



บททวนเอกสาร

3.1 การศึกษาที่ผ่านมา

การกำจัดความกระด้างด้วยวิธีตกผลึกทางเคมีได้เป็นที่รู้จักมากกว่าศตวรรษ โดยในปี ค.ศ. 1841 Dr. Thomas Clark แห่งมหาวิทยาลัยอะเบอร์ดีน สก็อตแลนด์ ได้พัฒนาวิธีการกำจัดความกระด้างสำหรับน้ำใช้ในชุมชนขึ้น ซึ่งเรียกว่า Clark's process โดยการใช้ปูนขาวในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และความกระด้างคาร์บอเนต ด้วยวิธีตกผลึกของความเป็นต่างแคลเซียมและแมกนีเซียมให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ รวมทั้งปูนขาวที่เติมให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตด้วย (2, 3, 4)

John Henderson Porter (1876) ได้พัฒนาวิธีการกำจัดความกระด้างให้ดีขึ้นด้วยการใช้โซดาแอชกับปูนขาว เพื่อกำจัดความกระด้างอนคาร์บอเนตและคาร์บอเนต ซึ่งเรียกว่า Porter-Clark process แต่ในปัจจุบันนิยมเรียกว่า cold lime-soda process (2, 3, 4)

Hartung (1956) ได้ทำการศึกษา น้ำจากแม่น้ำเมราเมคพบว่าน้ำที่ผ่านการกำจัดและมีเสถียรภาพมากกว่าเกิดจากการหมุนเวียนน้ำตะกอน (slurry) ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์หรือมากกว่าโดยน้ำหนักมายังเขตกวนเร็ว (5)

Alekin และ Moritscheva (1957) ได้ทำการทดลองพบว่า อิวมีสจากพืชก่อให้เกิดผลการหน่วงที่กระทบต่อการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นอย่างมาก ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเนาเปื้อยของแพลงค์ตอนแม่น้ำมีผลเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ อัตราการเพิ่มของความขุ่นเป็นสัดส่วนกับปริมาณสารอินทรีย์ (6)

Black และ Christman (1961) ได้กล่าวว่า การคำนวณปริมาณปูนขาวที่ใช้ในการกำจัดเฉพาะความกระด้างแคลเซียมนั้น ควรสมมติว่าแมกนีเซียมไอออนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ถูกกำจัดโดยการดูดติดผิวกับผลึกแคลเซียม

คาร์บอนเนต และพบว่าผลึกแคลเซียมคาร์บอนเนตมีประจุลบเมื่อไม่มีแมกนีเซียม แต่ประจุนี้จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นประจุบวกในขณะที่อัตราส่วนของแมกนีเซียมต่อแคลเซียมในน้ำดิบเพิ่มขึ้น (7)

Malina และ Tiyaoporn (1964) ; Schonfeld (1964) ได้ทำการทดลองพบว่า ฟอสเฟตจากผงซักฟอกขัดขวางการตกผลึกของแคลเซียมในกระบวนการปูน-โซดา แต่ไม่มีผลต่อแมกนีเซียม ในความเข้มข้นต่ำเท่ากับ 1 มก./ล. โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิ (8)

Holden (1970) ได้กล่าวว่า แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ถูกพบว่ามีประจุบวกตลอดช่วงพีเอชของการกำจัดความกระด้างด้วยวิธีตกผลึก (3)

Degremont (1973) ได้กล่าวว่า ปฏิกริยาที่เกิดจากปูนขาวในน้ำดิบเป็นไปช้ามากเมื่อไม่มีนิวคลีโอ ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำดิบและปูนขาวสัมผัสกับปริมาตรที่ใหญ่อย่างเพียงพอของผลึกแคลเซียมคาร์บอนเนตที่ได้ตกผลึกแล้ว ปฏิกริยาจะเข้าสู่จุดสมดุลในเวลาไม่กี่นาที (9)

Alexander และ McClanahan (1975) ได้ทำการทดลองพบว่า ในการกำจัดแคลเซียมไอออนด้วยการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอนเนตนั้น ระดับสมดุลของความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนเกิดขึ้นภายหลัง 25 นาที และขึ้นอยู่กับพีเอชปฐมของสารละลาย แต่ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนปฐมของสารละลาย นอกจากนี้ จลนศาสตร์ (Kinetics) ที่เกิดขึ้นจริงเกี่ยวกับการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอนเนตก็เป็นแบบอันดับแรก ในส่วนของความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (10)

Schierholz, Stevens และ Cleasby (1976) ได้กล่าวว่า การดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับระบบกำจัดความกระด้างของน้ำด้วยปูนขาวและโซดาแอชเพื่อกำจัดแคลเซียม เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนเนตไอออนมีค่ามากที่สุด โดยเกิดขึ้นเมื่อความเป็นด่างทั้งหมดเป็นสองเท่าของความเป็นด่างฟีนอล์ฟธาไลน์ นอกจากนี้ ณ จุดที่คาร์บอนเนตมีค่ามากที่สุดไฮดรอกไซด์จะเท่ากับไบคาร์บอนเนตด้วย (11)

Burris, Cosens และ Mair (1976) ได้ทำการทดลอง การกำจัดตะกอนที่เกิดจากการกำจัดความกระด้างซึ่งกระทำโดยกระบวนการกลายเป็นปูนใหม่

(recalcination process) และพบว่าน้ำฟิวตินจำเป็นต้องผ่านการกำจัด ความขุ่นและสีด้วยสารส้มเสียก่อนที่จะเข้ากระบวนการกำจัดความกระด้าง เพื่อให้ความขุ่นลดเหลือ 10 JTU หรือน้อยกว่า ซึ่งทำให้ได้ปูนดิบที่กลับคืน (CaO) มีความบริสุทธิ์ต่ำสุดประมาณ 86 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังกล่าวว่าแมกนีเซียม เหล็ก อลูมิเนียม และซิลิกา ในตะกอนที่เกิดจากการกำจัดความกระด้างเป็น สารมลทินที่มีผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของปูนดิบที่กลับคืน แมกนีเซียมสามารถลด ได้ด้วยการคาร์บอเนชันเพื่อเปลี่ยนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นแมกนีเซียม ไบคาร์บอเนต แต่ยังไม่มียุติควบคุมเหล็ก อลูมิเนียม และซิลิกา (12)

Committee Report (1981) ได้เสนอแนะ สูตรที่ใช้คำนวณหา น้ำหนักแห้งของตะกอนที่เกิดจากการกำจัดความกระด้างสำหรับน้ำทุกชนิด คือ

$$S = 86.4(Q)(2.0Ca + 2.6Mg + 0.44Al + 1.9Fe + SS + A)$$

โดยที่ S = ตะกอนที่ผลิต, กก./วัน

Q = อัตราการไหลของระบบ, ลบ.ม./วท.

