

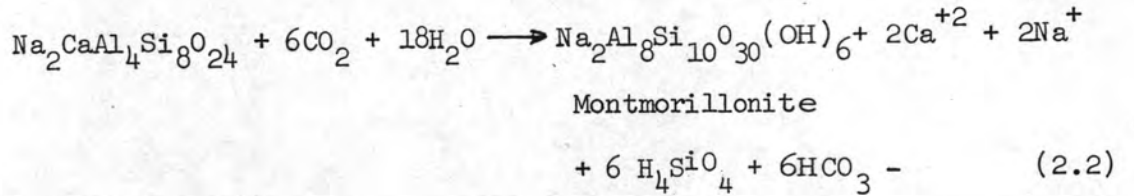
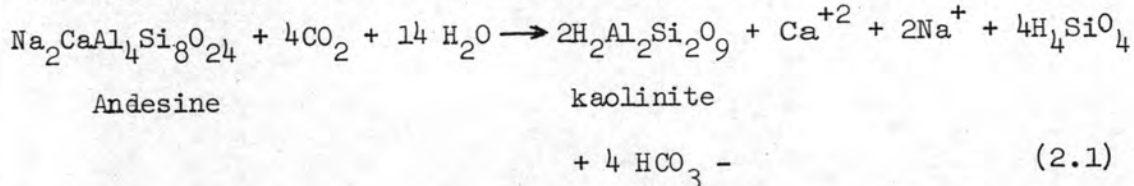


บททวนเอกสาร

2.1 กำเนิดของซิลิกาในน้ำธรรมชาติ

ซิลิคอน เป็นธาตุที่มีมากเป็นที่สองรองจากออกซิเจน ในธรรมชาติจะไม่พบซิลิคอนอิสระ แต่จะพบโดยทั่วไปในรูปซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) หรือ ซิลิกา ซึ่งอาจจะอยู่ตามลำพังหรือรวมกับสารออกไซด์อื่น ๆ เกิดเป็นสารประกอบซิลิเกต ซิลิคอนไดออกไซด์มีอยู่หลายรูปแบบในธรรมชาติ ตั้งแต่รูปแบบที่อนุภาคมีการจัดเรียงโครงสร้างภายในไม่เป็นระเบียบแบบแผน ไม่มีรูบทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอนที่เรียกว่า ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) จนกระทั่งรูปแบบที่มีการจัดเรียงโครงสร้างภายในอย่าง เป็นระเบียบที่เรียกว่าผลึกซิลิกา (Crystalline Silica) ที่เป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ทราย ควอทซ์ (Quartz) เป็นต้น การที่มีซิลิกาปรากฏอยู่ในน้ำธรรมชาติ เนื่องมาจากกระบวนการกัดเซาะ

(Weathering) แร่ซิลิเกตในธรรมชาติ เกิดขึ้น ดังตัวอย่างในสมการต่อไปนี้ (1)

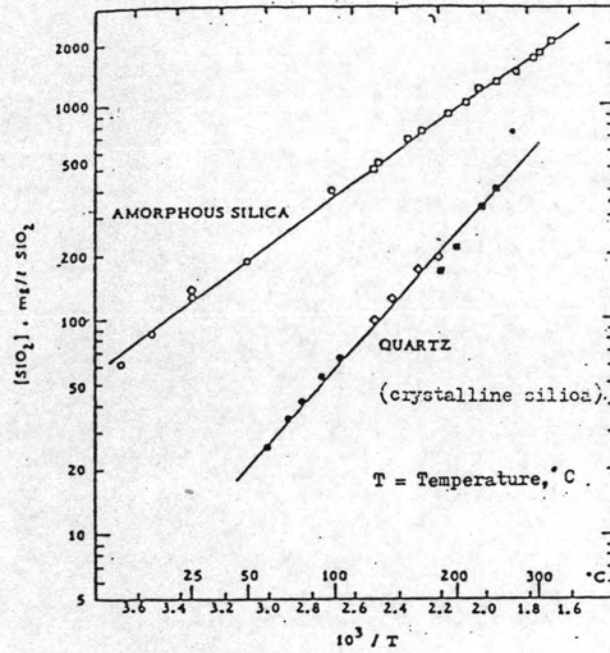


ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาที่อยู่ในน้ำไม่มากเมื่อเทียบกับปริมาณซิลิกาที่เป็นส่วนประกอบของแร่ซิลิเกต น้ำธรรมชาติทั่วไปจะมีปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาไม่สูงมากนัก อยู่ในช่วง 1-30 ppm แต่ก็ก็มีบางแห่งที่พบซิลิกามีความเข้มข้นสูงถึง 100 ppm (2) ซึ่งพบไม่บ่อยนัก ทั้งนี้ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาที่อยู่ในน้ำขึ้นกับชนิดของแร่ธาตุที่น้ำไหลผ่านและ

คุณสมบัติการละลายของซิลิกาแบบต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังสรุปในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Amorphous Silica ละลายได้มากกว่า Quartz ดังนั้นซิลิกาที่อยู่ในน้ำเกิดมาจากการละลายของ Amorphous Silica นั้นเอง

ตารางที่ 2.1 ค่าการละลายของซิลิกาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

Siliceous Material	Solubility (mg/L SiO ₂)	Condition (°C)
Quartz	6.8	25
Quartz	10.8	25
Amorphous	60-80	0
Amorphous	120-140	24
Amorphous	115	25
Amorphous	115-120	25
Amorphous	108	25



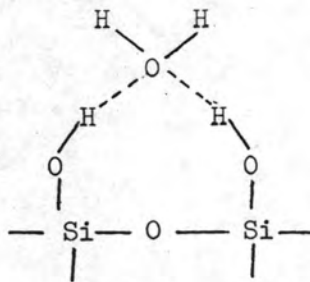
รูปที่ 2.1 การละลายของซิลิกาที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (3)

2.2 สถานะของซิลิกาในน้ำธรรมชาติ

ซิลิกาอยู่ในน้ำได้ทั้งในสถานะที่เป็นคอลลอยด์ (Colloidal Silica) และสถานะที่ละลายในน้ำ (Soluble Silica) ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาที่เอชและอุณหภูมิของสารละลาย ในน้ำธรรมชาติทั่วไปจะมีปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาไม่สูงมากนัก ถ้าที่เอชสารละลายอยู่ในช่วง 6-9 ซิลิกา จะอยู่ในรูปของซิลิกาที่ละลายมากกว่าคอลลอยด์ซิลิกา แต่ในน้ำธรรมชาติบางแห่ง เช่น ในน้ำพุร้อนอาจเกิดคอลลอยด์ซิลิกาได้ ถ้าปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาละลายอยู่ในน้ำมากจนเกิดสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง (Supersaturated Solution) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูง ๆ และที่เอชต่ำจะเกิดขบวนการโพลีเมอไรเซชัน (Polymerization) รวมตัวเป็นอนุภาคที่อยู่ในสถานะที่เป็นคอลลอยด์ แต่ถ้าน้ำมีความเข้มข้นของซิลิกาน้อยกว่า 100 มก/ล อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหลายจะไม่อยู่ตัว (Unstable) แต่จะกลายเป็นซิลิกาที่ละลายภายในเวลาอันสั้น เนื่องจากเกิดขบวนการ Depolymerization (2)

2.2.1 ซิลิกาที่ละลายในน้ำ (Soluble Silica)

ซิลิกาที่ละลายในน้ำมีปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาค่ากว่าระดับอิ่มตัวจะอยู่ในรูปของ Monosilicic acid, H_4SiO_4 (2, 4) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Monosilicic acid

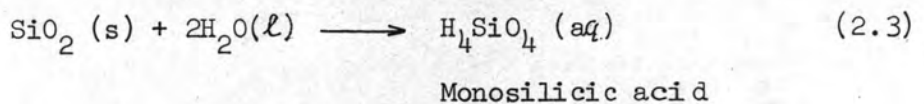
จากรูป 2.2 แสดงโมเลกุลของน้ำ 2 โมเลกุลยึดเกาะ SiO_2 ด้วยแรงดูดติดผิว และ เชื่อมต่อด้วยแรงไฮโดรเจนบอนด์เกิดเป็นกลุ่ม Silanol (SiOH) ที่พื้นผิวโมเลกุล (5) ทำให้ H_4SiO_4 มีคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

