

# พื้นฐานการใช้งานการแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับระบบผลิตน้ำทั่วไป

(Basic Ion Exchange for Residential Water Treatment)

โดย นายพรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ

ส่วนวิเคราะห์ จัดการสิ่งแวดล้อม

กองจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ

ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ

## ประวัติศาสตร์ของการแลกเปลี่ยนไอออน

ในปี ค.ศ. 1850 นักวิทยาศาสตร์ชื่อโทมัส (Thomas) และ เวย์ (Way) เป็นผู้ศึกษาค้นคว้าทดลองครั้งแรกสำหรับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) โดยการสังเกตจากการทดลองใส่ปุ๋ยลงในดินและสังเกตการเปลี่ยนแปลงของดิน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้พบว่าเมื่อนำสารละลาย Ammonium Sulfate ที่ใส่ลงในดิน แล้วนำน้ำที่ผ่านชั้นดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการพบว่าประกอบด้วย Calcium Sulfate เข้าไปแทนที่ Ammonium Sulfate จะเห็นว่าดินมีความสามารถในการดึงดูดแอมโมเนีย (ammonia) ซึ่งมีประจุบวกได้ดีกว่าประจุบวกชนิดอื่น (ในที่นี้คือแคลเซียม(calcium)) ทำให้สารละลายดังกล่าวมีความเหมาะสมในงานเกษตรกรรมแต่อย่างไรก็ตามนักวิทยาศาสตร์ก็ยังไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างเข้าใจ จนกระทั่ง 1 ทศวรรษต่อมาเมื่อนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Eichhorn ได้ค้นพบปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนโดยพบว่าดินธรรมชาติที่รู้จักดีในปี ค.ศ. 1905 คือ ดินซีโอไลต์ (Zeolites) และในขณะเดียวกันได้มีการสังเคราะห์ดินจากโรงงานเป็นครั้งแรกชื่อว่า Sodium Alumino Silicates ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยนำมาใช้กำจัดความกระด้างออกจากน้ำเป็นครั้งแรกแต่ alumino silicates มีข้อเสียมากมายเมื่อนำมาใช้งานกล่าวคือเมื่อละลายลงในน้ำถ้ามีค่า pH ต่ำกว่า 7 ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุจะลดลง alumino silicates มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุเพียง 10,000 ถึง 15,000 เกรน โดยใช้เกลือ 10 ปอนด์ เพื่อฟื้นฟูสภาพ alumino silicate นี้สามารถนำมาพัฒนาเป็นเมงกานีสกรีนแซนด์ (manganese green sand) โดยใช้เมงกานีสคลอไรด์ (manganese chloride) เข้าไปทำปฏิกิริยาและสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยโปแตสเซียมเปอร์เมงกาเนต (Potassium Permanganate) ได้ซึ่งสามารถนำมาใช้กำจัดเหล็กละลายน้ำได้ด้วย

วิวัฒนาการขั้นต่อมา การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถใช้ถ่านกำมะถัน(Sulfonate Coal) ในกระบวนการสร้าง ถ่านจะได้รับ functional group ซึ่งสามารถนำมาแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกที่อยู่ในน้ำได้ การแลกเปลี่ยนประจุนี้นับเป็นทิศทางที่ตรงกันข้าม สิ่งสำคัญสำหรับการเดินระบบถ่านกำมะถัน(Sulfonate coal) คือ

ค่า pH จะอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างกว้าง ทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ในยุคนั้น แต่ข้อบกพร่องของถ่านกัมมันต์คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุจะต่ำกว่า aluminosilicate และเมื่อฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกง (NaCl) 10 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุตของถ่านกัมมันต์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุจะได้ประมาณ 5,000 เกรน หลังจากนั้น 1 ถึง 2 ปี ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ชนิด phenol formaldehyde polymer โพลีเมอร์ชนิดนี้จะใช้ซัลโฟเนต (sulfonate) เพื่อสร้างเป็น strong acid cation (ประจุบวกกรดแก่) ส่วนโพลีเมอร์ประจุลบนั้นก็ใช้วิธีการเดียวกันเพียงแต่มีหมู่ functional เป็น amine (NHx) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์ประจุลบต่างอ่อนชนิดแรก แต่รูปแบบโพลีเมอร์ประจุลบที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายจะอยู่ในรูปไฮโดรเจน (Hydrogen) และโพลีเมอร์ประจุลบที่นิยมใช้กันจะอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (Hydroxide) จะสามารถผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ได้ ข้อเสียของโพลีเมอร์ประจุลบนี้สามารถยกระดับค่า pH ได้สูงขึ้น และไม่สามารถกำจัดสีออกจากน้ำได้

หลังจากสิ้นสุดสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ชนิด Styrene และ Divinylbenzene ขึ้นมา โพลีเมอร์ชนิดนี้สามารถผลิตได้ทั้งประจุบวกแบบกรดแก่ (Strong acid cation) และประจุลบแบบต่างแก่ (Strong base anion) การสังเคราะห์โพลีเมอร์ประจุบวกแบบกรดแก่นั้นสามารถทำได้โดยการนำโพลีเมอร์มาทำปฏิกิริยากับกรด sulfuric acid ส่วนการสังเคราะห์โพลีเมอร์ประจุลบแบบต่างแก่นั้นเริ่มแรกจะใช้ Chloromethylated และ aminate ซึ่งเป็นพื้นฐานในการผลิตเรซินในปัจจุบัน วัตถุประสงค์เพื่อใช้ในกระบวนการทำน้ำอ่อน (Softener) และกระบวนการทำน้ำบริสุทธิ์ (Deminerization)

ในที่สุดก็มาถึงการสังเคราะห์เรซิน ชนิด macroporous และ acrylic ซึ่งใช้ในระบบผลิตน้ำของโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

## กระบวนการผลิตเรซินในโรงงานอุตสาหกรรม(Manufacturing Process)

กระบวนการผลิตเรซินเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกและประจุลบประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : Polymerization Process

ขั้นตอนที่ 2 : Sulfonation Process

ขั้นตอนที่ 3 : Neutralization Process

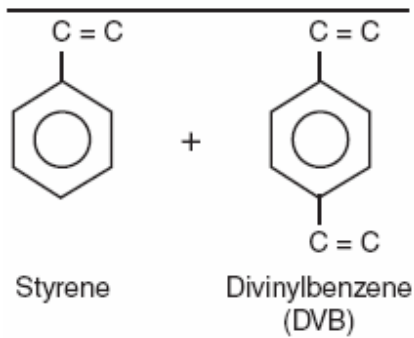
ขั้นตอนที่ 4 : Rinse Process

- ขั้นตอน Polymerization นั้น 2 โมโนเมอร์ (monomer) (ประกอบด้วย styrene และ divinylbenzene **รูปภาพที่ 1**) อยู่ในรูปละลายน้ำและแขวนลอยในน้ำ เมื่อนำมาผสมกันและปั่นด้วยใบพัด (impeller) เพื่อกวนผสมให้เข้ากันด้วยความเร็วเพื่อทำลายโครงสร้างทั้ง 2 โมโนเมอร์(monomer) ให้รวมกันเป็นวงขนาดเล็ก (small spheres)วงเล็กๆเหล่านี้จะมีความแข็งแรงและเปลี่ยนรูปเป็นเม็ดพลาสติกทรงกลมซึ่งรู้จักกันในชื่อ Copolymer ซึ่งไม่มีหมู่ functionalized และ copolymer ที่ได้จะถูกทำให้แห้งและคัดแยกออกมาตามคุณลักษณะเฉพาะที่ต้องการและเทลงไปยังสมิในเครื่องทำการรดกำมะถัน (sulfonator) ในขั้นตอนต่อไป

