

กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation)

โดย นายพรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ

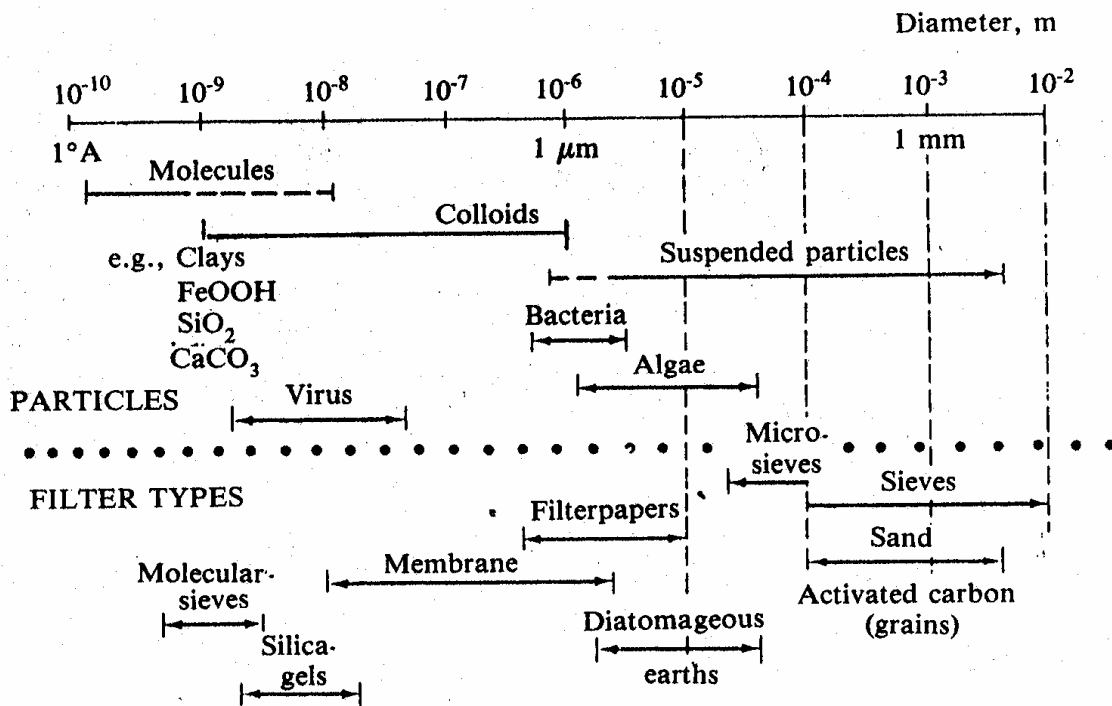
ส่วนวิเคราะห์ จัดการสิ่งแวดล้อม

กองจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ

ฝ่ายควบคุมคุณภาพน้ำ

อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 10^{-6} จนถึง 10^{-3} มม. (ภาพที่ 1) เนื่องจากมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจุตัว โดยพวกที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จะมีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์, สบู่ หรือสารจำพวก Detergent ส่วนพวกที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มักจะมีประจุเป็นลบ เช่น อนุภาคของดินเหนียว และเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพสูง ดังนั้นการทำให้อนุภาคต่างๆ รวมตัวกันและจับกันเป็นก้อนจะมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนคือ (มันลิน, 2537)

1. ทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยกลไกวิธีใดวิธีหนึ่งดังนี้



ภาพที่ 1 การจำแนกขนาดของสารต่างๆในน้ำ (มันลิน, 2537)

1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) โดยการเพิ่มประจุตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ในชั้นกระจายให้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้า (Zeta Potential) ที่ผิวบนสุดของน้ำลดตามไปด้วย(ภาพที่ 2) การทำลายเสถียรภาพโดยการลดความหนาของชั้นกระจายด้วยการเติมสารละลายของเกลือต่างๆมีข้อที่น่าสนใจดังนี้

1.1.1 ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้า (ที่มีอิออนประจุบวก) ที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยวิธีลดความหนาของชั้นกระจาย ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์

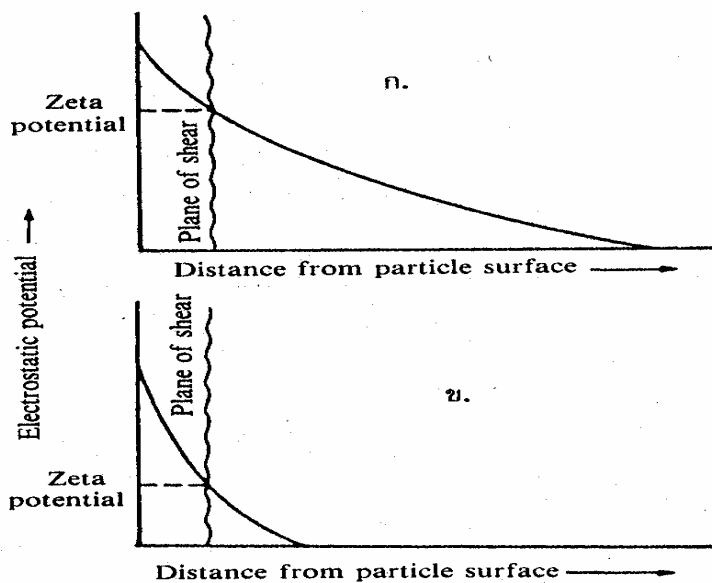
1.1.2 ไม่ว่าจะเติมอิออนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal)(ภาพที่ 3)

1.2 กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption and Charge Neutralization) โดยใส่สารเคมีบางหมู่ที่มีความสามารถให้ประจุตรงกันข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์และดูดติดผิวได้ ซึ่งจะมีผลในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์ ซึ่งเป็นการทำลายเสถียรภาพนั่นเอง

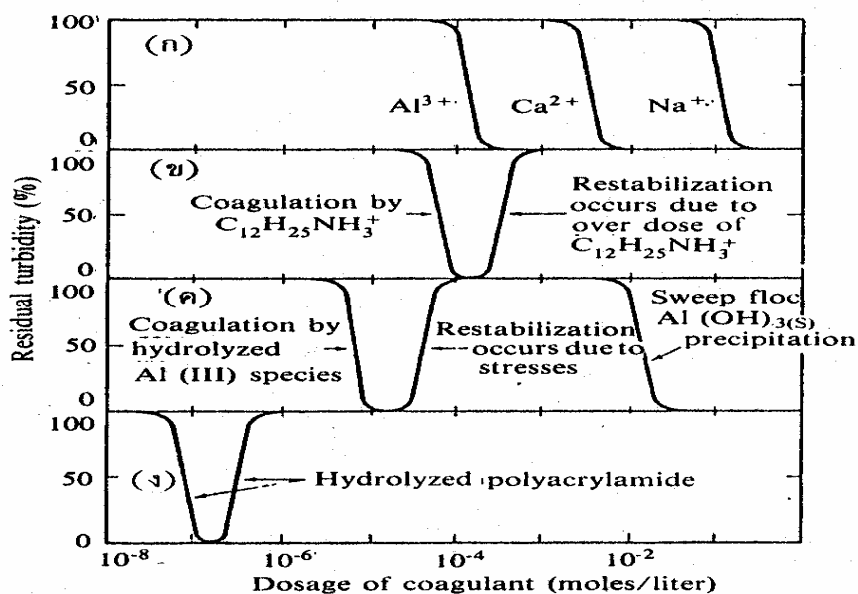
1.3 กลไกการสร้างผลึกขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ (Sweep Coagulation) เช่น การใส่สารส้มให้เกิดผลึก $Al(OH)_3$ เหมือนนุ่นสีขาว เพื่อให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมกันเป็นฟล็อกได้ กลไกการใช้ผลึกสารอินทรีย์ในการทำละลายเสถียรภาพของคอลลอยด์มีลักษณะที่แตกต่างจากกลไก 2 แบบแรกคือ ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม(Optimum Dosage) แปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ น้ำที่มีความขุ่นน้อยต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูแลนต์ได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์ที่น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตาม โคแอกกูแลนต์อาจไม่เกิดได้ดีเท่าที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆสำหรับเป็นสารเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูง โอกาสสัมผัสย่อมมีมาก จึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่ากับกรณีแรก

1.4 กลไกสร้างสะพานเชื่อมต่ออนุภาคคอลลอยด์ โดยใช้สารโพลีเมอร์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เมื่อใส่ลงในน้ำจะให้อิออนเป็นจำนวนมากเพื่อเกาะจับกับอนุภาคคอลลอยด์และยังมีแขนเชื่อมติดกับอนุภาคคอลลอยด์ตัวอื่นๆเพื่อทำให้เกิดฟล็อก

2. ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพ แล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกคูลูเลชัน(Flocculation) วิธีการสร้างสัมผัสให้อนุภาคมีหลายวิธี(ภาพที่ 4) ดังนี้

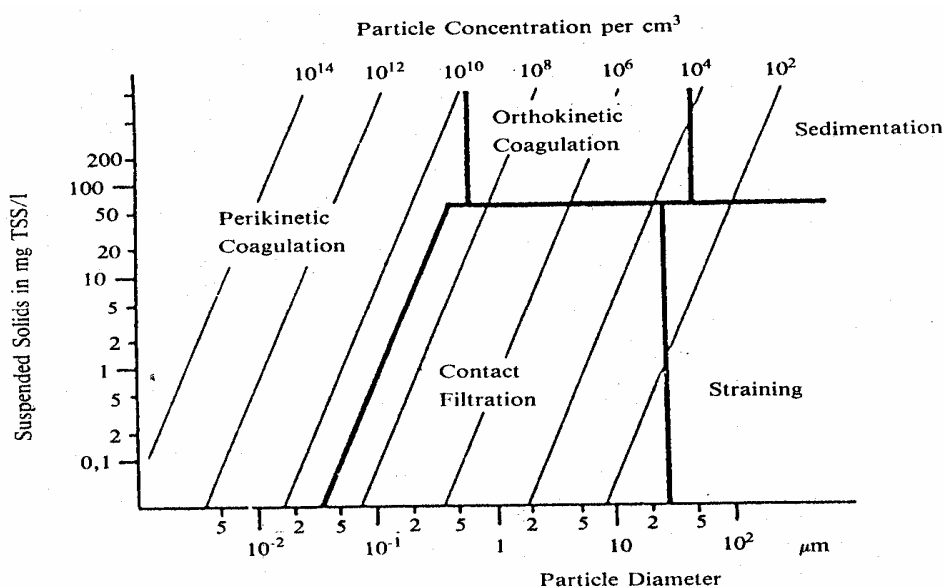


ภาพที่ 2 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามให้กับคอลลอยด์ (ก) ก่อนเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบปริมาณโคแอกกูแลนต์ ที่ใช้ในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ จะเห็นว่าแบบ (ก) ซึ่งเป็นการลดความหนาของชั้นกระจายด้วย Al^{3+} , Ca^{2+} และ Na^{+} ต้องการสารเคมีมากที่สุด ส่วนแบบ (ง) ซึ่งเป็นการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมโยง(สะพาน)ให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกัน มีความต้องการสารโคแอกกูแลนต์น้อยที่สุด

2.1 ทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปมาในน้ำจนกว่าจะมีการสร้างสัมผัสเกิดขึ้น วิธีปฏิบัตินี้เป็นที่นิยมมากที่สุด คือ กวนน้ำให้เคลื่อนที่ในลักษณะที่ส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกัน เป็นเหตุให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงมีการสัมผัสเกิดขึ้น การเคลื่อนที่ของน้ำต้องไม่รวดเร็วจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วฟล็อกที่เกิดขึ้นอาจแตกหรือหลุดออกจากกันได้วิธีนี้เป็นวิธีธรรมดาที่นิยมใช้กันทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ในการสร้างสัมผัสหรือสร้างฟล็อกคูลแลชันเรียกว่า ดังกวนช้า และวิธีการสร้างสัมผัสแบบนี้มีชื่อเทคนิคว่า Orthokinetic Flocculation อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกคูลแลชันแบบนี้ควรมีขนาดใหญ่กว่า 0.1 – 1 ไมครอนและมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล.



ภาพที่ 4 เกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคต่างๆทั้ง 5 ประเภท(มันสิน,2537)

2.2 การสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ อาจเกิดขึ้นได้เองโดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์กระทบกันเองหรือถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การสัมผัสแบบนี้จึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนเรียกว่า Perikinetic Flocculation

2.3 การสัมผัสระหว่างอนุภาคเกิดขึ้น เนื่องจากการตกตะกอนที่มีอัตราไม่เท่ากันของอนุภาคต่างๆ ฟล็อกคูลแลชันด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นพร้อมๆกับการตกตะกอน ทำให้สามารถกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำได้เลย อนุภาคที่สามารถสร้างฟล็อกคูลแลชันแบบนี้ได้ต้องมีขนาดใหญ่กว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นไม่น้อยกว่า 50 มก./ล. ในทางปฏิบัติอนุภาคที่มีขนาดดังกล่าวอาจเกิดฟล็อกคูลแลชันมาก่อนแล้วครั้งหนึ่ง เมื่อมาถึงการตกตะกอนจึงเกิดฟล็อกคูลแลชันอีกในขณะที่มีการตกตะกอน

2.4 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 –1 ไมครอน แต่เล็กกว่า 5 ไมครอน และมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. ฟล็อกคูเลชันอาจเกิดขึ้นโดยการสร้างสัมผัสมแบบ Orthokinetic Flocculation แต่อาจเกิดขึ้นช้าเนื่องจากโอกาสสัมผัสน้อย วิธีแก้ไขอาจกระทำดังนี้

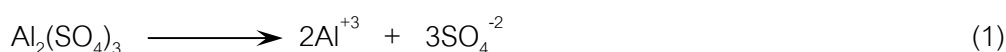
2.4.1 ใช้ถังกรองทรายแบบกรองเร็วหรือถังกรองแบบ 2 ชั้น ชั้นกรองช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสให้และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันด้วย การใช้ถังกรองช่วยสร้างฟล็อกคูเลชันเช่นนี้เรียกว่ากรองสัมผัส(Contact Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างในชั้นกรองมีจำกัด วิธีนี้จึงใช้ได้กับอนุภาคที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 50 มก./ล. การใช้กรวดขนาดเล็กแทนทรายอาจเพิ่มปริมาตรช่องว่างได้แต่เป็นการลดพื้นที่สัมผัส ดังนั้นจึงอาจได้ผลในทางฟล็อกคูเลชันไม่ดีเท่าชั้นทราย

2.4.2 ใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคใหม่ ในทางปฏิบัติสามารถกระทำได้ 2 วิธีคือ ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (Sludge Blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ผ่านชั้นสลัดจ์ อีกวิธีหนึ่งคือนำเอาฟล็อกกลับคืนมาผสมกับอนุภาคคอลลอยด์ จากนั้นจึงสร้างสัมผัสตามแบบ Orthokinetic Flocculation ไปตามปกติ การใช้ถังตกตะกอนแบบ Solids Contact Clarifier ก็ใช้หลักนี้

2.5 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 3 ไมครอนแต่มีความเข้มข้นต่ำ การสร้างสัมผัสอาจใช้วิธีการกรองได้เช่นกัน แต่สารกรองที่ใช้ควรมีขนาดใหญ่กว่าทราย

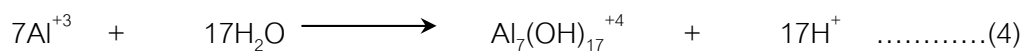
กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆและหาซื้อได้ง่ายในราคาที่ไม่แพงมากนัก สารส้ม(อลูมิเนียมซัลเฟต) มีสูตรโมเลกุล $Al_2(SO_4)_3 \cdot H_2O$ ซึ่งโดยปกติ * มีค่าเท่ากับ 14.3 หรือ 18 เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำจะแตกตัวให้อิออนบวกและลบ ดังปฏิกิริยา



เมื่อเติมสารส้มในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก $Al_2(SO_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $Al(H_2O)_6^{+3}$ หรือ Al^{+3} ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของ Al^{+3} จะเกิดขึ้นทันทีโดยไลแกนด์(Ligands) ชนิดต่างๆ

ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex substance) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (Hannah และคณะ, 1967) ดังสมการต่อไปนี้

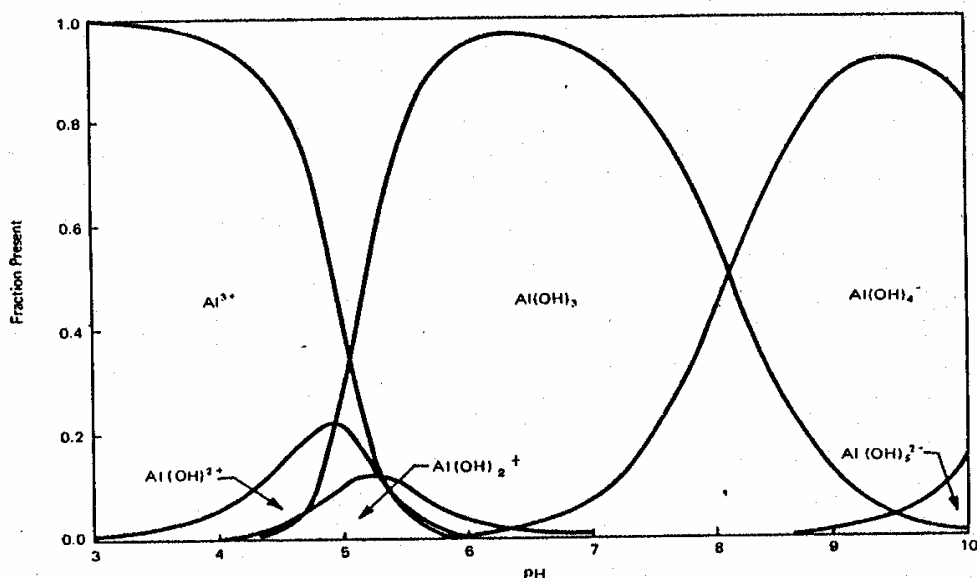


ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารล้นสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation Point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก Al(OH)_3

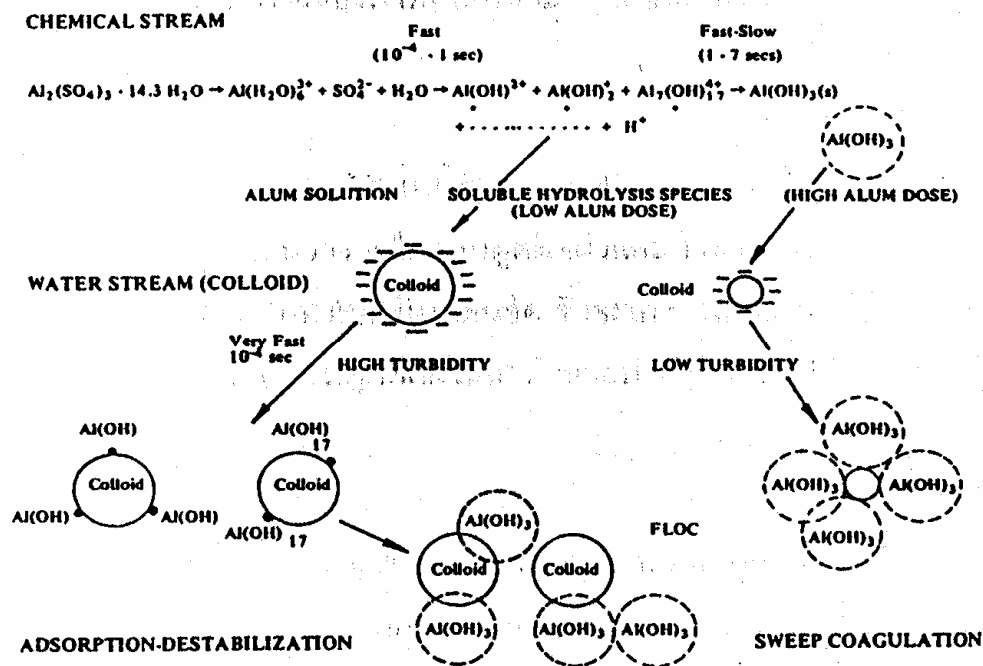


ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์คือสารคอมเพล็กซ์ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{+3} ถึง Al(OH)_3 สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero Point of Charge) ของ $\text{Al(OH)}_{3(s)}$ จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น Al(OH)_4^- , Al(OH)_5^{2-} ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจะสะเทินทางไฟฟ้าของ $\text{Al(OH)}_{3(s)}$ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น Al(OH)^{+2} , Al(OH)_2^+ , $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{+4}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$ (ภาพที่ 5)

สารล้นที่เติมลงในน้ำจะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยกลไกหลักดังนี้ (ภาพที่ 6) (Amirtharjah และ Mill, 1982)



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนสารล้นและค่าพีเอช (Committee Report, 1971)



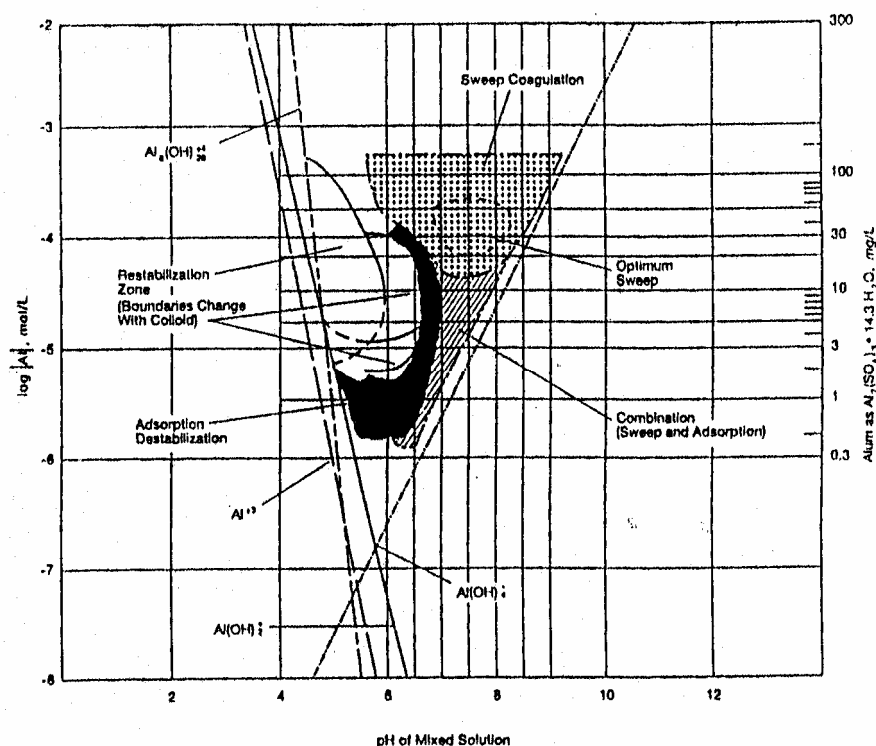
ภาพที่ 6 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม(Amirtharajah และ Mill, 1982)

1. **กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (Adsorption and Charge Neutralization)** เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวก ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งมักมีประจุเป็นลบให้เป็นกลาง (Neutralization) เป็นการสร้างโอกาสสัมผัสให้อนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอน ด้วยน้ำหนักของอนุภาคเพียงลำพัง กลไกนี้มีช่วงความเหมาะสมที่แคบ ซึ่งจะควบคุมการทำงานให้ดีขึ้นยาก เพราะสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะต้องพอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณต่ำเกินไป โคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้าสูงเกินไปสารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดผิวอนุภาคมากทำให้อนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุบวกและเกิดเสถียรภาพขึ้นอีกแต่ตะกอนที่เกิดจากกลไกนี้สามารถแยกออกจากน้ำได้ง่ายทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

2. **กลไกแบบกวาด (Sweep Coagulation)** ในกรณีความเข้มข้นของสารส้มเกินพอจนปฏิกิริยาดำเนินต่อไปจนได้ $Al(OH)_3$ ดังสมการที่ (4) การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสารส้มเป็นจำนวนมากพอ จนมีความเข้มข้นเกินจุดอิ่มตัว ซึ่งทำให้ผลึกของ $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคและทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียว ไม่แสดงอิทธิพลทางประจุไฟฟ้า จึงทำหน้าที่สร้างเป้าสัมผัสอนุภาคคอลลอยด์จนมีขนาดใหญ่และสามารถตกตะกอนได้เพียงลำพัง

3. **กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม (Combination Coagulation)** เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ แต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด

Amirtharajah และ Mill (1982) ได้รวบรวมผลการวิจัยเกี่ยวกับโคแอกกูเลชัน ด้วยสารส้มและนำมาวิเคราะห์ จึงเสนอหลักการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มดังแสดงในภาพที่ 7 ซึ่งจากภาพแสดงให้เห็นว่าโคแอกกูเลชันด้วยกลไกแบบกวาด จะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8 ถึง 8.2

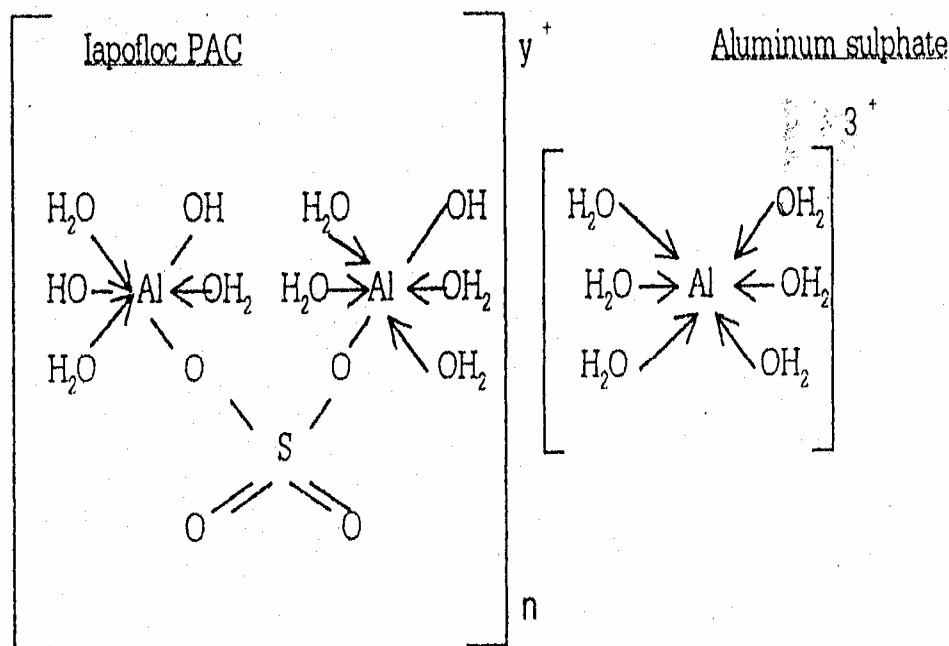


ภาพที่ 7 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (Amirtharajah และ Mills, 1982)

กลไกโคแอกกูเลชันด้วยโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์

โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride, PACl) เป็นสารสร้างตะกอนที่นิยมใช้กันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา โดยเป็นที่นิยมใช้ในประเศญี่ปุ่นและบางประเทศในทวีปยุโรป PACl ถูกเตรียมขึ้นโดยอลูมิเนียมที่เป็น Al_2O_3 นี้จะทำปฏิกิริยากับ HCl ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้รวมตัวเป็น $AlCl_3$ หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยากับเบสที่อุณหภูมิและความดันสูง เพื่อให้รวมตัวเป็นอลูมิเนียมโพลีเมอร์ ซึ่งเมื่อเติมสารส้มลงไป

สารละลายนี้ สารส้มจะไปลดความเข้มข้นของ Al_2O_3 ให้เหลือ 10-11 % และเติมซัลเฟตลงไปเพื่อไปทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอลูมิเนียม 2 อะตอม สูตรทั่วไปของ PACI คือ $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$ ดังภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACI และ alum (Hundt และ O'Melia,1988 ;Viraraghavan และ Wimmer,1988)



ภาพที่ 8 โครงสร้างทางเคมีของ lapofloc PACI และ Alum (Viraraghavan และ Wimmer,1988)

เมื่อ PACI ละลายน้ำจะไฮโดรไลซ์ทันทีเป็นอลูมิเนียมเชิงซ้อนมากมาย ซึ่งตัวที่ประสิทธิภาพมากที่สุดคือ $[Al_{13}O_4(OH)_{24}]^{+7}$ หรือ Al^{+13} ซึ่งการรวมตัวเป็นอลูมิเนียมตัวนี้ขึ้นอยู่กับระดับการรวมตัวของต่างกับสารละลายอลูมิเนียม, ชนิดและความเข้มข้นของต่าง, ความเข้มข้นของสารละลายอลูมิเนียมคลอไรด์, อุณหภูมิซึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือปริมาณของต่างที่เติมลงไปและระดับของความเป็นกลาง (Kaeding,1992) เมื่อนำโพสิออลูมิเนียมคลอไรด์มาใช้เป็นสารสร้างตะกอนแทนสารส้มนั้น พบว่า

- Dempsey (1985) ;Kaeding (1992) ; Packham และ Ratnayaka ; Povillot และ Suty (1992) ใช้ได้กับน้ำในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5.5 หรือพีเอชมากกว่า 7
- Nilsson (1992) ; Packham และ Ratnayaka (1992) ทำให้เกิดการรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์เกิดเป็นกลุ่มตะกอนได้เร็วและมีความแข็งแรงกว่าและตกตะกอนได้เร็วกว่าการใช้สารส้ม
- Packham และ Ratnayaka (1992) ; Povillot และ Suty (1992) เมื่อใช้ PACI เป็นสารสร้าง

ตะกอน จะไม่มีความจำเป็นต้องใช้สารช่วยสร้างตะกอน(Coagulat aid) เลย

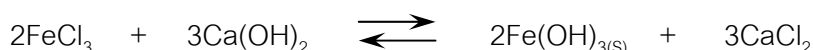
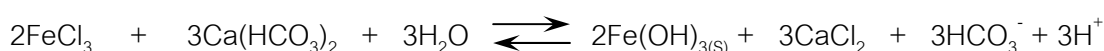
- Simpson (1988) ภายหลังจากการบำบัดแล้วน้ำที่ได้จะมีค่าพีเอชไม่ต่ำมากเหมือนกับการใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน
- Kaeding (1992) การนำ PACI มาใช้เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา นั้นไม่ทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงเครื่องมือหรืออุปกรณ์อื่น ๆ (Viraraghavan และ Wimmer, 1988) รวมทั้งไม่ต้องเปลี่ยนแปลงจุดที่จะใส่สารสร้างตะกอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำเลย น้ำที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะมีความขุ่นอยู่ในระดับที่ต่ำ ซึ่งจะทำให้ head loss ของระบบการกรองอยู่ในระดับที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารส้ม
- Simpson และคณะ (1988) ; Kaeding (1992) ; Povillot และ Suty (1992) ทำให้มีอลูมิเนียมตกค้างในน้ำ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้มแล้วพบว่า PACI จะทำให้อลูมิเนียมตกค้างในปริมาณที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมละลายกลับออกมาจาก PACI ในปริมาณที่น้อยกว่านั่นเอง ใช้ได้กับน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำได้
- Kawamura และ Trussel (1991) ทำให้มีปริมาตรของ Sludge ในปริมาณมากกว่าการใช้สารส้ม แต่เมื่อคิดในน้ำหนักแห้ง (Dry weight) แล้วจะมีน้ำหนักน้อยกว่าการใช้สารส้ม (Kaeding และคณะ, 1992) และในประเทศญี่ปุ่นได้นำเอา Sludge ที่แห้งแล้วนำไปถมที่ (land fill) หรือใช้เป็นตัวช่วยบำรุงดิน (Soil conditioner) และอาจนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ สามารถนำมาใช้กับน้ำที่มีความเป็นด่างต่ำและความขุ่นสูงได้ อีกทั้งยังใช้ PACI ในปริมาณที่น้อยกว่าสารส้ม
- Dempsey และคณะ (1985) ทำการทดลองและรายงานว่าที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอยต่ำๆ ถึงปานกลางพบว่า PACI เป็นสารสร้างตะกอนที่ดีกว่าสารส้ม (โดยเฉพาะที่พีเอชน้อยกว่า 5 หรือมากกว่า 7)
- Viraraghavan และ Wimmer (1988) ได้ทำการทดลองหาปริมาณสารสร้างตะกอนที่เหมาะสมของสารส้มและ PACI ที่อุณหภูมิ 7, 10 และ 20 °C พบว่าในการกำจัดความขุ่นนั้น PACI มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ 1/3 ถึง 2/3 ของปริมาณสารส้มและ PACI สามารถกำจัดความขุ่นได้มากกว่าการใช้สารส้มร้อยละ 20 ในทุกๆอุณหภูมิที่ทดสอบซึ่งประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่ได้มีการเพิ่มสารโพลีเมอร์เพื่อใช้เป็นสารช่วยในการตกตะกอนและสามารถใช้ PACI ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม นอกจากนี้คุณสมบัติของน้ำภายหลังจากบำบัดยังมีพีเอชสูงกว่าการใช้สารส้มจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำภายหลังจากบำบัดยังมีพีเอชสูงกว่าการใช้สารส้มจึงทำให้ไม่จำเป็นต้องปรับพีเอชของน้ำในภายหลังด้วย
- Hundt และ O'Melia (1988) ทำการทดลองพบว่า PACI สามารถกำจัด fulvic acid ที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่ำได้ดีกว่าการใช้สารส้ม และ PACI มีความเหมาะสมที่จะใช้กับน้ำ ที่มีสารอินทรีย์และพีเอชต่ำ เพราะทำให้ใช้ PAC ในปริมาณที่น้อยกว่าสารสร้างตะกอนที่เป็นอลูมิเนียมอื่น ๆ

- Viraraghavan และ Wimmer (1988) แม้ว่า PACl จะมีประสิทธิภาพในการเป็นสารสร้างตะกอน แต่ก็ยังมีราคาแพงกว่าสารส้มถึง 2.5 – 3 เท่า แม้ว่าจะช่วยประหยัดในเรื่องของการปรับพีเอช และโพลีเมอร์ที่จะต้องเติมลงไปก็ตาม

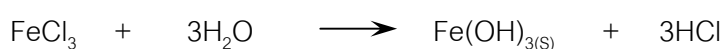
กลไกโคแอกกูเลชันด้วยเฟอร์ริกคลอไรด์

เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ FeCl_3 anhydrous มีลักษณะผลึกสีน้ำตาลหรือเหลือง เป็นเม็ดสีเขียวหรือดำ และมีรูปสารละลายสีน้ำตาลแกมเหลือง ปกติจะละลายน้ำได้ดีและเติมน้ำดิบในรูปของสารละลาย สารละลายจะมีฤทธิ์เป็นกรดและกัดกร่อน ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้ตะกอนเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$)

เฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารเคมีที่แตกตัวในน้ำ รูปแบบของสารประกอบหลักเมื่อละลายน้ำนั้นจะมีประจุบวก สามารถทำให้เป็นกลางได้โดยใช้ประจุลบที่เกิดจากของแข็งในน้ำตะกอนด้วยเหตุนี้จึงเป็นสาเหตุของการรวมกลุ่มของตะกอนเฟอร์ริกคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับ Bicarbonate alkalinity ในน้ำตะกอนและเปลี่ยนรูปเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์กับ Bicarbonate alkalinity ดังนี้



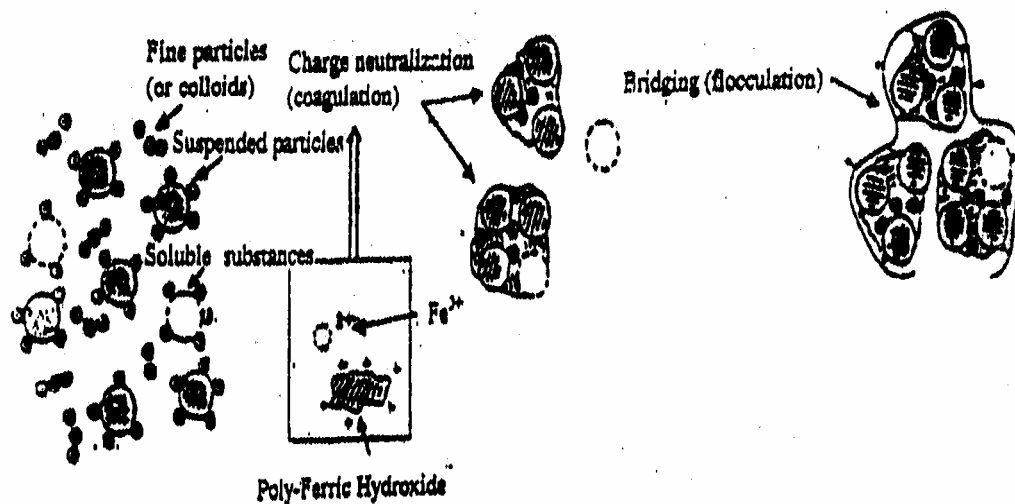
การสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มไม่อาจได้ผลดีมากนักกับน้ำอ่อนที่มีสีเข้ม กรณีเช่นนี้เฟอร์ริกคลอไรด์ให้ผลดีกว่า เมื่อเติมเฟอร์ริกคลอไรด์ให้กับน้ำ จะมีผลึกเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นดังนี้(มันลิน,2537)



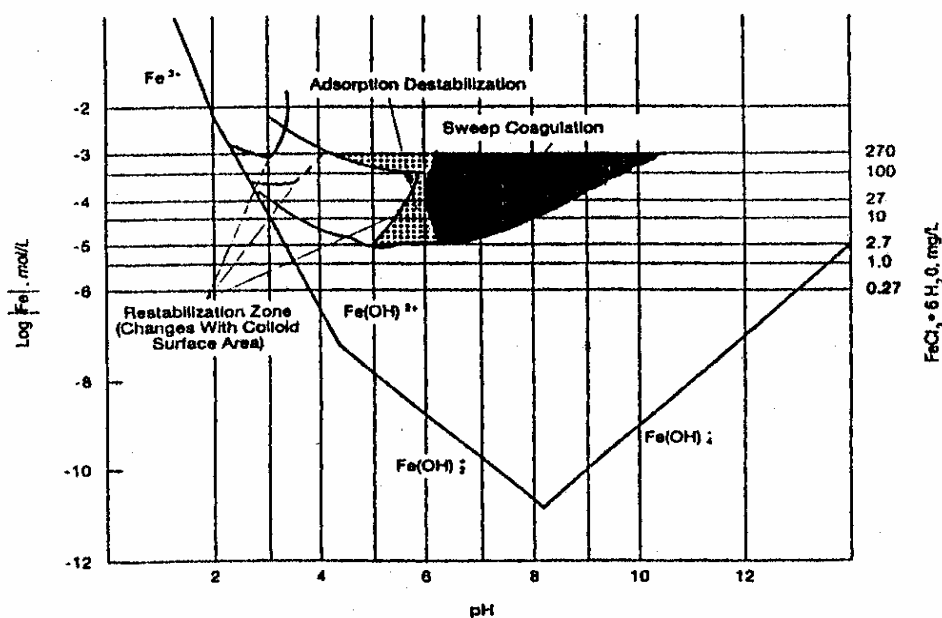
ข้อดีอีกประการหนึ่งของสารเคมีชนิดนี้ คือ สามารถสร้างโคแอกกูเลชันกับน้ำที่มี H_2S ได้ดี เฟอร์ริกคลอไรด์จะทำหน้าที่เป็นสารสร้างตะกอนในกระบวนการตกตะกอนได้ทั้ง 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 Coagulation เฟอร์ริกคลอไรด์นี้จะทำหน้าที่สะเทินประจุบนผิวของอนุภาคต่างๆทั้งที่แขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำให้กลายเป็นกลางโดยการดูดซับประจุ และทำปฏิกิริยากับประจุบนผิวของอนุภาคนั้นๆ ซึ่งเป็นผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคอ่อนลง และอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดเป็นตะกอนเล็กๆขนาดระหว่าง $10^{-9} - 10^{-7}$ ม.

ขั้นตอนที่ 2 Flocculation เฟอริกคลอไรด์จะทำหน้าที่รวมตะกอนเล็กๆซึ่งเกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 ให้เป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ขนาดมากกว่า 10^{-7} ม. ซึ่งถือว่าเป็นขนาดของตะกอนที่ใหญ่และหยาบทำให้ง่ายต่อขบวนการแยกตะกอนออกจากน้ำในขบวนการต่อไป



ภาพที่ 9 แสดงกระบวนการ Coagulation และ Flocculation ของ FeCl_3



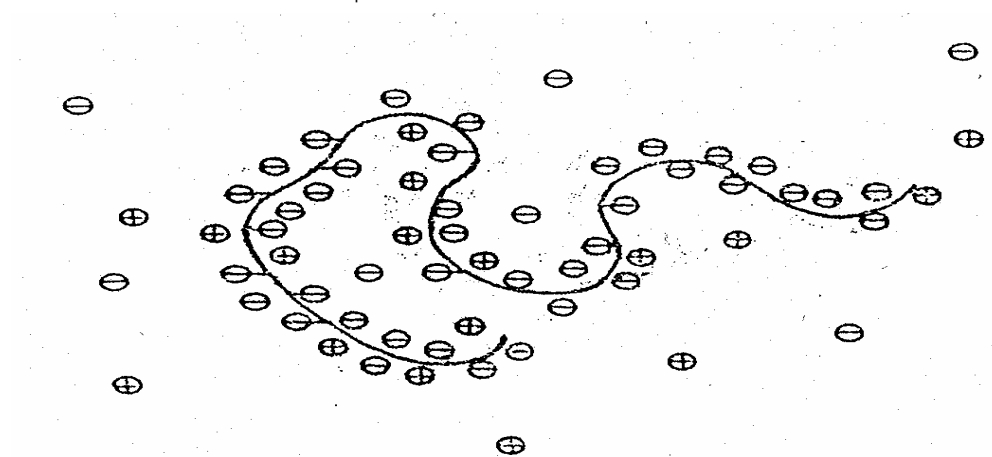
ภาพที่ 10 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยเฟอริกคลอไรด์

(Johnson, P.N. & Amirtharajah, A, 1983)

การใช้สารช่วยสร้างตะกอน(Coagulation aid)

โพลีเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้างๆ 2 ชนิด คือ

1. โพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมีหลายชนิด เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เจลาติน(Gelatin) และแป้ง(Starch)
2. โพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ในปี ค.ศ.1979 ได้มีการสังเคราะห์โพลีเมอร์ขึ้นอย่างสมบูรณ์ และนิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง Polyacrylamide ที่สร้างขึ้นจาก monomer ที่รวมกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวน โมเลกุลจะประกอบด้วน้ำหนักโมเลกุลในปริมาณเป็นล้านหน่วยแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงรูปร่างโพลีเมอร์ประกอบด้วยน้ำหนักโมเลกุลในปริมาณล้านหน่วย (USEPA,1979)

องค์ประกอบและรูปแบบทางด้านกายภาพของโพลีเมอร์มีรูปร่างเป็นโซ่ยาว(long chain) เป็นสารเคมีชนิดพิเศษ สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์จาก monomers หลายๆ อันรวมกันหรือสามารถทำได้จากการเพิ่มสารเคมีลงไปเพื่อเพิ่มหน้าที่ของ monomers ซึ่งเป็นตัวแบ่งประเภทของโพลีเมอร์ ที่เกิดขึ้น ดังนั้น monomer จึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งของ โพลีเมอร์ เชนของ monomer ค่อนข้างกว้างจึงใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์โพลีเมอร์ เช่น acrylamide สารอินทรีย์สังเคราะห์โพลีเมอร์ สามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆคือ

Cationic Polymer มีประจุบวกบนส่วนของสารอินทรีย์ ระดับของประจุบนโพลีเมอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนออกซอนของ nitrogen groups มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพตะกอนซึ่งมีประจุลบ ตัวอย่าง Cationic Polymer เช่น polydiallyldimethyl ammonium(PDADMA,cat-floc) สารรวมตะกอน polyacrylamide ประเภท cationic เตรียมได้โดยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสารเคมีชนิด non-ionic-

polyacrylamide หรือเป็นการรวม cationic monomer ด้วย acrylamide polymer ชนิด cationic polymer จะนิยมใช้ในงานปรับสภาพตะกอน เนื่องจากของแข็งในน้ำตะกอนสดนั้นมีประจุลบ

Anionic Polymer มีประจุลบบนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ จำนวนประจุลบขึ้นอยู่กับจำนวนกลุ่มของ acrylamide ที่ละลายอยู่ใน acrylic acid ชนิดของ anionic polymer เช่น polyacrylamide acid(PAA), hydrolyzed polyacrylamide(HPAM) และ polystyrene sulfate(PSS) สารรวมตะกอน polyacrylamide ประเภท anionic มีประจุไฟฟ้าเป็นลบเมื่อละลายน้ำและทำให้เกิดกลุ่ม amide group (NH_2) หรือเกิดจากการรวมกลุ่มของ anionic monomer จนเป็น acrylamide polymer

Nonionic polymer ไม่ละลายน้ำแต่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมอนุภาคของตะกอนให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ดี ในทางปฏิบัติ nonionic polymer อาจเกิดจากการรวมกันของสารอินทรีย์โพลีเมอร์ inorganic polymer และสารอินทรีย์โพลีเมอร์ (organic polymer) ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงของ floc

โครงสร้างในรูปสารละลายของ สารอินทรีย์โพลีเมอร์เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนเป็นสารละลาย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความหนืด ค่าความหนืด(Viscosity) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับของประจุไฟฟ้าที่ การเจือจางมากๆ โมเลกุลจะยืดแขนออก เพราะว่าผลของการผลัดจึงทำให้เกิดการประชิดตามความยาวของสายโพลีเมอร์ ที่ความเข้มข้นปกติ สายโซ่ที่ยาวของโพลีเมอร์ประจุลบ สันนิษฐานว่ามีรูปร่างคล้ายไส้ไก่ (ม้วนเป็นวง)แสดงดังภาพที่ 12 อย่างไรก็ตามเนื่องจากความยาวของสายโมเลกุลของโพลีเมอร์ค่อนข้างยาว ดังนั้นจึงไม่สามารถบอกตัวเลขของสายโพลีเมอร์ได้ทั้งหมดเมื่อโพลีเมอร์ละลายน้ำซึ่งประมาณโพลีเมอร์ ความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัม/ลิตรจะมีสายโพลีเมอร์ประมาณ 120 ล้านสายต่อน้ำ 1 ลิตร

Morrow และ Rausch (1974) รายงานว่าโพลีเมอร์ประจุบวก(Cationic Polymer) สามารถใช้เป็น สารสร้างตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์(inorganic coagulants) ให้แก่น้ำดิบที่มีความขุ่นสูงและต่ำได้เมื่อใช้ค่า G ในการรวนเร็วมากกว่า 400 วินาที⁻¹ ทำให้ได้ตะกอนที่มีปริมาตรต่ำจึงง่ายต่อการนำไปกำจัด นอกจากนี้ ตะกอนที่เกิดขึ้นจะหนัก และมีความหนาแน่นมากกว่าตะกอนที่เกิดขึ้นจากการใช้สารสร้างตะกอนที่เป็น สารอนินทรีย์จึงทำให้การตกตะกอนและการรวมตัวกันของตะกอนดีกว่า แต่ในการใช้โพลีเมอร์ในการกำจัด สีจะไม่ได้ผลที่ดีพอและค่าความเป็นด่าง, ความกระด้าง, พีเอช และอุณหภูมิจะไม่มีผลต่อการทำงานของโพลีเมอร์

Kawamura (1976) รายงานว่าการที่นำโพลีเมอร์มาใช้เป็นสารสร้างตะกอนหรือสารช่วยเร่งให้ ตกตะกอนกันอย่างมากเนื่องจาก การใช้โพลีเมอร์จะช่วยลดปริมาตรตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ

บำบัดน้ำได้ ทำให้ได้กลุ่มตะกอนที่มีขนาดเล็กและแน่น(dense floc) ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับตะกอนที่เกิดจากการใช้สารส้มหรือเกลือเฟอริกคลอไรด์ ทำให้เกิดกลุ่มตะกอนที่รวดเร็วมากกว่าการใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็กเป็นสารสร้างตะกอน สะดวกในการใช้งาน ไม่มีความเป็นพิษและอันตรายต่อผู้ใช้ สามารถทำลายหรือลดสภาพความเป็นต่างน้อยกว่าการใช้สารส้มหรือเกลือของเหล็กในการสร้างตะกอน ทำให้สารเคมีบางชนิด เช่น ซัลเฟต ตกค้างในน้ำในปริมาณที่น้อย

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน จำเป็นต้องรู้ชนิดและปริมาณสารที่เหมาะสมตลอดจนสภาวะต่างๆ ที่เอื้ออำนวยต่อการโคแอกกูเลชันซึ่งได้แก่ ระดับพีเอชของน้ำ ความเร็วแกวเดียนท์ และระยะเวลาในการกวนน้ำ ความก้าวหน้าของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการโคแอกกูเลชันยังไม่สามารถจะใช้กำหนดและควบคุมตัวแปรต่างๆดังกล่าวแล้วได้อย่างสมบูรณ์ จึงได้มีผู้พยายามพัฒนาวิธีควบคุมโคแอกกูเลชันนอกเหนือจากการทดลองจาร์เทสต์ ได้แก่วิธีการควบคุมโดยศักย์ไฟฟ้า(Zeta Potential) การควบคุมโดยวิเคราะห์หาสารโคแอกกูแลนท์ที่เหลือ(Residual Coagulant Analysis) และการควบคุมโดยการหาความสามารถในการกรอง(Filterability) เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดลองจาร์เทสต์และการหาความสามารถในการกรอง(มันซิน, 2537)

การทดลองจาร์เทสต์ (ชัยฤทธิ์, 2530)

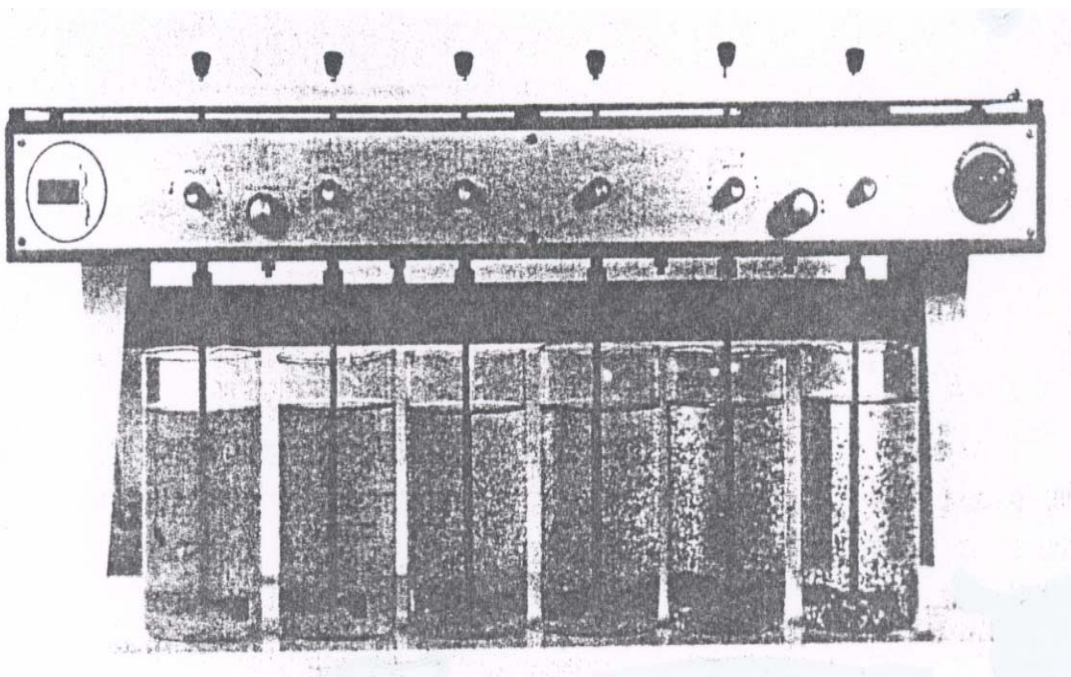
จาร์เทสต์เป็นวิธีที่ใช้มาตั้งแต่ดั้งเดิม และปัจจุบันยังใช้อย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบอย่างง่าย ๆ โดยทำการทดลองในบีกเกอร์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองสามารถปรับความเร็วรอบได้ส่วนมากก็มีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารโคแอกกูแลนท์และกำหนดขนาดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของน้ำตัวอย่าง ความเร็วรอบ ระยะเวลาการกวนน้ำและระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่งจึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนเป็นปริมาณสารโคแอกกูแลนท์ ส่วนระดับพีเอชอาจแปรเปลี่ยนหรือคงที่ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์จากนั้นก็จะได้ค่าประมาณ ชนิดของสารโคแอกกูแลนท์และระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดโคแอกกูเลชัน ในการทดลองควรทำหลายๆครั้งเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

เสริมพลและไชยยุทธ (2524) เสนอแนะให้ใช้อัตราการกวนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 3 นาทีแล้วเปลี่ยนมากรวนช้า 30 รอบ/นาที นาน 12 นาทีแล้วตั้งทิ้งให้ตกตะกอน

กรรณิการ์ (2525) แนะนำให้ใช้อัตราการหมุนเร็ว 100 รอบ/นาที นาน 1 นาที จากนั้นลดลงเหลือความเร็ว 30 – 40 รอบ/นาที นาน 20 นาทีแล้วตั้งทิ้งให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง

Cleasby (1990) แนะนำให้ใช้อัตราการหมุนเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นเวลา 0.5 – 1 นาทีแล้วเปลี่ยนมาหมุนช้า 25 ถึง 35 รอบ/นาที เป็นเวลา 15 ถึง 20 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 ถึง 45 นาที

Degremont (1991) แนะนำเรื่องการทดสอบจาร์เทสต์โดยให้คำแนะนำไว้ว่าอัตราการหมุนเร็วควรทำที่ 200 รอบ/วินาที นาน 1 นาที จากนั้นลดความเร็วรอบลงเป็นการหมุนช้าที่ความเร็ว 40 รอบ/วินาที นาน 20 นาที แล้วตกตะกอน 10 นาที



ภาพที่ 12 แสดงอุปกรณ์จาร์เทสต์