บทที่ 1
การอุดตันจากการกรองน้ำด้วยระบบ Reverse Osmosis (RO)

ออสโมซิส (Osmosis) เป็นกระบวนการทางธรรมชาติที่น้ำหรือตัวทำละลายในสารละลายที่เจือจางซึมผ่านเนื้อเยื่อ (Selective Semipermeable Membrane) ไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นกว่าซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยกระบวนการปรับสมดุลตามธรรมชาติ กล่าวคือ ถ้านำน้ำบริสุทธิ์มาบรรจุและให้สัมผัสกับเนื้อเยื่อทั้งสองข้าง ณ ที่ความดันและอุณหภูมิของทั้งสองข้างเท่ากัน จะไม่เกิดการซึมผ่านเนื้อเยื่อ หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบอยู่ในสภาวะที่สมดุล แต่เมื่อเติมตัวถูกละลาย (เกลือ) ลงในน้ำอีกข้างหนึ่งจะทำให้ศักย์ทางเคมี (Chemical potential) ของสารละลายลดลง สมดุลจะถูกรบกวน ระบบจึงปรับเข้าสู่สมดุลใหม่ โดยธรรมชาติจะปรับสมดุลโดยการลดสิ่งรบกวนนั้นโดยการลดความเข้มข้นของเกลือของสารละลาย หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบจะปรับเข้าสู่สมดุลโดยการเพิ่ม Chemical potential ของสารละลายข้างที่เติมน้ำเกลือ โดยการที่น้ำบริสุทธิ์จะไหลผ่านเนื้อเยื่อมายังข้างที่เป็นสารละลาย (น้ำเกลือ) และการไหลผ่านของน้ำในกระบวนการปรับสมดุลนี้ เรียกว่า “ออสโมซิส”

รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการที่น้ำซึมผ่านเนื้อเยื่อ (Semipermeable Membrane) จากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งเป็นกระบวนการฝืนธรรมชาติ (ตรงข้ามกับออสโมซิส) โดยการเพิ่มแรงดันทางด้านสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จนกระทั่งน้ำซึมย้อนจากสารละลายเข้มข้นไปสู่สารละลายที่เจือจางกว่า ซึ่งแรงดันที่ใช้นี้จะต้องมากกว่าแรงดันออสโมซิส (Osmotic Pressure)

การกรองน้ำด้วยระบบรีเวอรส์ออสโมซีส ก็เป็นกระบวนการเช่นเดียวกับที่กล่าวมา แต่การกรองน้ำระบบในนี้ที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นเวลายาวนานจะต้องประกอบด้วยการดำเนินการในหลายปัจจัยดังต่อไปนี้

• มีการปรับสภาพน้ำก่อนเข้าระบบ (Pretreatment) ที่ดี เพื่อขจัดตะกอนอนุภาคของสารต่างๆ รวมทั้งสารละลายที่มีอยู่ ตลอดจนเชื้อจุลินทรีย์และสารเคมีที่อาจทำให้เกิดการตกผลึกอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนหรือทำให้เนื้อเยื่อของเมมเบรนเสื่อมสภาพ

• จะต้องมีการออกแบบระบบ (System design) ที่ดี ให้มีการจัดเรียงเมมเบรนที่เหมาะสม ทำให้น้ำที่ไหลในมัดเมมเบรน (Membrane Module) มีความเหมาะสม รวมทั้งอุปกรณ์ควบคุมและแสดงสถานะภาพของระบบมีการติดตั้งอย่างเหมาะสมด้วย

• มีการเดินระบบที่ถูกต้องและมีการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องและเหมาะสม

ถ้าสามารถจัดทำการดำเนินการ 3 ปัจจัยเหล่านี้ได้ดี ก็จะสามารถใช้งานระบบ RO ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยาวนาน เกิดความคุ้มทุน

1.1 ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ RO เนื่องจากคุณภาพน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

เมมเบรนเป็นอุปกรณ์หลักในการกรองหรือกักกันสิ่งเจือปนต่างๆ ในน้ำ ตลอดจนสารละลายเกลือได้ สามารถกรองน้ำที่เค็มหรือกร่อยอันเนื่องจากมีเกลือละลายอยู่ ให้น้ำที่ผ่านการกรอง (Permeate) มีปริมาณเกลือลดลงจนเป็นน้ำจืดที่สามารถดื่มได้นั้น เมมเบรนที่ใช้กักกันจะต้องมีขนาดรูพรุนเล็กมากถึง 0.1 นาโนเมตร (nm) ดังนั้นถ้าน้ำที่ป้อนเข้าระบบมีพวกตะกอนสารแขวนลอย (Suspended Solids) คอลลอยด์ (Colloids) ตลอดจนจุลินทรีย์เจือปน อาจทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนและขัดขวางการซึมแพร่ผ่านของน้ำผ่านเมมเบรน ทำให้ผลิตน้ำได้ลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดการตกผลึกของสารละลายที่เข้มข้นขึ้นจากการที่น้ำได้ซึมแพร่ผ่านเมมเบรน ได้กักกันสารละลายเกลือไว้จนมีความเข้มข้นถึงจุดอิ่มตัวและตกผลึกอยู่บนผิวหน้าเมมเบรนซึ่งทำให้เกิดการอุดตันได้

นอกจากนี้สารเคมีที่ปนเปื้อนมากับน้ำบางชนิดอาจทำปฏิกิริยากับเมมเบรนทำให้เมมเบรนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร เช่น คลอรีนหรือสารในกลุ่มออกซิไดซิ่งเอ-เจนต์ (Oxidizing agent) ซึ่งสารพวกนี้จะทำปฏิกิริยากับสารที่ใช้ทำเนื้อเยื่อเมมเบรนทำให้ความสามารถของระบบการกักกันเกลือลดลง และทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีความเค็มเพิ่มขึ้น จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าคุณภาพน้ำที่ป้อนเข้าระบบ RO มีความสำคัญที่จะต้องพิจารณาอย่างมาก เพราะจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเดินระบบที่มักจะเกิดกับเมมเบรนที่เรียกว่า เมมเบรนฟาวลิง (Membrane Fouling) ทำให้เมมเบรนมีสมรรถนะในการกรองได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

1.2 การอุดตันในเมมเบรน (Membrane Fouling)

เมมเบรนฟาวลิง คือการที่เมมเบรนเกิดการอุดตันและมีสมรรถนะในการกรองหรือกักกันเกลือได้ไม่เต็มประสิทธิภาพอันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ และส่งผลกระทบต่างๆ กับเมมเบรน ได้จำแนกตามลักษณะของผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

• ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนและในแท่ง (มัด) เมมเบรน (Membrane Module)

• ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุที่ใช้ทำเนื้อเยื่อเมมเบรน เช่น การที่เมมเบรนถูกทำให้เสื่อมสภาพการกักกันเกลือด้วยคลอรีน

• ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นต่อโครงสร้างของแท่ง (มัด) เมมเบรน (Membrane Module) ทำให้มัดเมมเบรนแตก อันเนื่องจากการอุดตันในช่องน้ำไหลในมัดเมมเบรนหรือการใช้

ในการเล่นฟุตบอล จะเห็นว่าถ้าผู้เล่นปฏิบัติไม่ถูกต้องตามข้อตกลงของการเล่นหรือตามกฎกติกา กรรมการจะสั่งลงโทษผู้เล่นนั้นว่า ฟาว (Foul) เมมเบรนที่ใช้ในระบบการกรองน้ำ RO นั้นก็ลักษณะเดียวกัน ถ้าผู้ใช้นำเมมเบรนไปใช้ไม่ถูกต้องก็จะเกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมรรถนะของเมมเบรนที่ควรจะเป็นไปตามข้อกำหนดหรือลักษณะเฉพาะของเมมเบรนนั้นๆ ตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดไว้ ถ้าผู้ใช้เมมเบรนนำเมมเบรนนั้นไปใช้ในลักษณะที่ไม่ถูกต้อง ก็เหมือนกับทำผิดกติกา (Foul) ทำให้ไม่สามารถร้องเรียนใดๆ ต่อผู้ผลิตเมมเบรนได้ถึงคุณภาพของเมมเบรนว่ามีสมรรถนะและประสิทธิภาพตรงกับที่ระบุในคุณลักษณะเฉพาะของเมมเบรน เพราะการนำไปใช้ที่ผิดก่อให้เกิดความเสียหายกับเมมเบรนหรือเกิดเมมเบรนฟาวลิงขึ้น

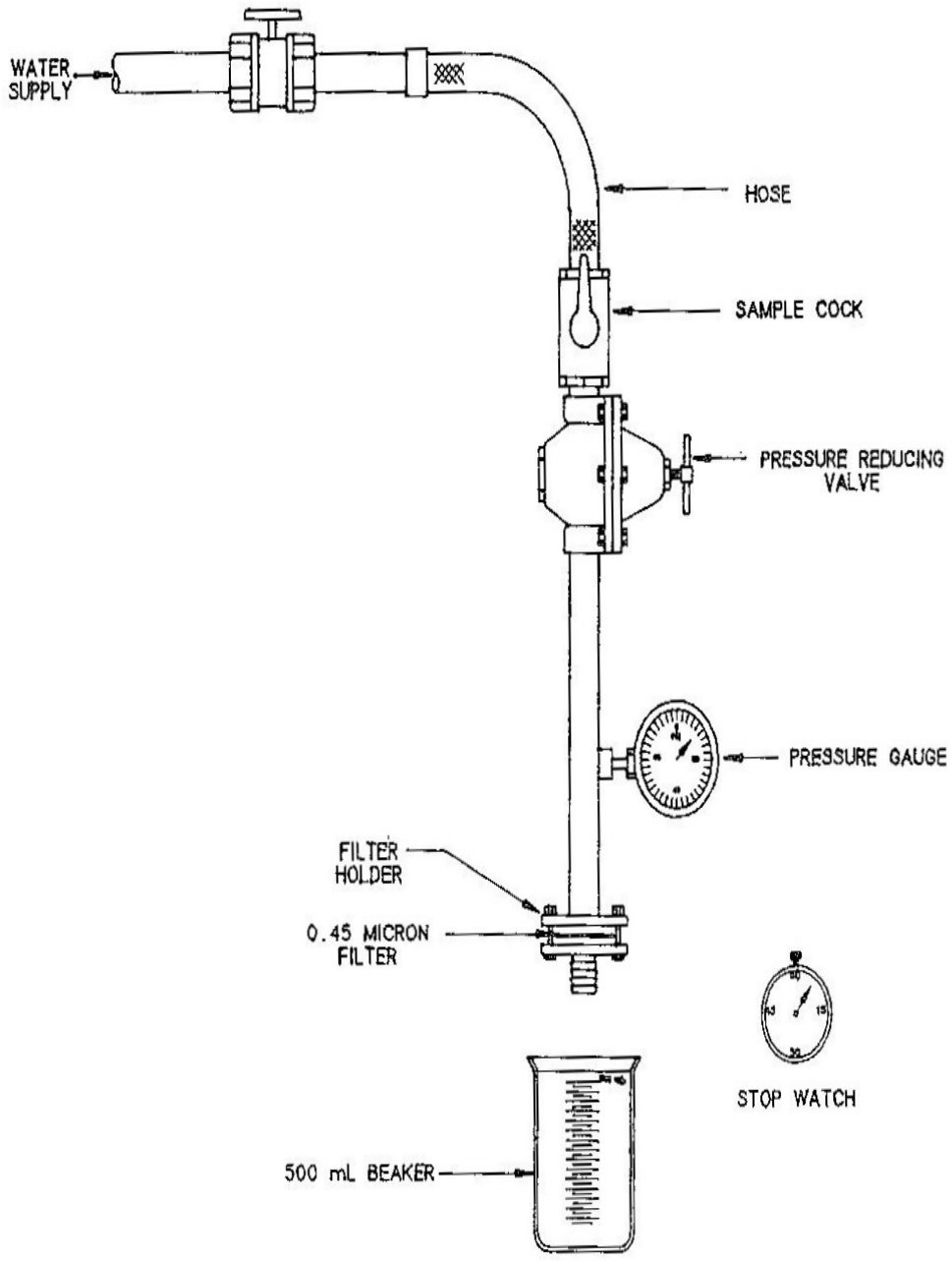
การที่น้ำมีตะกอนสารแขวนลอย การเกิดการตกผลึกของสารละลายที่ปนเปื้อนในน้ำเกาะติดบนผิวหน้าเมมเบรน รวมทั้งจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับน้ำที่ป้อนเข้าระบบ RO เกิดการเจริญเติบโตบนผิวหน้าเมมเบรน และเกิดเป็นกลุ่มของจุลินทรีย์คลุมบนผิวหน้าเมมเบรน เหตุการณ์ดังกล่าวเหล่านี้ล้วนส่งผลทำให้เกิดการขัดขวางการซึมแพร่ผ่านของน้ำให้ผ่านเมมเบรนได้โดยยาก ส่งผลทำให้กำลังการผลิตน้ำของระบบ RO ลดลง หรือจะต้องเพิ่มแรงดันน้ำมากขึ้นเพื่อให้กำลังการผลิตคงที่ จึงทำให้เพิ่มต้นทุนการเดินระบบและถ้ามีการอุดตันมากขึ้นจนทำให้ช่องทางที่น้ำไหลภายในมัดเมมเบรนอุดตัน อาจทำให้เกิดความ

- การอุดตันเนื่องจากตะกอนและสารแขวนลอย (Suspended Solids)
- การอุดตันเนื่องจากคอลลอยด์ (Colloids)
- การอุดตันเนื่องจากการตกผลึก (Membrane Scaling)
- การอุดตันเนื่องจากออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide)
- การอุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์ (Organic)
- การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Microbioorganism)

1.3 หลักในการป้องกันแก้ไขปัญหาการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน

น้ำดิบที่ป้อนเข้าระบบ RO ถ้ามีตะกอนและสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้น้ำนั้นมีความขุ่น ขนาดของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำมีได้หลายขนาด ถ้ามีขนาดตั้งแต่ 1-50 ไมครอน เรียกว่า สารแขวนลอย (Suspension Solids) ขนาดเล็กในช่วง 0.3-1 ไมครอน เรียกว่า คอลลอยด์ (Colloids) ซึ่งอนุภาคขนาดนี้อาจรวมถึงตะกอนของจุลินทรีย์ได้ด้วย ซึ่งถ้าน้ำมีอนุภาคเหล่านี้อยู่มากจะทำให้น้ำมีความขุ่นมาก ถ้าป้อนน้ำที่มีอนุภาคของสารเหล่านี้มากๆ เข้าสู่ระบบกรอง RO อาจทำให้เกิดการสะสมของตะกอนบนผิวหน้าเมมเบรนและในช่องน้ำไหลในมัดเมมเบรน ทำให้ขัดขวางการไหลของน้ำที่จะซึมแพร่ผ่านเมมเบรน ส่งผลให้กำลังการผลิตน้ำของระบบกรองน้ำ RO ลดลง ต้องใช้แรงดันเพิ่มขึ้น หรือบางครั้งอาจมีการสะสมมากจนช่องทางที่ให้น้ำไหลในมัดเมมเบรนแคบลง ทำให้แรงดันสูญเสียของมัดเมมเบรนสูงขึ้นจนทำให้แรงดันภายในมัดเมมเบรนและนอกมัดเมมเบรนต่างกันมากจนอาจทำให้มัดเมมเบรนแตกเสียหายได้ การอุดตันแบบนี้มักเกิดกับส่วนต่างๆ ของเมมเบรนด้านที่รับน้ำดิบหรือเกิดกับมัดเมมเบรนท่อนแรกๆ ในกรณีที่ระบบกรอง RO ใช้เมมเบรนหลายมัด

ดังนั้นในการเดินระบบจะต้องตรวจสอบดูว่าในน้ำดิบที่ป้อนเข้าระบบมีจำนวนของตะกอนในรูปสารแขวนลอยและคอลลอยด์มากหรือไม่ โดยทั่วไปจะใช้ค่าความขุ่นของน้ำมาพิจารณาเบื้องต้น โดยค่าความขุ่นของน้ำที่ป้อนเข้าระบบต้องไม่เกิน 1 NTU หรืออาจพิจารณาจากการวัดค่าดัชนีตะกอน (Silt Density Index) SDI ต้องไม่เกิน 5 หน่วย ซึ่งค่า



รูปที่1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์หาดัชนีตะกอน SDI

ที่มา: Reverse Osmosis Membrane Technology, Zahid Amjad, Van Nostrand Reinhold, 1992, pp. 107

การคำนวณหาค่า SDI สามารถหาได้จาก ASTM และ American Water Works Association, (2007) จากสมการดังนี้

$$SDI = \left[1 - \frac{\left(\frac{T_o}{T_f}\right)}{15} \right] \times 100$$

SDI = ดัชนีตะกอน (Silt Density Index)

T_0 = เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการกรองน้ำเริ่มแรกเพื่อให้ได้น้ำกรองในปริมาณ 500 ml

T_f = เวลา (วินาที) ที่ใช้ในการกรองน้ำให้ได้น้ำกรอง 500 ml เมื่อกรองน้ำครบ 15 นาที

บทที่ 2
การอุดตันเนื่องจากตะกอนสารแขวนลอย (Suspension Solids) และการอุดตันจากคอลลอยด์ (Colloids)

การอุดตันในระบบกรองน้ำ RO เป็นการอุดตันของเมมเบรนที่เกิดขึ้นเนื่องจากตะกอนต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำดิบ เช่น ตะกอนสารแขวนลอย หรือตะกอนคอลลอยด์ เป็นต้น

ลักษณะของการอุดตันที่เกิดขึ้นจากตะกอนต่างๆ ในน้ำดิบมีได้ดังต่อไปนี้

- การอุดตันที่เกิดกับช่องทางไหลของน้ำในมัดเมมเบรน มักจะเกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน
- การอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรนมักเกิดจากตะกอนขนาดเล็กที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ (Colloids)

2.1 การอุดตันเนื่องจากตะกอนสารแขวนลอย (Suspension Solids)

การอุดตันเนื่องจากตะกอนสารแขวนลอย เป็นการอุดตันของตะกอนขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่า 10 ไมครอน) มักจะอุดตันในช่องทางน้ำไหลในมัดเมมเบรน และมักจะเกิดในส่วนต้นๆ ของช่องทางน้ำไหลทำให้น้ำไหลไม่สะดวกเกิดความดันสูญเสียสูงกว่าปกติในมัดเมมเบรน ปกติมัดเมมเบรนจะมีแรงดันสูญเสียประมาณ 10-12 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังนั้นในการเดินระบบ RO ควรมีการตรวจสอบแรงดันสูญเสียในมัดเมมเบรนว่าสูงขึ้นหรือไม่ ถ้าสูงขึ้นแสดงว่ามีการอุดตันช่องทางไหลของน้ำในมัดเมมเบรนมากขึ้นกว่าปกติ ถ้าแรงดังสูงขึ้นกว่าเดิมมากควรรีบทำการแก้ไข เพราะถ้าปล่อยให้การอุดตันมากขึ้นอาจจะทำให้โครงสร้างของมัดเมมเบรนเสียหายได้

2.1.1 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากตะกอนสารแขวนลอย

การป้องกันการอุดตันเนื่องจากตะกอนขนาดใหญ่นี้ทำได้โดยการติดตั้งชุดกรองที่มีขนาดรูพรุนในช่วง 5-10 ไมครอน กรองน้ำดิบก่อนเข้าปั๊มแรงดันสูงที่จะปั๊มน้ำ

2.1.2 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากตะกอนสารแขวนลอย

การล้างทำความสะอาดเมมเบรนที่อุดตันจากตะกอนและสารแขวนลอย เมมเบรนที่ถูกใช้งานและเกิดการอุดตันสามารถล้างได้ด้วยน้ำยาล้างจาน สบู่เหลว ผงซักฟอก และน้ำยาสระผมที่ไม่ผสมสารฟอกขาว ที่สำคัญต้องไม่มีสารในกลุ่มออกซิไดซิงเอเจนต์ผสมอยู่ เพราะจะทำให้เนื้อเยื่อเมมเบรนเสียหายได้ การล้างด้วยสบู่ควรใช้สบู่เหลวเข้มข้น 0.45 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แต่ถ้าเป็นการอุดตันจากตะกอนจุลินทรีย์อาจจะต้องทำการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) 2.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักร่วมด้วย

2.2 การอุดตันเนื่องจากคอลลอยด์ (Colloids)

คอลลอยด์ (Colloids) คืออนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก โดยปกติอยู่ในช่วงประมาณ 0.3-1.0 ไมครอน ซึ่งจะแขวนลอยอยู่ในน้ำไม่ตกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงของโลก จะต้องใช้เครื่องเหวี่ยงจึงจะตกตะกอนได้ (ปกติแรงโน้มถ่วงขึ้นกับค่า $g = 9.8\ m/s^2$ การเหวี่ยงเป็นการเพิ่มค่า g ทำให้ตะกอนขนาดเล็กเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง g ที่สูงขึ้นที่เกิดเนื่องจากแรงเหวี่ยง) คอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงผลักทางไฟฟ้าและทำให้อนุภาคเหล่านี้กระจายตัวอยู่ในน้ำได้ ค่าประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ที่วัดได้ในรูปของ ซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) โดยใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าที่เรียกว่า Zeta Potential Meter ซึ่งค่านี้เป็นตัวแสดงความเสถียรของคอลลอยด์ โดยปกติคอลลอยด์จะเสถียรที่ค่า Zeta Potential สูงกว่า - 30 mV จากการที่อนุภาคมีประจุไฟฟ้าทำให้อนุภาคกระจายตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจนแรงดึงดูดของโลกที่กระทำกับอนุภาคหรือที่เรียกว่าน้ำหนัก W น้อยมาก ดังสมการ

$W = mg$

m = มวลของอนุภาค

g = ความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก

(9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง M/s^2)

ดังนั้นเมื่ออนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจะทำให้แรงดึงดูดที่ทำให้อนุภาคตกตะกอนด้วยแรงน้อยมากและน้อยกว่าแรงพยุงของน้ำอันเนื่องจากการเคลื่อนไหวของน้ำจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Movement) ดังนั้นถ้าในน้ำที่มีอนุภาคคอยลอยด์จึงไม่สามารถตกตะกอนได้โดยการตั้งทิ้งไว้ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบๆ มีการเปลี่ยนแปลงทำให้น้ำมีการเคลื่อนไหวพยุงอนุภาคคอลลอยด์ให้แขวนลอยอยู่ในน้ำ

2.2.1 แหล่งกำเนิดของการเกิดคอลลอยด์ในระบบกรองน้ำ RO

การเกิดของคอลลอยด์ในระบบกรองน้ำ RO มีแหล่งกำเนิดมาจาก 3 แหล่งด้วยกันดังนี้

• เกิดจากน้ำดิบที่ไหลผ่านตะกอนดินเหนียว ซึ่งจะชะล้างเอาสารอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminums Silicate) มาเป็นตะกอนคอลลอยด์ในน้ำได้

• เกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กที่สัมผัสน้ำในส่วนของท่อ ข้อต่อ และปั๊มในระบบของการกรองน้ำ RO ทำให้เกิดคอลลอยด์ของเหล็ก (Iron Colloids) ขึ้น

• เกิดจากน้ำที่ผ่านกระบวนการทำให้ใส (Clarifier) ซึ่งมีการเติมสารส้มหรือสารโคแอคคูแลนท์ (Coagulants) ซึ่งทำให้เกิดคอลลอยด์ของอลูมิเนียม (Aluminum Colloids) และถ้ามีสารเร่งตกตะกอนจำพวกพอลิเมอร์ (Polymer) หลงเหลือจากระบบตกตะกอนมากเกินไป จะเพิ่มความรุนแรงของการอุดตันและทำให้ล้างออกยากเพราะจะเกิดเป็นตะกอนเหนียว ดังนั้นจึงไม่ควรเติมสารส้มและสารเร่งตกตะกอนมากจนเกินไปเพราะจะทำให้มีสารเหล่านี้หลงเหลือมากจนเกิดปัญหาอุดตันในระบบกรอง RO ได้

2.2.2 แนวทางการป้องกันปัญหาการอุดตันเนื่องจากคอลลอยด์

การอุดตันเนื่องจากคอลลอยด์ เป็นการอุดตันของคอลลอยด์ในระบบ RO เกิดจากการที่อนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเกิดการรวมตัว (Coagulated) กับวัสดุที่ใช้ทำเนื้อเยื่อเมมเบรน (ปกติใช้โพลีเอไมด์ (polyamide)) โพลีเอไมด์จะมีประจุตามสภาพความเป็นกรดด่างหรือค่า pH ของน้ำ ทำให้ผิวหน้าเมมเบรนในระบบ RO มีประจุไฟฟ้าอ่อนๆ (ถ้า pH สูงจะมีประจุลบ ถ้า pH ต่ำจะมีประจุบวก) ดังนั้นในการเดินระบบ RO อาจต้องตรวจสอบว่าอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าบวกหรือลบ และต้องตรวจสอบความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำดิบที่ใช้ ซึ่งจะต้องควบคุมให้ประจุบนผิวเมมเบรนมีประจุเดียวกับ

ในปัจจุบันมีบริษัทผู้ผลิตเมมเบรนได้พัฒนาเมมเบรนชนิดที่สามารถลดปัญหาการดูดซับจากคอลลอยด์ (Low Fouling Membrane) โดยการเคลือบสารบางชนิดที่เป็นกลางทางไฟฟ้าทับบนผิวหน้าเมมเบรนที่เป็นสารโพลีเอไมด์ (Polyamide) ทำให้ผิวหน้าเมมเบรนที่ผลิตขึ้นมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าไม่ว่าจะเดินระบบที่สภาพความเป็นกรดหรือเป็นด่าง (pH ต่างๆ) โดยผิวหน้าเมมเบรนยังคงเป็นกลางทางไฟฟ้าทำให้สามารถเดินระบบได้แม้จะมีปัจจัยเสริมที่จะทำให้เกิดการอุดตันมากขึ้นจากการที่อนุภาคมีประจุไฟฟ้า

อัตราการเกิดการรวมตัว (Coagulate) ของคอลลอยด์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$-\frac{dN}{dt} = k_2 n^2 \qquad \text{———} \qquad (1)$$

เมื่อ $-\frac{dN}{dt}$ = อัตราการลดลงของคอลลอยด์ต่อช่วงเวลา
(มีความหมายว่าเกิดการสะสมอนุภาคคอลลอยด์บนผิวหน้าเนื้อเยื่อเมมเบรน)

k_2 = ค่าคงที่ของการรวมตัว ขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อเยื่อ อุณหภูมิ และค่าความเป็นกรดด่าง

n = ความเข้มข้นของคอลลอยด์ในน้ำ

จากสมการจะเห็นได้ว่าถ้าจะควบคุมให้ปัญหาการอุดตันลดลงจะต้องควบคุมปริมาณความเข้มข้นของคอลลอยด์ n ให้น้อย หรือลดค่า k_2 ลง ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับ

ดังนั้นในการเดินระบบ RO จะต้องมีการประเมินคุณภาพของน้ำดิบที่จะป้อนเข้าสู่ระบบเพื่อเป็นการทำนายว่าจะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันจากอนุภาคคอลลอยด์มากน้อยเพียงใด ซึ่งจะต้องตรวจสอบตัวบ่งชี้ดังต่อไปนี้

• ค่าประจุบนอนุภาคคอลลอยด์ วัดในรูป Zeta Potential ปกติจะต้องมากกว่า -30 mV

• ค่า pH ของน้ำเพื่อตรวจสอบว่าผิวหน้าเมมเบรนมีประจุไฟฟ้าใดเป็นบวกหรือเป็นลบซึ่งจะต้องปรับให้มีประจุไฟฟ้าเดียวกับประจุบนคอลลอยด์

• ค่าตัวบ่งชี้การอุดตัน (Fouling Index) เนื่องจากอนุภาคตะกอน ในรูปค่า SDI (Silt Density Index)

ตารางที่ 1 การอุดตันจากคอลลอยด์ภายใต้ภาวะตัวบ่งชี้ต่างๆ

SDI	**Zeta Potential (mV)**	**อัตราการอุดตันที่เกิดขึ้นจากคอลลอยด์**
<3.0	0 ถึง -30	ไม่เกิดการอุดตันหรืออุดตันเล็กน้อย
3.0-5.0	0 ถึง -30	เกิดปัญหาการอุดตันต้องมีระบบปรับสภาพน้ำเข้าระบบ RO
<5.0	น้อยกว่า -30	ไม่เกิดการอุดตันหรืออุดตันเล็กน้อย
>5.0	น้อยกว่า -30	เกิดปัญหาการอุดตันมากต้องปรับสภาพน้ำก่อนเข้าระบบ RO

* - ข้อมูลจากการทดลองที่ Plant recovery 75 %

- Zeta Potential วัดที่น้ำเข้าระบบ ค่า TDS = 3,000 ppm

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 504, page1, date 12/1/82

2.2.3 ดัชนีตะกอน (Silt Density Index) SDI

ดัชนีตะกอนเป็นตัวเลขที่ใช้บ่งบอกถึงการเกิดปัญหาการอุดตันบนเมมเบรน ได้ ซึ่ง ความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ หาได้จากค่า SDI ซึ่งค่า SDI จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของคอลลอยด์ดังสมการที่1

การหาค่า SDI หาได้จากการหาอัตราการอุดตันบนกระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.45 ไมครอน โดยใช้ความดัน 30 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แล้วหาอัตราส่วนของอัตราการกรองเริ่มต้นกับอัตราการกรองหลังจากกรองผ่านไป 15 นาที ค่า SDI จะมีความสัมพันธ์กับอัตราการอุดตันของคอลลอยด์บนเมมเบรนดังรายละเอียดในข้อ 1.3

การหาความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์อาจหาได้จากการใช้เครื่องนับจำนวนอนุภาคและขนาดโดยใช้หลักการสะท้อนแสงเลเซอร์ (Laser patical analyzer) ซึ่งเครื่องมือวัดนี้มีราคาแพงมาก และไม่สามารถวัดในภาคสนามได้

การหาความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์อาจหาได้จากค่าความขุ่นของน้ำ (Turbidity) ก็ได้ แต่เนื่องจากค่าความขุ่นของน้ำมีความสัมพันธ์กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคและสีของน้ำ จึงทำให้อาจไม่สัมพันธ์กับการอุดตันของอนุภาคคอลลอยด์โดยตรง แต่เป็นวิธีการวัดที่ทำได้ง่ายและสามารถทำในภาคสนามได้ จึงสามารถนำมาใช้ในการประเมินเบื้องต้น

ปกติน้ำทั่วๆ ไป เช่นน้ำบาดาลจะมีค่า SDI ไม่เกิน 1.0 ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ระบบปรับสภาพน้ำเพื่อกำจัดคอลลอยด์ แต่ถ้าน้ำบาดาลที่มีเหล็กและแมงกานีสปนเปื้อนอยู่ในปริมาณสูง เมื่อสูบขึ้นมาสัมผัสกับอากาศจะเกิดอนุภาคคอลลอยด์ของเหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ได้ ดังนั้นถ้าใช้น้ำบาดาลป้อนเข้าระบบ RO จึงควรนำเข้าระบบ RO โดยตรง โดยไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ จะช่วยลดปัญหาคอลลอยด์ของเหล็กและแมงกานีสได้ นอกจากนี้น้ำบาดาลที่มีการปนเปื้อนจุลินทรีย์ ซึ่งเซลล์ของจุลินทรีย์จัดเป็นอนุภาคที่มีขนาดในระดับเดียวกับคอลลอยด์ และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียบางชนิดสามารถเปลี่ยนเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำบาดาลไปเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ หรือในบางครั้งเกิดเป็นคอลลอยด์ของกำมะถัน (S) ขึ้นได้ในกรณีที่น้ำบาดาลมีการปนเปื้อนสารประกอบซัลไฟด์อยู่ ส่วนน้ำผิวดิน น้ำในแม่น้ำลำคลอง หนอง บึง บ่อ ส่วนใหญ่จะมีค่า SDI อยู่ในช่วง 10-175 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับฤดูกาลและสภาพแหล่งน้ำ

จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า SDI กับการอุดตันพบว่า ถ้าค่า SDI มีค่าเท่ากับ 3 หรือน้อยกว่า ทำให้ไม่เกิดปัญหาการอุดตันจากคอลลอยด์ สามารถเดินระบบ RO อย่างมีประสิทธิภาพได้เป็นเวลายาวนาน (นานกว่า 3 ปี) น้ำผิวดินที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนโดยการเติมสารส้มหรือสารเคมีช่วยตกตะกอน (Coagulant) สารช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรวมตัวของตะกอน (Flocculants) ให้ตกตะกอนในถังตกตะกอน แล้วกรองด้วยระบบกรองสาร (Sand Filter) เมื่อนำมาวัดหาค่า SDI โดยทั่วไปจะมีค่า SDI สูงกว่า 6 และน้ำจากระบบผลิตประปาชุมชนมักจะมีค่า SDI สูงกว่า 6 ดังนั้นถ้าจะนำน้ำจากแหล่งนี้เข้าในระบบ RO จะต้องมีการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์ให้เหลือน้อยลงจนมีค่า SDI น้อยกว่า 3 (อาจจะอนุโลม SDI น้อยกว่า 5 ได้แต่ต้องพิจารณาปัจจัยการอุดตันจากตะกอนตัวอื่นๆ ประกอบด้วย) จึงจะสามารถนำน้ำนั้นมาเข้าระบบ RO ได้โดยที่ไม่เกิดปัญหาการอุดตัน

2.2.4 การปรับสภาพน้ำดิบเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์

น้ำที่มีปริมาณอนุภาคของสารคอลลอยด์สูงซึ่งเราสามารถวัดในรูปค่าความขุ่นหรือค่าดัชนีตะกอน (SDI) ตามปกติบริษัทผู้ผลิตเมมเบรนที่ใช้สำหรับกรองน้ำในระบบ RO จะกำหนดระดับค่าดัชนีตะกอนที่ยอมรับได้น้อยกว่า 5 และค่าความขุ่นน้อยกว่า 1 NTU ซึ่งน้ำดิบส่วนใหญ่มีปริมาณคอลลอยด์สูงมีค่าความขุ่นและค่า SDI สูงกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ของทางบริษัทกำหนด หากนำน้ำดิบที่มีค่าความขุ่นและค่า SDI สูงๆ ป้อนเข้าในระบบ RO จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันในเมมเบรน จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพน้ำดิบเพื่อลดปริมาณของสารคอลลอยด์ก่อนที่จะนำเข้าในระบบ RO วิธีการปรับสภาพน้ำเพื่อลดปริมาณคอลลอยด์ มีหลายวิธีดังนี้

1. การกรองโดยใช้สารช่วยกรองไดอะตอม (Diatomaceous Earth) DE ซึ่งมีทั้งการกรองโดยใช้สารไดอะตอมผสมน้ำพอกแกนกรอง (Pre Coat Filter) หรือใช้ไส้กรองที่ผสม DE ที่ทำให้ไส้กรองมีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 1 ไมครอน วิธีการกรองนี้สามารถลดอนุภาคคอลลอยด์จากค่า SDI ที่สูง 5-6 ลงเหลือน้อยกว่า 2 ได้ การกรองระดับนี้อาจเรียกว่าไมโครฟิวเตรชัน (Microfiltration : MF)

2. การกรองอัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) UF เป็นการกรองในระดับที่มีขนาดของรูพรุนเล็ก 0.01 ไมครอน หรืออาจบอกขนาดของรูพรุนในรูปของขนาดโมเลกุล

2.2.5 การปรับเสถียรอนุภาคคอลลอยด์ (Colloids Stabilization)

จากสมการ (1) แสดงว่าอัตราการลดลงของอนุภาคคอลลอยด์ต่อเวลา คือ อัตราการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์กับผิวหน้าเนื้อเยื่อเมมเบรน

$$-\frac{dN}{dt} = k_2 n^2 \qquad \text{———} \qquad (1)$$

n = ความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์

k_2 = ค่าคงที่ของอัตราการรวมตัว ขึ้นอยู่กับค่า Zeta Potential

การลดค่า k_2 โดยการเพิ่มค่า Zeta Potential จะทำให้ยับยั้งการเกิดการรวมตัวของตะกอนโคแอคคูเลชั่น (Coagulation) ของคอลลอยด์ การปรับเสถียรของคอลลอยด์ซึ่งทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งคือใช้ผ่านระบบทำน้ำอ่อน (Water softening) เนื่องจากการแลกเปลี่ยนอิออนบวก 2 ประจุของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในน้ำกับ Na^{1+} ที่อยู่บนผิวเรซิ่นจะมีผลทำให้เกิดชั้นของประจุมากขึ้นบนอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ความกระด้างของน้ำลดลงเหลือน้อยกว่า 5 mg/L (as $CaCO_3$) แต่ค่า Zeta Potential จะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่า -30 mV

2.2.6 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากคอลลอยด์

การล้างเมมเบรนที่เกิดการอุดตันจากคอลลอยด์บนผิวหน้าเมมเบรนสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีดังนี้

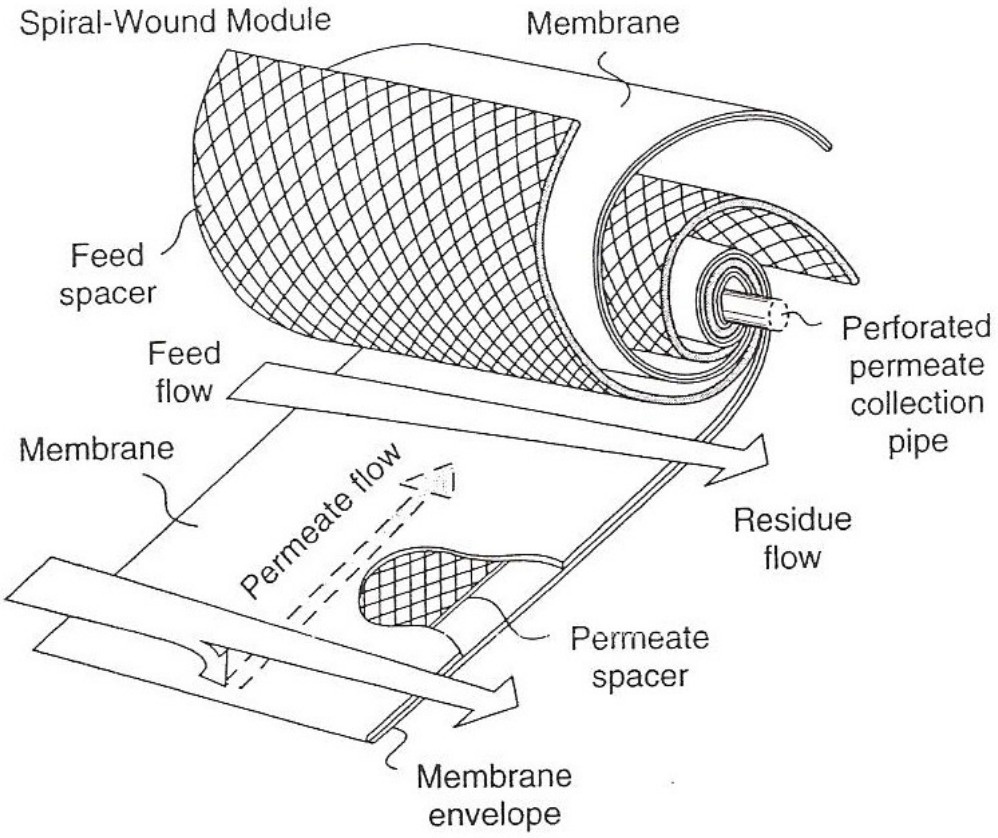
1. ใช้สบู่เหลว น้ำยาล้างจาน ยาสระผม หรือผงซักฟอกที่ไม่มีสารฟอกขาวและสารออกซิไดซิงเอเจนต์ นำมาผสมกับ NaOH และปรับความเป็นกรดด่างให้อยู่ระหว่าง pH 10-11

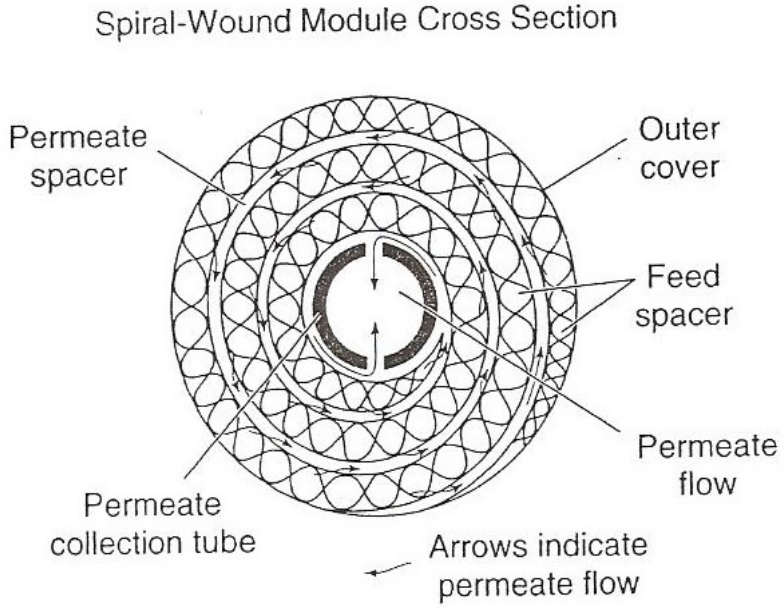
2. NaOH pH 10-11 (โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่าโซดาไฟ ผสมน้ำให้ค่า pH อยู่ที่10-11)

3. HCl pH 2.5 (กรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือที่เรียกทั่วไปว่ากรดเกลือ ละลายน้ำให้มีค่า pH 2.5)

4. กรดมะนาว ปรับ pH = 4 ด้วย NH_4OH (กรดมะนาวหรือกรดซิติก (Citic acid) เข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปรับ pH ให้ได้เท่ากับ 4 โดยใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) หรือน้ำแอมโมเนีย)

ถ้าเป็นการอุดตันเนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ร่วมด้วย อาจจะต้องฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยสารฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) 2.0 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ก่อนแล้วตามด้วยการล้างด้วยสารเคมีในข้อ 1-4 อย่างใดอย่างหนึ่ง





รูปที่ 2 ช่องทางน้ำไหลภายในมัดเมมเบรน Membrane Module

ที่มา: Richard W. Baker and Mc Graw-Hill, 2000

บทที่ 3
การอุดตันเนื่องจากออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide)

ปัญหาการอุดตันของเมมเบรนในระบบกรองน้ำ RO ที่เกิดจากออกไซด์ของโลหะ (Metal Oxide) ส่วนใหญ่แล้วจะพบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ส่วนออกไซด์ของอลูมิเนียมมีเกิดขึ้นเป็นบางกรณีที่น้ำดิบผ่านระบบการผลิตน้ำที่ใช้สารช่วยตกตะกอนในกลุ่มสารส้ม และสารในกลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ

3.1 การอุดตันเนื่องจากตะกอนเหล็กออกไซด์

ปกติเหล็กที่ละลายปนเปื้อนมากับน้ำเกิดในรูปของเฟอรัสไอออน (Fe^{2+}) เมื่อ Fe^{2+} ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในสภาวะที่น้ำมีค่า pH สูงๆ (pH สูงกว่า 7) Fe^{2+} จะกลายเป็น เฟอริคไอออน (Fe^{3+}) แล้วเกิดเป็นตะกอนเฟอริคออกไซด์ Fe_2O_3 อุดตันในเมมเบรน ถ้าต้องการป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาดังกล่าวจะต้องควบคุมปริมาณของเหล็กและออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้มีปริมาณต่ำ หรือควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 5-7 จะทำให้เหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นตะกอนสนิมเหล็กได้น้อยลงดังสมการ

$$4\,Fe^{2+} + 3O_2 \longrightarrow 2\,Fe_2O_3$$

3.1.1 ที่มาของตะกอนเหล็กออกไซด์ในระบบกรองน้ำRO

เหล็กที่ปนเปื้อนในน้ำตามธรรมชาติ ถ้าเป็นน้ำผิวดินจะมีปริมาณเหล็กละลายอยู่ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เพราะ Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์ตามธรรมชาติในขณะที่น้ำไหลจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนตกตะกอนแยกออกไป ส่วนในน้ำบาดาลปริมาณเหล็กที่ปนเปื้อนจะอยู่ในระดับสูง อาจสูงถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ทั้งนี้เพราะในน้ำบาดาลไม่มีออกซิเจนละลายอยู่ หรือค่า DO (Dissolve Oxygen) เป็นศูนย์ ทำให้เหล็กยังคงสภาพอยู่ในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน เมื่อสูบน้ำบาดาลขึ้นมาจากบ่อ ออกซิเจนจะเริ่มละลายลงไปในน้ำและจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดเป็นตะกอนสนิมเหล็ก

เหล็กที่ละลายน้ำก่อให้เกิดปัญหาในระบบ RO อีกแหล่งหนึ่งคือ เหล็กที่ละลายออกมาจากการที่ท่อ ข้อต่อ มีส่วนประกอบที่เป็นเหล็กอยู่ในระบบ RO แล้วเกิดการผุกร่อนและละลายเป็นอนุภาคเหล็กออกไซด์เล็กๆ ที่เป็นคอลลอยด์ของเหล็ก ซึ่งก็จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันได้เช่นเดียวกับที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมา ดังนั้นในระบบ RO ควรหลีกเลี่ยงการใช้อุปกรณ์ที่เป็นเหล็กในชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องสัมผัสกับน้ำ

เหล็กในน้ำบาดาลที่มีการปนเปื้อนจุลินทรีย์ มีจุลินทรีย์บางชนิดใช้เหล็กในกระบวนการเผาผลาญอาหารทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเหล็กในกลุ่มนี้จะไม่ถูกออกซิไดซ์ให้เกิดเป็นตะกอน แต่จะเป็นคอลลอยด์ของสารประกอบอินทรีย์อยู่ในน้ำและก็ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบกรองน้ำ RO ได้เช่นเดียวกัน ส่วนแมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำก็จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับเหล็กและจะเกิดเป็นตะกอนสีน้ำตาลดำทำให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบกรองน้ำ RO ได้เช่นกัน

3.1.2 การป้องกันและแก้ไขปัญหาการอุดตันเนื่องจากตะกอนเหล็กออกไซด์

น้ำดิบที่สามารถป้อนเข้าสู่ระบบกรอง RO ได้ จะต้องมีเหล็กปนเปื้อนอยู่ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจมีเหล็กปนเปื้อนอยู่สูงถึง 4 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ แต่ระดับปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำต้องต่ำและค่า pH ของน้ำก็ต้องต่ำด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณเหล็กที่ยอมให้มีได้ในน้ำที่ป้อนเข้าสู่ระบบกรองน้ำ RO ได้ ซึ่ง ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำและค่า pH ของน้ำ

ปริมาณความเข้มข้นออกซิเจนละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	ปริมาณ Fe^{2+} ที่ยอมให้มีได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)
< 0.5	< 6.0	4
0.5-5	6.0-7.0	0.5
5-10	>7.0	0.05

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 503, page1, date 12/1/82

ถ้าน้ำที่จะป้อนเข้าระบบกรองน้ำ RO มีปริมาณเหล็กละลายสูงจะต้องมีระบบปรับสภาพน้ำเพื่อลดปริมาณ Fe^{2+} โดยการใช้สารออกซิไดซิงเอเจนต์ (Oxidizing agent) จำพวกคลอรีน หรือสารโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate : $KMnO_4$) หรือใช้อากาศก็ได้ เฟอรัสไอออน Fe^{2+} จะถูกออกซิไดซ์เป็นเฟอริคไอออน Fe^{3+} เกิดเป็นตะกอนเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แล้วสามารถกรองตะกอนของเหล็กออกไซด์ออกโดยการใช้ระบบกรองทราย หรือระบบกรองตะกอนอื่น ๆ

การใช้เรซินกำจัดเหล็ก (Iron Removal Resin) เช่น Birm และ Manganese green sand ซึ่ง Birm เป็นเรซินที่สามารถกำจัดเหล็กได้เพียงขั้นตอนเดียว กล่าวคือจะสามารถออกซิไดซ์เหล็กและสามารถกรองออกได้ในเวลาเดียวกันแต่ Manganese green sand จะต้องคืนสภาพ (Regenerate) ด้วยสาร $KMnO_4$ และต้องระมัดระวังมิให้สาร $KMnO_4$ เหลือเข้าไปในระบบ RO เพราะสาร $KMnO_4$ จะไปทำลายเนื้อเยื่อเมมเบรนได้ ปัจจุบันมีการพัฒนาเรซินที่ใช้กำจัดเหล็กได้ มีชื่อทางการค้าต่างๆ กัน สามารถกำจัดเหล็กได้เช่นเดียวกับ Manganese green sand แต่ไม่ต้อง Regenerate ด้วย $KMnO_4$ ทำให้ไม่เกิดปัญหาสาร $KMnO_4$ เหลือเข้าไปทำลายเมมเบรน

ระบบทำน้ำอ่อนโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนอิออน (Ion Exchange) หรือ Softener สามารถกำจัดเหล็กได้เช่นเดียวกันแต่ต้องมีปริมาณเหล็กละลายอยู่ในน้ำไม่มาก (น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) ทั้งนี้เพราะถ้าน้ำมีปริมาณเหล็กปนเปื้อนอยู่สูงจะเกิดปัญหาสนิมเหล็กตกตะกอนอุดตันในรูพรุนของเม็ดเรซิน ทำให้เรซินมีความสามารถในการกำจัดความกระด้างลดลงและอาจทำให้เรซินเสียหายเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร

การควบคุม pH ของน้ำที่ป้อนเข้าระบบก็สามารถควบคุมปัญหาการอุดตันของเหล็กในเมมเบรนได้เช่นเดียวกัน เพราะที่ pH ต่ำๆ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} เกิดขึ้นได้น้อยมาก ทั้งนี้ต้องดูตามค่าการยอมรับในตารางที่ 2

3.2 การอุดตันเนื่องจากสารประกอบอลูมิเนียม (Aluminum Compound)

สารประกอบอลูมิเนียม (Aluminum Compound) เป็นโลหะออกไซด์ที่พบได้ในระบบการกรองน้ำ RO ที่เกิดการอุดตันในเมมเบรน มีที่มาและสาเหตุของการเกิดสารประกอบอลูมิเนียมในน้ำมีดังนี้

3.2.1 ที่มาของตะกอนสารประกอบอลูมิเนียมในระบบกรองน้ำ RO และการกำจัด

สารประกอบอลูมิเนียม (Aluminum Compound) ในระบบกรองน้ำ RO เกิดจากอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide) ในกระบวนการตกตะกอนสารแขวนลอยด้วยสารส้มที่มักใช้ในระบบผลิตน้ำประปาชุมชนทั่วไป ซึ่งโดยปกติอลูมิเนียมจะละลายน้ำได้น้อยที่ pH 6.5 – 6.7 ดังนั้นในการผลิตน้ำประปาควรตกตะกอนด้วยสารส้มและปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6.5 – 6.7 จะทำให้มีอลูมิเนียมละลายปนไปกับน้ำในปริมาณต่ำ แต่ถ้าตกตะกอนที่ pH สูงกว่าหรือต่ำกว่าช่วงดังกล่าว คือ pH สูงกว่า 6.7 หรือต่ำกว่า 6.5 จะมีปริมาณอลูมิเนียมละลายอยู่สูง อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันจากตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์บนผิวหน้าเมมเบรนได้

ระบบผลิตน้ำประปาชุมชนมักตกตะกอนด้วยสารส้มที่ pH 5.0-5.5 เพื่อกำจัดสีในน้ำ และเมื่อเกิดตะกอนแล้วผ่านระบบกรองทรายจะถูกปรับ pH เป็น 8.0-8.5 อาจมีอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminum Hydroxide) ตกตะกอนเป็นคอลลอยด์ในน้ำได้ ซึ่งสามารถใช้วิธีกำจัดคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นได้เช่นเดียวกับการบำบัดสารแขวนลอยในบทที่2 ระบบทำน้ำอ่อน (Softener) สามารถกำจัดอลูมิเนียมอิออนได้เช่นกัน แต่ปริมาณอลูมิเนียมต้องไม่สูงมาก

อลูมิเนียมที่สามารถนำเข้าระบบได้โดยไม่เกิดปัญหาการอุดตันต้องมีคอลลอยด์ของ Al^{3+} ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้ามี Al^{3+} สูงกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้องปรับให้อยู่ในสภาวะ pH ที่เหมาะสม (pH ต่ำกว่า 6.5 หรือสูงกว่า 6.7)

3.2.2 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากตะกอนสารประกอบอลูมิเนียม

การอุดตันของโลหะออกไซด์หรือตะกอนของสารประกอบอลูมิเนียมบนเมมเบรนสามารถล้างออกได้ด้วยสารเคมีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. 1.0 % โดยน้ำหนัก Sodium Hydrogen sulfite ($Na_2S_2O_4$)
2. 2.0 % โดยน้ำหนักกรดมะนาว (Citric acid) โดยปรับ pH 4.0 ด้วย NH_4OH
3. 2.0 % โดยน้ำหนักกรดมะนาว (Citric acid) ผสมกับ 2.0 % โดยน้ำหนัก Sodium EDTA โดยปรับ pH ที่ 4.0 ด้วย NH_4OH
4. 1.0 % โดยน้ำหนัก Sodium Hexa meta phosphate

บทที่ 4
การอุดตันเนื่องจากการตกผลึก (Membrane Scaling)

การอุดตันเนื่องจากการตกผลึกบนผิวหน้าเมมเบรน (Membrane Scaling) เป็นการอุดตันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการตกผลึกของสารละลายเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยเกิดการตกผลึกบนผิวหน้าเมมเบรน เนื่องจากในระบบกรองน้ำ RO ใช้เมมเบรนในการคัดกรองสารละลายเกลือไว้แล้วปล่อยให้น้ำสะอาดซึมแพร่ผ่านเนื้อเยื่อเมมเบรนได้ ดังนั้นในกระบวนการน้ำที่เหลือทิ้งจะมีปริมาณความเข้มข้นของเกลือสูงขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจทำให้เกลือบางชนิดที่ละลายอยู่ซึ่งมีปริมาณมากเกินกว่าที่เกลือชนิดนั้นจะละลายได้หมด จึงเกิดการตกผลึกแยกออกจากน้ำแล้วไปเกาะบนผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ขัดขวางการไหลของน้ำที่จะผ่านเมมเบรนเป็นเหตุให้เกิดการอุดตัน ดังที่เรียกกันว่า เมมเบรนฟาวลิง (Membrane Fouling) ซึ่งการอุดตันเกิดได้จากผลึกหลายชนิดดังนี้

1. การอุดตันเนื่องจากผลึก $BaSO_4$
2. การอุดตันเนื่องจากผลึก $SrSO_4$
3. การอุดตันเนื่องจากผลึก CaF_2
4. การอุดตันเนื่องจากผลึก $CaSO_4$
5. การอุดตันเนื่องจากผลึก $CaCO_3$ หรือหินปูน
6. การอุดตันเนื่องจากผลึก SiO_2

ในการเดินระบบ RO จะต้องควบคุมมิให้ความเข้มข้นของสารดังกล่าวเข้มข้นเกินความสามารถในการละลายของสารเหล่านั้น และต้องไม่เกินค่าตัวบ่งชี้การตกผลึก (Solubility Index) ของสารแต่ละชนิดซึ่งอาจระบุเป็นค่าความสามารถในการละลายในรูปผลคูณอิออน K_{sp} (Solubility Product) ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

4.1 การอุดตันเนื่องจากผลึกเกลือซัลเฟต (Sulfate)

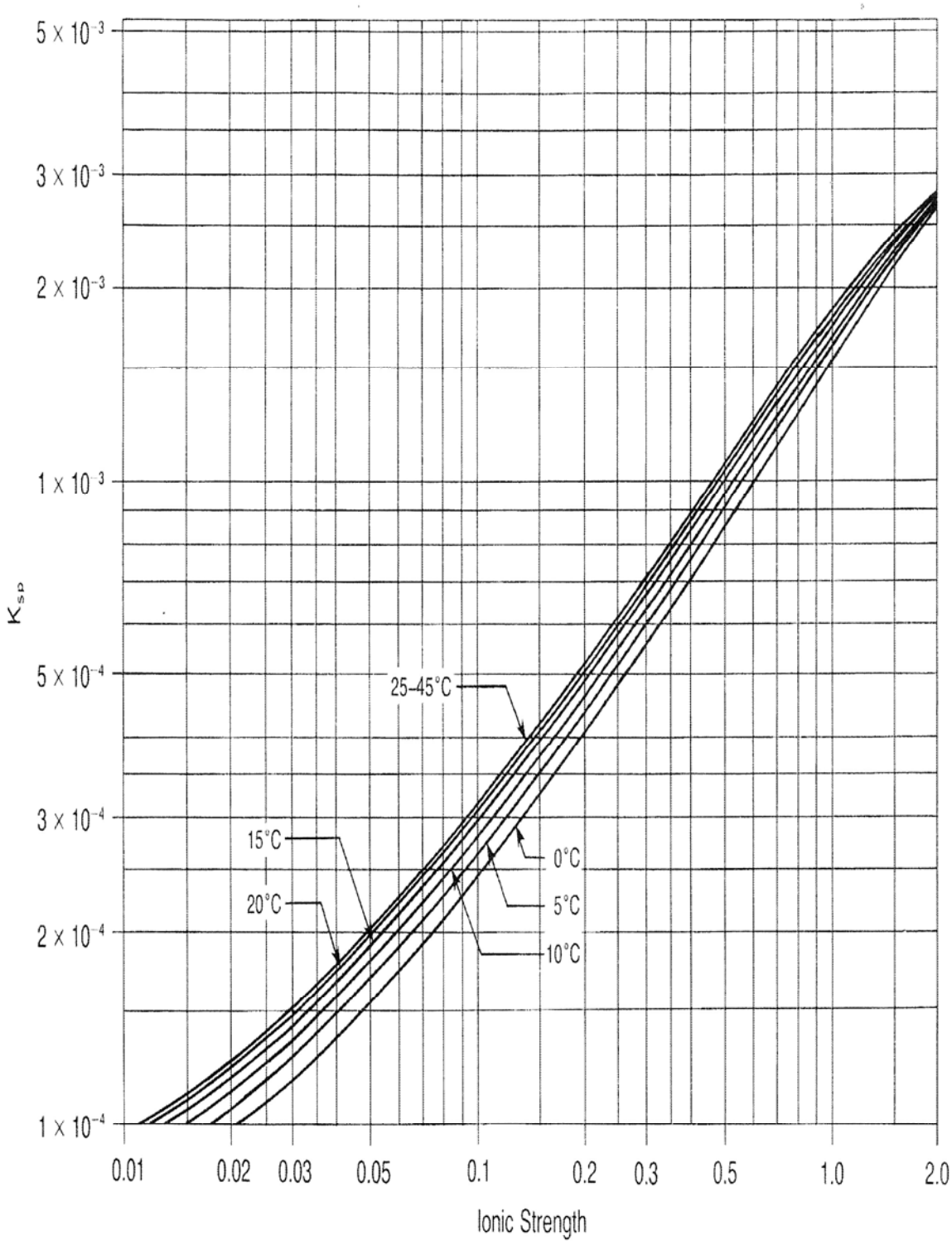
ปัญหาการอุดตันในระบบกรองน้ำ RO มักเกิดกับเกลือซัลเฟตในรูป $CaSO_4$, $BaSO_4$, $SrSO_4$ เกลือซัลเฟตเหล่านี้ละลายน้ำได้น้อย ดูได้จากค่าผลคูณอิออน (Solubility

ตารางที่ 3 ค่า Solubility Product: K_{sp} ของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยบางชนิด

สารประกอบ	Solubility Product : K_{sp}
$CaSO_4$	$7.10x10^{-5}$
$BaSO_4$	$1.07x10^{-10}$
$SrSO_4$	$3.44x10^{-7}$
$CaCO_3$	$4.96x10^{-9}$
CaF_2	$1.46x10^{-10}$

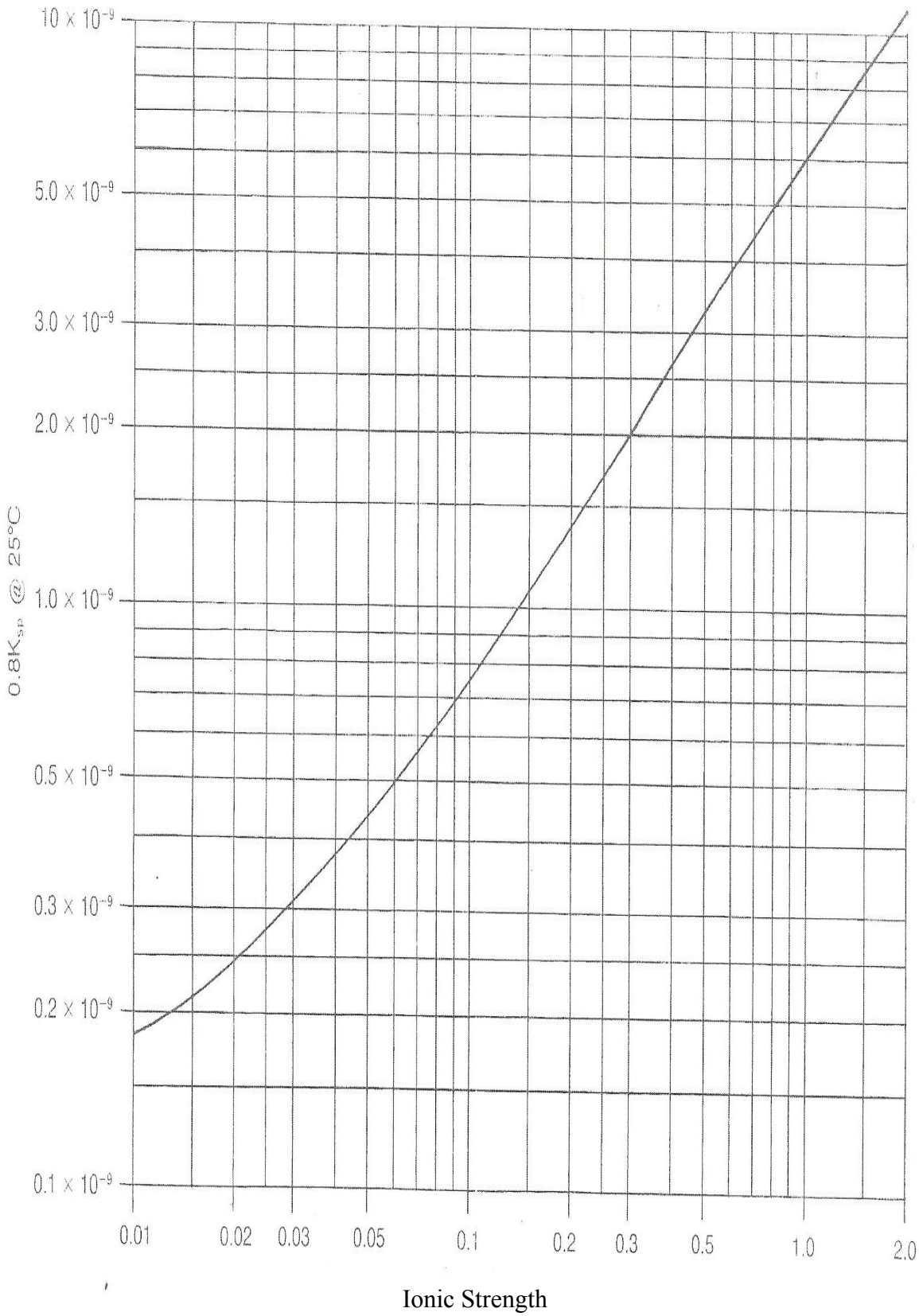
ที่มา: Hand book of chemistry and physics, 70^{th} edition, 1989-1990

ค่า K_{sp} ที่แสดงในตารางที่ 3 เป็นค่า K_{sp} ที่แสดงความสามารถในการละลายของสารในน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แต่ความสามารถในการละลายขึ้นอยู่กับปริมาณเกลืออื่นๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำทั้งหมด ทั้งนี้เพราะถ้าในน้ำมีปริมาณเกลือละลายอยู่มากค่า K_{sp} จะสูงกว่าในตาราง ดังเช่นในน้ำทะเลและน้ำกร่อยซึ่งมีปริมาณอิออนที่มีประจุไฟฟ้าละลายอยู่ในปริมาณมาก และการละลายน้ำของเกลือขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำและปริมาณเกลือทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ กราฟในรูปที่ 3 , 4 และ 5 แสดงค่า K_{sp} ของเกลือ $CaSO_4$, $BaSO_4$ และ $SrSO_4$ ที่อุณหภูมิต่างๆ และความเข้มข้นของประจุ (แสดงความเข้มข้นของเกลือทั้งหมด) ในรูป Ionic Strength และแสดงผลของปริมาณอิออนอื่นๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำคำนวณเป็นค่า Ionic Strength ที่มีผลต่อค่า K_{sp} ฉะนั้นในระบบการกรองน้ำ RO จะต้องตรวจสอบน้ำดิบว่ามีค่า Ionic Strength อยู่เท่าไร แล้วจึงจะสามารถหาค่า K_{sp} ของเกลือที่ละลายอยู่ได้ โดยใช้ค่า 80% ของค่า K_{sp} มาเป็นเกณฑ์ในการยอมรับได้ของน้ำที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ หรือจะดูจากค่าที่บริษัทผู้ผลิตเมมเบรนกำหนด



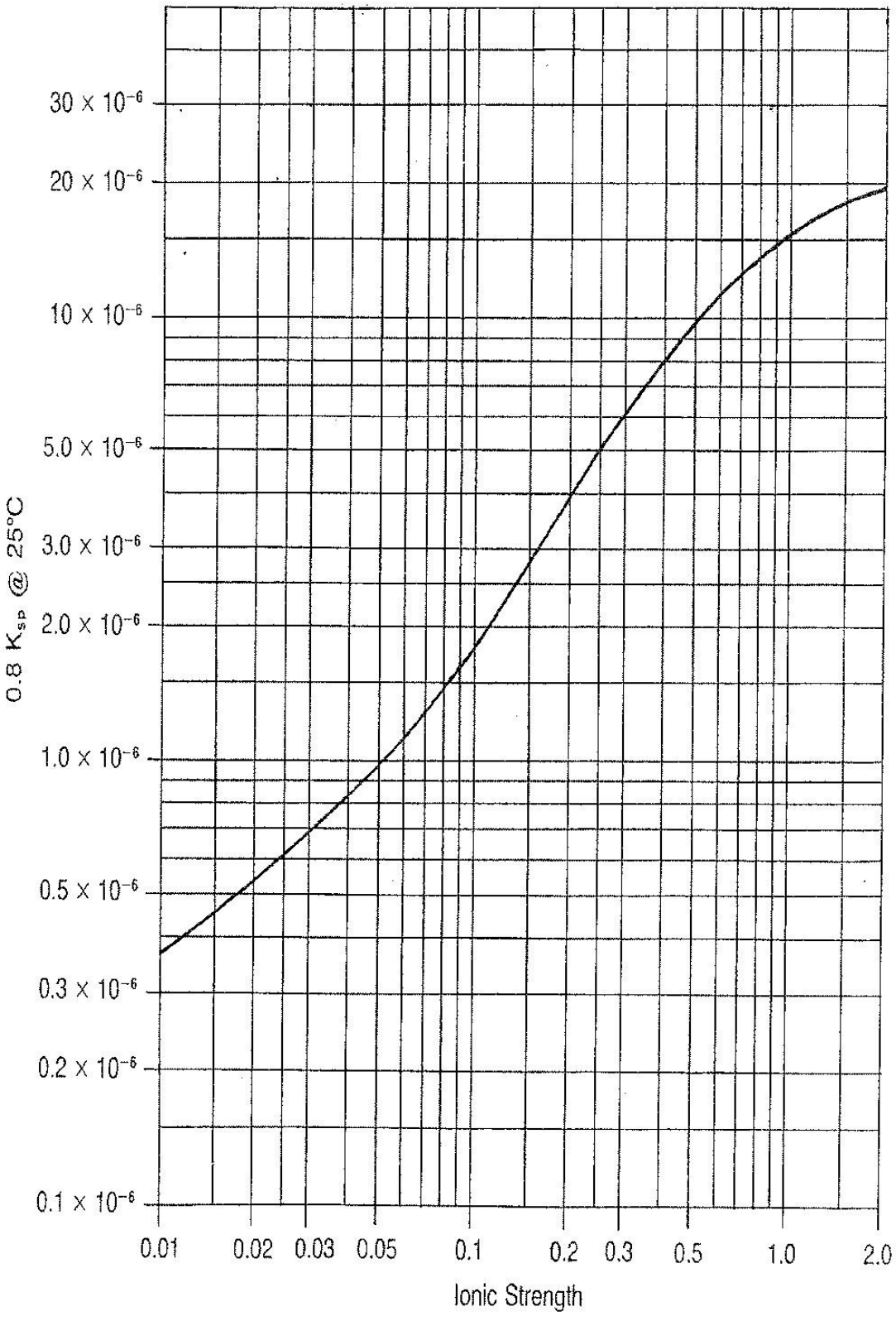
รูปที่ 3 กราฟแสดงค่า K_{sp} ของเกลือ $CaSO_4$ ที่ 25 ^{o}C

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page11, date 12/1/82



รูปที่ 4 กราฟแสดงค่า K_{sp} ของเกลือ $BaSO_4$

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page12, date 12/1/82



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่า K_{sp} ของเกลือ $SrSO_4$

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page13, date 12/1/82

เมื่อพิจารณาค่า K_{sp} ของเกลือซัลเฟตทั้ง 3 ชนิดจากกราฟจะเห็นว่าค่ายังต่ำอยู่มาก ในการเดินระบบ RO จะต้องควบคุมมิให้ความเข้มข้นของเกลือดังกล่าวที่อยู่ในส่วนของน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) ของระบบ RO สูงเกินกว่าค่า K_{sp} ซึ่งโดยปกติจะยอมให้ความเข้มข้นของเกลือในระบบสูงเพียง 80 % ของค่า K_{sp} ในรูปที่ 3,4,5 ได้แสดงค่า 0.8 K_{sp} เพื่อให้เชื่อได้ว่าไม่เกิดการตกผลึกของเกลือเหล่านี้บนผิวหน้าเมมเบรน และถ้าต้องการเดินระบบ RO ที่ความเข้มข้นของเกลือซัลเฟตสูงกว่า 0.8 K_{sp} จะต้องใช้สารป้องกันการตกผลึก (Anti sealants) เช่น (Sodium Hexa meta phosphate) NaHMP หรือสารตัวอื่นๆ ที่มีชื่อทางการค้าดังเช่น Forcal-100 , Seflox-100 เป็นต้น แต่ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ดังแสดงในตาราง 4

ตารางที่ 4 เงื่อนไขในการเดินระบบ RO เพื่อป้องกันการอุดตันของผลึกเกลือซัลเฟตที่ค่า K_{sp} ต่าง ๆ

เกลือซัลเฟต	ผลคูณของอิออนในน้ำเกลือ (Brine) IPb	
	ไม่ใช้ Anti sealant	ใช้ Anti sealant 10 mg/L
$CaSO_4$	$< 0.8\ K_{sp}$	$\leq$ 0.001 หรือ $1.2\ K_{sp}$
$BaSO_4$	$< 0.8\ K_{sp}$	$\leq 40\ K_{sp}$
$SrSO_4$	$< 0.8\ K_{sp}$	$\leq 8\ K_{sp}$

ที่มา: Hand book of chemistry and physics, 70th edition, 1989-1990

ในทางปฏิบัติจะเก็บน้ำทิ้งของระบบ RO ที่เรียกว่า Brine นำมาตรวจหาความเข้มข้นของอิออนของเกลือชนิดที่คาดว่ามีอยู่ หาความเข้มข้นว่ามีอยู่เท่าไรในหน่วยโมลต่อลิตร แล้วนำความเข้มข้นมาคูณกันดังเช่นในกรณีของเกลือซัลเฟตเป็นดังนี้

$$[Ba^{2+}]\ [SO_4^{2-}] = K_{sp}$$

$[Ba^{2+}]$ และ $[SO_4^{2-}]$ = ความเข้มข้นของอิออน Ba^{2+}และ SO_4^{2-} ในหน่วยโมลต่อลิตร แล้วนำผลคูณที่ได้ไปเทียบในกราฟรูปที่ 4 โดยดูเส้นกราฟที่อุณหภูมิของน้ำ Brine ถ้า

ถ้าเป็นการออกแบบระบบ RO ที่ต้องประเมินว่าจะมีการอุดตันเกิดขึ้นหรือไม่ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์น้ำดิบที่จะป้อนเข้าระบบแล้วคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) โดยใช้ค่าสัดส่วนของปริมาณน้ำที่ผลิตได้ต่อปริมาณน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (conversion) ในการเดินระบบมาใช้ในการคำนวณหาค่า K_{sp} ของ $BaSO_4$ เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้นของน้ำเกลือเข้มข้นจากการเดินระบบ RO ตามสัดส่วนการผลิตน้ำต่อน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (y) ดังสมการ

$$[Ba^{2+}]_b = [Ba^{2+}]_f[1/(1-y)] \quad \text{————} \quad (1)$$

$[Ba^{2+}]_b$ = ความเข้มข้นของ Ba^{2+} ในน้ำเกลือเข้มข้น (Brine)

$[Ba^{2+}]_f$ = ความเข้มข้นของ Ba^{2+} ในน้ำป้อนเข้าระบบ (Feed)

y = conversion ratio สัดส่วนของปริมาณน้ำที่ผลิตได้ต่อปริมาณน้ำที่ป้อนเข้าระบบ หรือ

y = Permeate Flow Rate / Feed Flow Rate

แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่า K_{sp} ของผลึกในน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) จากสมการ

$$IP_{(BaSO_4)_b} = [Ba^{2+}]_b [SO_4^{2-}]_b$$

$IP_{(BaSO_4)_b}$ = Ion Product ของ $BaSO_4$ ใน Brine

$[Ba^{2+}]_b$ = ความเข้มข้น Ba^{2+} Ion ใน Brine (mole/ liter)

$[SO_4^{2-}]_b$ = ความเข้มข้น SO_4^{2-} Ion ใน Brine (mole/ liter)

4.1.1 การคำนวณหาค่า Ionic strength

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า Ionic Strength จากสมการ

$$I = \frac{1}{2}\sum \overline{M_i} Z_i^{\,2} \quad \text{————} \qquad (2)$$

I = Ionic Strength

$\overline{M_i}$ = ความเข้มข้นของอิออน (Molal) โมลต่อ 1000 กรัมของน้ำ

Z_i = ประจุบนอิออน (i)

$\overline{M_i}$ หาได้จากสมการ

$$\overline{M_i} = \frac{C_i}{1{,}000\, MW_i \left[\frac{10^6 - TDS_f}{10^6} \right]} \quad \text{————} \qquad (3)$$

C_i = ความเข้มข้นของอิออน i ppm (as ion)

MW_i = น้ำหนักอิออน i

TDS_f = ปริมาณสารละลายร่วม (Total Dissolved Solids) ในน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (Feed) ppm or mg/l

เมื่อคำนวณได้ค่า $\overline{M_i}$ ในสมการ (3) แล้วจะเป็นค่า $\overline{M_i}$ ของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (feed) จะต้องนำไปคำนวณหาค่า $\overline{M_{i\,b}}$ ซึ่งเป็นความเข้มข้นในน้ำทิ้ง (Brine) จากการเดินระบบ RO ที่ใช้สัดส่วนของน้ำที่ผลิตได้ต่อน้ำที่ป้อนเข้าระบบ = y

$$\overline{M}_{ib} = \overline{M}_{if} \left[\frac{1}{1-y} \right]$$

$\overline{M_{ib}}$ = ความเข้มข้นอิออน i ในน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) , Molal

$\overline{M_{if}}$ = ความเข้มข้นอิออน i ในน้ำป้อนเข้าระบบ (Feed) , Molal

y = Conversion ratio (น้ำที่ผลิตได้ต่อน้ำที่ป้อนเข้าระบบ) ตามเงื่อนไขในการเดินระบบ RO

การคำนวณหาค่า Ionic strength ต้องหาผลรวมของประจุไฟฟ้าของอิออนทั้งหมดที่มีปนเปื้อนอยู่ในน้ำ ทั้งนี้ต้องพิจารณาปริมาณของอิออนที่ปนอยู่ในน้ำที่มีผลต่อนัยสำคัญของการคำนวณ ถ้าใช้ $\overline{M_{i\,b}}$ ความเข้มข้นของอิออนในน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) จะได้ค่า Ionic strength ของ Brine ด้วย

ใช้ค่า $IP_{(BaSO_4)_b}$, ค่า I_b Ionic strength ของน้ำเกลือเข้มข้น (Brine) และอุณหภูมิที่เป็นเงื่อนไขในการเดินระบบอ่านค่า 0.8 K_{sp} จากรูปที่4

1. ถ้าน้อยกว่า 0.8 K_{sp} ไม่ตกผลึก
2. ถ้าเท่ากับ 0.8 K_{sp} สมดุลพอดี ไม่เกิดผลึก
3. ถ้ามากกว่า 0.8 K_{sp} มีแนวโน้มจะตกผลึก

การคำนวณหาดัชนีการตกผลึกของ $CaSO_4$ และ $SrSO_4$ ก็ใช้วิธีเดียวกัน

4.1.2 การปรับสภาพน้ำก่อนเข้าระบบ RO เพื่อป้องกันการอุดตันจากเกลือซัลเฟต

วิธีการปรับสภาพน้ำก่อนเข้าระบบ RO เพื่อป้องกันการอุดตันจากเกลือซัลเฟตทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การเติมสารป้องกันการตกผลึก (Anti scalants) หรือ Scale Inhibitors โดยปกติใช้สาร NaHMP (Sodium hexa meta phosphate) หรือสารป้องกันการตกผลึก (Anti scalant) ที่มีชื่อทางการค้าต่างๆในกรณีที่ค่าผลคูณอิออนสูงกว่าค่า K_{sp} ไม่มากหรือตามข้อกำหนดของบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน โดยเติมผสมกับน้ำป้อนเข้าระบบให้มีสาร Anti scalants เข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือตามที่ปริมาณผู้ผลิตระบุตามข้อกำหนดในตารางที่ 5 แต่การใช้สารยับยั้งการตกผลึกจะต้องมีการล้าง (Flushed) ระบบทุกๆ 4 ชั่วโมง และเมื่อหยุดระบบจะต้อง Flushed ด้วยน้ำสะอาดทุกครั้ง ทั้งนี้เพราะสารเหล่านี้จะยับยั้งการตกผลึกได้ในช่วงเวลาจำกัด อนึ่งในการเติมสาร NaHMP จะต้องพิจารณาดูปัญหาการตกผลึกของสารในกลุ่มฟอสเฟต เช่น $Ca_3(PO_4)_2$ ทั้งนี้เพราะการเติม NaHMP จะเป็นการเพิ่มจำนวนฟอสเฟตอิออน ซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มปัญหาการเกิดผลึก $Ca_3(PO_4)_2$ ให้รุนแรงขึ้น

2. ใช้วิธีลด Conversion หรือลดปริมาณสัดส่วนของน้ำที่ผลิตได้ต่อน้ำที่ป้อนเข้าระบบ (y) เพื่อลดความเข้มข้นของอิออน ทำให้ผลคูณอิออน IP_b ลดลงอยู่ในสภาวะที่ไม่ตกผลึกหรืออยู่ในสภาพที่สามารถใช้สาร Anti sealants ได้ ควรหลีกเลี่ยงการใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) ในการปรับสภาพความเป็นกรดด่าง (pH) เพราะจะเป็นการเพิ่ม

3. ใช้ระบบทำน้ำอ่อน (Softener) ซึ่งใช้กระบวนการแรกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange) ในระบบนี้ Ca^{2+}, Ba^{2+}, Sr^{2+} จะถูกจับใช้กับเรซินทำให้ผลคูณ IP_b ลดลง

4.1.3 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากเกลือซัลเฟต

เกลือซัลเฟตที่มักพบว่ามีการอุดตันในระบบ RO เช่นเกลือ $CaSO_4$, $BaSO_4$ และ $SrSO_4$ ในระบบกรองน้ำ RO ถ้าเป็นน้ำกร่อยจะเดินระบบที่ Conversion Ratio สูงๆ ประมาณ 60-70 % เพราะจะทำให้เกิดการตกผลึกเกลือซัลเฟตดังกล่าวทั้งหมด ($CaSO_4$, $BaSO_4$ และ $SrSO_4$) ส่วนในระบบกรองน้ำทะเลผลึก $CaSO_4$ จะไม่เกิดเพราะระบบกรองน้ำทะเลเดินระบบที่ Conversion ไม่เกิน 40 % ทำให้ IP_b ของ $CaSO_4$ ไม่สูงกว่า 0.8 K_{sp} ของ $CaSO_4$

การล้างผลึก $CaSO_4$, $BaSO_4$ และ $SrSO_4$ ในกรณีที่เกิดการอุดตัน

1. สารละลาย EDTA ที่ pH 7-8
2. กรดมะนาว Citric acid 2 % โดยน้ำหนัก ปรับ pH 8 ด้วย NH_4OH

4.2 การอุดตันเนื่องจากแคลเซียมฟลูออไรด์ (Calcium Fluoride) CaF_2

แคลเซียมฟลูออไรด์เป็นตะกรันอย่างหนึ่งที่เกิดการอุดตันในระบบกรองน้ำ RO แต่พบไม่บ่อยนัก การคำนวณหาดัชนีการเกิดตะกรันมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการคำนวณหาดัชนีการเกิดตะกรันของ $CaSO_4$ เพียงแต่สมการสมดุล K_{sp} ต่างกัน ดังสมการ

$$K_{sp}\ (CaF_2) = [Ca^{2+}][F^{1-}]^2$$

ดังนั้น $$IP_b = [M_{Ca^{2+}}]_b\ [M_{F^{1-}}]_b^2$$

ถ้าคำนวณแล้วค่า IP_b (Ion Product of Brine)

$IP_b < K_{sp}$ of CaF_2 แสดงว่าไม่เกิดตะกรัน

$IP_b = K_{sp}$ of CaF_2 อยู่ภาวะสมดุลพอดี

$IP_b > K_{sp}$ of CaF_2 แสดงว่าจะเกิดตะกรัน

ค่า K_{sp} ของ $CaF_2 = 4.0 \times 10^{-11}$

ถ้าต้องการจะเดินระบบ RO ที่ค่าผลคูณอิออน (IP_b) ในน้ำทิ้งสูงกว่า 4.0×10^{-11} ซึ่งเป็นจุดที่จะเกิดการตกผลึกของเกลือ CaF_2 จะต้องเติมสารป้องกันการตกผลึก (Anti scalants) อาจใช้สาร NaHMP (10 mg/L) หรือสารป้องกันการตกผลึกตัวอื่นๆ ตามที่ทางบริษัทผู้ผลิตเมมเบรนระบุ แต่ค่า IP_b ต้องไม่เกิน 4.0×10^{-9} เพราะที่ความเข้มข้นของเกลือที่สูงมากๆ สารป้องกันการตกผลึกไม่สามารถควบคุมการตกผลึกได้

ถ้าผลคูณอิออน IP_b ของน้ำทิ้งสูงเกินค่า K_{sp} ของ CaF_2 วิธีการป้องกันทำได้โดยการลด Convertion ratio (y) ลง หรือลดปริมาณความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในน้ำดิบ โดยการผ่านเข้าระบบทำน้ำอ่อน (Solftener) โดยการใช้แคทไอออนเรซินจับ Ca^{2+} จะทำให้เหลือ Ca^{2+} น้อยๆ ทำให้ผลคูณอิออน IP_b ลดลงต่ำกว่าค่า K_{sp}

4.3 การอุดตันเนื่องจากตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

ตะกรันของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือหินปูนที่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันในระบบกรองน้ำ RO เป็นปัญหาที่พบบ่อย ทั้งนี้เพราะ Ca^{2+}, CO_3^{2-} และ HCO_3^- อนุมูลคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตมักมีปนเปื้อนอยู่ในน้ำ การเกิดตะกรันหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากแคลเซียมอิออน (Ca^{2+}) คาร์บอเนตอิออน (CO_3^{2-}) และ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มีความเข้มข้นสูงเกินกว่าความสามารถในการละลายของ $CaCO_3$ จึงรวมตัวกันเป็นผลึกของ $CaCO_3$

ดังนั้นในการป้องกันมิให้เกิดตะกรันหินปูน $CaCO_3$ ทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของ Ca^{2+}, CO_3^{2-} และ HCO_3^- ให้มีปริมาณต่ำๆ เพื่อมิให้ถึงค่าอิ่มตัว

4.3.1 การหาค่าบ่งชี้การเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

ในการหาค่าบ่งชี้การเกิดตะกรัน $CaCO_3$ ซึ่งไม่สามารถใช้ค่า K_{sp} ของ $CaCO_3$ มาใช้ในการพิจารณาเพียงอย่างเดียวได้ ทั้งนี้เพราะ Ca^{2+} และ HCO_3^- มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อุณหภูมิและสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำ ตลอดจนความกระด้างของน้ำ ทั้งนี้เพราะการแตกตัวของกรดคาร์บอนิก (Carbonic) H_2CO_3 ซึ่งเป็นกรดอ่อนจะเกิดการแตกตัว 2 ขั้นตอนดังนี้

$$H_2CO_3 \xleftrightarrow{k_{a1}} H^+ + HCO_3^- \qquad (4)$$

$$HCO_3^- \xleftrightarrow{k_{a2}} H^+ + CO_3^{2-} \qquad (5)$$

ซึ่งการแตกตัวแต่ละขั้นตอนของกรดคาร์บอนิกจะมีสมดุลของการแตกตัวของกรด K_a 2 ค่า คือ k_{a1} และ k_{a2} ดังสมการ 4 และ 5

การแตกตัวของกรดคาร์บอนิกในสมการที่ 4 ถือว่าแตกตัว 100 % k_a ถือว่าเป็นค่าคงที่แสดงอัตราการสลายตัวของกรดคาร์บอนิกในการแตกตัวครั้งที่ 2 k_{a2} ดังสมการ6

$$k_{a2} = \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} \qquad (6)$$

การละลายของหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต

$$CaCO_3 \longleftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} \qquad (7)$$

$$K_{sp} \text{ (ของ } CaCO_3) = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \qquad (8)$$

K_{sp} ความสามารถการละลายในรูปของผลคูณอิออน IP ของส่วนที่ละลายน้ำ และสามารถคำนวณเป็นสัดส่วนของค่า K_{sp} และ k_{a2} ได้ดังนี้

$$\frac{k_{sp}}{k_{a2}} = \frac{[HCO_3^-][CO_3^{2-}][Ca^{2+}]}{[CO_3^{2-}][H^+]}$$

และสามารถจัดรูปแบบสมการให้อยู่ในรูปของค่าที่สามารถตรวจวัดได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{k_{sp}}{k_{a2}} = \frac{\left[HCO_3^-\right]\left[Ca^{2+}\right]}{\left[H^+\right]}$$

$$\left[H^+\right] = \frac{k_{a2}}{k_{sp}}\left[HCO_3^-\right]\left[Ca^{2+}\right]$$

$$-\log\left[H^+\right] = -\log\left[\frac{k_{a2}}{k_{sp}}\left[HCO_3^-\right]\left[Ca^{2+}\right]\right]$$ (ใส่-log ทั้งสองข้างของสมการ)

ในทางเคมีค่า -log ของความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลิตรแทนด้วย p ตัวอย่าง เช่น $-\log[H^+]$ = pH ค่า $[H^+]$ = ความเข้มข้นของไฮโดรเจนอิออน pH จึงเป็นค่าแสดงความเป็นกรดด่างของสารละลาย

$$pH = -\log\frac{k_{a2}}{k_{sp}} + \left\{-\log\left[HCO_3^-\right]\right\} + \left\{-\log\left[Ca^{2+}\right]\right\}$$

$$pH = C + pAlk + pCa$$

$$pH = -\log\left[H^+\right]$$

$$pAlk = -\log\left[HCO^-{}_3\right]$$

$$pCa = -\log\left[Ca^{2+}\right]$$

$$C = -\log\frac{k_{a2}}{k_{sp}}$$

ทั้งนี้เพราะว่า $-\log$ ของค่าคงที่จะได้ค่าคงที่ตัวใหม่เรียกว่า C

สรุปสมการให้ง่ายขึ้นได้ดังนี้

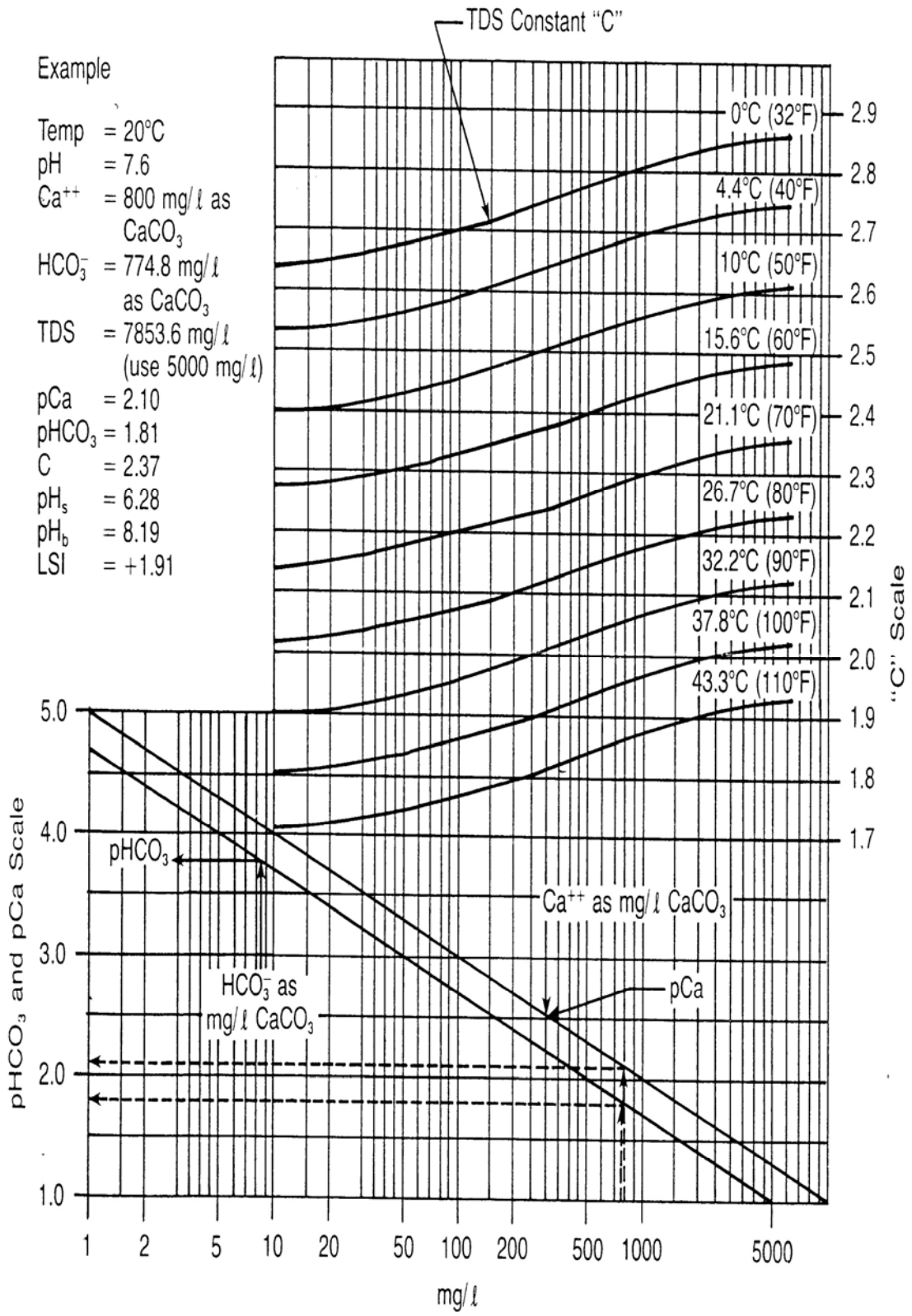
$$pH = pCa + pAlk + C \qquad \text{————————} \qquad (9)$$

จากการปรับสมการให้อยู่ในรูปที่ดูง่ายและสัมพันธ์กับค่าที่สามารถวัดได้และหาค่าได้ จะเห็นว่าสมการ (9) แสดงค่า pH ของน้ำมีผลต่อการตกผลึกของหินปูน จึงสามารถพิจารณาค่า pH ที่จุดหินปูนอิ่มตัว

$$pH_s = pCa_c + pAlk_c + C \qquad \text{————————} \qquad (10)$$

pH_s คือ pH ที่จุดหินปูนอิ่มตัวพอดี

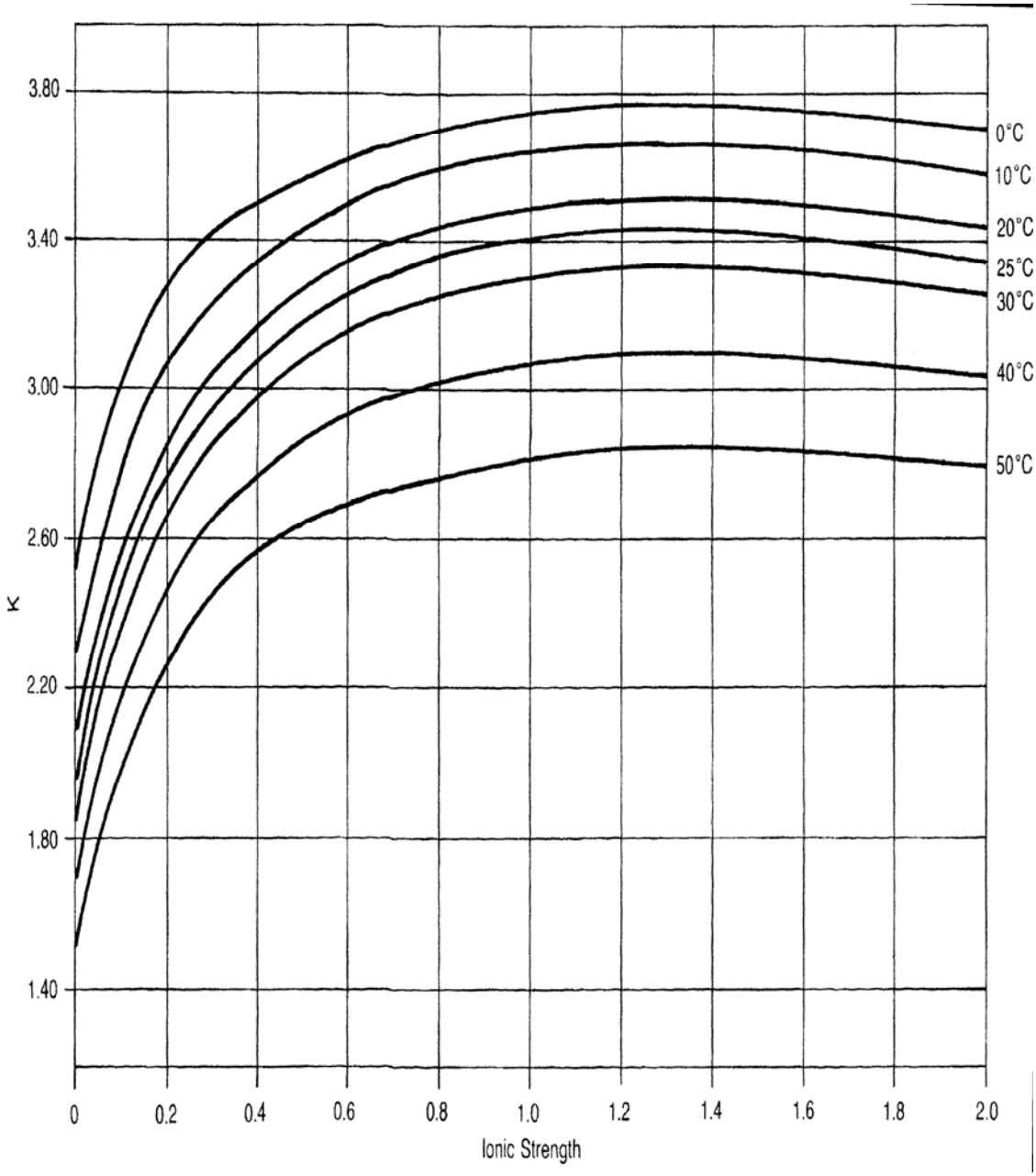
ในปี 1930 Langelier ได้ทำการศึกษาการทดลองและหาความสัมพันธ์ของค่า C อุณหภูมิและปริมาณสารละลายรวมตามสมการ (10) และได้ทำการทดลองหาค่า C ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิและค่าปริมาณสารละลายรวมในช่วงความเข้มข้น 1-10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (TDS) ดังแสดงในรูปที่ 6 (Langelier Saturation Index)



รูปที่ 6 กราฟแสดงดัชนีชี้วัดการอิ่มตัวของการตกผลึกในน้ำ (Langelier Saturation Index)

ที่มา: ASTM D 3739-05, standard practice for calculation and adjustment

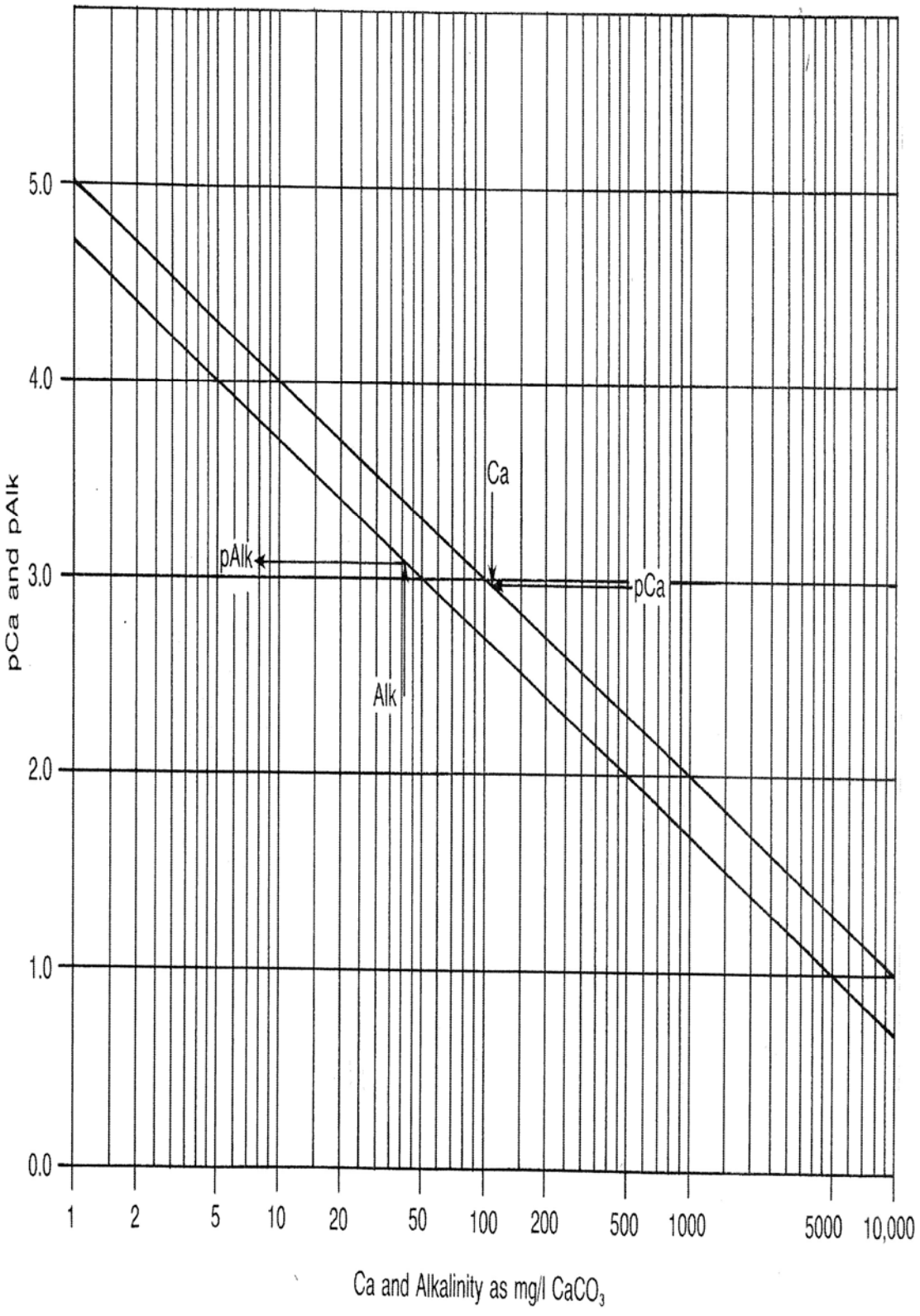
ส่วนในน้ำที่มีค่า TDS สูงๆ สูงกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ช่วงความเข้มข้นของน้ำทะเล) Stiff และ Davis ได้หาความสัมพันธ์ของค่า C ในสมการ (9) และ (10) ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิและค่า Ionic Strength เรียกค่าคงที่นี้ว่า K ดังรูปที่ 7 และหาค่า pCa และ pAlk จากรูปที่ 8



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของค่า K และค่า Ionic Strength ที่อุณหภูมิต่างๆ

("K" vs Ionic Strength and Temperature)

ที่มา: ASTM D 4582-05, standard practice for calculation and adjustment



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของค่า pCa and pAlk และค่า Ca and Alkalinity as mg/l $CaCO_3$ (Conversion of Calcium and Alkalinity to pCa and pAlk)

ที่มา: ASTM D 4582-05, standard practice for calculation and adjustment

การพิจารณาดัชนีบ่งชี้การเกิดตะกรันของ $CaCO_3$ โดยการพิจารณาจากค่า pH ของน้ำเทียบกับค่า pH_S เรียกว่า LSI (Langelier Saturation Index)

LSI (Langelier Saturation Index) = $pH_b - pH_S$

S & DSI (Stiff and Davis Stability Index) = $pH_b - pH_S$

(สำหรับ TDS เกิน 10,000 (mg/l)

pH_S = pH ที่มีปริมาณ $CaCO_3$ อิ่มตัวพร้อมตกผลึก

pH_b = pH ของน้ำเกลือเข้มข้นที่ทิ้งจากระบบ RO

ซึ่งอาจวัดได้จากการเดินระบบ RO แล้ววัด pH_b ของน้ำทิ้ง แต่ถ้าระบบยังไม่ได้สร้างหรือยังไม่ได้เดินระบบสามารถหาค่าได้โดยการคำนวณเพื่อประเมินสถานภาพการอุดตันจากหินปูนตามสมการ (9)

4.3.2 วิธีการคำนวณหา pH_b

วิธีการคำนวณหา pH_b สามารถคำนวณหาได้จากสมการดังนี้

$$pH_b = pCa_b + pAlk_b + C$$

$$pH_b = pCa_b + pAlk_b + K$$

$$pCa_b = -\log\left[Ca^{2+}\right]_b$$

$$pAlk_b = -\log\left[HCO_3^-\right]_b$$

$[Ca^{2+}]_b$ = ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในน้ำเข้มข้น (น้ำทิ้ง Brine) โมลต่อลิตร

$[HCO_3^-]_b$ = ความเข้มข้นของ HCO_3^- ในน้ำเข้มข้น (น้ำทิ้ง Brine) โมลต่อลิตร(as $CaCO_3$)

$$\left[Ca^{2+}\right]_b = \left[Ca^{2+}\right]_f \left[\frac{1-(y)(SP)}{1-y}\right]$$

SP = Salt passage ของ Ca^{2+} มีค่าใกล้ศูนย์

$$\left[Ca^{2+}\right]_b = \left[Ca^{2+}\right]_f \left[\frac{1}{1-y}\right]$$

$$SP = 1 - SR$$

SP = Salt passage

SR = Salt Rejection

y = Conversion Ratio ในการเดินระบบ

$$\left[HCO_3^-\right]_b = \left[HCO_3^-\right]_f \left[\frac{1-(y)(SP)}{1-y}\right]$$

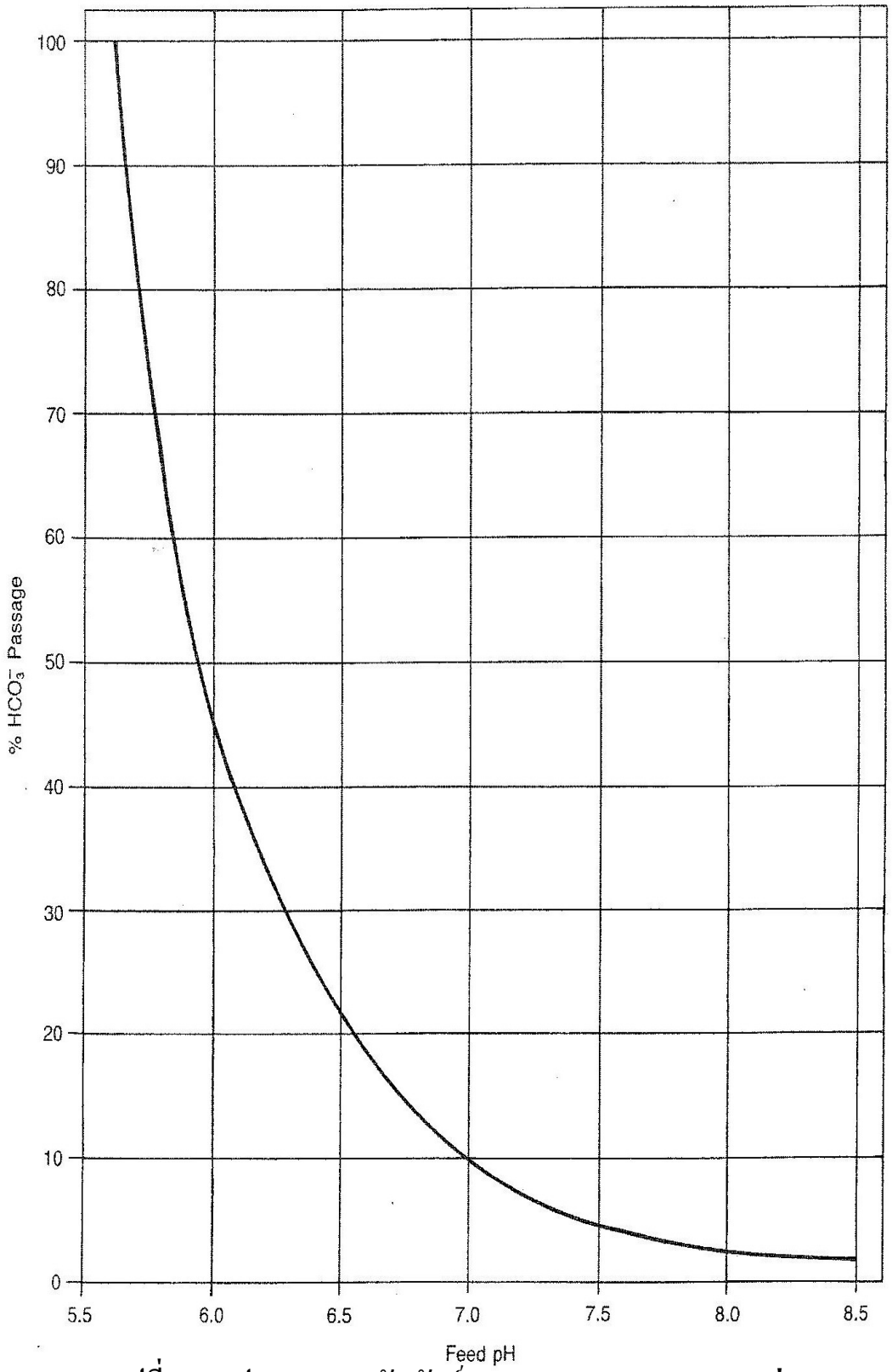
$[Ca^{2+}]_b$ = ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในน้ำเข้มข้น (น้ำทิ้ง Brine) โมลต่อลิตร

$[Ca^{2+}]_f$ = ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในน้ำป้อนเข้าระบบ (Feed) โมลต่อลิตร

$[HCO_3^-]_b$ = ความเข้มข้นของ HCO_3^- ในน้ำเข้มข้น (น้ำทิ้ง Brine) โมลต่อลิตร

$[HCO_3^-]_b$ = ความเข้มข้นของ HCO_3^- ในน้ำป้อนเข้าระบบ (Feed) โมลต่อลิตร

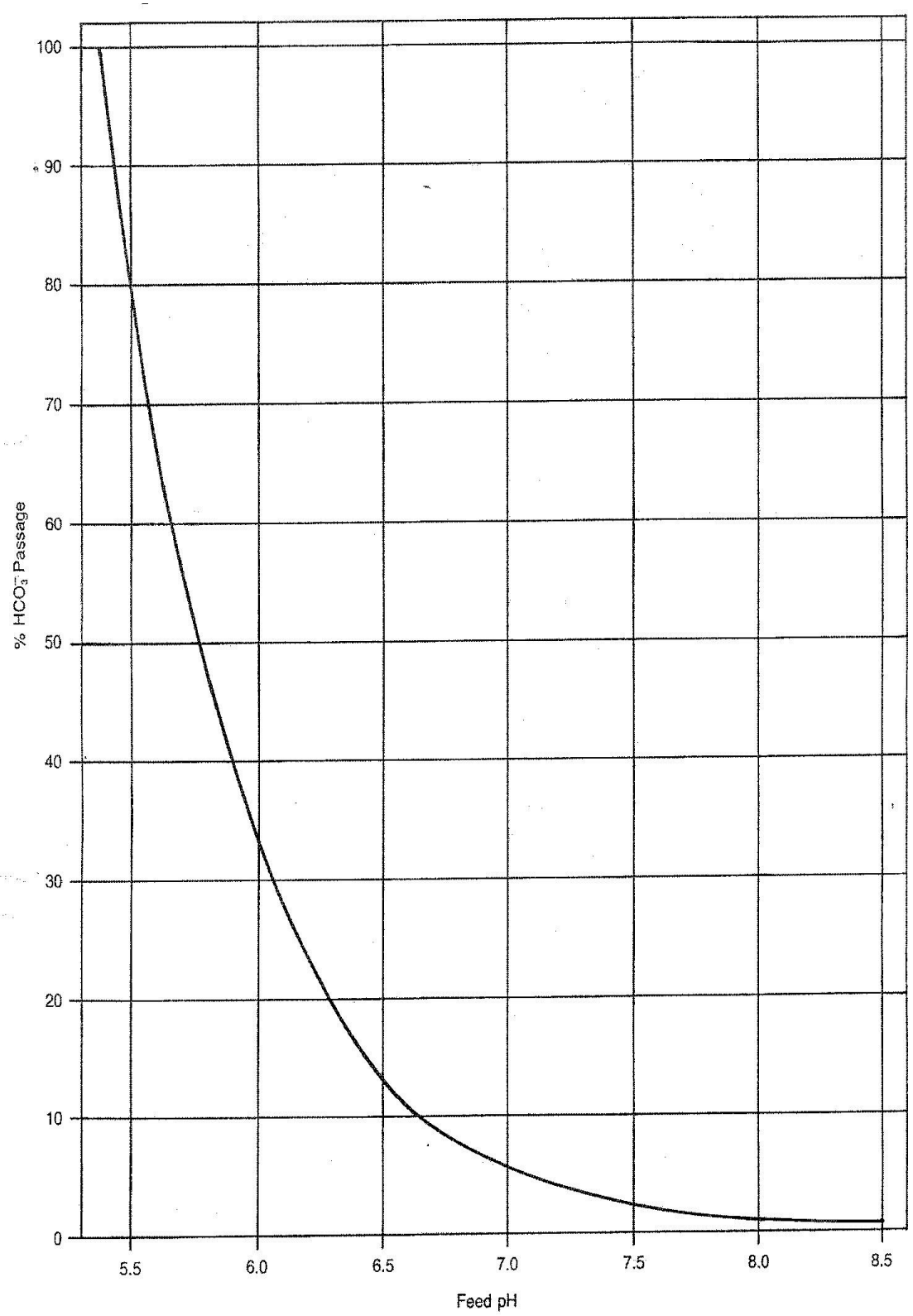
อัตราการซึมผ่านเมมเบรนของเกลือ (Salt Passage) SP ของ HCO_3^- มีความสามารถในการซึมแพร่ผ่านเนื้อเยื่อเมมเบรนได้อย่างมีนัยสำคัญและแปรผันกับค่า pH ของน้ำที่ป้อนเข้าระบบ สามารถหาค่า SP ของ HCO_3^- นี้ได้จากกราฟรูปที่ 9 และ 10



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %HCO_3^- Passage และค่า Feed pH

(Effect of Feed pH on HCO_3^- Passage for B-9 Permeator)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page2, date 12/1/82



รูปที่10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ %HCO_3^- Passage และค่า Feed pH

(Effect of Feed pH on HCO_3^- Passage for B-10 Permeator)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 402, page4, date 12/1/82

ส่วนค่า C และ K หาได้จากกราฟในรูปที่ 7, 6

เมื่อได้ค่า pH_b และ pH_S นำไปแทนค่าในสมการ

$$LSI = pH_b - pH_s$$

หรือ $S \& LSI = pH_b - pH_s$

ถ้า ค่า LSI หรือ S & DSI $<$ 0 แสดงว่าไม่เกิดตะกรัน $CaCO_3$

ค่า LSI หรือ S & DSI = 0 สมดุลในการตกผลึก

ค่า LSI หรือ S & DSI $>$ 0 ระบบอาจเกิดการตกผลึกของ $CaCO_3$

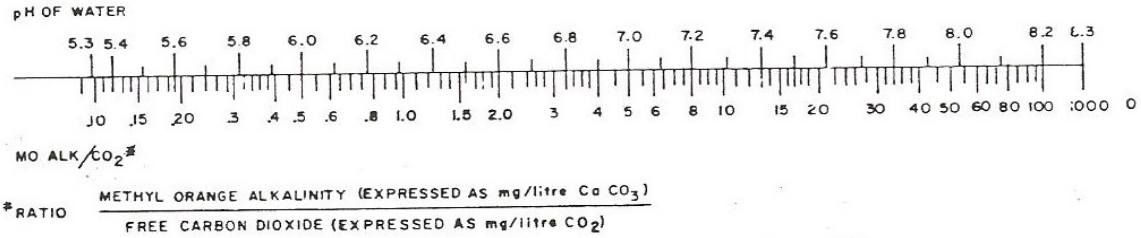
ถ้าจะเดินระบบที่ค่า LSI อยู่ในช่วง 0 – 1 จะต้องเติม Antiscalant ถ้ามากกว่า 1 ต้องเติมกรด H_2SO_4 หรือ HCl เพื่อทำปฏิกิริยากับ CO_3^{2-} ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) CO_3^{2-} จะลดลง หรือผ่านระบบทำน้ำอ่อนเพื่อกำจัด Ca^{2+}

หมายเหตุ การหาค่า pH_b อาจหาได้จากสัดส่วนของไบคาร์บอเนต HCO_3^- และคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 ที่ละลายในน้ำโดยอ่านจาก Scale ในรูปที่ 11

$$pH_b = 6.30 + \log R_b \quad \text{(In Brine as } CaCO_3\text{)}$$

$$Rb = \frac{HCO_3^-}{CO_2} \quad \text{(In Brine as } CO_2\text{)}$$

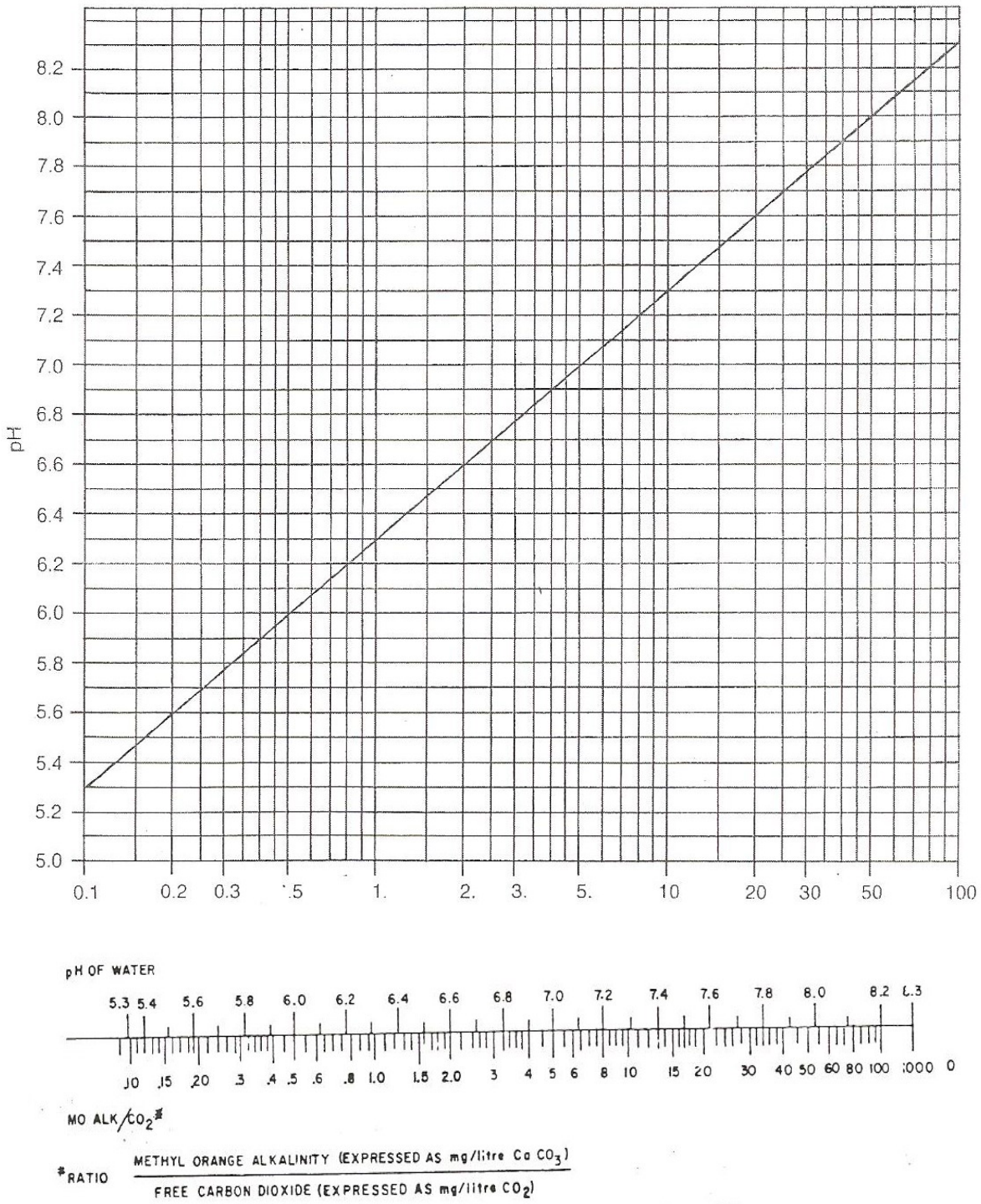
R_b หาได้จากกราฟในรูปที่ 12 หรือ Scale ในรูปที่ 11



รูปที่11 สเกลในการหาสัดส่วนของ HCO_3^- และ CO_2 ที่ละลายในน้ำ

(pH Versus Methyl Orange Alkalinity/Free CO_3)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page6, date 12/1/82



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของค่า pH และ HCO_3^- as mg/l $CaCO_3$ และสเกลหาสัดส่วนของ HCO_3^-และ CO_2 ที่ละลายในน้ำ (Effect of HCO_3^- และ CO_2 on pH)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page 6, date 12/1/82

$$R = \frac{HCO_3^{-}(asCaCO_3)(mg/l)}{CO_2(asCO_2)(mg/l)}$$

$$R = \frac{MethyOrangeAlkalinity(asCaCO_3)(mg/l)}{FreeCarbindioxide(asCO_2)}$$

การหาค่าR $_b$ ทำได้โดยการหา $R_f = R$ ของน้ำป้อนเข้าระบบโดยใช้ค่า pH ของน้ำเข้าระบบหาค่า R แล้วนำค่า R ไปหารค่า Methyl orange-Alkalinity จะได้ค่า Free CO_2 ในน้ำที่ป้อนเข้าระบบ

ค่า Free CO_2 ในน้ำที่ป้อนเข้าระบบ = Free CO_2 ในน้ำ Brine ทั้งนี้เพราะ CO_2 ผ่านเมมเบรนได้ 100 % (SP CO_2=1)

นำค่า Methyl orange-Alkalinity ในน้ำ Brine ที่คำนวณได้ ไปหาค่า R_b

ดังนั้นในการเดินระบบจะต้องตรวจสอบหาค่า LSI ว่ามีค่าเท่าไร

LSI < 0 เดินระบบได้โดยไม่เกิดตะกรัน $CaCO_3$

$1 \geq LSI \geq 0$ เดินระบบได้โดยเติม Anti scalant 10 mg/l หรือตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

LSI > 0 ต้องการระบบปรับสภาพน้ำก่อนเข้าระบบ RO Pretreatment

4.3.3 การปรับสภาพน้ำเพื่อป้องกันการเกิดตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

กรณีคำนวณหาค่า LSI แล้วได้ค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่า $CaCO_3$ มีโอกาสตกผลึกได้ การป้องกันทำได้ 4 วิธีคือ

1. เดินระบบโดยเติมสาร Anti scalant ร่วมด้วย โดยใช้ความเข้มข้น 10 mg/l NaHMP หรือสาร Anti scalant อื่นๆ ที่มีขายตามท้องตลาดแต่ไม่ควรใช้กับน้ำที่มีค่า LSI มากกว่า 1 และเมื่อใช้สาร Anti scalant จะต้องมีการ flesh น้ำทิ้งทุกๆ 4-6 ชั่วโมง หรือเมื่อหยุดเดินระบบจะต้อง flesh ด้วยน้ำสะอาดทุกครั้ง

2. ลดปริมาณ CO_3^{2-} และ HCO_3^{-} โดยการเติมกรด H_2SO_4 หรือกรด HCl กรดเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับ CO_3^{2-} และ HCO_3^{-} ไปเป็น CO_2 ดังสมการ

$$H_2SO_4 + 2HCO_3^- \rightarrow 2H_2O + 2CO_2 + SO_4^{2-}$$

$$HCl + HCO_3^- \rightarrow H_2O + CO_2 + Cl^-$$

จากสมการเป็นการลดปริมาณ CO_3^{2-} และ HCO_3^- ทำให้ค่า LSI ลดลงได้

3. กำจัด Ca^{2+} โดยใช้ระบบ Softener Cationic Resin จะจับ Ca^{2+} เอาไว้ทำให้จำนวน Ca^{2+} ลดลงทำให้มีค่า LSI ลดลง

4. ลด Conversion จะทำให้ความเข้มข้นของ Ca^{2+} ในน้ำทิ้ง Brine ลดลง ทำให้มีค่า LSI ลดลงด้วย

4.3.4 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต

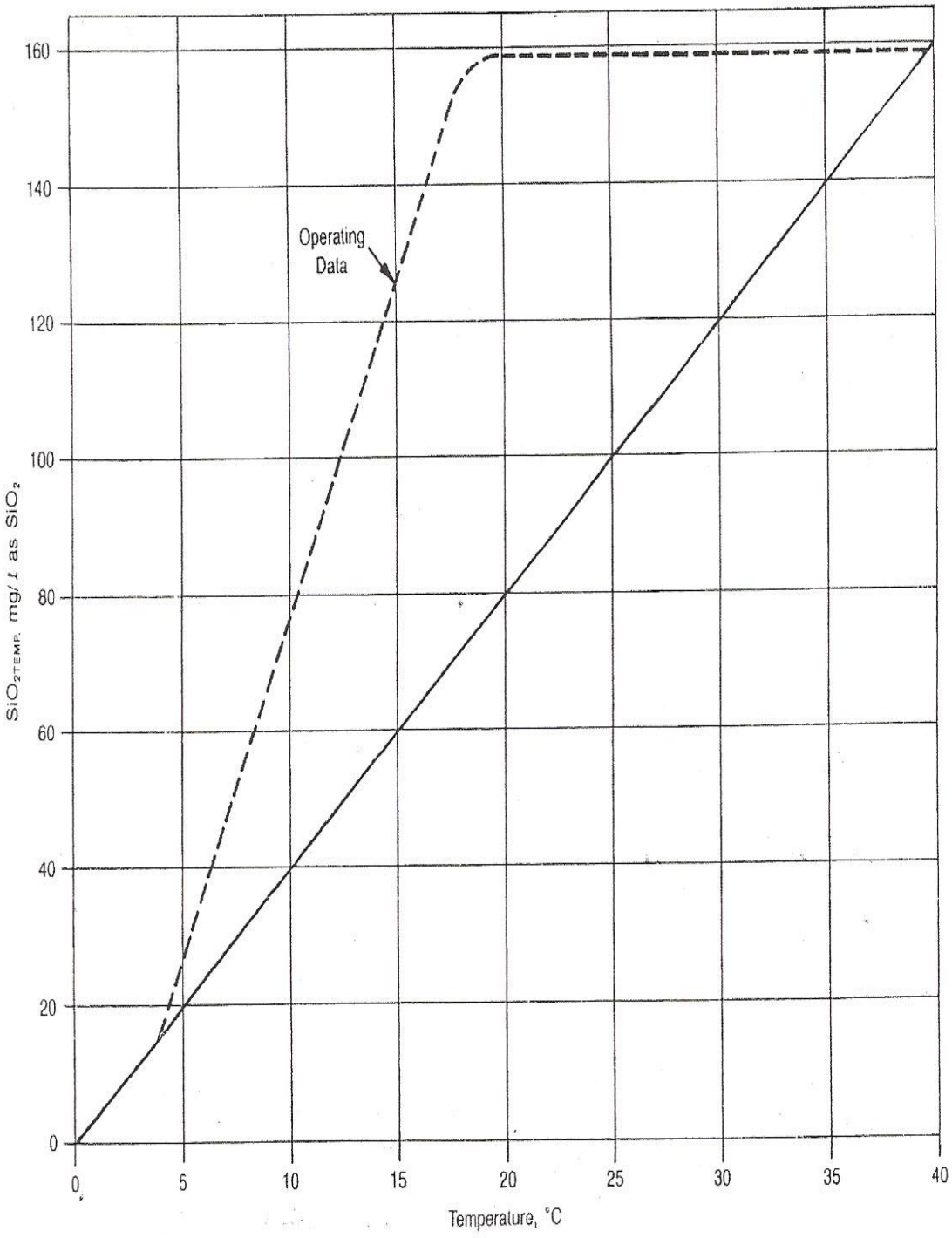
การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากตะกรันแคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$ ในระบบกรองน้ำ RO สามารถล้างได้ด้วยกรดต่างๆ ดังนี้

1. ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 1% ที่ pH = 2
2. ล้างด้วยกรดมะนาว Citric acid เข้มข้น 2% โดยน้ำหนัก ปรับ pH = 4 ด้วย NH_4OH

4.4 การอุดตันเนื่องจากการเกิดตะกรันของซิลิกา (Silica) SiO_2

การอุดตันเนื่องจากการเกิดตะกรันของซิลิกาในระบบกรองน้ำ RO เกิดขึ้นเมื่อซิลิกาอยู่ในภาวะที่อิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated) ซิลิกาจะสามารถเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ซิลิกา (Polymerize) ทำให้เกิดเป็นคอลลอยด์ที่ไม่ละลายน้ำหรือเกิดเป็นเจลของซิลิกา เมื่อเดินระบบในสภาวะที่มีการเกิดคอลลอยด์ของซิลิกาจะทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรน เช่นเดียวกับการอุดตันโดยอนุภาคคอลลอยด์ที่กล่าวในบทที่ 1

โดยปกติในน้ำบริสุทธิ์ซิลิกาจะสามารถละลายได้ประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ความสามารถในการละลายของ SiO_2 จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เช่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะละลายได้ 160 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ความสัมพันธ์ของความสามารถในการละลายน้ำของ SiO_2 กับอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 13



รูปที่13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า $SiO_{2\ TEMP}$ mg/l as SiO_2 กับอุณหภูมิ

(Effect of Temperature on SiO_2 Solubility)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page 15, date 12/1/82

ตามรูปที่ 13 เส้นทึบแสดงความสามารถในการละลายของ SiO_2 ที่ภาวะเป็นกลาง (pH = 7) ที่ภาวะเป็นด่างความสามารถในการละลายของ SiO_2จะสูงขึ้นและสูงกว่าสภาวะที่เป็นกลางและเป็นกรดดังแสดงค่าตัวคูณค่าความสามารถการละลายของ SiO_2 ที่ pH ต่างๆ ในรูปที่ 14 ความสามารถในการละลายของ SiO_2 จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า Ionic strength แต่ถ้าในสารละลายมีอลูมิเนียมร่วมอยู่ด้วยจะทำให้เกิดอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminium Silicate) ที่ละลายน้ำได้ยากเกิดขึ้นด้วย เช่น น้ำที่ผ่านระบบการตกตะกอนด้วยสารส้มที่มากเกินพออาจมีอลูมิเนียมอิออนหลงเหลืออยู่มาก ซึ่งอาจก่อให้เกิดตะกอนอลูมิเนียมซิลิเกตได้ ในการเดินระบบ RO ที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันจาก SiO_2 ให้พิจารณาจากปริมาณ SiO_2 ในน้ำทิ้ง Brine ว่ามีระดับความเข้มข้นสูงกว่าความสามารถในการละลายของ SiO_2 ที่อุณหภูมิและ pH ที่เป็นเงื่อนไขในการเดินระบบหรือไม่ ถ้าสูงกว่าแสดงว่าอาจจะเกิดปัญหาการอุดตันจากคอลลอยด์ของ SiO_2 ได้

$$SiO_{2b} \leq SiO_{2Ac}$$

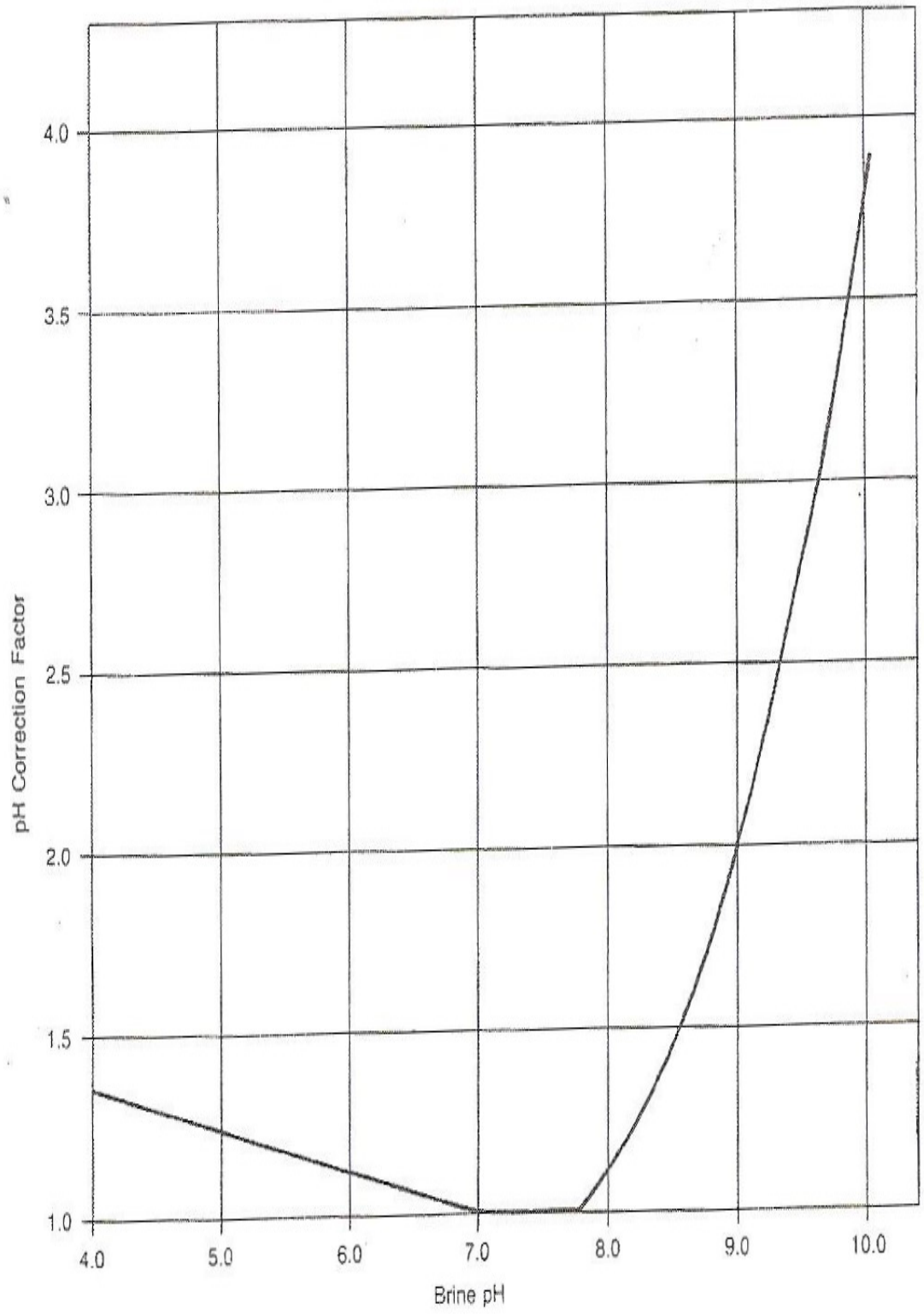
SiO_{2b} = ปริมาณ SiO_2 น้ำทิ้ง Brine (mg/l)

SiO_{2Ac} = ปริมาณ SiO_2 ที่ยอมรับได้ที่ภาวะอุณหภูมิและ pH ในการเดินระบบ

$SiO_{2Ac} = SiO_{2temp}$ x (pH Correct ion factor)

SiO_{2temp} = ความสามารถในการละลาย SiO_2 ณ อุณหภูมิที่ใช้เดินระบบ RO (mg/l)

pH Correct ion factor ที่สัมพันธ์กับค่า pH หาได้จากกราฟรูปที่ 14

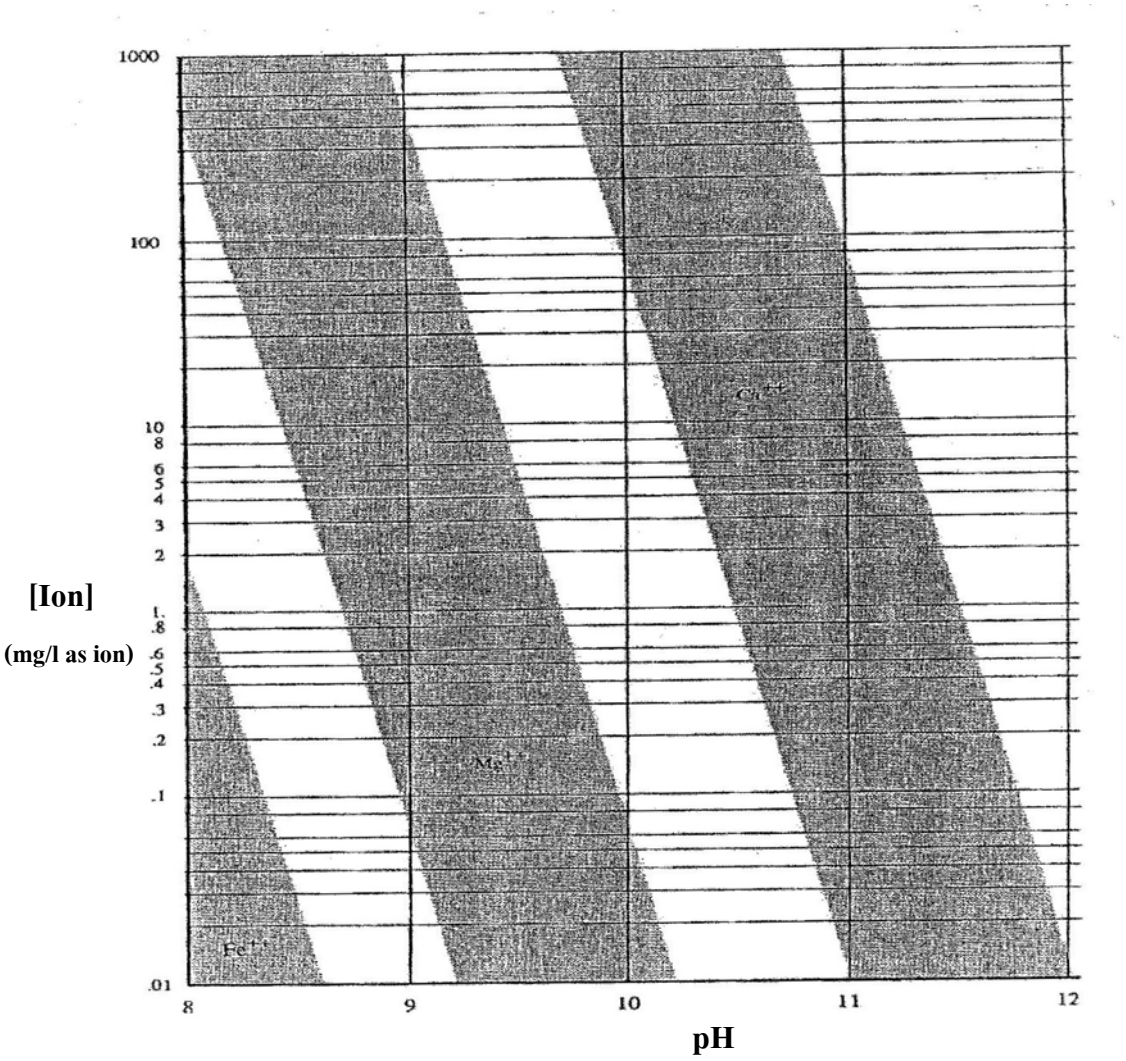


รูปที่ 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า pH Correction Factor

และค่า Brine pH (SiO_2 pH Correction Factor)

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page 16, date 12/1/82

นอกจากนี้ในการเดินระบบ RO ที่อาจจะก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันจาก SiO_2 จะต้องพิจารณาร่วมกับปริมาณสารอื่นที่ปนเปื้อนมากับน้ำ เช่น อลูมิเนียม เหล็ก แมกนีเซียม และแคลเซียม เนื่องจากสารเหล่านี้สามารถเกิดเป็นตะกอนในรูปซิลิเกตได้ดัง รูปที่ 15 แสดงการเกิดตะกอนซิลิเกตของโลหะเหล่านี้ที่ค่า pH ต่างๆ ในรูปพื้นที่ส่วนที่เป็นเงาดำเป็นส่วนที่ค่า pH และความเข้มข้นของ Ca^{2+} Mg^{2+} Fr^{2+} จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอลูมิเนียมได้



รูปที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า [Ion] (mg/l as ion) และค่า pH

(Metal concentration at which silicate precipitation can occur)

ที่มา: Reverse Osmosis Apractical Guide for Industrial Users 2nd edition, WES BYRNE, Tall Oaks Publishing Inc., 2002, pp. 173

4.4.1 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากการเกิดตะกรันของซิลิกา

ในการเดินระบบ RO ถ้าคำนวณแล้วปริมาณของ SiO_2 ในน้ำทิ้ง Brine สูงกว่าค่าที่ยอมรับได้ SiO_{2Ac} แสดงว่ามีโอกาสเกิดการอุดตันจาก SiO_2ในระบบ RO วิธีป้องกันทำได้ 4 วิธีดังนี้

1. ลด Conversion (y) ลงโดยปรับให้มีการทิ้งน้ำมากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของ SiO_{2b} ในน้ำทิ้งลดลง วิธีการนี้ทำให้กำลังการผลิตลดลงบ้าง

2. ใช้กระบวนการทำน้ำอ่อน (Solftener) โดยวิธีการเติมปูนขาว วิธีการนี้อาจลดปริมาณ SiO_2ลงได้ถึง 50 % และในระบบทำน้ำใส (Clarifier) จะต้องเติม $FeCl_3$ มากขึ้น และเติมโซเดียมอลูมิเนต (Sodium Aluminates) เพื่อช่วยให้ SiO_2 ตกตะกอนในรูปของอลูมิเนียมซิลิเกต วิธีการนี้เหมาะสำหรับระบบ RO ที่มีขนาดใหญ่

3. วิธีการควบคุมอุณหภูมิในการเดินระบบให้เหมาะสม ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายของ SiO_2 จะมากขึ้น แต่อุณหภูมิต้องไม่สูงจนเกิดความเสียหายกับเมมเบรน โดยปกติให้สูงได้ไม่เกิน 45 องศาเซลเซียส

4. การควบคุม pH ให้เหมาะสม ที่ pH สูงกว่า 8 ความสามารถในการละลายของ SiO_2 จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป 14 แต่การปรับค่า pH ไม่ควรสูงจนทำให้เนื้อเยื่อเมมเบรนเกิดความเสียหาย โดยปกติจะปรับให้มีค่าอยู่ในช่วง pH 8.5-9 อย่างไรก็ตามในการเดินระบบโดยการปรับ pH ให้สูงขึ้นจะต้องพิจารณาถึงปัญหาอื่นๆ เช่น อาจก่อให้เกิดการอุดตันจาก $CaCO_3$ เพิ่มขึ้นหรือไม่ซึ่งเป็นปัจจัยที่ผู้เดินระบบจะต้องพิจารณาร่วมด้วย

4.4.2 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากการเกิดตะกรันของซิลิกา

การล้างระบบ RO ที่เกิดการอุดตันจาก SiO_2 จะต้องพิจารณาถึงการอุดตันนั้นเกิดจากการรวมตัวของ SiO_2 กับสารชนิดใด ดังเช่น

1. ถ้าการอุดตันเกิดจากการรวมตัวของซิลิกากับแคลเซียมหรือแมกนีเซียมเกิดเป็น Calcium Silicate หรือ Magnesium Silicate จะต้องล้างด้วย 1% NaHMP

2. ถ้าการอุดตันนั้นเกิดจากตะกอนคอลลอยด์ของ SiO_2 และเกิดขึ้นบ่อยๆ จะต้องล้างด้วย NaOH pH 11.5

บทที่ 5
การอุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์ (Organic matter)

สารอินทรีย์อาจมีปนเปื้อนอยู่ในน้ำบ้างทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแหล่งน้ำในแต่ละแห่ง สารอินทรีย์ในน้ำรวมไปถึงคราบน้ำมัน ไขมันทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และพวกสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่ใช้ในการเกษตรและอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำแล้วปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำ

โดยปกติสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่กว่า 150 ดาลตันขึ้นไปจะไม่สามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ดังตารางที่ 5 ยกเว้นโมเลกุลสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติพิเศษบางชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของโมเลกุลที่สามารถแตกตัวเป็นอิออนได้จะถูกกักกันได้ดีถึงแม้จะมีโมเลกุลขนาดเล็กกว่า 150 ดาลตัน ก็ตาม ตัวอย่างเช่น กรดอินทรีย์และฟีนอลซึ่งความสามารถในการดักกรองจะขึ้นอยู่กับความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำ

สารอินทรีย์ที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้จะเกิดการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนเกิดเป็นเจลหรือคอลลอยด์ของสารอินทรีย์เหล่านั้นบนผิวหน้าเมมเบรนและขัดขวางการซึมผ่านของน้ำ ทำให้น้ำไหลผ่านเมมเบรนได้น้อยลงและเกิดการอุดตัน

นอกจากสารอินทรีย์ดังกล่าวแล้ว สารช่วยตกตะกอนโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมในระบบการทำน้ำใส (Clarifier) ในระบบประปาที่อาจหลงเหลือจากการเติมที่มากเกินพอและอาจเกิดปัญหาการอุดตันจากเจลที่เกิดจากการรวมตัวกันของสารประกอบอินทรีย์และไขมัน และเจลนี้อาจรวมตัวกับสารแขวนลอยที่เป็นของแข็งในน้ำซึ่งเพิ่มปัญหาการอุดตันให้รุนแรงขึ้น บางครั้งอาจอุดตันแบบไม่สามารถล้างออกได้

ตารางที่ 5 ความสามารถของเมมเบรนในการกักกัน (Rejection) สารอินทรีย์ที่ขนาดโมเลกุลต่างๆ

Solute	น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) (ดาลตัน)	Feed Concentration %	ความสามารถในการคัดกรองของเมมเบรน (Rejection) %
Methanol	32.0	3.0	0.0
Ethanol	46.0	4.0	0.0
Ethyleneglycol	62.0	5.5	0.0
Isopropanol	60.0	5.5	26.0
Diethyleneglycol	106.0	9.0	47.0
Triethyleneglycol	150.0	13.0	90.0
Fructose	180.0	6.0	80.0
Glucose	180.0	6.0	79.0
Sucrose	342.0	1.0	98.0
Lactose	342.0	6.0	99.0
Humic Acid	-	0.4	99.0

ที่มา: Desal product specifications replacements for FILMTEC TW 30 ELEMENTS, E-19.4

5.1 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากสารประกอบอินทรีย์

การป้องกันการอุดตันเนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ทำได้โดยการควบคุมระบบทำน้ำใส (Clarifier) ที่ใช้สารโพลีเมอร์มากเกินพอ ถ้าเป็นน้ำมันหรือไขมันที่ปะปนมากับน้ำในรูปของอนุภาคของแข็งเล็กๆ แขวนลอยในน้ำ อาจใช้วิธี DAF (Dissolve Air Flotation) เพื่อแยกน้ำมันและไขมันก่อนป้อนเข้าระบบ RO

การอุดตันจากสารอินทรีย์อาจทำให้เกิดปัญหาการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และเป็นเหตุทำให้เกิดปัญหาการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ร่วมด้วยได้ เพราะสารประกอบอินทรีย์เป็นอาหารของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตได้ดีก่อให้เกิดการอุดตัน

5.2 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์

การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากสารอินทรีย์ มีวิธีการล้างได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

1. ล้างด้วยโซดาไฟ NaOH pH 11.0 เพราะโซดาไฟจะทำปฏิกริยากับไขมันและกรดอินทรีย์ กลายเป็นเกลือที่ละลายน้ำได้
2. ล้างด้วยกลุ่มสารซักฟอก (Detergent) ที่มีฟอสเฟต แต่ต้องไม่มีสารฟอกขาวจำพวกออกซิไดซิงเอเจนต์ผสมอยู่ เพราะจะทำให้เมมเบรนเสียหาย อาจผสมโซดาไฟ NaOH ปรับ pH อยู่ที่ 11.0 ร่วมด้วยได้
3. ถ้ามีการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ร่วมด้วยอาจต้องใช้ 0.25-2 % ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ล้าง แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด

บทที่ 6
การอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์ (Biological Fouling)

น้ำที่มีการปนเปื้อนจากพวกเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ อาจทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรนขึ้นได้ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์จะไปเจริญเติบโตบนผิวหน้าเมมเบรนและในโครงสร้างภายในช่องน้ำไหลของเมมเบรน ซึ่งอาจมีผลต่อการอุดตันมากขึ้นถ้าในน้ำมีการปนเปื้อนสารประกอบอินทรีย์ที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์อยู่จะทำให้จุลินทรีย์เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและก่อให้เกิดผลกระทบต่อเมมเบรน

6.1 ปัญหาที่เกิดจากการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

การอุดตันที่เกิดขึ้นเนื่องจากจุลินทรีย์มีผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเมมเบรน 4 ประการดังนี้

1. ทำให้เกิดการอุดตันบนผิวหน้าเมมเบรน ขัดขวางการซึมแพร่ผ่านเมมเบรนทำให้กำลังการผลิตน้ำลดน้อยลง นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสามารถทำให้เกิดการอุดตันในช่องทางน้ำไหลในมัดเมมเบรน เป็นเหตุให้แรงดันสูญเสียในมัดเมมเบรนสูงขึ้น (ปกติแรงดันสูญเสียในมัดเมมเบรนประมาณ 10 – 12 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว : psig)

2. ทำให้เนื้อเยื่อของเมมเบรนเสียหายจากการทำลายของเชื้อจุลินทรีย์ และเกิดกลิ่นเหม็นอันเนื่องจากการย่อยสลายของเซลล์ที่ตาย เกิดสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต แบคทีเรียกลุ่มนี้มักจะสร้างกลิ่นเหม็นในระบบ RO ได้

3. ทำให้เกิดการอุดตันในช่องทางน้ำไหลในมัดเมมเบรน

4. เกิดการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในน้ำที่ผลิตได้ (Permeate) การอุดตันในช่องทางน้ำไหลในมัดเมมเบรนนั้น ถ้าอุดตันมากๆ จะทำให้แรงดันภายในมัดเมมเบรนต่างจากแรงดันภายนอกมาก ซึ่งอาจทำให้มัดเมมเบรนแตกได้

6.2 การตรวจสอบการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

การตรวจสอบการอุดตันที่เกิดจากจุลินทรีย์ ทำได้โดยการเก็บตัวอย่างน้ำที่ป้อนเข้าระบบและน้ำทิ้งจากระบบไปตรวจสอบหาปริมาณแบคทีเรียรวม (Total Bacteria Count)

นอกจากจะใช้วิธีการวัด TBC อาจใช้วิธีการวัดหาการเปลี่ยนแปลงของ TOC (Total Organic Carbon) ก็ได้ เพราะจะทำได้สะดวกและรวดเร็วกว่า

6.3 การป้องกันการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

โดยปกตินำ้บาดาลจะมี TBC ค่อนข้างต่ำจึงไม่จำเป็นต้องมีระบบป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทั้งนี้เพราะในน้ำบาดาลไม่มีปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ เว้นแต่ถ้ามีการปนเปื้อนในเส้นท่อหรือปนเปื้อนแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต ส่วนน้ำผิวดินปกติจะมี TBC สูงซึ่งจะต้องมีระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ปกติใช้ระบบการเติมคลอรีน ซึ่งจะต้องเติมให้มีคลอรีนอิสระเหลือ 0.5 – 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 20-30 นาที จึงจะสามารถควบคุมปริมาณจุลินทรีย์ได้ ถ้ามีคลอรีนอิสระเหลือน้อยกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่สามารถควบคุมการเจริญพันธุ์ของจุลินทรียได้ น้ำที่ผ่านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลอรีนจะต้องกำจัดคลอรีนออกให้หมดโดยการเติมสารโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ และดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ให้คลอรีนอิสระเหลือไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร เพราะถ้ามีปริมาณคลอรีนเหลือสูงกว่าที่กำหนด คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับสารโพลีเอไมด์ (Polyamide) บนผิวเมมเบรนจะทำให้ความสามารถในการกักกันเกลือ (Salt Rejection) ลดลง แต่ถ้าเป็นเมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose Acetate) จะสามารถทนคลอรีนอิสระได้มากกว่า ซึ่งจะทนคลอรีนสูงถึง 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดคลอรีนอาจใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์หรือเติมสารโซเดียมไบซัลไฟต์ (Sodium Bisulfite) $NaHSO_3$ แต่สารโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate) Na_2SO_3 จะไม่แนะนำให้ใช้เพราะอาจทำปฏิกิริยากับไฟเบอร์ในโครงสร้างของมัดเมมเบรนได้ นอก

การใช้สารละลาย $NaHSO_3$ กำจัดคลอรีนจะต้องพิจารณาความเสถียรของสารละลาย $NaHSO_3$ และอายุของสารละลาย $NaHSO_3$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อายุการคงสภาพของสารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์

ความเข้มข้นของสารโซเดียมไบซัลไฟต์ Sodium Bisulfite Solution ($NaHSO_3$) Weight %	**อายุการคงสภาพของสารละลาย Sodium Bisulfite Maximum Solution Life**
2	3 วัน
10	1 สัปดาห์
20	1 เดือน
30	6 เดือน

ที่มา: Permasep Engineering Manual, Bulletin 505, page 1, date 12/1/82

ปริมาณการใช้สาร $NaHSO_3$ กำจัดคลอรีน ต้องใช้ $NaHSO_3$ ในปริมาณ 3 ปอนด์ต่อคลอรีน 1 ปอนด์ ถ้าใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) 1 ลูกบาศก์ฟุต สามารถกำจัดคลอรีนในน้ำที่มีความเข้มข้นของคลอรีน 1 ppm ได้จำนวน 1 ล้านแกลลอน (หรือกำจัดคลอรีนได้ 3.8 กิโลกรัม)

ปริมาณการเติมสาร $NaHSO_3$ เพื่อกำจัดคลอรีนจะต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ CO_2 และปริมาณ O_2 ที่ละลายในน้ำซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$X = 6.5[DO] + 1.5[Cl_2] + 20$$

X = ปริมาณโซเดียมไบซัลไฟต์ $NaHSO_3$ ที่ต้องการใช้ (ppm)

DO = ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (ppm)

Cl_2 = ปริมาณความเข้มข้นของคลอรีนอิสระ (ppm)

20 = ค่าความปลอดภัย (เพราะอาจมีสารอื่นที่เจือปนในน้ำและทำปฏิกิริยากับ $NaHSO_3$)

การควบคุมจุลินทรีย์โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ซึ่งแสง UV ที่ความยาวคลื่นนี้จะสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ แต่เชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความทนต่อแสง UV ได้แตกต่างกัน ดังนั้นในการออกแบบระบบฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยแสง UV จะต้องออกแบบให้เชื้อจุลินทรีย์อยู่ในลำแสงที่ความเข้มแสงเป็นเวลานานพอที่จะฆ่าเชื้อโรคชนิดนั้นๆ ได้เรียกว่า UV Disinfection Doseในหน่วย mW-sec

การหยุดเดินระบบเป็นเวลานาน (5 วันขึ้นไป) ควรต้องเติมสารละลายฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) แล้วแช่ไว้ในระบบ และต้องมีการเปลี่ยนทุกๆ 4 สัปดาห์ ทั้งนี้เพราะการหยุดระบบกรอง RO จะมีเชื้อจุลินทรีย์สะสมบนผิวหน้าเมมเบรนได้มากและเกิดกลิ่นเหม็นเพราะในน้ำนิ่งเชื้อจุลินทรีย์เจริญได้ดีกว่าน้ำที่มีการไหล

6.4 การล้างเมมเบรนที่อุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

การล้างเมมเบรนที่อุดตันด้วยจุลินทรีย์ใช้วิธีการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วย 2% โดยน้ำหนัก Formaldehyde แล้วล้างด้วยสารซักฟอก 0.25 %โดยน้ำหนัก (ต้องไม่มีสารฟอกขาว) นอกจากนี้การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์อาจใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์ 1.0%โดยน้ำหนัก ก็ได้แต่ต้องเติม 18 % กลีเซอรีน (Glycerine) เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM D 3739-05, standard practice for calculation and adjustment. P 1-1

2. ASTM D 4582-05, standard practice for calculation and adjustment

3. Desal product specifications replacements for FILMTEC TW 30 ELEMENTS, E-19.4

4. Hand book of chemistry and physics, 70th edition, 1989-1990 p B207-B208

5. Membrane Technology and Applications Second Edition, Richard W. Baker and Mc Graw-Hill, 2000 p 144

6. Permasep Engineering Manual, Bulletin 402, page4, date 12/1/82

7. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page2, date 12/1/82

8. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page6, date 12/1/82

9. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page11, date 12/1/82

10. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page12, date 12/1/82

11. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page13, date 12/1/82

12. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page 15, date 12/1/82

13. Permasep Engineering Manual, Bulletin 502, page 16, date 12/1/82

14. Permasep Engineering Manual, Bulletin 503, page1, date 12/1/82

15. Permasep Engineering Manual, Bulletin 504, page1, date 12/1/82

16. Permasep Engineering Manual, Bulletin 505, page 1, date 12/1/82

17. Reverse Osmosis Apractical Guide for Industrial Users 2nd edition, WES BYRNE, Tall Oaks Publishing Inc., 2002, pp. 173

18. Reverse Osmosis Membrane Technology, Zahid Amjad,Van Nostrand Reinhold, 1992, p 107

19. Reverse Osmosis and Nanofiltration, American Water Works Association, 2007, p 206