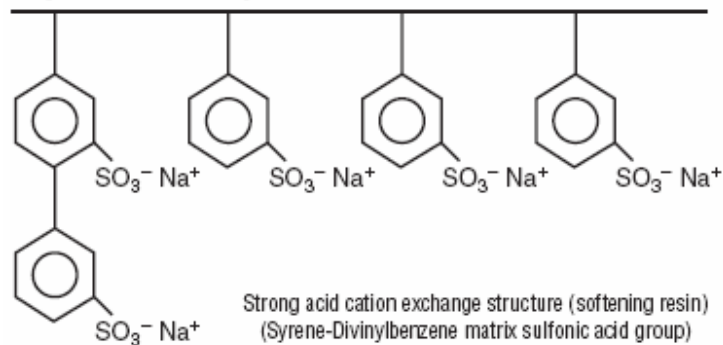
- ขั้นตอน Sulfonation Process นั้น Copolymer จะถูกทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (sulfuric acid) เมื่อรวมเข้าด้วยกันแล้วความเข้มข้นของกรดและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ จะเกิดเป็นหมู่ functional บน copolymer หรือเรซินประจุบวก (cation resin) ถึงจุดนี้จะได้เรซินประจุบวก (cation resin) แบบกรดแก่ในรูปไฮโดรเจน (hydrogen form) จะเกิดการอยู่ตัวและไม่สามารถนำมาใช้ในระบบผลิตน้ำทั่วไปได้เพราะถ้านำน้ำมาผ่านชั้นเรซินนี้ จะทำให้น้ำที่ออกมามีค่า pH ต่ำลง ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับของกระบวนการผลิตน้ำทั่วไป

- ขั้นตอน Neutralization Process เรซินประจุบวกในรูปไฮโดรเจน (hydrogen form) สามารถนำมาปรับสภาพให้กลายเป็นรูปโซเดียม (sodium form) (**ภาพที่ 2**) โดยการจ่ายโซดาไฟผ่านชั้นเรซิน โซดาไฟส่วนที่เกินสามารถชะล้างออกได้และเรซินที่ได้สามารถนำไปใช้ทำน้ำอ่อน แต่อย่างไรก็ตามต้องนำเรซินที่ได้ไปผ่านขั้นตอนสุดท้ายเพื่อลดปัญหาในเรื่องรสชาติ กลิ่นและสีออกจากเรซิน และเรซินชนิดนี้สามารถนำมาทำน้ำอ่อนสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแต่ไม่เป็นที่นิยมนำมาผลิตน้ำทั่วไป

- ขั้นตอนสุดท้าย (Rinse Process) คือการทำความสะอาดเรซิน ซึ่งประกอบด้วยการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำร้อนและการอบไอน้ำ กระบวนการนี้ช่วยลดและกำจัดสารประกอบอินทรีย์ออกจากเรซินที่อาจปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตในโรงงาน รสชาติและกลิ่นที่ออกจากเรซินต้องลดลงให้มากที่สุดอย่างไรก็ตาม

**Figure 1. Monomers**

ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้าง Monomer

**Figure 2. Strong acid cation sodium form**

ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของเรซินประจุบวกแบบกรดแก่ในรูปโซเดียม

กระบวนการในขั้นตอนสุดท้ายนี้จำเป็นต้องมีการเผื่อระวังในเรื่องของสี แต่อย่างไรก็ตามสีที่เกิดขึ้นสามารถกำจัดหลังจากมีการฟื้นฟูสภาพครั้งที่ 1 เมื่อมีการใช้เรซินทำน้ำอ่อน ก่อนที่เรซินจะถูกส่งไปยังลูกค้าจะมีการตรวจสอบคุณภาพในขั้นตอนสุดท้ายให้ได้ตามมาตรฐานการผลิตก่อนส่งมอบให้ลูกค้า ([ดูตารางที่ 1](#))

ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินในทางทฤษฎีมีหน่วยเป็นมิลลิอิควิวาเลนต์ต่อมิลลิลิตร (milli-equivalents per milliliter (meq/ml)) สามารถแปลงเป็นหน่วยที่รู้จักได้โดยการคูณ meq/ml ด้วย 21.8 จะได้หน่วยเป็น equal kilograms per cubic foot (Kgr/cu.ft) มาตรฐานใหม่สำหรับการใช้เรซินทำน้ำอ่อนในทางทฤษฎีประมาณความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุไว้ที่ 41.4 – 43.6 kgr/cu.ft ความสามารถนี้สามารถเป็นจริงได้เมื่อมีการเดินระบบจนกระทั่งเรซินหมดสภาพอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเรซินจากโรงงานผู้ผลิต

**Table 1. Parameters used to check resin quality**

Total capacity, meq/ml	1.9-2.0
Water retention percentage	45-48
Bead count percentage Whole	95 min.
Screen distribution percentage 16 mesh 50 mesh -50 mesh	5 max 5 max 0.5 max
pH	6.5-9.5
Color, alpha	25 max
Taste	*
Odor	*
Mechanical strength, gm/bead	**

\*Taste and odor are subjective tests. Sybron has put together a "taste and odor panel" that judge both of these parameters. Softening resin will either get a pass or a fail.

\*\* The mechanical strength test, which is also known as the Chatillion test, checks the bead's strength. No

เมื่อเรซินทำงานจนกระทั่งหมดสภาพอย่างสมบูรณ์แล้ว ในทางทฤษฎีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุจะไม่สมบูรณ์แบบเหมือนเดิมเมื่อมีการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

การอุ้มน้ำ (water retention) ภายในเม็ดเรซิน เมื่อมีการส่งมอบและตรวจรับจะต้องไม่มีความชื้นในภาชนะบรรจุ (ด้านนอกเม็ดเรซิน) เช่น หลอดบรรจุ (drum), ถุง(bag) หรือกล่อง (box) อย่างไรก็ตามมาตรฐานเรซินที่ใช้ทำน้ำอ่อนจะมีความชื้น (moisture content) ได้ประมาณ 44 – 48 %ของน้ำถ้าทำให้เรซินแห้งความชื้นของเรซินจะลดลงเหลือ 40 % เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ความชื้นเรซินจึงเป็นสิ่งจำเป็นและตัวเลขค่าความชื้นดังกล่าวสามารถที่จะยอมรับได้ทั้งด้านในและด้านนอกเม็ดเรซิน ความชื้นจะเป็นตัวเลขเดียวกันหรืออาจจะสูงกว่าความสามารถในการอุ้มน้ำก็ได้ โดยปกติความชื้น (moisture content) จะลดลงประมาณ 2 % ของการอุ้มน้ำ (water retention)

เกณฑ์การคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเรซินจะใช้ทั้งเม็ดเรซินที่ได้มาตรฐานใช้งานได้และนับรวมเรซินที่แตกหักเสียหาย โดยปกติการวิเคราะห์เรซินที่ดีและเรซินที่เสียหายจะรวมเปอร์เซ็นต์ของทั้งเรซินที่ได้มาตรฐานและเรซินที่แตกหักเสียหายด้วย ดังนั้นเรซินที่แตกหักเสียหายจึงเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องพิจารณา โดยปกติแล้ว โรงงานผู้ผลิตจะกำหนดตัวเลขเรซินที่แตกหักเสียหายไม่ควรเกิน 5 % ซึ่งเม็ดเรซินที่แตกหักเสียหายนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดัน (pressure drop) และช่องว่างระหว่างเม็ดเรซินในชั้นกรองลดลง (channeling in the bed)

