ซึ่งแก้ไขได้โดยการใส่เรซินที่มีคิกซ์ของการเชื่อมต่อแบบไขว้สูงขึ้นหรือใช้เรซินชนิดแมกโคพอร์ส

(macroporous) ลดการพองตัวของเรซินลง เพื่อแก้ไขปัญหาคือแรงดันภายในคอลัมน์ลดลง การดูดซับความชื้นคิดเป็นร้อยละของความชื้นต่อน้ำหนักแห้งหรือเปียกของเรซินหรือในรูปของน้ำหนักหรือโมลของน้ำต่อความจุสมมูลย์ เนื่องจากเรซินสามารถดูดซับน้ำได้ต่างกัน ดังนั้นความหนาแน่นของเรซินจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและชนิดของไอออน

2.3.3.3 การไอออนไนเซชัน (ionization) เมื่อเรซินอยู่ในสารละลาย ไอออนของเรซินจะแตกตัวและอยู่ในสมดุลกับเรซินนั้น โดยมีค่าสมดุลการแตกตัวหรือ pK ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินดังแสดงในตารางที่ 2-1 ค่า pK ของเรซินยิ่งสูงความสามารถจับไอออนในสารละลายยิ่งดี

ตารางที่ 2-1 ค่าสมดุลการแตกตัว (pK) ของเรซินแต่ละชนิด (Simon, 1991 อ้างถึงในจรัสศักดิ์ อาจนรงค์ฤทธิ์, 2547 )

ion exchange material	active group	approximate pK value
Strong acid cation	R-SO <sub>3</sub>	<1
Weak acid cation	R-COO	4-6
Strong base anion		
Type I	R-N+(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	>13
Type II	R-N<(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> //C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH	>13
Weak base anion	R-N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	7-9

จากตารางจะเห็นได้ว่าเรซินแบบ SAC จะเกิดการไอออนไนเซชันที่ค่า pK น้อยกว่า 1 และแบบ SBA จะเกิดเมื่อค่า pK มากกว่า 13 ส่วนเรซินแบบ WAC และ WBA จะไม่เกิดการไอออนไนเซชันจนกว่าค่า pK จะสูงกว่าค่า pK ในตารางตามลำดับ

2.3.3.4 ความจุไอออนของเรซิน (capacity) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของเรซิน ซึ่งเป็นสิ่งที่บอกรถึงปริมาณของไอออนที่มีไอออนตรงข้ามที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนโครงสร้างของเรซิน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ลักษณะ คือ

- ความจุไอออนรวมของเรซิน (total capacity) หมายถึงจำนวนไอออนทั้งหมดที่มีอยู่บนเรซินได้จากการคำนวณปริมาณของไอออนทั้งหมดที่อยู่บนเรซิน

- ความจุไอออนของเรซินแลกเปลี่ยนได้จริง (operation capacity หรือ effective capacity) หมายถึงจำนวนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้เมื่ออยู่ในสภาวะการใช้งานจริงขึ้นอยู่กับสภาวะของการใช้งาน เช่น อัตราการไหลของน้ำที่ต้องการบำบัด (service flow rate) ระดับความเข้มข้นของการรีเจนเนอเรต (regeneration level) อัตราการไหลของการรีเจนเนอเรต (regeneration flow rate) เป็นต้น

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนทั้งหมดของเรซินขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันทั้งหมดที่เกาะอยู่บนโครงสร้างโพลีเมอร์ การบอกค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนทั้งหมด เช่น เรซินแบบ SAC หมู่ฟังก์ชันซัลโฟเนตจะแสดงอยู่ในรูปของมิลลิอิกควิวาเลนที่ต่อกรัมของเรซินแห้ง (milliequivalent/gram, meq/g) หมายถึงจำนวนมิลลิกรัมสมมูลย์ของไอออนที่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนได้ต่อเรซินแห้ง 1 กรัม (dry-weight capacity) กรณีของเรซินแบบ SBA มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปของปริมาตรเปียก (wet-volume capacity) โดยทั่วไปจะแสดงค่าเป็น อิกควิวาเลนที่ต่อลิตรของเรซิน (equivalent/liter, eq/l) หรือในทางอุตสาหกรรมจะแสดงในหน่วยของ kilograins of  $\text{CaCO}_3/\text{cu.ft}$ ,  $\text{kg}/\text{ft}^3$  ซึ่ง  $1 \text{ kg}/\text{ft}^3$  จะเท่ากับ 21.8 eq/l โดยทั่วไป SAC ในรูปของโซเดียมมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประมาณ 2 eq/l และ SBA ในรูปของคลอไรด์จะมีค่าระหว่าง 1.0-1.4 eq/l ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้จริง จะใช้เมื่อเรซินกำลังใช้งาน ซึ่งจะมีปริมาตรเมื่อมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบแล้ว ซึ่งจะเป็นปริมาตรของเรซินที่มีน้ำอยู่ระหว่างโครงสร้าง เรียกปริมาตรของเรซินนี้ว่า bed volume