Ca = ความกระด้างแคลเซียมที่ถูกกำจัด, มก./ล. $CaCO_3$

Mg = ความกระด้างแมกนีเซียมที่ถูกกำจัด, มก./ล. $CaCO_3$

Al = ปริมาณสารส้ม, มก./ล. 17.1% Al_2O_3

Fe = ปริมาณเหล็ก, มก./ล. Fe

SS = ของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ, มก./ล.

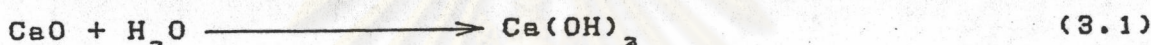
A = สารเคมีเพิ่มเติม เช่น โพลีเมอร์ ดินเหนียว หรือ แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน, มก./ล.

และรายงานว่าอัตราส่วน Ca:Mg ของตะกอนแสดงถึงความสามารถในการทำให้ข้น (thickening) และการลดน้ำ (dewatering) โดยทั่วไปแล้ว ตะกอนที่มีอัตราส่วน Ca:Mg น้อยกว่า 2 จะลดน้ำได้ยาก ในขณะที่ตะกอนที่มี อัตราส่วน Ca:Mg มากกว่า 5 จะลดน้ำได้ง่าย อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติในการ ลดน้ำของตะกอนอาจแสดงโดยอัตราการลดน้ำ หรือ ความต้านทานจำเพาะ (specific resistant) และค่าความต้านทานจำเพาะของ solids slurry แปรผันจาก 1×10^{11} ม./กก. สำหรับตะกอนที่สามารถลดน้ำได้เร็ว จนถึง 500×10^{11} ม./กก. สำหรับตะกอนที่เกิดจากสารรวมตะกอนซึ่งลดน้ำได้เร็ว (13)

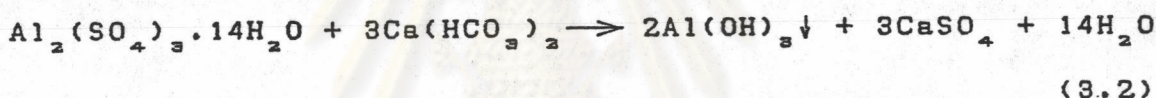
Peters และ Stevens (1982) ได้ทำการทดลองพบว่า เหล็กที่มีปริมาณน้อยมาก (trace) ประมาณ 0.6 มก./ล. Fe จะขัดขวางอัตราการเติบโตของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เพียงเล็กน้อย แต่ทำให้เพิ่มอัตราการสร้างนิวคลีโอเป็นอย่างมาก เป็นผลให้เกิดผลึกขนาดเล็กจำนวนมากที่ทำให้ขึ้นการตกตะกอนและการกรองลำบากมากขึ้น และอัตราการเติบโตของผลึกทั้งสองชนิดดังกล่าวจะลดลงด้วยการเพิ่มความเข้มข้นของเหล็ก อย่างไรก็ตาม เหล็กสามารถลดปริมาณตะกอนที่เกาะติดกับผนังของถังปฏิกิริยาได้เป็นอย่างมาก (14)

3.2 เคมีของการตกผลึกความกระด้าง

1. ปฏิกิริยาเคมีของปูนคืดกับน้ำ

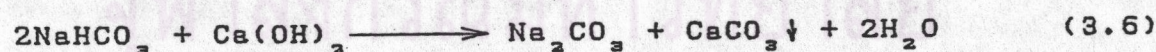
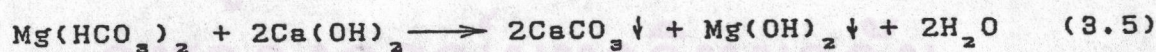
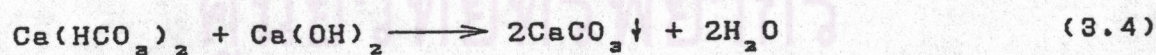
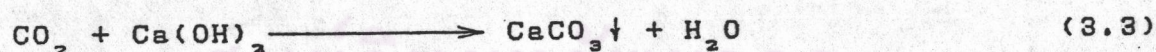


2. ปฏิกิริยาเคมีของสารส้มกับความเป็นด่าง

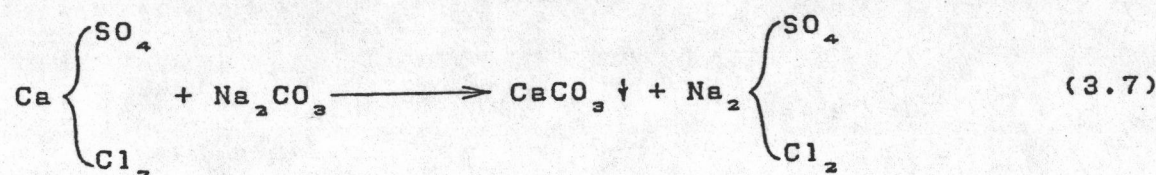


3. ปฏิกิริยาเคมีของการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวและโซดาแอช สามารถสรุปได้ดังนี้

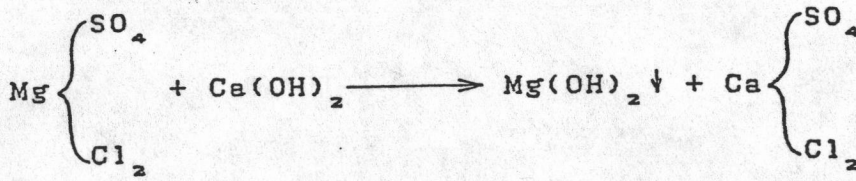
ก. การใช้ปูนขาวกำจัดความกระด้างคาร์บอเนต ความเป็นด่างโซเดียม และคาร์บอนไดออกไซด์



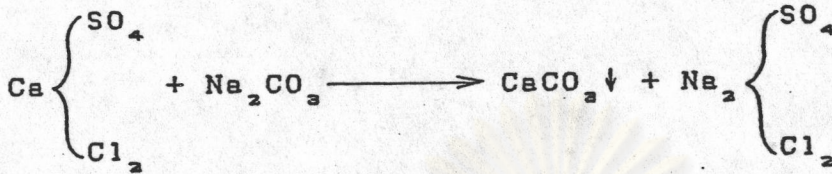
ข. การใช้โซดาแอชกำจัดความกระด้างแคลเซียมอนคาร์บอเนต



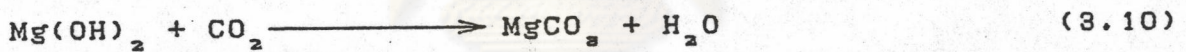
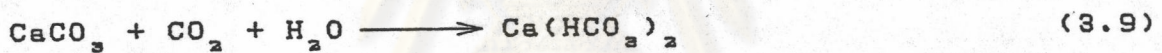
ค. การใช้ปูนขาวและโซดาแอชกำจัดความกระด้างแมกนีเซียมอนคาร์บอเนต



(3.8)



อนึ่งน้ำที่ผ่านการกำจัดแบบ conventional มักมีพีเอชสูง ซึ่งเกิดจากการอิ่มตัวเกินไป (supersaturated) ของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำ และ/หรือจากปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้น้ำมีแนวโน้มในการตกผลึกได้อีก ดังนั้นจึงต้องมีการรีคาร์บอเนชัน (recarbonation) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด เพื่อลดพีเอชและทำให้น้ำเสถียรภาพก่อนที่จะเข้าถึงกรองต่อไปตามปฏิกิริยาดังนี้



การรีคาร์บอเนชันจะกระทำจนถึงระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดต่อการป้องกันตะกอนและการกัดกร่อน อย่างไรก็ตาม ถังโซลิดซ์คอนแทคต์ ชนิดมีชั้นตะกอน พบว่ามีการสัมผัสกันอย่างใกล้ชิดระหว่างน้ำที่ผ่านการกำจัดกับมวลขนาดใหญ่ของตะกอนจึงป้องกันมิให้เกิดการอิ่มตัวเกินไปและการตกผลึกในภายหลัง ดังนั้นน้ำที่ผ่านการกำจัดไม่จำเป็นต้องมีการรีคาร์บอเนชัน อีกทั้งมักมีความขุ่นต่ำกว่า 10 NTU ซึ่งเหมาะแก่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทโดยไม่จำเป็นต้องผ่านการกรอง

3.3 การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ต้องการ

ปริมาณสารเคมีที่ต้องการใช้ในกระบวนการปูน-โซดาขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำดิบและคุณภาพของน้ำที่ผ่านการกำจัดว่าต้องการน้ำที่มีความกระด้างเหลืออยู่เท่าใด

3.3.1 การปรับแก้ผลของสารรวมตะกอน

สารรวมตะกอนเป็นสารที่ใช้สำหรับรวมผลึกแคลเซียมคาร์บอเนต

และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดเล็กให้เป็นฟล็อก (floc) ที่สามารถตกตะกอนได้ง่ายด้วยกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) ซึ่งเกิดจากการใช้สารส้มในปริมาณที่มากพอจนทำให้ผลคูณของ Al^{+3} และ $(OH)^{-3}$ มีค่ามากกว่า K_{sp} ทำให้ผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในช่วง 1 ถึง 7 วินาที (15,16) ทำหน้าที่รวมผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Amirtharajah และ Mills (16) ได้ทำการทดลองพบว่า โคแอกกูเลชันด้วยกลไกแบบกวาดจะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8 ถึง 8.2 และใช้สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$) 20 ถึง 50 มก./ล.) สารรวมตะกอนทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสูงขึ้น แต่สารเคมีที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน เช่น สารส้ม เพอร์ริลซัลเฟต เพอร์ริกซัลเฟต เพอร์ริกคลอไรด์ ยกเว้นโซเดียมอลูมิเนต เมื่อเติมลงไปใต้น้ำดิบแล้ว ทำให้ความเป็นด่างลดลง คาร์บอนไดออกไซด์และซัลเฟตเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้คุณภาพน้ำดิบเสียก่อน ที่จะคำนวณหาปริมาณปูนขาวและโซดาแอช ที่ต้องใช้ในการกำจัดความกระด้าง ตามสมการที่ (3.11) และ (3.12)

ตารางที่ 3.1 ผลของสารส้มที่มีต่อความเป็นด่าง คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟต

สารส้ม (1 มก./ล.)	ความเป็นด่าง (มก./ล. $CaCO_3$)	คาร์บอนไดออกไซด์ (มก./ล. CO_2)	ซัลเฟต (มก./ล. $CaCO_3$)
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$ (17)	-0.50	+0.44	+0.50
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (2,4)	-0.45	+0.40	+0.45

3.3.2 สารเคมีที่ต้องการ

ปริมาณสารเคมีที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้
 ปริมาณปูนขาว, มก./ล. $Ca(OH)_2 = (CO_2 \text{ (มก./ล. } CO_2) \times 74/44 + Alk$
 $(\text{มก./ล. } CaCO_3) \times 74/100 + Mg-H \text{ ที่ถูกกำจัด (มก./ล. } CaCO_3) \times 74/100 +$
 $Causticity \text{ ในน้ำที่ผ่านการกำจัด (มก./ล. } CaCO_3) \times 74/100) \times 100$
 /เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ (3.11)

ถ้าปูนขาวที่ใช้ในสมการ (3.11) เป็น CaO ให้แทนน้ำหนักโมเลกุล 74 ด้วย 56

ปริมาณโซดาแอช, มก./ล. $Na_2CO_3 = (NCH \text{ (มก./ล. } CaCO_3) \times 106/100 +$

Na-Alk ในน้ำที่ผ่านการกำจัด (มก./ล. CaCO_3) $\times 106/100$ $\times 100$ / เปอร์เซ็นต์
ความบริสุทธิ์ (3.12)

เนื่องจากกระบวนการปูน-โซดาเย็นที่มากเกินไปจะมีการใช้ปูนขาว
และโซดาแอชที่มากเกินไปอย่างละ 62 มก./ล. CaCO_3 เพื่อลด Mg-H และ Ca-H
ลงเหลืออย่างละประมาณ 8 มก./ล. CaCO_3 ส่วนโซดาแอชอีก 62 มก./ล. CaCO_3
ใช้เปลี่ยนปูนขาวที่มากเกินไปเป็น Caustic soda ดังนั้น Causticity และ
Na-Alk ในน้ำที่ผ่านการกำจัดจึงมีค่า 70 และ 124 มก./ล. CaCO_3 ตามลำดับ

3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียมคาร์บอเนต

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียม
คาร์บอเนต แบ่งออกได้ดังนี้

3.4.1 ผลของอุณหภูมิ

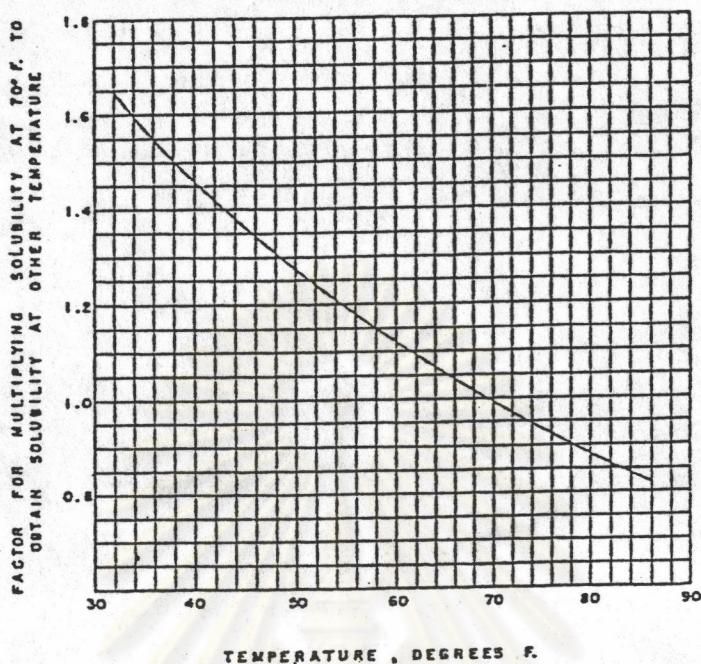
รูปที่ 3.1 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลาย
น้ำของแคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับการกำจัดความกระด้างด้วยกระบวนการเย็น
(cold process) (18) และจากกราฟถ้าให้ความสามารถในการละลายน้ำ
ทราบค่าที่อุณหภูมิ 70 °ฟ ความสามารถในการละลายน้ำที่ 60 °ฟ หรือที่ 80 °ฟ
สามารถหาได้โดยการคูณด้วย 1.12 หรือ 0.88 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง
อุณหภูมิ 10 °ฟ ทำให้ค่าเปลี่ยนแปลงไป 12 เปอร์เซ็นต์

3.4.2 ผลของคาร์บอเนตไอออนที่มีต่อปฏิกิริยาการกำจัด

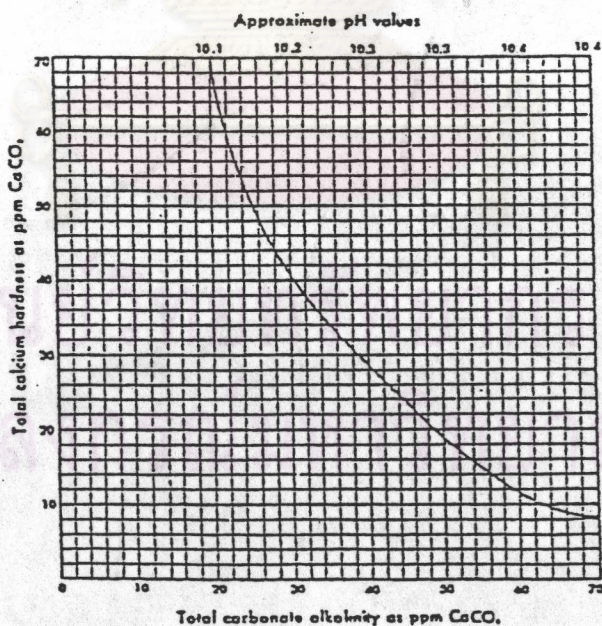
เมื่อกำจัดความกระด้างในน้ำดิบด้วยปูนขาวจะเป็นการเปลี่ยน
แคลเซียมไบคาร์บอเนตทั้งหมดไปเป็นคาร์บอเนต ทำให้ความกระด้างแคลเซียม
สามารถลดลงเหลือประมาณ 35 มก./ล. CaCO_3 ที่อุณหภูมิ 70 °ฟ แต่ถ้าน้ำดิบมี
แมกนีเซียมและโซเดียมไบคาร์บอเนตด้วยแล้ว การกำจัดด้วยปูนขาวจะก่อให้เกิด
แมกนีเซียมคาร์บอเนตที่ละลายน้ำกับโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งถ้าคาร์บอเนตที่ละลาย
น้ำเท่ากับ 70 มก./ล. CaCO_3 แล้ว จะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของ
แคลเซียมคาร์บอเนตลดลงเหลือประมาณ 8 มก./ล. CaCO_3 เนื่องจากเกิดกลไก
common-ion effect (ดูรูปที่ 3.2)

3.4.3 ผลของแคลเซียมไอออน

โดยทั่วไปแล้ว ผลของความกระด้างแคลเซียมไอออนคาร์บอเนตที่



รูปที่ 3.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียมคาร์บอเนต (18)



รูปที่ 3.2 ผลของคาร์บอเนตที่ละลายน้ำในการลดความกระด้างแคลเซียม (4)

มากเกินพอต่อคาร์บอเนตยังไม่เป็นที่ยอมรับในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่
อุณหภูมิปรกติโดยปราศจากโซดาแอช และแคลเซียมคาร์บอเนตที่ละลายน้ำถูกสมมติ
ว่ามีค่า $35 \pm$ มก./ล. CaCO_3 โดยไม่คำนึงถึงเกลือแคลเซียมอื่น ๆ ในสารละลาย

3.4.4 ผลของพีเอช

แคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดที่พีเอช
ประมาณ 9.4 แต่เมื่อพีเอชสูงขึ้นจะเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น
แทน ในทางตรงกันข้าม ความสามารถในการละลายน้ำของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์
ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วเมื่อพีเอชสูงกว่า 9.5 และเกือบเป็นศูนย์ที่พีเอชต่ำกว่า
10.5 เล็กน้อย (19) (ดูรูปที่ 3.3)

3.4.5 ผลของตัวขัดขวาง

สารมลทินต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในน้ำดิบ เช่น แทนนิน ของเสีย
อินทรีย์ สิ่งปฏิภูล และอื่น ๆ เป็นสาเหตุของการตกผลึกช้า หรือ การสร้างผลึก
ผิดปกติไปและอาจทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของแคลเซียมคาร์บอเนตสูง
ขึ้น การเติมคลอรีนจะกำจัดผลของสารมลทินเหล่านี้ โดยการออกซิเดชันของสาร
ประกอบอินทรีย์

3.5 ความสามารถในการละลายน้ำของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์

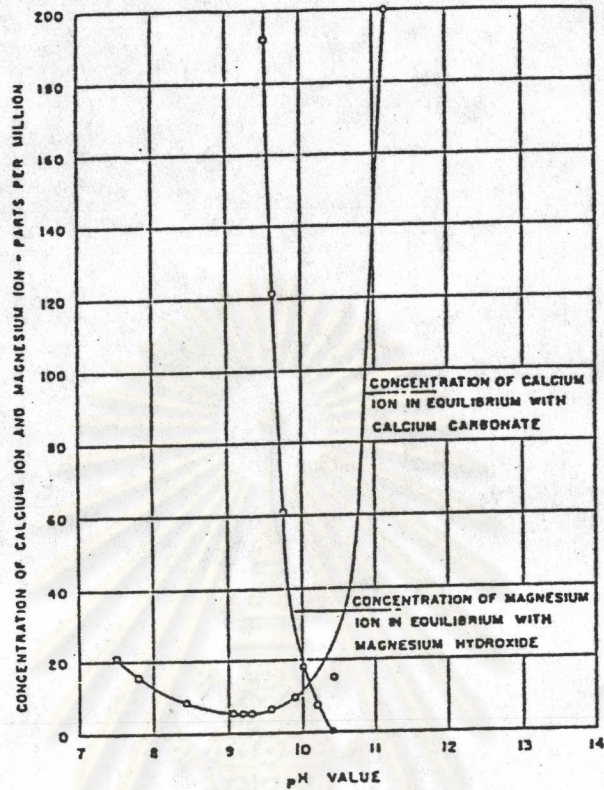
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเกิด common-ion effect ได้เช่น
เดียวกับแคลเซียมคาร์บอเนต และเมื่อใช้ปูนขาวในปริมาณพอดีตามสโตยชิโอเมตริก
(stoichiometric) แล้ว ความกระด้างแมกนีเซียมสามารถลดลงเหลือประมาณ
 33 มก./ล. CaCO_3 แต่ถ้ามีไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 70 มก./ล. CaCO_3
ซึ่งได้จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมโดยตรงหรือจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนขาวกับ
โซดาแอช ความกระด้างแมกนีเซียมจะลดลงเหลือประมาณ 8 มก./ล. CaCO_3
(ดูรูปที่ 3.4)

3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดความกระด้าง

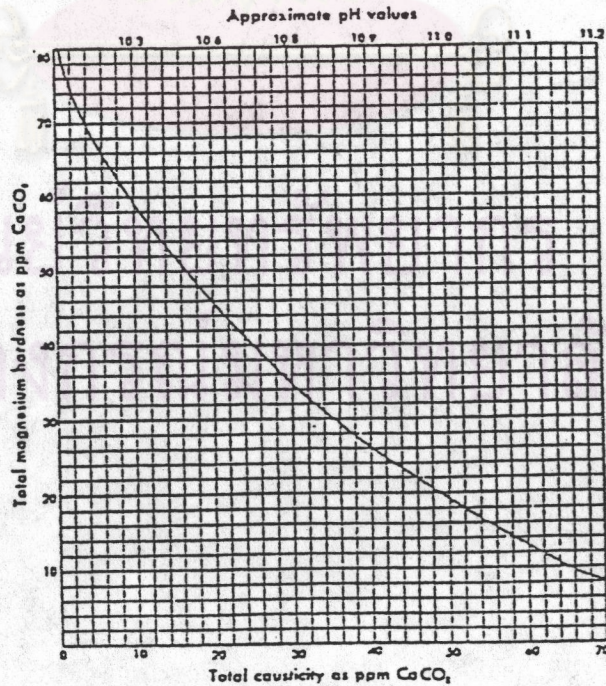
ประสิทธิภาพของการกำจัดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

3.6.1 อัตราการละลายน้ำของสารเคมี

การที่ปูนขาว CaO และ Ca(OH)_2 ละลายน้ำได้ช้าจึงต้องการ
เวลากักน้ำ 5 ถึง 10 นาที (20) เพื่อให้อนุภาคปูนขาวแขวนลอยอยู่ได้และ



รูปที่ 3.3 ความเข้มข้นสมดุลของแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนกับพีเอช (19)

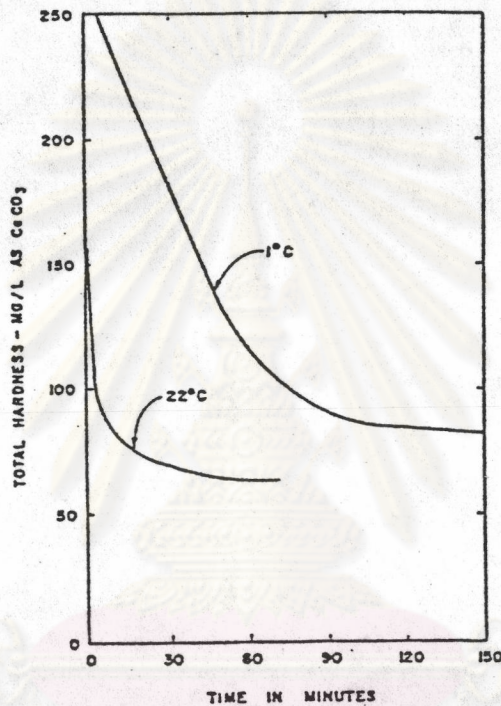


รูปที่ 3.4 ผลของไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำในการลดความกระด้างแมกนีเซียม (4)

กระจายอย่างสม่ำเสมอในระหว่างเวลาของการกวนผสม

3.6.2. อัตราการสร้างผลึก

อัตราการสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ Coie (21) ได้รายงานว่า น้ำที่มีอุณหภูมิ 1 °ซ ใช้เวลาประมาณ 90 นาที จึงจะมีความกระด้างต่ำสุด ในขณะที่น้ำที่มีอุณหภูมิ 22 °ซ ใช้ เวลาเพียง 30 นาทีเท่านั้น (ดูรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการกำจัดความกระด้าง (21)

3.6.3 อัตราการสร้างฟลอค

การหมุนเวียนตะกอนซึ่งเกิดจากการตกตะกอนของผลึกต่าง ๆ ในเขตตกตะกอนมายังเขตกวนเร็ว ทำให้เพิ่มการเติบโตของผลึกจนเป็นฟลอค อนึ่งปฏิกิริยาเคมีของปูนขาวในน้ำดิบเป็นไปได้ช้ามากถ้าไม่มีนิวคลีโอ ในทางตรงกันข้าม ถ้าปูนขาวผสมกับน้ำดิบเมื่อมีผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตอยู่ด้วย เวลาของปฏิกิริยาเคมีจะลดลงและเพิ่มเสถียรภาพของน้ำที่ผ่านการกำจัด

3.6.4 อัตราการตกตะกอนของฟลอค

อัตราการตกตะกอนขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาแน่นของฟลอค ถ้าฟลอคมีขนาดและความหนาแน่นเพิ่มขึ้น อัตราการตกตะกอนจะมากขึ้น อย่างไร

ก็ตาม ถ้าน้ำมีอุณหภูมิต่ำลงทำให้ความหนาแน่นของน้ำเพิ่มขึ้น อัตราการสร้างผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตจะลดลง

3.7 ประเภทของระบบกำจัดความกระด้าง

ระบบกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวและโซดาแอชสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทต่อเนื่อง (continuous type) และประเภทไม่ต่อเนื่อง (intermittent หรือ batch-process type)

3.7.1 ประเภทต่อเนื่อง (continuous type)

เป็นระบบกำจัดความกระด้างที่น้ำดิบและน้ำที่ผ่านการกำจัดมีการไหลเข้าและออกจากระบบตลอดเวลา และยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ดังนี้

3.7.1.1 แบบ conventional softeners

เป็นระบบที่มีการแยกหน่วยกำจัดออกเป็นเอกเทศ เช่น ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน เหมือนกับระบบผลิตน้ำประปา และยังสามารถย่อยออกได้เป็น 3 ชนิด ตามรูปแบบของการไหล คือ

1. การกำจัดแบบขั้นเดียว (single stage softening)

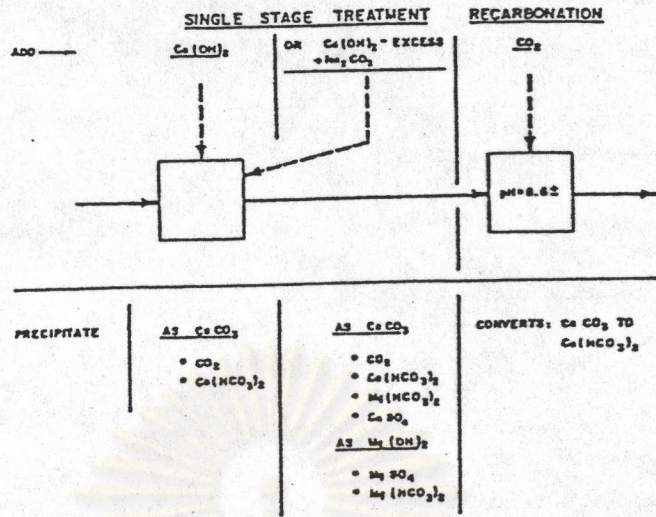
วิธีนี้สามารถกำจัดความกระด้างได้ทุกชนิดและในระดับที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้ (ดูรูปที่ 3.6)

2. การกำจัดแบบสองขั้น (two stage softening)

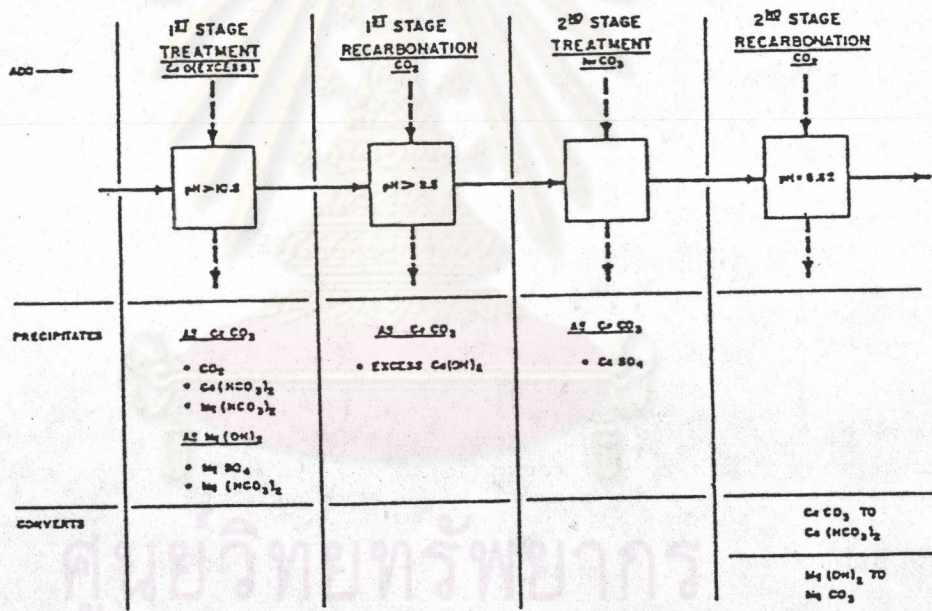
วิธีนี้สามารถกำจัดแมกนีเซียมได้มากขึ้น โดยเติมปูนขาวก่อนเพื่อกำจัดความกระด้างคาร์บอเนต และแมกนีเซียมอนคาร์บอเนต แล้วจึงรีคาร์บอเนชันเพื่อกำจัดปูนขาวที่ตกค้างให้เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนการเติมโซดาแอชเพื่อกำจัดความกระด้างแคลเซียมอนคาร์บอเนต จากนั้นจึงรีคาร์บอเนตอีกครั้งหนึ่ง เพื่อเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายน้ำให้เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมคาร์บอเนตตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.7)

3. การกำจัดบางส่วน (split treatment)

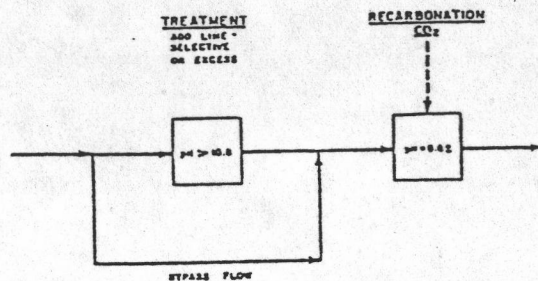
วิธีนี้เป็นการกำจัดความกระด้างเฉพาะส่วนที่มากเกินไป โดยน้ำส่วนแรกมีการเติมปูนขาวให้มากเกินไปเพื่อกำจัดความกระด้าง



รูปที่ 3.6 ผังการไหลของการกำจัดแบบขั้นเดียว (22)



รูปที่ 3.7 ผังการไหลของการกำจัดแบบสองขั้น (22)



รูปที่ 3.8 ผังการไหลของการกำจัดบางส่วน (22)

แมกนีเซียม จากนั้นจึงผสมน้ำส่วนแรกที่ผ่านการกำจัดและมีปูนขาวตกค้างกับน้ำส่วนที่สองซึ่งเป็นน้ำดิบ ความกระด้างในน้ำดิบจะทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนขาวตกค้าง ทำให้หมักไม่ต้องมีการรีคาร์บอนเนชัน (ดูรูปที่ 3.8)

3.7.1.2 แบบ solids contact basins

เป็นระบบที่มีถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอนรวมอยู่ภายในถังเดียวกัน ตะกอนของผลึกที่เกิดขึ้นก่อนหน้าจะก่อให้เกิดนิวคลีโอซึ่งเพิ่มการตกผลึกของแคลเซียมคาร์บอเนตและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ข้อดีของระบบนี้ คือ ประสิทธิภาพของการกำจัดสูงกว่า เวลาพักน้ำสั้นกว่า ต้องการพื้นที่น้อยกว่า และประหยัดสารเคมีที่ใช้ จึงนิยมใช้ในการกำจัดความกระด้างของน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรม และยังแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ชนิดมีชั้นตะกอน (sludge blanket)

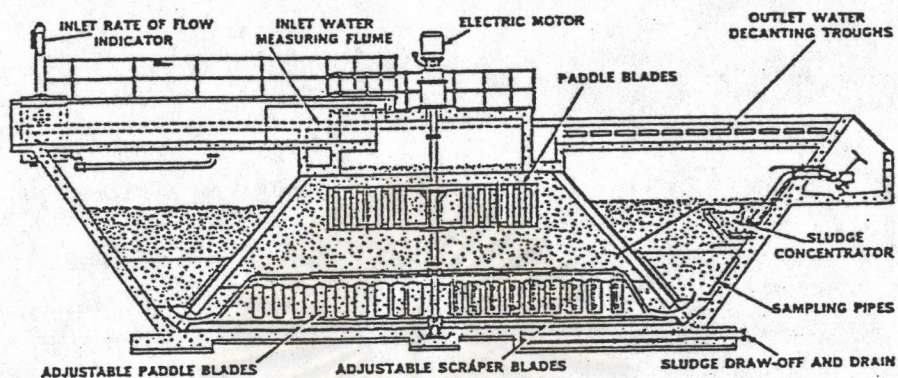
น้ำดิบจะผสมกับปูนขาวหรือสารเคมีอื่น แล้วไหลขึ้นผ่านชั้นตะกอนของผลึกที่เกิดขึ้นก่อนหน้า (ดูรูปที่ 3.9)

2. ชนิดหมุนเวียนน้ำตะกอน (slurry recirculation)

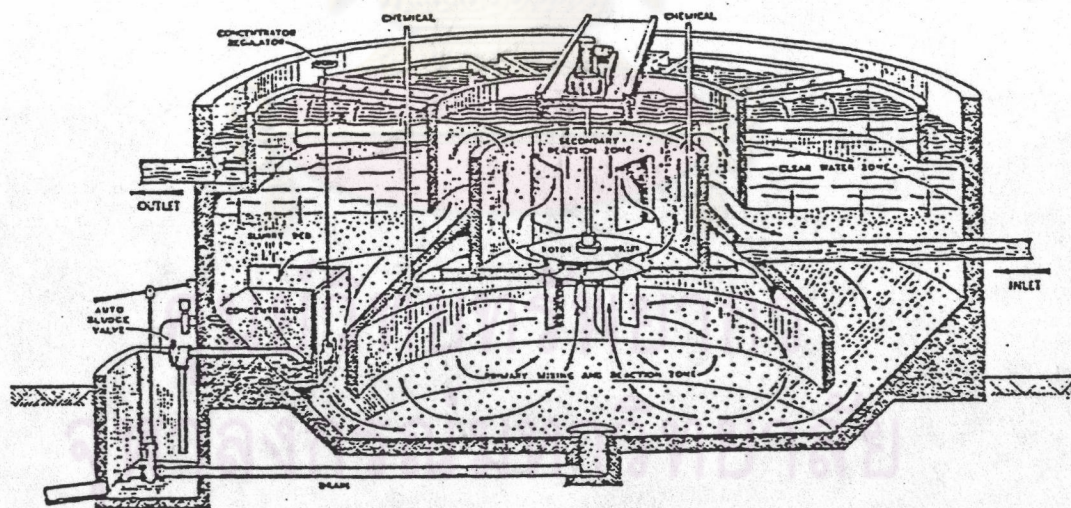
น้ำดิบและสารเคมีจะผสมกับน้ำตะกอนของผลึกซึ่งถูกหมุนเวียนมาจากถังตกตะกอน (ดูรูปที่ 3.10)

3.7.1.3 แบบ catalyst หรือ spiractor

เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังรูปกรวยคว่ำบรรจุด้วยคะตะลิสต์เม็ดละเอียด เช่น แคลไซต์ หรือทราย ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ถึง 0.6 มม. ประมาณ 2 ใน 3 ของปริมาตร น้ำดิบและสารเคมีไหลเข้าในทิศทางสัมผัสกับขอบถึงบริเวณก้นถังและไหลวนขึ้นผ่านชั้นคะตะลิสต์ที่แขวนลอย ผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะตกตะกอนและเกาะติดกับคะตะลิสต์ ยกเว้นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้คะตะลิสต์มีขนาดเพิ่มขึ้น ส่วนของแข็งแขวนลอย (ส่วนใหญ่เป็นแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์) ที่ไม่ตกตะกอนและเกาะติดกับคะตะลิสต์จะถูกกำจัดด้วยการกรอง ระบบนี้มีเวลาพักน้ำต่ำประมาณ 8 ถึง 12 นาที แต่เหมาะสำหรับการกำจัดความกระด้างของน้ำดิบที่มีเกลือแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ และมีอุณหภูมิมากกว่า 50 °ฟ



รูปที่ 3.9 ถังโซลิดซ์คอนแทคท์ชนิดมีชั้นตะกอน (23)



รูปที่ 3.10 ถังโซลิดซ์คอนแทคท์ชนิดหมุนเวียนน้ำตะกอน (24)

3.7.2 ประเภทไม่ต่อเนื่อง (intermittent หรือ batch-process type)

โดยปรกติแล้ว ระบบนี้มักมีถังปฏิกริยาจำนวน 3 ถัง ดำเนินการในลักษณะ fill-and-draw cycle ซึ่งไม่ค่อยแน่นอน เช่น ขณะที่น้ำดิบและสารเคมีกำลังถูกผสมในถังที่หนึ่ง ถังที่สองก็กำลังตกตะกอน และน้ำที่ผ่านการกำจัดจากถังที่สามก็กำลังถูกดูดออกเพื่อนำไปใช้ ประสิทธิภาพของการกำจัดขึ้นอยู่กับ การเอาใจใส่ต่อปริมาณสารเคมีที่ใช้และมีเวลากระบวนการมากพอ ข้อเสียของระบบนี้คือ ราคาของอุปกรณ์สูงกว่า ต้องการพื้นที่มากกว่า และค่าแรงมากกว่า

ในการกำจัดความกระด้างของน้ำนั้น ข้อกำหนดของการประปामลรัฐเวอร์จิเนีย (25) กล่าวว่า เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เกิน 10 มก./ล. ควรพิจารณาถึงวิธีการกำจัดที่ประหยัด ทำโดยการลดก๊าซ (deaeration) ไม่ควรกำจัดด้วยปูนขาว

3.8 ความเข้มของการกวนผสม

ความเข้มของการกวนผสมเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญของกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราเร็วของการหมุน รูปร่างของใบพัด และลักษณะทางเรขาคณิตของถังกวนผสม

Camp และ Stein (26) ได้ประยุกต์ Stokes' theory (ทฤษฎีของสโตก กล่าวว่า เกรเดียนต์ความเร็วเท่ากับรากที่สองของการสิ้นเปลืองพลังงาน ณ จุดหนึ่งหารด้วยความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล) ให้สัมพันธ์กับพลังงานที่ให้ทั้งหมด ซึ่งเรียกว่า เกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย (root-mean-square velocity gradient), G และเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เป็นดัชนีบอกระดับความปั่นป่วนของน้ำ

$$G = (P/\mu V)^{0.5} = (W/\mu)^{0.5} \quad (3.13)$$

โดยที่

$$P = \text{กำลังที่ให้กับของไหล, ก.-ชม.}^2/\text{วท.}^3$$

$$\mu = \text{ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, ก./ชม.-วท.}$$

$$V = \text{ปริมาตรของของไหล, ชม.}^3$$

$W = \text{ฟังก์ชันการสิ้นเปลือง} = \text{กำลังที่สูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของของไหล, เออร์ก/ชม.}^3\text{-วท.}$

ค่าของ W ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตของ stators เครื่องกวนผสม ถึงกวนผสม และอัตราเร็วของเครื่องกวนผสม ค่าที่ถูกต้องของ W สามารถหาได้จากการวัดโมเมนต์บิด (torque) ที่ให้กับของไหลที่อัตราเร็วและอุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้

$$W = 2\pi sT/V \quad (3.14)$$

โดยที่

s = อัตราเร็วของเครื่องกวนผสม, รอบ/วท.

T = โมเมนต์บิดที่ให้กับของไหล, ดายน์-ซม.