การใช้ตะแกรงหรือการใช้ถาดเจาะรูตามขนาดต่างๆจะทำให้สามารถแยกขนาดของเม็ดเรซินได้ตามมาตรฐานขนาดต่างๆที่เหมาะสมกับงาน เช่น การทำน้ำอ่อน จะมีขนาดที่ผ่านรูตะแกรงระหว่าง 16 U.S mesh ถึง 50 U.S. mesh หรือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ผ่านรูตะแกรงมีความสำคัญเนื่องจากขนาดเรซินที่ผ่านรูตะแกรงขนาดเล็กมากๆจะทำให้เกิดปัญหาการสูญเสียแรงดัน (pressure drop) ได้

ค่า pH มีความสำคัญเนื่องจากเป็นดัชนีชี้วัดว่าเรซินเมื่อทำการ neutralized และ rinsed แล้วจะอยู่ในรูปไหน เนื่องจากเรซินจะมีการดูดติดผิวเมื่อมีการผ่านสารละลายเพื่อฟื้นฟูสภาพ กล่าวคือถ้าสารละลายที่ผ่านเรซินแล้วมีค่า pH ต่ำกว่า 7 เรซินจะอยู่ในรูปของ hydrogen form ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นโดยเรซินจะมีการปลดปล่อยแลกเปลี่ยนระหว่าง sodium และ hydrogen นั่นคือเมื่อมีการฟื้นฟูสภาพเรซินด้วยสารละลายเกลือแกง (salt solution)  $H^+$  ที่อยู่บนผิวเม็ดเรซินจะถูกแลกเปลี่ยนกับ  $Na^+$  ที่ได้มาจากสารละลายเกลือและปลดปล่อย  $H^+$  ออกมาทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  กลายเป็น HCl (hydrochloric acid) จึงทำให้สภาพน้ำที่ออกมามีค่า pH ต่ำกว่า 7 ถ้า pH ของน้ำที่ผ่านชั้นกรองเรซินมีค่าสูงแสดงว่าการฟื้นฟูสภาพด้วยโซดาไฟ (NaOH) ไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ การชะล้างอาจไม่หมด การวิเคราะห์ค่า pH ของน้ำหลังจากมีการฟื้นฟูสภาพแล้วน้ำควรมีค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5 ถึง 9.5

เรซินสามารถบรรจุใส่ถังกระสอบได้ประมาณ 1 ลูกบาศก์ฟุต/ถุง แต่ถ้าบรรจุใส่ถังจะได้ประมาณ 7 ลูกบาศก์ฟุต ถ้าบรรจุแบบหีบห่อจะได้ประมาณ 20 ลูกบาศก์ฟุตหรือ 40 ลูกบาศก์ฟุต ส่วนบรรจุภัณฑ์อื่นๆ แล้วแต่ความต้องการลูกค้า การกำหนดค่าภาษีก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของบรรจุภัณฑ์

### กระบวนการผลิตน้ำอ่อน (The Softening Process)

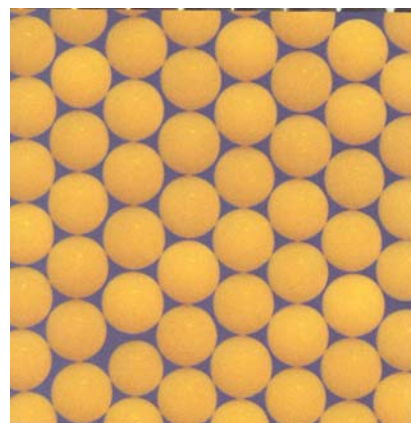
ในสมัยแรกๆ ความกระด้างในน้ำส่วนใหญ่เป็นปัญหากับสุขภาพทำให้เกิดคราบและเมื่อมีการใช้สบู่สำหรับทำความสะอาดร่างกาย ถ้าน้ำมีความกระด้างของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะไม่เกิดฟองสบู่และเกิดการตกตะกอนผลึก (precipitation) เกาะติดอยู่บริเวณผิวทำให้มีความรู้สึกไม่สะอาดและกำจัดออกได้ยาก หยดน้ำที่อยู่บนผิวหน้าของสุขภัณฑ์เมื่อระเหยน้ำออกหมดจะพบธาตุแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) เหลืออยู่ ตะกรันที่เกิดขึ้นนี้ค่อนข้างเกาะติดแน่นและทำความสะอาดยาก ในโรงงานอุตสาหกรรม ความกระด้างจะเกิดเป็นตะกรันในระบบเส้นท่อจ่ายน้ำและหม้อไอน้ำ (Boiler) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(Heat exchanger) และหอหล่อเย็น (Cooling tower) ตะกรันที่เกิดขึ้นจะลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระบบ ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบเพิ่มขึ้นถ้าเกิดตะกรันมากๆจะทำให้อัตราการไหลของน้ำในเส้นท่อ

ลดลงหรือไม่สามารถไหลได้ จากเหตุผลนี้การทำน้ำอ่อนจะเป็นผลดีสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้เมื่อปรากฏปัญหาของความกระด้างเพิ่มขึ้นจนสามารถทำให้เกิดตะกอนได้

สถาบัน WQA (Water Quality Association) ได้ให้ข้อเสนอแนะสำหรับระดับความกระด้างไว้ดังนี้

- ความกระด้างน้อยกว่า 17.1 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  (1 grain) เป็นน้ำอ่อน
- ความกระด้างระหว่าง 17.1 ถึง 60 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  เป็นน้ำกระด้างเล็กน้อย
- ความกระด้างระหว่าง 60 ถึง 120 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  เป็นน้ำค่อนข้างกระด้าง
- ความกระด้างระหว่าง 120 ถึง 180 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  เป็นน้ำกระด้าง
- ความกระด้างมากกว่า 180 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  เป็นน้ำกระด้างมาก

มาตรฐานเรซินที่ใช้สำหรับการทำน้ำอ่อนในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีค่า crosslinked 8 % หมายถึง โครงสร้างของ polymer matrix จะมี 8 % ของ divinylbenzene(DVB) สมดุลย์ของเรซินจะประกอบด้วย styrene และ sodium sulfite ( $\text{SO}_3\text{Na}^+$ ) ในโรงงานผลิตเรซิน  $\text{SO}_3\text{Na}^+$  สามารถผลิตได้จากกระบวนการผลิตเพื่อให้ทำหน้าที่สำหรับการผลิตน้ำอ่อน สีเรซินมีตั้งแต่สีดำจนถึงสีทองขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตจากโรงงานซึ่งจะมีตะแกรงสำหรับคัดแยกขนาดของเม็ดเรซินตามขนาดของตะแกรง



ภาพที่ 3 แสดงรูปร่างและสีของเม็ดเรซิน

เรซินสำหรับทำน้ำอ่อนประเภทเจล (Gel Type) ลักษณะสี่คอนข้างขุ่น (แสงยังสามารถผ่านทะลุได้) ขณะที่เรซินทำน้ำอ่อนประเภท Macroporous Type ลักษณะสี่คอนข้างทึบ(แสงไม่สามารถทะลุผ่านได้) ชนิดของเรซินประเภทอื่น ๆ สามารถที่จะผลิตให้มีความแตกต่างกันของเปอร์เซ็นต์ crosslinking ได้ อย่างไรก็ตามเรซินประเภท macroporous จะมีความแข็งแรงมากกว่าเรซินประเภทเจล (gel) และมีเปอร์เซ็นต์ของ crosslinking สูงกว่า ความเข้มข้นของ DVB จะอยู่ประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ด้วยเปอร์เซ็นต์ที่สูงนี้ทำให้มีความสามารถต้านทานปฏิกิริยาออกซิดेशन(oxidation) ที่อาจเกิดขึ้นจากคลอรีน(chlorine) ได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากเนื่องจากไม่มีเรซินที่อยู่ในตลาดที่มีความต้านทานคลอรีนได้ เรซินทุกชนิดจะลดประสิทธิภาพลงเมื่อมีคลอรีน เรซินที่มี DVB crosslinking สูงสามารถทนต่อน้ำที่มีอุณหภูมิสูงได้ ในทางทฤษฎีเรซินประเภท macroporous ที่มี crosslinking 12 เปอร์เซ็นต์ จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ประมาณ 2.2 meq/ml แต่ในทางปฏิบัติปริมาณเรซินที่ใช้จะมากกว่าในทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามตัวเลขนี้เป็นค่ามาตรฐานสำหรับใช้ทำน้ำอ่อนเพราะ crosslinking ในเรซินที่มีสภาพบวม ตามหลักจลศาสตร์อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเรซินจะลดลง เมื่อมองว่าเรซินเปรียบเสมือนฟองน้ำ เมื่อน้ำผ่านชั้นเรซิน ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุจะไม่เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวเรซินเท่านั้นแต่จะเกิดทั่วเม็ดเรซิน บริเวณที่มี crosslinking ด้านในไม่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนที่อยู่ในน้ำได้ บางทีเมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำเรซินจะมีความสามารถในการเก็บกักน้ำได้สูงกว่าเรซินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูง โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 38 ถึง 42 เปอร์เซ็นต์ เรซินที่มี crosslinking สูงๆจะแพงกว่าเรซินที่มี crosslinking ต่ำๆ

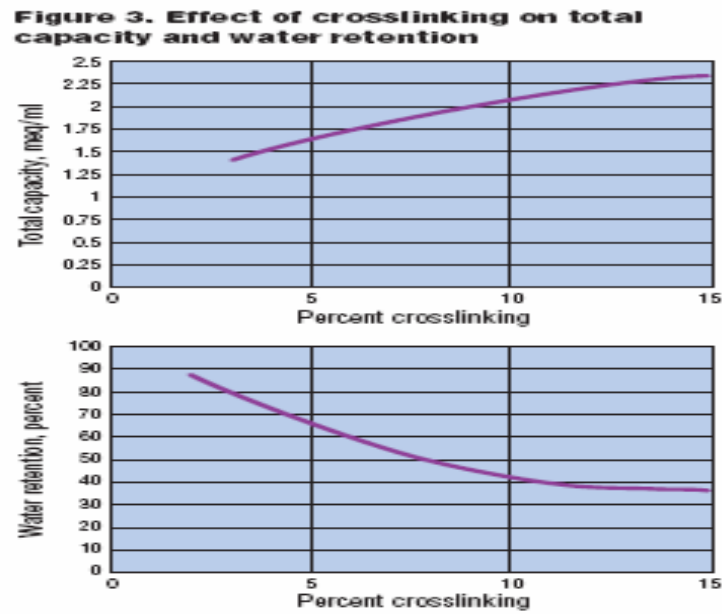
เรซินทำน้ำอ่อนที่ขายในตลาดอยู่ในรูป non - solvent sulfonated (ซัลโฟเนตที่ไม่อยู่ในรูปตัวทำละลาย) เรซินนี้ไม่สามารถใช้ swelling agent ในระหว่างกระบวนการ sulfonation ซึ่งมีลักษณะผิวของเม็ดเรซินจะมีลักษณะขรุขระ เรียกว่าผลเปลือกส้ม (orange peel effect)

เรซินทั่วๆไป จะใช้ swelling agent เพื่อลดแรงดัน osmotic ในระหว่างกระบวนการ sulfonation จึงทำให้ผิวทรงกลมของเม็ดเรซินมีสภาพที่ราบเรียบเพราะในกระบวนการ sulfonation process จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นพิษต่อธรรมชาติ ถ้าตัวทำละลายไม่ได้ใช้เพื่อลดความเค็มของเม็ดเรซินๆจะมีลักษณะขรุขระซึ่งจะทำให้มีโอกาสเกิดการแตกหักและเสียหายได้มากกว่าเรซินที่อยู่ในรูป solvent sulfonated

เรซินที่มี crosslinking ต่ำจะมีคุณภาพที่ดีกว่าแต่ไม่สามารถทนทานคลอรีนหรือสารออกซิไดซ์อื่นๆที่อยู่ได้นานเท่าเรซินที่มี crosslinking สูง

เรซินที่ crosslinked ต่ำๆในทางทฤษฎีจะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ (ภาพที่ 4) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของเรซินที่มี crosslinked ประมาณ 6% จะมีค่าประมาณ 1.6 ถึง 1.7 meq/ml ที่ความจุน้ำประมาณ 54 ถึง 56% ผลดีคือเรซินประเภทนี้จะมีราคาถูกกว่าเรซินที่มี crosslinked สูง เมื่อซื้อเรซินประเภทนี้จะมีเนื้อน้ำมากกว่าเนื้อเรซิน





ภาพที่ 4 แสดงความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและความจุน้ำของเรซินที่มี Crosslinking ต่างๆ

พื้นฐานในการเลือกเรซินทำน้ำอ่อน (ภาพที่ 5) ประจุบวก 1 เช่น  $\text{Na}^+$  จะถูกจับได้น้อยกว่าประจุบวก 2 เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $\text{Mg}^{2+}$  นั่นคือ  $\text{Ca}^{2+}$  จะเข้าแย่ง  $\text{Na}^+$  ได้ดีกว่า ตัวแปรที่สองที่มีผลต่อการเลือกเรซินคือน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ของอิออนที่สูงจะถูกแลกเปลี่ยนประจุได้ดีกว่าอิออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  น้ำหนักโมเลกุล 40.1 จะเข้าแย่ง  $\text{Na}^+$  ได้ดีกว่า  $\text{Mg}^{2+}$  ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 24.3

#### Figure 4. Selectivity

##### Cation exchanger



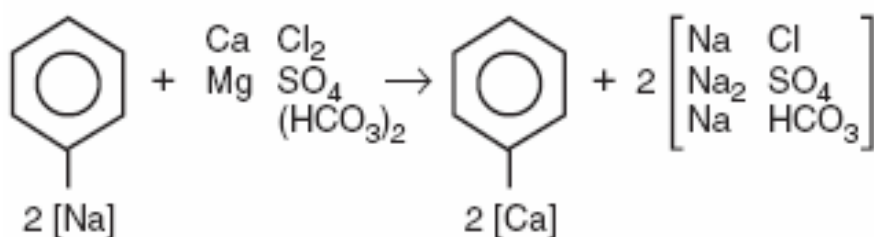
##### Anion exchanger



ภาพที่ 5 แสดงอิออนชนิดต่างๆที่เรซินประจุบวกและประจุลบชอบที่จะแลกเปลี่ยนประจุ

ในกระบวนการทำน้ำอ่อน โซเดียม( $\text{Na}^+$ ) 2 อีออน จะแลกเปลี่ยนประจุกับ 1 อีออนของแคลเซียม( $\text{Ca}^{2+}$ ) หรือ 1 อีออนของแมกนีเซียม( $\text{Mg}^{2+}$ ) (ภาพที่ 6) น้ำที่ผ่านเรซินสำหรับทำน้ำอ่อนจะมี โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต โซเดียมคลอไรด์และความกระด้างอีกเล็กน้อยปนออกมา เมื่อมีการฟื้นฟูสภาพด้วยเกลือแกงจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับโดย 2 อีออนของโซเดียม( $\text{Na}^+$ ) จะเข้าไปจับกับเม็ดเรซินและเรซินจะปลดปล่อย อีออนของแคลเซียม( $\text{Ca}^{2+}$ ) ออกมา 1 อีออน น้ำทิ้งที่ออกมาจากการฟื้นฟูสภาพเรซินจะมีส่วนประกอบของเกลือแกง ( $\text{NaCl}$ ), แคลเซียมคลอไรด์( $\text{CaCl}_2$ )และแมกนีเซียมคลอไรด์( $\text{MgCl}_2$ ) เรซินประเภทโซเดียม ฟอรัม (Sodium Form) จะไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ครบ 100 เปอร์เซ็นต์

**Figure 5. Softening resin reaction**



ภาพที่ 6 แสดงปฏิกิริยาของเรซินระจุบวกรวดแบบกรดแก่ในรูปโซเดียมทำปฏิกิริยากับความกระด้างในน้ำ

โปแตสเซียมคลอไรด์( $\text{KCl}$ ) ซึ่งรู้จักกันในชื่อโปแตส (potash) เป็นตัวเลือกสำหรับการฟื้นฟูสภาพเรซินในทางทฤษฎี 1 ปอนด์ของโซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) จะใช้โปแตสเซียมคลอไรด์( $\text{KCl}$ ) ประมาณ 1.27 ปอนด์ ซึ่งทดสอบโดยผู้เชี่ยวชาญจากโรงงานผู้ผลิต ในทางปฏิบัติจะให้ค่าที่แตกต่างจากค่าทางทฤษฎี จากการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ ผลที่ออกมาปรากฏว่าเมื่อใช้โปแตสเซียมคลอไรด์ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน โปแตสเซียมคลอไรด์จะปลดปล่อยโปแตสเซียมอีออนลงไปในน้ำและเข้าไปแทนที่โซเดียม ทำให้โซเดียมสามารถลดลงได้ ตามเอกสารการศึกษาประกอบโดย PCL ซึ่งกล่าวว่าเมื่อพิจารณาขนาดของระบบทำน้ำอ่อนควรพิจารณา ดังนี้

1. สามารถกำจัดอีออนที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับโซเดียมได้ในระหว่างเดินระบบและเมื่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุหมดไป ระดับของโซเดียมที่ออกมากับน้ำจะเพิ่มขึ้นและมีปริมาณมาก ระดับของโซเดียมที่สูงขึ้นนี้เกิดจาก 2 กระบวนการคือ

- โซเดียมไม่ได้ถูกกำจัดออกไปจากน้ำดิบก่อนเข้าระบบ
- ความกระด้างจะเข้าแย่งโซเดียมจากชั้นกรองเรซินและปลดปล่อยโซเดียมออกมา

2. เมื่อรวมกระบวนการทั้งสองเข้าด้วยกัน ทำให้ระดับของโซเดียมในน้ำที่ออกจากระบบมีระดับที่สูงขึ้นมากกว่าน้ำเข้าระบบ ข้อดีของการใช้โปแตสเซียมคลอไรด์เป็นสารเคมีในการฟื้นฟูสภาพจะเหมาะสมสำหรับน้ำที่ต้องการโซเดียมต่ำๆ เพราะโซเดียมที่หลุดออกมาจากเรซินนั้น มีระดับต่ำถ้าวิศวกรรมออกแบบได้ดี

ความเค็มนไหวในด้านงานวิจัยเรื่องโซเดียมในอดีตพบว่าไม่ใช่ปัญหาใหญ่ที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคความดันโลหิตสูงนอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพเรซินในระบบทำน้ำอ่อนด้วยเกลือแกง(NaCl) จะมีโซเดียมที่ปนเปื้อนออกมาน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าทางโภชนาการที่ร่างกายต้องการต่อวัน ถ้าในน้ำมีความกระด้าง 171 มิลลิกรัม/ลิตร (10 เกรน) จะต้องการโซเดียมประมาณ 78 มิลลิกรัม/ลิตรในรูปโซเดียม

สถาบันอาหารและยา แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ได้กำหนดเกณฑ์โซเดียมละลายน้ำไว้ 3 ระดับคือ

1. โซเดียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 28 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นโซเดียมในรูปอิสระ
2. โซเดียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 197 มิลลิกรัม/ลิตรเป็นโซเดียมที่มีความสามารถในการละลายค่อนข้างต่ำ
3. โซเดียมที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 789 มิลลิกรัม/ลิตรเป็นโซเดียมที่มีความสามารถในการละลายต่ำ

ความกระด้างที่มีความเข้มข้น 100 เกรน ปริมาณความต้องการโซเดียมเพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซินมีค่อนข้างต่ำ ดังนั้นที่ปริมาณความเข้มข้นขนาดนี้จะไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ข้อควรพิจารณาเกี่ยวกับขนาดของระบบผลิตน้ำอ่อน จะต้องพิจารณาถึงคุณภาพน้ำดิบก่อนเป็นลำดับแรก โดยทั่วไปพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้พิจารณามีดังนี้คือ แคลเซียม(Ca) และแมกนีเซียม(Mg) ซึ่งแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นพารามิเตอร์หลักที่ทำให้เกิดความกระด้างแต่โซเดียม(Na) จะมีผลต่อค่าสารละลายในน้ำ (Total Dissolved Solid) ค่า pH และเหล็กก็จำเป็นต้องรู้เมื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำออกมาแล้ว แคลเซียม, แมกนีเซียมและโซเดียมจะอยู่ในรูปไอออนจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ก่อนซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ทั่วไปซึ่งจะต้องคูณไอออนเหล่านั้นด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง(conversion factor) โดยที่ค่าคงที่นี้ได้มาจากน้ำหนักสมมูลของ  $\text{CaCO}_3$  หารด้วยน้ำหนักสมมูลของไอออนนั้นๆ เช่น แคลเซียมมีค่าคงที่(conversion factor) 2.5 นั่นคือ  $\text{CaCO}_3$  มี Molecular Weight เท่ากับ 100 มีประจุ เท่ากับ 2 ดังนั้นน้ำหนักสมมูลของ  $\text{CaCO}_3$  จะเท่ากับ  $100/2 = 50$  แต่ Ca มี M.W. = 40.1 มีประจุเท่ากับ 2 ดังนั้นน้ำหนักสมมูลของแคลเซียมจะมีค่าเท่ากับ  $40.1/2$  จะได้ประมาณ 20 ดังนั้นค่าคงที่ที่จะเปลี่ยนหน่วยจาก Ca ให้กลายเป็น  $\text{CaCO}_3$  จะเท่ากับ  $50/20 = 2.5$  และเมื่อรวมผลวิเคราะห์คุณภาพน้ำสำหรับประจุลบจะเท่ากับประจุบวก(ดังแสดงในตารางที่ 2) ซึ่งจะบอกค่าคงที่ (conversion factor) สำหรับการเปลี่ยนหน่วย

ตารางที่ 2 แสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการเปลี่ยนหน่วยจากมิลลิกรัม/ลิตร เป็นมิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$

	ppm as ion	Conversion factor	ppm as $\text{CaCO}_3$
<b>Cations</b>			
Calcium (Ca)	100	2.5	250
Magnesium (Mg)	50	4.12	206
Sodium (Na)	20	2.18	43.6
Total			499.6
<b>Anions</b>			
Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )	427	0.82	350
Chloride (Cl)	28	1.41	39.5
Sulfate ( $\text{SO}_4$ )	106	1.04	110
Total			499.6
pH			7.7
TDS as $\text{CaCO}_3$			500
Iron (Fe)	2.1	1.79	3.76

ความกระด้างจะประกอบด้วยแคลเซียม(Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ค่า TDS ก็สามารถเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ได้ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความละเอียดของการวิเคราะห์ทางห้องปฏิบัติการว่าถูกต้องหรือไม่โดยการพิจารณา ประจุบวกทั้งหมดที่ละลายน้ำ (Ca, Mg, K และ Na) แปลงหน่วยให้อยู่ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ก็จะให้ค่าที่พอดีกับค่า TDS ถ้าพิจารณาในส่วนประจุลบทั้งหมดที่อยู่ในน้ำและเมื่อแปลงหน่วยให้อยู่ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ก็จะให้ค่าที่พอดีกับประจุบวกทั้งหมด

ข้อเสนอแนะที่จะต้องนำมาพิจารณาอีกพารามิเตอร์คือค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนต อีออน ( $\text{HCO}_3^-$ ), คาร์บอเนต อีออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และไฮดรอกไซด์ อีออน ( $\text{OH}^-$ ) ความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity) จะอยู่ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนตเมื่อค่า pH อยู่ระหว่าง 4.3 ถึง 8.5 ถ้าค่า pH สูงกว่า 8.5 ถึง 10 จะอยู่ในรูปคาร์บอเนต( $\text{CO}_3^{2-}$ ) และถ้าค่า pH มากกว่า 10 จะอยู่ในรูป  $\text{OH}^-$

เมื่อทราบขนาดของระบบทำน้ำอ่อนเพื่อกำจัดความกระด้างตัวที่ต้องทราบต่อมาก็คือค่า TDS และปริมาณความต้องการเกลือซึ่งไม่ใช่เรื่องที่ผิดปกติเลยที่อัตราการผลิตน้ำอ่อน (Softener rate) 30,000 เกรนจะต้องการเกลือ (NaCl) สูงถึง 15 ปอนด์ /ลูกบาศก์ฟุต เพื่อใช้ในการฟื้นฟูสภาพเรซิน ซึ่งอัตราส่วนนี้เมื่อนำมาใช้จะทำให้ง่ายต่อการทำงาน การคำนวณจากค่าความกระด้างทั้งหมดในรูป  $\text{CaCO}_3$  (พิจารณาจาก Ca และ Mg) และหารด้วย 17.1 ค่าคงที่นี้ใช้สำหรับการเปลี่ยนหน่วยจาก มิลลิกรัม/ลิตรในรูป  $\text{CaCO}_3$  ให้อยู่ในรูป เกรน/แกลลอน สามารถคำนวณโดยใช้สูตรดังนี้

ตัวอย่าง เช่น  $\text{Ca} = 250$  มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ,  $\text{Mg} = 206$  มิลลิกรัม/ลิตร ในรูป  $\text{CaCO}_3$  เปลี่ยนให้อยู่ในรูปเกรน/แกลลอนได้ดังนี้ คือ

$$= (250 + 206)/17 = 26.7 \text{ เกรน/แกลลอน}$$

การคำนวณปริมาณน้ำที่เรซินสามารถรับได้โดยการนำค่าอัตราการผลิตน้ำอ่อนของเรซิน (Softener rate) ในรูปเกรนหารด้วยค่าความกระด้างของน้ำดิบในรูปเกรน/แกลลอนจะได้ค่าเท่ากับ  $30,000 / 26.7 \cong 1,120$  แกลลอน ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่สามารถผลิตได้

อย่างไรก็ตามเมื่อค่า TDS เกินกว่า 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุจะต่ำลงเหลือ 30,000 เกรนที่ 15 ปอนด์ โซเดียมคลอไรด์ต่อลูกบาศก์ฟุตและสำหรับแหล่งน้ำประเภทอื่นๆที่มีอัตราส่วนระหว่างค่าความกระด้างและค่า TDS ต่ำกว่า 15% จะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำทั้ง 2 กรณีนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ระดับความกระด้างที่รั่วไหลออกมาต้องปรึกษาไปยังโรงงานผู้ผลิตเรซินโดยพิจารณาความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุและการรั่วไหลเมื่อทราบว่าแหล่งน้ำเป็นประเภทไหนเพื่อจะได้ทราบว่าควรใช้เรซินประเภทไหน

เมื่อกลับไปดูหัวข้อที่แล้วจะพบว่าเรซินไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้หมด(จะอยู่ในรูป  $\text{Na}^+$ ) เนื่องจากบางตำแหน่งของชั้นกรองเรซินที่หมดสภาพแล้วอยู่ในมูมอับ เกลือแกงอาจเข้าไม่ถึง ดังนั้นแคลเซียมและแมกนีเซียมที่เกาะอยู่บนผิวเรซินจะมีโอกาสหลุดออกมาได้หลังจากกระบวนการฟื้นฟูสภาพเสร็จสิ้นแล้ว ซึ่งเรียกว่าการรั่วไหลของความกระด้าง (hardness leakage) ในระหว่างที่มีการเดินระบบอีกครั้งหนึ่งกราฟที่แสดงการรั่วไหลจะขึ้นอยู่กับค่า TDS และปริมาณการจ่ายเกลือแกงในบ้านพักอาศัยต้องการค่า hardness leakage ต่ำกว่า 1 เกรน (ไม่มีความกระด้างเลย) สภาพเช่นนี้ไม่สามารถใช้กับระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำในโรงงานอุตสาหกรรมได้ซึ่งโดยปกติคุณภาพน้ำที่ต้องการมักจะให้มีค่าความกระด้างต่ำกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร (ต่ำกว่า 0.06 เกรน)

เมื่อตรวจสอบความกระด้างที่หลุดออกจากระบบ ให้จำไว้เสมอว่าต้องเดินระบบไปสักพักก่อนเก็บตัวอย่างน้ำไปตรวจวิเคราะห์ การเริ่มต้นเดินระบบใหม่ๆช่วงแรกจะต้องมีการชะล้างความกระด้างที่ออกมาจากตัวเรซินให้หมดก่อน เมื่อระบบหยุดเดินเรซินและน้ำไม่เกิดการเคลื่อนไหวซึ่งจะเข้าสู่สภาวะสมดุลย์หมายถึงเมื่อระบบได้มีการเดิน เรซินจะปลดปล่อยความกระด้างกลับออกมาสู่น้ำจนกระทั่งความเข้มข้นในน้ำและเรซินสมดุลย์กัน เมื่อระบบมีการเดินใหม่อีกครั้งน้ำที่ออกมาในช่วงแรกๆจะมีการปนเปื้อนความกระด้างซึ่งน้ำส่วนนี้จะต้องทำการระบายทิ้งออกก่อนระดับความกระด้างจะกลับเข้าสู่สภาพปกติเหล็กก็สามารถเกิดกระบวนการนี้ได้เหมือนกัน

## การฟื้นฟูสภาพ (Regeneration)

เมื่อเรซินหมดประสิทธิภาพแล้วขั้นตอนแรกของการฟื้นฟูสภาพ คือการล้างทำความสะอาดชั้นเรซิน (backwash) การล้างทำความสะอาดเรซินเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชั้นกรองซึ่งจะแบ่งแยกชั้นกรองออกเป็น 2 ส่วนคือชั้นบนจะเป็นเรซินขนาดเล็กและตามด้วยเรซินขนาดใหญ่ ซึ่งข้อเสนอแนะอัตราการไหลของน้ำสำหรับการล้างทำความสะอาดต้องเพียงพอที่จะยกชั้นเรซินให้มีการขยายตัวไม่น้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งนิยมใช้อัตราการไหลประมาณ 5 แกลลอน/นาที่/ตารางฟุต (12.5 เมตร/ชั่วโมง) ที่อุณหภูมิของน้ำต่ำอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ล้างทำความสะอาดชั้นกรองเรซินจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิน้ำลดลงความหนืดของน้ำจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในช่วงเดือนกรกฎาคม ปริมาณความต้องการน้ำสำหรับล้างทำความสะอาดจะมากกว่าในช่วงเดือนมกราคม อุณหภูมิของน้ำที่ขึ้นๆลงๆจะเกิดที่บริเวณผิวน้ำดังนั้นบริเวณ top screen จะต้องใส่เครื่องป้องกันการสูญเสียเรซินออกจากถังกรองเมื่อมีการล้างทำความสะอาดเรซิน

การเตรียมสารละลายเกลือใช้น้ำเกลือประเภทเกลือผง เกลือจะละลายที่ความเข้มข้นประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์ (ถึงจุดอิ่มตัว) เมื่อถึงช่วงเวลาที่ต้องมีการฟื้นฟูสภาพชั้นสารกรอง สารละลายเกลือจะถูกดูดเข้าไปผสมกับน้ำ Dilution water เมื่อผสมกันแล้วความเข้มข้นของสารละลายเกลือจะลดลงเหลือประมาณ 10 ถึง 13 เปอร์เซ็นต์ อัตราการจ่ายสารละลายเกลือจะลดลงเหลือประมาณ 0.25 ถึง 0.5 แกลลอน/นาที่/ตารางฟุต (0.625 ถึง 1.25 เมตร/ชั่วโมง) โดยทั่วไปเวลาที่เกลือสัมผัสกับเรซินจะประมาณ 20 ถึง 30 นาที ถ้าเวลาต่ำกว่า 20 นาที จะทำให้ระยะเวลาการเดินระบบอีกครั้งจะสั้นลงและการรั่ว (leakage) ของความกระด้างจะมากขึ้น (หัวใจสำคัญของการออกแบบระบบ) หลังจากฟื้นฟูสภาพเรซินโดยใช้เกลือแกงเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนการชะล้างเกลือให้หมดไปจากชั้นกรองจะใช้น้ำที่มีอัตราการไหลต่ำๆ (slow rinse) ชะล้างสารละลายเกลือที่ยังตกค้างอยู่บนชั้นกรองเรซิน ปริมาณน้ำที่ใช้ในการชะล้างจะประมาณ 1 ถึง 2 เท่าของปริมาณเรซิน หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการชะล้างเร็ว (fast rinse) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำจะเทียบเท่ากับอัตราการผลิตน้ำ ปริมาณน้ำจะใช้ประมาณ 3 ถึง 10 เท่าของปริมาณเรซินขึ้นอยู่กับระบบกระจายน้ำในถังเรซินกล่าวคือถ้ามีจุดอับในถังเรซินจะต้องใช้ปริมาณน้ำมากและใช้เวลานานจนกว่าจะได้คุณภาพน้ำที่ต้องการ ดังนั้น เรซิน 1 ลูกบาศก์ฟุตจะใช้น้ำล้างประมาณ 8 แกลลอน หรือ 1 BV (Bed Volume) จะใช้น้ำประมาณ 8 แกลลอน

อัตราการผลิตน้ำจะอยู่ประมาณ 5 – 10 แกลลอน/นาที่/ตารางฟุต (12.5 เมตร/ชั่วโมง ถึง 25 เมตร/ชั่วโมง) อัตราการไหลของน้ำสูงๆจะมีผลต่อจุลศาสตร์ของเรซินหมายถึงเรซินไม่สามารถทำงานได้เร็วพอ เรซินเกือบทุกยี่ห้อจะมีการฟื้นฟูสภาพและหมดสภาพอยู่ในตัวเรซินที่อัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นเรซินจะขยายตัวออก การขยายตัวนี้จะทำให้ลดปริมาณเรซินในระบบลดลง อย่างไรก็ตามในหลายๆกรณีพบว่าที่อัตราการไหลของน้ำสูงๆ การรั่วไหล (leakage) ของความกระด้างจะไม่ถึงจุดวิกฤติ ที่อัตราการไหลของน้ำ 20 แกลลอน/

นาที่/ตารางฟุต (50 เมตร/ชั่วโมง) หรือมากกว่าไม่ใช่สิ่งผิดปกติเมื่อใช้อัตราการไหลของน้ำสูงโอกาสที่จะทำให้การรั่วของความกระด้าง(hardness leakage) จะมีโอกาสสูงขึ้นมาก ปริมาณน้ำที่ได้จะลดลงและการสูญเสียแรงดันจะเพิ่มขึ้นในระยะยาวพารามิเตอร์ต่างๆจะถูกจัดให้อยู่ในรายละเอียดของคู่มือและมีความจำเป็นต่อลูกค้ามาก ซึ่งจะทำให้สามารถป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้กับระบบทำน้ำอ่อนโดยใช้เรซิน ในการกลั่นลำดับส่วนสามารถผลิตน้ำที่อัตราการไหลสูงกว่า 50 แกลลอน/นาที่/ตารางฟุต ได้ ถ้าอัตราการไหลต่ำน้ำที่อยู่ภายในท่อและผ่านชั้นกรองได้แต่ความดันของน้ำจะลดลงและสภาพความต้านทานน้ำที่ผ่านจะน้อยอาจต้องให้น้ำไหลลัด (by pass) และรอบการเดินระบบจะสั้นกว่าที่ตั้งไว้ ถ้าระบบกระจายน้ำในถังเรซินดีไม่ว่าอัตราการผลิตน้ำจะมากหรือน้อยก็สามารถใช้เรซินในการกำจัดความกระด้างได้ดีรวมทั้งอุปกรณ์ในการวัดอัตราการไหลของน้ำในระบบนับว่ามีความสำคัญมาก

## การคำนวณปริมาณเรซินเพื่อกำจัดความกระด้างแบบง่าย

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

$$1. \text{ Equivalent} = \frac{\text{g}}{\text{Eq - Wt}} \quad (\text{gm-eq})$$

$$2. \text{ Equivalent - Weight} = \frac{\text{Molecular Weight (M.W.)}}{\text{Valency บวก หรือ ลบ}}$$

(น้ำหนักสมมูลย์)

$$3. \text{ Equivalent - Weight} = \frac{\text{Molecular Weight (M.W.)}}{\text{ค.ร.น. Valency}}$$

(น้ำหนักสมมูลย์)

จาก Specification ของเรซินแบบ strong acid cation แบบ Na form มีค่า  
Total exchange capacity ประมาณ = 2 eq/l

$$1. \quad \text{Equivalent - Weight} = \frac{\text{Molecular Weight (M.W.)}}{\text{Valency บวก หรือ ลบ}}$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ มี Molecular Weight} = 40.078 + 12.011 + (15.9994 \times 3)$$

$$= 100$$

$$\text{CaCO}_3 \text{ มี Valency} = 2$$

$$\text{เพราะฉะนั้น Equivalent - Weight} = \frac{100}{2} = 50$$

$$2. \quad \text{Equivalent} = \frac{\text{g}}{\text{Eq - Wt}}$$

$$\begin{array}{rcl} & \nearrow & 2 \\ \text{จากค่า Total exchange capacity} & & = \frac{\text{g}}{50} \\ & & \text{g} = 100 \end{array}$$

เพราะฉะนั้น เรซิน strong acid cation แบบ Na form 1 ลิตร สามารถ  
กำจัดความกระด้างออกได้หมด 100 กรัม

### Example

$$\text{Total Hardness} = A \quad \text{mg/l as CaCO}_3$$

$$= A \quad \text{g/m}^3 \text{ as CaCO}_3$$

$$\text{Raw water Flow rate} = B \quad \text{m}^3/\text{hr}$$



เพราะฉะนั้น เรซิน 1 ลิตร สามารถกำจัด ความกระด้างออกได้หมด 100 กรัม

$$\text{ความกระด้าง 100 กรัม ต้องใช้เรซิน} = 1 \text{ ลิตร}$$

$$\text{เพราะฉะนั้นความกระด้าง } A \text{ กรัม ต้องใช้เรซิน} = \frac{A}{100} \text{ ลิตร}$$

เพราะฉะนั้น เรซิน  $\frac{A}{100}$  ลิตร สามารถกำจัด ความกระด้างออกได้หมด 1 ลบ.ม.

$$\text{จาก Raw water Flow rate} = B \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\text{จาก ปริมาณน้ำ 1 ลบ.ม. ต้องใช้เรซิน} = \frac{A}{100} \text{ ลิตร}$$

$$\text{ปริมาณน้ำดิบ } B \text{ ลบ.ม. ต้องใช้เรซิน} = \frac{A}{100} \times B \text{ ลิตร ที่ 1 ชั่วโมง}$$

แต่ประสิทธิภาพของเรซินมีประมาณ 50 ถึง 70%เท่านั้น ดังนั้นปริมาตรเรซินที่ใช้จริง

$$= \frac{A}{100} \times \frac{B}{\text{efficiency}}$$

### ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณหาปริมาตรเรซิน

$$\text{Total Hardness} = 120 \text{ mg/l as CaCO}_3$$

$$= 120 \text{ g/m}^3 \text{ as CaCO}_3$$

$$\text{Raw water Flow rate} = 50 \text{ m}^3/\text{hr}$$

#### วิธีทำ

$$\text{Equation : } \text{Volume Resin} = \frac{A}{100} \times \frac{B}{\text{efficiency}} \text{ Liter/hr}$$

$$\therefore \text{Volume Resin} = \frac{120(\text{mg/l as CaCO}_3) \times 50 (\text{m}^3/\text{hr})}{100 \times 0.60} \text{ Liter/hr}$$

$$= 100 \text{ Liter/hr}$$

- สมมติ **operate** ระบบ 10 ชั่วโมง/วัน
- ต้องการ **regenerate** เรซิน 15 วัน/ครั้ง

∴ ระยะเวลาการทำงานของระบบผลิตทั้งหมดจนถึง การ **regenerate**

$$= 10 \times 15 \quad \text{ชั่วโมง}$$

$$= 150 \quad \text{ชั่วโมง}$$

จาก Volume Resin = **100** ลิตร/ชั่วโมง

∴ Volume Resin ที่ต้องการทั้งหมด = **100 x 150** ลิตร

= **15000** ลิตร

## ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเรซิน

ผลวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำดังนี้

$$\text{Na}^+ = 20 \text{ mg/l} \quad \text{Cl}^- = 40 \text{ mg/l}$$

$$\text{Ca}^{2+} = 15 \text{ mg/l} \quad \text{SO}_4^{2-} = 30 \text{ mg/l}$$

$$\text{Sr}^{2+} = 2 \text{ mg/l}$$

$$\text{Mg}^{2+} = 10 \text{ mg/l}$$

จงคำนวณหาความกระด้างและปริมาณเรซินที่ใช้ในการกำจัด

ความกระด้างทั้งหมด?

### วิธีทำ

อิออนบวกที่มีวาเลนซ์ 2 เท่านั้นที่ทำให้เกิดความกระด้าง ในที่นี้

คือ **Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>**

1.	Cation	Equivalent weight	Hardness mg/l as CaCO <sub>3</sub>
	Ca <sup>2+</sup>	20	$15 \times \frac{50}{20} = 37.5$
	Sr <sup>2+</sup>	43.8	$2 \times \frac{50}{43.8} = 2.3$
	Mg <sup>2+</sup>	12.2	$10 \times \frac{50}{12.2} = 41.0$
	เพราะฉะนั้น Total Hardness		= 80.8 mg/l as CaCO <sub>3</sub>

2. 
$$\text{Equivalent} = \frac{\text{g}}{\text{Eq - Wt}}$$

$$\text{Equivalent - Weight} = \frac{\text{Molecular Weight (M.W.)}}{\text{Valency บวก หรือ ลบ}}$$

CaCO<sub>3</sub> มี Molecular Weight = 40.078 + 12.011 + (15.9994x3)  
= 100

CaCO<sub>3</sub> มี Valency = 2

เพราะฉะนั้น Equivalent - Weight =  $\frac{100}{2} = 50$

เพราะฉะนั้น Equivalent =  $\frac{80.8 \times 10^{-3}}{50}$  ← จากที่คำนวณ

= 1.616 x 10<sup>-3</sup> eq / l

การคำนวณหาปริมาณเรซินให้ได้ถูกต้อง ต้องมีการคำนวณปริมาณเรซินเมื่อไว้สำหรับเตรียมสารละลายเกลือแกงและใช้ในการ Rinse แต่เนื่องจากปริมาณน้ำดังกล่าวมีน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำที่ผลิตได้ใน 1 วัน จึงอาจยกเว้นไม่นำมาคิด ทำให้คำนวณง่ายขึ้น

จาก Specification ของเรซิน มีค่า Total exchange capacity = 1.75 eq/l

เพราะฉะนั้น exchange capacity 1.75 eq มาจากเรซิน = 1 liter  
ถ้าต้องการกำจัดความกระด้าง  $1.616 \times 10^{-3}$  eq จะต้องใช้มาจากเรซิน

$$= \frac{1.616 \times 10^{-3} \times 1}{1.75} \text{ liter}$$

$$= 9.23 \times 10^{-4} \text{ liter}$$

เพราะฉะนั้นถ้าต้องการผลิตน้ำ 1 ลิตร โดยให้สามารถกำจัดความกระด้างออกให้หมด ต้องใช้เรซินเท่ากับ  $9.23 \times 10^{-4}$  ลิตร

- สมมติ อัตราการผลิตน้ำที่ต้องการ 4 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (operate ระบบ 10 ชั่วโมง/วัน)
- ต้องการ regenerate เรซิน 15 วัน/ครั้ง

$$\text{เวลา 1 ชั่วโมง ผลิตน้ำได้} = 4 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{ถ้า operate ระบบผลิต 10 x 15 ชั่วโมง จะผลิตน้ำได้} = 4 \times 10 \times 15$$

$$\text{เพราะฉะนั้นจะผลิตน้ำได้} = 600 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

$$\text{จากการผลิตน้ำ 1 ลิตร ต้องใช้เรซิน} = 9.23 \times 10^{-4} \text{ ลิตร}$$

ถ้าต้องการผลิตน้ำให้ได้  $600 \times 1000$  ลิตรจะต้องใช้เรซิน

$$= 9.23 \times 10^{-4} \times 600 \times 1000 \text{ ลิตร}$$

$$= 553.8 \text{ ลิตร}$$

แต่ประสิทธิภาพของเรซินมีประมาณ 50 ถึง 70% เท่านั้น ดังนั้นปริมาณเรซินที่ใช้จริง

$$= \frac{553.8}{0.6} = 922.67 \text{ ลิตร}$$