2.3.3.5 ขนาดของเรซิน (particle size) โดยทั่วไปเรซินจะมีลักษณะเป็นเม็ดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 0.04-1.0 mm. (325-18 mesh) ในทางการค้าจะใช้เรซินขนาด 20-50 และ 50-100 mesh ขนาดของเรซินมีผลต่ออัตราเร็วของการแลกเปลี่ยนไอออน โดยเรซินที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการแลกเปลี่ยนเร็วกว่าขนาดใหญ่ และผลต่อแรงดันภายในคอลัมน์ โดยเรซินขนาดเล็กต้องใช้แรงดันสูงกว่าขนาดใหญ่

2.3.3.6 ความเสถียร (stability) ความเสถียรของเรซินมีผลต่อลักษณะการใช้งาน และอายุของเรซิน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเสถียรของเรซินทางกายภาพ ได้แก่ แรงเค้น ซึ่งทำให้โครงสร้างของเรซินเปลี่ยนรูป และอุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเรซิน เช่น เรซิน SBA type I ความสามารถในการแลกเปลี่ยนลดลงเนื่องจากสูญเสียหมู่เมทิล (methyl) และเอมีน (amine) จากวงแหวนเบนซีน ซึ่งการสูญเสียขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสูญเสียขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จะทำให้น้ำมีเมธานอล (methanol) และไตรเมทิลเอมีน (trimethylamine) เจือปนอยู่ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณน้อยและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ แต่จะทำให้น้ำมีกลิ่น คล้ายกลิ่นคาวปลา

ส่วนเรซิน SBA type II ความสามารถในการแลกเปลี่ยนลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างไนโตรเจนกับหมู่เอทานอล ทำให้เรซินกลายเป็น WBA โดยทั่วไป SBA type I มีอายุการใช้งาน ที่อุณหภูมิปกติประมาณ 5-6 ปี และ 3-5 ปีสำหรับ SBA type II ส่วนปัจจัยทางเคมีที่มีผลกระทบต่อความเสถียรของเรซิน ได้แก่ การถูกออกซิไดซ์ด้วยคลอรีนอิสระ (free chlorine) เช่นกรณีของเรซินแบบ SAC ส่วนปัญหาที่มีผลต่อความเสถียรของเรซินแบบ SBA จะทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน

2.3.3.7 ความเฉพาะเจาะจงต่อไอออน (ion selectivity) ความเฉพาะเจาะจงของการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นอยู่กับความแรงของประจุและขนาดของประจุ โดยความแรงของประจุมีผลต่อการแลกเปลี่ยนมากที่สุด สามารถแบ่งความเฉพาะเจาะจงได้ 3 ประการ (Arden, 1968 อ้างถึงใน จีรศักดิ์ อาจณรงค์ฤทธิ์, 2547) คือ

ประการที่ 1 ที่ความเข้มข้นต่ำและอุณหภูมิปกติ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนจะเพิ่มขึ้น เมื่อวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนที่แลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้น เช่น  $\text{Th}^{4+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$ ;  $\text{PO}_4^{3-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$

ประการที่ 2 มีความเข้มข้นต่ำ อุณหภูมิปกติและวาเลนซ์อิเล็กตรอนคงที่ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนจะเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอม เช่น  $\text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$ ;  $\text{Ba}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Be}^{2+}$

ประการที่ 3 ที่ความเข้มข้นของไอออนสูง ความแตกต่างขึ้นอยู่กับศักยภาพของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เช่น  $\text{Na}^+$  กับ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{NO}_3^-$  กับ  $\text{SO}_4^{2-}$  ในบางกรณีไอออนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนน้อยกว่า อาจจะมีศักยภาพในการแลกเปลี่ยนต่ำกว่า  $\text{I}^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเดียว เช่น  $\text{SO}_4^{2-} > \text{I}^- > \text{NO}_3^- > \text{CrO}_4^{2-} > \text{Br}^-$

เมื่อเรียงลำดับความเฉพาะเจาะจงตามจำนวนอิเล็กตรอน มีดังนี้

โมนอวาเลนซ์ :  $\text{Ag}^+ > \text{Co}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{H}^+ > \text{Li}^+$

ไดวาเลนซ์ :  $\text{Pb}^{2+} > \text{Hg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Mn}^{2+}$

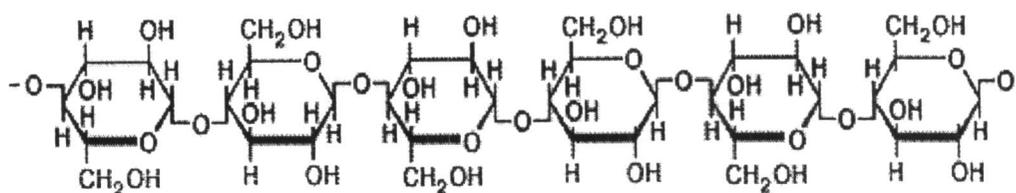
ไตรวาเลนซ์ :  $\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+}$

## 2.4 องค์ประกอบในเซลล์พืช

พืชส่วนใหญ่จะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโดยปกติปริมาณของสารประกอบเหล่านี้จะแตกต่างกันตามชนิด อายุของพืช และยังขึ้นกับว่าเป็นส่วนประกอบส่วนใดของพืช

### 2.4.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลส เป็นสารประกอบที่มีมากที่สุด ในธรรมชาติ เพราะเป็นส่วนประกอบประมาณ 1 ใน 3 ของส่วนประกอบทั้งหมดของพืช โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้างให้กับผนังเซลล์ของพืช เช่น ไม้ จะมีเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 50 นอกจากนั้นอาจเกิดอยู่ในรูปของเส้นใย เช่น ฝ้าย ซึ่งจัดว่าเป็นเซลลูโลสบริสุทธิ์ (นิริรัชต์ สงวนเดือน, 2545)



ภาพที่ 2-3 แสดงสูตร โครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) ชนิดหนึ่งที่มีมากในผนังของเซลล์พืช ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของ ดี-กลูโคส (D-glucose) ในรูปแบบต้า-ดี-กลูโคไพราโนส ( $\beta$ -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 ( $\alpha$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5%

2) เบต้าเซลลูโลส ( $\beta$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 %

3) แกมมาเซลลูโลส ( $\gamma$ -cellulose) เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีทั้งในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.5 % และสารละลายกรดเจือจาง

#### 2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (pentoses) ที่มีลักษณะเป็น heterogenous โดยประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์หลายชนิดรวมกัน ลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขาแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง น้ำหนักโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะต่ำกว่าเซลลูโลส ขนาดของโมเลกุลมีความยาว 30-50 หน่วย และมีองค์ประกอบหลักคือ ไซแลน นอกจากนี้ยังมีกลูแคน (glucan) แมนแนน (mannan) กาแลคแตน เฮมิเซลลูโลส เมื่อถูกย่อยสลายได้น้ำตาลที่เป็นเพนโตส และเฮกโซส ได้แก่ ไซโลส แมนโนส กาแลคโตส อะราบิโนส และเฮมิเซลลูโลส จะไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายในด่าง และถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส

#### 2.4.3 ลิกนิน (lignin)

เป็นสารประกอบอะโรมาติก (aromatic compound) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซิล (methoxyl group,  $-\text{OCH}_3$ ) หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group,  $-\text{OH}$ ) และส่วนที่เป็นฟีนอลิก (phenolic) โดยปกติไม่สามารถระบุได้ว่าลิกนินเป็นสารประกอบประเภทใด เพราะไม่สามารถกำหนดโครงสร้างที่แน่นอนได้ เนื่องจากลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะตัวเดียว แต่จะเกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบ ประกอบด้วยหน่วยเหล่านี้คือ

- ฟีนิลโพรเพน (Phenyl Propane)
- กัวอิจีล ยูนิต (Guaiacyl unit)
- ไซริงเกิล ยูนิต (Syringyl unit)
- พารา-ไฮดรอกซีฟีนิล ยูนิต (para-hydroxyphenyl unit)

ลักษณะการจับ (link) ของหน่วยฟีนิล โพรเพน อาจเชื่อมกันที่ตำแหน่งแอลฟา เบต้า หรือแกมมา กับ side chain ของหน่วยอื่น หรือที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ของวงแหวนฟีนิล (Phenyl ring) ได้ เป็นรูปร่างเส้นตรง วงกลม หรือมีกิ่งก้านสาขาได้ ลิกนินไม่ละลายน้ำ และสารอินทรีย์ชนิดใด จะอยู่ภายในโครงสร้างของพืช โดยอยู่รอบๆ เซลลูโลส และป้องกันเซลลูโลสจากการย่อยสลาย

## 2.5 สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน (cellulose ion exchanger)

สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนเหมือนกับเรซินสังเคราะห์ แต่จะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น โครงร่างตาข่ายของเซลลูโลสจะเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) แต่โครงร่างตาข่ายของเรซินสังเคราะห์เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เนื่องจากเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นไฟเบอร์ การยึดเกาะกันของโครงร่างตาข่ายจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยมีหมู่ไอออนอยู่ตามตำแหน่งต่างๆบนโครงร่างตาข่าย ดังนั้นไอออนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไม่สามารถผ่านเรซินสังเคราะห์ได้จะสามารถผ่านสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนสารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน

จากลักษณะ โครงสร้างของเซลลูโลส พบว่าโมเลกุลของเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซีที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ซึ่งเป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุด สารเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดประมาณ 15-20 ไมครอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับโครงร่างของเซลลูโลสและองค์ประกอบอื่นๆ แต่จะไม่มีผลต่อคุณสมบัติของเซลลูโลสแลกเปลี่ยนไอออน การปรับปรุงลักษณะโครงสร้างและหมู่ไอออนในเซลลูโลสสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนให้สูงขึ้น

## 2.6 เปลือกถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ Glycine Max(L) Merrill ซึ่งเป็นพืชในตระกูลของ Leguminosae, subfamily papilionideae ซึ่งเป็นพืชตระกูลถั่วที่รู้จักกันดี โดยเฉพาะเป็นพืชดั้งเดิมของคนในเอเชีย เช่น จีน เกาหลี ญี่ปุ่น ตลอดจนคนไทยของเรา มีถิ่นกำเนิดกระจายอยู่ตั้งแต่

เอเชียตะวันออกเฉียงใต้และหมู่เกาะต่างๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิกจนถึงทวีปออสเตรเลีย โดยได้มีการปลูกและนำมาบริโภคเป็นอาหารพื้นเมืองนานาชนิด

ในเมล็ดถั่วเหลืองมีส่วนประกอบ 3 ส่วนคือ เปลือกร้อยละ 7 ใบเลี้ยงร้อยละ 90 และยอดอ่อนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีขนาดน้ำหนักเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 0.1-0.2 กรัม สีของเปลือกมีหลายสี เช่น สีเหลืองใช้ในอุตสาหกรรมทำอาหารของคนทั่วไป สีดำใช้ในอุตสาหกรรมโรงงานสกัดน้ำมันพืช สีเขียวและสีน้ำตาลไม่นิยมใช้กันมากนัก จมูกของถั่วเหลืองมักมีสีน้ำตาลบางพันธุ์มีจมูกสีขาว ใบเลี้ยงซึ่งมีสองใบอยู่ภายใต้เปลือกมักมีสีเหลืองและสีเขียว มีลักษณะโครงสร้างและลักษณะทั่วไปเป็นเมล็ดกลมรี ในส่วนของใบเลี้ยงซึ่งเป็นส่วนที่สะสมอาหารต่างๆ และเป็นส่วนที่จะนำมาใช้ประโยชน์จะมีลักษณะเป็นสีเขียวในขณะที่ถั่วยังไม่แก่ แต่ไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้กันในประเทศไทย ลักษณะของเปลือกถั่วมีหลายสี เช่น สหรัฐอเมริกาจะนิยมปลูกเฉพาะถั่วเหลืองเปลือกสีเหลือง ในขณะที่ถั่วเหลืองเปลือกดำมีปลูกในประเทศอินเดีย จมูกถั่วเหลือง (hilum) มีหลายสี เช่น สีดำ สีน้ำตาล สีเหลือง เป็นต้น ซึ่งเชื่อกันว่าสีของจมูกถั่วเหลืองเป็นปัจจัยหลักที่จะใช้ในการบ่งบอกถึงพันธุ์ เมล็ดถั่วเหลืองจะอยู่ในฝักถั่วเหลืองซึ่งมีสีดำหรือน้ำตาลในขณะที่แก่เต็มที่และ 1 ฝักจะบรรจุเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 3 เมล็ด (สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร, 2527: อ้างถึงใน บุญญฤทธิ์ ปัญญาภิบาล, 2543)

#### การใช้ประโยชน์จากถั่วเหลือง

1) ส่วนต่างๆของถั่วเหลือง คือ ใบ ลำต้นและเปลือก เมื่อเก็บเกี่ยวและนวดเรียบรื้อแล้วและไถกลบรวมทั้งปมที่ตกค้างลงสู่ดินจะเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ดีที่สุดในส่วนของเปลือกถั่วเหลืองนำมากองรวมกันใช้เพาะเห็ดเรียกว่า “เห็ดถั่วเหลือง” นำมาทำอาหารรับประทานได้

2) การนำไปผสมอาหารสัตว์ ซึ่งมีผู้มารับซื้อจากโรงงานในราคา กิโลกรัมละ 3 บาท

3) เมล็ดถั่วเหลืองนำมาใช้เป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเมล็ดถั่วเหลืองจะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากมาย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pawan และ Dara (1982) ศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก โดยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ทำการศึกษาคือ ชานอ้อย ที่นำไปปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8% และ เปลือกไม้ ที่ถูกปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 39% และ 0.2 N กรดซัลฟิวริก การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบตช์ พบว่า ชานอ้อยและเปลือกไม้สามารถกำจัดตะกั่ว โปรท ทองแดง แคดเมียม และนิกเกิล ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบว่าค่าพีเอช ของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยชานอ้อยมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยเปลือกไม้มีค่าพีเอชลดลง ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนชานอ้อยและเปลือกไม้ เพิ่มขึ้นถึงแม้ว่าเปอร์เซ็นต์ของโลหะหนักที่ถูกกำจัดจะลดลง จากการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ความสามารถสูงสุดของวัสดุสำหรับโลหะหนักที่ทำการศึกษามากกว่า 1 meq/g. ของวัสดุ จากผลการศึกษานี้ให้เห็นว่า มีแนวโน้มของการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ทดแทนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียให้มีค่าตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้

สุมาลี สถิตชัยเจริญ และสุจิน มาลานุสรณ์ (2533) ศึกษาการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ผักตบชวา เปลือกถั่วลิสง และกาบมะพร้าว ในรูปกรด และ xanthate เทียบกับที่ไม่มีกรปรับปรุง พบว่า ผักตบชวาในรูป xanthate บำบัดนิกเกิล กับสังกะสี ได้ดีกว่าในรูปกรด และธรรมชาติ แต่ผักตบชวาในรูปกรด สามารถบำบัดทองแดงกับโครเมียม ได้ดีกว่าในรูป xanthate และธรรมชาติ ส่วนกาบมะพร้าวรูป xanthate สามารถบำบัดโลหะหนักทุกชนิดได้ถึง 80.0-99.8 % โดยสามารถกำจัดทองแดงได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และเปลือกถั่วลิสงในรูป xanthate สามารถบำบัดสังกะสี และทองแดง ได้ต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

Nakajima และ Sakaguchi (1990) ได้ทำการวิจัยศึกษาการกำจัดยูเรเนียมจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำทะเล โดยใช้วัสดุ 7 ชนิด คือ เปลือกลูกนัท ผิวด้านในลูกนัท เปลือกถั่วทั้งด้านนอกและด้านใน หัวหอม เปลือกส้ม และเปลือกองุ่น ไปทำการปรับสภาพด้วยฟอร์มัลดีไฮด์และกรดซัลฟิวริก พบว่า วัสดุที่ผ่านการปรับสภาพมีความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมเพิ่มขึ้นจากวัสดุที่ไม่ได้ปรับสภาพ

Maranon และ Sastre (1991) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากแอปเปิ้ลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตน้ำแอปเปิ้ล ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะที่ทำการศึกษาคือ

ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดของวัสดุที่ใช้ทดลอง การปรับสภาพของกากแอมป์เปิด ด้วยกระบวนการทางเคมี และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ในการศึกษาองค์ประกอบของกากแอมป์เปิดที่นำมาใช้ในการทดลอง พบว่า ประกอบด้วย เซลลูโลส 20 % เซมิเซลลูโลส 10 % ลิกนิน 10 % และส่วนประกอบอื่นๆ เช่น แทนนิน reducing sugars และ colouring agents เป็นต้น สำหรับกระบวนการทางเคมีที่ใช้ปรับสภาพกากแอมป์เปิด คือ phosphorylation reaction และ crosslinking and xanthation reaction ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงของกากแอมป์เปิด ที่ปรับสภาพโดย phosphorylation reaction (P-AR) 1.6 meq/g. ที่ปรับสภาพโดย crosslinking and xanthation reaction (CLX-AR) 1.1 meq/g. และกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ 0.4 meq/g. ส่วนความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของนิกเกิลของ P-AR เท่ากับ 1.1 meq/g. CLX-AR 0.6 meq/g. และกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ 0.3 meq/g. อิทธิพลของขนาดวัสดุที่ใช้ในการทดลองพบว่า ขนาด 0.2-0.4 mm. มีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าขนาด 0.4-0.63 mm. ส่วนการศึกษาทางด้านกระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพกากแอมป์เปิด พบว่า P-AR สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่า CLX-AR และกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพประมาณ 2 และ 5-8 เท่า ตามลำดับ อิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนัก พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง

Maranon และ Sastre (1992) ได้ทำการศึกษาการใช้กากแอมป์เปิดจากกระบวนการผลิตน้ำแอมป์เปิด ในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ กับที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี คือ phosphorylation reaction ในการทดลองได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก คือ พีเอช อัตราการไหล อิทธิพลของสารคอมเพล็กซ์โดยการเติม EDTA ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทะเล โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างเรซินแบบ cation resin (Amberlite IR-120) กับกากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ ทองแดง และนิกเกิล ส่วนน้ำทะเลเป็นตัวอย่างจากทะเลคาริเบียน โลหะหนักที่ศึกษา คือ ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และปรอท จากผลการทดลอง พบว่า อิทธิพลของ พีเอช มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพและที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ คือ มากกว่า 3.5 โดยสามารถกำจัดทองแดง และนิกเกิลได้ 99 % โดยควบคุมอัตราการไหล 10 มล./นาที ส่วนกากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี มีพีเอชที่เหมาะสม คือ มากกว่า 2.5 โดยสามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ 99 % โดยควบคุมอัตราการไหล 10 มล./นาที ในกรณีน้ำเสียสังเคราะห์เป็นน้ำเสียผสมระหว่างทองแดงและนิกเกิล พีเอชที่เหมาะสม คือ 5 ซึ่งรวมถึงน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี

การเติม EDTA สำหรับอิทธิพลของอัตราการใช้ ได้ทำการศึกษาโดยมีการแปรค่าอัตราการใช้ 3 ค่า คือ 10 20 และ 30 มล./นาที่ จากผลการทดลองพบว่า กากแอมป์เปิดที่ไม่ได้ปรับสภาพ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99 % ที่อัตราการใช้ 10 และ 20 มล./นาที่ ส่วนที่อัตราการใช้ 30 มล./นาที่ สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 58 % ส่วนกากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี สามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลได้ประมาณ 99 % ที่อัตราการใช้ 10, 20 และ 30 มล./นาที่ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า กากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพด้วยกระบวนการทางเคมี phosphation reaction สามารถปรับอัตราการใช้ที่สูงได้โดยประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักไม่ลดลง ส่วนการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก เปรียบเทียบกันระหว่างเรซินแบบสังเคราะห์ และกากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพ พบว่า กากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพมีความสามารถในการกำจัดทองแดงได้ดีกว่าเรซินแบบสังเคราะห์ ส่วนนิกเกิล แคลเมียม และตะกั่ว เรซินแบบสังเคราะห์ สามารถกำจัดออกจากน้ำเสียได้ดีกว่ากากแอมป์เปิดที่ปรับสภาพ

Tan, Ooi และ Lee (1993) ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมประจุบวก ( $Cr^{6+}$ ) ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ใยเปลือกมะพร้าว และเมล็ดปาล์มที่ผ่านกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยทำการทดลองแบบเบดซ์และแบบคอลัมน์ วัสดุที่นำมาใช้ต้องนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วทำให้ละเอียด และร่อนคัดขนาด โดยให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.30-0.85 mm. จากนั้นนำไปต้มในน้ำกลั่นประมาณ 0.5-1.0 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปกวนใน 1.5 M NaOH นำไปล้างด้วย 2 M  $HNO_3$  และล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้งก่อนที่จะใช้ในการทดลอง จากผลการทดลอง อิทธิพลของเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับวัสดุ พบว่า ระยะเวลาสัมผัส 20 นาทีแรกสามารถกำจัดโครเมียมได้ประมาณ 80 % จากนั้น ความสามารถในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้อีกต่อไป สำหรับอิทธิพลของพีเอช พบว่า พีเอชที่เหมาะสมสำหรับใยเปลือกมะพร้าว คือ 1.5-5.0 และเมล็ดปาล์ม คือ 1.5-3.0 มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมประมาณ 70 % ความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ของใยเปลือกมะพร้าว เท่ากับ 5 และ 29 mg.Cr/g. ส่วนเมล็ดปาล์มมีความสามารถในการดูดซับ เท่ากับ 5 และ 14 mg.Cr/g. ที่พีเอช 3.00 และ 2.05 ตามลำดับ อิทธิพลของชั้นความสูงของวัสดุ พบว่า ที่อัตราการใช้เดียวกัน ชั้นความสูงที่มากกว่าจะสามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณของวัสดุที่สามารถดูดซับโครเมียมมากกว่า สารเคมีที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน ได้แก่ 0.05 M NaOH หรือ 0.1 M  $HNO_3$

Omar, Marline และ Egila (1993) ศึกษาการนำ Bambara Nut และแกลบ มาใช้ในการกำจัดไอออนของนิกเกิล และทองแดง โดยวัสดุที่ใช้ต้องนำไปตากแห้ง จากนั้นบด และคัดขนาด ให้มีขนาดประมาณ 0.4 mm. ผลการศึกษา พบว่า ระยะเวลาสัมผัสที่ดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดีที่สุดคือ 120 นาที โดยมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับทองแดง เท่ากับ 6.8 mg./100 ml. สำหรับผล

ของชนิดโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับ พบว่า ทองแดงถูกดูดซับได้ดีกว่านิกเกิล และการดูดซับของวัสดุจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

เกศสุชา พูลคำ (2537) ได้ทำการวิจัยโดยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อย 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. นอกจากนี้ พบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดง มีค่าสูงกว่านิกเกิลและสังกะสี ความเข้มข้นปริมาณน้อยของโลหะหนักในน้ำเสีย มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักปริมาณมาก และปริมาณ 0.5 N. HCl สำหรับการรีเจนเนอเรชัน ใช้ประมาณ 3 bed volumes

นันทนา อิทธิพร โกวิท (2538) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ชนิดซัลโฟเอทีล และครอสลิง-เซนเทตที่ทำจากผักตบชวา ชนิดของโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี การทดลองที่ใช้เป็นแบบคอลัมน์ที่มีชั้นความสูงของเรซิน 20 cm. น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชประมาณ 5.0 และมีความเข้มข้นของโลหะหนัก 5, 10, 20 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ไหลผ่านชั้นเรซินด้วยอัตราการไหล 3 bed volumes/hr. ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ได้แก่ กระบวนการทางเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพผักตบชวา และความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย จากผลการทดลอง พบว่า ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของซัลโฟเอทีล และ ครอสลิง-เซนเทต อยู่ในช่วง 0.233-0.503 meq/g. และ 0.279-0.595 meq/g. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนกับทองแดงมีค่าสูงกว่า นิกเกิลและสังกะสี ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียน้อย มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าในน้ำเสียที่มีโลหะหนักมาก และสำหรับการรีเจนเนอเรชัน ใช้สารรีเจนเนอเรนต์เข้มข้น 0.5 N ประมาณ 2 bed volumes

พิธิ กระสินธุ์ศรี (2539) ได้ทำการวิจัยการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดลิกโน-เซลลูโลสิคฟอรั่มลิตไฮด์ที่ทำจากผักตบชวา โดยนำผักตบชวามาปรับสภาพด้วยสารละลายฟอรั่มลิตไฮด์ที่ความเข้มข้น 2, 5, 10, 20, 30 และ 37 % (v/v) พบว่า การปรับสภาพโครงสร้างผักตบชวากับฟอรั่มลิตไฮด์ 5 % ให้ประสิทธิภาพดีในการกำจัดไอออนของโลหะหนัก โดยวิธีการทดลองแบบคอลัมน์ ผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยฟอรั่มลิตไฮด์ 5 % เท่ากับ 1.0962, 0.6932 และ

1.0375 meq/g. สำหรับไอออนของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า การแลกเปลี่ยนไอออนของทองแดงมีค่าสูงกว่าไอออนของนิกเกิลและสังกะสี หลังจากคอลัมน์หมดประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนของโลหะสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ 0.5 N HCl ประมาณ 1 bed volume หลังจากการล้างคอลัมน์ด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน สามารถนำคอลัมน์กลับมาใช้ใหม่ได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ค่าสัมประสิทธิ์ สหพันธ์ของ Person สำหรับไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี คือ -0.085, -1.00 และ -0.78 ตามลำดับ จากค่าสัมประสิทธิ์ข้างต้น พบว่า เมื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักลง จะมีผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบสังกะสี พบว่า คอลัมน์ชนิดนี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้เป็นที่น่าพอใจ และสามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียชุบโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขวัญเนตร สบายใจ (2542) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผักตบชวา โดยการปรับสภาพด้วยสีย้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 กับที่ไม่ได้ปรับสภาพ จากการทดลองด้วยเบดซ์ พบว่า การปรับสภาพด้วยสีย้อม 2 ชนิด คือ Reactive Red 31 และ Direct Blue 71 ที่ความเข้มข้น 0.002 และ 0.001 % ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น และพบว่าผักตบชวามีความสามารถในการแลกเปลี่ยนทองแดง มากกว่าสังกะสีและนิกเกิล จากการทดลองกับ น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบสังกะสีพบว่า สามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Marshall และคณะ (1999) ทำการศึกษาการใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก ในการกำจัดทองแดง โดยนำเปลือกถั่วเหลืองมาสกัดด้วย 0.1 N. NaOH จากนั้นทำการปรับสภาพด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.6 M พบว่า เปลือกถั่วเหลือง ที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก มีความสามารถในการดูดซับ มากกว่า 1.7 มิลลิโมลทองแดง ต่อกรัมของเปลือกถั่วเหลือง ซึ่งสูงกว่าของเปลือกถั่วเหลืองที่ไม่ปรับสภาพ (0.39 มิลลิโมลต่อกรัม) เนื่องจากการปรับสภาพด้วยกรดซิตริก จะเพิ่มหมู่คาร์บอกซิลให้กับเปลือกถั่วเหลือง ดังนั้นเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริกมีความเหมาะสมในการนำไปใช้กำจัดทองแดงออกจากน้ำเสีย

Baker และคณะ (1999) ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจาก hydroxyethyl cellulose ในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสี ในน้ำเสีย จากการทดลองแบบเบดซ์ และคอลัมน์ พบว่า เรซินมีการบวมตัวเฉลี่ย 75.94 % และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 2.57 meq/g. ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

ดังนั้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมได้สามารถนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ และจากการศึกษาแบบคอลัมน์ พบว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดนี้ มีข้อดีคือ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสูง และเป็นสารเคมีที่คงสภาพดี

Marshall และคณะ (2000) ศึกษาความสามารถการดูดซับไอออนของทองแดง โดยใช้เปลือกถั่วเหลืองที่ผ่านการสกัดด้วยเบส แล้วปรับสภาพด้วยกรดซิตริก เปรียบเทียบกับวัสดุเหลือทิ้งอื่น ได้แก่ เปลือกถั่วลิสง เปลือกเมล็ดอัลมอนต์ เมล็ดฝ้าย และถั่วแมคคาเดเมีย พบว่า เปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพมีค่าการดูดซับไอออนของทองแดงได้ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับเรซินสังเคราะห์ 4 ชนิด ถึงความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักบางชนิด พบว่าเปลือกถั่วเหลืองที่ปรับสภาพมีค่าการดูดซับที่ดีมาก

Yin และคณะ (2001) ศึกษาการใช้สาหร่ายทะเล (*Laminaria japonica*) กำจัดแคดเมียม โดยนำสาหร่ายที่มีขนาดระหว่าง 300 ถึง 600  $\mu\text{m}$ . มาปรับสภาพด้วยแคลเซียม จากการทดลองแบบแบตช์ เกี่ยวกับผลของระยะเวลาสัมผัส พบว่า 90 % ของการดูดซับเกิดขึ้นใน 20 นาทีแรก และเข้าสู่สมดุล ที่ระยะเวลาสัมผัส 1 ชั่วโมง ผลของพีเอชที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่า ความสามารถสูงสุดในการดูดซับเท่ากับ 1.3 mmol/g. (น้ำหนักแห้ง) ที่พีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 6 และผลของการปรับสภาพด้วยแคลเซียม พบว่า ทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นและช่วยให้การตกตะกอนง่ายขึ้น การทดลองแบบคอลัมน์ พบว่า ผลการศึกษาสอดคล้องกับการทดลองแบบแบตช์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า สาหร่ายทะเล (*Laminaria japonica*) สามารถใช้กำจัดแคดเมียมออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Vaughan, Seo และ Marshall (2001) ศึกษาการกำจัดไอออนของแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และสังกะสี โดยใช้ซังข้าวโพดที่ผ่านการล้างและปรับสภาพด้วยกรดซิตริกหรือกรดฟอสฟอริก โดยทำการทดลองด้วยสารละลายโลหะหนักแยกแต่ละชนิด และสารละลายโลหะหนักผสม เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนักกับเรซินสังเคราะห์ 4 ชนิด พบว่าซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพให้ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด เป็นที่น่าพอใจ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักที่ดูดซับ

Wong และคณะ (2003) ศึกษาการกำจัดทองแดงและตะกั่วจากสารละลายโดยใช้เกลบที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกรดทาร์ทาริก (*tartaric acid*) พบว่า การกำจัดทองแดงให้ผลดีที่สุดเมื่อทำการปรับสภาพเกลบโดยใช้ กรดทาร์ทาริก 1.2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสนาน 10 นาที ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและตะกั่ว เท่ากับ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้น

เริ่มต้นของโลหะหนักในสารละลายที่มีค่าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะน้อยลง เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการเขย่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนจะเพิ่มขึ้น

Shin และ Rowell (2005) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของไม้ต้นสน (*Juniperus monosperma*) ซึ่งใช้เป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพประเภทลิกโนเซลลูโลสติก โดยการศึกษาได้ทำการปรับสภาพเนื้อไม้สนโดยปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ และเปลี่ยนแปลงปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่พื้นผิว หลังการปรับสภาพด้วยปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน พบว่าไม้สนมีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียได้มากกว่า 2 เท่า เมื่อเทียบกับไม้สนที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย DRIFT หลังจากการทำปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน พบว่าแถบ (band) ของหมู่ คาร์บอนิล (carbonyl) มีขนาดเล็กลง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหมู่ฟังก์ชันโคนิเฟอร์อลดีไฮด์ (coniferaldehyde) ในลิกนินของไม้สนถูกแทนที่ด้วยหมู่ซัลโฟนิค (sulfonic) ดังนั้นปฏิกิริยาซัลโฟเนชันจะทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไม้สนมีมากขึ้น เนื่องจากมีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันในการจับโลหะหนักเพิ่มขึ้น