V = ปริมาตรของของไหล, ซม.³

และ Camp ได้นิยามสัมประสิทธิ์แรงลากรวมที่ไร้มิติ 2 ตัวในถึงกวนผสม ดังนี้

3.8.1 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนเต็มที่ (fully turbulent) จะได้ว่า

$$W = 124\rho a C_u s^3 \quad (3.15)$$

โดยที่

$$124 = (2\pi)^3/2$$

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, ก./ซม.³

a = พื้นที่ภาพฉายของใบพัด, ซม.²

= 17.5 ซม.² สำหรับ 2-blade paddle ขนาด 1x3 นิ้ว

C_u = สัมประสิทธิ์แรงลากรวมแบบปั่นป่วน

3.8.2 สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) จะได้ว่า

$$W = 4.92\mu C_v s^2 \quad (3.16)$$

โดยที่

$$4.92 = (2\pi)^2/8$$

C_v = สัมประสิทธิ์แรงลากรวมแบบหนืด

3.9 การหาค่าเกรเดียนต์ความเร็ว

Lai, Hudson และ Singley (27) ได้ทดลองหาความเข้มข้นของการกวนผสมด้วยวิธีจาร์เทสต์ เพื่อหาค่าเกรเดียนต์ความเร็ว สัมประสิทธิ์แรงลากรวมแบบปั่นป่วน เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และพาวเวอร์นัมเบอร์ สำหรับการทดลอง Series A และ Model A-1 ได้กระทำโดยใช้น้ำตัวอย่างปริมาตร 2.0 ล. ที่มีอุณหภูมิประมาณ 25 °ซ ใสลงในบีกเกอร์ขนาด 2.0 ล. ซึ่งไม่มี stators ทำให้ได้ข้อมูลของความสัมพันธ์ระหว่างค่า G และ C_u กับ N โดยที่ N เป็นอัตราเร็วของเครื่องกวนผสม, รอบ/นาที ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า G และ C_u กับ N

N, รอบ/นาที	20	30	40	50	60	70	80	90	100	170
$C_u \times 10^{-3}$	8.0	4.8	3.7	3.3	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.6
G, วท. ⁻¹ ข้อมูลที่ 2.0 ล. 25 °ซ	8.5	12.0	16.3	21.5	26.9	33.4	40.1	46.9	53.9	119.6
G, วท. ⁻¹ ข้อมูลที่ 0.5 ล. 29 °ซ	17.8	25.1	34.1	45.0	56.3	69.9	83.9	98.1	112.8	250.2

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องนำไปปรับแก้ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของการวิจัย ซึ่งกระทำโดยใช้น้ำดิบปริมาตร 0.5 ล. ที่มีอุณหภูมิประมาณ 29 °ซ ตามสมการดังนี้

$$G_1/G_2 = (\mu_2/\mu_1 \times V_2/V_1)^{0.5} \quad (3.17)$$

โดยที่ μ_1 และ μ_2 = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2
 V_1 และ V_2 = ปริมาตรของของไหลที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2

และค่าของ ρ และ μ ที่อุณหภูมิ T_1 และ T_2 คือ

$\rho = 0.99707$ และ 0.99597 ก./ซม.³ ที่อุณหภูมิ 25 และ 29 °ซ ตามลำดับ

$\mu = 0.89535 \times 10^{-2}$ และ 0.81835×10^{-2} ก./ซม.-วท. ที่อุณหภูมิ 25 และ 29 °ซ ตามลำดับ

และจากตารางที่ 3.2 เมื่อทำการ interpolation แล้ว จะทำให้ได้ค่า N ที่สอดคล้องกับ G เท่ากับ 20 40 60 80 และ 100 วท.⁻¹ ตามลำดับ ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เกณฑ์ความเร็วที่ใช้ในการทดลอง

N, รอบ/นาที	23.0	45.4	62.7	77.2	91.3
G, วท. ⁻¹					
ข้อมูลที่ 0.5 ล. 29 °ซ	20.0	40.0	60.0	80.0	100.0



3.10 พารามิเตอร์ควบคุมการกวนผสม

3.10.1 การกวนเร็ว (rapid, flash หรือ initial mixing)

เป็นการกระจายปูนขาวและโซดาแอสให้ผสมกับน้ำดิบอย่างทั่วถึง และคงสภาพการกระจายนี้จนมีเวลาเพียงพอทำให้สารเคมีเกิดการละลายและเริ่มปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากปูนขาวมีอัตราการละลายน้ำช้าจึงต้องการเวลากักน้ำ 5 ถึง 10 นาที ตามที่ได้กล่าวไว้ใน 3.6.1 การกวนเร็วควรมีเวลากักน้ำ 1 นาที หรือมากกว่า เมื่อใช้เกรเดียนต์ความเร็ว 700 วัต.^{-1} (20)

3.10.2 การกวนช้า หรือ การรวมตะกอน (slow-mixing หรือ flocculation)

เป็นการรวมหรือสร้างลัมพลีให้กับฟล็อกปฐมจนเป็นฟล็อกที่สามารถตกตะกอนได้ง่าย แต่มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลกระทบต่อ การรวมตะกอน เช่น พีเอช ความเป็นด่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้นของเกลือ ขนาดอนุภาคและธรรมชาติของคอลลอยด์ และสภาวะการกวนผสม ดังนั้นเกรเดียนต์ความเร็วจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญมากเพราะอัตราการสร้างฟล็อกเป็นสัดส่วนกับเกรเดียนต์ความเร็ว เช่น เมื่อเกรเดียนต์ความเร็วมีค่ามากขึ้น การรวมตะกอนก็จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ก็ต้องมีขีดจำกัดต่อพลังงานที่ให้เพราะฟล็อกจะเพิ่มขนาดจนกระทั่งแรงเฉือนที่เกิดขึ้นโดยเกรเดียนต์ความเร็วมีค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนของฟล็อก ฟล็อกจะแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลงในทางตรงกันข้าม จะเกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ที่สุดซึ่งสามารถเกิดขึ้น ณ เกรเดียนต์ความเร็วที่กำหนดให้ใด ๆ ส่วนพลังงานที่ให้มากที่สุดสำหรับการรวมตะกอนของน้ำ โดยส่วนใหญ่คือ เกรเดียนต์ความเร็วเป็น 100 วัต.^{-1} และค่าที่เหมาะสมประมาณ 50 วัต.^{-1} (28)

มลรัฐเวอร์จิเนีย (22) ได้ระบุว่า การรวมตะกอนควรขึ้นกับค่า GT ตั้งแต่ 20,000 ถึง 200,000 (โดยที่ G เป็นเกรเดียนต์ความเร็ว T เป็นเวลากักน้ำ มีหน่วยเป็น วัต.^{-1} และ วัต. ตามลำดับ) และเวลากักน้ำต่ำสุด 40 นาที

Camp (29) ได้รายงานว่ เกรเดียนต์ความเร็วมากที่สุดที่ใช้ในสหรัฐอเมริกา มีค่าอยู่ในช่วง 20 ถึง 74 วัต.^{-1} และเวลากักน้ำ ตั้งแต่ 10 ถึง

100 นาที ส่วนใน Water treatment plant design (1969) ได้แนะนำว่า
เกณฑ์ความเร็วควรอยู่ในช่วง 5 ถึง 100 วท.^{-1} และ เวลาพักน้ำ ตั้งแต่
20 ถึง 60 นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย