

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (ION EXCHANGE)

ตามที่กล่าวแล้วในคำนำ มลทินที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำที่อยู่ในรูปของแร่ธาตุละลายน้ำ (Dissolved Solids) ไม่ว่าจะเป็นไอออนบวก (Cation) เช่น โซเดียม แคลเซียม แมกเนเซียม หรือ แอนไอออน (Anion) เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต โบคาร์บอเนต แร่ธาตุละลายเหล่านี้ ไม่สามารถกำจัดออกได้ โดยกระบวนการทำน้ำใสและการกรองธรรมดา แต่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การค้นพบหลักการแลกเปลี่ยนไอออนครั้งแรกโดย ทอมป์สัน (Thompson) และเวย์ (Way) ชาวอังกฤษ เป็นผู้ค้นหาปรากฏการณ์แลกเปลี่ยนไอออนของดิน โดยการทดสอบละลาย แอมโมเนียมซัลเฟต $[(NH_4)_2SO_4]$ ผ่านชั้นดิน ดินจะจับแอมโมเนียไว้ และได้สารละลายแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ออกมาแทนที่ดังสมการ



สารแลกเปลี่ยนไอออนอาจแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในปัจจุบันสารประเภทหลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก

ซีโอไลต์ (Zeolite) เป็นสารประกอบที่มีความสามารถแลกเปลี่ยน Na^+ ที่อยู่ในตัวกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำหลายชนิด เช่น Alklyne Earth Ions , NH_4^+ และไอออนที่มีประจุ 2 + บางตัว ซีโอไลต์มี 2 ชนิด คือ แบบธรรมชาติ และแบบสังเคราะห์ ซีโอไลต์แบบธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ Green Sand หรือ Glaucanite เป็นแร่ที่มีอยู่ตามธรรมชาติ พบมากในรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา แร่ชนิดนี้มีน้ำอยู่ประมาณ 10 % ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์ ได้มาจากสารประกอบหลายชนิดรวมตัวกัน เช่น โซเดียมซิลิเกต และอลูมิเนียมซัลเฟต หรือโซเดียมอลูมิเนต ความถ่วงจำเพาะของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดเมื่อแห้งแล้ว จะมีค่าประมาณ 2.1 ถึง 2.4 ซึ่งนับว่าต่ำกว่าของทรายธรรมดา (ถพ. 2.56) ไม่มากนัก ซีโอไลต์แบบสังเคราะห์ มีน้ำอยู่ในตัวประมาณ 50 % การที่มีน้ำอยู่ในตัวดังกล่าวทำให้ความหนาแน่นของซีโอไลต์แบบธรรมชาติและแบบสังเคราะห์ มีค่าประมาณ 100 และ 50 ถึง 70 กก. ต่อ ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

เนื่องจากซีโอไลต์มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนต่ำ จึงได้มีการพัฒนาสารอินทรีย์ โพลีเมอร์ จนกระทั่งสามารถใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน ที่มีอำนาจสูงกว่าซีโอไลต์เป็นอันมาก สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดใหม่นี้ เรียกว่า Resinous Ion Exchanger หรือ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเท่านั้น เนื่องจากมีการใช้กันอย่างกว้างขวางมากกว่าซีโอไลต์

2.2 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

หน้าที่ของระบบแลกเปลี่ยนไอออนมี 2 ประการ ซึ่งเกิดขึ้นต่อเนื่องกัน คือ

(ก) กำจัดไอออนต่างๆ ออกจากน้ำ เช่น Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--} , Cl^- เป็นต้นนอกจากนี้ ในบางครั้งเรซินอาจใช้กำจัดโลหะพิษต่างๆ ออกจากน้ำได้ด้วย แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องใช้เรซินที่สังเคราะห์เป็นพิเศษ โลหะพิษที่ใช้เรซินกำจัดออก ได้แก่ อาเซนิก, แบเรียม, แคดเมียม, โคบอลต์, ทองแดง, ทอง, ตะกั่ว, โมลิบดีนัม, เซเลเนียม, เงิน, แวนนาเดียม, สังกะสี

(ข) ทำให้ไอออนต่างๆ มีความเข้มข้นสูงมาก ๆ งานส่วนนี้เกิดขึ้นหลังจากได้น้ำสะอาดแล้ว กล่าวคือ ไอออนที่ถูกกำจัดออกจากสารละลาย จะหลุดออกมากับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ในระหว่างการทำรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) เนื่องจากปริมาณของสารละลายรีเจนเนอเรนต์ต่ำกว่าปริมาณสารละลายซึ่งเป็นที่อยู่เดิมของไอออน ความเข้มข้นใหม่ของไอออนจึงสูงมาก ลักษณะเช่นนี้เท่ากับเป็นการทำให้ไอออนซึ่งเดิมเจือจางมาก มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลายสิบหลายร้อยเท่า ระบบประปามักไม่สนใจหน้าที่ประการหลังนี้ เพราะสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงดังกล่าว ถือเป็นของเสีย แต่ในบางกรณี เช่น ในการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำ เราต้องการแยกไอออนออกจากสารละลายเจือจาง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ จึงต้องการทำให้ไอออนมีความเข้มข้นสูงมาก ๆ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีประโยชน์มากในกรณีนี้

โดยปกติสารแลกเปลี่ยนไอออน มักออกแบบเพื่อกำจัดสารละลายที่อยู่ในรูปไอออนเท่านั้นและไม่ใช้ในการกรองคอลลอยด์หรือโมเลกุลขนาดใหญ่ที่อยู่ในรูปของไอออน (มีประจุ) อันที่จริงแล้ว สารแลกเปลี่ยนไอออนมีความเหมาะสมในการเป็นเครื่องกรองได้เป็นอย่างดี แต่ถ้าใช้กรองแล้วหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนอาจด้อย หรือสูญเสียประสิทธิภาพ แล้วแต่ว่าจะกรองมากหรือน้อย ถ้าหากภาระในการกรองอยู่ในระดับต่ำ สารแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำหน้าที่ได้ทั้งสองอย่างพร้อมกัน การใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนให้ทำหน้าที่อื่นๆ ที่นอกเหนือจากที่กล่าว เช่น สารแลกเปลี่ยนไอออนอาจใช้เป็นสารดูดซับ (Adsorbent) หรือเป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นต้น มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย

2.3 การดูดซับ (ADSORPTION)

การดูดซับ หมายถึง การถ่ายเททางฟิสิกส์ขององค์ประกอบในก๊าซหรือของเหลวไปยังพื้นผิวของแข็งและถูกดูดซับไว้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การดูดซับนั้น สารที่ถูกดูดซับไม่ละลายเข้าไปในของแข็ง (Adsorbent) แต่ติดค้างอยู่ที่ผิวของของแข็งหรือผิวด้านในของรูพรุนของของแข็งที่ใช้เป็นสารดูดซับนั้น กระบวนการดูดซับส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ (Reversible) บางครั้งอาศัยการเปลี่ยนแปลงความดันหรืออุณหภูมิก็สามารถไล่สารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับได้แล้ว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความดัน, อุณหภูมิ ทำให้สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) เปลี่ยนค่าไป

การเลือกสารดูดซับ (Adsorbents) เป็นสิ่งสำคัญมาก โดยมากต้องเป็นสารที่ก่อให้เกิดความดันสูญเสีย (Pressure loss) น้อย และมีความแข็งแรงพอที่จะเคลื่อนย้ายและนำไปใช้งานได้ นอกจากนี้ยังต้องมีความสามารถในการดูดซับสารองค์ประกอบที่สนใจได้ดี ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขายในท้องตลาดคือ bentonite, bauxite, alumina, bone, charcoal, Fuller's earth, carbon, silica gel

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) โดยอาศัยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) มีกลไกที่คล้ายคลึงกับการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งตัวเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเปรียบเสมือนเป็นเฟสของแข็ง (Solid phase) และมีการแลกเปลี่ยนไอออนกับองค์ประกอบที่อยู่ในเฟสของไหล (Fluid phase) ดังนั้น กลไกที่เกี่ยวข้องจึงคล้ายกลไกการดูดซับระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid liquid adsorption)

2.4 สมดุลย์ระหว่างของแข็ง-ของไหล (SOLID-FLUID EQUILIBRIA)

การศึกษาพบว่า การดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น โดยมีกลไก (Mechanism) ที่เกี่ยวข้องทั้งทางฟิสิกส์และ/หรือเคมี กลไกดูดซับทางฟิสิกส์ (Physical adsorption) เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในเฟสของไหล (Adsorbate) และผิวของแข็งมีขนาดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของไหลกันเอง ดังนั้น โมเลกุลของไหลจึงติดแน่นกับผิวของแข็งที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับ (Adsorbent) และเกิดสมดุลขึ้นกับของไหลที่เหลืออยู่ในเฟสของไหลนั้น

การแลกเปลี่ยนไอออนไม่เหมือนการดูดซับทางฟิสิกส์ แต่คล้ายกับการดูดซับทางเคมี ดังนั้นในที่นี้จะขอกล่าวถึงการดูดซับทางฟิสิกส์เพียงเล็กน้อย

ตัวอย่างผลการทดลองเพื่อศึกษารูปแบบการดูดซับทางฟิสิกส์แบบอุณหภูมิคงที่ (Physical adsorption isotherms) ของสารไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์บนซิลิกาเจล (silica gel) เป็นดังสมการในรูปที่ 2.1 ก. และการทดลองดูดซับก๊าซผสมเป็นดังรูปที่ 2.1 ข.

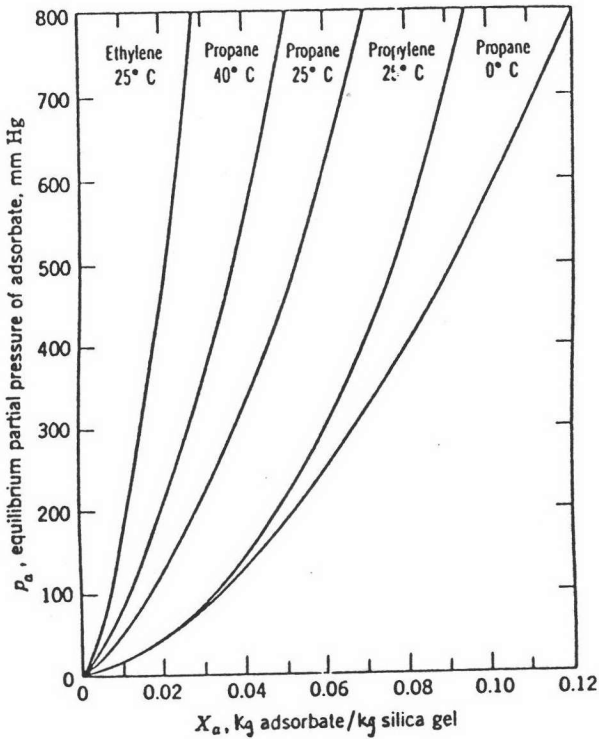


Figure 2.1 ก. Adsorption isotherms of hydrocarbons on silica gel

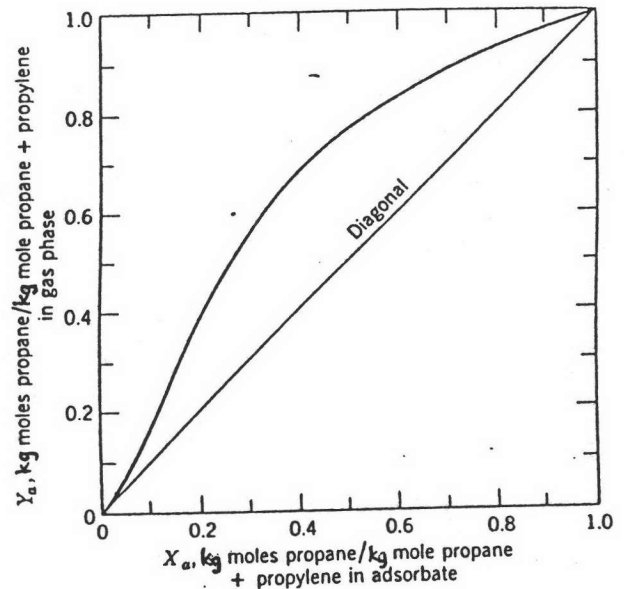


Figure 2.1 ข. Simultaneous adsorption of propane and propylene on silica gel at 25°C

รูปที่ 2.1 ตัวอย่าง Adsorption isotherms และการดูดซับก๊าซผสม

ข้อมูลสำหรับการดูดซับทางฟิสิกส์ สามารถอธิบายได้โดยสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับ adsorption isotherms คือ

- ก. Freundlich : $x = k_1 p^{1/n}$
- ข. Langmuir : $x = \frac{k_2 P}{1 + k_3 P}$ (กรณีที่ P มีค่าน้อย)

เมื่อ x = mass of adsorbate
unit mass of adsorbent

P = partial pressure of adsorbed gas in the gas phase

n, k_1, k_2, k_3 = empirical constants

ในกรณีของการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or chemisorption) ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบในของไหลที่ถูกดูดซับ (Adsorbed fluid) กับของแข็งดูดซับ (Adsorbent solid) นั้น ในหลายๆ กรณี การดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ (Irreversible) ซึ่งเป็นการยากที่จะแยกเอาสารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ อนึ่งในกรณีของการแลกเปลี่ยนไอออนโดยอาศัยเรซิน การดูดซับจะเป็นปฏิกิริยาคล้ายกับการดูดซับทางเคมี แต่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนคืนได้ โดยการรีเจนเนอเรตเรซินซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

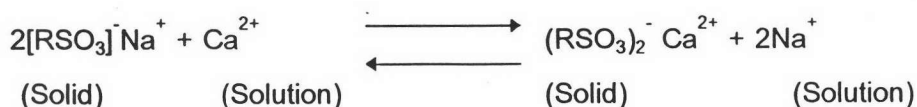
2.5 ปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับของแข็งและของไหล (SOLID-FLUID OPERATIONS)

หน่วยปฏิบัติการ (Unit operations) ที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสระหว่างก๊าซ-ของแข็ง (gas-solid) หรือของเหลว-ของแข็ง (Liquid-solid) ได้แก่ กระบวนการดูดซับ (Adsorption) , การชะล้าง (Leaching) , การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) และการอบแห้ง (Drying) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแลกเปลี่ยนไอออน

การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นกระบวนการอีกแบบหนึ่งสำหรับการสัมผัสกันระหว่างของแข็ง-ของเหลว โดยมีการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้น โดยมากมักใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ (Water Treatment) ให้สมมุติง่ายๆ ว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) มีลักษณะเป็นเจลเนื้อเดียวตลอดและมีการกระจายโครงร่างของสารไฮโดรคาร์บอน โดยมีไอออนิกกรุป (Ionic groups) ที่ไม่เคลื่อนที่เกาะอยู่ที่สายของไฮโดรคาร์บอน ประจุของไอออนมีการแพร่ไปมาทำให้สภาพรวมเป็นกลาง ตัวอย่างเช่น เรซินประจุบวก (cation exchange resin) มี anionic groups ที่เป็นประจุลบ ซึ่งประจุจะมีการสะเทินโดยการแพร่ของไอออนบวก (Cation) ในการผลิตสามารถเลือกผลิตไอออนิกกรุปที่เกาะติดนี้ได้ กรณีของแคทไอออน อาจมีไอออนิกกรุปเป็นพวก phenolic, carboxylic, sulfonic และ phosphonic ions ได้ กรณีแอนไอออน (Anion exchange resin) มีไอออนิกกรุปเป็น primary, secondary หรือ tertiary amines, phosphonium และ arsenium

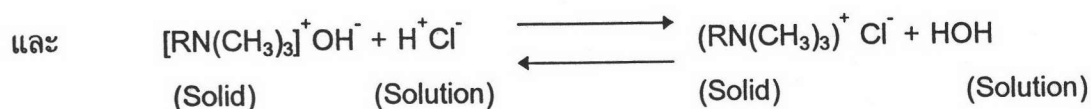
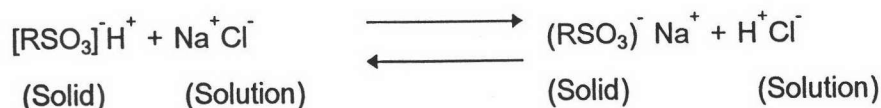
รูปลักษณะของ exchange materials มีหลายแบบ เช่น เม็ดกลม (Spherical beads), เมมเบรน (Membranes), เส้นใย (Fibers) และของเหลว (Liquids)

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของแคทไอออนที่มี Sulfonic group เป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ ดังสมการ



ในกระบวนการนี้ ไอออนของความกระด้าง (hardness) คือ Ca^{2+} , Mg^{2+} ซึ่งถูกกำจัดออกไปจากน้ำ โดยการผ่านน้ำไปบนเบดของเม็ดเรซิน ปฏิกริยาเป็นแบบย้อนกลับได้ เรซินนี้สามารถทำให้กลับมาอยู่ในรูปของ Na^+ -form โดยใช้สารละลายเกลือแกงมาผ่านชั้นของเรซินเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

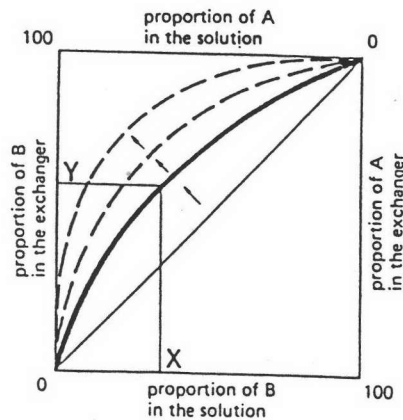
ในทำนองเดียวกันสามารถทำน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water , or demineralized water) โดยการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการผ่านน้ำไปบนชั้นของ แคนไอออน และตามด้วยชั้นของแอนไอออน ดังสมการ



ปกติจะนิยมรีเจนเนอเรตแคนไอออนด้วยกรดกำมะถันหรือกรดเกลือ ส่วนแอนไอออนจะนิยมรีเจนเนอเรตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

2.6 กฎที่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนแบบย้อนกลับได้ (LAWS GOVERNING REVERSIBLE ION EXCHANGE)

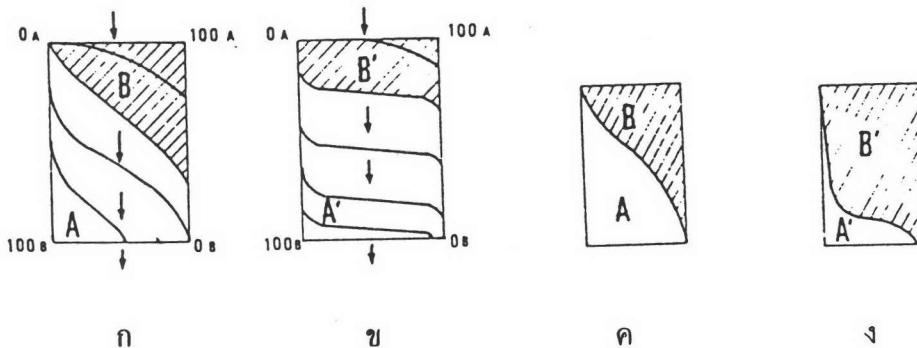
ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องกับไอออน 2 ชนิด A และ B นั้นคือสมดุลย์ระหว่างความเข้มข้นของสาร A และ B ในของเหลวกับในเรซิน (ion exchange substance) สามารถแสดงได้ดังรูป 2.2 ในภาวะสมดุลย์ หนึ่งเมื่อความเข้มข้นสาร B ในสารละลาย = x % เรซินจะอิ่มตัวด้วยสาร B ด้วยความเข้มข้น y % เช่น ถ้าไอออน A และ B มีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินเท่ากัน เส้นสมดุลย์ (Equilibrium curve) จะเป็นเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมจตุรัส ถ้ายิ่งเรซินมีความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนกับสาร B มากเท่าใดเส้นกราฟจะยิ่งมีทิศทางตามลูกศรในรูป



รูปที่ 2.2 เส้นสมดุลย์

หน้าตาของกราฟสำหรับกรณีของไอออน 2 ชนิดจะขึ้นอยู่กับหลายแฟคเตอร์ เช่น ธรรมชาติและจำนวนประจุ (Valency) ของไอออน ความเข้มข้นของไอออนในของเหลว ชนิดของสารแลกเปลี่ยนไอออน เช่น สำหรับกรณีระบบ $Ca^{2+} \rightleftharpoons 2Na^{+}$ และใช้เรซินแบบ sulphonated polystyrene เรซินจะจับแคลเซียมได้มากกว่าโซเดียมไอออน

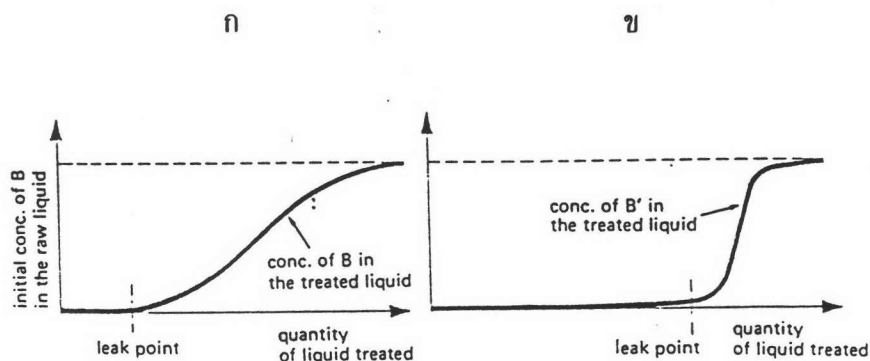
ถ้าเราให้เรซินปกติอยู่ในฟอร์มของสาร A และของเหลวมีไอออน B อยู่ เมื่อของเหลวไหลผ่านชั้นเรซิน จุดสมดุลย์ต่าง ๆ บนพื้นที่หน้าตัดของชั้นเรซินที่เวลาต่าง ๆ กันจะมีรูปแบบการกระจายดังเส้นโค้งความเข้มข้นที่แสดงในรูปที่ 2.3 ก (ในกรณีที่ไอออนทั้ง 2 มีลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากัน) หรือดังเส้นโค้งที่แสดงในรูป 2.3 ข (ในกรณีที่เรซินชอบจับไอออน B' มากกว่า A') อนึ่งจุด "leakage point" จะมาถึงเมื่อปลายของเส้นโค้งวิ่งเลยสุดขอบล่างของแกนตั้งไปแล้วนั่นคือ มีความเข้มข้นของไอออน B บางส่วนวิ่งทะลุผ่านชั้นเรซินออกมา ณ จุดนี้รูปร่างของเส้นโค้งของทั้ง 2 กรณีของลำดับความชอบจะเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.3 ค และ 2.3 ง ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 เส้นโค้งของความเข้มข้น

ในที่นี้พื้นที่แรเงาหรือ $\frac{B}{A+B}$ เป็นสัดส่วนของความสามารถในการ

แลกเปลี่ยนไอออน (total exchanger capacity) สัดส่วนพื้นที่แรเงาในกรณีของ B' (เรซินชอบจับไอออน B มากกว่า A) จะใหญ่กว่าในกรณีของ B (เรซินชอบจับไอออน B เท่ากับ A) ดังนั้นเราสามารถเขียน "saturation curve" ได้ดังรูปที่ 2.4 ก , 2.4 ข

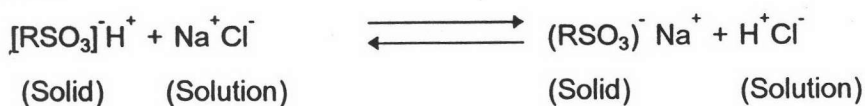


รูปที่ 2.4 เส้นโค้งอิ่มตัว

รูปแบบของเส้นโค้งอิ่มตัวนอกจากจะแสดงถึงสมดุลเชิงสถิต (Static equilibrium) แล้วยังแสดงถึง "exchange kinetics" ระหว่างของเหลวกับสารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน) อีกด้วย ไคเนติกส์เหล่านี้เกี่ยวข้องกับการซึมผ่านของไอออนเข้าไปในสารแลกเปลี่ยนไอออนและเป็นไปตามกฎสมดุลย์ของโดแนน (Donan equilibrium laws) ซึ่งปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องค่อนข้างซับซ้อน เพราะเกี่ยวข้องทั้งตึกรีของการกระจายและความเข้มข้นของไอออน อุณหภูมิ ธรรมชาติของผิวสัมผัสระหว่างสารแลกเปลี่ยนไอออนกับของเหลวและไคเนติกส์ของการแพร่ผ่านเข้าไปในสารแลกเปลี่ยนไอออน

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมด (total capacity) ของสารแลกเปลี่ยนไอออน (เช่น จำนวนสมมูลย์, equivalents ต่อลิตรเรซิน) เป็นเพียงค่าคร่าว ๆ ที่ใช้ในทางปฏิบัติ

การอธิบายความสัมพันธ์ของสมดุลย์เฟส (phase equilibrium relationships) ของการแลกเปลี่ยนประจุจะทำเหมือนกับกรณีของ Adsorption isotherms กล่าวคือโดยมากจะใช้วิธีของสมมูลย์การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange equilibria) ซึ่งอาศัยพื้นฐานของความสัมพันธ์ระหว่างมวล ตัวอย่างเช่น



Equilibrium constant ของปฏิกิริยา คือ

$$\text{Kequil.} = \frac{(\text{conc. } [\text{RSO}_3^-]\text{Na}^+)(\text{conc. } \text{H}^+\text{Cl}^-)}{(\text{conc. } [\text{RSO}_3^-]\text{H}^+)(\text{conc. } \text{Na}^+\text{Cl}^-)}$$

สมการข้างบนสามารถประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรมได้เป็น

$$\text{Kequil} = \frac{1-X_a}{X_a} \cdot \frac{Y_a}{1-Y_a}$$

เมื่อ X_a = equivalent fraction of solute (a) in liquid phase

Y_a = equivalent fraction of solute (a) in resin phase

สำหรับอัตราการถ่ายเทในการแลกเปลี่ยนไอออน (Rate of transfer in ion exchange) มีกลไกที่สลับซับซ้อนมาก

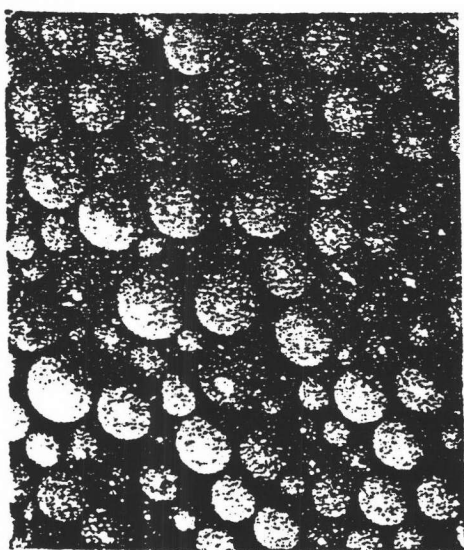
สมมติฐานของกลไก (Postulated mechanism) ของการแลกเปลี่ยนประจุประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้ :-

- ขั้นตอน 1) การแพร่ (Diffusion) ของไอออนจาก bulk liquid phase ไปยังพื้นผิวนอกของเรซิน
- ขั้นตอน 2) การแพร่ของไอออน จากพื้นผิวนอกของเรซินเข้าไปภายในเรซินไปที่ตำแหน่งของการแลกเปลี่ยน (Site of exchange)
- ขั้นตอน 3) เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนขึ้นที่ active site
- ขั้นตอน 4) การแพร่ของไอออนที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมา (Replaced ions) จากภายในเรซินไปที่พื้นผิวนอกของเรซิน
- ขั้นตอน 5) การแพร่ของไอออนที่ถูกแลกเปลี่ยนออกมาจากพื้นผิวนอกของเรซินไปยัง bulk liquid

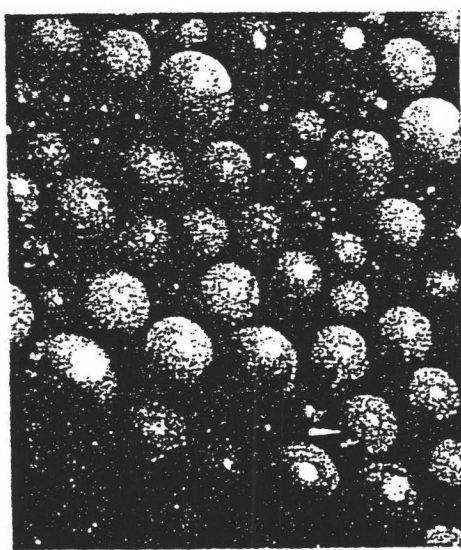
2.7 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Resin) มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ โครงสร้างที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและหมู่ไอออนที่มีประจุไฟฟ้า (Functional Group) โครงสร้างของเรซินเป็นส่วนที่ทำให้มันมีรูปร่างเป็นอย่างไรที่ปรากฏ (รูปที่ 1.5) และคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ และไม่แตกหักโดยง่าย โครงสร้างนี้สร้างขึ้นจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนชนิดเดียวกันจำนวนมากซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาว และมีไฮโดรคาร์บอนอีกชนิดหนึ่งมาทำหน้าที่ประสานเพื่อให้เกิด

เป็นรูป 3 มิติ (รูปที่ 2.6) ที่มีความโปร่งหรือความพรุน ความโปร่งของเรซินขึ้นอยู่กับความเหนียวแน่นของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ซึ่งวัดได้จากปริมาณของตัวประสาน ยกตัวอย่างเช่น ตัวประสานคือ DVB (Divinylbenzene) โพลีสไตรีนจะเกาะจับกันแน่นหนาเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณของ DVB ที่ใช้ กล่าวคือ ถ้าใช้ DVB มาก โครงร่างของเรซินจะแข็งและทึบ แต่ถ้าใช้ DVB น้อย โครงร่างของเรซินจะอ่อนและโปร่ง โดยปกติมักให้เรซินมี Degree of Crosslinkage ในช่วง 8-12 % DVB ซึ่งหมายความว่า มี DVB ประมาณ 8-12 % ในไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด (มีโพลีสไตรีนประมาณ 88-92 %) ความโปร่งหรือความพรุนของเรซิน มีความสำคัญต่อการกำหนดความสามารถในการแลกเปลี่ยน (Exchange Capacity) และกำหนดลักษณะอื่นๆ ของเรซินด้วย เช่น ความชื้นในเรซิน เป็นต้น กล่าวคือ เรซินจะต้องมีความพรุนพอเพียงที่จะทำให้ไอออนต่างๆ เคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวก จึงจะมีการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เรซินที่มี Degree of Crosslinkage สูงเกินไป จะมีความพรุนต่ำทำให้มีน้ำ (ความชื้น) อยู่ในเรซินน้อย นอกจากนี้ยังเปราะและแตกหักง่ายอีกด้วย เรซินที่มี Degree of Crosslinkage ต่ำเกินไป จะมีความพรุนมาก ทำให้อมน้ำได้มาก แต่สลายตัวได้ง่าย เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวหรือแรงประสานต่ำ นอกจากนี้ยังมีข้อเสียคือ ทำให้ไอออนที่มีขนาดใหญ่ (เช่น โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีประจุไฟฟ้า) สามารถเข้าถึงภายในโครงร่าง และทำให้เรซินเสียได้ในเวลาต่อมา

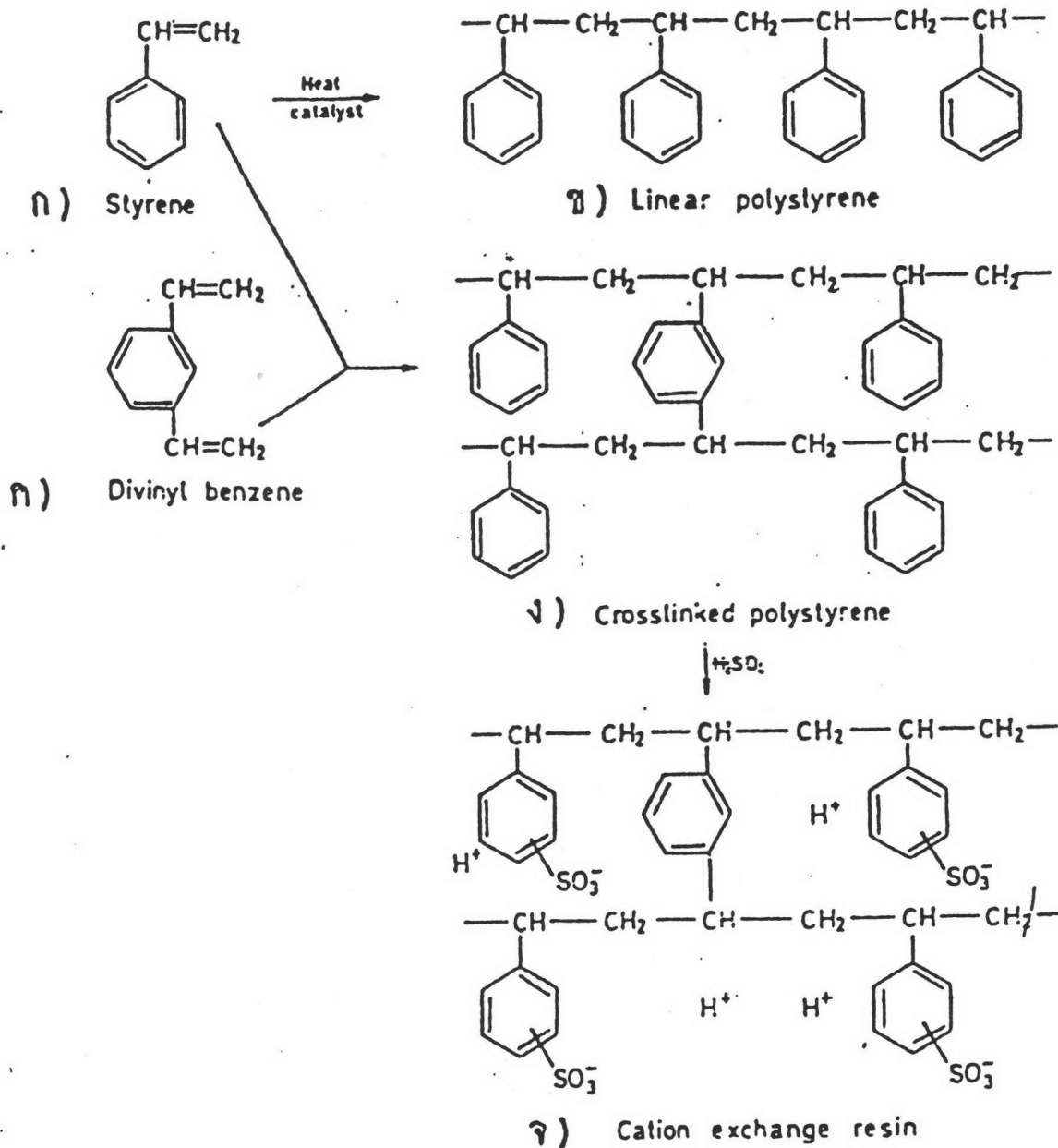


cation resin



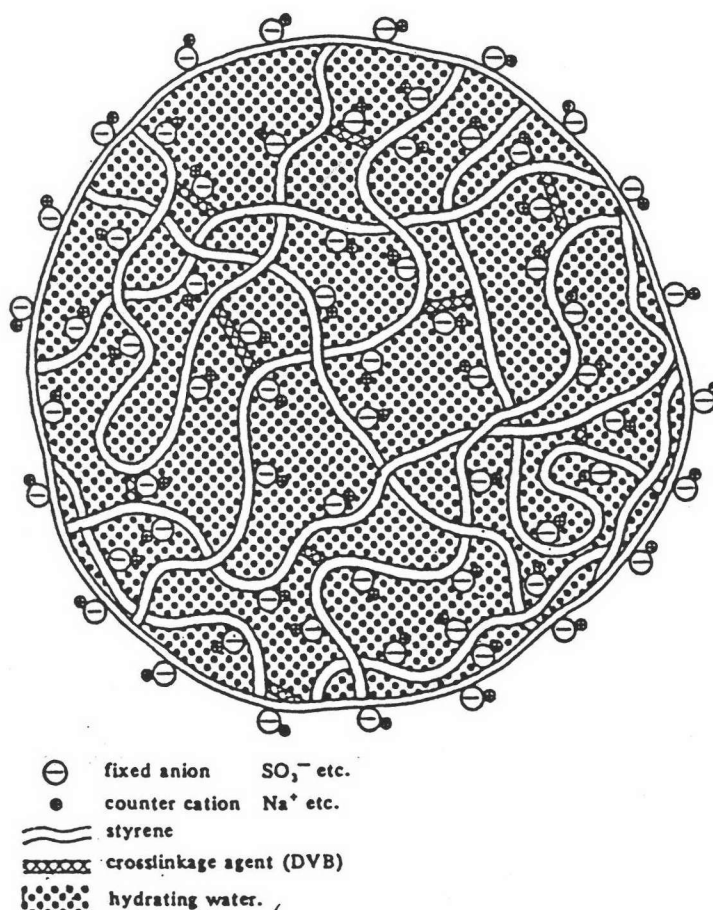
anion resin

รูปที่ 2.5 รูปร่างของเรซิน



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการสังเคราะห์และเตรียม Cation exchange resin

ดั่งเห็นได้จาก รูปที่ 2.6 ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นต้นกำเนิด คือ สไตรีน (ภาพ ก) เมื่อหลายโมเลกุลมาต่อกัน จะเป็นโพลีเมอร์โซ่ยาว (ภาพ ข) การต่อกันเป็นสามมิติเกิดขึ้นได้เมื่อมีตัวประสาน คือ Divinylbenzene (ดูภาพ ค) ทำให้ได้โครงร่างของเรซิน (ดูภาพ ง) ซึ่งยังไม่มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน การเติมหมู่ไอออน เช่น $-\text{SO}_3\text{H}$ (ซัลโฟนิก) ทำให้ได้เรซินที่มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างสมบูรณ์ (ดูภาพ จ)

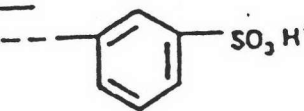
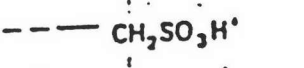
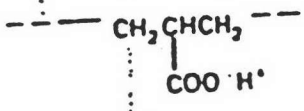


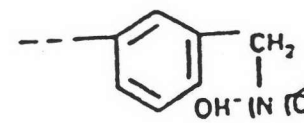
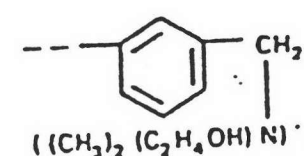
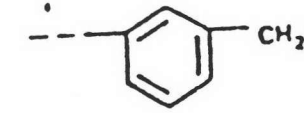
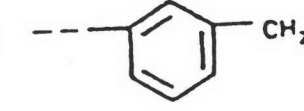
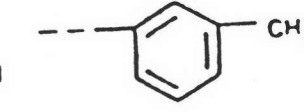



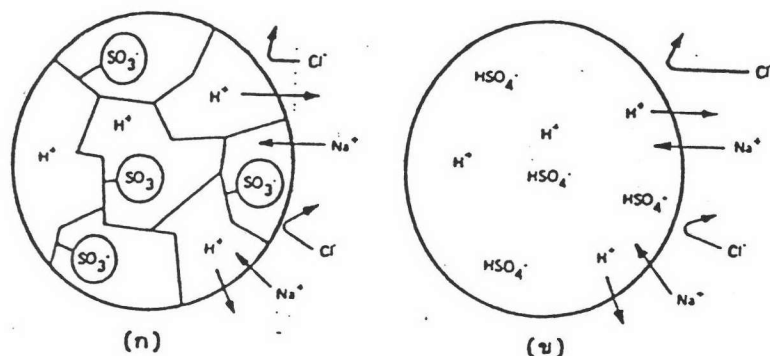
รูปที่ 2.7 โมเดลของโครงสร้างภายในของเม็ดเรซิน

การบวมหรือพองน้ำของเรซินที่มี Degree of Crosslinkage ต่ำๆ ทำให้ปริมาตรของเรซินเพิ่มขึ้นได้มาก ดังนั้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนต่อปริมาตร (เช่น meq/ml) จึงมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นตามการลดหรือเพิ่มของ Degree of Crosslinkage เรซินที่มี % DVB สูง จึงมีขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (คิดต่อปริมาตร) สูงกว่าเรซินชนิดเดียวกันที่ % DVB ต่ำ

หมู่ไอออน (Functional Group) ของเรซิน เป็นตัวกำหนดพฤติกรรมต่างๆ ของเรซิน เช่น ความสามารถหรืออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น หมู่ไอออนที่เกาะจับอยู่บนโครงร่างไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 2.6) ทำให้เรซินมีประจุบวกหรือลบ การจำแนกประเภทของเรซินออกเป็น 4 ประเภท ก็เป็นไปตามชนิดของหมู่ไอออนนี้เอง (ตารางที่ 2.1) ยกตัวอย่าง เช่น หมู่ซัลโฟนิค ($-\text{SO}_3^-$) หรือหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COO}^-$) ทำให้เรซินมีประจุลบประจำตัวและเรียกว่า Cationic Resin ซึ่งใช้ในการกำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ ส่วนหมู่อามีน (Amine) ชนิดต่างๆ เช่น RRNH_2^+ ทำให้เรซินมีประจุบวกประจำตัวและเรียกว่า Anionic Resin สามารถใช้กำจัดไอออนลบออกจากน้ำได้

ตารางที่ 2.1 หมู่ไอออนของเรซินประเภทต่าง ๆ

Classification	Active Groups	Dissociation Constant pK_a	Typical configuration
<u>Cation Exchange Resins</u>			
Strong acid:	Sulfonic	1	
	Methylene sulfonic	1	
Weak acid:	Carboxylic	4-6	
	Phosphonic	2-3 7-8	
	Phenolic hydroxyl	9-10	
<u>Anion Exchange Resins</u>			
Strong base:	Quarternary ammonium (type I)	13	
	(type III)		
Weak base:	Primary amine	6-9	
	Secondary amine	7-9	
	Tertiary amine (aromatic matrix)	9-11	
	(aliphatic matrix)		

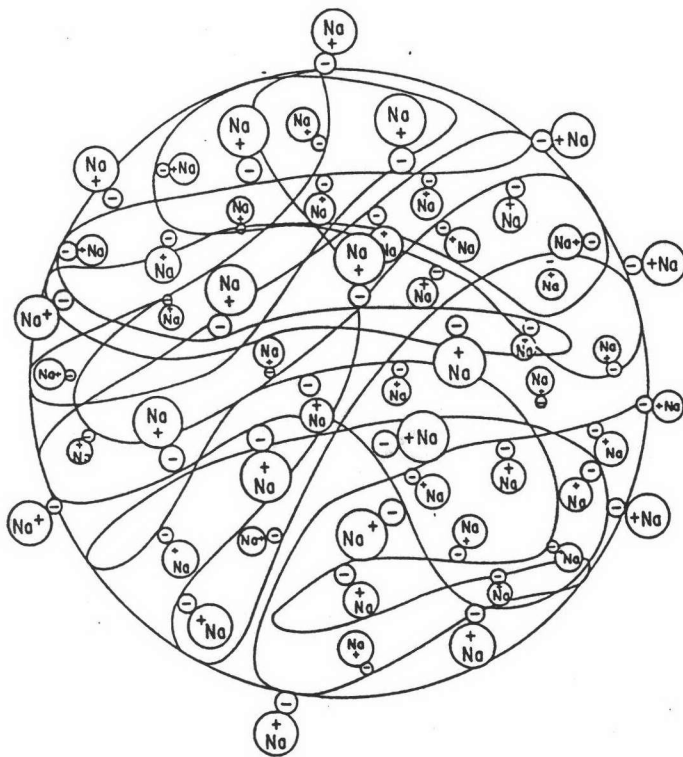


รูปที่ 2.8 กลไกของการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนประจุบวก

รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นถึงการแลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ ของเรซินและ Na^+ ในน้ำหมูซัลโฟนิกประกอบด้วย $-\text{SO}_3^-$ ซึ่งไม่เคลื่อนที่ และ H^+ ซึ่งใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ ภายในเรซินจะมีน้ำอยู่มากกว่า 50 % (แม้ว่าจะเห็นเป็นเรซินแห้ง ๆ ก็ตาม) หมูซัลโฟนิกทำให้สารละลายภายในเรซินมีความเข้มข้นของกรดสูงประมาณ 25 % H^+ หรือไอออนบวกอื่นๆ สามารถเคลื่อนที่เข้า หรือออกจากเรซินได้ จึงทำให้มีการแลกเปลี่ยนไอออนบวก รูปที่ 2.8 ก. แสดงภาพตัดภายในของเรซิน (เป็นจินตนาการ) ส่วนรูป ข. เรซินแบบกรดแก่ อาจเปรียบเทียบได้เป็นหยดสารละลายกรดกำมะถันที่มีเยื่อเมมเบรน ซึ่งยอมให้เฉพาะไอออนบวกผ่านเข้าออก

โครงร่างไฮโดรคาร์บอนและหมู่อิออนที่มีประจุไฟฟ้าจะจับตัวกันเป็นส่วนประกอบถาวรของเรซิน และจำเป็นต้องมีไอออนอิสระที่มีประจุตรงกันข้ามมาทำให้เรซินเป็นกลาง เรซินของใหม่จะมี H^+ , Na^+ , Cl^- , OH^- ตัวใดตัวหนึ่งเป็นไอออนอิสระ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซินและสิ่งที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ ไอออนอิสระนี้จับอยู่กับหมู่อิออน (Functional Group) ของเรซิน (รูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9) อย่างชั่วคราว และพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่น ที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ การที่ไอออนอิสระสามารถอาศัยอยู่ในเรซินได้ ทำให้อาจเรียกเรซินว่า "Solid Solution" (ในทำนองเดียวกับ Liquid Solution หรือ Solution แบบธรรมดา) เนื่องจากความเข้มข้น 1N ใน Liquid Solution หมายถึง มวล 1 สมมูลย์ในสารละลาย 1 ลิตร (1 สมมูลย์/ลิตร) ความเข้มข้นของไอออนอิสระในเรซินจึงนิยมใช้หน่วยเดียวกันนี้ ในทางปฏิบัติถือว่า Cationic Resin มีความเข้มข้นประมาณ 2N ส่วน Anionic Resin (Strong Base) มีความเข้มข้นประมาณ 1.3N ความเข้มข้นไอออนของเรซินดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเรซินมี Na^+ เข้มข้น 2N หรือ 2 สมมูลย์/ลิตร (เท่ากับ 2 eq./l) ย่อมหมายความว่าเรซินมีอำนาจสูงสุดในการแลกเปลี่ยนไอออนได้เท่ากับ 2 สมมูลย์/ลิตร เพราะมี Na^+ จำนวนดัง

กล่าวไว้แลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นๆ ในน้ำ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการแลกเปลี่ยนไอออน จะเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีค่าไม่ถึงค่าความเข้มข้นของไอออนใน เรซิน



รูปที่ 2.9 โมเดลของ Cationic resin

ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เรซินแลกเปลี่ยนไอออน เป็นโครงสร้างพลาสติกที่มีประจุบวกติด ประจำตัว เรซินที่มีประจุลบประจำตัว สามารถบรรจุ Na^+ หรือ H^+ ไว้แลกเปลี่ยนกับไอออนประจุบวกใน น้ำ เรซินชนิดนี้เรียกว่า Cationic Resin ส่วนเรซินที่มีประจุบวกประจำตัว สามารถบรรจุ OH^- และ Cl^- ไว้แลกเปลี่ยนกับประจุลบในน้ำ จึงมีชื่อเรียกว่า Anionic Resin

สรุปได้ว่า เรซินประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลาย ๆ โมเลกุลประสานต่อกันเป็นโครง ร้างซึ่งทำให้เรซินคงสภาพดังที่เห็นได้ แต่ส่วนที่ทำให้เรซินมีอำนาจแลกเปลี่ยนไอออนของน้ำได้นั้น เป็นหมู่ไอออนซึ่งมีส่วนหนึ่งเกาะติดอยู่กับโครงร่างและไม่เคลื่อนที่ อีกส่วนหนึ่งเป็นไอออนที่ เคลื่อนที่ได้และเป็นส่วนที่ใช้แลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในน้ำ

2.9 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

หากจะเปรียบเทียบอย่างง่าย ๆ แต่ชัดเจน เรซินแต่ละชนิดสามารถเปรียบเสมือนกับกรดหรือด่างซึ่งมีทั้งอ่อนและแก่ ความแตกต่างที่ต้องตระหนักไว้ คือกรดและด่างเป็นของเหลว แต่เรซินเป็นของแข็ง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า เรซินเป็นกรดหรือด่างชนิดแข็ง ความแตกต่างอีกประการหนึ่ง คือ ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่ได้ สำหรับในกรณีของกรดหรือด่างธรรมดา ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาจะยังคงอยู่ในน้ำ แต่ปฏิกิริยาของเรซินนั้น ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาที่ได้ยังคงอยู่กับเรซิน นั่นคือ ผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาเป็นของแข็ง

จากการที่เรซินเปรียบเทียบได้กับกรดหรือด่าง ทำให้มีการแบ่งประเภทของเรซิน ตามความเป็นกรดหรือด่างได้ 4 ชนิด ดังนี้

เรซินแบบกรดแก่	(Strong Acidic Cationic Resin)	ตัวย่อ	SC
เรซินแบบกรดอ่อน	(Weak Acidic Cationic Resin)	ตัวย่อ	WC
เรซินแบบด่างแก่	(Strong Basic Anionic Resin)	ตัวย่อ	SB
เรซินแบบด่างอ่อน	(Weak Basic Anionic Resin)	ตัวย่อ	WB

ตารางที่ 2.3 เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของเรซินทั้ง 4 ชนิด

เรซินทั้งสี่แบบนี้จะมีไอออนประจำตัวดังนี้

SC	$-\text{SO}_3^-$
WC	$-\text{COO}^-$
SB	$-\text{NR}_3^+$
WB	$-\text{NH}_2, -\text{NHR}, -\text{NR}_2$

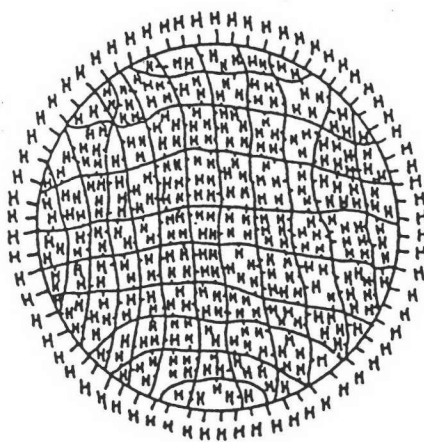
โครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกัน แตกต่างกันก็ที่ชนิดของไอออนกรุปที่ติดประจำกับเรซินเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติสำคัญของเรซินทั้ง 4 ประเภท

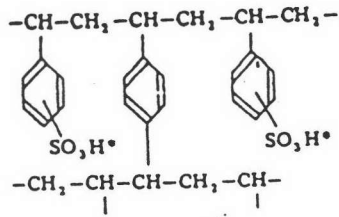
Type Resin	Functional Group	Drained Density		Operating pH Range	Maximum Exchange Capacity			Regeneration	Trade Name Example
		lb/ft ³	kg/m ³		me/g	me/ml	kg/ft ³		
Strong Acid	-SO ₃ -H ⁺ Sulfonic acid	49-53	790-850	0-14	4.8	2.0	43.7	Excess strong acid	Duolite C-20 Amberlite 120 Dowex 50
Weak Acid	-COO ⁻ H ⁺ Carboxylic acid	45	720	7-14	11	4.5	98.3	Weak or strong acid	Duolite C-433 Amberlite IRC-50 Zeo Carb 226
Strong Base Type I	-CH ₂ N(CH ₃) ₃ + OH ⁻ Quaternary ammonium	45	720	0-14	4.3	1.3	28.4	Excess strong base	Amberlite IRA-410 Duolite A-101 D
Strong Base Type II	-CH ₂ N(CH ₃) ₂ CH ₂ CH ₂ OH ⁻ OH ⁻ Modified quaternary ammonium	45	720	0-14	3.4	1.4	30.6	Excess strong base	Amberlite IRA 140 Duolite A-102 D
Weak Base	-N(CH ₃) ₃ H ⁺ OH ⁻ Tertiary amine	32	510	0-6	9	2.5	54.6	Weak or strong base	Duolite A-7 Amberlite IRA-93
Intermediate Base	Mix of above two	43	690	0-14	8.8	2.7	59.0	Strong base	Duolite A-30B

2.10 เรซินแบบกรดแก่

หน้าที่ของเรซินแบบกรด (ทั้งแก่และอ่อน) คือใช้ไอออนบวกของตัวเอง (มักเป็น H⁺ หรือ Na⁺) แลกกับไอออนที่ต้องการกำจัดออกจากน้ำ เช่น Ca⁺², Mg⁺² เป็นต้น H⁺ หรือ Na⁺ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ได้ของหมู่ไอออนของเรซิน ยกตัวอย่าง เช่น เรซินแบบกรดแก่จะมีหมู่ซัลโฟนิค หรือ -SO₃⁻ เป็นหมู่ไอออน ซึ่งจับติดอยู่กับโครงไฮโดรคาร์บอน หมู่ซัลโฟนิคนี้อาจอยู่ในรูปของ H⁺ ดังเช่น -SO₃H⁺ หรือ อยู่ในรูปของ Na⁺ เช่น -SO₃Na⁺ ก็ได้ -SO₃⁻ จะเป็นส่วนที่ไม่ใช้ในการแลกเปลี่ยน มีแต่ H⁺ หรือ Na⁺ เท่านั้นที่ใช้แลกกับไอออนบวกที่อยู่ในน้ำ (รูปที่ 2.12)

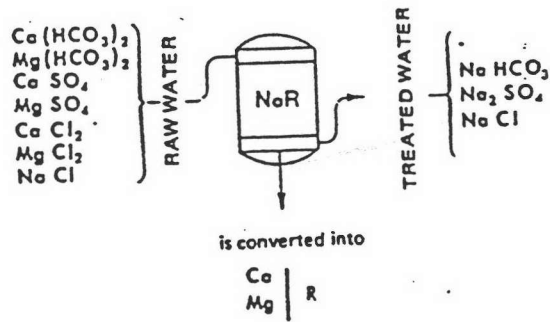


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของเรซิน SC เมื่ออยู่ในสภาพที่แตกตัว



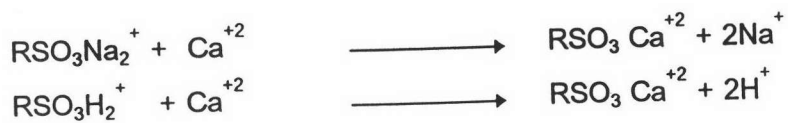
* เรซินที่ขายอยู่ในรูปของโซเดียม(Na)

รูปที่ 2.11 โครงสร้างแบบหนึ่งของเรซิน SC



รูปที่ 2.12 การเปลี่ยน Na⁺ ของเรซินแบบกรดแก่ กับไอออนบวกทุกตัวที่อยู่ในน้ำ (สิ่งที่ไม่เปลี่ยนแปลงคือ ไอออนลบในน้ำ)

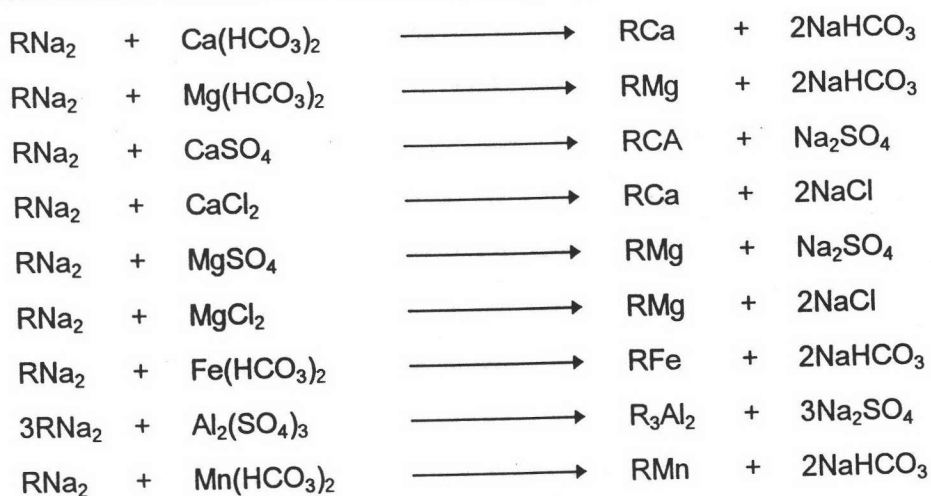
ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดแก่ที่มี Na⁺ และ H⁺ เป็นดังนี้คือ



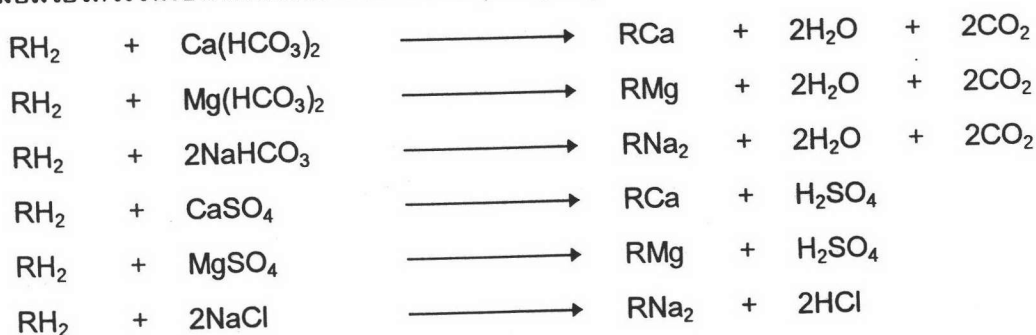
ตารางที่ 2.4 เป็นการรวบรวมสมการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ที่มักเกิดขึ้นในน้ำธรรมชาติ

ตารางที่ 2.4 สมการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่เกิดจากการใช้เรซินแบบกรดแก่

ก. เมื่อมีโซเดียมเป็นไอออนอิสระของเรซิน (Na Cycle)



ข. เมื่อมีไฮโดรเจนเป็นไอออนอิสระของเรซิน (H Cycle)



เรซินทุกชนิดจะหมดอำนาจเมื่อใช้งานไปชั่วระยะหนึ่ง แต่สามารถเรียกอำนาจกลับคืนมาได้อีก โดยการทำรีเจนเนอเรชัน เรซินที่อยู่ในรูปของ Na^+ จะต้องรีเจนเนอเรตด้วยเกลือแกง (NaCl) ดังนี้



ส่วนเรซินที่อยู่ในรูปของ H^+ จะต้องมีรีเจนเนอเรตด้วยกรดแก่ (H^+) ดังนี้



เรซินแบบกรดแก่มีข้อดีหลายประการ เช่น

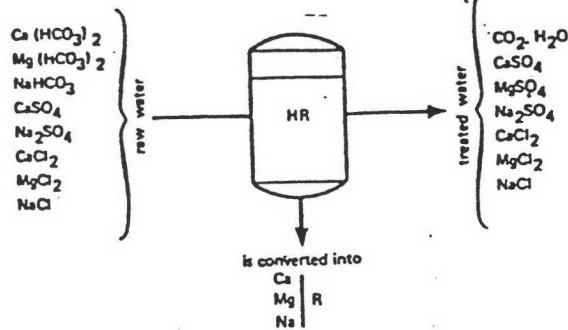
- ก) ใช้ได้ดีกับน้ำที่มีพีเอชทุกระดับ
- ข) สามารถแยก Na^+ จากเกลือแคงได้ อำนวยเช่นนี้เรียกว่า Salt Splitting
- ค) มีการรั่วของไอออนบวกที่ต้องการกำจัด เช่น Ca^{+2} เป็นต้น เกิดขึ้นน้อย
- ง) สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้รวดเร็ว
- จ) มีความคงทน อาจใช้ได้นานถึง 20 ปี หรือนานกว่า โดยเกิดการสูญเสีย อำนวยขึ้นเพียงเล็กน้อย
- ฉ) การเปลี่ยนรูปของ Na^+ ในเรซินให้เป็น H^+ ทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นเพียง 7% (พองน้ำ)
- ช) เหมาะสำหรับใช้กำจัดความกระด้างหรือในการทำน้ำบริสุทธิ์ (Demineralization)

ข้อเสียที่สำคัญ คือ มีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันต่ำ (ประมาณ 25-45%) ทำให้ต้องเปลืองสารเคมีในการทำรีเจนเนอเรชัน

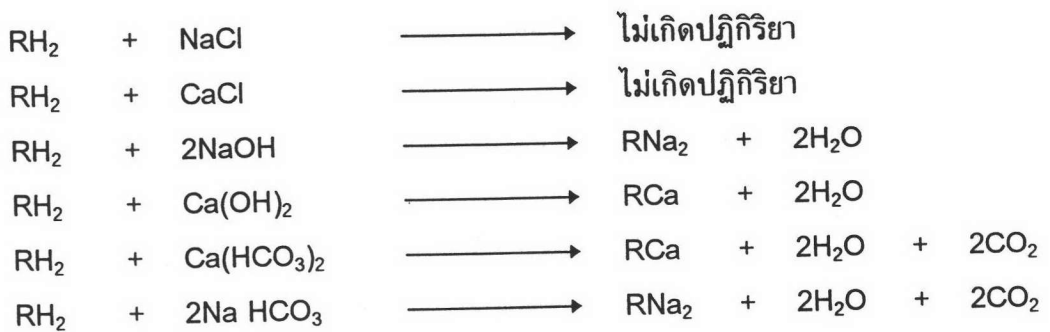
2.11 เรซินแบบกรดอ่อน

เรซินแบบนี้แตกต่างจากเรซินแบบกรดแก่ตรงที่ตัวหมู่ไอออน กล่าวคือ ในขณะที่เรซินแบบกรดแก่มีหมู่ซัลโฟนิค เรซินแบบกรดอ่อนมีหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$ หรือ $-\text{COONa}$) หมู่ซัลโฟนิคอาจเทียบเท่ากับกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งเป็นกรดแก่ ส่วนหมู่คาร์บอกซิลิกอาจเทียบเท่ากับกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งเป็นกรดอ่อน

เรซินชนิดนี้แตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดทำให้ไม่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออน กับเกลือที่ได้จากกรดแก่ เช่น CaCl_2 , CaSO_4 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันสูงถึง 90% โดยใช้กรดแก่หรือกรดอ่อนหรือเกลือแคงเป็นตัวรีเจนเนอเรนต์ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแบบกรดแก่ประมาณ 2 เท่า และทนต่อสารออกซิแดนต์ (เช่น คลอรีน) ได้ดีกว่าด้วย มีการรั่วของแคลเซียมต่ำ แต่ยอมให้โซเดียมรั่วหนีได้มาก ถ้าเปลี่ยนเรซินที่เป็น Na^+ ให้เป็น H^+ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้นมาก (เนื่องจากพองน้ำ)

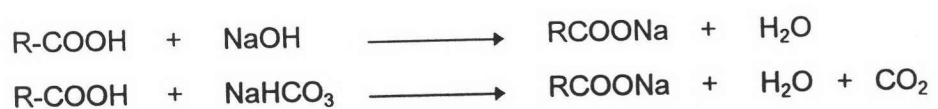


รูปที่ 2.13 การแลกเปลี่ยน H^+ ของเรซินแบบกรดอ่อนกับไอออนบวกบางตัวในน้ำ ตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออน (ดูรูปที่ 2.13 ประกอบด้วย)



ขอให้สังเกตว่า ไอออนบวกที่อยู่กับ SO_4^{2-} และ Cl^- ผ่านถึงเรซินโดยไม่ถูกแลกเปลี่ยน ซึ่งหมายความว่า เรซินแบบกรดอ่อนกำจัดได้เฉพาะความกระด้างชั่วคราว แต่ไม่กำจัดความกระด้างถาวร จะเห็นได้ว่า เรซินแบบกรดอ่อนนี้ สามารถกำจัดความเป็นด่าง (Alkalinity) ออกจากน้ำได้ โดยไม่ต้องมีการเติมกรดเลย ส่วนปฏิกิริยารีดอกซ์ของเรซินแบบกรดอ่อนเป็นเช่นเดียวกับของเรซินแบบกรดแก่

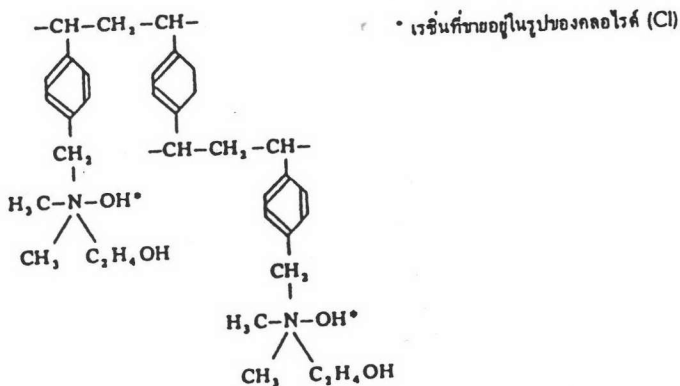
สมการการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินแบบกรดอ่อนข้างบนใช้ RH_2 เขียนแทนรูปของเรซิน เราอาจเขียน R-COOH แทนได้เช่นกันคือ



ลักษณะสมบัติที่ดีของเรซินชนิด WC คือ ฟีนฟูประสิทธิภาพให้อยู่ในรูปเต็ม (รูปที่มี H) ได้ง่ายและในการฟื้นฟูก็ต้องการปริมาณกรดล้างน้อยกว่าแบบ SC มากพอควร แต่มีข้อเสียก็คือ ปลดปล่อยไอออนที่จับไว้ได้โดยง่าย เช่น การที่มีน้ำบริสุทธิ์ไหลผ่านก็จะปล่อยไอออนโซเดียมออกมา

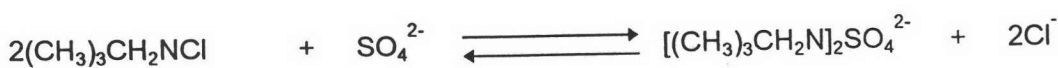
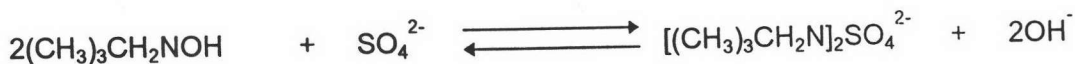
2.12 เรซินแบบต่างแก็

เรซินแบบต่างแก็มีหน้าที่หลักคือ ไขไอออนลบของตน (มักเป็น OH⁻ หรือ Cl⁻) แลกกับไอออนลบในน้ำที่ต้องการกำจัดออก เช่น HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ เป็นต้น หมู่ไอออนของเรซินแบบต่างแก็มักเป็น Quaternary Amine (รูปที่ 2.14) ตัวอย่าง เช่น (CH₃)₃CH₂N⁺ ไอออนอิสระมักเป็น Cl⁻ หรืออาจเป็น OH⁻



รูปที่ 2.14 โครงสร้างแบบหนึ่งของเรซิน SB

ปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนไอออนและรีเจนเนอเรชัน เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับซึ่งกันและกัน ดังนี้



สารรีเจนเนอเรนต์อาจเป็น NaCl หรือ HCl หรือ NaOH ทั้งนี้แล้วแต่ว่าเรซินอยู่ในรูปใด

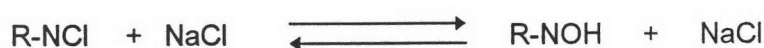
การกำจัดความเป็นต่างออกจากน้ำ อาจใช้เรซินแบบต่างแก็ที่อยู่ในรูป Cl⁻ (เรซินในรูป OH⁻ ใช้ไม่ได้) และใช้ NaCl เป็นสารรีเจนเนอเรนต์ วิธีนี้สามารถกำจัดความเป็นต่างได้โดยไม่ต้อง

ใช้กรด เรซินแบบต่างแก่ที่อยู่ในรูป Cl^- สามารถกำจัด SO_4^{2-} ได้เช่นเดียวกับความเป็นต่างชนิด HCO_3^- แต่การกำจัด SO_4^{2-} มักไม่มีความจำเป็น ดังนั้นการใช้เรซินแบบนี้เพื่อกำจัด HCO_3^- จึงสิ้นเปลืองเกินกว่าความจำเป็น

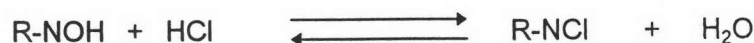
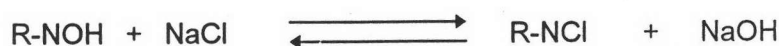
เรซินแบบต่างแก่ สามารถใช้ได้ดีที่พีเอชทุกระดับ และมีความสามารถในการแยกเกลือด้วย (Salt Splitting) ความสามารถทั้งสองข้อนี้ นับว่าเหนือกว่าเรซินแบบต่างอ่อน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชัน ต่ำเพียง 18-33 % ทำให้ต้องเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์มาก นอกจากนี้เรซินแบบต่างแก่มีความคงทนต่ำทำให้มีอายุการใช้งานสั้น กรดฮิวมิกที่เกิดจากการนำเปื่อยของพืชสามารถทำให้เรซินเสียหายและไม่สามารถทำรีเจนเนอเรชันได้ บางครั้งถ้าใช้งานหนัก เรซินอาจมีอายุไม่เกิน 3 ปี

นอกจากการแลกเปลี่ยนไอออนลบแล้ว เรซินแบบต่างแก่ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนซิลิกาและ CO_2 อีกด้วย

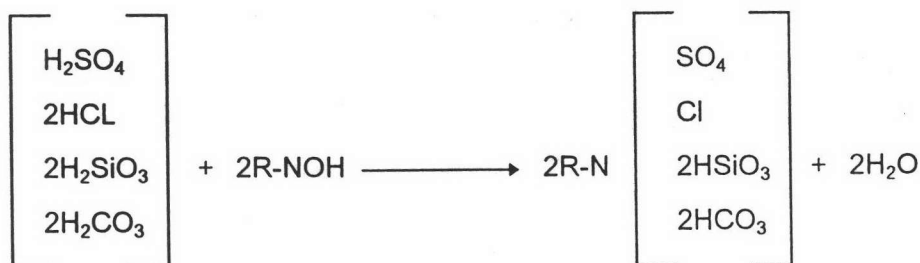
เรซินแบบ SB ที่ใช้จะขายในรูปของคลอไรด์ (R-NCl) ทั้งนี้เพราะมีเสถียรภาพสูงกว่าในการใช้งาน ถ้าต้องการใช้ในรูป R-NOH ก็ต้องล้างหรือฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินด้วยด่างโซดาไฟก่อน



ถ้านำเรซินชนิด SB ใส่ลงในสารละลายของเกลือแกงและกรดเกลือจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



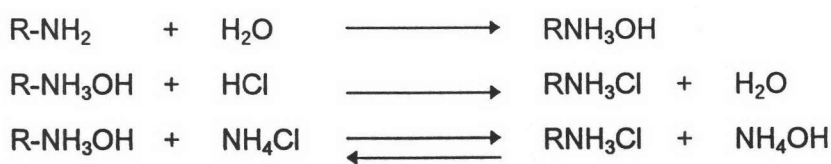
เรซินชนิด SB ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์จะจับไอออนประจุลบซึ่งเป็นกรดอนินทรีย์ได้ดี



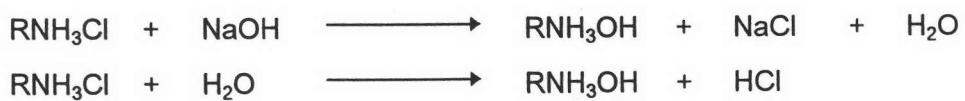
เรซินชนิด SB เมื่อใช้แล้วต้องใช้ด่างโซดาไฟล้างจึงจะกลับคืนสู่สภาพเดิม

2.13 เรซินแบบต่างอ่อน

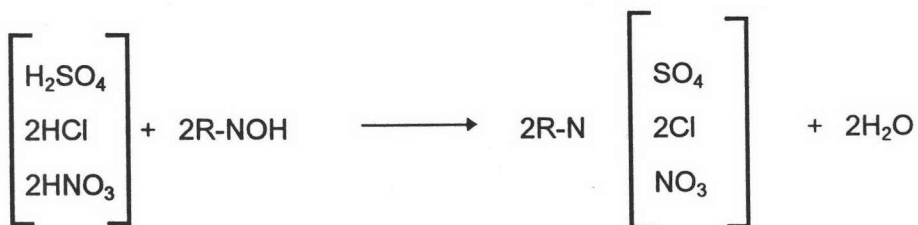
การกำจัดไอออนลบของเรซินแบบนี้ นับว่าแตกต่างจากเรซินอีก 3 ประเภท เนื่องจากไม่ได้มีการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินชนิดนี้กำจัดได้เฉพาะกรดแก่ เช่น HCl, H₂SO₄, HNO₃ ออกจากน้ำ แต่ไม่สามารถกำจัดกรดอ่อนและเกลือ เช่น CO₂, SiO₂, NaCl เป็นต้น การกำจัดกรดแก่เกิดขึ้นโดยที่กรดแก่ทั้งโมเลกุลเข้ามาจับกับเรซิน



การล้างเรซินชนิดนี้กระทำได้ง่าย ถ้าไม่ใช้ต่างโซดาไฟ จะใช้โซดาแอชและน้ำแอมโมเนีย NH₄OH ล้างก็ได้ แม้ว่ามีข้อดีคือล้างได้ง่ายแต่ข้อเสียคือทำปฏิกิริยากับน้ำและปล่อยไอออนที่จับไว้ได้ง่ายเช่นกัน



เรซินชนิด WB ใช้จับไอออนประจุลบของกรดแก่หรือ FMA (free mineral acid) ได้



เรซินชนิดนี้จะไม่จับไอออนของกรดอ่อน เช่น กรดคาร์บอนิก กรดซิลิสิก ในการใช้งาน จะใช้คู่กับ SB เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการล้างฟื้นฟูประสิทธิภาพของเรซินและดักจับสารอินทรีย์ทั้งหลายไม่ให้ไปอุดตันเม็ดเรซิน SB หรือใช้ในงานที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซิลิกาไม่มีความสำคัญมากนัก

โดยปรกติเรซินแบบต่างอ่อนมักใช้การกำจัด Cl⁻ และ SO₄⁻ ข้อดีมีหลายประการ เช่น ประสิทธิภาพในการทำรีเจนเนอเรชันสูงเกือบ 100% ทำให้เปลืองสารเคมีน้อย และยังสามารถใช้

Na₂CO₃ ได้ (ราคาถูกกว่า NaOH) ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสูง (แต่อัตราเร็วของปฏิกิริยาต่ำ) นอกจากนี้ยังทนต่อกรดฮิวมิกได้

2.14 คุณสมบัติทั่วไปของเรซิน

เพื่อให้มีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง เรซินควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- (ก) ต้องมีไอออนอิสระที่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนในน้ำ
- (ข) ต้องไม่ละลายน้ำ
- (ค) ต้องมีช่องว่างภายในโครงไฮโดรคาร์บอนอย่างพอเพียง เพื่อให้ไอออนชนิดต่าง ๆ เคลื่อนที่ผ่านเข้าและออกได้อย่างสะดวก

เรซินทั่วไปมีลักษณะกลมและขนาดใกล้เคียงทรายกรอง แต่ไม่แข็งเท่าและไม่หนักเท่า ตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของเรซินโพลีสไตรีนชนิดหนึ่ง

ตารางที่ 2.5 ลักษณะสมบัติทั่วไปของเรซินโพลีสไตรีนเชิงพาณิชย์ชนิดหนึ่ง

Appearance	White to reddish-brown
Form	Spheres
Cross linking, % DVB	8-12
Specific gravity	1.3 ±
Net weight as shipped, lb/cu ft	50-53
Moisture content as shipped, % by wt	35-50
Void volume, %	30-40
Effective size, mm	0.45-0.55
Uniformity coefficient	1.5-1.75

Sieve analysis (wet): U.S. Standard Sieve No. retained on	Range, % by volume	Typical, % by volume
16	2-5	3.7
20	20-35	36.3
30	35-55	42.1
40	12-22	14.3
50	0-4	3.1
-50	0-1	0.5

2.15 ความชื้นของเรซิน

ความสามารถในการเก็บกักน้ำไว้ในตัว มีความสำคัญต่ออำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน เรซินมีความชื้นสูงถ้าเก็บกักน้ำไว้ในช่องว่างได้มาก และจะมีความชื้นต่ำถ้ามีช่องว่างน้อย ความสามารถในการเก็บกักน้ำ จะแสดงให้เห็นได้จากการบวมหรือพองน้ำของเรซินเมื่อวางแช่อยู่ในน้ำ การเคลื่อนที่ของน้ำผ่านเข้าและออกจากช่องว่างของเรซินเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อพาไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำซึมเข้าไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอิสระของเรซิน ระดับการบวมน้ำขึ้นอยู่กับระดับของการประสาน (Degree of Crosslinkage) ของโครงไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 2.6 และ 2.7) ซึ่งทำให้เรซินมีลักษณะเป็นเม็ดแข็ง ดังเช่นที่เป็นอยู่ ถ้าไฮโดรคาร์บอนยึดเหนี่ยวกันไม่แน่น ช่องว่างภายในจะมีมาก จึงเก็บกักน้ำได้มาก เป็นผลให้เรซินมีความชื้นภายในสูงและมีโอกาสบวมน้ำได้มาก ที่สำคัญคือ ความสามารถ (คิดต่อปริมาตรของเรซิน) ในการแลกเปลี่ยนไอออนจะต่ำ การออกแบบถังเรซินชนิดที่การประสานระหว่างไฮโดรคาร์บอนต่ำ จะต้องคำนึงถึงสภาพการหดตัวและพองตัวของเรซิน ที่เกิดในขั้นตอนรีเจนเนอเรชันและระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน ในทางตรงกันข้ามเรซินที่มีการประสานระหว่างไฮโดรคาร์บอนสูง จะมีความสามารถ (คิดต่อปริมาตร) ในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง มีความชื้นน้อยและพองตัวน้อย อย่างไรก็ตามถ้าการประสานดังกล่าวสูงเกินไปจนทำให้ช่องว่างภายในเรซินเหลือน้อย การแลกเปลี่ยนไอออนอาจไม่สามารถเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากไอออนไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าออกได้สะดวก และยังอาจทำให้เรซินเปราะและแตกได้ง่ายอีกด้วย

2.16 ความหนาแน่นปรากฏ (BULK DENSITY)

ความหนาแน่นของเรซิน คือความหนาแน่นปรากฏที่วัดหลังจากผ่านการล้างย้อนตกตะกอนและปล่อยให้สะเด็ดน้ำแล้ว ซึ่งหมายถึงน้ำหนักของเรซิน ทารด้วยปริมาตรทั้งหมดของชั้นเรซิน ซึ่งรวมช่องว่างที่เกิดระหว่างเม็ดของเรซิน ความหนาแน่นปรากฏนี้เรียกว่า Bulk Density หรือ Shipping Weight เพราะเป็นข้อมูลสำหรับเวลาขนส่งเรซิน เนื่องจากบอกได้ว่าเรซิน 1 หน่วยปริมาตรมีน้ำหนักเท่าใด พารามิเตอร์ที่มีความหมายคล้ายกับความหนาแน่น คือ ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) โดยปกติเรซินจะมี (ถ.พ.) โดยปกติเรซินจะมี ถ.พ. ประมาณ 1.3 ซึ่งต่ำกว่า ถ.พ. ของทรายกรอง (ถ.พ. 2.65) มาก ทั้งนี้เพราะภายในเม็ดเรซินมีน้ำอยู่ประมาณ 40-50%

2.17 ขนาดประสิทธิผล (EFFECTIVE SIZE) และ สัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ (UNIFORMITY COEFFICIENT)

ขนาดของเรซินสามารถบอกได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือ ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ของความสม่ำเสมอ ซึ่งมีความหมายเหมือนกับที่ใช้กับทรายกรอง นอกจากนี้ขนาดของเรซินก็ใกล้เคียงกับขนาดของทรายกรองอีกด้วย บางครั้งขนาดของเรซินอาจบอกได้โดยอาศัยเบอร์ของตะแกรงร่อน เช่นผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ได้แต่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 40 เป็นต้น (ดูตารางที่ 2.5)

2.18 ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน

ในการออกแบบระบบแลกเปลี่ยนไอออน หรือคัดเลือกชนิดของเรซินให้เหมาะกับงานสิ่งที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ คือ ขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน (Ion Exchange Capacity) ทั้งนี้เพราะพารามิเตอร์ตัวนี้มีบทบาทอย่างสำคัญยิ่งในการกำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการและราคาของระบบ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินหมายถึง ปริมาณไอออนที่เรซินแลกเปลี่ยนจากน้ำ (มักใช้หน่วยสมมูลย์ หรือวัตในหน่วยกิโลเกรนของหินปูน) ต่อหน่วยน้ำหนัก หรือหน่วยปริมาตรของเรซิน หน่วยแสดงขีดความสามารถของเรซินจึงอาจเป็นได้หลายแบบ ดังนี้

- (ก) หน่วยสมมูลย์ต่อปริมาตรของเรซิน เช่น meq/ml, eq/l
- (ข) หน่วยสมมูลย์ต่อน้ำหนักของเรซิน เช่น meq/g
- (ค) หน่วยน้ำหนัก (ในเทอมหินปูน) ต่อปริมาตรของเรซิน เช่น กิโลเกรนต่อลิตร หรือ กิโลเกรนต่อ ลบ.ฟุต หรือ กรัม CaCO_3/l

2.19 วัฏจักรการทำงาน of ระบบแลกเปลี่ยนไอออน

ระบบแลกเปลี่ยนไอออนอาจทำงานแบบงวดๆ (Batch) หรือ แบบต่อเนื่องก็ได้ การทำงานแบบต่อเนื่องนี้ หมายถึงการทำงานแบบคอลัมน์ซึ่งมีเรซินบรรจุอยู่ในถังและปล่อยให้น้ำดิบไหลผ่านชั้นเรซินอย่างต่อเนื่อง ทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นตลอดเวลา การทำงานแบบนี้ได้รับความนิยมมากกว่าแบบงวดมาก การทำงานแบบต่อเนื่องยังมี 3 ลักษณะ คือ แบบธรรมดาซึ่งชั้นเรซินอยู่นิ่งกับที่ , แบบชั้นเรซินมีการขยายตัวตลอดเวลา, และแบบชั้นเรซินค่อยๆ เคลื่อนที่ออกจากถังบรรจุ ในระหว่างที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้จะสนใจเฉพาะการทำงานต่อเนื่องแบบธรรมดา ซึ่งมีน้ำไหลผ่านชั้นเรซิน (อยู่นิ่งกับที่) จากข้างบนลงล่างเท่านั้น

ในขณะที่ถังกรองน้ำมีวัฏจักรการทำงานเพียง 2 ขั้นตอน คือ กรองน้ำและล้างย้อนถัง เรซินมีการทำงานถึง 4 ขั้นตอน ต่อเนื่องกัน คือ

- 1) การแลกเปลี่ยนไอออน (Service)
- 2) การล้างย้อน (Backwash)
- 3) การรีเจนเนอเรชัน (Regeneration)
- 4) การชะล้าง (Rinse)

1) การแลกเปลี่ยนไอออนหรือการบริการ

ขั้นตอนนี้ ถือเป็นหน้าที่หลักของเรซิน กล่าวคือ ไอออนอิสระ (ที่เคลื่อนที่ได้อย่างเสรี) ในเรซิน จะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่น ๆ ในน้ำดิบ ทำให้ได้น้ำสะอาดตามต้องการ ขั้นตอนนี้จะยุติลงเมื่อมีไอออนอิสระในเรซินเหลือน้อย จนกระทั่งไม่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนต่างๆ ในน้ำดิบได้ ทำให้น้ำที่ได้เริ่มมีไอออนที่ไม่ต้องการในปริมาณเข้มข้นกว่าระดับที่ยอมรับได้ คาบเวลาในแต่ละวัฏจักรของเรซินขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนในน้ำดิบ และขีดความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ผู้ออกแบบอาจกำหนดคาบเวลาของเรซินในแต่ละวัฏจักรได้ เช่น 24 ชม. เป็นต้น

2) การล้างย้อน

หลังจากเรซินหมดอำนาจแล้ว (แต่ยังไม่เสียหาย) ต้องทำการล้างย้อนเพื่อให้ชั้นเรซินมีการขยายตัวเกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- (1) ทำลายการจับตัวเป็นก้อนของเรซิน ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ ในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน
- (2) เพื่อล้างความขุ่นหรือตะกอนแขวนลอยที่ติดอยู่ในชั้นเรซิน
- (3) กำจัดฟองอากาศที่อาจเกิดขึ้นและค้างอยู่ในชั้นเรซิน
- (4) ทำให้มีการเรียงตัวใหม่ในชั้นของเรซิน ซึ่งช่วยให้การกระจายน้ำผ่านชั้นเรซินเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอในระหว่างการแลกเปลี่ยนไอออน

อัตราไหลในการล้างย้อนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน, อุณหภูมิของน้ำ, และระดับการขยายตัวของชั้นเรซิน (รูปที่ 2.16) โดยปกติอัตราการไหลในการล้างย้อนชั้นเรซินแบบกรดและด่าง มักมีค่าประมาณ 6 และ 3 แกลลอน/นาที่-ตร.ฟุต (หรือ 0.4074 และ 0.2037 ลบ.ชม./วินาที-ตร.ชม) ตามลำดับและใช้เวลาประมาณ 5-15 นาที การล้างย้อนทำให้ชั้น

เรซินแบบกรดและแบบด่างขยายตัวประมาณ 50-75% และ 75-100% ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้อง ออกแบบให้ถังเรซินแบบด่างมี Free Board มากกว่าของถังเรซินแบบกรดเสมอ

3) การรีเจนเนอเรชัน (การฟื้นฟูอำนาจ)

การรีเจนเนอเรชัน หมายถึง การทำให้เรซินที่หมดอำนาจไปแล้วกลับฟื้นตัวและมีอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนใหม่อีก การที่เรซินหมดอำนาจ (ชั่วคราว) เป็นเพราะว่าไอออนอิสระส่วนใหญ่ในเรซินถูกนำไปแลกเปลี่ยนกับไอออนอื่นในน้ำจนหมดสิ้น การรีเจนเนอเรชัน ได้แก่การขับไล่ไอออนในเรซินที่แลกเปลี่ยนได้จากน้ำ และเติมไอออนอิสระให้กับเรซิน ทำให้เรซินกลับคืนสู่สภาพเดิมและอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนอีกครั้งหนึ่ง สารเคมีที่ใช้เติมไอออนอิสระให้กับเรซินที่เสื่อมอำนาจไปแล้ว เรียกว่า สารรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ตัวอย่างของ สารรีเจนเนอเรนต์ ได้แก่ NaCl ซึ่งใช้เติม Na^+ หรือ Cl^- ให้กับเรซิน หรือ H_2SO_4 ซึ่งใช้เติม H^+ ให้กับเรซิน เป็นต้น

ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชัน (Regeneration Efficiency) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างจำนวนสมมูลของไอออนที่จับไว้ในเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้ว และจำนวนสมมูลของไอออนในสารรีเจนเนอเรนต์ที่นำแลกเปลี่ยน ถ้าประสิทธิภาพเท่ากับ 100% หมายความว่า ไอออนที่แลกเปลี่ยนระหว่างกันของสารรีเจนเนอเรนต์กับของเรซินที่เสื่อมอำนาจแล้วมีจำนวนเท่ากัน อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้ว การแลกเปลี่ยนไอออนจากเรซินที่เสื่อมแล้ว มักต้องใช้ไอออนจำนวนมากกว่าสารรีเจนเนอเรนต์ กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันมักมีค่าไม่ถึง 100% เรซินประเภทกรดอ่อนและด่างอ่อน มักมีประสิทธิผลดังกล่าวสูงกว่าของเรซินประเภทกรดแก่และด่างแก่หรืออาจกล่าวได้ว่าเรซินประเภทแรกสิ้นเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์น้อยกว่าเรซินประเภทหลัง

อัตราไหลในการรีเจนเนอเรชัน มักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.25-1 กล./นาที่-ตร.ฟุต (หรือ 0.017-0.068 ลบ.ชม./วินาที-ตร.ชม.) หรือขึ้นอยู่กับข้อมูลทางเทคนิค ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตเรซินแนะนำไว้ สารรีเจนเนอเรนต์มีหลายชนิด (ขึ้นอยู่กับชนิดของเรซิน) เช่น เกลือแกง, โซดาไฟ, โซดาแอช, แอมโมเนีย, กรดเกลือ, และกรดกำมะถัน

ในทางปฏิบัติ มักนิยมทำรีเจนเนอเรชันเพื่อเรียกอำนาจในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินให้กลับคืนมาบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันของเรซินมีค่าต่ำ ดังนั้นการเรียกอำนาจสูงสุดที่เป็นไปได้กลับคืนมา ต้องสิ้นเปลืองสารรีเจนเนอเรนต์อย่างมหาศาล จึงไม่คุ้มค่างับผลตอบแทนที่ได้รับ

รูปที่ 2.18 เป็นตัวอย่างที่ขยายคำอธิบายข้างบนได้เป็นอย่างดี จากรูปจะเห็นได้ว่าถ้าใช้กรดกำมะถัน 10 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต (หรือ 778.3 กรัม/ลิตร) จะได้อำนาจกลับคืนมาเท่ากับ 28 กิโลแอมป์ต่อ ลบ.ฟุต (64.075 กรัม/ลิตร) แต่การเพิ่มกรดกำมะถัน 2 เท่า คือใช้กรด 20 ปอนด์ต่อ ลบ.ฟุต จะได้อำนาจจะคืนเท่ากับ 34.5 กิโลแอมป์ต่อ ลบ.ฟุต หรือเพิ่มขึ้นเป็น 1.23 เท่า เท่า

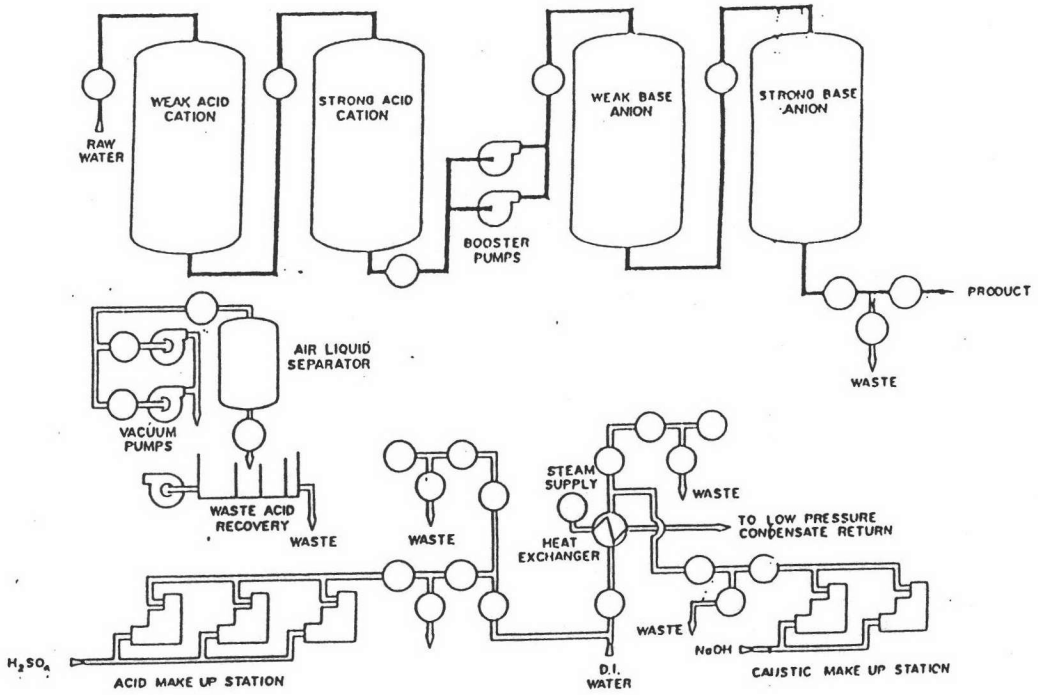
นั้น ปริมาณของสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้เรียกว่า Regeneration Level ซึ่งมีหน่วยเป็นมวลของสารรีเจนเนอเรนต์ต่อปริมาตรของเรซิน เช่น 10 ปอนด์/ลบ.ฟุต เป็นต้น

การป้อนสารรีเจนเนอเรนต์ให้กับเรซินมีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของถังเรซิน (หรือขนาดของระบบ) โดยปกติมักต้องทำให้รีเจนเนอเรนต์เป็นสารละลายเสียก่อน ถ้าเป็นระบบขนาดเล็ก (เช่นมีเรซินไม่เกิน 1,000 ลบ.ฟุต) การป้อนสารละลายมักกระทำโดยใช้ Eductor ซึ่งอาศัยการไหลของน้ำในการดูดสารเคมีเข้าถังเรซิน ระยะเวลาในการดูดสารละลายจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารเคมีที่ต้องใช้ สำหรับระบบขนาดใหญ่ การเติมสารละลายมักนิยมใช้เครื่องป้อนสารเคมี (Chemical Feeder หรือ Metering Pump) เพราะสามารถให้ความถูกต้องและแม่นยำได้มากกว่าวิธีอื่น ๆ

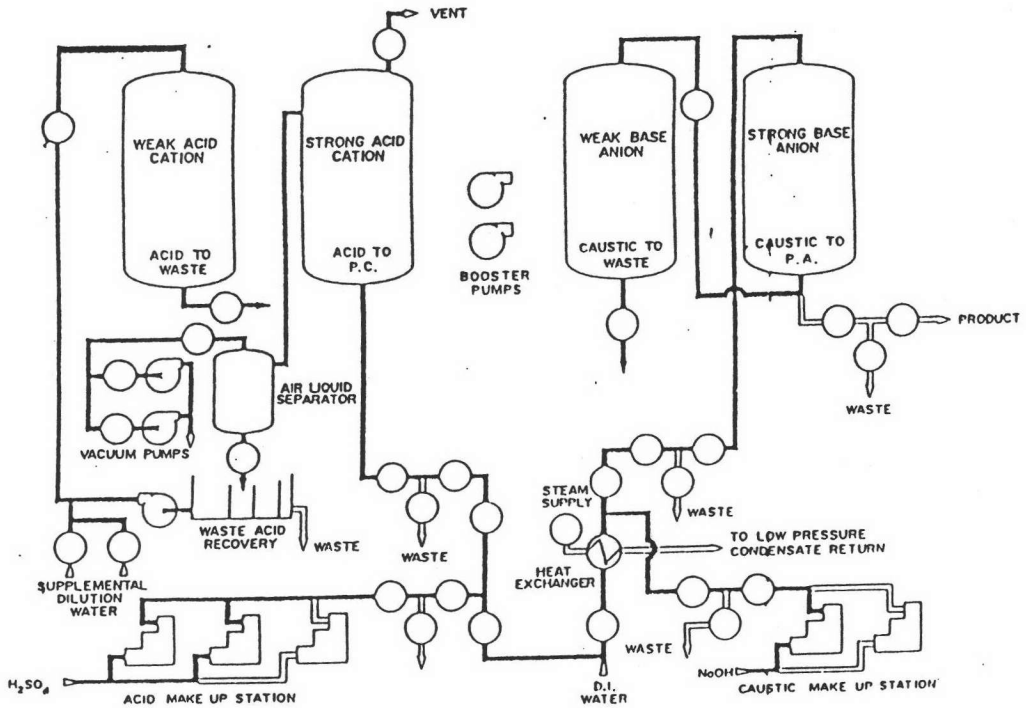
4) การชะล้างสารเคมี (Rinse)

หลังจากผ่านขั้นตอนรีเจนเนอเรชันแล้ว ย่อมมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่ในชั้นเรซิน จึงต้องใช้น้ำสะอาดชะล้างเรซิน เพื่อขับไล่หรือแทนที่สารรีเจนเนอเรนต์ให้หลุดออกจากชั้นเรซิน การชะล้างเรซินมี 2 ขั้นตอน คือ การชะล้างอย่างช้า (Slow Rinse หรือ Displacement Rinse) และการชะล้างอย่างรวดเร็ว (Fast Rinse) การชะล้างอย่างช้าจะทำก่อนโดยปล่อยให้ น้ำประมาณ 1 เท่าของปริมาตรของชั้นเรซิน (Bed Volume) ไหลผ่านชั้นเรซินในอัตราเดียวกับการทำรีเจนเนอเรชัน น้ำล้างในขั้นตอนนี้ถือเป็นน้ำเสียเพราะมีสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้วปนอยู่มาก และต้องนำไปทำการกำจัดพร้อมกับสารละลายรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้แล้ว การชะล้างอย่างรวดเร็วกระทำเพื่อขับไล่สารรีเจนเนอเรนต์ที่ยังตกค้างอยู่ให้หลุดออกจากชั้นเรซินให้หมด เนื่องจากมีสารรีเจนเนอเรนต์ตกค้างอยู่น้อย จึงอาจชะล้างให้เร็วขึ้นได้ อัตราเร็วของการชะล้างอย่างเร็วมักเป็นอัตราเดียวกับอัตราไหลของการแลกเปลี่ยนไอออน (Service Flow Rate) หรือ เท่ากับ 1.5 กล./นาที-ลบ.ฟุต (หรือ 0.102 ลบ.ชม./วินาที-ตร.ชม.) ปริมาตรของน้ำทั้งหมด ที่ใช้ชะล้างสารเคมี มักมีค่าอยู่ในช่วง 25-100 กล./ลบ.ฟุตของเรซิน (หรือ 3.342-13.367 ลิตร/ลิตรของเรซิน)

หมายเหตุ : ในขั้นตอนการเดินเครื่อง การล้างย้อน การรีเจนเนอเรต การชะล้างโดยมากบริษัทผู้ผลิตเรซินมักจัดทำ ข้อมูลทางเทคนิค (Technical Data) ไว้ให้ เช่น อัตราไหลที่เหมาะสมในขั้นตอนต่าง ๆ ระดับรีเจนเนอเรชัน (Regeneration Level) ความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้ ความหนาต่ำสุดของชั้นเบดเรซิน (Minimum bed depth) และ technical/operating data อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับหน่วยที่ใช้กำกับอาจแตกต่างกันไป ในปัจจุบันมักเป็นระบบ SI unit

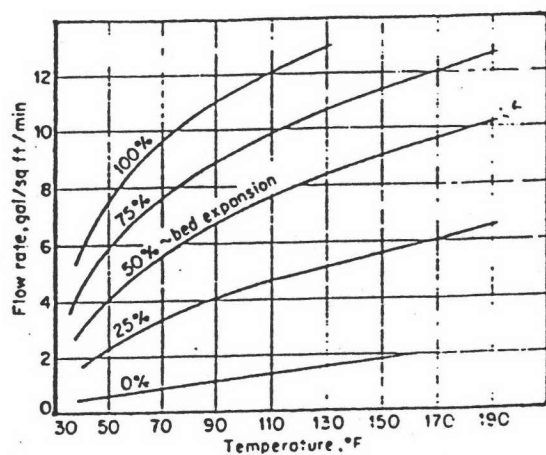


ก - Service Cycle

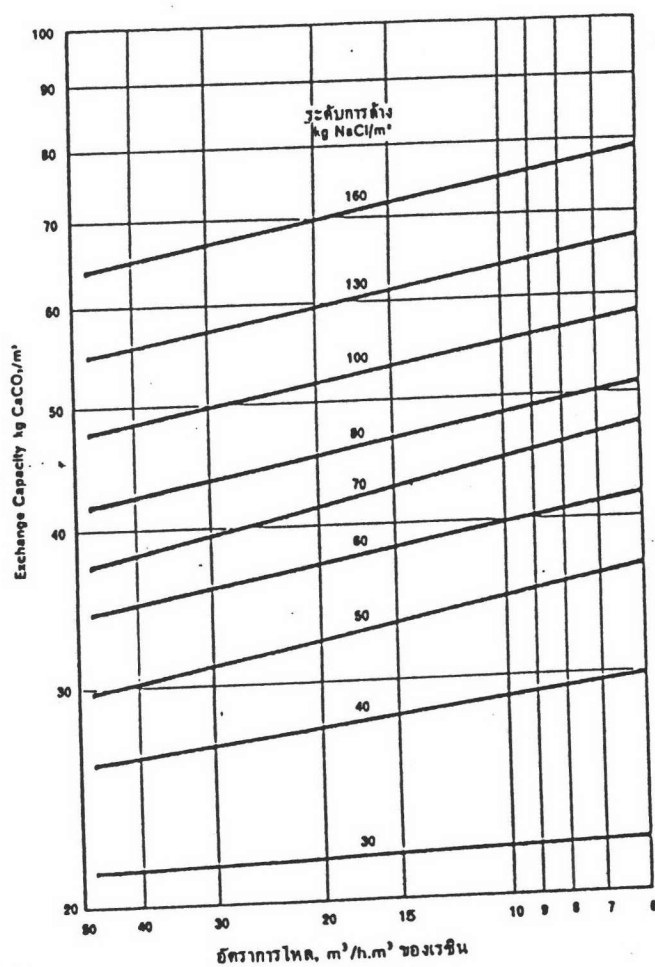


ข - Regeneration

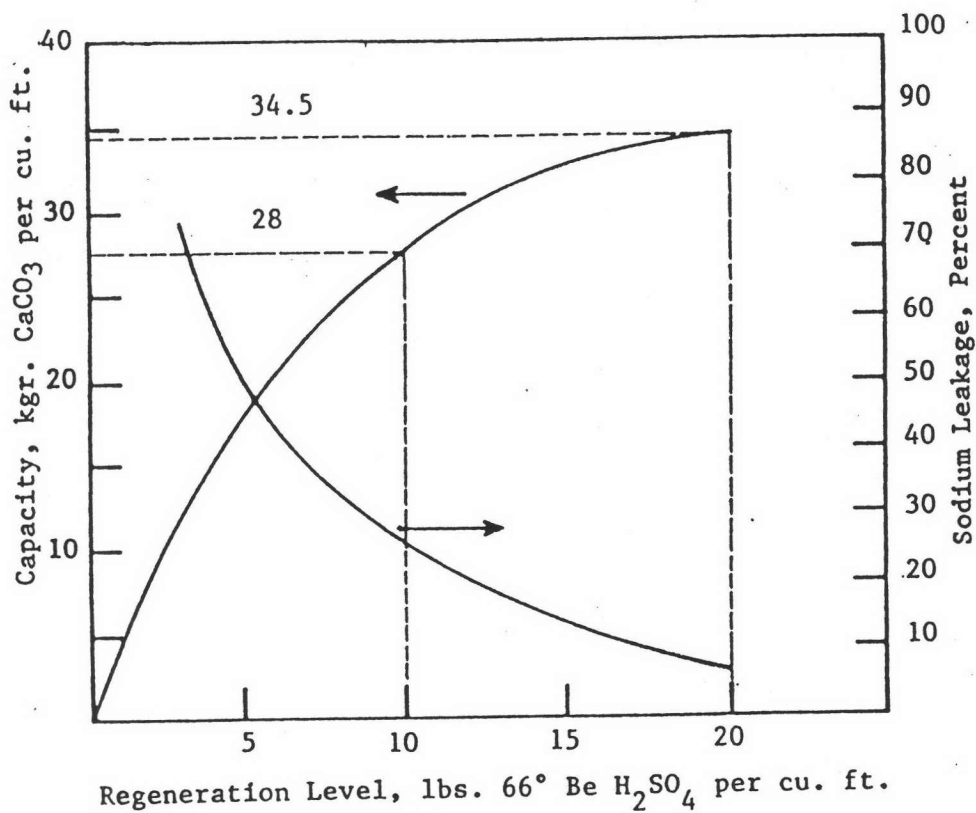
รูปที่ 2.15 ก. ตัวอย่างของขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออน (Service Cycle)
 ข. ตัวอย่างของขั้นตอนการรีเจนเนอเรชัน (Regeneration)



รูปที่ 2.16 อัตราไหลในการล้างย้อนและอุณหภูมิกับ % การขยายตัวของชั้นเรซิน



รูปที่ 2.17 ประสิทธิภาพในการล้างเรซินขึ้นกับปริมาณน้ำยาที่ใช้ล้าง (ในที่นี้ใช้น้ำเกลือ)



รูปที่ 2.18 ระดับรีเจนเนอเรชันของเรซินประเภทกรดแก่

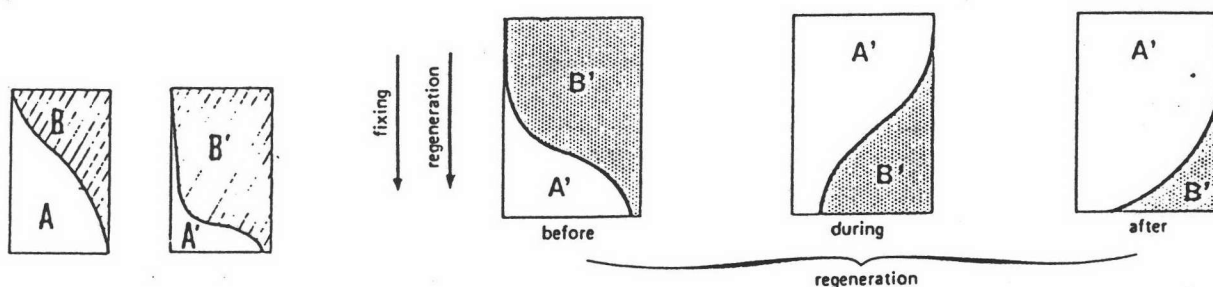
2.20 วิธีการรีเจนเนอเรชัน (METHODS OF REGENERATION)

ในกระบวนการผลิตน้ำอ่อน (Softening) หรือน้ำบริสุทธิ์ (Demineralization) นั้น เมื่อสิ้นสุดรอบการจ่ายน้ำ (Cycle end) คือถึงจุด Break through point ดังรูปที่ 2.22 (สาร A' และ สาร B') เรซินจะจับไอออน B' ไว้จนอิ่มตัวแล้ว และมีสภาพที่สมดุล (Equilibrium) กับความเข้มข้น

ชั้นของ B' ในสารละลายขาเข้า กล่าวคือเรซินไม่สามารถจับไอออน B' ได้ต่อไปอีก ถึงจุดนี้หากจะนำเรซินกลับมาใช้งานผลิตน้ำใหม่ จำเป็นต้องทำการฟื้นฟูอำนาจเรซิน ที่เรียกว่า รีเจนเนอเรชัน ลักษณะการทำรีเจนเนอเรชันอาจทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1) โคเคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (Co-current regeneration)

เป็นวิธีการล้างเรซิน โดยการเติมสารรีเจนเนอเรนต์ ในทิศทางเดียวกับทิศทางการไหลของน้ำในขณะใช้งานผลิตน้ำบริสุทธิ์ โดยมากมักให้มีทิศทางไหลของน้ำจากด้านบนสู่ด้านล่างของหอ



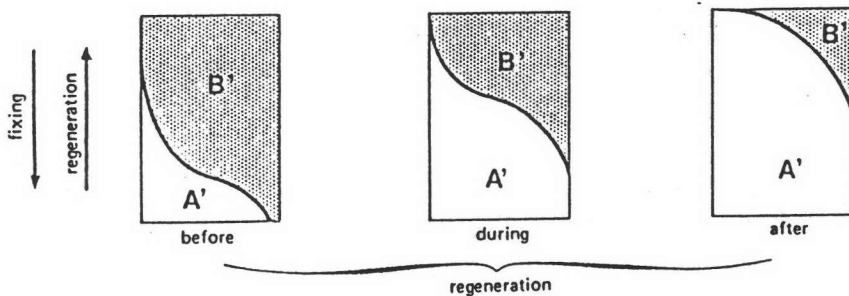
รูปที่ 2.19 รูปแบบเมื่อเรซินอิ่มตัว

รูปที่ 2.20 Co-current regeneration

ในการรีเจนเนอเรต สารละลายเข้มข้นด้วยไอออน A' (รีเจนเนอเรนต์) จะถูกผ่านเข้าไปสัมผัสชั้นของเรซิน ซึ่งอยู่ในสภาพที่อิ่มตัวด้วยไอออน B' (ที่ต้องการกำจัดออก) ผลก็คือ ไอออน B' จะถูกนำพาเคลื่อนตัวไปในชั้นความสูงอื่นของหอซึ่งมีสภาพที่อิ่มตัวน้อยกว่า และอยู่ในสภาพที่พอเหมาะในการจับไอออน B' ได้มากกว่า ดังนั้นในช่วงแรกเริ่มของการรีเจนเนอเรต ไอออน A' จะยังคงหลุดลอดออกจากหอ ถ้าต้องการรีเจนเนอเรตให้ได้สมบูรณ์ ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องทำการรีเจนเนอเรตซ้ำ (Double exchange process) โดยใช้ปริมาณรีเจนเนอเรนต์ที่สอดคล้องเหมาะสมกับสัดส่วน A'/B' ในที่สุดเมื่อสิ้นสุดการรีเจนเนอเรตตามปริมาณรีเจนเนอเรนต์ที่กำหนดไว้ จะยังคงมีไอออน B' บางส่วนที่ไม่สามารถไล่ออกจากเรซินได้หมด 100% ไอออน B' เหล่านี้จะติดค้างอยู่ในชั้นล่างของเรซิน (ในกรณีที่รีเจนเนอเรตจากด้านบนสู่ด้านล่าง)

2) เคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (Counter-current regeneration)

เป็นวิธีการล้างเรซิน โดยการเติมสารรีเจนเนอเรนต์ในทิศสวนทางกับทิศทางการไหลของน้ำขณะใช้งานผลิตน้ำ ทั้งนี้อาจให้ทิศทางการผลิตน้ำจากด้านบนสู่ด้านล่างของหอ และทิศรีเจนเนอเรนต์จากด้านล่างสู่ด้านบน ที่เรียกว่า อัปโฟลว์เคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (Upflow counter-current regeneration) หรือให้ทิศทางการผลิตน้ำจากด้านล่างขึ้นด้านบน และทิศรีเจนเนอเรนต์จากด้านบนสู่ด้านล่าง ที่เรียกว่า ดาวน์โฟลว์เคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน (Down-flow counter-current regeneration) ก็ได้



รูปที่ 2.21 Counter-current regeneration

วิธีการนี้หากให้สารรีเจนเนอเรนต์จากด้านล่างขึ้นด้านบน ในลักษณะนี้สารละลายเข้มข้นของไอออน A' ที่ใช้เป็นรีเจนเนอเรนต์จะสัมผัสกับชั้นล่างของเรซินซึ่งชั้นล่างนี้จะมี ความเข้มข้นของไอออน B' น้อยกว่าชั้นบน แล้วสาร A' จะชะ (Elute) ไอออน B' ขึ้นไปตามชั้น ความสูงอื่น แต่เนื่องจากเม็ดเรซินในชั้นบนขึ้นไปมีไอออน B' ที่อิ่มตัวมากกว่า ดังนั้นไอออน B' จึง ไม่สามารถถูกเม็ดเรซินชั้นบนขึ้นไปจับได้อีก ในแง่ของเทอร์โมไดนามิกส์แล้ว ลักษณะนี้จะให้ ประสิทธิภาพในการชะไล่ (Elute) ไอออน B' ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่ากรณีของโคเคอร์เรนต์ รีเจนเนอเรชัน

หลักการเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชันมีข้อดีที่สำคัญ 2 ประการ ที่ต้อง การเน้นให้ทราบคือ

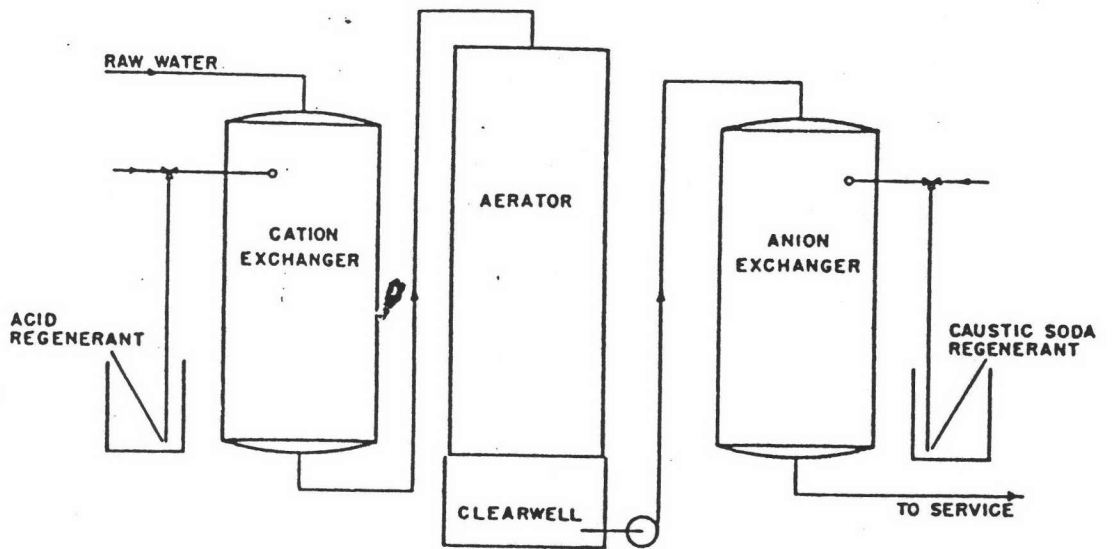
- มีการเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง นั้นหมายถึงการลดปริมาณการใช้สารรีเจนเนอเรนต์ลงโดยคุณภาพการล้างเท่าเดิม

- มีการเพิ่มคุณภาพของน้ำขาออก (Treated water) อันเนื่องจากว่าปลายด้านน้ำขาออกของเรซินถูกรีเจนเนอเรตด้วยสารรีเจนเนอเรนต์ที่มากเกินไป (Excess) เมื่อเทียบกับโคเคอร์เรนต์รีเจนเนอเรชัน

2.21 การผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ปราศจากแร่ธาตุ

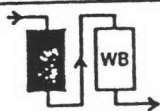
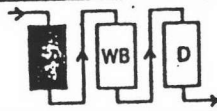
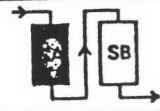
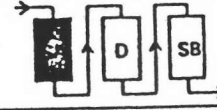
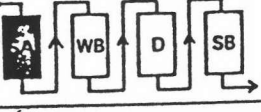
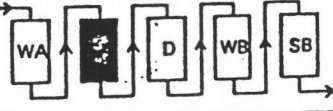
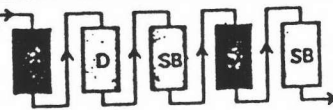

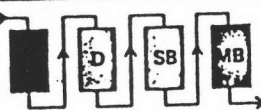
น้ำบริสุทธิ์ในที่นี้หมายถึงน้ำที่ปราศจากเกลือแร่ต่าง ๆ (Demineralized Water) การใช้เรซินผลิตน้ำบริสุทธิ์ สามารถทำได้หลายวิธี แต่ทุกวิธีจะต้องมีเรซิน 2 ชนิด คือ แบบต่างและแบบกรด ซึ่งอาจบรรจุแยกถังหรืออาจบรรจุในถังเดียวกัน (Mixed Bed) ก็ได้ เรซินแบบต่างซึ่งรีเจนเนอเรตด้วยโซดาไฟจะทำหน้าที่กำจัดไอออนลบ รวมทั้ง SiO_2 และ CO_2 ออกจากน้ำ ส่วนเรซินแบบกรด ซึ่งรีเจนเนอเรตด้วยกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน จะทำหน้าที่กำจัดไอออนบวกออกจากน้ำ น้ำที่ผลิตได้จึงเป็นน้ำที่ปราศจากเกลือแร่ต่าง ๆ

การผลิตน้ำบริสุทธิ์ด้วยกรรมวิธีแลกเปลี่ยนไอออน สามารถทำได้หลายวิธี ตารางที่ 1.8 เป็นตัวอย่างของการจัด Flow Diagram ของถังเรซินประเภทต่าง ๆ เพื่อให้สามารถผลิตน้ำสะอาดบริสุทธิ์ บางครั้งในการออกแบบระบบอาจประกอบด้วย ถังเรซินประจุบวก และถังเรซินประจุลบแยกถังโดยต่ออนุกรมเรียงกัน 1 คู่ หรือ 2 คู่ แล้วแต่กรณี ซึ่งในขั้นตอนสุดท้ายอาจมีถังเรซินผสม (Mixed bed) ต่ออยู่ด้วย เพื่อป้องกันการรั่วไหลของไอออนที่หลุดลอดมาจากถังตอนหน้า ทั้งนี้เพื่อให้ได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงอยู่เสมอ ในบางกรณีหากน้ำดิบขาเข้ามีความเป็นด่างสูง กล่าวคือมีไบคาร์บอเนต คาร์บอเนตสูง เช่น แหล่งน้ำบาดาล อาจมีการเลือกใช้อุปกรณ์ไล่ก๊าซ (Degasifier) ต่ออยู่คั่นกลางระหว่างถังเรซินประจุบวกและถังเรซินประจุลบคู่แรก เพื่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการลดความเป็นด่างในน้ำ เท่ากับลดภาระในการกำจัดแอนไอออนให้กับเรซินประจุลบ อย่างไรก็ตามการเลือกใช้อุปกรณ์และการออกแบบ ขนาดและจำนวนถัง ปริมาณสารเรซินย่อมขึ้นอยู่กับคุณภาพการเส็ดลอดของไอออน (Ionic Leakage) ที่ยอมให้มีได้ อัตราการจ่ายน้ำ (Flow rate) ความถี่-บ่อยในการล้างเรซิน ความบริสุทธิ์ของน้ำขาออกที่ต้องการ โดยต้องคำนึงถึงหลักความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ประกอบ



รูปที่ 2.22 การผลิตน้ำบริสุทธิ์ได้โดยใช้หอเรซิน ประจุบวกและลบโดยมีหอไล่ก๊าซคั่นกลาง

ตารางที่ 2.6 ลักษณะการใช้งาน คุณภาพน้ำที่ได้ และข้อได้เปรียบเสียเปรียบของระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์แบบต่าง ๆ

ระบบ	การใช้งาน	คุณภาพน้ำ	ข้อได้เปรียบเสียเปรียบ
	ไม่มีปัญหาด้านซัลฟิดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 10 - 20 ไมโครโมฮัม ไม่เปลี่ยนแปลงมีเท่ากับในน้ำดิบ	ค่าลงทุนในอุปกรณ์ต่ำ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ
	ไม่มีปัญหาด้านซัลฟิดในน้ำ แต่ต้องการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 10 - 20 ไมโครโมฮัม ปริมาณซัลฟิดไม่เปลี่ยนแปลงมีเท่าเดิม	ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำ แต่ต้องใช้อินพินคือเป็นขั้วต่อได้ก๊าซ
	น้ำดิบมีความเป็นด่างต่ำ ต้องการกำจัดซัลฟิด	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 5 - 15 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.02 - 0.10 ศิพีเอ็ม	ค่าลงทุนในอุปกรณ์ต่ำ ไม่ต้องคิดบ่มเพิ่ม เมื่อค่าใช้จ้งด้านสารเคมีดำเนินงานสูง
	น้ำดิบมีความเป็นด่างสูง ต้องการกำจัดซัลฟิด	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 5 - 15 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.02 - 0.10 ศิพีเอ็ม	ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่ำ ต้องคิดบ่มเพิ่ม
	น้ำดิบมีความเป็นด่าง ซัลเฟต และคลอไรด์สูง ต้องการกำจัดซัลฟิด	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 5 - 15 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.02 - 0.10 ศิพีเอ็ม	ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่ำ ค่าลงทุนในอุปกรณ์สูง ต้องคิดบ่มเพิ่ม
	น้ำดิบมีความกระด้าง ความเป็นด่าง ซัลเฟต และคลอไรด์สูง ต้องการกำจัดซัลฟิด	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 5 - 15 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.02 - 0.10 ศิพีเอ็ม	ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่ำ ค่าลงทุนในอุปกรณ์สูง ต้องคิดบ่มเพิ่ม
	น้ำดิบมีความเป็นด่างและโซเดียมสูง ต้องการคุณภาพน้ำที่บริสุทธิ์มาก	ความนำไฟฟ้าจำเพาะ 1 - 5 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.01 - 0.05 ศิพีเอ็ม	ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่ำ ค่าลงทุนในอุปกรณ์สูง ต้องคิดบ่มเพิ่ม
	น้ำดิบมีสารละลายน้ำต่ำ ต้องการคุณภาพน้ำที่บริสุทธิ์มาก	ความนำไฟฟ้าจำเพาะมีค่าต่ำกว่า 1 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.01 - 0.05 ศิพีเอ็ม	ค่าลงทุนในอุปกรณ์ต่ำ ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีสูง
	น้ำดิบมีความเป็นด่างและสารละลายน้ำสูง ต้องการคุณภาพน้ำที่บริสุทธิ์มาก	ความนำไฟฟ้าจำเพาะมีค่าต่ำกว่า 1 ไมโครโมฮัม ซัลฟิด 0.01 - 0.05 ศิพีเอ็ม	ค่าลงทุนในอุปกรณ์สูง ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีต่ำ ต้องคิดบ่มเพิ่ม

KEY

 STRONGLY ACIDIC HYDROGEN CATION

 WEAKLY ACIDIC HYDROGEN CATION

 WEAK BASE ANION

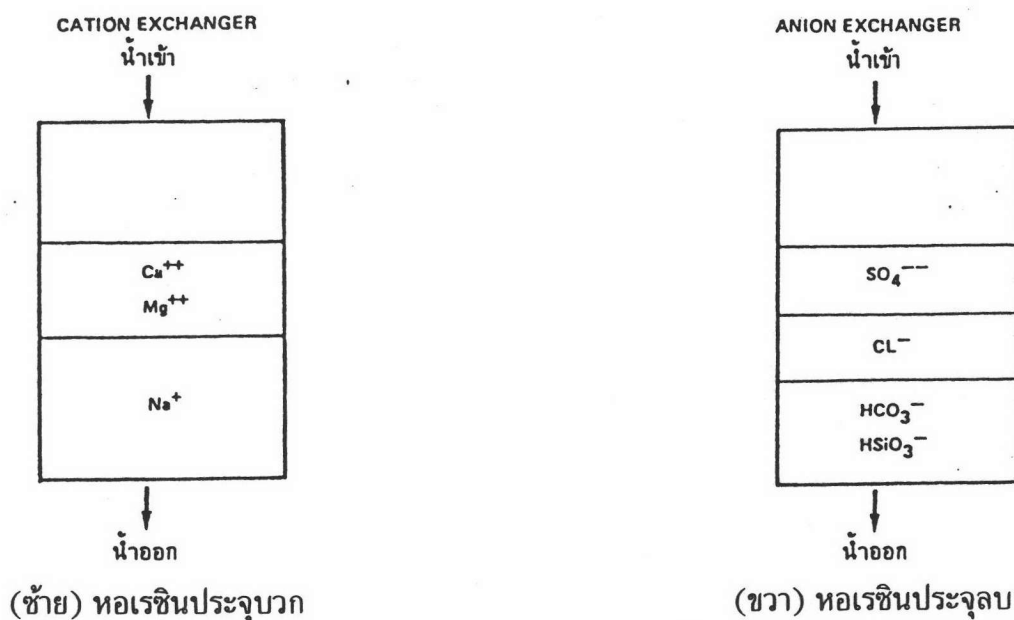
 STRONG BASE ANION

 DECARBONATOR OR VACUUM DEAERATOR

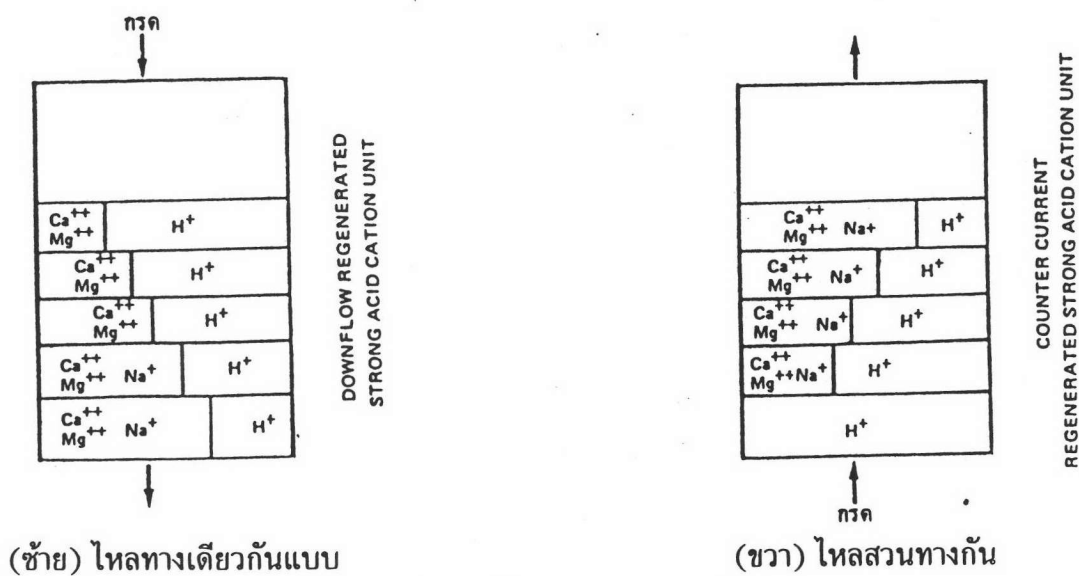
 MIXED BED

2.22 การแก้ปัญหาการรั่วของไอออน

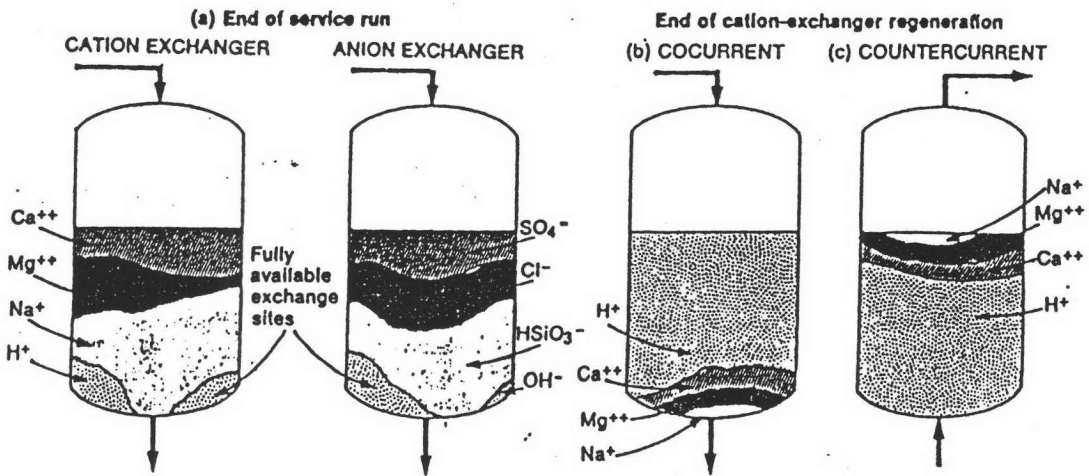
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การใช้งานเรซินไม่ว่าจะเป็นชนิดประจุบวกหรือลบ จะมีไอออนรั่วไหลออกมากับน้ำได้ ซึ่งทำให้คุณภาพน้ำที่ได้ด้อยลง ปัญหานี้เกิดจากการล้างเรซินด้วยวิธีการที่น้ำยาล้างไหลในทิศทางเดียวกับการไหลของน้ำในการใช้งาน (co-current regeneration) จึงมีผู้คิดค้นแก้ปัญหานี้โดยให้น้ำยาล้างไหลในทิศสวนทางกับการไหลของน้ำ (counter-current regeneration) เช่น ถ้าน้ำไหลจากบนสู่ด้านล่าง ก็ให้น้ำยาล้างไหลย้อนจากด้านล่างสู่ด้านบน



รูปที่ 2.23 ลักษณะของหอบรรจุเรซินเมื่อผ่านการใช้งานแล้ว



รูปที่ 2.23 ลักษณะของชั้นเรซินประจุบวกเมื่อล้างด้วยกรดแล้ว



รูปที่ 2.25 ลักษณะของชั้นเรซินในหอเมื่อจับไอออนจนเต็มหมด และหลังจากล้างเรซินแบบไหลตามกันและไหลสวนทางกัน

รูปที่ 2.23 , 2.24 และ 2.25 แสดงรายละเอียดของเรซินในหอที่จับไอออนไว้เป็นชั้น ๆ และมีการล้างเรซินประจุบวกด้วยกรดแบบไหลทางเดียวกันและไหลสวนทาง ถ้าเป็นแบบไหลทางเดียวกันเรซินที่อยู่ชั้นล่างสุดใกล้ท่อทางออกจะล้างออกไม่หมดยังจับไอออนจำพวกโซเดียม แมกเนเซียม และแคลเซียมอยู่ เมื่อน้ำดิบไหลจากด้านบนลงล่าง เรซินส่วนบนจะจับไอออนประจุบวกไว้เกิดเป็นกรดซึ่งเข้าคู่กับไอออนประจุลบที่เหลืออยู่ กรดนี้จะไปแทนที่โซเดียมไอออนที่เรซินจับไว้ ทำให้มีโซเดียมปนมากับน้ำ นอกจากนี้ไฮโดรเจนไอออนที่เรซินส่วนบนปล่อยออกมาจะไปแทนที่โซเดียมไอออนได้เช่นกัน ปัญหาการรั่วไหลของไอออนนี้แก้ไขได้โดยการล้างสวนทาง โดยที่ให้น้ำยาล้างไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกับการไหลของน้ำในขณะที่ใช้งาน เช่น ป้อนกรดไหลย้อนจากด้านล่างสู่ด้านบนซึ่งจะทำให้ชั้นเรซินที่ล้างไม่หมดนั้นไปอยู่ด้านบนแทน ซึ่งจะไม่มีปัญหาในการใช้งาน ด้วยวิธีนี้สามารถลดปริมาณการรั่วของไอออนได้อย่างมาก

ตารางที่ 2.7 การร่วของโซเดียมไอออนเมื่อล้างด้วยวิธีการแตกต่างกัน (ใช้เรซินชนิด SC)

คุณภาพน้ำดิบ	กรดก่ำนะถัน ๑๘% ที่ 4๑ กรัม/ลิตรเรซิน	
	แหล่ง ก	แหล่ง ข
Na (ซีซีเอ็มในรูป CaCO ₃)	20	40
Ca + Mg (ซีซีเอ็มในรูป CaCO ₃)	80	60
ความเป็นด่าง (ซีซีเอ็มในรูป CaCO ₃)	50	50
Cl + SO ₄ (ซีซีเอ็มในรูป CaCO ₃)	50	50

คุณสมบัติ	กรดก่ำนะถัน ๑๘% ที่ 4๑ กรัม/ลิตรเรซิน			
	ไหลตามกัน		ไหลสวนทาง	
	แหล่ง ก	แหล่ง ข	แหล่ง ก	แหล่ง ข
โซเดียมร่ว (ซีซีเอ็มในรูป CaCO ₃)	2	3	0.25	0.3
ความนำไฟฟ้า (ไมโครโม)	11	16	1.5	1.8

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าการล้างแบบไหลสวนทางกันจะได้คุณภาพน้ำบริสุทธิ์ที่ดีกว่ามาก ซึ่งระบบล้างไหลตามกันนั้นจะไม่ได้คุณภาพน้ำดีขนาดนี้ แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณกรดในการล้าง เช่น เพิ่มเป็น 160 กรัม/ลิตรเรซิน นอกจากจะได้คุณภาพน้ำดีกว่าแล้วยังทำให้เรซินมีความจุหรือกำลังความสามารถในการจับไอออนเพิ่มขึ้นด้วย เพราะการล้างมีประสิทธิภาพดีขึ้น การล้างแบบไหลตามกันนั้นจะล้างเรซินได้หมด ส่วนที่ไม่สัมผัสกับน้ำยาจะมีมาก

2.23 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

1. การแลกเปลี่ยนไอออนที่บอลติก (Balitic Ion Exchange)

ผู้แต่ง : ANON

แหล่งที่มา : Water & Environment International v.4, n.32, Jan. 1995, p. 35.

ด้วยความที่ยังไม่พอใจในระบบผลิตน้ำแบบแลกเปลี่ยนไอออนที่มีอยู่ในเชิงพาณิชย์ โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Demineralization Plants) แถบแสกนดิเนเวียได้ทดลองใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนแบบใหม่ คือ Amberpack backwashable packed-bed ion-exchange resin system เพื่อการผลิตน้ำบริสุทธิ์จากน้ำดิบที่มีสารอินทรีย์ในปริมาณสูง พบว่าด้วยการใช้ระบบนี้ การล้างสารแลกเปลี่ยนมีประสิทธิภาพมากขึ้น หนึ่งระบบ Amberpack มีข้อเด่นที่สามารถทำการล้างย้อนเรซินได้ ถ้ามีความจำเป็นต้องไล่ผงละเอียดที่เกิดจากการเสียดสีแตกกระเทาะของเม็ดเรซิน

2. ระบบการรีเจนเนอเรตแบบสวนทางเป็นทางเลือกใหม่ของการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (Consider upflow regeneration as demineralization alternative)

ผู้แต่ง : Strauss, Sheldon D.

แหล่งที่มา : Power (New York, N.Y.), v.139, July 1995, p.43-4.

UPCORE เป็นเทคนิคการรีเจนเนอเรต ชนิดเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์แบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นใช้กับระบบผลิตน้ำบริสุทธิ์ โรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ทำการศึกษามีหอเรซินประจุบวกเพื่อกำจัดไอออนบวก และมีหอเรซินประจุลบสำหรับกำจัดไอออนลบแยกกัน โดยทั่วไปหอเรซินที่ใช้ในการทำน้ำบริสุทธิ์เพื่อเติมเข้าในหม้อน้ำ ต้องทำการรีเจนเนอเรตเป็นช่วง ๆ ด้วยการผ่านสารละลายกรดและด่างเข้าชั้นของเรซินในทิศทางโคเคอร์เรนต์หรือเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์ ในระบบ UPCORE มีการป้องกันการขยายตัวของชั้นเรซินโดยใช้ชั้นเรซินเฉื่อย (Inert Resin) ที่ส่วนบนของหอ ทำหน้าที่เป็นชั้นกรองในขณะรีเจนเนอเรต ข้อได้เปรียบคือ เมื่อสารรีเจนเนอเรตไหลในทิศทางตรงข้ามกับทิศการจ่ายน้ำ จะสามารถใช้สารเคมีน้อยลงทำให้ค่าใช้จ่ายต่ำลง และเรซินส่วนที่รีเจนเนอเรตสมบูรณ์ที่สุดจะเรียงอยู่ในชั้นที่ใกล้กับทาง

ออกมากที่สุดในการจ่ายน้ำ ในรอบการทำงานถัดไป ทำให้หมดปัญหาการรั่วไหลออกของไอออน เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์อื่นทั่วไปแล้วระบบ UPCORE มีข้อเด่น 2 ข้อ คือ มีการใส่เรซินเฉื่อยที่มีขนาดเม็ดเท่า ๆ กันที่ส่วนบนของห่อแต่ได้ชุดกระจายน้ำ ดังนั้นระบบ UPCORE ที่พัฒนาโดย Esmil Water System of Holland และปรับปรุงโดยบริษัท Dow Chemical จึงสามารถต่อระบบกับท่อทางที่มีอยู่เดิมได้ง่าย มีราคาถูก แต่เพิ่มความสามารถจ่ายน้ำ มีคุณภาพน้ำผลิตที่ดีและลดน้ำเสียที่เกิดจากการรีเจนเนอเรต

3. การรีเจนเนอเรตแบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์เพิ่มความสามารถจ่ายน้ำเป็น 2 เท่า (Upflow countercurrent regeneration doubles water-demineralizer capacity)

แหล่งที่มา : Hoogovens-Tech. Services Utrecht Netherlands
Journal : Chemical Engineering (International Edition), v.101,
issue 12, p. 21.

ระบบ UPCORE ใช้การรีเจนเนอเรตแบบเคาน์เตอร์เคอร์เรนต์ในทิศทางไหลขึ้น ทำให้เพิ่มความสามารถจ่ายน้ำเกือบ 2 เท่าของระบบคอนเวนชันนอล (Conventional) โคเคอร์เรนต์ ที่ขนาดการผลิต 200 ลบ.ม.ต่อชั่วโมง สามารถประหยัดเงิน 500,000 เหรียญสหรัฐต่อปี โดยการลดปริมาณสารเคมีและน้ำใช้ ระบบจ่ายน้ำในทิศไหลลงและรีเจนเนอเรตในทิศไหลขึ้น มีข้อได้เปรียบคือ ไม่ต้องทำการล้างย้อน เพราะเม็ดเรซินแตกและเศษผลอื่น ๆ จะถูกล้างออกจากระบบในตอนเริ่มแรกของขั้นตอนการรีเจนเนอเรตได้