

บทที่ 3

ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

(Coagulation and Flocculation Process)

ในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่ มักจะมีแร่ธาตุหรือเศษอนุภาคดินต่าง ๆ ปะปนอยู่อย่างมากมาย การที่จะนำน้ำจากแหล่งน้ำมาผลิตน้ำประปา จึงมีความจำเป็นจะต้องกำจัดอนุภาคที่ทำให้น้ำเกิดความขุ่น ในการกำจัดอนุภาคความขุ่นนี้ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่การกำจัดจะทำได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particle) อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 10^{-6} มม. ถึง 10^{-3} มม. และไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด จึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า ฟล็อก (floc) โดยการใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อทำการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้สารเคมีเรียกว่ากระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และเมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพเคลื่อนที่มาสัมผัสก็จะเกิดการชนกันรวมตัวกันเป็นฟล็อก ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการฟล็อกคูเลชัน (flocculation) ฟล็อกที่เกิดขึ้นสามารถทำให้ตกตะกอนได้ง่าย และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอนหรือการกรองในภายหลัง

รายละเอียดของกระบวนการทั้งสองมีดังนี้

3.1.1. ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ อาศัยกลไก 4 แบบ คือ

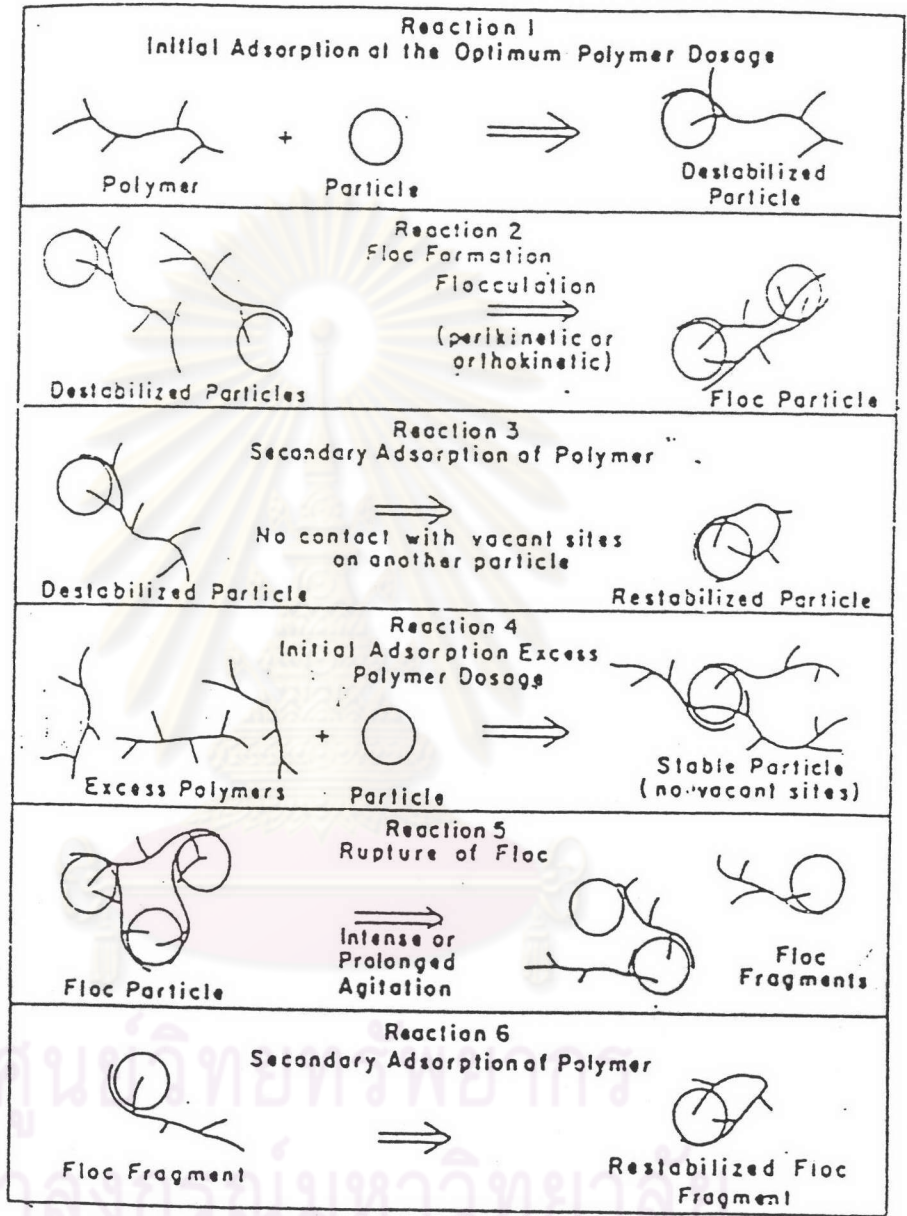
1) การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยลดค่าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential) โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ผลคือชั้นกระจายที่มีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงด้วย โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงประจุของอนุภาคเป็นตรงกันข้าม

2) การดูดติดผิวและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption and charge neutralization) โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับประจุอนุภาคคอลลอยด์ และสามารถดูดติดผิวบนอนุภาคคอลลอยด์ได้ สารเคมีดังกล่าวจะทำให้ปฏิกิริยากับประจุอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ประจุอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้ามได้

3) การใช้กลไกการกวาด (sweep coagulation) เกิดโดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากขึ้นซึ่งระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้อยู่ก็ใช้กลไกชนิดนี้

4) ใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer bridging) อธิบายโดยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging model ในขั้นตอนแรกอนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ขั้นตอนต่อมาคืออนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่และสามารถแยกตัวจากน้ำได้ง่าย ถ้าใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสีย เนื่องจากโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์ จนไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น ๆ ซึ่งเรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particles) การกวนน้ำแรงเกินไปก็จะทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืนมาเช่นกัน เนื่องจากฟล็อกที่เกิดแตกเป็นส่วน ๆ และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาคอันเดิมดังรูปที่ 3.1

3.1.2. การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) จะมีการเติมสารเคมีประเภทโคแอกกูแลนต์ เพื่อทำลายความหนาของชั้นกระจาย โดยการทำลายประจุไฟฟ้าบนอนุภาคคอลลอยด์ หรือการเพิ่มเป้าสัมผัสในกระบวนการแบบฟล็อกกวาด (sweepfloc coagulation) หรือการใช้โพลีเมอร์พร้อมกับการกวนน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สารโคแอกกูแลนต์กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะเกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันอย่างสมบูรณ์เพียงใดขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำให้เกิดสัมผัสที่มีหลายวิธี (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2526)



รูปที่ 3.1 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันแบบเชื่อมต่อกันด้วยสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2526)

1) การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้น วิธีที่นิยมปฏิบัติกันมากคือ การกวนน้ำให้เคลื่อนที่โดยในสวนต่าง ๆ ของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน ทำให้อนุภาคต่าง ๆ มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน จึงเกิดการสัมผัสและรวมตัวกันขึ้นเป็นฟล็อกในที่สุด แต่การเคลื่อนที่ต้องไม่เร็วเกินไปจนทำให้ฟล็อกแตกออก ซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า ออร์โธไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Orthokinetic Flocculation) อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูเลชันแบบออร์โธไคเนติก ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 - 1 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.

2) การสร้างสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นเองได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับโมเลกุลของน้ำ ขึ้นกับอุณหภูมิ การรวมตะกอนเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำด้วยความร้อนซึ่งแปรรูปเป็นพลังงาน ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว และชนอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำ ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่และเกิดการสัมผัสกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น มีชื่อเรียกว่า เพอริไคเนติก ฟล็อกคูเลชัน (Perikinetic Flocculation) ซึ่งไม่เหมาะกับการทำน้ำประปา เพราะเสียเวลามาก และเนื่องจากการเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุล ทำให้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1 - 1 ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก

3) ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 - 1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. กระบวนการฟล็อกคูเลชันอาจเกิดจากการสัมผัสแบบออร์โธไคเนติก โดยใช้ผ่านเครื่องกรองทรายเร็วเพื่อช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสและบังคับให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาชิดกัน โดยการใช้อุณหภูมิที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้อนุภาคใหม่ เช่น ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (sludge blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนผ่านชั้นสลัดจ์

ตัวอย่างของสารโคแอกกูแลนต์

- สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)

- ปูนขาว ($Ca(OH)_2$)

- เฟอร์ริกคลอไรด์ ($FeCl_3$)

- แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$)

- เฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$)

3.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน

3.2.1. ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradients)

ความเร็วเกรเดียนท์ (G) หมายถึง ความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยเฉพาะกลไกแบบคูดิวและทำลายประจุ ความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับสูง กล่าวคือ ไม่น้อยกว่า 300 วินาที⁻¹ เพื่อให้การกระจายของสารเคมีเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ แต่ในถังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำ มีค่าไม่เกิน 60 - 100 วินาที⁻¹ เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วสัมผัสกันและจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนสามารถคำนวณหาได้จากสมการของแคมป์และสไตน์ดังนี้

$$G = (P/\mu V)^{0.5} \quad \text{----- (3.1)}$$

เมื่อ G = ความเร็วเกรเดียนท์ หรือระดับความปั่นป่วน (วินาที⁻¹)

P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน (นิวตัน-เมตร/วินาที)

μ = ความหนืดของน้ำ (viscosity) (นิวตัน-วินาทีต่อ ตร.เมตร)

V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ลบ.ม.)

สำหรับการกวนน้ำที่ใช้ใบพาย (paddle) ในการกวนน้ำ พลังงานที่ต้องการคำนวณได้จากสูตร

$$P = 0.5 C_D A \rho v^3 \quad \text{----- (3.2)}$$

เมื่อ C_D = ค่าคงที่สำหรับใบกวนแต่ละชนิด

(มีค่าเท่ากับ 1.8 สำหรับใบพัดแบบใบพาย)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นผิวของใบพัด (ตารางเมตร)

v = ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัด

(เท่ากับ 0.75 เท่าของความเร็วของใบพัด)

P = พลังงานที่ต้องการ (วัตต์)

3.2.2. เวลาในการกักน้ำ (detention time)

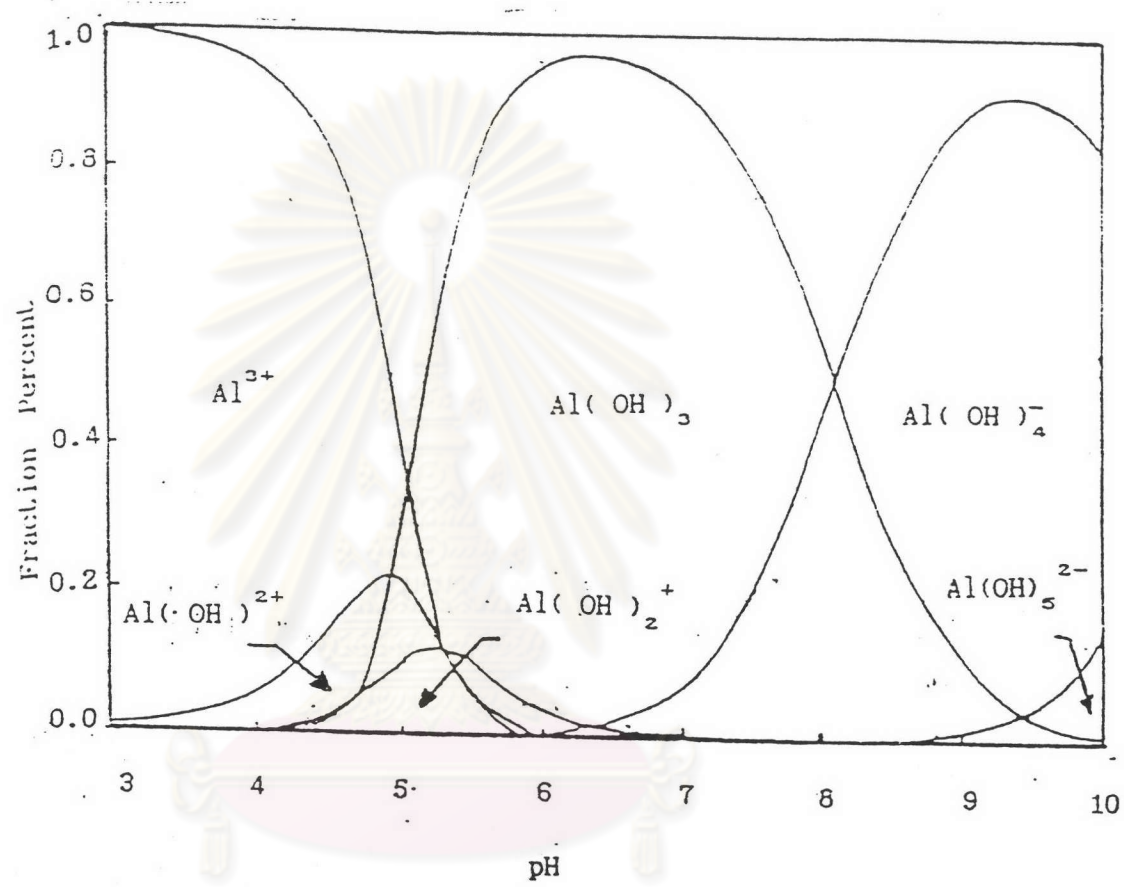
เวลาในการกักน้ำ หมายถึง เวลาที่น้ำอยู่ในถังกวนเร็ว เป็นเวลาสัมผัสระหว่างสารโคแอกกูแลนต์กับตะกอน ซึ่งเกิดขึ้นรวดเร็วมากในเวลาไม่เกิน 1 นาที เป็นระยะเวลาที่สอดคล้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารโคแอกกูแลนต์ กล่าวคือ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แบบคอลลอยด์และทำลายประจุ จะเกิดในช่วงเวลา 10^{-4} -1.0 วินาที และ 1 - 7 วินาที สำหรับกลไกแบบกวาด

ในการกวนช้า เวลาที่กักน้ำจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่ทำให้เกิดโอกาสสร้างสัมผัส กล่าวคือ ค่า $G \cdot t$ ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง $10^4 - 10^5$

3.2.3. พีเอช

พีเอช ในที่นี้หมายถึง พีเอชสุดท้ายภายหลังจากการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญเนื่องจากมีผลกระทบต่อการศึกษาประกอบเชิงซ้อนของสารส้มในลักษณะต่าง ๆ กัน เช่น $Al(OH)_2^+$, Al^{3+} และ $Al(OH)_4^-$ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เมื่อนำสารส้มมาละลายในน้ำ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน สารส้มที่มีประจุบวกและลบในสภาพน้ำที่เป็นกรดและด่างตามลำดับ ซึ่งมีอิทธิพลต่อกลไกการเกิดโคแอกกูแลนต์ สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มในช่วงพีเอชต่ำกว่า 4 อะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เมื่อปริมาณสารส้มต่ำความหนาแน่นของประจุลดลง ทำให้ไม่สามารถลดเสถียรภาพของอนุภาคได้ เนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ถูกกีดกันด้วยโมเลกุลของน้ำจึงไม่สามารถคอลลอยด์อนุภาค เมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 4-6 สารส้มจะอยู่ในลักษณะสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกของ $Al(OH)_2^+$ ซึ่งเป็นประโยชน์มากต่อการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบคอลลอยด์และทำลายประจุ และผลึกของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีบทบาทมากในกลไกแบบกวาด จะปรากฏในช่วงพีเอช 6 - 8 ในกรณีที่มีพีเอชสูงกว่า 9 นั้น อิทธิพลของสารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มจะอยู่ในรูปสารประกอบประจุลบของ $Al(OH)_4^-$ ซึ่งเป็นประจุนิดเดียวกับของคอลลอยด์ จึงไม่เป็นผลดีต่อกระบวนการโคแอกกูแลนต์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มกับพีเอช
(Sanko , 1979)

จากการวิจัยเกี่ยวกับเคมีของสารส้มในน้ำ เพื่อหาความสำคัญของพีเอช ต่อกลไกโคแอกกูเลชัน ทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญ 3 ประการคือ

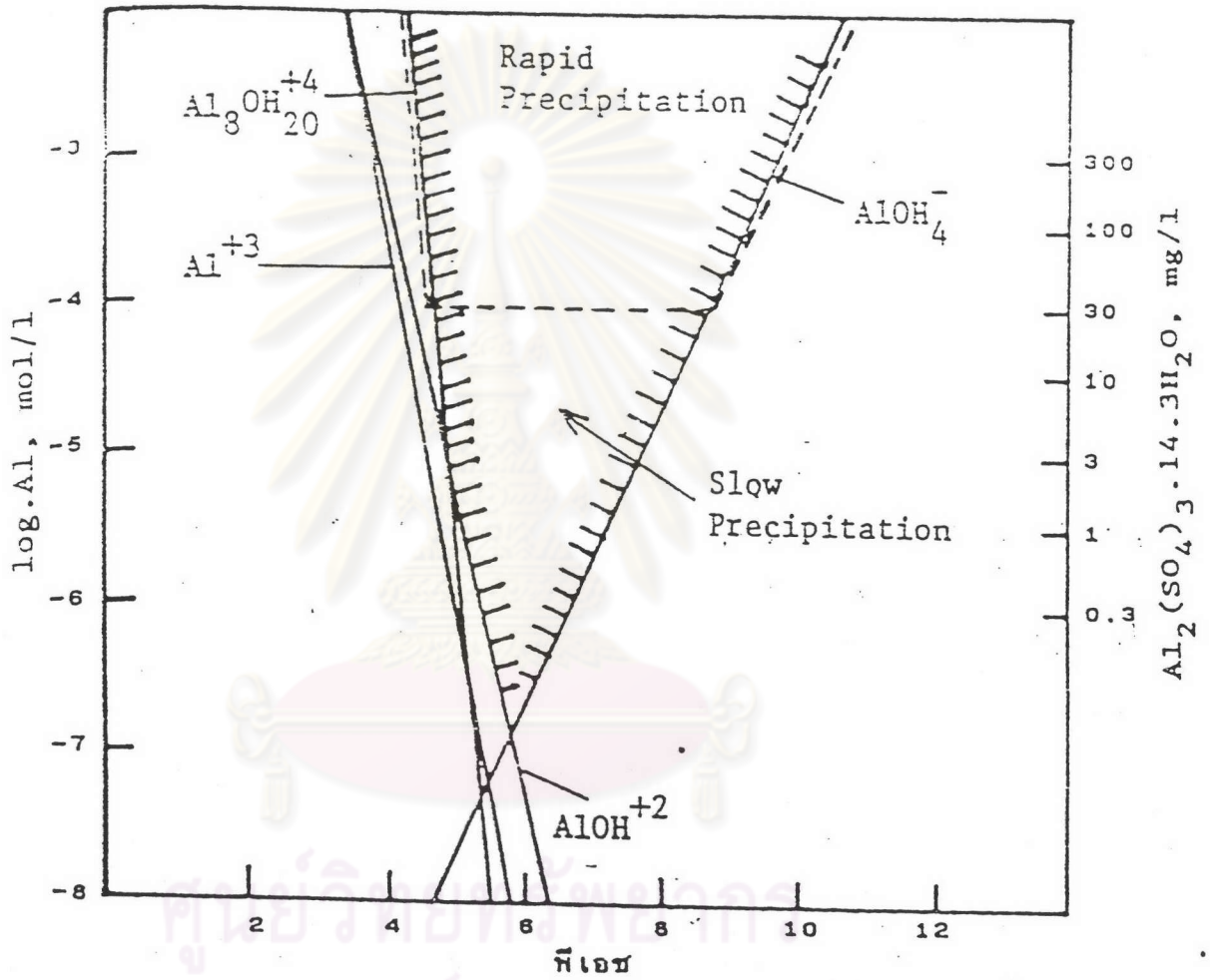
1) ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีไฮดรอกซิล (hydroxo metal complex) พร้อมที่จะดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และหักล้างประจุคอลลอยด์ได้ ถ้าไอออนมีประจุ ตรงกันข้ามและมากกว่าของคอลลอยด์ คอลลอยด์จะแสดงประจุเป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (charge reversal)

2) พีเอชของน้ำเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.3

3) ฟล็อกสารส้มที่มีพีเอชเป็นกลางจะมีประจุบวก แต่จะกลายเป็นประจุลบเมื่อมีพีเอชเป็นด่าง Amirtharaja และ Mills (1982) ได้กำหนดให้พีเอชเป็นตัวแปรที่สำคัญในการควบคุมกลไกโคแอกกูเลชัน และได้เสนอหลักการการควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มดังแสดงในรูปที่ 3.3 น้ำที่มีพีเอชต่ำจะมี Al^{3+} มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลง เมื่อมีพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง สารประกอบ $Al(OH)_3$ ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่นๆ พื้นที่ที่แรงเงาได้แสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ ตามทฤษฎี ในทางปฏิบัติจะต้องมีสารส้มไม่น้อยกว่า 30 มก./ล. จึงจะมีผลึก $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในอัตราเร็วพอสมควร (เป็นชั่วโมง) พื้นที่ในเส้นประแสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ ในทางปฏิบัติ เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงของความเป็นด่าง ไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ ดังนั้นการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มให้กับน้ำ ควรมีพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย น้ำที่มีพีเอชต่ำเกินไปก็ไม่ดี เนื่องจาก Al^{3+} ไม่ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ และน้ำไม่ควรมีพีเอชสูงเกินไป เนื่องจากได้ไอออนประจุลบ ซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันให้กับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน

3.2.4. ชนิดของอนุมูลในน้ำตะกอน

น้ำตะกอนโดยทั่วไป จะมีสารต่าง ๆ ละลายปนอยู่ ซึ่งมีผลต่อการทำการ ตกตะกอน เช่น ช่วงพีเอชที่เหมาะสม เวลาในการเกิดฟล็อก ปริมาณสารเคมีที่ใช้ใน



รูปที่ 3.3 แผนภูมิที่ใช้ในการควบคุมกลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม
(มั่นสิน ตันทุลเวศม์ , 2526)

การตกตะกอนที่เหมาะสมและปริมาณสารเคมีที่เหลืออยู่ในน้ำตะกอน ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออนในสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ (Ferric Hydroxide) โดยอนุมูลที่มีอยู่ในน้ำตะกอนเหล่านั้น

จากการศึกษาผลของอนุมูลที่มีต่อกระบวนการตกตะกอน พบว่า

- การทำการตกตะกอนด้วยอะลูมิเนียม (Aluminium) หรือเกลือของเหล็ก (Iron Salt) จะมีผลต่ออนุมูลประจุลบมากกว่าอนุมูลประจุบวก ดังนั้นอนุมูลประจุบวกต่าง ๆ เช่น Na^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะมีผลน้อยมากต่อการทำการตกตะกอน
- อนุมูลประจุลบจะมีผลต่อช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการทำการตกตะกอน ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวาเลนซ์ของอนุมูลชนิดนั้น ๆ อนุมูลที่มีประจุลบน้อย ๆ เช่น คลอไรด์ไอออน (Cl^-) และ ไนเตรตไอออน (NO_3^-) จะมีผลน้อยมาก ในขณะที่ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และ ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) จะมีผลมากกว่า

3.2.5. ปริมาณสารแขวนลอย

ความหนาแน่นของอนุภาคคอลลอยด์จะมีผลต่อการควบคุมการตกตะกอน ซึ่งพบว่า ปริมาณสารเคมีที่ใช้ไม่ได้เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นอนุภาคคอลลอยด์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อระดับความหนาแน่นของอนุภาคสูง จะใช้ปริมาณสารเคมีน้อยลง ทั้งนี้เพราะมีเป่าลมผสมมากขึ้น อนุภาคมีโอกาสชนกันมากขึ้น และพบว่าการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กัน จะรวมกันได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดเดียวกัน

3.2.6. อุณหภูมิ

การทำการตกตะกอนในช่วงที่มีอุณหภูมิต่ำ จะทำให้ลักษณะการตกตะกอนของฟล็อกไม่ดี ความหนาแน่นของตะกอนเบาสดลง การลดอุณหภูมิ ทำให้ความหนืดของน้ำเพิ่มขึ้น อัตราการตกตะกอนเบา ก็จะช้าลง ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณสารเคมี และอาจจำเป็นต้องใช้สารช่วยตกตะกอน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของตะกอนเบาช่วยให้สามารถตกตะกอนเร็วขึ้น

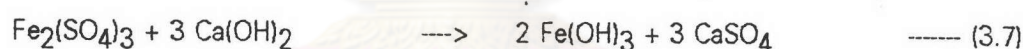
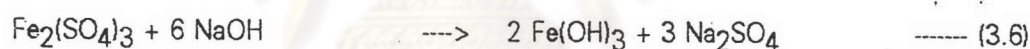
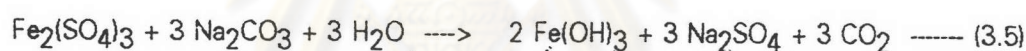
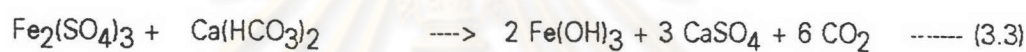
3.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในปัจจุบันสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่กลุ่มที่มีอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และกลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีสารต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1. เฟอริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

โดยทั่วไปแล้วสารโคแอกกูแลนต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ จะใช้ในช่วงพีเอช ที่กว้างเช่น 4 - 11 เฟอริกซัลเฟตมักจะใช้ในการกำจัดสีที่ค่าพีเอชต่ำและที่ค่าพีเอชสูงจะใช้ในการกำจัดเหล็ก, แอมกานีส และการกำจัดความกระด้าง

สมการปฏิกิริยาเคมีของเฟอริกซัลเฟตมีดังนี้



3.3.2. เฟอรัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

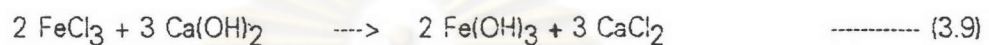
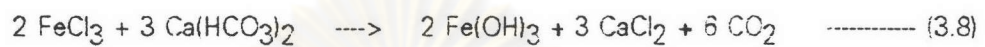
อยู่ในรูปของผลึกหรือเม็ด มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ 20 % สามารถละลายในน้ำได้เฟอรัสซัลเฟตและปูนขาวมักนิยมใช้ที่ค่าพีเอชสูง เช่น ในกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูน-โซดา และในการกำจัดเหล็ก, แอมกานีส

3.3.3. เฟอริกคลอไรด์

เฟอริกคลอไรด์ที่ใช้กันโดยทั่วไป มักอยู่ในรูปของเหลวและผลึก ซึ่งในรูปของเหลวและผลึกมีการกักกร่อนสูงและต้องขนส่งแบบเดียวกับกรดไฮโดรคลอริก ยกตัวอย่าง

เช่น ถังเหล็กเคลือบไฟเบอร์กลาสเสริมด้วยโพลีเอสเตอร์ ฟิวซี เป็นต้น ในรูปของเหลวจะมี FeCl_3 ละลายอยู่ 43 % โดยมวล และต้องเก็บในที่ปราศจากความชื้น เพราะเฟอร์ริกคลอไรด์ เป็นสารที่ดูดความชื้นได้เร็วมาก