2.2.1.1 คุณสมบัติการละลายของซิลิกา

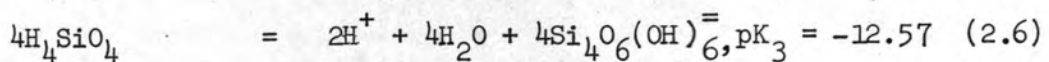
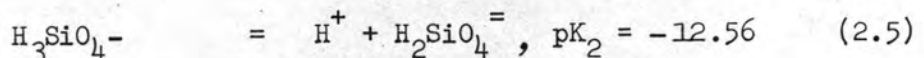
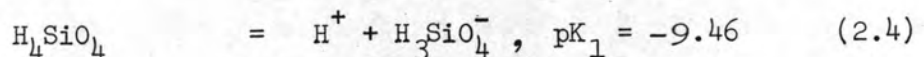
ดังที่กล่าวแล้วว่ารูปแบบที่เป็น Amorphous Silica ละลายได้มากกว่า Crystalline Silica องค์กรประกอบอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการละลายของซิลิกาได้แก่อุณหภูมิ และพีเอชของสารละลาย การละลายของซิลิกาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูป

2.1 ส่วนการละลายของซิลิกาขึ้นกับค่าพีเอชจะเป็นไปดังนี้คือ

สารละลายที่มีพีเอชน้อยกว่า 9 การละลายของซิลิกาจะเป็นดังนี้



เมื่อพีเอชของสารละลายมากกว่า 9 จะมีการละลายเพิ่มขึ้น และแตกตัว (Dissociate) อยู่ในรูปของไอออนซิลิเคตต่าง ๆ (6) ดังสมการ



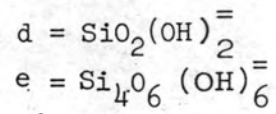
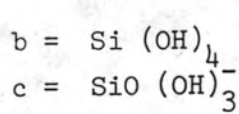
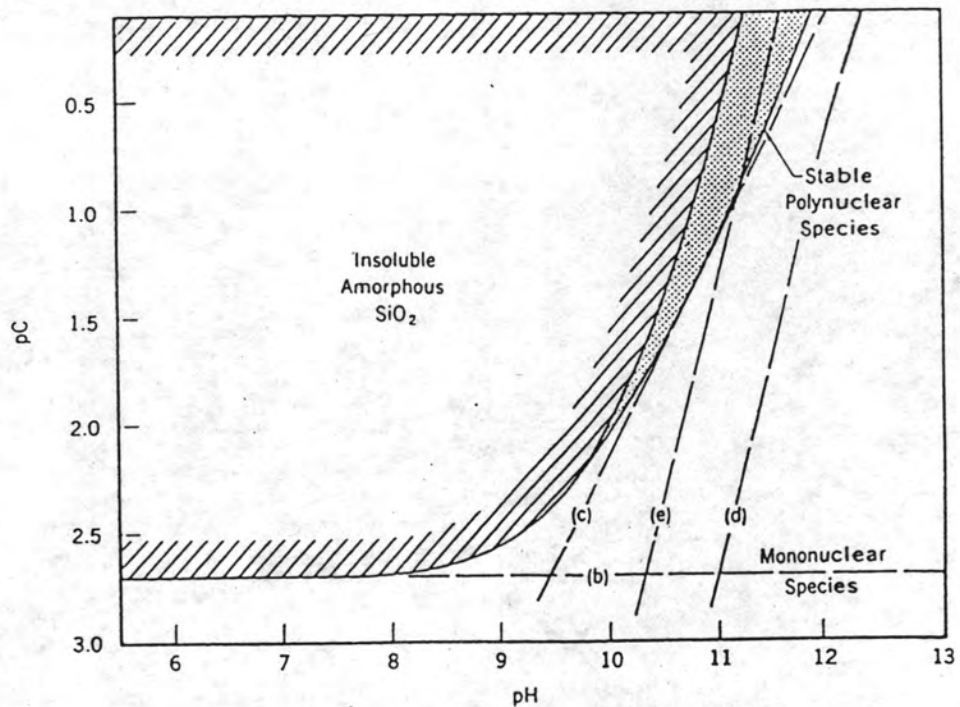
โคอะแกรมแสดงความเข้มข้นของซิลิกาที่สภาวะสมดุล (25°C) เป็นฟังก์ชันกับพีเอช ดังแสดงในรูป 2.3 จะเห็นว่าความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ที่ได้จากการแตกตัวนี้จะขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย ตัวอย่างเช่น

อัตราส่วนระหว่าง H_3SiO_4^- กับ H_4SiO_4	ที่พีเอช 10.5	เป็น	5/1
	ที่พีเอช 9.5	เป็น	1/1
	ที่พีเอช 9	เป็น	1.6/10
	ที่พีเอช 8	เป็น	1.6/100 (7)

การกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ สำหรับความเข้มข้นของซิลิกา 120 มก/ล.

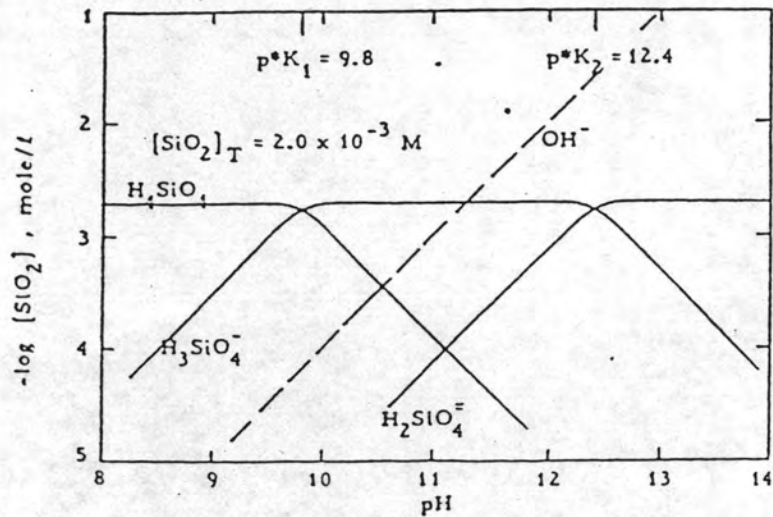
ตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูป 2.4

น้ำธรรมชาติมีพีเอช 6-9 จึงพบซิลิกาอยู่ในรูป H_4SiO_4 มากกว่าอนุภาคซิลิเกต
(Dissociated silicate ion)



รูปที่ 2.3 การละลายน้ำของซิลิกาขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ที่อุณหภูมิ 25°C

(1)



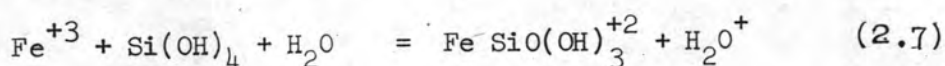
รูปที่ 2.4 การแตกตัวของอนุภาคซิลิเคตในสารละลายซิลิกาที่มีความเข้มข้น 120 มก/ล ที่พีเอชต่าง ๆ

2.2.1.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างไอออนของโลหะกับ H_4SiO_4

โดยทั่วไปแล้วที่อุณหภูมิและสภาวะปกติ ซิลิกาที่คุณสมบัติค้ำานทานต่อสารเคมีทั่วไป เป็นส่วนมาก (6) ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้เมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิสูง ๆ นอกจากนี้ความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับรูปแบบและการเตรียมการเบื้องต้น (pretreatment) การที่ซิลิกาที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากพื้นผิวของซิลิกาประกอบด้วยกลุ่ม SiOH (Silanol) อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่จุดนี้ ไอออนของโลหะหลายชนิดสามารถทำปฏิกิริยากับ H_4SiO_4 ได้ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{+3} กับ H_4SiO_4

ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Fe^{+3} กับ H_4SiO_4 เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Silicato-iron complex) ดังสมการ

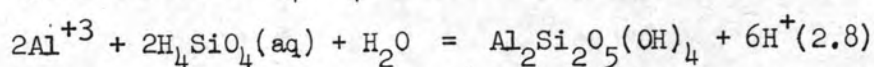


ภายใต้การควบคุมพีเอชสารละลายน้อยกว่า 3.5 (8)

จากการศึกษาทดลองโดย Schenk และ Weber (1) แสดงให้เห็นว่าซิลิกาที่อยู่ในน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ Fe^{+3} กล่าวคือ ซิลิกาจะเป็นสารที่หน่วงหนี้ยวปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเนื่องมาจากการแข่งขันกันระหว่าง H_4SiO_4 กับ H_2O และ OH^- ในการทำปฏิกิริยากับ Fe^{+3} หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การเกิดสารเชิงซ้อนขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง Fe^{+3} กับซิลิกา เป็นการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในเวลาเดียวกันซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Fe^{+3} กล่าวคืออัตราการเกิดออกซิเดชันเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของซิลิกาสูงขึ้น และเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่สูงขึ้น (อนุภาคซิลิเกตแตกตัวตามค่าพีเอชที่เปลี่ยนไปดังกล่าวแล้ว)

2. ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับ Al^{+3}

ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับสารประกอบอลูมิเนียม เกิดขึ้นดังสมการ



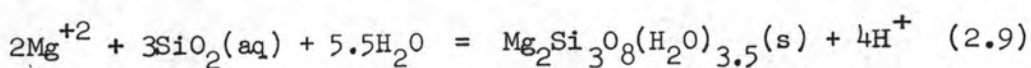
Aluminosilicate

ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอช 4-10 ที่อุณหภูมิ $25^\circ C$ ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากประมาณ

0.1 ไมครอน ต้องใช้เครื่องมือ Electron microscope จึงจะตรวจสอบเนื้อผลึกได้ ผลึกจะเพิ่มขนาดใหญ่อขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปนาน (Ageing) บางครั้งอาจจะนานถึง 4 ปี (9)

3. ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับ Mg^{+2}

ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับสารประกอบแมกนีเซียม เกิดขึ้นดังสมการ



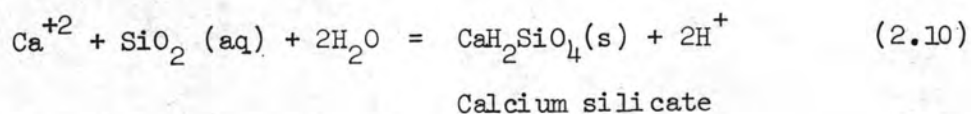
Sepiolite

การทดลองพบว่า การเพิ่มพีเอชให้สูงขึ้น (มากกว่า 9) เป็นผลทำให้ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาที่สภาวะสมดุล (Equilibrium) ลดต่ำลง และเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยาให้เข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้น เมื่อพีเอชสารละลายประมาณ 9.5 จะเกิด $Mg(OH)_2$ และ Sepiolite ตกผลึกพร้อม ๆ กัน การตรวจสอบด้วยวิธี electron microscope พบว่าผลึก Sepiolite มีลักษณะคล้ายเข็มมีความยาว 0.2-0.3 nm อยู่ร่วมกับเนื้อผลึก $Mg(OH)_2$ ซึ่งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

การเกิดผลึกแมกนีเซียมซิลิเกตขึ้นอยู่กับค่า K_{sp} (Solubility Constant) และพีเอชของสารละลาย กล่าวคือสารละลายที่มีพีเอชสูง ๆ หรือมีความเข้มข้นของไอออน Mg^{+2} และซิลิกาเพียงพอจะทำให้เกิดการตกผลึกขึ้นได้ นอกจากนี้การเพิ่มอุณหภูมิก็มีผลให้ปฏิกิริยาค่าเนินไปทางขวามือเร็วขึ้นด้วย (3)

4. ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับ Ca^{+2}

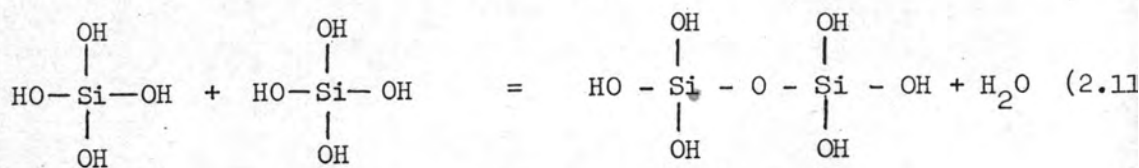
ปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับสารประกอบแคลเซียม เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับ Mg^{+2} ดังสมการ



การเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกต เมื่อสารละลายมีพีเอชอยู่ในช่วง 11-12 หรือถ้าสารละลายมีพีเอชค่ากว่านี้ก็จะต้องมีปริมาณความเข้มข้นของ Ca^{+2} สูงเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สภาวะสมดุลเร็วขึ้น (10)

2.2.2 คอลลอยด์ซิลิกา (Colloidal Silica)

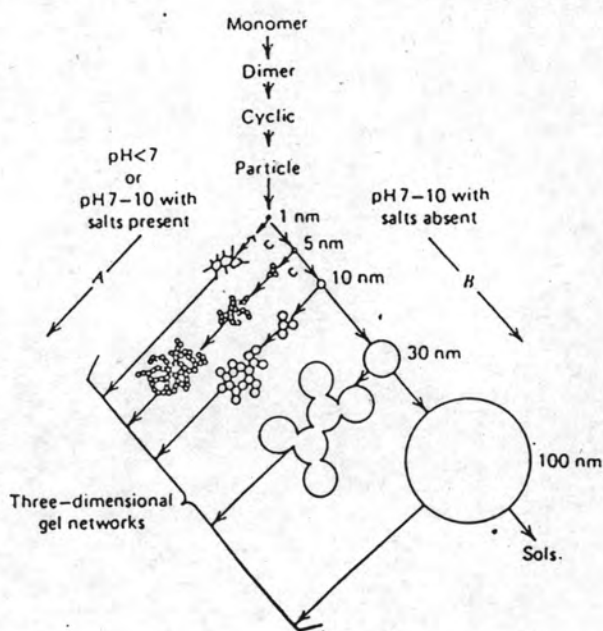
คอลลอยด์ซิลิกา เป็นซิลิกาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการโพลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensed Polymerization) ของ monosilicic acid เกิดเป็นโครงสร้างที่ซ้ำ ๆ กัน ภายในโครงสร้างโพลิเมอร์ (polymer) โดยมีโมเลกุลของน้ำขาดหายไป (7) ดังสมการ



monosilicic acid monosilicic acid polymeric particle

ปฏิกิริยาค่าเป็นคอปไปเรื่อย ๆ จนขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น อยู่ในสถานะที่เป็นคอลลอยด์ (Colloidal silica/Silica sol) มีการเชื่อมต่อกันเป็นลูกโซ่และ เชื่อมโยงกันเป็นโครงข่าย (network) จนสามารถมองเห็นรูปร่าง 3 มิติได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า ซึ่งเรียกว่าซิลิกาเจล (Silica gel) (1,4,6,7)

ขั้นตอนการเกิดโพลิเมอร์ เซชันของ H_4SiO_4 ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดขบวนการโพลิเมอร์ เซชันของซิลิกา

ในสารละลายต่าง (B) อนุภาคมีการเพิ่มขนาดใหญ่มากขึ้นและมีปริมาณลดลง สำหรับสารละลายกรหรือสารละลายต่างที่มีเกลือ (Flocculating salts) รวมอยู่ด้วย อนุภาคจะมีการรวมตัวมีโครงสร้างเป็นโครงข่าย (networks) และเป็น 3 มิติ เกิดรูปแบบที่เรียกว่า ซิลิกาเจล (gels) (6)

ปัจจัยที่เอื้ออำนวยให้มีการเกิดโพลิเมอร์ เซชัน มีดังนี้

1. การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซิลิกาให้สูงขึ้นจนสารละลายมีปริมาณซิลิกาอิ่มตัววดยิ่ง (Supersaturated Solution) ภายใต้ที่เอชของสารละลาย เป็นกรด ดังแสดงในรูป 2.3 พื้นที่แสงแสดงให้เห็นถึงขอบเขตของการเกิดกระบวนการโพลิเมอร์ เซชัน
2. การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย เป็นการเพิ่มขนาดของอนุภาค (Sol particle)
3. การเติมสาร Flocculating salts เพื่อทำลายประจุและกระตุ้นให้มีการรวมตัวกันเร็วขึ้น

คอลลอยด์ซิลิกาจึงเป็นสถานะหนึ่งของซิลิกาที่เกิดขึ้นในขณะที่กระบวนการโพลิเมอร์ เซชันของ monosilicic acid (H_4SiO_4) ดำเนินอยู่ภายใต้การควบคุมสภาวะที่เหมาะสม ดังกล่าวแล้ว ขนาดของคอลลอยด์ซิลิกาไม่ใหญ่กว่า 300 nm มีพื้นที่ผิวสูงมาก ($50-700 \text{ m}^2/\text{g}$) คุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุลบ จึงทำให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นเหตุให้อนุภาคกระจายอยู่ตัวในน้ำ (Stable) โดยไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นประจุไฟฟ้าจึง เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้อนุภาคซิลิกามีเสถียรภาพ (6)

2.3 วิธีการกำจัดซิลิกา

การกำจัดซิลิกาออกจากรน้ำทำได้หลายวิธี เช่น

- 2.3.1 กระบวนการกลั่น (Distillation)
- 2.3.2 กระบวนการเมมเบรน (Electro dialysis)
- 2.3.3 กระบวนการตกผลึกทางเคมีและการดูดซับ
- 2.3.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ

2.3.1 กระบวนการกลั่น (Distillation)

เป็นวิธีที่ได้น้ำที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุด แต่ไม่นิยมใช้เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังไม่มีข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือจากเครื่อง Evaporator ที่ขายกันทั่วไปที่อ้างถึงการกำจัดซิลิกา แต่กล่าวได้ว่าวิธีนี้สามารถกำจัดซิลิกาได้อย่างสมบูรณ์ถ้าไม่มีการรั่วไหลของเครื่องควบแน่นหรือเกิดการพัดพาซิลิกาไปกับไอน้ำ ในต่างประเทศ โรงงานที่ผลิตพลังงานไอน้ำหลายแห่งได้ติดตั้งเครื่อง Evaporator พบว่ามีการพัดพาของซิลิกาไปกับไอน้ำจำนวนมากซึ่งก่อให้เกิดปัญหาตามมาในเครื่องควบแน่น

2.3.2 กระบวนการเมมเบรน (Electrodialysis)

ปัจจุบันไม่มีการผลิตเพื่อการค้ามีแต่การทดลองในห้องปฏิบัติการ เท่านั้น วิธีนี้ต้องการแสดงให้เห็นว่าซิลิกาที่มีอยู่ในน้ำอยู่ในรูป colloid เนื่องจากเยื่อ เมมเบรน ไม่ยอมให้ colloid ผ่าน แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองพบซิลิกาอยู่ในห้องประจุบวกและประจุลบ แสดงถึงความซับซ้อนของรูปแบบของซิลิกาที่อยู่ในน้ำ เนื่องจากซิลิกาบางส่วนแตกตัวเป็นไอออนได้ การกำจัดซิลิกาด้วย เครื่องมือนี้ไม่มีการทดลองยืนยัน

2.3.3 กระบวนการตกผลึกทางเคมีและการดูดซับผิว

กระบวนการนี้เกิดจากการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปลงในน้ำในปริมาณที่มากเกินไปจนเกิดการตกผลึก (precipitate) ไฮดรอกไซด์ซึ่งมีลักษณะเหนียวเหนอะ (sticky) อนุภาคซิลิกาสามารถดูดซับ (Adsorbed) บนผิวของผลึกเหล่านี้เกิดการยึดเกาะกันเป็นตะกอนใหญ่ได้ สารเคมีที่ทำให้เกิดกลไกแบบนี้ ได้แก่ สารประกอบอลิมนัมและสารประกอบเหล็ก นอกจากนี้แล้วยังมีสารเคมีอีกบางชนิดที่นอกจากจะเกิดการตกผลึกเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์แล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาที่อยู่ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบ เมทัลซิลิเคต ตกตะกอนเกาะติดอยู่บนผิวของผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น สารเคมีเหล่านั้น ได้แก่ สารประกอบแมกนีเซียม สารประกอบแคลเซียม ซึ่งให้ผลในการกำจัดซิลิกาสูงกว่า 2 ชนิดแรก

ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาด้วยวิธีการตกผลึกทางเคมี ขึ้นอยู่กับ

1. ชนิดและปริมาณสารเคมีที่ใช้
2. พีเอช

3. อุณหภูมิ
4. เวลาที่ใช้ในการนำปฏิกิริยา
5. ไอออนต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำ
6. การหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่

2.3.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ

เป็นวิธีการผลิตน้ำให้มีคุณภาพดีเหมาะสำหรับกระบวนการผลิตที่ต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง วิธีนี้ได้รับการพัฒนาแทนที่กระบวนการกลั่นซึ่งเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าและเมื่อมีการนำหม้อไอน้ำความดันสูง ๆ มาใช้งานเพิ่มขึ้น ความจำเป็นที่จะต้องกำจัดซิลิกาในน้ำป้อนหม้อน้ำให้เหลือน้อยที่สุดจนเกือบจะเป็นศูนย์ก็มีมากขึ้น วิธีการแลกเปลี่ยนประจุจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้สำหรับระบบผลิตพลังงานไอน้ำที่ต้องการน้ำที่มีปริมาณซิลิกาเหลืออยู่ต่ำกว่า 0.5 มก/ล

การเลือกวิธีการกำจัดซิลิกาด้วยวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำดิบและวัตถุประสงค์ของการใช้น้ำ ทั้งนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามความดันของหม้อไอน้ำ เช่น การผลิตพลังงานไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าต้องการน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก เนื่องจากปัญหาตะกอนซิลิกาที่จับเกาะที่ใบพัดกังหันและในท่อไอน้ำ ภายหลังจากการบำบัดน้ำด้วยวิธีธรรมดาแล้วจึงต้องใช้วิธีการกลั่นหรือการแลกเปลี่ยนประจุ ส่วนระบบแลกเปลี่ยนความร้อนธรรมดาไม่จำเป็นต้องกำจัดซิลิกาให้หมดไปอย่างสมบูรณ์เพียงแต่สามารถให้มีเหลืออยู่ได้ปริมาณหนึ่ง ๆ ที่จะไม่เกิดการตกผลึกจับเกาะที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนก็เพียงพอแล้ว วิธีการตกผลึกทางเคมีจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากสามารถลดปริมาณซิลิกาให้ต่ำลงได้โดยการเลือกใช้สารเคมีและควบคุมสภาวะของปฏิกิริยาให้เหมาะสม ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ สามารถศึกษาได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.4 การกำจัดคอลลอยด์ซิลิกา

การกำจัดคอลลอยด์ซิลิกาเกิดขึ้นจากกลไกต่าง ๆ ดังนี้

2.4.1 การดูดซับและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาค

งานวิจัย เกี่ยวกับการใช้เกลือของโลหะที่มีวาเลนซ์ (Valence) สูง ๆ เช่น $\text{Fe}(\text{ClO}_4)_3$ และ $\text{Al}(\text{ClO}_4)_3$ (12,13) แสดงให้เห็นว่าสารประกอบดังกล่าวเมื่อไฮโดรไลซ์ จะให้ออนบวกต่าง ๆ ซึ่งสามารถจะรวมอนุภาคประจุลบของซิลิกาที่แขวนลอยอยู่ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. สารประกอบ เกลือของโลหะ เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวกลายเป็นไอออนบวก และลบที่มีวาเลนซ์สูง ไอออนบวกทำปฏิกิริยากับ OH^- ทำให้เกิดสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีประจุบวก เช่น Hydroxo aluminum complex

2. ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxo metal complex) จะดูดซับอนุภาคคอลลอยด์และหักล้างประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และพร้อมที่จะรวมตัวกันหลาย ๆ อนุภาคจนกลายเป็น floc

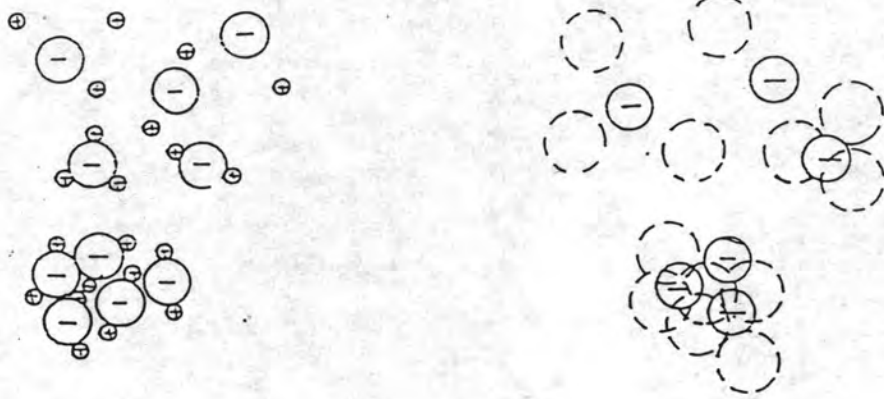
เนื่องจากกลไกดูดซับดังกล่าวสามารถ เปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ซิลิกาให้ เป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (Charge Reversal) เมื่อใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไป สารประกอบเชิงซ้อนจะดูดซับไปที่ผิวซิลิกาจนทำให้ซิลิกา เป็นประจุบวกซึ่งเป็นการทำให้ซิลิกา กลับมีเสถียรภาพ (Restabilization) เนื่องจากประจุนั้นขึ้นมาอีก ดังนั้นกลไกแบบนี้จึงให้ผลดีในช่วงเวลาอันสั้น และปริมาณสารเคมีที่ใช้ต้องพอเหมาะ และมีปริมาณต่ำกว่าค่าผลคูณของการละลายของการเกิดผลึกไฮดรอกไซด์ ลักษณะของกลไกแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.6.

2.4.2 การจับอนุภาคซิลิกาไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไปในน้ำในปริมาณที่มากกว่า ค่าการละลายจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สารเคมีที่ใช้ได้แก่ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_3$ MgCl_2 MgO เป็นต้น สามารถทำให้เกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็น絮โดยการควบคุมพีเอช เกิดเป็นตะกอน $\text{Fe}(\text{OH})_3$ $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งล้วนแต่เป็นผลึกสาร (precipitate) ที่ไม่ละลายน้ำ ซิลิกาที่อยู่ในน้ำสามารถดูดซับ (Adsorbed) บนผิวของผลึกเหล่านี้ ลักษณะสำคัญของกลไกแบบนี้คือ ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสม (Optimum

dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของซิลิกา กล่าวคือน้ำที่มีปริมาณซิลิกาตั้งต้นต่ำ ๆ ต้องใช้ปริมาณสาร เคมีสูงมากจึงจะเกิดโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาตั้งต้นสูง ๆ จะใช้สาร เคมีน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลว่าน้ำที่มีปริมาณซิลิกาสูง ๆ ย่อมมีโอกาสนับสัมผัสกันมากกว่า ลักษณะการเกิดกลไกแบบนี้ แสดงได้จากรูปที่

2.7



รูปที่ 2.6 กลไกการดูดติดและลดยเสถียรภาพ รูปที่ 2.7 กลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาด

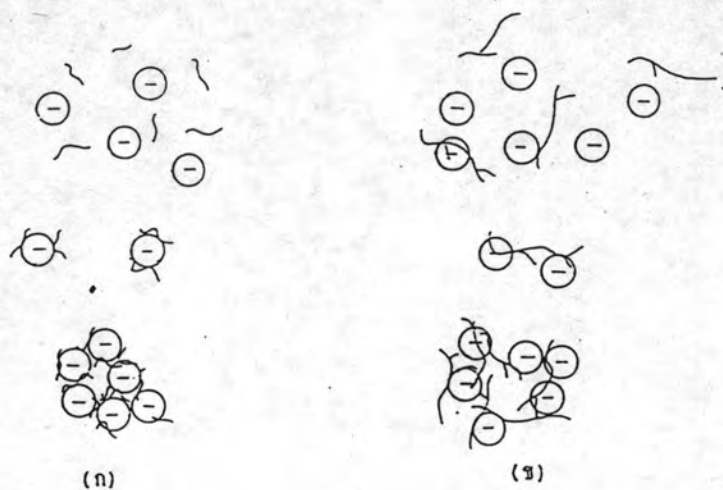
2.4.3 การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคซิลิกา

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และ โปรตีนบางชนิดรวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มาก ประจุไฟฟ้าประจำตัวอาจเป็นบวก ลบหรือไม่มีประจุเลยก็ได้ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยสารอินทรีย์ต่าง ๆ ดังกล่าว สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging การศึกษาทดลองใช้สารโพลีเมอร์ในการทำลายเสถียรภาพมีมานานและพบว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชันกับพื้นที่ผิวของอนุภาคหรือ เป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค กล่าวคือถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีพื้นที่ผิวสูง (ขนาดของอนุภาคเล็กละเอียด) ต้องใช้สารโพลีเมอร์มาก แต่ถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีพื้นที่ผิวดำ (ขนาดอนุภาคใหญ่) ต้องใช้สารโพลีเมอร์น้อย เป็นต้น (14)

โพลีเมอร์สร้างโคแอกกูเลชันให้กับคอลลอยด์ได้ 2 วิธีคือ

วิธีที่หนึ่ง เป็นการทำให้สายประจุของคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์ที่มีประจุบวกทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดไป กรณีนี้อาจใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างโคแอกกูเลชัน

วิธีที่สอง เป็นการสร้างโคแอกกูเลชันโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคหลาย ๆ ตัว ประจุของโพลีเมอร์ในกรณีนี้ไม่สำคัญเพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือโพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคต่าง ๆ ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดโคแอกกูเลชัน โดยกลไกการเชื่อมต่อนของโพลีเมอร์

- ก. โพลีเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแต่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค
- ข. โพลีเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

การใช้สารโพลีเมอร์ เป็นสารโคแอกกูแลนต์มักไม่นิยม เนื่องจากไม่เป็นการประหยัด มักจะใช้เป็นสารที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนต์สร้างโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น การเติมสารโพลีเมอร์ก่อนหรือหลังจากการเกิดโคแอกกูเลชันขึ้นกับจุดประสงค์ของการใช้สารโพลีเมอร์นั้น ๆ

รายละเอียดเกี่ยวกับสารโพลีเมอร์อยู่ในภาคผนวก ก

วิธีทำลาย เสถียรภาพของคอลลอยด์ซิลิกาตั้งกล่าวแล้ว เป็นวิธีที่ช่วยทำให้ซิลิกามีการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลที่ยาวขึ้นและมีขนาดใหญ่ ทำให้ขบวนการ polymerization ดำเนินต่อไปจนกระทั่งเกิด silica gel ขั้นตอนการรวมตัวของคอลลอยด์ซิลิกา เป็นประโยชน์ในการเตรียมสารโพลีเมอร์ให้มีขนาดต่าง ๆ กัน ดังเช่นสาร activated silica ซึ่งเตรียมได้จากการทำให้สารละลายค้างของโซเดียมซิลิเคต เป็นกลาง และเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นลดลงเพื่อป้องกันการก่อตัวเป็น silica gel (15) สาร activated silica เป็นสารที่มีประโยชน์ และมีที่ใช้กว้างขวาง เช่น ใช้เป็นสารห้ามสนิมในระบบหม้อไอน้ำหรือระบบน้ำหล่อเย็น ใช้เป็นสารที่ช่วยให้โคแอกกูเลชันเกิดได้ดียิ่งขึ้น (Coagulant aid) (1)

2.5 การกำจัดซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำ

การกำจัดซิลิกาที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยไอออนของโลหะบางชนิด เกิดขึ้นได้ดังต่อไปนี้

2.5.1 การจับซิลิกาไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

2.5.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับไอออนของโลหะบางชนิด

2.5.1 การจับซิลิกาไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

กลไกแบบนี้เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับการทำลาย เสถียรภาพของคอลลอยด์ซิลิกาตั้งกล่าวแล้ว ผลการทดลองในอดีต (1, 16, 17, 18, 19, 20) ให้ข้อมูลว่าผลึกที่เกิดจากสารประกอบที่สร้างขึ้น ที่มีลักษณะเป็น amorphous จะให้ผลดีกว่ารูปแบบที่เป็น crystalline ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมแปรผกผันกับปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำดิบ และการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการลดประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกา สารเคมีที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ Sodium aluminate ($Na_2Al_2O_4$) Aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$) Aluminum chloride ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$) Ferric sulfate ($Fe_2(SO_4)_3$) และ Ferric chloride ($FeCl_3$) เป็นต้น สารโคแอกกูแลนต์ดังกล่าวสามารถกำจัดซิลิกาด้วยกลไก

แบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก (Sweep Coagulation) กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายโดยการสร้างผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นนุย (Amorphous gelatinous) เมื่ออนุภาคซิลิกาสัมผัสกับผลึกก็จะเกาะจับตัวอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมาก ๆ จะได้ฟลอคขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย ปริมาณสารเคมีที่ใช้ต้องมีปริมาณสูงพอจนทำให้ผลึกของ Al^{+3} และ Fe^{+3} กับ $(\text{OH}^-)^3$ มีค่าเกินกว่า K_{sp} และพีเอชของน้ำต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงจะให้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้ต้องใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่มีปริมาณ 5-10 เท่าของปริมาณซิลิกาในน้ำดิบ (11) จึงจะลดปริมาณซิลิกาให้ต่ำลงได้

2.5.2 การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับไอออนของโลหะบางชนิด

กลไกแบบนี้เกิดขึ้นจากการที่ไอออนของโลหะมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา (H_4SiO_4) ได้สารประกอบซิลิเคตขึ้นภายใต้การควบคุมสภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ พีเอชสารละลาย เป็นต้น สารเคมีที่เกิดกลไกแบบนี้ได้แก่ สารประกอบแมกนีเซียม และ สารประกอบแคลเซียม

2.5.2.1 กลไกการกำจัดซิลิกาด้วยแมกนีเซียม

สารประกอบแมกนีเซียมที่นิยมใช้ได้แก่ MgCl_2 MgSO_4 MgO เป็นต้น การเติมปูนขาวหรือโซดาไฟทำให้ได้ผลึกของ $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ซึ่งมีลักษณะเป็นนุยคล้ายกับนุยของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ แต่มีน้ำหนักมากกว่า กลไกการกำจัดซิลิกาด้วยสารประกอบแมกนีเซียมเกิดขึ้นได้ 2 ประการคือ กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกโดยการสร้างผลึก $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ดังกล่าว อีกกลไกหนึ่งที่เกิดพร้อม ๆ กันได้แก่การเกิดปฏิกิริยาระหว่าง Mg^{+2} กับ H_4SiO_4 เกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิเคตตกผลึกครอบคลุมพื้นผิว $\text{Mg}(\text{OH})_2$ กลายเป็นสารเชิงซ้อนของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์-แมกนีเซียมซิลิเคต (19)

เนื่องจากสภาวะของปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีที่พีเอชสูง ๆ (พีเอชมากกว่า 10) ซึ่งเป็นพีเอชที่ Mg^{+2} พร้อมทั้งจะตกผลึกในขณะเดียวกับที่ Mg^{+2} แข็งขันกันทำปฏิกิริยากับ H_4SiO_4 จึงเป็นการยากที่จะระบุว่าเกิดกลไกใดเป็นหลักและไม่สามารถทราบได้ว่าปริมาณเท่าใดของ Mg^{+2} ที่ตกผลึกเป็น $\text{Mg}(\text{OH})_2$ และปริมาณเท่าใดตกผลึกเป็นแมกนีเซียมซิลิเคต การตรวจสอบด้วยวิธี Electron microscopy เป็นการพิสูจน์ว่ามีปฏิกิริยาเคมีระหว่าง H_4SiO_4 กับ Mg^{+2} เกิดผลึกแมกนีเซียมซิลิเคตร่วมกับเนื้อผลึก $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ปริมาณสารเคมี

ที่ใช้ไม่เป็นไปตาม Stoichiometric แต่กล่าวได้ว่าปริมาณสารเคมีที่ใช้แปรผกผันกับความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำดิบ เช่นเดียวกับสารประกอบอลูมิเนียมและ เหล็ก

2.5.2.2 กลไกการกำจัดซิลิกาด้วยสารประกอบแคลเซียม

สารประกอบแคลเซียมที่นิยมใช้ได้แก่ CaCl_2 CaO ตกผลึกเป็น Ca(OH)_2 ซึ่งละลายน้ำได้น้อยจึงปรากฏอยู่ในน้ำในรูปที่เป็นตะกอนแขวนลอย กลไกการกำจัดซิลิกาด้วยสารประกอบแคลเซียม เกิดขึ้นในทำนองเดียวกับสารประกอบแมกนีเซียมกล่าวคือ เกิดจากการที่ซิลิกา เกาะติดครอบคลุมบนพื้นผิวของผลึก Ca(OH)_2 (3) ในขณะเดียวกัน เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง Ca^{++} กับ H_4SiO_4 ตกผลึกเป็นแคลเซียมซิลิเคตและ เกาะติดครอบคลุมบนพื้นผิวของ Ca(OH)_2 (10) แยกตัวออกจากน้ำพร้อม ๆ กัน

2.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลในการกำจัดซิลิกา

การกำจัดซิลิกาเกิดขึ้นได้ด้วยกลไกหลายชนิดดังกล่าวแล้ว การใช้สารโคแอกกูแลนต์ใด ๆ อาจจะทำให้กลไกหลายอย่างรวมกันและมีประสิทธิภาพการกำจัดไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.6.1 ชนิดและปริมาณของสารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้ได้แก่สารประกอบอลูมิเนียม สารประกอบ เหล็กและสารประกอบแมกนีเซียม เป็นต้น สารเคมีแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซิลิกาได้ไม่เท่ากัน เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารเคมีเหล่านั้น ซึ่งได้แก่

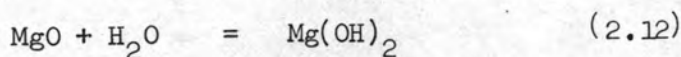
2.6.1.1 ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้น

สารเคมีที่ตกผลึกไฮดรอกไซด์จะให้ผลดีในการกำจัดซิลิกาดีกว่าผลึกคาร์บอเนต เนื่องจากลักษณะของผลึกที่เป็นรูย เหนียวเหนอะ ทำให้ซิลิกา เกาะติดบนผิวผลึกเหล่านี้ได้ดี ผลึกไฮดรอกไซด์ได้แก่ Al(OH)_3 Fe(OH)_3 Mg(OH)_2

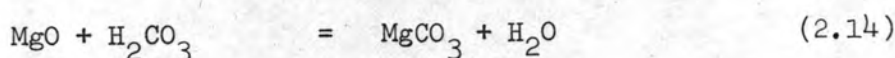
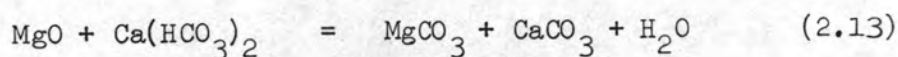
2.6.1.2 คุณสมบัติการละลาย (21)

สารประกอบต่าง ๆ มีคุณสมบัติการละลายแตกต่างกัน ทั้งนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ดังเช่นสารประกอบต่อไปนี้

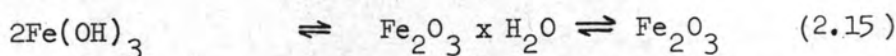
1. สารประกอบแมกนีเซียม เช่น MgO เมื่อละลายในน้ำเกิดเป็นสารประกอบแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ช้ามาก การละลายน้ำของ MgO เกิดขึ้นดังสมการ



นอกจากนี้ MgO จะไม่ละลายในสารละลายที่เป็นด่างด้วย แต่การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ MgO ละลายได้ดีขึ้น การเตรียมสารละลาย MgO ทำได้โดยการเติมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือสารไบคาร์บอเนตต่าง ๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ MgO แล้วเปลี่ยนอยู่ในรูปของ $MgCO_3$ ดังสมการ



2. สารประกอบเหล็ก ที่อุณหภูมิปกติในสารละลายต่างจะอยู่ในรูปของ $Fe(OH)_3$ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นจะเปลี่ยนรูปไปตามลำดับดังนี้



Ferric hydroxide Hydrated ferric oxide Anhydrous ferric oxide

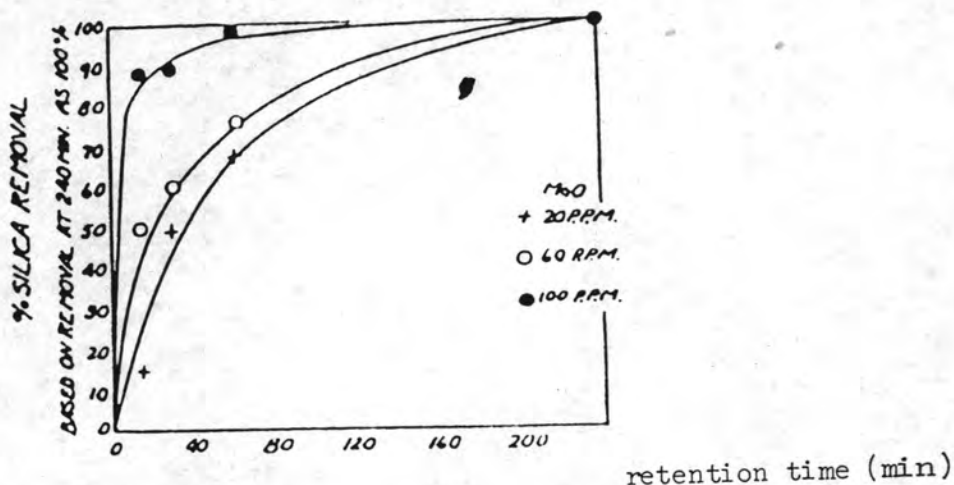
ดังนั้นสารประกอบชนิดนี้จึงให้ผลในการกำจัดซิลิกาที่อุณหภูมิค่าต่ำกว่าที่อุณหภูมิสูง

2.6.2 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิที่ใช้ในการกำจัดซิลิกาสำหรับสารเคมีแต่ละชนิดจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากกลไกการกำจัดแตกต่างกัน สารเคมีที่ทำให้เกิดกลไก Sweep Coagulation จะให้ประสิทธิภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิสูง สารละลายที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบของผลึกไฮดรอกไซด์ดังกล่าวแล้ว และความหนืดของสารละลายลดลงทำให้ซิลิกาเกาะติดบนผลึกเหล่านั้นไม่ดี แต่สำหรับกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เนื่องจากสารประกอบแมกนีเซียมละลายน้ำได้มากขึ้น

2.6.3 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (Retention time)

การใช้ปริมาณสารเคมีมากเกินไปจะลดปริมาณซิลิกาให้ต่ำลงเท่าที่ต้องการ ทำให้สภาวะการกำจัดซิลิกาเกิดขึ้น และเข้าสู่สภาวะสมดุลภายในเวลาอันสั้น และซิลิกาก็จะถูกกำจัดไปเป็นจำนวนมาก งานวิจัยที่ผ่านมา เวลาสรุปว่า เเปอร์ เซนค์การกำจัดซิลิกาสูงมากในช่วง 15 นาที การเพิ่ม retention time สูงขึ้นจนถึง ๒40 นาที ทำให้เปอร์ เซนค์การกำจัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหรือแทบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย แต่ถ้าใช้ปริมาณสารเคมีไม่เพียงพอที่จะทำให้ เเปอร์ เซนค์การกำจัดสูงเท่าที่ต้องการจะทำให้สภาวะสมดุลเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ การเพิ่ม retention time จะเป็นการช่วยทำให้ เเปอร์ เซนค์การกำจัดซิลิกาดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 อิทธิพลของ retention time

2.6.4 ความสำคัญของพีเอชที่มีต่อการกำจัดซิลิกา

พีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไก Sweep Coagulation เนื่องจากมีความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความสามารถในการตกผลึกของสารต่าง ๆ สารเคมีแต่ละชนิดจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน งานวิจัยที่ผ่านมาสรุปค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับสารเคมีแต่ละชนิด (3) ดังตารางที่ 2.2 ในตารางนี้จะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำดิบและสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาไม่เท่ากัน ในที่นี้ประสิทธิภาพจะแสดงในรูปของ $\frac{\Delta SiO_2}{\Delta Me}$ ซึ่งเป็นอัตราส่วนโมลของซิลิกาที่ถูกกำจัดต่อปริมาณสารเคมีที่ใช้ ดังนั้นการเปรียบเทียบระหว่างสารชนิดเดียวกันแต่มีสภาวะ

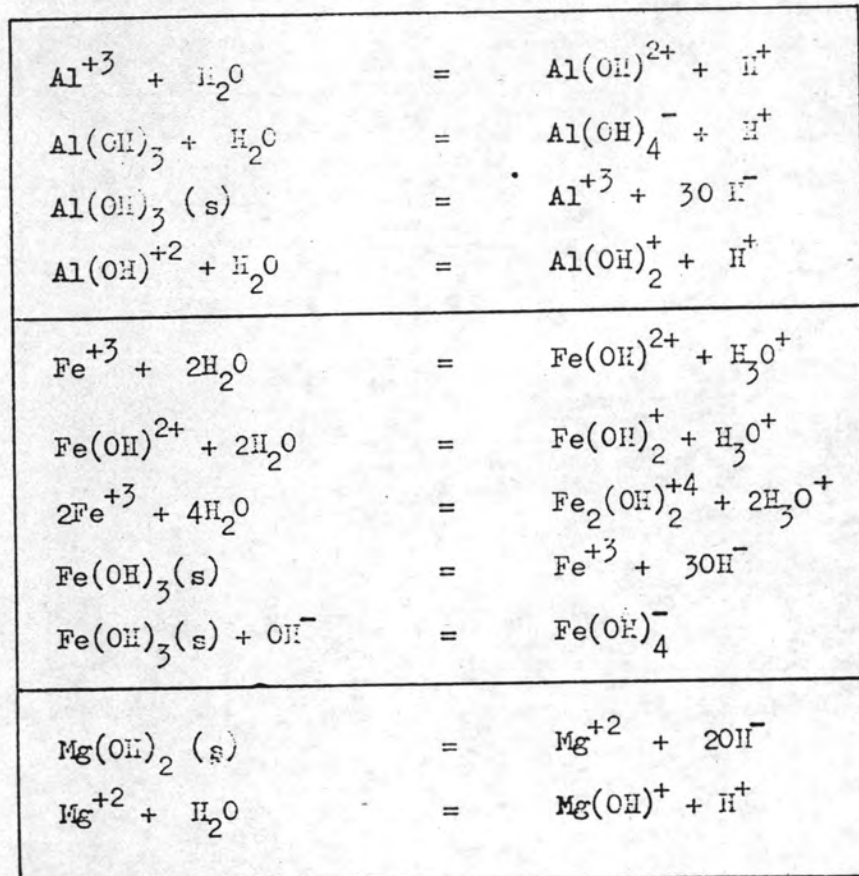
ในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันกล่าวคือ ถ้า $\frac{(\Delta\text{SiO}_2)}{(\Delta\text{Me})}$ ของสภาวะหนึ่งสูงกว่าอีกสภาวะหนึ่ง
ย่อมหมายถึงประสิทธิภาพการกำจัดดีกว่า เนื่องจากซิลิกาถูกลดปริมาณลงมาก ในขณะที่ใช้สาร
เคมีจำนวนไม่มากนัก

ตารางที่ 2.2 ที่เอชที่เหมาะสมสำหรับสาร เคมีแต่ละชนิด

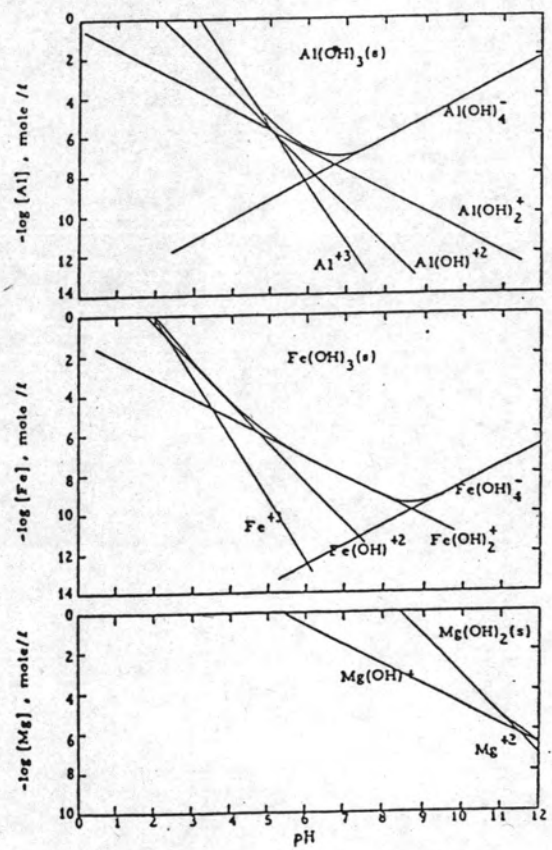
Metal Compound	Reaction pH	T °C	Initial Silica mg/l SiO ₂	$\frac{\Delta[\text{SiO}_2]}{\Delta[\text{Me}]}$	
Ferric Sulfate	a	8.5-9.5	24	3.2 8.4 22.4	12-17 16-48 27-44
Ferric Sulfate	b	9	22	3.3 9.8 16.6 21.0 39.5	10-17 30-40 55-80 37 30-35
Ferric Sulfate	a	9	25	95.2 44.0	50-60 25-37
Ferric Sulfate	a	9	25	44.0 31, 56	15-25 29-33
Sodium Aluminate	b	8.3-8.7	22	3.3 9.8 16.6 21.0 39.5 95.2	13 35 70 40-45 40 55
Aluminum Hydroxide	a	6.9-8.3	23	20.0	13-36
Sodium Aluminate	a	9.2-10.1	95	24.0 31.0	14-50 12-20
Magnesium Hydroxide	a	10.5	25	64.0	20-35
	c	10.5	25	15-30	10-20
Magnesium Sulfate	a	10	95	44.0	35
Magnesium Oxide (Remosil)	a	10.1	95	21.0	10-60
	a	10.1	95	31.0	5-31
	a	9.2-9.7	95	31, 56	13
Magnesium Sulfate	a	8.9-10.0	95	31, 56	13
Magnesium Oxide (Remosil)	b	10.1	95	12.0	20
	b	9.1	95	26.0	30
	c		95	50.0	51
	c		95	20.0	77
Magnesium Oxide	a	10.0-10.3	90	32-34	3
Magnesium Hydroxide	a	10.0-10.3	90	15.0	8-13

- Without precipitate recirculation
- With precipitate recirculation
- Treatment plant results (precipitate recirculation)

นอกจากนี้พี เอชของน้ำ เป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซ์ของสารประกอบเกลือต่าง ๆ ดังนี้



ความสัมพันธ์ระหว่างพี เอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ด้วยไดอะแกรมที่เรียกว่า Stability diagram บนภาพเดียวกัน แสดงให้เห็นถึงขอบเขตของการคงมีของสารดังกล่าวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบของสารต่าง ๆ ในน้ำที่มีพีเอชต่าง ๆ ในสภาวะสมดุลย์ (3)

ปฏิกิริยาระหว่าง H_4SiO_4 กับไอออนของโลหะบางชนิดจะเกิดขึ้นและเข้าสู่ภาวะสมดุล (Equilibrium) ได้ก็ต่อเมื่อมีการควบคุมพีเอชให้เหมาะสม และพบว่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดซิลิกา มักจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูง ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดผลึกไฮดรอกไซด์ขึ้นพร้อม ๆ กับการเกิดผลึกโลหะซิลิเกต กลไกการกำจัดซิลิกาจึงเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน 2 กลไก กล่าวคือกลไกที่จับซิลิกาไว้ในผลึกไฮดรอกไซด์ที่สร้างขึ้นและการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกา กับ ไอออนของโลหะ เกิดเป็นผลึกซิลิเกต ตกตะกอน เกาะติดบนผิวผลึกไฮดรอกไซด์แยกตัวออกจากน้ำพร้อม ๆ กัน ดังนั้นพีเอชจึงมีความสำคัญและเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการควบคุมการกำจัดซิลิกาให้มีประสิทธิภาพที่สุด

สำหรับการเพิ่มระดับพีเอชกระทำได้โดยการใช้โซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว ($Ca(OH)_2$) ซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้แตกต่างกันคือ

ก. การใช้ปูนขาวในการปรับพีเอช

เนื่องจากปูนขาวมีราคาไม่แพงจึงเป็นสารที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช แต่การใช้ปูนขาวมีข้อควรระวัง 2 ประการคือ เรื่องการตกผลึกของหินปูน ($CaCO_3$) ที่เกิดขึ้นและเรื่องปูนขาวที่ใช้ไม่หมดเนื่องจากปูนขาวละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นเมื่อเติมปูนขาวลงในน้ำที่ต้องการปรับพีเอช โอกาสที่จะมีปูนขาวแขวนลอย เป็นตะกอนอยู่ในน้ำเกิดขึ้นได้เสมอและในขณะที่เติมปูนขาวจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำกลายเป็นตะกอนแขวนลอยของหินปูน การแก้ปัญหาเรื่องการใช้ปูนขาวได้ไม่หมดทำได้โดยการหมุนเวียนเอาตะกอนจากก้นถังตกตะกอนกลับคืนมาใช้ที่ถังปรับพีเอชใหม่อีก

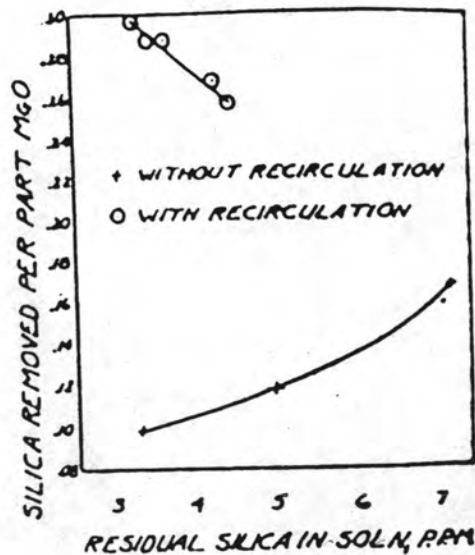
ข. การใช้โซดาไฟในการปรับพีเอช

โซดาไฟมีราคาแพงกว่าปูนขาว แต่มีข้อดีคือสามารถละลายน้ำได้ดี ดังนั้นการบ่อนโซดาไฟจะสามารถกระทำได้ง่ายกว่าการบ่อนปูนขาว (ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก) ประกอบกับปูนขาวเสื่อมได้ง่ายและหึ่งกระจาย ด้วยเหตุนี้จึงมีข้อแนะนำว่าถ้าต้องใช้สารเคมีจำนวนน้อยในการเพิ่มพีเอชก็ไม่ควรใช้ปูนขาว สารเคมีที่เหมาะสมกว่าคือ NaOH ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี



2.6.5 อิทธิพลของการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่

ดังที่กล่าวแล้วว่าการใช้ไอออนของโลหะ (Polyvalence metal ion) ในการกำจัดซิลิกาต้องใช้สารเคมีปริมาณสูงมากกว่าที่ต้องการทาง stoichiometric การหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่ เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้ลดลง การทดลองที่ผ่านมาพบว่า การหมุนเวียนตะกอนกลับสามารถลดปริมาณสารเคมีลง 30-40% ของปริมาณที่ต้องการ เมื่อไม่มีการหมุนเวียนตะกอนกลับ (20) ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงขึ้น เนื่องจากตะกอนที่ได้จากการตกผลึกมีปริมาณมากขึ้นจึงเพิ่มโอกาสสัมผัสระหว่างผลึกไฮดรอกไซด์กับซิลิกาที่อยู่ในน้ำมากขึ้น เป็นผลให้มีซิลิกาเหลืออยู่ในน้ำน้อยลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่เป็นการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างซิลิกาที่ถูกกำจัดกับปริมาณสารเคมีที่ใช้ แต่ถ้าไม่มีการหมุนเวียนตะกอนกลับจะเป็นการลดอัตราส่วนระหว่างซิลิกาที่ถูกกำจัดกับปริมาณสารเคมีที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดซิลิกาสูงขึ้น $\left(\frac{\Delta \text{SiO}_2}{\Delta \text{Me}} \right)$ เมื่อมีการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่ ดังสรุปในตาราง 2.2



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ใหม่ (20)