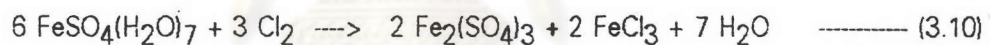
ปฏิกิริยาของเฟอร์ริกคลอไรด์กับความเป็นด่างตามธรรมชาติ และที่เพิ่มเข้าไปจะเป็นดังนี้



3.3.4. คลอรีเนต เฟอร์รัสซัลเฟต (Chlorinated Ferrous Sulphate)

เนื่องจากการออกซิเดชันของเฟอร์รัสซัลเฟตโดยออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จะเกิดขึ้นที่พีเอชสูงกว่า 8.5 ดังนั้นจึงเติมคลอรีนลงไปเ็นเฟอร์รัสซัลเฟต เพื่อให้ทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นเฟอร์ริกซัลเฟตและเฟอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนต์

ปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังนี้



โคแอกกูแลนต์ด้วยคลอรีเนต เฟอร์รัสซัลเฟตมักใช้ในการเติมคลอรีนขั้นแรก (pre-chlorination) และมีข้อดีกว่าเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการโคแอกกูแลนต์ได้ในช่วงพีเอช 4 - 11

3.3.5. อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)

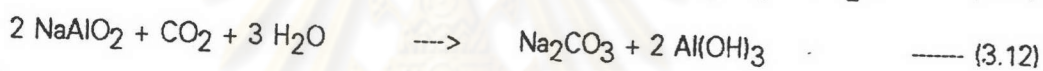
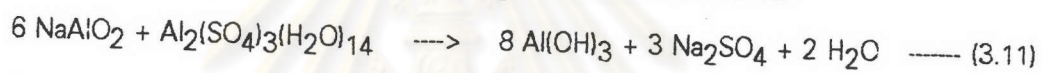
เป็นสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ผลิตมาจากการย่อยแร่บอกไซต์ (bauxite) ด้วยกรดซัลฟูริก ปริมาณแร่บอกไซต์ที่ใช้หาได้จากสมการสโตยชิโอเมตริก (stoichiometric) ร่วมกับกรดแล้วทำการระเหยน้ำออก ได้สูตรอย่างง่ายเป็น $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ และมีอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นส่วนประกอบในช่วง 14 - 18 %

3.3.6. อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

อะลูมิเนียมคลอไรด์ประกอบด้วย Al_2O_3 20 % ความหนาแน่น 1300 กก./ม.³ ค่าพีเอช 2.5 ใช้ในการปรับสภาพของสลัดจ์ (sludge conditioning)

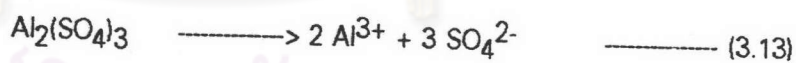
3.3.7. โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2)

โซเดียมอะลูมิเนตแตกต่างจากสารส้มตรงที่มีความเป็นด่างมากกว่าความเป็นกรดในปฏิกิริยาของมัน โดยปกติจะไม่ใช้ตามลำพัง ยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอนน้ำที่มีสีสูง และมีค่าพีเอชต่ำ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการละลายของสารประกอบอะลูมิเนียม จึงมีการเติมโซเดียมอะลูมิเนตลงไป เพื่อเพิ่มค่าพีเอชได้ประมาณ 6 ทำให้สารละลายอะลูมิเนียมสามารถตกผลึกได้ในบ่อตะกอนชั้นที่สอง ปฏิกิริยาของโซเดียมอะลูมิเนตกับสารส้ม และกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะให้สารประกอบอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายมีดังนี้

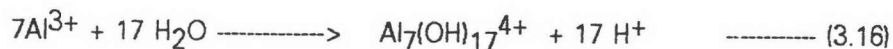
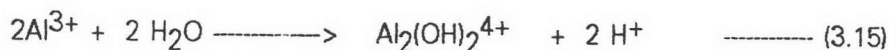
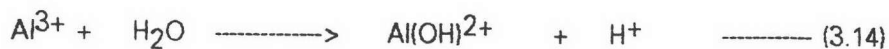


3.4 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้มมีสูตรโมเลกุล $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งโดยปกติ x มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้ไอออนบวกและลบ



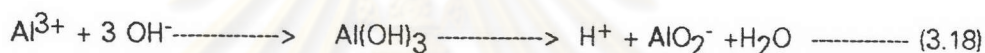
อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะถูกล้อมรอบด้วย 6 โมเลกุลของน้ำได้ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ ไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมไอออนจะเกิดขึ้นทันที โดยลิแกนด์ (Ligand) ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ เช่น ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-), ฟลูออไรด์ไอออน (F^-), ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) และสารอินทรีย์ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่าง อะลูมิเนียมไอออน กับ ไฮดรอกไซด์ไอออน ดังนี้คือ



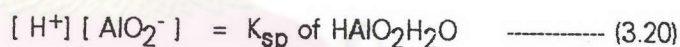
ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารสัมสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไป จนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึกของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์



อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)_3) มีคุณสมบัติในการเป็น amphoteric คือสามารถละลายได้ทั้งในสภาวะที่เป็นกรดและเป็นด่าง ดังสมการ



อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)_3) สามารถอยู่ในสมดุลกับ Al^{3+} กับ OH^- หรือ H^+ กับ AlO_2^- (meta-aluminate ion) และสภาวะอิ่มตัว



การเติมกรดแก่จะให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้เป็นน้ำ ทำให้ค่า $[\text{Al}^{3+}] [\text{OH}^-]^3$ น้อยกว่าค่า K_{sp} ของ Al(OH)_3 (meta-aluminic acid) และ Al(OH)_3 ก็จะละลาย

ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดผิวนุภาคคอลลอยด์ ได้แก่ สารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่าง อะลูมิเนียมไอออน กับ ตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $[\text{Al(OH)}_3]_{(s)}$ ซึ่ง Driscoll และ Letterman (1988) ได้เสนอแบบจำลองในการเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมดังในรูปที่ 3.4 เมื่อเติมสารสัมลงในน้ำ ชนิดของสารประกอบอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับสภาพของสารละลาย เช่น ความเข้มข้นของเกลือ

อะลูมิเนียมที่ไหลลงไป อุณหภูมิ ชนิดและความเข้มข้นของสารที่ละลายในน้ำ รวมทั้งชนิดและพื้นที่ผิวของอนุภาค

สารประกอบเชิงซ้อนอาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of Charge) ของตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบ เช่น $Al(OH)_4^-$, $Al(OH)_5^{2-}$ ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชัน จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวก เช่น $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_7^{4+}$, $Al_3(OH)_{34}^{5+}$

สารส้มที่เติมลงในน้ำทำให้เกิดกลไกของการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลักดังนี้

1) กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization)

กลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวกทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งมักมีประจุลบให้เป็นกลาง เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันมีขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานได้ดีนั้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น จะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้ามีปริมาณต่ำไป การตกตะกอนจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไป สารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดอนุภาคมาก ทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวก และเกิดเสถียรภาพขึ้นอีก แต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย

2) กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation)

กลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบกวาดของสารส้มเกิดขึ้นในกรณีความเข้มข้นของสารส้มมากเกินไปจนปฏิกิริยาดำเนินไปได้ผลึกของ $Al(OH)_3$ กลไกแบบนี้จะเกิดดีที่สุดเมื่อใช้ปริมาณสารส้มมากเกินไปจนทำให้ผลคูณของ $[Al^{+3}]$ และ $[OH^-]^3$ มีค่าเกินกว่า K_{sp} ของ $Al(OH)_3$ และพีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6 - 7.5 ซึ่งทำให้ผลึก $Al(OH)_3$

มีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาค และทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า ในลักษณะดังกล่าว $Al(OH)_3$ และอนุภาคคอลลอยด์ จะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง

กระบวนการโคแอกกูเลชันที่พบเสมอในระบบผลิตน้ำประปา มักจะเป็นกลไกดังกล่าวนี้เพราะเป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้ง่าย เพียงแต่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้มที่สูงพอ และสภาพความเป็นด่างของน้ำที่เหมาะสม แต่ตะกอนจะเกิดขึ้นมากและยากต่อการแยกออกจากน้ำ

3) กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation)

กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วมเป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด สภาวะดังกล่าวจัดเป็นกลไกแบบร่วมซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำงานเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะให้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด

3.5 กลไกโคแอกกูเลชันที่เกิดจากการใช้โคแอกกูแลนท์เอ็ด

โคแอกกูแลนท์เอ็ด (Coagulant Aid) หรือโคแอกกูเลชันเอ็ด (Coagulation Aid) หมายถึง สารที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนท์สร้างโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาในการตกตะกอนได้ด้วย สารเคมีที่ใช้เป็นตัวช่วยในการตกตะกอนมีหลายชนิด แต่ที่นิยมได้แก่ แอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ปูนขาว และสารอินทรีย์โพลีเมอร์หรือโพลีอีเล็กโทรไลต์

สารโพลีอีเล็กโทรไลต์เป็นสารที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในการปรับปรุงคุณภาพตะกอน โพลีอีเล็กโทรไลต์เป็นโมเลกุลที่เกิดจากลูกโซ่ของโมโนเมอร์ ซึ่งเป็นหน่วยเล็ก ๆ ของโครงสร้างทางเคมีหลาย ๆ ตัวมาจับเรียงกัน อาจจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นกลุ่มของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ มีโมโนเมอร์ ซึ่งสามารถนำพาประจุหรือแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดสารประกอบที่มีประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ อาจมีประจุบวก (cationic polyelectrolytes) หรือมีประจุลบ (anionic polyelectrolytes) โดยทั่วไปสารโพลีอิเล็กโทรไลต์มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 10,000,000 ปัจจุบันมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นเป็นลำดับ เพื่อการปรับสภาพน้ำดีและการบำบัดน้ำเสีย

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์มักมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติเช่น แป้ง ยางไม้ สาหร่ายทะเลสกัด และสารที่ได้จากการสังเคราะห์ แต่จากกระบวนการสังเคราะห์ทำให้สามารถควบคุมคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ทั้งปริมาณ ชนิดประจุ และน้ำหนักโมเลกุล ฯลฯ สารดังกล่าวจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในการใช้งานสารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้สำหรับการปรับแต่งสภาพน้ำดิบเพื่อการอุปโภคบริโภคจำเป็นต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยด้วย เนื่องจากมักมีสารเจือปนตกค้างอยู่เสมอ

3.5.1. ชนิดของโพลีอิเล็กโทรไลต์

การจัดหมวดหมู่สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ สามารถกระทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติ และประโยชน์ใช้งานกล่าวคืออาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดโครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุล หรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโมเลกุล ฯลฯ

- แบ่งตามประจุที่อยู่บนสายโพลีเมอร์ (Polymer Chain) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

ก. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวก

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่มีประจุบวกมีหลายรูปแบบ ได้แก่

- โพลีอามีน
- โพลีเอทีลีน ควอเทอร์นารี
- แคทไอออนนิค ไซยานามีน
- คาโบโมอิล โพลีเมอร์แคทไอออน
- โพลี แอลฟา-ไวนิลไมตาไซลีน

- โพลีไดอัลลีเมททิล แอมโมเนียมคลอไรด์
- ไดเมททิล อะมีโนอัลคิล อะครีลิก
- เมททาไซคลิกเอสเทอร์โพลีเมอร์
- เอ็น-ไดอัลคิลอิมิโนอัลคิล อะครีลาไมน์ โพลีเมอร์

ข. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ โดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูงถึงสูงมาก มักใช้เป็นสารรวมตะกอน โพลีเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลท ไอออน ได้แก่ พวกรโพลีเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิเลท และพวกที่มีหมู่ซัลโฟนิค แอซิด

ค. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุทำให้เกิดการรวมตะกอน โดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือสูงมาก ตัวอย่างสารรวมตะกอนที่สำคัญได้แก่ โพลีเอททิลีน ออกไซด์ และโพลีอะครีลาไมด์ ส่วนโพลีไวนิล ไพโรไลโดนอน มักถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

- แบ่งตามแหล่งกำเนิด แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

ก. โพลีอิเล็กโทรไลต์ ที่ได้จากธรรมชาติ

โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากธรรมชาติที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เจลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch) เป็นต้น ส่วนใหญ่เป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ ชนิด Nonionic มีลักษณะโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน

ข. โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์

เป็นการนำโมโนเมอร์หนึ่งหรือสองชนิดมารวมกัน ซึ่งสามารถจะจัดการสังเคราะห์ขึ้นให้ได้ตรงตามที่ต้องการ โดยสามารถจะทำให้มีขนาดที่แตกต่างกัน เป็นผลทำให้มีน้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) ที่แตกต่างกัน สามารถกำหนดกลุ่มประจุและจำนวนประจุที่ต้องการได้ (Charge Density) และยังสามารถจัดการเกี่ยวกับโครงสร้างของโพลีอิเล็กโทรไลต์ให้เป็นเส้นตรง หรือกิ่งก้านสาขาได้

Vostricil และ Juracka (1976) ได้กล่าวว่าในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีการใช้สารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำเนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงนี้ สามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ที่นำไปใช้โดยสรุปได้ดังนี้

- ทำหน้าที่เป็นโพลีโคแอกกูแลนต์ (Polycoagulant) คือ เป็นสารที่ใช้ในการตกตะกอนเช่นเดียวกับสารส้ม
- ทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนต์เฮด คือ เป็นสารช่วยตกตะกอนร่วมกับสารอินทรีย์ เช่น สารส้ม
- ทำหน้าที่เป็นตัวเพิ่มน้ำหนักของอนุภาคคอลลอยด์ (Weighting Agent) เป็นการเพิ่มความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคคอลลอยด์
- ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกรอง (Filtration Aid) ทำให้ยืดอายุการใช้งานของถังกรองออกไป
- ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการปรับปรุง หรือ การดewaterออกจากสารอินทรีย์ (Organic Dewatering หรือ Organic Conditioning Aid)

3.5.2. กลไกโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากการใช้โพลีอีเล็กโทรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เฮด

โพลีอีเล็กโทรไลต์สร้างโคแอกกูแลนต์ให้กับอนุภาคคอลลอยด์ได้ 2 วิธี ซึ่งส่วนสำคัญคุณสมบัติในการเกาะจับอนุภาคคอลลอยด์ คือ

- 1) เป็นการทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีอีเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดไป กรณีนี้อาจใช้โพลีอีเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก็ได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ได้เป็นปัจจัยที่สำคัญในการสร้างโคแอกกูแลนต์
- 2) เป็นการสร้างโคแอกกูแลนต์ โดยมีโพลีอีเล็กโทรไลต์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลาย ๆ ตัว (ดูรูปที่ 3.1 ในหน้า 7) ประจุของโพลีอีเล็กโทรไลต์ ในกรณีนี้ไม่ใช่เรื่องสำคัญ เพราะไม่จำเป็นต้องให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือโพลีเมอร์ที่ใช้ต้องมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ เพื่อให้โพลีอีเล็กโทรไลต์เป็น

สะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความถี่ต่าง ๆ หรือตะกอนได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรง และสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนได้

กลไกหลักที่สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชันให้กับอนุภาคคอลลอยด์สามารถอธิบายได้จากกลไกสร้างสะพาน ดังนี้

จากรูปที่ 3.1 ในปฏิกิริยาที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโมเลกุลของสารโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะติดอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ซึ่งอนุภาคเหล่านี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมดังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งการต่อเชื่อมจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีตำแหน่งว่างและมีโพลีเมอร์ และเมื่อปลายอิสระไม่มีการเกาะจับบนอนุภาคอื่น ปลายอิสระก็จะจับบนอนุภาคเดิมดังปฏิกิริยาที่ 3 ทำให้ไม่มีปลายอิสระจับอนุภาคอื่น ๆ และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ การใช้โพลีเมอร์มากเกินไป ทำให้โพลีเมอร์หลายโมเลกุลมีโอกาไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์เดียวกัน ดังปฏิกิริยาที่ 4 อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดจะเป็นแบบมีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปจะทำให้ฟล็อกแตกเป็นส่วน ๆ ดังปฏิกิริยาที่ 5 ทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 6 ทำให้เสถียรภาพกลับคืนมาใหม่อีก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 ตะกอนสารส้ม

3.6.1. แหล่งการผลิตตะกอนในโรงงานผลิตน้ำ

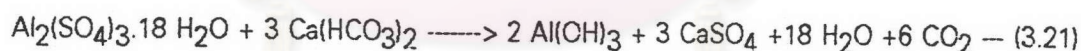
ตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตน้ำ แยกเป็นตะกอนสารส้มกับตะกอนปูนขาว (Lime Sludge) ซึ่งเกิดจากระบบการตกตะกอนด้วยสารเคมี และระบบกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาว ตามลำดับ ตะกอนส่วนใหญ่ในโรงงานผลิตน้ำเกิดขึ้นในกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

1) การตกตะกอนขั้นต้น (Presedimentation)

น้ำผิวดินที่ใช้ในการผลิตน้ำ มีปริมาณสารแขวนลอยสูง การตกตะกอนขั้นต้น อาจลดปริมาณของของแข็งทั้งหมดลง ซึ่งประกอบด้วยทรายหยาบ ตะกอนดินเหนียวและสารประกอบอินทรีย์

2) กระบวนการตกตะกอนในถังตกตะกอน

โดยปกติมักใช้เกลือของอะลูมิเนียมหรือเหล็กเป็นสารโคแอกกูแลนต์ ปฏิกิริยาของสารส้มกับน้ำเป็นปฏิกิริยาแบบเชิงซ้อน (Complex Reaction) ซึ่งเป็นการสร้างฟล็อกของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ Viessman and Hammer (1985) แสดงปฏิกิริยาไว้ดังนี้



จากปฏิกิริยาแสดงการเติมสารส้มลงในน้ำ จะทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นต่าง และเกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

3) การล้างถังกรอง (Filter Backwash)

น้ำล้างในกระบวนการล้างถังกรองมีปริมาณสูง แต่มีความเข้มข้นของตะกอนต่ำ โดยปริมาณน้ำล้างที่ใช้ประมาณ 2 - 3 % ของปริมาณน้ำผลิตทั้งหมด ตะกอนของแข็งที่เกิดขึ้นในกระบวนการล้างถังกรองมีลักษณะคล้ายกับที่พบในกระบวนการตกตะกอนในถังตกตะกอน

3.6.2. ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตน้ำ

ตะกอนที่เกิดขึ้นประกอบด้วยสารคอลลอยด์ที่ถูกกำจัดออกจากน้ำดิบและฟล็อกเคมี ซึ่งส่วนประกอบของตะกอนนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งน้ำและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำ การประมาณปริมาณตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำทำได้ยาก เนื่องจากขาดข้อมูลการดำเนินการผลิต โดยทั่วไปโครงสร้างความสัมพันธ์ถูกพัฒนาจากข้อมูลภาคปฏิบัติและจากห้องทดลองสำหรับแต่ละโรงงาน เช่น

ก. จากการศึกษาของ Viessman and Hammer (1985) แสดงการคำนวณปริมาณตะกอนดังนี้

$$S = (0.33 A + T) Q (10^{-3}) \quad \text{----- (3.22)}$$

เมื่อ S = ปริมาณตะกอนทั้งหมด (กก./ลบ.ม)

A = อัตราการใช้สารส้ม (มก./ล)

T = ค่าความขุ่น (JTU)

Q = ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)

ข. จากการศึกษาของ Borchardt et al (1981) แสดงการคำนวณปริมาณตะกอน ดังนี้

$$S = (0.44 A + SS + T + M) Q (10^{-6}) \quad \text{--- (3.23)}$$

เมื่อ S = ปริมาณตะกอนทั้งหมด (ตัน/วัน)

A = อัตราการใช้สารส้ม (มก./ล.)

SS = ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำดิบ (มก./ล)

T = ค่าความขุ่นของน้ำดิบ (NTU)

M = สารเคมีที่ใช้ เช่น โพลีเมอร์ (มก./ล.)

Q = ปริมาณน้ำ (ลบ.ม./วัน)

ค. การประมาณครหหลวง แสดงการคำนวณตะกอนดังนี้

$$S = [SS + (156 / 666.7) A] Q (10^{-6}) \text{ --- (3.24)}$$

เมื่อ S = ปริมาณตะกอน (ตัน/วัน)

SS = ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำดิบ (มก./ล)

A = อัตราการใช้สารส้ม (มก./ล)

Q = ปริมาณน้ำ (ลบ.ม/วัน)

3.6.3. ลักษณะสมบัติของตะกอนสารส้ม

ตะกอนสารส้มที่เกิดจากถังตกตะกอน โดยทั่วไปจะมีปริมาณสารแขวนลอยเข้มข้นประมาณ 1 % ซึ่งประกอบด้วยของแข็งระเหย 20 - 40 % ที่เหลือเป็นสารอนินทรีย์ของดินเหนียวหรือตะกอนดิน โดยทั่วไปตะกอนสารส้มจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.5 - 7.5 และมีค่าบีโอดี (BOD₅) 100 มก./ล. และพบว่าตะกอนสารส้มไม่ก่อปัญหาเรื่องกลิ่น

3.6.4 การปรับปรุงลักษณะของตะกอน

การปรับปรุงลักษณะของตะกอน เป็นกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำออกจากตะกอน สำหรับวิธีการและวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงลักษณะตะกอน แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

กลไกทางฟิสิกส์ เคมีและชีวะ ที่มีอิทธิพลต่อสารปรับปรุงลักษณะ คือ เพื่อเพิ่มโอกาสการรวมตัวเป็นก้อน (agglomeration) ของอนุภาค ซึ่งเป็นกลไกที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นวิธีปรับปรุงลักษณะตะกอนที่เหมาะสม จึงควรจัดหาสำหรับตะกอนแต่ละชนิดโดยวิธีการทางห้องทดลอง สารปรับปรุงลักษณะมีหลายชนิด จึงควรต้องประเมินตามพื้นฐานธรรมชาติของตะกอนที่ถูกบำบัด และกระบวนการแยกน้ำออกจากตะกอนที่นำมาใช้

ตารางที่ 3.1 วิธีการและวัตถุประสงค์ของการปรับปรุงลักษณะตะกอน

(Eckenfelder และ Santhanam, 1981)

วิธีการปรับปรุง ลักษณะ	หน่วยการผลิต	หน้าที่
การเติมสาร โพสเซียม	การเพิ่มความเข้มข้น ของตะกอน	ปรับปรุงอัตราการรับตะกอน, ระดับความเข้มข้น และการจับตัวของสาร
การเติมสาร โพสเซียม	การนำตะกอนมา แยกน้ำ	ปรับปรุงอัตราการผลิต, ปริมาณของแข็งในแผ่น ตะกอน และการจับตัวของสาร
การเติมสารอนินทรีย์ เคมี	การนำตะกอนมา แยกน้ำ	ปรับปรุงอัตราการผลิต, ปริมาณของแข็งในแผ่น ตะกอน และการจับตัวของสาร
การล้างคัด	การนำตะกอนมา แยกน้ำ	ลดความต้องการสารปรับปรุงลักษณะตะกอน ด้วยสารเคมี
การบำบัดด้วย ความร้อน	การนำตะกอนมา แยกน้ำ	การจำกัดหรือลดปริมาณสารเคมีที่ใช้ โดยปรับปรุง อัตราการผลิต, ปริมาณของแข็งในแผ่นตะกอน และความคงตัวของตะกอน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงอื่น ๆ
การเติมซีเมนต์	การนำตะกอนมา แยกน้ำ	ช่วยทำให้แผ่นตะกอนที่ถูกปรับปรุงออกมาจาก ระบบเครื่องอัดกรองสูญญากาศชนิดสายพาน ทำงานได้สะดวกขึ้น ได้ผลสูงกว่าและอาจช่วย ลดปริมาณสารเคมี

3.7 การบำบัดตะกอนสารส้ม

3.7.1. ปริมาณตะกอนและส่วนประกอบของตะกอน

จากค่าเฉลี่ยของตะกอนที่เกิดขึ้นในโรงกรองน้ำประปา ซึ่งเสนอโดย Masschelein (1992) พบว่า ความเข้มข้นของตะกอนในรูปแบบต่าง ๆ (หน่วยเป็น ก./ม.³ ของน้ำประปาที่ผลิตได้) มีค่าดังนี้

- ตะกอนจากน้ำดิบ : 10 - 50 ก./ม.³
- อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ : 10 - 20 ก./ม.³
- สารประกอบอนินทรีย์ (เช่น แอลคิเว็ดเต็ดซิลิกา สารประกอบของเหล็ก และแมงกานีส) : 5 ก./ม.³
- แอลคิเว็ดเต็ดคาร์บอน (ถ้ำใช้) : น้อยกว่า 20 ก./ม.³
- สารอินทรีย์และสารอื่น ๆ : น้อยกว่า 20 % ของทั้งหมด

ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบของตะกอนจากโรงกรองน้ำดังกล่าว ได้นำมาใช้เป็นค่าทั่วไปในการออกแบบในกรณีที่มีการเติมและไม่เติมแอลคิเว็ดเต็ดคาร์บอน (PAC) ดังนี้

แหล่งตะกอน	ไม่เติมPAC	เติมPAC
ตะกอนที่ถูกแยกออกจากน้ำดิบ	57 %	51 %
ตะกอนจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน	33 %	30 %
คาร์บอน	-	12 %
ตะกอนอื่น ๆ	10 %	7 %

จากการศึกษาเพิ่มเติม พบว่า

- ในตะกอนจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน มีโลหะหนักเจือปนอยู่ (โดยเฉพาะเหล็กและแมงกานีส) ในปริมาณไม่เกิน 10 % ของตะกอนจากกระบวนการ

โคแอกกูเลชันทั้งหมด และมีของแข็งระเหยอยู่ระหว่าง 20 - 35 % ของปริมาณของแข็งแห้งทั้งหมด

- เมื่อปีการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ พบว่าปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์อนินทรีย์จะลดลง โดยมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยได้
- องค์ประกอบของตะกอนสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามปัจจัยหลายอย่าง เช่น ฤดูกาล ปริมาณน้ำในแหล่งน้ำที่นำมาใช้ทำน้ำประปา ชนิดของสารเคมีที่ใช้ ฯลฯ

3.7.2. เทคนิคในการกำจัดกากตะกอน

1) การทิ้งลงในแหล่งน้ำโดยตรง (Direct discharge)

วิธีนี้ไม่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสาเหตุที่ทำให้มลภาวะในน้ำเพิ่มขึ้น

2) การหมุนเวียนตะกอนกลับโดยตรง (Direct cycling)

การหมุนเวียนตะกอนกลับไปที่กระบวนการแรกสุดของโรงกรองน้ำ มักใช้ในการควบคุมและปรับสภาพของกระบวนการฟล็อกคูเลชันและการตกตะกอนให้เหมาะสม มีข้อดีคือสามารถยืดหยุ่นได้ตามความต้องการ

น้ำที่ถูกใช้ในการล้างย้อนแล้วจะถูกเวียนกลับไปจุดเริ่มต้นของระบบ การเวียนกลับดังกล่าว ทำให้ปริมาณของสารแขวนลอยเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณสารเคมีที่ใช้

3) บ่อตากตะกอน (Sludge lagoon)

บ่อตากตะกอนเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากวิธีหนึ่งในการกำจัดกากตะกอนของโรงกรองน้ำ วิธีนี้เหมาะสำหรับบริเวณที่ราคาที่ดินไม่แพงนัก และถ้าสามารถทิ้งบ่อให้ตากตะกอนได้เป็นเวลานาน ๆ พบว่าวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำที่สุด

ตะกอนจากกระบวนการต่าง ๆ จะถูกนำมาเติมลงในบ่อตากตะกอนอย่างต่อเนื่องจนเต็มบ่อ ตะกอนจะอัดตัวลงที่ละน้อยอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งมีปริมาณของแข็งแห้ง

ที่ความเข้มข้น 10 - 15 % โดยตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยเกลือของเหล็ก จะรีดน้ำออกได้เร็วกว่าตะกอนสารส้ม การแยกน้ำออกจากตะกอนด้วยวิธีนี้ ใช้กลไกธรรมชาติ ได้แก่ การระเหย และการดูดซึมน้ำของพืชที่อยู่รอบ ๆ ปากบ่อ น้ำใสที่ออกจากบ่อสามารถระบายทิ้งลงในแหล่งน้ำได้โดยตรง

บ่อดักตะกอนสามารถควบคุมได้ง่าย ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากนัก แต่ต้องใช้พื้นที่มาก ดังนั้นจะต้องพิจารณาการใช้ที่ดินให้เหมาะสมก่อนการสร้างบ่อดักตะกอน

4) เทคนิคการอัดตะกอน

- การแยกน้ำออกจากตะกอนโดยใช้ความร้อน

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถทำการเผาไหม้ได้โดยตรง จึงต้องมีการเติมเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้ วิธีนี้จะต้องกระทำที่อุณหภูมิ 150 - 200 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 - 45 นาที พลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 2.3 - 2.8 ล้านจูล / กิโลกรัมของน้ำที่แยกออกมา

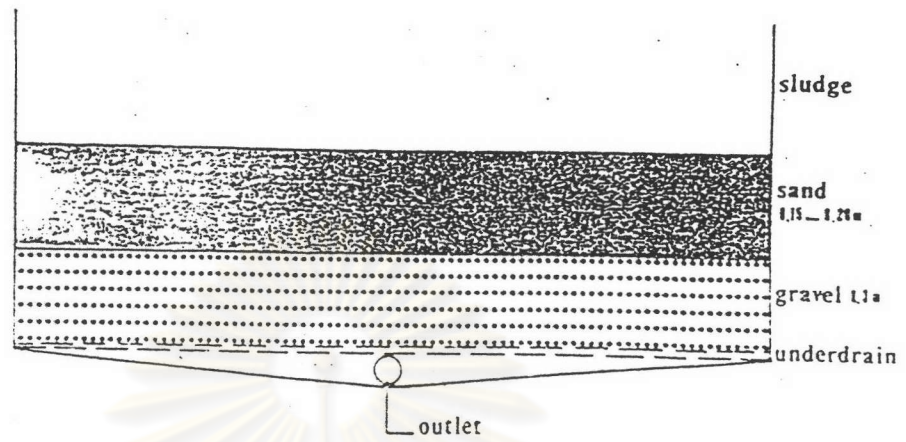
วิธีนี้ต้องการการอัดตัวของตะกอนให้มีความหนาแน่นสูง ๆ และใช้ได้ดีกับตะกอนที่เกิดจากการใช้ปูนขาว

- การแช่แข็งและการละลาย

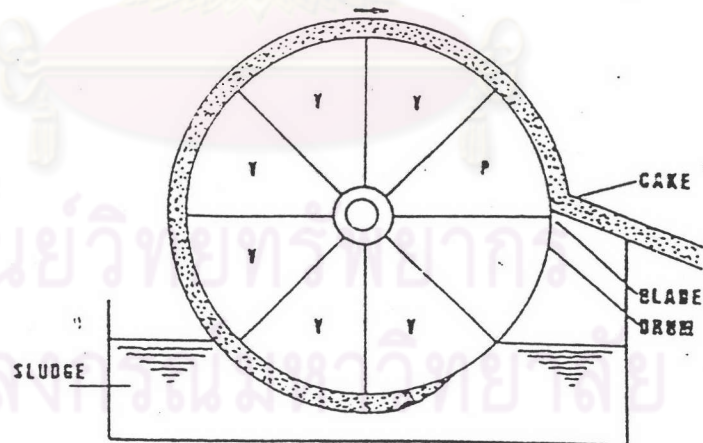
วิธีนี้ใช้กับประเทศที่มีอากาศหนาวเย็นจัด ในบริเวณที่ต้องการปรับปรุงสภาพของบ่อดักตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็ก ข้อเสียของวิธีนี้คือ ไม่ประหยัดค่าใช้จ่ายด้านต่าง ๆ

- ลานตากตะกอน (Sand drying bed)

ลานตากตะกอนกำจัดน้ำออกจากตะกอนโดยการระบายน้ำให้ซึมผ่านชั้นกรองและการระเหย ลานตากตะกอนประกอบด้วยชั้นทรายสูง 15 - 20 ซม. ซึ่งอยู่บนชั้นหินสูง 30 ซม. ได้ชั้นหินมีที่รองรับน้ำออกสู่ภายนอก ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลานตากตะกอน (Masschelein, 1992)



รูปที่ 3.6 เครื่องกรองสูญญากาศ (Masschelein, 1992)

ทรายที่นิยมใช้กัน มีลักษณะดังนี้

เส้นผ่านศูนย์กลาง : 0.3 - 1.2 มม.

เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย : 0.5 มม.

สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ : น้อยกว่า 5

กรวดที่ใช้มีขนาด : ตั้งแต่ 3 - 6 มม.

ค่าการบรรทุกของของแข็งที่ผิวหน้า : 4 กก./ม.²

ความลึกของชั้นตะกอน : น้อยกว่า 1.2 ม.

(ควรอยู่ระหว่าง 0.5 - 0.75 ม.)

ลานตากตะกอนมีปัจจัยควบคุมทางสภาพภูมิอากาศเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงาน โดยทั่วไปประสิทธิภาพจะต่ำลงในฤดูหนาว และการใช้โพลีเอทิลีนไทรโลทประจุบวกที่มีมวลโมเลกุลสูง ๆ ช่วยให้การแยกน้ำออกจากตะกอนได้ง่ายขึ้น

- การกรองสูญญากาศ

ตะกอนจะต้องถูกอัดตัวให้แน่นขึ้นก่อนเข้าสู่เครื่องกรองสูญญากาศ ซึ่งมีลักษณะคล้ายถังกลมที่ล้อมรอบด้วยผ้ากรอง ถึงสูญญากาศมีขนาดพื้นที่ผิวกรองตั้งแต่ 1 - 70 ม.² โดยบางส่วนจมอยู่ในตะกอนดังรูปที่ 3.6 เมื่อส่วนของถังกลมหมุน ตะกอนจะถูกดึงขึ้นมา และกระบวนการแยกน้ำออกจากตะกอนจะเริ่มขึ้น ความแตกต่างของความดันภายในและภายนอกถึงอยู่ในช่วง 0.3 - 0.5 บาร์ น้ำจะซึมผ่านเข้าภายในถึง ส่วนตะกอนจะเคลื่อนที่จนออกนอกถังไป โดยมีความหนาแน่นระหว่าง 3-6 มม. และมีความเข้มข้นสูงสุด 25 %

ตะกอนสารส้มค่อนข้างจะแยกน้ำออกได้ยากด้วยวิธีนี้ ปริมาณการบรรทุกของแข็งควรใช้ไม่เกิน 2 กก.ของตะกอนแห้ง/ม.² - ชม. ค่าที่นิยมใช้คือ 0.5 - 1 กก./ม.²-ชม. โดยสิ่งที่ต้องระมัดระวังมากที่สุดคือการอุดตันของผ้ากรอง ตะกอนสารส้มที่มีการใช้โพลีเมอร์มีค่าการของแข็งบรรทุก 5 และ 30 กก./ม.²-ชม. และได้ตะกอนแห้ง 15 และ 9 % ตามลำดับ

- การใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

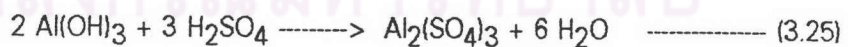
ตะกอนต้องได้รับการอัดตัวมาก่อนเช่นเดียวกับถังกรองสูญญากาศ ตะกอนที่ได้จากกระบวนการนี้ มีความเข้มข้นประมาณ 25 - 30 % เครื่องจักรที่ใช้มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก เรียวลงตอนปลาย ตะกอนจะถูกเหวี่ยงไปที่ผนังของถัง และไหลไปตามเกลียว ซึ่งหมุนไปในทางเดียวกับถังด้วยความเร็วที่สูงกว่าหรือต่ำกว่ากันเล็กน้อย ดังรูปที่ 3.7 โดยปกติความเร็วที่ใช้มีค่าประมาณ 15 - 66 รอบ / วินาที มีแรงเหวี่ยง 1000 - 4000 เท่าของแรงดึงดูด โดยปกติจะอยู่ในช่วง 2500 ถึง 3200 ม./วินาที² และตะกอนจะอยู่ในถังนาน 1 นาที การใช้โฟลิมเมอร์แบบไม่มีประจุในอัตรา 1.5 - 2.5 กก.ต่อตันของตะกอนแห้ง ทำให้ได้ตะกอนแห้งเข้มข้น (จากวิธีนี้) 15 - 20 %

- การใช้เครื่องอัดกรอง (Filter press)

วิธีนี้ใช้แรงกด 5000 - 20000 เท่าของแรงดึงดูดในการกรอง ความดันที่สูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพดีขึ้นและความเข้มข้นของตะกอนแห้งดีขึ้น เครื่องกรองแบบนี้มีลักษณะเป็นถาด ฝากรองจะถูกตั้งบนผิวหน้าของถาดแต่ละแผ่น ตะกอนจะถูกป้อนเข้าไปในระหว่างถาด เมื่อเพิ่มความดันมากขึ้น ถาดแต่ละใบจะเคลื่อนที่เข้าหากัน น้ำจากตะกอนจะไหลออกมา เมื่อความดันลดลง ถาดจะเปิดออกเพื่อให้เอาตะกอนแห้งออก เตรียมรับตะกอนชุดใหม่ต่อไป ตะกอนที่ได้ปกติมีความเข้มข้นประมาณ 30 - 40 % ซึ่งมักกำจัดโดยการฝังกลบต่อไป

5) การหมุนเวียนกลับของอะลูมิเนียมจากตะกอนสารส้ม

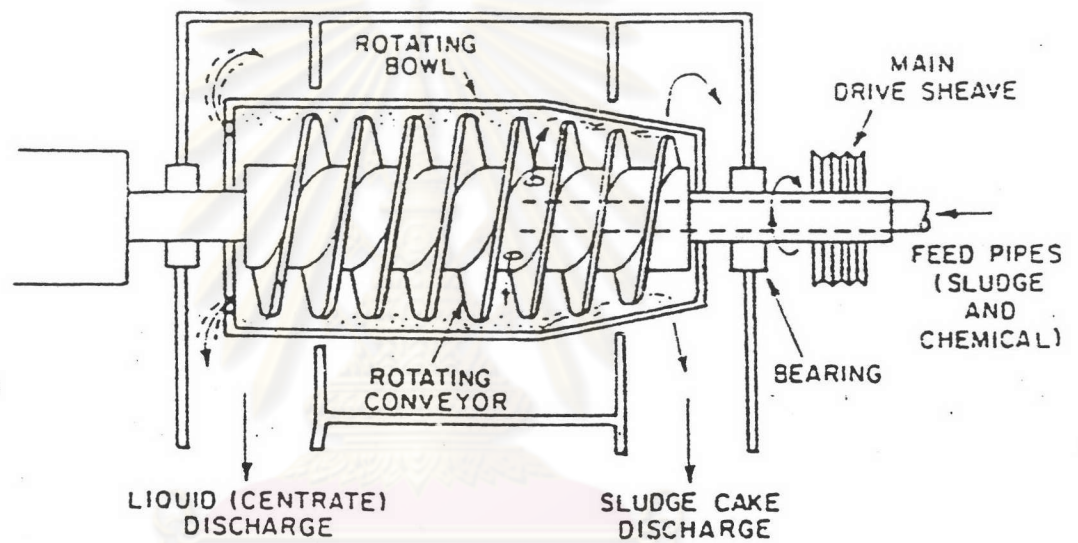
5.1) กระบวนการนำกลับโดยใช้กรด



จากสมการข้างต้น พบว่า

- พีเอชอยู่ในช่วง 3.0 - 3.4

- ใช้ 3.2 กรัมของไฮโดรเจนต่อโมลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีการนำกลับ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.7 เครื่องแยกน้ำจากตะกอนโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง
(Eckenfelder และ Santhanam, 1981)

5.2) กระบวนการนำกลับโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

- พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 11.4 - 11.8
- อัตราส่วนโมลโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมิเนียมที่นำกลับ = 1.75
- ของเหลวที่ถูกนำกลับจะมีโซเดียมประมาณ 40 มิลลิโมลต่อลิตร
- ประสิทธิภาพในการนำกลับอะลูมิเนียมมีค่าสูงถึง 98 % ถ้าใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นสูงมาก

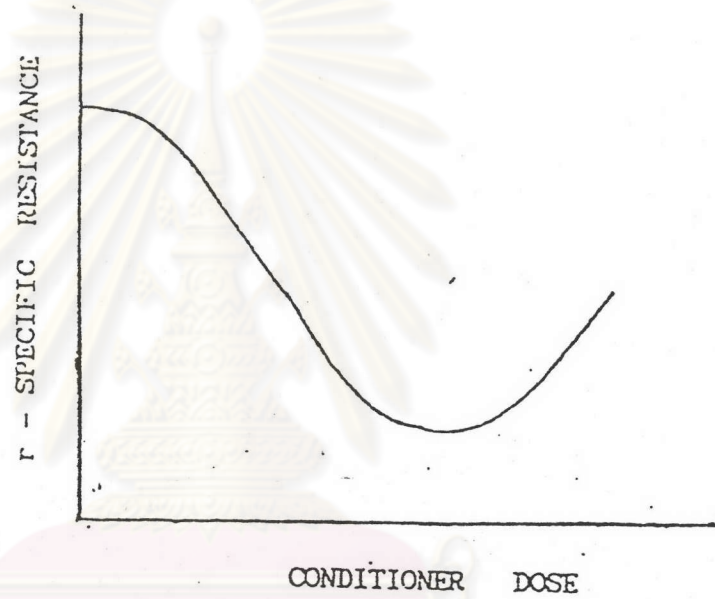
5.3) กระบวนการนำกลับโดยใช้ปูนขาว

- พีเอชที่เหมาะสมคือ 11.2-11.6 โดยมีประสิทธิภาพการนำกลับ 25%
- อัตราส่วนโมลของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมิเนียม = 7 - 8
- ของเหลวที่ถูกนำกลับมีแคลเซียม 75 มิลลิโมลต่อลิตร

3.7.3 อัตราการใช้สารเคมีที่เหมาะสม (Optimum Chemical Dosage) และค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง

Eckenfelder และ Santhanam (1981) ได้กล่าวถึงอัตราการใช้สารเคมีที่เหมาะสม อาศัยความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของตัวแปร ซึ่งมีอิทธิพลต่อการกระทำระหว่างอนุภาคของตะกอน จึงต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์มาช่วย วิธีการปรับปรุงลักษณะที่เหมาะสมสามารถหาได้วิธีเดียวคือ การทดสอบหาค่าอัตราการใช้สารเคมีที่เหมาะสมสำหรับโรงกรองน้ำแต่ละแห่ง โดยการประเมินจากการทดลองในห้องทดลองและโรงงานขนาดจำลอง เป็นการดำเนินการขั้นต้น

Rebhun et al (1989) ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง แสดงถึงความสามารถการกรอง และบ่อยครั้งที่ถูกใช้ในการตัดสินใจประสิทธิภาพของสารปรับปรุงลักษณะ (conditioner) นอกจากนี้ยังใช้ในการเลือกอัตราการใช้สารปรับปรุงลักษณะสมบัติตะกอนที่ทำให้ความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำลง ทำให้ความสามารถต่อการกรองดีขึ้น และยังใช้ในการเลือกหาอัตราการใช้สารปรับปรุงลักษณะที่เหมาะสมสอดคล้องกับค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะในการตอบสนองต่อการปรับปรุ่่งลักษณะตะกอน

(Rebhun et al , 1989)

ศูนย์วิทยพัธ์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง (Specific Resistance) คือดัชนีความสามารถการกรองของตะกอน มีหน่วยเป็นเมตร/กิโลกรัม ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการประเมินประสิทธิภาพของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงลักษณะของตะกอน โดยถือหลักที่ว่าสารเคมีที่ใช้ตัวใดทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำ จะทำให้ตะกอนนั้นมีความสามารถในการกรองสูง ยิลด์ของตะกอนจะมีค่ามาก นั่นคือ สารเคมีนั้นมีประสิทธิภาพในการดึงน้ำออกจากตะกอนได้ดี ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนประเภทต่าง ๆ

การหาค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง ซึ่งเสนอโดย Coakley และ Jones ซึ่งมีสมการดังนี้

$$r = \frac{2bPA^2}{\mu C} \quad \text{----- (3.26)}$$

เมื่อ r = ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง (ม./กก.)

b = ความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง (t/V) กับ V (วินาที/ม.⁶)

V = ปริมาตรของน้ำที่กรองออกจากตะกอน (ลบ.ม.)

t = เวลาในการกรอง (วินาที)

P = แรงดัน (นิวตัน/ตร.ม.)

A = พื้นที่ของการกรอง (ตร.ม.)

μ = ความหนืดของน้ำที่กรองออกจากตะกอน (นิวตัน-วินาที/ตร.ม.)

C = น้ำหนักของตะกอนต่อปริมาตรของน้ำที่กรองออกจากตะกอน (กก./ลบ.ม.)

ค่า C สามารถประมาณได้จากปริมาณความชื้นในตะกอน (Moisture Content)

$$C = \frac{1000}{[C_i/(100-C_i)] - [C_c/(100-C_c)]} \quad \text{----- (3.27)}$$

เมื่อ C_i = ความชื้นของตะกอน (% โดยน้ำหนัก)

C_c = ความชื้นของกากตะกอน (Cake, % โดยน้ำหนัก)

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองที่ระดับความดันที่ใช้ของตะกอนแต่ละประเภท

(Eckenfelder และ Santhanam, 1981)

ประเภทของตะกอน	ความดัน		ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง	
	กก./ชม. ²	ปอนด์/นิ้ว ²	จินาที/กรัม	เมตร/กิโลกรัม
Activated sludge	0.52	7.4	2.88E+10	2.83E+14
Thixotropic mud	11.46	163	1.50E+10	1.47E+14
ตะกอนจากแหล่งชุมชนที่ถูกย่อยสลายแล้ว	0.52	7.4	1.42E+10	1.39E+14
ตะกอนดิบจากแหล่งชุมชน	0.52	7.4	4.70E+09	4.61E+13
ตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยสารส้ม	1.02	14.5	5.30E+09	5.20E+13
Gelatinous Al(OH) ₃	3.59	51	2.20E+09	2.16E+13
Gelatinous Fe(OH) ₃	3.59	51	1.50E+09	1.47E+13
Reservoir Benthos	1.34	19	7.70E+08	7.55E+12
ตะกอนที่เกิดจากการตกตะกอนน้ำ	0.70	10	5.10E+08	5.00E+12
คอลลอยด์ของดินเหนียว	3.59	51	5.00E+08	4.91E+12
การระบายแร่ที่ถูกทำให้เป็นกลางด้วยปูนขาว	1.02	14.5	3.00E+08	2.94E+12
Gelatinous Mg(OH) ₂	3.59	51	3.00E+08	2.94E+12
Activated sludge ที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว	0.52	7.4	1.65E+08	1.62E+12
Vegetable tanning	1.02	14.5	1.50E+08	1.47E+12
Conditioned, digested primary and activated sludge	0.52	7.4	1.46E+08	1.43E+12
Conditioned digested sludge	0.52	7.4	1.05E+08	1.03E+12
เฟอริคออกไซด์	3.59	51	8.00E+08	7.85E+12
ตะกอนดิบจากแหล่งชุมชนที่ถูกปรับสภาพแล้ว	0.52	7.4	3.10E+08	3.04E+12
แคลเซียมคาร์บอเนต	3.59	51	2.00E+08	1.96E+12

การหาความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอน มีวิธีหนึ่งที่นิยมใช้คือ การใช้อุปกรณ์ชุดกรวยบุคเนอร์ (Buchner Funnel Test) ดังแสดงในรูปที่ 3.9

การหาค่าyield ของตะกอน (Net Sludge Solids Yields) โดยใช้สมการดังนี้

$$Y_n = 3600 \times \left[\frac{FPC}{\mu t} \right]^{1/2} \text{ ----- (3.28)}$$

เมื่อ Y_n = yield ของตะกอน (กก./ตร.ม.-ชม.)

$$F = \frac{\text{original sludge solids}}{\text{(original sludge solids + conditioner solids)}}$$

P = ความดัน (นิวตัน/ม.²)

C = น้ำหนักของตะกอนต่อปริมาตรของน้ำที่กรองออกจากตะกอน (กก./ลบ.ม.)

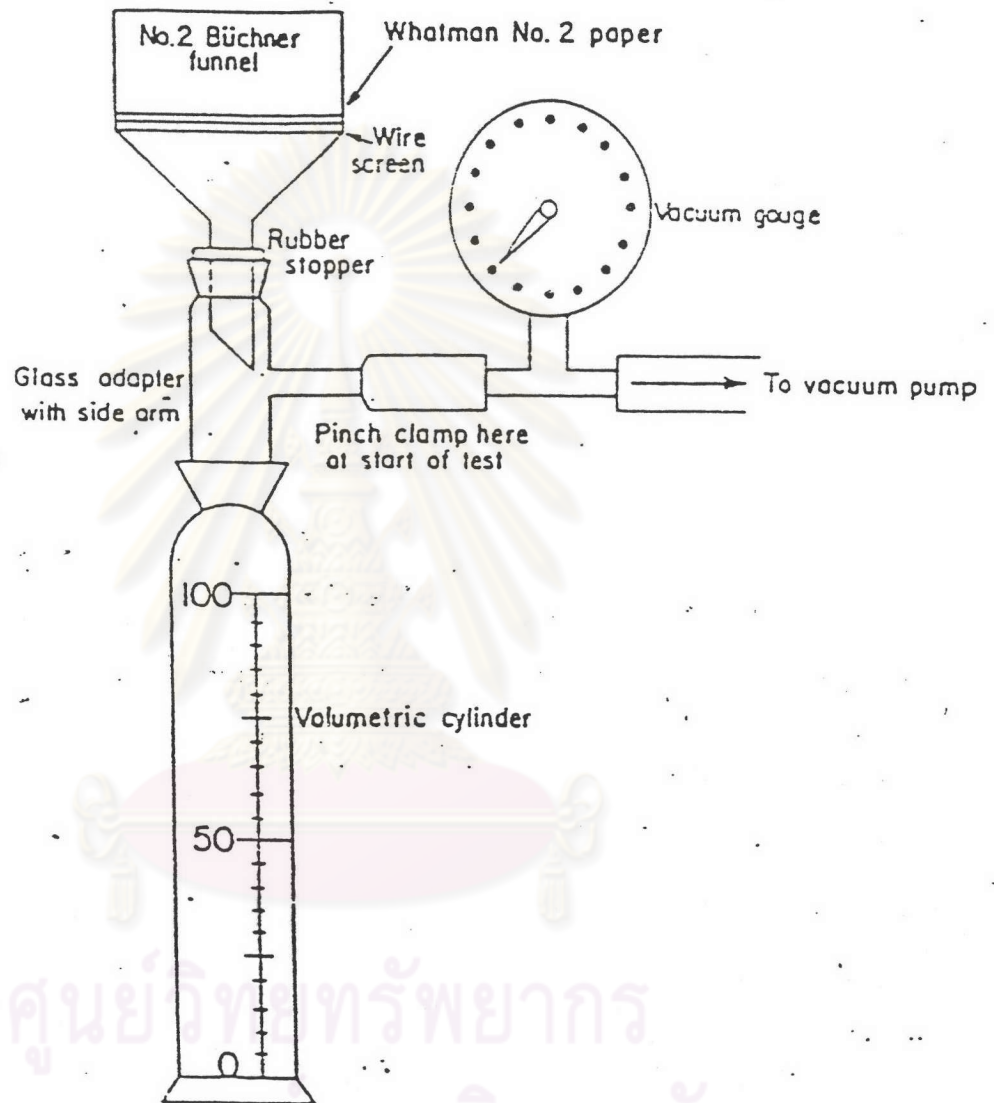
μ = ความหนืดของน้ำที่กรองออกจากตะกอน (นิวตัน-วินาที/ตร.ม.)

r = ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง (ม./กก.)

t = เวลาในการกรอง (วินาที)

Albrecht (1972) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกำจัดตะกอนสารส้ม พบว่า

1) ลักษณะตะกอนสารส้ม โดยทั่วไปจะเปลี่ยนไปตามลักษณะการดำเนินการของโรงกรองน้ำแต่ละโรง แต่มีลักษณะพื้นฐานที่เหมือนกัน คือ เป็นอนอนิวโตเนียน มีโครงสร้างคล้ายเจล เป็นตะกอนเบาที่ประกอบด้วย อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อนุภาคของสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวหรือทราย อนุภาคคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดสี จุลชีพ รวมทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ต่าง ๆ ที่ถูกกำจัดออกจากน้ำดิบในการทำน้ำประปา ความเข้มข้นของตะกอนอยู่ในช่วง 3000 - 15000 มก./ล. โดยมีของแข็งแขวนลอยประมาณ 75 - 90 % ของปริมาณของแข็งทั้งหมด และมีของแข็งที่ระเหยได้ประมาณ 20 - 35 % ของปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าบีโอดีอยู่ในช่วง 30 - 100 มก./ล. ค่าซีโอดีประมาณ 500-10000 มก./ล. และค่าพีเอชในช่วง 5 - 7



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ชุดทรายบดเนออร์

(Eckenfelder และ Santhanam, 1981)

2) วิธีการกำจัดตะกอนสารส้มมีหลายวิธี เช่น การทิ้งโดยตรงลงในแหล่งน้ำผิวดิน การทำให้ตะกอนมีความหนาแน่นสูงขึ้น ลานทรายตากตะกอน บ่อตากตะกอน การกรองสูญญากาศ การนำกลับอะลูมิเนียม และการใช้เครื่องอัดกรอง

3) ในสหรัฐอเมริกา พบว่า วิธีหนึ่งที่กลับนิยมใช้ในการกำจัดตะกอนสารส้มมากที่สุด คือ การทิ้งกลับลงไปแหล่งน้ำผิวดิน ไม่ได้รับการยอมรับอีกต่อไป เนื่องจากก่อให้เกิดปัญหามลพิษในแหล่งน้ำ

4) ในโรงกรองที่ไม่สามารถทิ้งตะกอน สารส้มลงในแหล่งรับน้ำผิวดินได้และมีพื้นที่ใช้งานจำกัด ควรใช้วิธีการนำกลับอะลูมิเนียมในการกำจัดตะกอนสารส้ม เพื่อให้เกิดความคล่องตัวของระบบและประหยัดค่าใช้จ่าย

3.8 การผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง

การผลิตจ่ายน้ำประปาของการประปานครหลวง ใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นส่วนใหญ่ โดยมีสถานีสูบน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาที่ตำบลลำแด้ จังหวัดปทุมธานี และจุดคลองเปิดลำเลียงน้ำเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำที่บางเขน สามเสน และธนบุรีในอัตราการใช้ น้ำดิบประมาณวันละ 3.5 ล้านลูกบาศก์เมตร

3.8.1.กระบวนการผลิตน้ำประปา มีขั้นตอนที่สำคัญต่าง ๆ ดังนี้

- การสูบน้ำดิบ

การนำน้ำเข้าสู่กระบวนการผลิต จะต้องใช้เครื่องสูบน้ำตามกำลังผลิตของแต่ละโรงงานผลิตน้ำ และจะแยกวัสดุที่ปนมากับน้ำ โดยผ่านตะแกรงเหล็กอย่างหยาบและละเอียด เพื่อแยกวัสดุที่ไม่ต้องการขึ้นต้นออกจากกระบวนการผลิต

- การตกตะกอน

การประปานครหลวงมีชนิดของถังตกตะกอนหลายชนิด ทั้งชนิดเก่ารูปถังสี่เหลี่ยมและแบบทันสมัยและขนาดใหญ่ที่สุดในเอเชียที่โรงงานผลิตน้ำบางเขน ทุกชนิดของถังตกตะกอนมีจุดประสงค์ในการทำงานอย่างเดียวกันคือ เป็นการผสมสารเคมีกับน้ำดิบและจับตะกอนให้ตกลงและระบายแยกตะกอนออกจากน้ำ ทำให้น้ำสะอาดใสขึ้นระดับหนึ่ง ปัจจุบันความขุ่นของน้ำดิบมีความแปรเปลี่ยนสูงมากระหว่าง 50 - 200 NTU. (หน่วยวัดความขุ่น) หลังจากน้ำผ่านกรรมวิธีการตกตะกอนแล้วจะได้น้ำที่มีความใสประมาณ 4 - 5 NTU.

- การกรอง

น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลเข้าสู่บ่อกรอง หรือบางโรงงานก็อาจใช้เครื่องสูบน้ำยกระดับช่วยอีกครั้งหนึ่ง เพื่อสามารถควบคุมระดับน้ำในการกรองได้ดีขึ้น ในบ่อกรองจะประกอบด้วยประตูระบายน้ำเข้าออก และระบบล้างบ่อกรอง หัวกรอง และสารกรอง ซึ่งประกอบด้วย หินหยาบ ทรายละเอียด และแอนทราไซท์ (ถ่านหินชนิดหนึ่ง) ความละเอียดและการเรียงตัวที่ดีของสารกรอง ทำให้สามารถกรองน้ำที่ได้จากถังตกตะกอนให้ความขุ่นที่หลงเหลืออยู่หมดไป หรือสะอาดได้มาตรฐานตามกำหนดไม่เกิน 2 NTU. (ความขุ่นของน้ำดื่ม)

- การเติมสารเคมี

การประปานครหลวงใช้สารเคมีหลักในการผลิตน้ำประปาอยู่ 4 ชนิด คือ

- 1) สารส้ม ใช้เติมในถังตกตะกอน เพื่อให้น้ำตกตะกอน และแยกตะกอนออก
- 2) ปูนขาว ใช้ปรับปรุงคุณภาพความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ ให้อยู่ในสถานะเป็นกลาง ที่ค่าพีเอชประมาณ 7
- 3) คลอรีน เป็นสารที่เติมในน้ำดิบและน้ำบริสุทธิ์ที่ผ่านการกรองแล้ว เพื่อฆ่าเชื้อโรคและสิ่งเจือปนในน้ำ ทำให้น้ำบริสุทธิ์สะอาด ปลอดภัยในการบริโภค
- 4) สารช่วยการตกตะกอน (โพลีเมอร์) ใช้เติมในน้ำดิบร่วมกับสารส้ม เพื่อช่วยในการตกตะกอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การใช้สารเคมีเหล่านี้ จะได้รับการตรวจสอบคุณภาพ และกำหนดมาตรฐานในการใช้โดยนักวิทยาศาสตร์ และวิศวกรควบคุมการใช้อย่างใกล้ชิดและต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง เพื่อให้การผลิตน้ำประปาได้มาตรฐานที่สุด

- ตะกอน และน้ำทิ้ง

เดิมการผลิตน้ำประปาจำนวนน้อย ปัญหากการกำจัดตะกอนและน้ำทิ้งไม่ได้ เป็นสิ่งกระทบกระเทือนต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก แต่ปัจจุบันการผลิตน้ำที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนในปริมาณมากกว่า 2 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะเกิดตะกอนที่ต้องกำจัดประมาณวันละ 200 ตัน และจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณน้ำที่ผลิตเพิ่มและค่าความขุ่นของน้ำที่เพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งลักษณะสมบัติของตะกอนที่เกิดขึ้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 ส่วนชนิดและปริมาณของธาตุองค์ประกอบในรูปออกไซด์ที่มีในตะกอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ปัจจุบันที่โรงงานผลิตน้ำบางเขนได้ใช้วิธีกำจัดตะกอนโดยการสูบเข้าบ่อพักขนาดใหญ่เพื่อตกตะกอน ระบายน้ำใส่ออกให้ตะกอนเข้มข้น และสูบขึ้นตากแห้งโดยแสงแดด และนำออกนอกโรงงานผลิตน้ำ ส่วนน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต ปัจจุบันได้ใช้เครื่องสูบน้ำสูบน้ำคุณภาพดีส่วนหนึ่งกลับมาใช้ใหม่ประมาณวันละ 80,000 ลูกบาศก์เมตร

3.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Gates และ McDermott (1988) ศึกษาหาความสัมพันธ์ของปริมาณของแข็งทั้งหมด กับค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนสารส้มจากโรงงานผลิตน้ำออเบิร์น (Auburn) รัฐอลาแบมา พบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนสารส้มจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้โพสซีอีเล็คโทรไลท์ 3 ชนิด ในการปรับปรุงลักษณะของตะกอนสารส้ม พบว่าตะกอนสารส้มที่ไม่ถูกบำบัดจะมีค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง 0.1×10^{10} ถึง 0.44×10^{10} วินาที²/กรัม แต่ถ้าใช้โพสซีอีเล็คโทรไลท์ประจุบวก, ประจุลบ และไม่มีประจุ พบว่าจะลดค่าความต้านทานจำเพาะลง 10 - 100 เท่า

ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติที่วิเคราะห์ได้จากตะกอนของโรงงานผลิตน้ำบางเขน
การประปานครหลวง (เดิมศักดิ์ โชติวรรณวิรัช, 2538)

พารามิเตอร์	ตัวอย่างที่					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
พีเอช	7.11	7.11	7.12	7.15	7.10	7.12
ของแข็งทั้งหมด (%)	4.58	4.46	4.74	3.98	4.00	4.35
ปริมาณน้ำ (%)	95.42	95.54	95.26	96.02	96.00	95.65
สี (พลาตินัม - โคบอลต์)	10	10	10	10	10	10
อะลูมิเนียม (กรัม)	0.7005 (15.29)	0.6491 (14.55)	0.7024 (14.82)	0.5940 (14.92)	0.6012 (15.03)	0.6494 (14.93)
ตะกั่ว (มก./ล.)	0.140	0.130	0.107	0.102	0.114	0.119
ปรอท (มก./ล.)	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002

หมายเหตุ : ตัวเลขในวงเล็บ คือ จำนวนร้อยละของปริมาณอะลูมิเนียมในของแข็งทั้งหมด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 ชนิดและปริมาณของธาตุองค์ประกอบในรูปออกไซด์ที่มีอยู่ในตะกอนของ
โรงงานผลิตน้ำบางเขน การประปานครหลวง (เดิมศักดิ์ โชติวรรณวิรัช, 2538)

ธาตุองค์ประกอบ ในรูปออกไซด์	ตัวอย่างที่					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
SiO ₂	53.7	56.5	55.0	55.9	56.7	55.56
Al ₂ O ₃	28.9	27.5	28.0	28.2	28.4	28.2
Fe ₂ O ₃	8.11	8.10	8.00	8.12	7.90	8.05
K ₂ O	3.1	1.9	2.4	2.0	1.9	2.26
MgO	1.60	1.70	1.70	1.65	1.75	1.68
Na ₂ O	1.90	1.80	1.80	1.75	1.00	1.65
CaO	0.9	1.1	1.0	0.95	1.0	0.99
TiO ₂	1.20	0.77	0.99	1.0	1.0	0.99
ZrO ₂	0.70	0.04	0.60	0.05	0.04	0.29
MnO ₂	0.22	0.12	0.17	0.20	0.19	0.18
SO ₃	-	0.21	0.20	-	0.15	0.18
CuO	0.12	0.14	0.10	0.11	0.10	0.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bugg, King และ Randall (1970) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของค่าพีเอชต่อค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง เมื่อใช้โพลีอีเล็กโทรไลต์ในการปรับปรุงลักษณะของตะกอนสารส้มในกระบวนการแยกน้ำออกจากตะกอน พบว่าสารโพลีอีเล็กโทรไลต์จะมีประสิทธิภาพในช่วงพีเอชที่ค่อนข้างกว้าง ยกเว้นโพลีอีเล็กโทรไลต์ประจุบวกซึ่งมีประสิทธิภาพเฉพาะที่พีเอชค่อนข้างต่ำ ส่วนโพลีอีเล็กโทรไลต์ประจุลบและไม่มีประจุ จะมีประสิทธิภาพในช่วงพีเอช 6.0 - 10.0 และที่พีเอชต่ำกว่านี้ จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ผลการศึกษาของ HUANG และ SHU (1981) ในการปรับปรุงลักษณะของตะกอนโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyalumchloride Sludge) ด้วยสารเคมีในกระบวนการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำชิกตัน (Chig-Tan Water Treatment Plant) ซึ่งพบว่า ในกระบวนการทำให้ตะกอนเข้มข้นขึ้น การใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์ร่วมกับปูนขาว จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์อย่างเดียว และการใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์ร่วมกับปูนขาว แบบใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์ในขั้นต้น และปูนขาวในขั้นที่สอง (Two-Stage Thickening) จะมีประสิทธิภาพและประหยัดสารเคมีมากกว่าการใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์ ร่วมกับปูนขาวแบบขั้นตอนเดียว แต่ต้องใช้พื้นที่ในการดำเนินการมากกว่า สำหรับกระบวนการนำตะกอนมาแยกน้ำออก พบว่าการใช้สารโพลีอีเล็กโทรไลต์อย่างเดียวเป็นสารปรับปรุงลักษณะจะประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด รองลงมาคือการใช้ปูนขาวร่วมกับสารโพลีอีเล็กโทรไลต์

Teerawat Luangurai (1990) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกอนจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงกรองน้ำบางเขน โดยทำการใช้แบบจำลองของลานตากตะกอน ซึ่งมีทรายเป็นตัวกรองและการใส่สารเคมีเพื่อปรับปรุงคุณภาพของตะกอนก่อนที่ละลายเข้ามาตากลงบนลานตากตะกอน ซึ่งสารเคมีที่ใช้ได้แก่ ปูนขาว สารโพลีอีเล็กโทรไลต์ ชื่อทางการค้า Magnafloc LT26 และ เฟอริคคลอไรด์ จากการทดลองโดยใช้เครื่องกรองบุคคล พบว่า

ปริมาณการใช้ปูนขาว Magnafloc และเฟอริคคลอไรด์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 16 % ,0.006 % และ 8 % ของความเข้มข้นของตะกอนตามลำดับ จะได้ยิลด์ของตะกอนเท่ากับ 11.8, 14.81 และ 4.31 กก./ม.²-ชม.ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่า Magnafloc LT26 เป็นสารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการตกตะกอนได้ดีกว่าปูนขาว โดยที่ภาระของแข็งทั้งหมด 9 กิโลกรัม/ตารางเมตร จะให้ค่าอัตราภาระของแข็งทั้งหมดสูงสุด สำหรับตะกอนที่เติม Magnafloc LT26 ปูนขาว เฟอริคคลอไรด์ และที่ไม่ได้เติมสารเคมี โดยมีค่าเท่ากับ 3.27, 2.14, 2.57 และ 2.73 กก./ม.²-ชม.ตามลำดับ

× Novak และ O'Brien (1975) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โพลีเมอร์กับสลัดจ์ทางเคมี พบว่า

- 1) โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง จะทำให้การรีดน้ำออกจากสลัดจ์ดีขึ้น โดยการลดความต้านทานจำเพาะของสลัดจ์
- 2) โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงจะทำให้การอัดตัวของสลัดจ์เพิ่มขึ้น แต่มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อความเข้มข้นของตะกอนแห้ง
- 3) จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีเมอร์กับความเข้มข้นของของแข็งสลัดจ์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งความแตกต่างของความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพีเอชของสลัดจ์และความเข้มข้นต่าง ๆ ของตะกอนแห้งอัดแห้ง
- 4) ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่ใช้ลดลง เมื่อเพิ่มมวลโมเลกุลของโพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า 10^6 จะไม่มีประสิทธิภาพในการรวมสลัดจ์ทางเคมี
- 5) ค่าพีเอชของสลัดจ์มีผลต่อโพลีเมอร์ โพลีเมอร์ไม่มีประจุและโพลีเมอร์ประจุลบสามารถทำงานได้ดีที่พีเอชระหว่าง 6 - 8.5 โพลีเมอร์ประจุบวกทำงานได้ดีที่พีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย

× Mallevalle, Brucher และ Fiessinger (1984) ศึกษาถึงความปลอดภัยในการใช้สารโพลีเมอร์ในการผลิตน้ำประปา โดยโพลีเมอร์ที่นำมาศึกษาครั้งนี้เป็นโมโนเมอร์

อะครีลาไมน์ พบว่าสามารถใช้ความเข้มข้นสูงสุดถึง 500 มก./ล. โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และมีประสิทธิภาพ เมื่อใช้เป็นโคเอกกูแลนต์เอดที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 500 มก./ล โดยที่ไม่ได้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพและขนส่งสัคส์ ซึ่งมีเสถียรภาพในน้ำมากเกินไป

Novak และ Bandak (1989) ได้ทำการศึกษาการปรับสภาพตะกอนและความต้านทานของตะกอนต่อการเจือปน ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าปัจจัยที่สำคัญในการปรับปรุงลักษณะตะกอน ได้แก่ ความปั่นป่วนของน้ำ (G) และค่าเวลาในการกวนผสม (t) โดยความต้องการการกวนผสมที่เหมาะสมในการปรับปรุงลักษณะตะกอน ได้แสดงโดยใช้สมการแสดงความสัมพันธ์กับค่าคงที่ในรูป $(G^X)t = K$ โดย K เป็นค่าคงที่จากปริมาณโพสิเมอร์ที่ใช้ ซึ่งเชื่อมโยงปริมาณสารเคมีที่ใช้กับค่า t และ G^X ค่า X สำหรับตะกอนที่ยังไม่ได้ปรับปรุงลักษณะจะมีค่าประมาณ 2.8 และสำหรับตะกอนที่ปรับปรุงแล้วจะมีค่าประมาณ 1.0

สรุปผลการศึกษา ดังนี้

1) การปรับปรุงลักษณะตะกอนด้วยวิธีทางเคมี ทำให้เกิดตะกอนที่มีความต้านทานต่อการแตกแยกหรือฉีกขาดเนื่องจากแรงเจือปน ความต้านทานดังกล่าวจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณสารเคมีที่ใช้

2) ค่าตัวชี้กำลังของ G ในสมการ $(G^X)t = K$ เป็นสิ่งที่แสดงความคงตัวทางกายภาพของตะกอน

3) ตะกอนดิบที่ยังไม่ปรับปรุงสภาพจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า G มากกว่าค่า t โดยสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ชี้กำลังของ G

4) จากการทดลอง พบว่า ปริมาณสารเคมีปรับสภาพตะกอนที่เหมาะสมไม่ใช่ปริมาณของสารเคมีที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ชี้กำลังของ G ต่ำสุดเสมอไป

Ministry of Technology (1968) ได้ศึกษาการใช้เครื่องอัดกรองในแง่มุมต่าง ๆ ดังนี้

1) การทดลองปรับสภาพตะกอนมักจะแสดงผลของตัวแปรต่าง ๆ ในรูปแบบของความต้านทานต่อการกรอง ซึ่งแสดงถึงความลำบากในการแยกน้ำออกจากตะกอน

2) โดยปกติ จะใช้เครื่องอัดกรองเมื่อต้องการให้ความเข้มข้นของตะกอนที่แยกน้ำออกแล้ว (filter cake) มีค่าไม่ต่ำกว่า 35 %

3) ในการแยกน้ำออกจากตะกอนด้วยเครื่องอัดกรอง สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึง คือ การปรับสภาพตะกอน เพื่อให้ได้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองที่ต้องการ (ประมาณ 0.1×10^9 วินาที² / กรัม ที่ความดัน 500 กรัม / ตารางเซนติเมตร) และเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึงการกวนผสมที่พอเหมาะ อุปกรณ์ที่ช่วยในการกวนผสม ความเข้มข้นของตะกอน ชนิดของผ้ากรองที่ใช้ในเครื่องอัดกรอง โดยต้องระมัดระวังไม่ให้ของแข็งขนาดใหญ่เข้าไปในเครื่องอัดกรอง เพราะทำให้เครื่องอัดกรองแยกน้ำออกจากตะกอนได้ไม่ดี และของแข็งเหล่านั้นอาจทำให้ผ้ากรองเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องรักษาความสะอาดของผ้ากรองอย่างสม่ำเสมอ

ศิริพร ขวัญบุญ (2535) ได้ทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนสารส้ม เมื่อใช้สารโพสลิอีเล็กโทรไลต์ปรับปรุงลักษณะตะกอนสารส้มของโรงงานผลิตน้ำธนบุรี และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารปรับค่าพีเอชจากพีเอช 6.8 เป็น 8.0 พบว่า

1) ที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนสูง จะลดค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองได้มากกว่าที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนต่ำ

2) ที่พีเอช 6.8 จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำกว่าที่ระดับพีเอช 8.0

3) สารโพสลิอีเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำสุด รองลงมาคือสารโพสลิอีเล็กโทรไลต์ชนิดไม่มีประจุ และชนิดประจุลบ ตามลำดับ

4) เมื่อพิจารณาชนิดของสารโพสลิอีเล็กโทรไลต์ร่วมกับระดับค่าพีเอชพบว่า ถ้าใช้สารโพสลิอีเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวกที่พีเอช 8.0 จะมีผลให้ค่าความต้านทาน

จำเพาะต่อการกรองของตะกอนต่ำกว่าที่พีเอช 6.8 แต่เมื่อใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบและชนิดไม่มีประจุ พบว่าที่พีเอช 6.8 จะมีผลให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนต่ำกว่าที่พีเอช 8.0

5) เมื่อพิจารณาชนิดของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ร่วมกับระดับความเข้มข้นของตะกอน ถ้าใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดเดียวกัน พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนสูง จะลดค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองได้มากกว่าที่ระดับความเข้มข้นของตะกอนต่ำ และถ้าใช้ระดับความเข้มข้นของตะกอนเท่ากัน สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองต่ำสุด รองลงมาคือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดไม่มีประจุ และชนิดประจุลบ ตามลำดับ

Forster (1985) ได้ทำการรวบรวมค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนหลายชนิด พบว่า มีค่าระหว่าง 1.4×10^{12} - 4×10^{14} ม./กก. และได้ให้ข้อสังเกตว่า ตะกอนที่มีค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนมากกว่า 5×10^{12} ม./กก. เป็นตะกอนที่มีความสามารถในการกรองต่ำ ในทางปฏิบัติพบว่าตะกอนดังกล่าวเมื่อนำมาผ่านการกรอง จะต้องใช้เวลาในการกรองนาน หรือ ผ่านตะกอนที่กรองได้มีปริมาณของแข็งต่ำ

Sarikaya และ Al-Marshoud (1993) ได้ศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติเกี่ยวกับการแยกน้ำออกจากตะกอนที่ผ่านการย่อยทางแอโรบิก (aerobically digested sludges) พบว่า

1) การเลือกชนิดของโพลีเมอร์ในการปรับสภาพตะกอน พบว่าโพลีเมอร์ชนิดประจุลบโดยทั่วไปจะมีความยาวของลูกโซ่ (chain lengths) มากกว่าโพลีเมอร์ชนิดอื่น ๆ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกลไกการสร้างสะพานเชื่อมของโพลีเมอร์แต่ละชนิด พบว่า โพลีเมอร์ชนิดประจุลบจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าชนิดอื่น ๆ ในกรณีที่ต้องการเน้นถึงกระบวนการดูดติดผิวและทำลายประจุ การใช้โพลีเมอร์ชนิดประจุบวกจะให้ผลดีกว่าชนิดอื่น ๆ

2) เมื่อศึกษาผลของค่าพีเอชกับปริมาณโพลีเมอร์ประจุบวกที่ใช้ในการปรับสภาพตะกอน พบว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น ปริมาณที่เหมาะสมในการใช้โพลีเมอร์ปรับสภาพตะกอนในแต่ละค่าพีเอช จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณที่เหมาะสมของ

โพสเอร์เพิ่มขึ้นจาก 2.94 กก./ตันของปริมาณของแข็งแห้งในตะกอนที่พีเอช 2.5 เป็น 8.82 กก./ตันของปริมาณของแข็งแห้งในตะกอนที่พีเอช 11.5

3) เมื่อศึกษาผลของปริมาณของแข็งในตะกอนกับปริมาณโพสเอร์ประจุบวกที่ใช้ในการปรับสภาพตะกอน พบว่าปริมาณโพสเอร์ที่ใช้ในการปรับสภาพตะกอน (ในหน่วย มก./ล.) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของแข็งในตะกอน และปริมาณโพสเอร์ที่ใช้ (ในหน่วย กก./ตันของปริมาณของแข็งแห้งในตะกอน) จะลดลงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งในตะกอน โดยปริมาณโพสเอร์ที่ใช้ (โดยน้ำหนัก) ลดลง 18 % เมื่อปริมาณของแข็งในตะกอนเพิ่มขึ้น 7 เท่า

4) เมื่อศึกษาผลของการกวนเร็วที่ใช้ในการปรับสภาพตะกอน โดยเปรียบเทียบการกวนเร็วที่ความเร็ว 100 และ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที พบว่าสามารถแยกน้ำออกจากตะกอนที่เกิดขึ้นได้ดี เมื่อใช้ปริมาณโพสเอร์ที่เหมาะสม โดยเมื่อใช้ความเร็ว 100 รอบต่อนาที พบว่า ปริมาณที่เหมาะสมของโพสเอร์ที่ใช้เป็นครึ่งหนึ่งของ ปริมาณที่เหมาะสมของโพสเอร์ที่ใช้ที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที

Degremont (1979) ได้กล่าวถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดกรองไว้ว่า เครื่องอัดกรองสามารถใช้ได้กับตะกอนที่มีค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง $5 \times 10^{11} - 8 \times 10^{12}$ ม./กก. ภายใต้ความดัน 6 - 15 บาร์ และได้ยึดของตะกอน 2 - 10 กก./ม²-ชม. ซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง (cake solid content) มากกว่า 30 %

Negulescu (1958) ได้กล่าวถึงการปรับสภาพตะกอนและความสามารถในการทำงานของเครื่องอัดกรองไว้ว่า ตะกอนที่ปรับสภาพแล้วจะมีความชื้นลดลงจาก 90 - 96 % เป็น 65 - 80 % ขึ้นกับสภาพของตะกอนแต่ละประเภท ซึ่งค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองที่เหมาะสมสำหรับเครื่องอัดกรองควรมีค่าต่ำกว่า 1×10^{11} ชม./ก.

Benson และ Thomas (1966) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารโพสเอร์อิเล็กโทรไลต์ พบว่า กรณีที่ต้องการให้เกิดกระบวนการดูดติดผิวและทำลายประจุ สามารถทำให้เกิดขึ้นโดยการใช้สารโพสเอร์อิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุบวก หรือโดยการเติมสารส้มหรือปูนขาว

ส่วนการใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ชนิดประจุลบควรใช้ในกรณีที่ต้องการเน้นถึงกระบวนการสร้างสะพานเชื่อมด้วยโพลีเมอร์

× Vesilind (1975) ได้กล่าวถึงการเลือกใช้สารโพลีเมอร์ในการปรับสภาพตะกอนว่า ในโรงบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่ จะใช้สารโพลีเมอร์ประจุบวกในการปรับสภาพตะกอน เนื่องจากต้องการใช้ประจุบวกในการทำลายประจุลบของตะกอน แต่ยังมีอีกวิธีหนึ่งที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ ได้แก่ การเติมสารที่ให้ประจุบวก (เช่น ไฮโดรเจนไฮออกไซด์) ลงไปในตะกอน เพื่อลดการรบกวนจากอำนาจของประจุลบของตะกอน ก่อนนำมาปรับสภาพด้วยสารโพลีเมอร์ประจุลบ โดยใช้กระบวนการสร้างสะพานด้วยโพลีเมอร์

Ford (1970) ได้ทำการศึกษาคณสมบัติของตะกอนโดยทั่วไป พบว่า ตะกอนสารส้มที่ได้มาจากการผลิตน้ำประปา มีค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง 5.3×10^9 วินาที²/กรัม ส่วนตะกอนประเภทอื่น ๆ มีค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองระหว่าง 1×10^7 ถึง 2.8×10^{10} วินาที²/กรัม ขึ้นกับสภาพของตะกอนแต่ละชนิด

Swanwick (n.d.) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการต่างๆ ในการบำบัดตะกอน โดยในการสำรวจค่าความจำเพาะต่อการกรองของตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย พบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองของตะกอนดังกล่าว อยู่ในช่วง 0.13×10^9 ถึง 120×10^9 วินาที²/กรัม ซึ่งเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยโพลีเมอร์และนำมาแยกน้ำออกจากตะกอน พบว่า ได้ตะกอนที่มีส่วนประกอบที่เป็นของแข็ง (cake solid content) 16 - 19 % และน้ำใสที่แยกออกจากตะกอนมีปริมาณสารแขวนลอยประมาณ 180 มิลลิกรัม/ลิตร

Swanwick (1968) ได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนาของเทคโนโลยีเกี่ยวกับตะกอนของสหรัฐอเมริกา พบว่า ค่าความต้านทานจำเพาะของตะกอนดิบ มีค่าประมาณ 6.4×10^9 วินาที²/กรัม ที่ระดับความเข้มข้นของตะกอน 4.35 % และเมื่อนำมาปรับสภาพด้วยการเติมโซดาแอส และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 71 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะต่อการกรองเพิ่มขึ้นเป็น 18.0×10^9 วินาที²/กรัม

Smollen (1990) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการแยกน้ำออกจากตะกอน เพื่อลดปริมาตรของตะกอน พบว่า ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งที่ยังไม่ได้รับการปรับสภาพ มีความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง ระหว่าง 3.8×10^{12} - 8.55×10^{14} ม./กก. หลังจากการปรับสภาพด้วยโพลีเมอร์ พบว่า ตะกอนดังกล่าวมีความต้านทานจำเพาะต่อการกรอง อยู่ในช่วง 6.5×10^{11} ถึง 3.3×10^{12} ม./กก.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย