

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร



กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน (coagulation and flocculation)

ในน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่ มักจะมีแร่ธาตุหรือเศษอนุภาคดินต่าง ๆ ปะปนอยู่ด้วยอย่างมากมาย การที่จะนำน้ำจากแหล่งน้ำมาผลิตน้ำประปา จึงมีความจำเป็นจะต้องกำจัดอนุภาคที่ทำให้เกิดน้ำเกิดความขุ่น ซึ่งการกำจัดอนุภาคความขุ่น ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่การกำจัดจะทำได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particle) ซึ่งมีขนาด 10^{-6} มม. ถึง 10^{-3} มม. ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองในเวลาจำกัด จึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนเรียกว่า ฟล็อก โดยการใส่สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อทำการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ ซึ่งเรียกกระบวนการการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค คอลลอยด์โดยใช้สารเคมีว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) เมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพ เคลื่อนที่มาสัมผัสก็จะเกิดการชนกันรวมตัวกันเป็นฟล็อก ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฟล็อกคูเลชัน (flocculation) ซึ่งรายละเอียดของกระบวนการทั้งสองมีดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของคอลลอยด์
อาศัยกลไก 4 แบบ คือ

3.1.1 การลดความหนาของชั้นกระจาย (diffuse layer) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยลดค่าซีตาโพเทนเชียล (zeta potential) โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ผลคือชั้นกระจายที่มีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงด้วย

3.1.2 การดูดติดผิวและการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (adsorption and charge neutralization) โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับประจุอนุภาคคอลลอยด์ และสามารถดูดติดผิวบนอนุภาคคอลลอยด์ได้

3.1.3 การใช้กลไกการกวาด (sweep coagulation) เกิดโดยการเติมสารเคมีบางชนิดลง ไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ทำให้ได้ผลึก ที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากขึ้นซึ่งระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้ยูก็ใช้กลไกชนิดนี้

3.1.4 ใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer bridging) อธิบายโดยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging ในขั้นตอนแรกโมเลกุลของสารโพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์อาจ เนื่องจากประจุที่ต่างกันระหว่างโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ โดยมี ปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilization) ขั้นตอนต่อมาคืออนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกับอนุภาคอื่นๆโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งทำ ให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ และสามารถแยกตัวจากน้ำได้ง่ายถ้าใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิด ผลเสีย เนื่องจากโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์จนไม่มีที่ว่างบนอนุภาค สำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียร ภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized) การกวนน้ำแรงเกินไปก็จะทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืน มาเช่นกัน เนื่องจากฟล็อกที่เกิดแตกเป็นส่วนๆและทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาค อันเดิมดังรูปที่ 3.1

3.2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสให้มากที่สุด (Tranports of colloidal) จะมีการเติมสารเคมีประเภทโคแอกกูแลนต์เพื่อทำลายความหนาของชั้น กระจายโดยการทำลายประจุไฟฟ้าบนอนุภาคคอลลอยด์ หรือการเพิ่มเป้าสัมผัสในกระบวนการแบบ ฟล็อกกวาด (sweepfloc coagulation) หรือการใช้โพลีเมอร์พร้อมกับการกวนน้ำอย่างรวดเร็วเพื่อให้ สารโคแอกกูแลนต์กระจายไปยังส่วนต่างๆ อย่างรวดเร็วอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะเกิด กระบวนการฟล็อกกุเลชั่นอย่างสมบูรณ์เพียงใดขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำให้เกิดสัมผัสที่มีหลายวิธี (มัน ลิน ตันทุลเวศม์, 2526)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

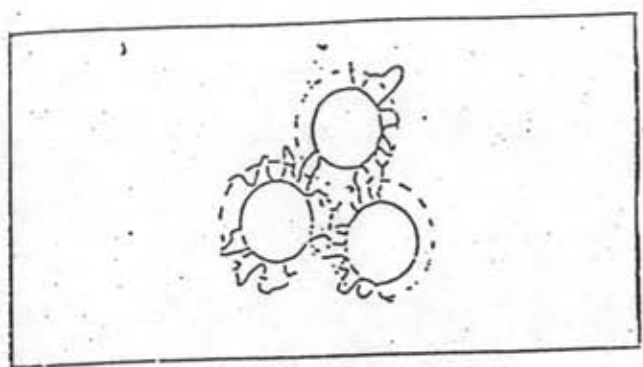


Fig. 12 a
 Flocculation by bridging of particles
 due to adsorption of polymer segments

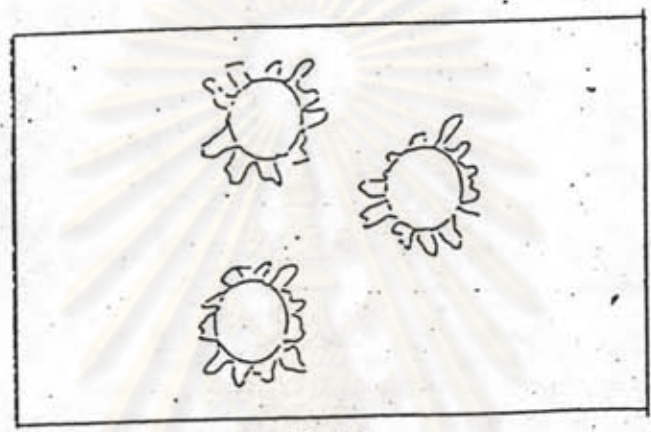


Fig. 12 b
 Restabilization of particles
 due to adsorption of excess polymer

รูปที่ 3.1 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ และการกลับคืนเสถียรภาพของคอลลอยด์

3.2.1 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนไปมาในน้ำ จนกว่าจะมีการสัมผัสเกิดขึ้นวิธีที่นิยมปฏิบัติกันมากคือการกวนน้ำให้มีอัตราเร็วในการไหลแตกต่างกันทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ไม่เท่ากันจึงเกิดการสัมผัสขึ้นแต่การเคลื่อนที่ต่อไม่เร็วเกินไปจนทำให้ฟล็อกแตกออกซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า ออร์โธโคเนติก ฟล็อกคูเลชัน ใช้ในถังกวนช้า

3.2.2 การสร้างสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นเองได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับโมเลกุลของน้ำขึ้นกับอุณหภูมิ มีชื่อเรียกว่า เพอร์โธโคเนติก ฟล็อกคูเลชัน ซึ่งไม่เหมาะกับการทำน้ำประปาเพราะเสียเวลามากและเป็น การเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุล ทำให้สามารถสร้างสัมผัสให้กับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอนเท่านั้น ข้อดีของวิธีนี้คือไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก

3.2.3 ในกรณีที่อนุภาคคอลลอยด์มีขนาดใหญ่กว่า 0.1 ถึง 1 ไมครอนแต่เล็กกว่า 5 ไมครอนและมีความเข้มข้นน้อยกว่า 50 มก./ล. กระบวนการฟล็อกคูเลชันอาจเกิดจากการสัมผัสแบบออร์โธโคเนติก โดยใช้ผ่านเครื่องกรองทรายเร็วเพื่อช่วยเพิ่มอัตราสัมผัสและบังคับให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันโดยการใช้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมผัสให้อนุภาคใหม่เช่น ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (sludge-blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนผ่านชั้นสลัดจ์

ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตัวแปรที่สำคัญในการกวนน้ำคือความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีความปั่นป่วนสูง ทั้งนี้เพื่อให้การการผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อม ๆ กันทุกจุด ในทางตรงกันข้ามน้ำในถังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วเกิดการแตกออกจากกัน การเคลื่อนไหวในถังกวนช้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคและจับติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ถึงกวนเร็วมักมีค่า G ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที⁻¹ แต่ถึงกวนช้ามักมีค่า G อยู่ในช่วง 60-100 วินาที⁻¹ ตัวแปรอีกตัวที่สำคัญได้แก่ เวลาผสม (t) ซึ่งหมายถึงเวลาสัมผัสระหว่างสารเคมีและความขุ่นเนื่องจากปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เกิดขึ้นรวดเร็วมากถึงกวนเร็วจึงต้องการเวลาสัมผัสเพียง 1 นาทีหรือน้อยกว่าในทางปฏิบัติมักถือว่าเวลาสัมผัสเป็นเวลาที่น่าอาศัยอยู่ในถังหรืออุปกรณ์กวนเร็วซึ่งหมายถึง เวลากักน้ำ (detention time) พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนในระดับ G อาจคำนวณได้จากสมการของ แคมป์ และ สโตน์

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

$$G = \text{ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน(วินาที}^{-1}\text{)}$$

$$P = \text{พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน(นิวตัน-เมตร/วินาที)}$$

$$\mu = \text{ความหนืดของน้ำ(viscosity)(นิวตัน-วินาทีต่อ ตร.เมตร)}$$

$$V = \text{ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ลบ.ม)}$$

สำหรับการกวนน้ำที่ใช้ใบพายในการกวนน้ำพลังงานที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก

$$P = 0.5 C_D A \rho v^3$$

C_D = ค่าคงที่สำหรับใบกวนแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 1.8

สำหรับพัดแบบใบพาย

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นที่ผิวของใบพัด (ตารางเมตร)

v = ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัดเท่ากับ $0.75 \cdot$ ความเร็วของ
ใบพัด

P = พลังงานที่ต้องการ (watt)

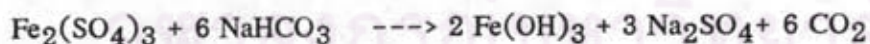
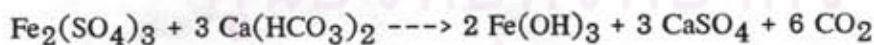
สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในปัจจุบัน สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และกลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ซึ่งมีสารต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เฟอร์ริกซัลเฟต $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$

โดยทั่วไปแล้วสารโคแอกกูแลนต์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ จะใช้ในช่วงพีเอชที่กว้างเช่น 4-11 เฟอร์ริกซัลเฟตมักจะใช้ในการกำจัดสีที่ค่าพีเอชต่ำและที่ค่าพีเอชสูงจะใช้ในการกำจัดเหล็ก , แอมกานิส และการกำจัดความกระด้าง

สมการปฏิกิริยาเคมีของเฟอร์ริกซัลเฟตมีดังนี้



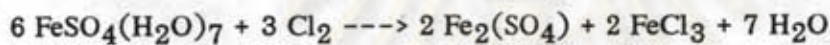
2. เฟอร์รัสซัลเฟต $FeSO_4 \cdot 7H_2O$

อยู่ในรูปของผลึกหรือเม็ด มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ 20% Fe สามารถละลายในน้ำได้ เฟอร์รัสซัลเฟตและปูนขาวมักนิยมใช้ที่ค่าพีเอชสูง เช่น ในกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูน-โซดา และในการกำจัดเหล็ก , แมงกานีส

3. chlorinated Ferrous Sulphate

เนื่องจากการออกซิเดชันของเฟอร์รัสซัลเฟตโดยออกซิเจนที่ละลายในน้ำจะเกิดขึ้นที่พีเอชสูงกว่า 8.5 ดังนั้นจึงเติมคลอรีนลงไปเ็นเฟอร์รัสซัลเฟตเพื่อให้ทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น $Fe_2(SO_4)_3$ และ $FeCl_3$ ซึ่งทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนต์

ปฏิกิริยาสามารถแสดงได้ดังนี้

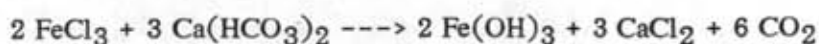


โคแอกกูแลนต์ด้วย chlorinated Ferrous sulphate มักใช้ในการเติมคลอรีนขั้นแรก (pre-chlorination) และมีข้อดีกว่าเฟอร์ริกซัลเฟต ซึ่งสามารถใช้ในกระบวนการโคแอกกูแลนต์ได้ในช่วงพีเอช 4-11

4. เฟอร์ริกคลอไรด์

เฟอร์ริกคลอไรด์ที่ใช้กันโดยทั่วไป มักอยู่ในรูปของเหลวและผลึก ซึ่งในรูปของเหลวและผลึกมีการกักความร้อนสูงและต้องขนส่งแบบเดียวกับกรดไฮโดรคลอริก ยกตัวอย่างเช่น ถังเหล็กเคลือบไฟเบอร์กลาสเสริมด้วยโพลีเอสเตอร์ พิวซี เป็นต้น ในรูปของเหลวจะมี $FeCl_3$ ละลายอยู่ 43% (m/m) และต้องเก็บในที่ปราศจากความชื้นเพราะเฟอร์ริกคลอไรด์เป็นสารที่ดูดความชื้นได้เร็วมาก

ปฏิกิริยาของเฟอร์ริกคลอไรด์กับความเป็นด่างตามธรรมชาติ และที่เพิ่มเข้าไปจะเป็นดังนี้



5. อะลูมิเนียมซัลเฟต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$)

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

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

อะลูมิเนียมคลอไรด์ประกอบด้วย Al_2O_3 20% ความหนาแน่น 1300 กก./ม³ ค่าพีเอช 2.5 ใช้ในการปรับสภาพของสลัดจ์ (sludge conditioning)

7. โซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO_2)

โซเดียมอะลูมิเนตแตกต่างจากสารส้มตรงที่ มีความเป็นต่างมากกว่าความเป็นกรด ในปฏิกิริยาของมัน โดยปกติจะไม่ใช้ตามลำพังยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอนน้ำที่มีสีสูงและมีค่าพีเอชต่ำซึ่งไม่เหมาะสมต่อการละลายของสารประกอบอะลูมิเนียมจึงมีการเติมโซเดียมอะลูมิเนตลงไป เพื่อเพิ่มค่าพีเอชได้ประมาณ 6 ทำให้สารละลายอะลูมิเนียม สามารถตกผลึกได้ในบ่อตะกอนชั้นที่สอง ปฏิกิริยาของโซเดียมอะลูมิเนตกับสารส้มและกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะให้สารประกอบอะลูมิเนียมที่ไม่ละลายมีดังนี้

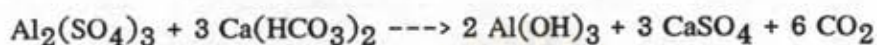


8. โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminium chloride หรือ PACl)

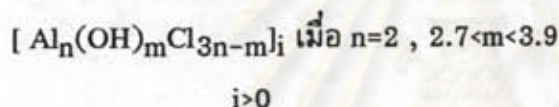
เนื่องจากการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์มักเกิดปัญหาสภาพเป็นกรดมากค่าพีเอชจะต่ำลง (ธงชัย พรณสวัสดิ์ และ กาญจนา ครองธรรมชาติ, 2530), (T.Viraraghavan and C.H. Wimmer, 1992) ดังสมการ



จากสมการเห็นว่าเกิดอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ตกตะกอน และเกิดกรดซัลฟูริกทำให้พีเอชลดลงจึงต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพน้ำไม่ให้มีพีเอชต่ำลงมากนัก ดังสมการ



ซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเกิดความกระด้างถาวรขึ้น จากปัญหาที่เกิดขึ้น เหล่านี้จึงมีการพัฒนาโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยโพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นสารเคมีที่มีสูตรโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโมเลกุลดังนี้



คุณสมบัติของ PACI เมื่อเป็นโคแอกกูแลนต์

1. มีอำนาจในการสร้างตะกอน , การรวมตัวของตะกอนสูงและการตกตะกอน จะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าสารส้ม
2. สะดวกในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี
3. ในการทำงาน PACI จะมีช่วงพีเอชในการทำปฏิกิริยากว้างกว่าโคแอกกูแลนต์ตัวอื่น ๆ ปกติจะมีพีเอชอยู่ในช่วง 6-9 แต่บางกรณีสามารถตกตะกอนในช่วง พีเอช 5-10
4. โพลีอะลูมินัมคลอไรด์สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม โดยที่ใช้ระยะเวลาในการกวนเร็วน้อยกว่า

กลไกตกตะกอนด้วย PACI

เมื่อ PACI แตกตัวจะได้อะลูมิเนียมที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนไอออนจึงเกิดการไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมได้สารต่าง ๆ เช่น $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$

$Al_6(OH)_{15}^{+3}$ เป็นต้น ซึ่งมีอะลูมิเนียมหลายอะตอมที่เรียกว่า polymeric hydroxo complex มีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์ไม่เสถียร แล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นแล้วจึงตกตะกอน สำหรับการสร้างตะกอนพีเอชของน้ำจะมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิสเนื่องจากถ้าพีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกเกิดขึ้นมาก ให้ผลในการเพิ่มทั้งปริมาณและอัตราเร็วในการตกตะกอนนอกจากอะลูมิเนียมจะจับกับอนุภาคคอลลอยด์แล้วอะลูมิเนียมยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในน้ำกลายเป็น $Al(OH)_3$ เป็นตะกอนเล็ก ๆ และเนื่องจาก อะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพสูงในการทำละลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติม PACI ลงไปในน้ำจะต้องผสมอย่างรวดเร็วทันที แล้วลดอัตราเร็วในการกวนช้าลงเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสและจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่ขึ้น แล้วแยกตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาโดยการปล่อยให้ตกตะกอนตามธรรมชาติ

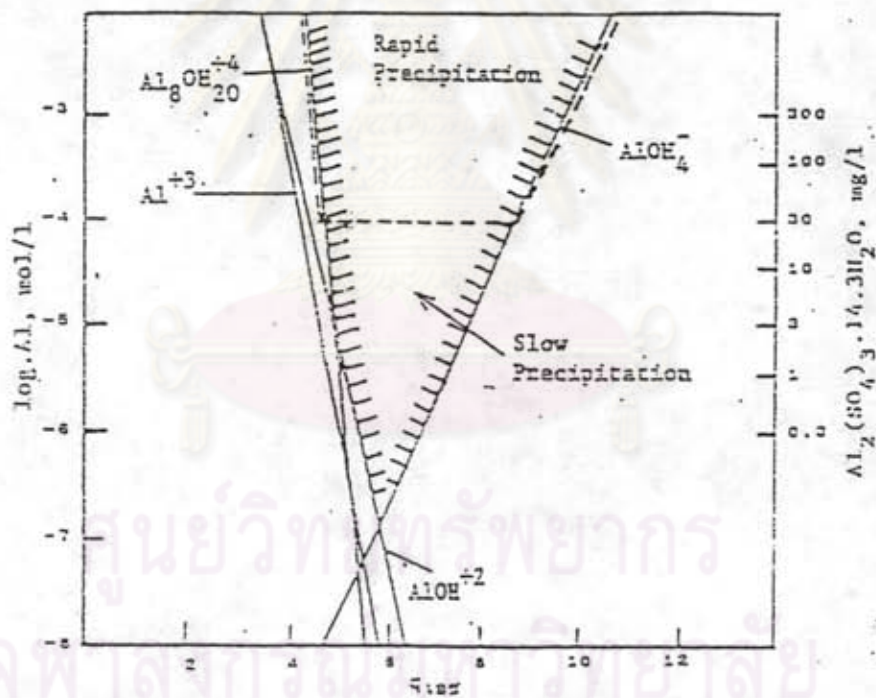
ความสำคัญของพีเอชต่อกลไกโคแอกกูเลชัน

จากการวิจัย เกี่ยวกับเคมีของสารส้มในน้ำทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญ 3 ประการคือ

1. ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีแต่ไฮดรอกซิล (hydroxo metal complex) พร้อมทั้งจะดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และหักล้างประจุคอลลอยด์ได้ ถ้าไอออนมีประจุตรงกันข้ามและมากกว่าของคอลลอยด์ คอลลอยด์จะแสดงประจุเป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (charge reversal)

2. พีเอชของน้ำเป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.2

3. ฟล็อกสารส้มที่มีพีเอชเป็นกลางจะมีประจุบวกแต่จะกลายเป็นประจุลบเมื่อมีพีเอชเป็นด่าง จากรูป 3.2 น้ำที่มีพีเอชต่ำจะมี Al^{+3} มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลง เมื่อมีพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลางสารประกอบ $Al(OH)_3$ ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่นๆ พื้นที่ที่แรเงาไว้แสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ ตามทฤษฎี ในทางปฏิบัติจะต้องมีสารส้มไม่น้อยกว่า 30 มก./ล. จึงจะมีผลึก $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในอัตราเร็วพอสมควร (เป็นชั่วโมง) พื้นที่ในเส้นประแสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ ในทางปฏิบัติเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงของความเป็นด่างไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบดังนั้นการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มให้กับน้ำควรมีพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย น้ำที่มีพีเอชต่ำเกินไปก็ไม่ดีเนื่องจาก Al^{+3} ไม่ดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์น้ำไม่ควรมีพีเอชสูงเกินไป เนื่องจากได้ไอออนประจุลบ ซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชัน ให้กับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน



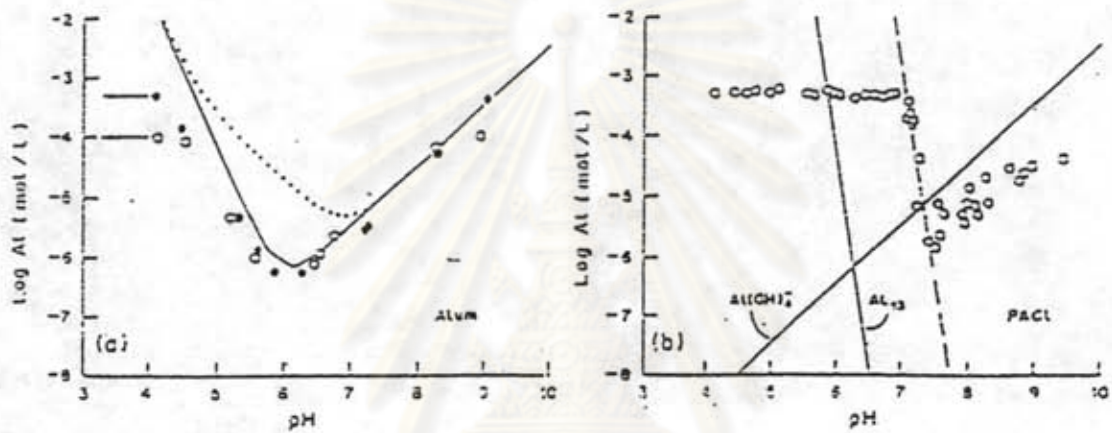
รูปที่ 3.2 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น พื้นที่ภายในเส้นประ เป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประ แต่ยังแรเงาอยู่ มีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (มั่นสิน ดันทุลเวศม์ , 2526)

จากการศึกษาของ John E Van Benschoten และ James K Edzwald ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารส้มและ PACl ได้ข้อสรุปว่า เมื่อใช้กระบวนการสเปคโตรโฟโตเมตริก เพื่อดูค่าการดูดซับแสง พบว่า ค่าดูดซับแสงที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นว่า มีความคงตัวอยู่ในรูปอะลูมิเนียมโพลีเมอร์ (Al polymer) ขณะที่สารส้มจะพบเพียง อะลูมิเนียมโมโนเมอร์ (Al monomer) และจากการศึกษาผลของพีเอชต่ออะลูมิเนียมโพลีเมอร์ จะพบว่าค่าพีเอช 4.2 และ 5.9 มีอะลูมิเนียมโพลีเมอร์ละลายอยู่เป็นจำนวนมากและพีเอช 7.4 อะลูมิเนียมส่วนใหญ่จะเกิดการตกตะกอน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค่าพีเอชต่ำกว่า 6 โพลีเมอร์ของPAClจะเสถียรเหมาะสำหรับการโคแอกกูเลชัน

จากข้อมูล solubility ดังรูป 3.3 แสดงให้เห็นว่าปริมาณสาร $10^{-3}M$. (13.5มก Al/l) อะลูมิเนียมในสารโคแอกกูแลนต์ จะไม่ตกผลึกที่พีเอชต่ำกว่า 7 และ จากรูป 3.3จะมีเส้นสมมุติทางทฤษฎีสำหรับ $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{+7}$ และ $Al(OH)_4^-$ และ $Al(OH)_3$ ในสภาพสมดุลโพลีเมอร์ Al_{13} และข้อมูลจะมีแนวโน้มตามเส้นข้อมูลนี้ ซึ่งอาจจะชี้ได้ว่ามีประจุของโพลีเมอร์เป็นจำนวนมาก ซึ่งจะควบคุมการละลายในช่วงพีเอชดังกล่าว และข้อมูลช่วงพีเอชเป็นค่า จะมีการละลายน้อยกว่าเส้นทางทฤษฎีของ $Al(OH)_4$

สำหรับผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อ PACl มีน้อยกว่าสารส้มที่ค่าพีเอชคงที่ อุณหภูมิต่ำจะมีผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าความซุ่น ค่า electrophoretic mobility และ การละลายของ อะลูมิเนียม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดง Solubility data สำหรับอะลูมิเนียมละลายของ

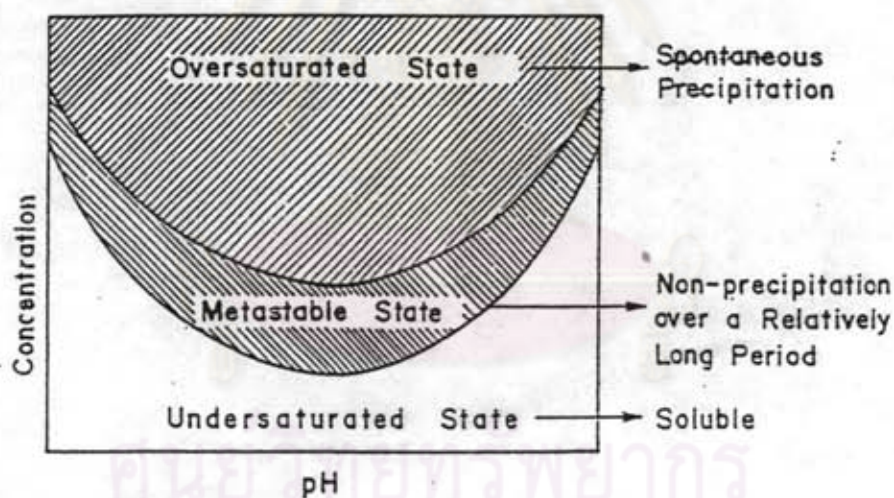
a) สารส้ม b) โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์

(John E Van Benschoten และ James K Edzwald , 1990)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมมุติฐานเบื้องต้นของการกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น

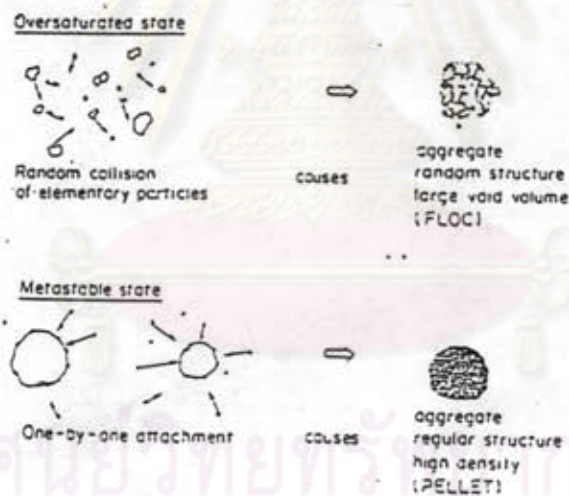
กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนหรือ pellet-floc นี้ยังมีคำอธิบายที่แตกต่างกัน และมีความสับสนในความหมายอยู่มาก (Tambo N and Matsui Y, 1987) , (Yusa M and Gaudin A.M, 1964) สมมุติฐานหนึ่งในคำอธิบายเหล่านี้คือ เม็ดตะกอนจะสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่สารละลายอยู่ในสภาวะเสถียรแบบเมตา (metastable state) กล่าวคือในสภาวะดังกล่าวความเข้มข้นของสารจะมากกว่าอัตราการละลายได้ของสาร แต่ก็ยังไม่มากพอที่จะเกิดสภาวะเกินอิ่ม (supersaturation) และก่อรูปเป็นของแข็ง (solid-state) ดังนั้นสารละลายจึงไม่เกิดการก่อรูปเป็นของแข็ง (precipitation) หรือถ้าเกิดก็น้อยมากแม้ว่าจะปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานานๆ ดังรูปที่ 3.4 แต่เมื่อมีการเติมสารชนิดเดียวกันกับสารละลายนั้นและอยู่ในสภาวะของแข็ง (solid phase) ด้วยให้เพิ่มเข้าอยู่ในสารละลายที่อยู่ในสภาวะเสถียรแบบเมตาจะทำให้สารละลายเหล่านั้นเกิดการจับตัวกันเป็นของแข็งบนพื้นผิวของของแข็งที่เติมลงไปอย่างรวดเร็ว และมีการรวมตัวกันเป็นของแข็งที่ใหญ่ขึ้นทันที



Solubility and Saturation
(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.4 สถานะของสารละลาย เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่างกัน
(Tambo and Matsui, 1987)

ด้วยหลักการนี้เองเราสามารถนำไปตัดแปลงเป็นกระบวนการกำจัดความขุ่นโดย การสร้าง เม็ดตะกอน ทั้งนี้โดยสร้างสภาวะเสถียรแบบเมตะให้เกิดขึ้นในระบบกล่าวคือเมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปใต้น้ำขุ่น จะทำให้อนุภาคที่อยู่ในน้ำถูกทำลายเสถียรภาพเกิดเป็นจุลฟล็อก แต่เนื่องจาก จุลฟล็อกเหล่านี้ยังมีขนาดและหรือความเข้มข้นไม่มากพอ ที่จะเกิดการจับตัวกันได้เอง แต่เมื่อทำให้ จุลฟล็อกเหล่านี้เข้าไปรวมอยู่กับเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และแข็งแรงภายในอุปกรณ์สร้างเม็ด ตะกอน ก็จะทำให้เกิดการจับตัวกันระหว่างจุลฟล็อกกับเม็ดตะกอนเหล่านั้นโดยเป็นการจับกันแบบหนึ่ง ต่อหนึ่ง (one by one attachment) ทำให้ไม่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายในหรือมีน้อยมาก จึงเกิด เป็นเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูง (pellet flocs) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (Tambo N and Matsui Y, 1987)



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบการจับตัวเป็นของแข็งในสภาวะปกติกับสภาวะเมตะ (Tambo and Matsui, 1987)

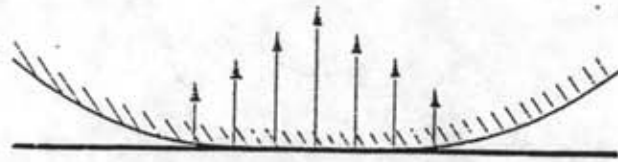
Yusa, Suzuki and Tanaka (1975) ได้อธิบายไว้ถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการจับตัวกันของอนุภาคซึ่งทำให้ได้เป็นเม็ดตะกอนกลมและแน่นนั้นว่าโดยปกติแรงดันภายนอกเม็ดฟล็อก (หมายถึงเม็ดฟล็อกปกติที่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายใน) กระทำต่อเม็ดฟล็อกอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทุกทาง แรงดันภายนอกเหล่านี้มีความสมดุลกับแรงดัน เนื่องจากของเหลวหรือน้ำภายในฟล็อก ฟล็อกจึงอยู่ในสภาพคงตัว ในทางตรงกันข้ามหากมีแรงดันภายนอกเม็ดฟล็อกกระทำต่อเม็ดฟล็อกอย่างไม่สม่ำเสมอ และแรงยึดเกาะกันภายในอนุภาคตะกอน หรือจุลฟล็อก (microfloc) แข็งแรงกว่าแรงกระทำภายนอกของเหลวภายในเม็ดฟล็อกจะถูกขับออกมาตรงจุดที่แรงกระทำภายนอกมีค่าน้อยที่สุดโมเลกุลของน้ำที่แทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกจะลดจำนวนหรือปริมาณลง อนุภาคตะกอนที่อยู่ในเม็ดฟล็อก จึงเคลื่อนตัวเข้ามาชิดและอัดตัวกันได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้นฟล็อกที่เกิดขึ้นจึงมีความหนาแน่นสูงตกตะกอนได้เร็วกว่าฟล็อกธรรมดาทั่วไป

สรุปได้ว่าการสร้างเม็ดตะกอน จะต้องมีการให้พลังงานกลจากภายนอกเข้าสู่ระบบซึ่งก็คือการทำให้เกิดภาวะไม่สมดุลบนเม็ดฟล็อก ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยเทคนิค 2 อย่างคือ เทคนิคการกลิ้งฟล็อกไปบนพื้นผิวเรียบหรือโค้งและเทคนิคการผลักเม็ดฟล็อกให้ชนกันเองหรือผลักเม็ดฟล็อกให้ชนกับพื้นผิวเรียบหรือผิวโค้ง ซึ่งอธิบายได้โดยละเอียดดังนี้

1. เทคนิคการกลิ้ง (rolling technique)

สมมุติว่าเม็ดฟล็อกอยู่ในสภาพอีลาสติก (elastic) คือมีความหยุ่นตัวและให้เม็ดฟล็อกสัมผัสกับพื้นผิวที่จุด ๆ หนึ่งซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ แรงกระทำที่จุดนั้นมีค่าน้อยมากจนไม่ทำให้ฟล็อกเปลี่ยนรูปร่าง หรือเกิดการยุบตัว ณ จุดสัมผัส ถ้าเม็ดฟล็อกอยู่นิ่ง ๆ เราจะสามารถเขียนรูปแสดงการกระจายแรงดันที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผิวฟล็อกได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 กล่าวคือแรงดันภายนอกมีค่าสูงสุด ณ บริเวณจุดกึ่งกลางของพื้นผิวสัมผัสซึ่งเป็นจุดที่ฟล็อกจะเกิดการยุบตัวมากที่สุด และแรงดันภายนอกจะค่อย ๆ ลดลง เมื่ออยู่ห่างออกไปจากจุดสัมผัสตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



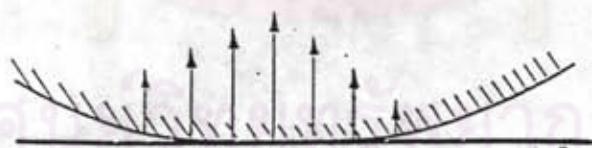
Pressure Distribution Around
the Contact Area When a
Floc is at Rest on a Solid Plane

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

รูปที่ 3.6 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกหยุดนิ่ง (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

หากมีการกลิ้งเม็ดฟล็อกไปข้างหน้า จุดที่มีแรงดันภายนอกสูงสุดก็จะกลายเป็นจุดสัมผัสถัดไปทางข้างหน้าของตำแหน่งเดิม ถ้ากลิ้งเม็ดฟล็อกไปข้างหน้าเรื่อย ๆ จุดที่มีค่าแรงดันสูงสุดก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปข้างหน้าเรื่อย ๆ จนครบรอบซึ่งสามารถเขียนรูปแสดงการกระจายแรงกระทำภายนอกที่มีต่อเม็ดฟล็อกได้ ดังรูปที่ 3.7 อันแสดงให้เห็นว่าการกลิ้งฟล็อกไปบนผิวเรียบหรือโค้งทำให้แรงซึ่งกระทำต่อฟล็อกไม่สม่ำเสมอ ฟล็อกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) เป็นผลให้หน้าซึ่งแทรกอยู่ในเม็ดฟล็อกถูกรีดออกมาดังกล่าวข้างต้น

← Direction of Movement



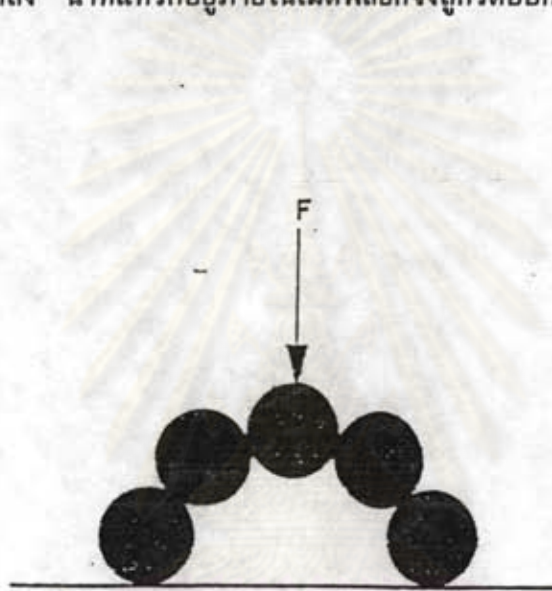
Pressure Distribution Around
the Contact Area When a
Floc Rolls Over Along a Solid Plane

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

รูปที่ 3.7 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกกลิ้ง (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

2. เทคนิคการชน (collision technique)

หากสามารถบังคับให้ฟล็อกขนาดเล็กวิ่งเข้ามาชนกัน หรือวิ่งเข้าชนพื้นผิวเรียบ หรือโค้งผลที่เกิดขึ้นก็คือช่องว่างภายในฟล็อกลดน้อยลงและฟล็อกจะยึดเกาะกันอย่างแข็งแรงขึ้นเนื่องจากการชนกันนั้นทำให้เกิด มีแรงกระทำที่ภายนอกเม็ดฟล็อกเป็นผลให้เกิดแรงเฉือนระหว่างอนุภาคเล็กๆ ภายในฟล็อกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคเล็กๆขึ้นใหม่ ในลักษณะที่ชิดกันเป็นผลให้ช่องว่างภายในฟล็อกลดลง น้ำที่แทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกจึงถูกรีดออกมาดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



Internal Constitution of a
Loose Bulky Floc Produced by
Normal Flocculation

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975.)

รูปที่ 3.8 การจัดเรียงของอนุภาคภายในฟล็อกก่อนชน

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)



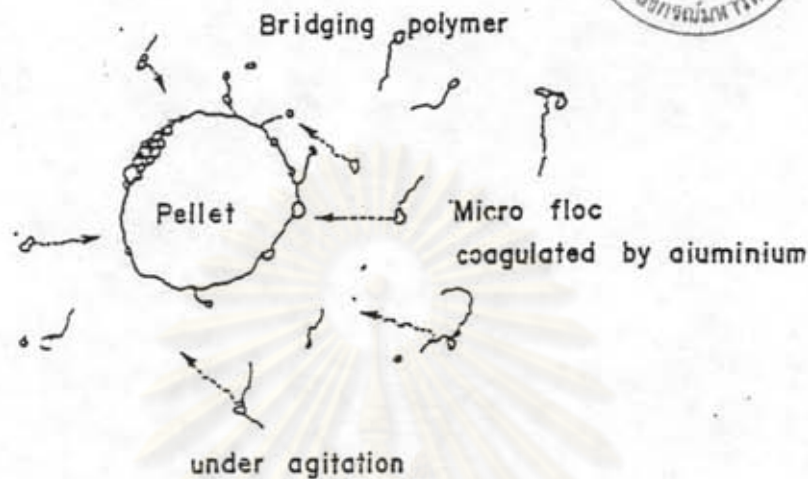
Internal Constitution of a
Compact Floc Produced as the
Result of Pellet Flocculation
(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

รูปที่ 3.9 การจัดเรียงของอนุภาคภายในฟล็อกหลังชน
(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

หลักการของการสร้างเม็ดตะกอน

การสร้างเม็ดตะกอนให้เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดความขุ่น จำเป็นจะต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งเกิดขึ้นในถังกวนเร็ว และส่วนสร้างเม็ดตะกอนจากคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว ซึ่งเกิดขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน (pelletizer) ซึ่งในที่นี้จะใช้แบบไหลขึ้น

กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนนั้น เริ่มโดยการเติมโคแอกกูแลนต์ชนิดโลหะ (metal coagulant) เช่น เกลืออะลูมิเนียม (aluminum salts) บัณฑิต ชาญรงค์ (2535) และปริญญา ณ นคร (2535) เริ่มการสร้างเม็ดตะกอนโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminum chloride, PACl) ที่พีเอชในช่วง 6.8-7.5 เพื่อให้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ในรูปที่สามารถจับตัวเป็นของแข็งในการทดลองนี้เลือกใช้ PACl เติมน้ำลงในถังกวนเร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในขั้นตอนนี้ออนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะเกิดการรวมตัวกันจนกลายเป็นจุลฟล็อก (microflocs) หนึ่งที่บริเวณล่างสุดของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น จะมีการเติมโพลีเมอร์ผสมกับน้ำซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากถังกวนเร็ว เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในการเกาะติดกันให้กับ จุลฟล็อก ซึ่งจะได้เม็ดตะกอนที่แข็งแรงและมีความหนาแน่นสูง เนื่องจากไม่มีโมเลกุลน้ำแทรกภายในฟล็อก หรือมีน้อยมากดังรูปที่ 3.10

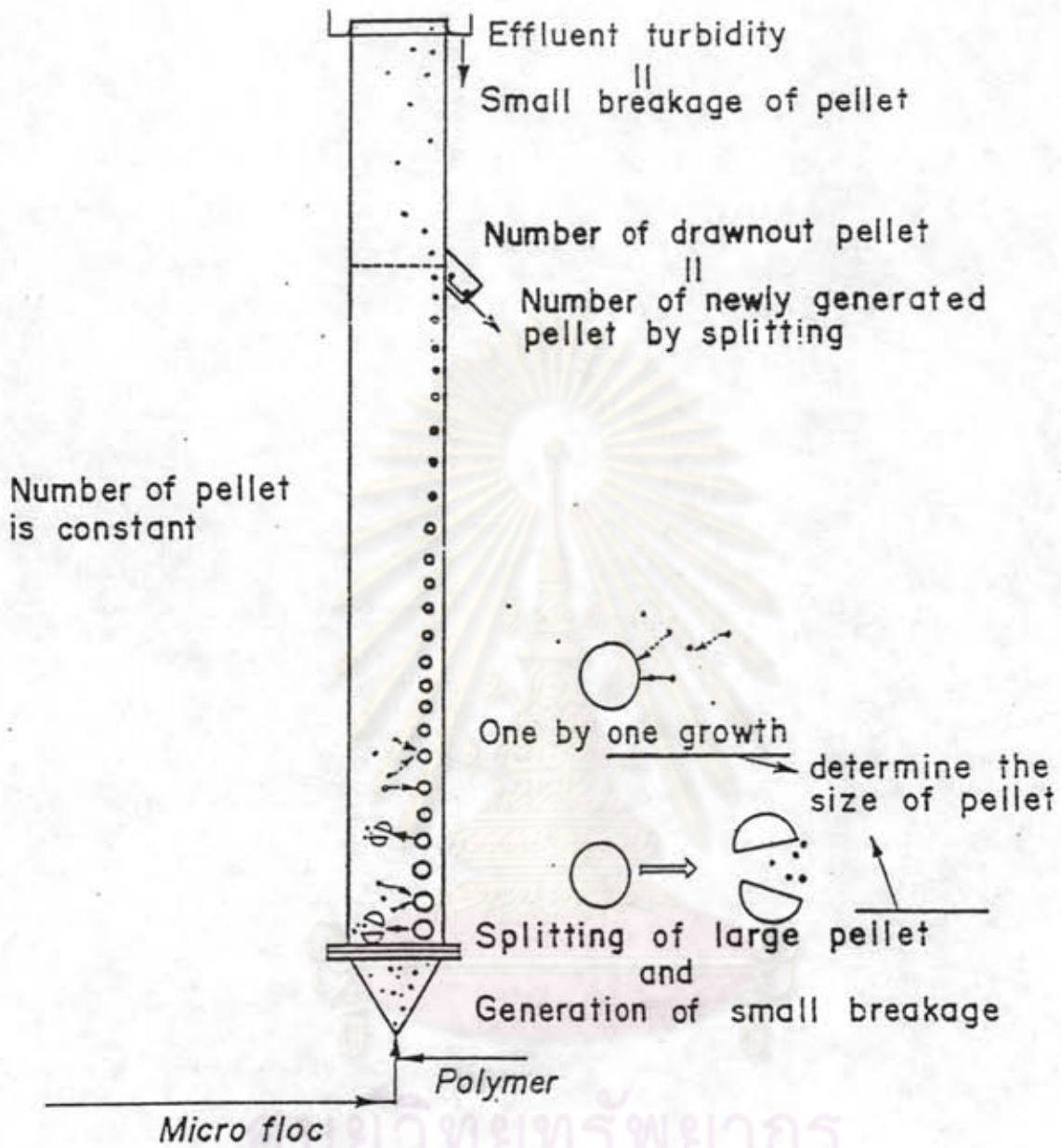


Application of Metastable State
Operation for Clay Suspension

(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.10 การจับตัวกันแบบหนึ่งต่อหนึ่งภายใต้สภาวะเสถียรแบบเมตะ
(Tambo and Matsui, 1987)

หลังจากนั้นการกวนช้าด้วยความเร็วเกรเดียนท์ปานกลาง (moderate- agitation) จะช่วยป้องกันมิให้เกิดการโตแบบสุ่มของฟล็อก (random growth) กล่าวคือ ความปั่นป่วนของน้ำจะทำให้ฟล็อกหลวม (loose flocs) ที่รวมตัวกันอย่างไม่แน่นแตกออกจากกันแล้วเคลื่อนตัวไปสัมผัสกับจุลฟล็อกเกิดการรวมตัวกันแบบหนึ่งต่อหนึ่งอีกครั้งได้เป็นเม็ดตะกอนทรงกลม แกว่ง มีความหนาแน่นสูงสามารถทนต่อความปั่นป่วนของน้ำได้ดี นอกจากจะพบว่าเม็ดตะกอนขนาดเล็กจะอยู่ส่วนบน และขนาดใหญ่จะอยู่ส่วนล่างของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้นนี้ ทั้งนี้เพราะเม็ดตะกอนขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมากกว่า ดังรูปที่ 3.11



Steady State Mass Balance

(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิดเม็ดตะกอนที่สภาวะคงที่

(Tambo and Matsui, 1987)

การใช้โพลีเมอร์เป็นสารฟล็อกคูแลนท์

1. ชนิดของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นกลุ่มของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะมีโมโนเมอร์ ซึ่งสามารถนำพาประจุหรือแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดสารประกอบที่มีประจุไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ อาจมีประจุบวก (cationic polyelectrolytes) หรือมีประจุลบ (anionic polyelectrolytes) โดยทั่วไปสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 10,000,000 ปัจจุบันมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นเป็นลำดับ ทั้งเพื่อการปรับสภาพน้ำดีและการบำบัดน้ำเสีย

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์มักมีทั้งที่ได้จากธรรมชาติเช่น แป้ง ยางไม้ สาหร่ายทะเลสกัด และสารที่ได้จากการสังเคราะห์ แต่จากกระบวนการสังเคราะห์ทำให้สามารถควบคุมคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ทั้งปริมาณ ชนิดประจุ และน้ำหนักโมเลกุล ฯลฯ สารดังกล่าวจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการใช้งาน สารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้สำหรับการปรับแต่ง สภาพน้ำดิบเพื่อการอุปโภค-บริโภค จำเป็นต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยด้วยเนื่องจากมักมีสารเจือปนตกค้างอยู่เสมอตารางที่ 3.1 เป็นตัวอย่างของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน

การจัดหมวดหมู่สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ สามารถกระทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติ และประโยชน์การใช้งานกล่าวคืออาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดโครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุล หรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโมเลกุล ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงประเภทของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นตามคุณสมบัติประการสุดท้ายที่กล่าวมานี้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน (Bratby, 1980)

Name	Structure	Charge type	Molecular weight	Manufacturer and location
Magnifloc 835A	Polyacrylamide $\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}} \right]_x$ (with some -COO-groups)	Anionic, high charge	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 820A	As above	Anionic, intermediate charge	8×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 837A	As above	Anionic, low charge	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc A-21	Polystyrene sulfonic acid, $\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{SO}_3(-)}{\text{CH}} \right]_x$	Anionic, very high charge		Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Wasproloc 20	Causticized potato starch, crosslinked with borate	Anionic	Very high	Gamlen Chemical Co. South San Francisco, California
Magnifloc 905N	Polyacrylamide, very few -COO-groups	Nonionic	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc N-17	As above	Nonionic	Very high, approx. $5-10 \times 10^6$	Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Betz 1260	Polyacrylamide copolymer	Cationic	Very high $10 \times 10^6?$	Betz Laboratories, Inc. Trevose, Pennsylvania
Califloc T	Poly (diallyldimethyl ammonium chloride) (quarternary amine)	Cationic, very high charge	0.5×10^6	Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Califloc B	Amine?	Cationic, moderate charge		Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Magnifloc 507C	Tertiary amine	Cationic, moderate charge	10^6-10^7	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 573C	Quarternary amine	Cationic, very high charge	$5 \times 10^6-10^7$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 2535	Tertiary amine/polyacrylamide copolymer	Cationic, moderate charge	$1-3 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Primaflor C-7	Polyamine-HSO ₃	Cationic, fairly high charge	$1-2 \times 10^6$	Rohm and Haas Co. Philadelphia, Pennsylvania
Alcolac DV530	Polyethyleneimine $\left[(\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2)_x \right]$	Cationic	Approx. 5×10^6	Alcolac Inc. Baltimore, Maryland
Fyloc 12	As above	Cationic	Approx. 6×10^6	Dow Chemical Co. Midland, Michigan

Note: While other equally effective polymers could have been substituted for those selected for this table, the availability of further information, such as molecular weight and structure, in many cases determined the polymers chosen here.

2. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวก (cationic polyelectrolytes)

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่มีประจุบวกมีหลายรูปแบบได้แก่

2.1 โพลีเอมีน เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 10^5 แต่มีความเป็นประจุบวกสูงเช่น โพลีเอทีลีน อามีน และ โพลีเอทีลีน ไอมีน (PEI) สารกลุ่มนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ และใช้บ้างในการศึกษาปฏิกิริยารวมตะกอน

2.2 โพลีเอทีลีน ควอเทอริ เป็นสารที่ไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช มีความต้านทานต่อการสลายตัวโดยคลอรีนมากกว่าโพลีเมอร์ทั่วไป จึงมักมีความสำคัญในการคลอรีนหน้าดิบ

2.3 แคทไอออนนิค ไซยานามีน เป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำประมาณ 1×10^3 ถึง 5×10^3 เริ่มแรกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษ แต่ก็พบว่าสามารถแสดงปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยเช่นกัน

2.4 คาโบโมอิล โพลีเมอร์แคตไอออน เป็นกลุ่มสารที่มีความสำคัญในทางการค้า และใช้งานได้เอนกประสงค์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 10^6 มีความหนืดสูง และมีสาร ที่ไวต่อปฏิกิริยาอยู่น้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย

2.5 โพลี แอลฟา-ไวนิลไมดาโซลีน เป็นโพลีเมอร์พวกโพลีไซคลิกอามาไรด์ มีโครงสร้างพิเศษสำหรับการเป็นสารรวมตะกอนทั้งนี้เพราะมีความเป็นประจุบวกสูงมาก และมีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางจนถึงสูง

2.6 โพลีไดอัลลีสเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นมีน้ำหนักโมเลกุลช่วงต่ำถึงปานกลาง (น้อยกว่า 10^6) มีความต้านทานต่อคลอรีนและไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช

2.7 ไดมัททิล อะมิโนอัลคิล อะครีลิก และ เมทาซาคลิกเอสเทอร์โพลีเมอร์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีความไวในสภาพตัวกลางที่เป็นกรดหรือเบส ใช้เป็นสารรวมตะกอน สารกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างสูง

2.8 เอ็น - ไดอัลคิลอะมิโนอัลคิล อะครีลาไมน์ โพลีเมอร์ โพลีเมอร์กลุ่มนี้ได้รับความสนใจในการใช้เป็นสารรวมตะกอน เพราะมีเสถียรภาพต่อการไฮโดรไลซิส มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

3. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ให้ประจุลบ (anionic polyelectrolytes)

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ โดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูงถึงสูงมากมักใช้เป็นสารรวมตะกอน โพลีเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลท ไอออน ได้แก่ พวกโพลีเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิเลท เช่นไฮโปอะคลีลิก แอซิด และพวกที่มีหมู่ซัลโฟนิค แอซิด เช่นเกลียวโซเดียมของโพลีสไตรีน ซัลโฟนิค แอซิด

4. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ(nonionic polyelectrolytes)

โมโนเมอร์ที่มีประจุต่ำกว่า 1% ในสารละลายโพลีเมอร์เหล่านี้จะทำให้เกิดการรวมตะกอน โดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือสูงมาก ตัวอย่างสารรวมตะกอนที่สำคัญได้แก่ โพลีเอทิลีน ออกไซด์ และ โพลีอะคลีลาไมด์ ส่วนโพลีไวนิล โพลีไอลไดนอน มักถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

5. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ทั้งประจุบวกและลบ (polyampholytes)

สารกลุ่มนี้เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรดและเบส มักจะให้ประจุบวกที่มีพีเอชต่ำ ให้ประจุลบที่มีพีเอชสูง และเป็นกลางทางประจุที่ Isoelectric pH ตัวอย่างเช่น สารรวมตะกอนที่เรียกว่า Switterion flocculant ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วยประจุบวกหรือลบบ่อยมากภายในโมเลกุล

กลไกทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารโพลีอิเล็กโทรไลต์

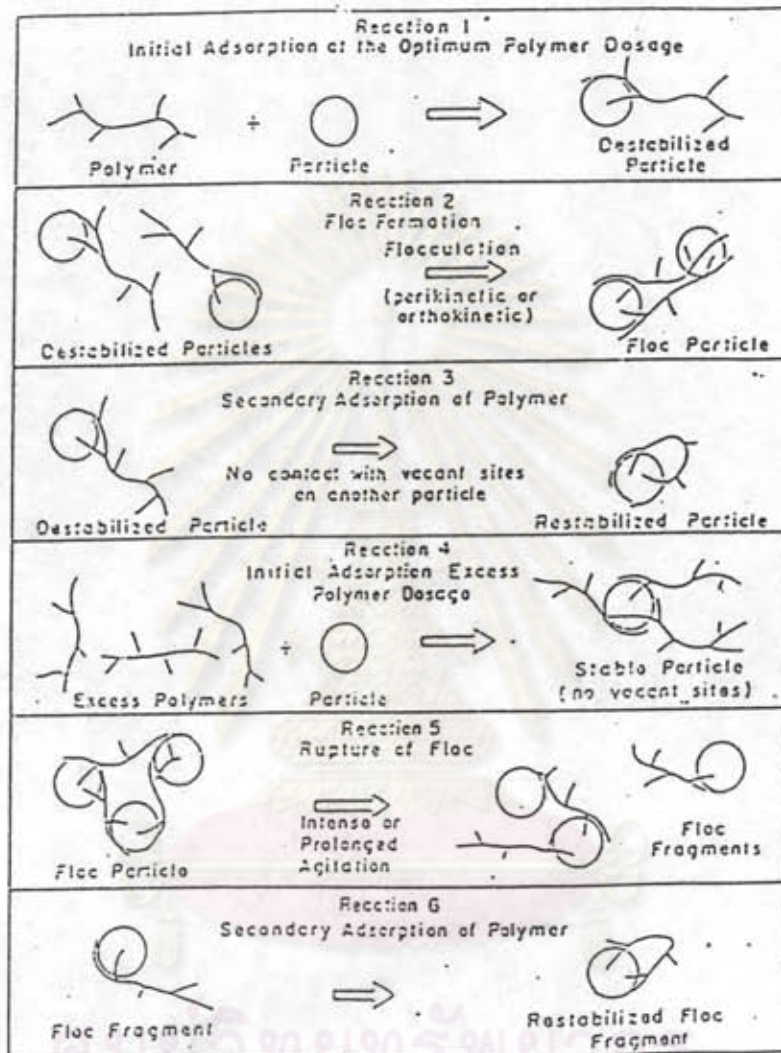
มีกลไกหลัก 2 กลไกคือ

1. กลไกสร้างสะพาน (bridging mechanism)
2. กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิต (electrostatic patch mechanism)

1. กลไกการสร้างสะพาน (bridging mechanism)

จากรูป 3.12 ในปฏิกิริยาที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะอยู่ โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะติดอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ซึ่งอนุภาคเหล่านี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมดังปฏิกิริยาที่ 2 ซึ่งการต่อเชื่อมจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีตำแหน่งว่างและมีโพลีเมอร์และเมื่อปลายอิสระไม่มีการเกาะจับบนอนุภาคอื่นปลายอิสระก็จะจับบนอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 3 ทำให้ไม่มีปลายอิสระจับอนุภาคอื่น ๆ และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาค สำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง เรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (Restabilized particle) การใช้โพลีเมอร์มากเกินไป เพราะโพลีเมอร์มีหลายโมเลกุล ไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ ดังปฏิกิริยาที่ 4 อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไป จะทำให้ฟล็อกแตกเป็นส่วน ๆ ดังปฏิกิริยาที่ 5 ทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 6 ทำให้เสถียรภาพกลับคืนมาใหม่อีก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์
(มั่นสิน ตันทุลเวศม์ , 2526)

2. กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic patch-mechanism)

กลไกนี้ใช้อธิบายพฤติกรรมการเกาะติดหรือทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในกรณีที่ใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบในการใช้เป็นสารช่วยรวมตะกอน หลังจากผ่านการทำลายเสถียรภาพด้วยสารรวมตะกอนจำพวกโลหะมาก่อนแล้ว และเกิดปรากฏการณ์แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ค่อนข้างรุนแรง โดยที่ตามปกติอนุภาคต่างๆในสับสเตรต (substrate) มักมีตำแหน่งที่มีประจุลบบนพื้นผิวค่อนข้างจะคงตัว เมื่อโมเลกุลของโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกถูกเติมลงไปบนสับสเตรตนั้นจะเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวอนุภาคผ่านพันธะทางไฟฟ้าสถิตย์ โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและมีความหนาแน่นของประจุสูงมากและมากกว่าประจุลบบนพื้นผิวอนุภาคและจะทำลายประจุลบ ไม่เพียงแต่บริเวณที่เกาะติดเท่านั้น แต่จะรวมถึงส่วนอื่น หรือทั้งหมดบนผิวอนุภาคได้ แล้วก่อตัวเป็นประจุบวกห้อมล้อมขอบเขตของตำแหน่งประจุลบดังรูปที่ 3.13 ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างอนุภาคโดยตรงและลดแรงผลักระหว่างอนุภาคเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นได้ โดยอนุภาคที่อยู่ใกล้ชิดกันและอยู่ในแนวเดียวกันสามารถ ให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่รุนแรง



รูปที่ 3.13 ความเป็นไปได้ในการจัดเรียงตัวของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์บนอนุภาคที่มีความหนาแน่นประจุลบต่ำ (Bratby, 1980)

การใช้โพลีเมอร์ในกระบวนการเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น

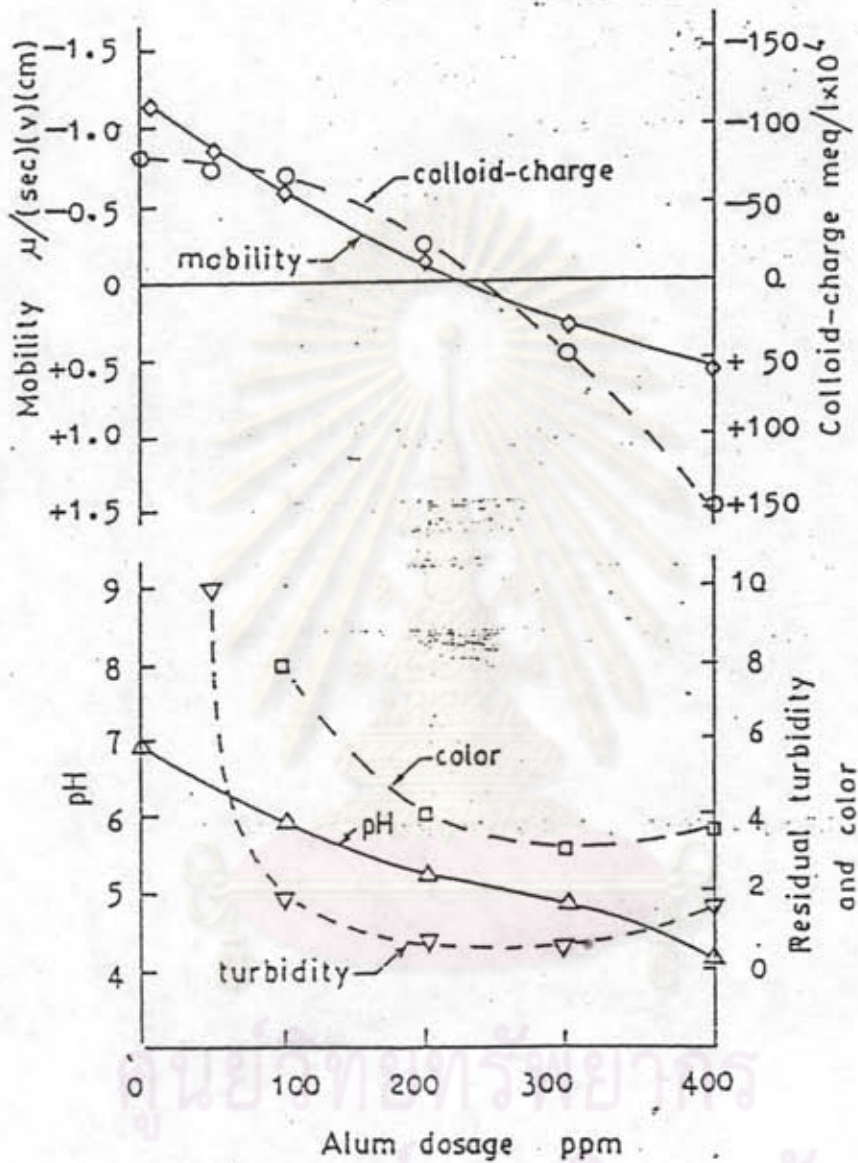
ในกระบวนการเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้นหลังจากการเติมโคแอกกูแลนต์เช่น PACI ลงในน้ำดิบแล้ว จะมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจนได้อนุภาคเบื้องต้น เติมน้ำโพลีเมอร์หลังเกิดอนุภาคเบื้องต้น จะช่วยให้การสะสมตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้นทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของโพลีเมอร์จะเป็น สะพานเชื่อมอนุภาค เบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมตัวกันได้เร็วและเกิดเป็นอนุภาคตะกอนที่มีความแข็งแรงมากขึ้น โคแอกกูแลนต์เอ็ดที่ใช้หลังจากการเติม PACI จึงมักเป็นพวกที่ไม่มีประจุหรือโพลีเมอร์ประจุลบ เพราะโพลีเมอร์เหล่านี้มีโมเลกุลใหญ่ เหมาะที่จะใช้เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้น ให้ได้ฟล็อกที่แข็งแรงมีน้ำหนักมากแยกออกจากน้ำได้ดี อย่างไรก็ตามพบว่าโพลีเมอร์ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของฟล็อก

การศึกษาที่ผ่านมา

- Kawamura (1967) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่น่าเทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์มาใช้ในกระบวนการโคแอกกูแลชั่น โดยทดลองกับน้ำธรรมชาติและน้ำสังเคราะห์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการวัดศักย์ไฟฟ้า Zeta potential แล้วสรุปว่าเทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคในกระบวนการโคแอกกูแลชั่น ได้ดีเช่นเดียวกับการวัดศักย์ไฟฟ้า (ดูรูปที่ 3.14) และยังมีข้อดีกว่าคือ การไทเทรตคอลลอยด์สามารถครอบคลุมอนุภาคได้ทุก ๆ ขนาดแม้แตขนาดซึ่งเครื่อง Zeta meter วัดศักย์ไฟฟ้าไม่ได้ และยังสามารถนำประจุที่วัดได้ไปใช้คำนวณหาปริมาณสารส้มที่เหมาะสมได้ โดยมีความสัมพันธ์กับความเป็นต่าง ดังสมการ

$$P = K_1 (A) + K_2 (C)^n$$

เมื่อ P	คือ ปริมาณสารส้มที่เหมาะสม
A	คือ ความเป็นต่าง (alkalinity)
C	คือ ประจุคอลลอยด์ของอนุภาค
K_1, K_2, n	คือ ค่าคงที่



รูปที่ 3.14 การตรวจสอบกระบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้า และการไทเทรตคอลลอยด์ (Kawamura , 1967)

- J.T. Novak และ J.H. O'Brien (1975) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้โพลีเมอร์ กับ สลัดจ์ทางเคมี พบว่า

1. โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูง จะทำให้การรีดน้ำออกจากสลัดจ์ดีขึ้นโดยการลดความต้านทาน จำเพาะของสลัดจ์ (sludge specific resistance)

2. โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงจะทำให้การอัดตัวของสลัดจ์เพิ่มขึ้น แต่มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อย ต่อความเข้มข้นของตะกอนแห้ง

3. จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพลีเมอร์ กับความเข้มข้นของของแข็ง สลัดจ์ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งความแตกต่างของความเข้มข้นโพลีเมอร์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับพีเอช ของสลัดจ์และความเข้มข้นต่าง ๆ ของตะกอนแห้งอัดแห้ง

4. ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่ใช้ลดลงเมื่อเพิ่มมวลโมเลกุลของโพลีเมอร์ ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า $1 \cdot 10^6$ จะไม่มีประสิทธิภาพในการรวมสลัดจ์ทางเคมี

5. ค่าพีเอชของสลัดจ์มีผลต่อโพลีเมอร์ โพลีเมอร์นอนไอออนและโพลีเมอร์แอนไอออน สามารถทำงานได้ดีที่ พีเอชระหว่าง 6-8.5 โพลีเมอร์แคตไอออนทำงานได้ดีที่ พีเอชเป็นกลางหรือ เป็นกรดเล็กน้อย

- Yusa , Suzuki และ Tanaka (1975) ได้ทำการศึกษาเรื่อง separating liquid from solids by pellet flocculation ได้ใช้เทคนิคการกลึงและเทคนิค การชนอธิบายว่า เมื่อให้แรงกลที่ไม่ สม่าเสมอเพียงเล็กน้อยกระทำกับฟล็อกในช่วงเวลาเล็กน้อยก็จะทำให้น้ำออกจากเม็ดฟล็อกและทำให้เกิดฟล็อกที่อัดแน่นแข็งแรง

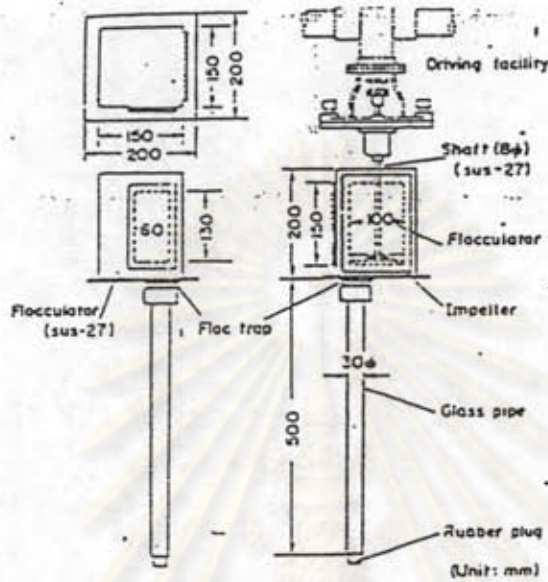
- R.Klute และ U.Neis (1976) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเสถียรภาพของสารแขวนลอยของ อนุภาคของดินคาโอลินที่มีสารประกอบอินทรีย์ปนอยู่โดยใช้โพลีเมอร์แคตไอออนเป็นสารรวม ตะกอน โดยการแปรความเข้มข้นของกรดเบนโซอิกและกรดฮิวมิกต่าง ๆ กัน และใช้วิธี Liquid Saintillation , วิธีการนับอนุภาค , วัดการดูดกลืนโพลีเมอร์บนพื้นผิวของอนุภาคดินคาโอลิน , หา ความเปลี่ยนแปลงของจำนวนอนุภาคสัมพัทธ์ นอกจากนี้ยังทดลองถึงด้านพลังงานกลกับการดูดกลืน

และการจับตัวของอนุภาค พบว่าอัตราการดูดติดผิวและการรวมตะกอนของโพลีเมอร์ มีนัยสำคัญกับความเข้มข้นของกรดชีวมิติที่มีอยู่ในสารละลายแต่ไม่มีผล กับกรดเบนโซอิก ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการฟุ้งพาอาศัยสารประกอบอินทรีย์ในปริมาณการใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ครั้งหนึ่ง อาจทำให้ลักษณะคงที่ในการแขวนลอยของอนุภาคดินคาโอลินเพิ่มขึ้นหรือลดลง

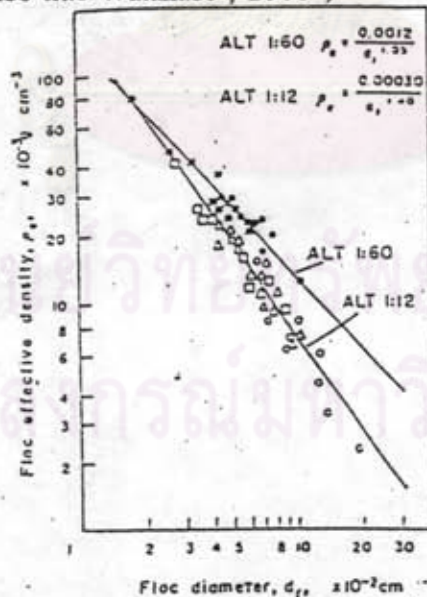
- Wang (1978) ได้ใช้เทคนิคการไทเทรตคอลลอยต์วัดหาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ แล้วสรุปว่าประจุไฟฟ้าและความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันแบบสโตยชิโอเมตริกการไทเทรตคอลลอยต์ จึงสามารถใช้ตรวจสอบความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ ได้อย่างดี

- Tambo และ Watanabe (1978) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางกายภาพของฟล็อกในแง่ที่เกี่ยวกับความหนาแน่นของฟล็อก ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือดังรูป 6.1 ซึ่งประกอบด้วยกระบอกที่ใช้ในกระบวนการฟล็อกคูเลชัน และท่อตกตะกอนซึ่งตั้งอยู่ตรงกันกระบอกสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน ฟล็อกจะถูกนำไปยังท่อตกตะกอนโดยผ่านแผ่นกั้นระหว่างกระบอกสำหรับกระบวนการฟล็อกคูเลชัน และท่อตกตะกอน ซึ่งความเร็วในการตกตะกอนและขนาดของฟล็อก จะถูกวัดโดยกลองที่วางอยู่ด้านข้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและในการทดลองนี้ใช้สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์และปรับค่าพีเอช โดยใช้ 0.025 นอร์มอลของ NaOH และใช้ค่าความเร็วรอบในการกววนเร็ว 100 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งขณะกววนเร็วก็จะผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารโคแอกกูแลนต์หลังจากนั้นก็ทำการกววนช้า โดยใช้ค่าความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีทำการวัดอัตราเร็วในการตกตะกอนและขนาดของฟล็อกที่ 20 นาทีแรกของการกววนช้าได้ทุก ๆ 10 นาที ซึ่งค่าความหนาแน่นของฟล็อกสามารถคำนวณได้โดยใช้ความเร็วในการตกตะกอนและขนาดของฟล็อกที่ได้จากการทดลองและค่าคงที่บางค่าเช่น dragcoefficient ความหนืดและความหนาแน่นของน้ำ , ค่าความโน้มถ่วงโลก โดยแทนค่าเหล่านี้ลงในสมการของสโตคเพื่อหาค่าความหนาแน่นของฟล็อก ซึ่งจากการทดลองสรุปได้ว่าความหนาแน่นยังผลของฟล็อกมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในสเกลของกราฟฟล็อกการิทึม และพบว่าอัตราส่วนแอลที (ALT ratio) ซึ่งมีนิยามคือปริมาณความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ต่อความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอย จะมีผลต่อความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดจากอนุภาคดินเหนียวและอะลูมิเนียม เมื่อให้ค่าขนาดฟล็อกคงที่จะพบว่าอัตราส่วน ALT จะลดลงขณะที่ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นดังรูป 3.16 , 3.17 , 3.18 , 3.19 และที่ค่าพีเอชในช่วง 6.5 ถึง 8 จะมีผลต่อความหนาแน่นฟล็อกน้อยมากเมื่อค่าอัตราส่วนแอลทีมีค่ามากกว่า -4×10^2 อย่างไรก็ตามที่ค่าของอัตราส่วนแอลทีต่ำเช่น 2×10^{-2} ค่า

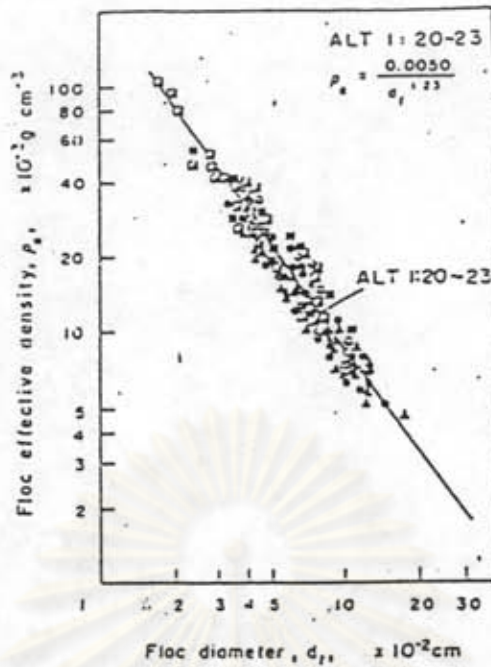
K_p จะลดลง เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นดังรูป 3.20



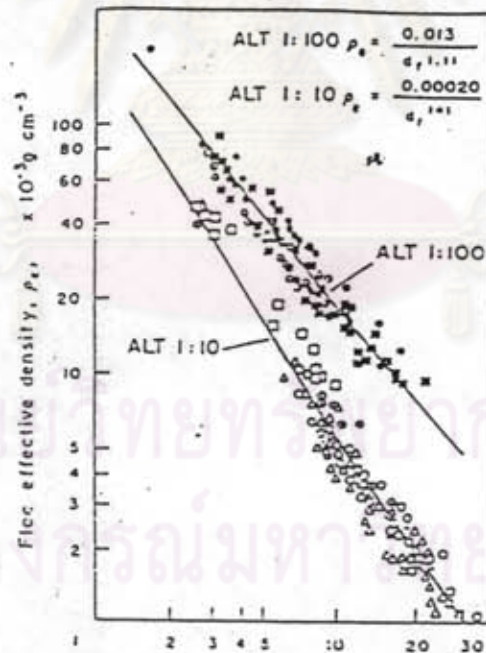
รูปที่ 3.15 แสดงอุปกรณ์การทดลองของTambo และ Watanabe
(Tambo และ Watanabe , 1979)



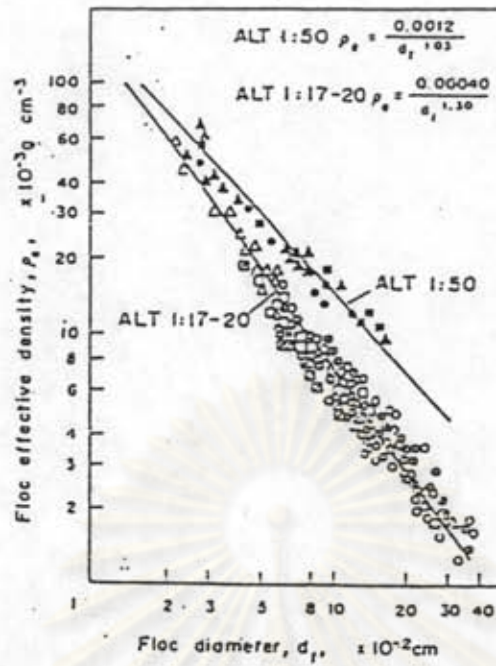
รูปที่ 3.16 แสดงความหนาแน่นของฟล็อกเมื่อใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์
(Tambo และ Watanabe , 1979)



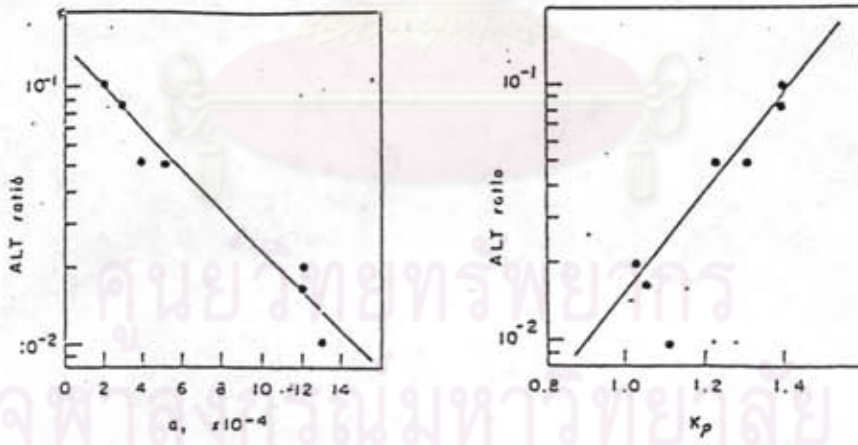
รูปที่ 3.17 แสดงความหนาแน่นของฟล็อกเมื่อใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์
 (Tambo และ Watanabe , 1979)



รูปที่ 3.18 แสดงความหนาแน่นของฟล็อกเมื่อใช้โพไลอะลูมินัมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์
 (Tambo และ Watanabe , 1979)



รูปที่ 3.19 แสดงความหนาแน่นของฟล็อกเมื่อใช้โพลิอะลูมินัมคลอไรด์เป็นสารโคแอกกูแลนต์ (Tambo และ Watanabe ,1978)



รูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแอลทีและค่าคงที่ ทีพีเอชเป็นกลาง (Tambo และ Watanabe ,1979)

- สุชาติ (2526) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการไทเทรตคอลลอยด์ ได้ผลการศึกษาวิจัยดังนี้

1.เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์ สามารถวัดประจุของสารส้ม, โพลีเมอร์ชนิดประจุบวกและอนุภาคประจุลบต่างๆ แต่ทั้งนี้ควรรักษากฎของการไทเทรตของตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบกันให้ใกล้เคียงกัน

2.เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์ สามารถเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างглоการเชื่อมต่อของโพลีเมอร์ประจุลบได้ โดยต้องรักษากฎของการไทเทรตของตัวอย่างที่นำมาเปรียบเทียบกัน ให้ใกล้เคียงกันที่สุด

3.การวัดประจุของน้ำใสของการโคแอกกูเลชั่นแบบกวาด สามารถติดตามและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชั่นนั้นๆ ได้

4.การวัดประจุหลังการกวนผสมของการโคแอกกูเลชั่นที่ใช้กลไกการดูดติดและลดเสถียรภาพ สามารถติดตามและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชั่นนั้นๆ ได้

5.ในการวิจัยนี้ ยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของโคแอกกูแลนต์ กับคุณสมบัติของน้ำที่ทำโคแอกกูเลชั่น จึงยังไม่สามารถใช้เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์ทำนายชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของโคแอกกูแลนต์

6.จากผลการวิจัยในครั้งนี้ ได้ตั้งสมมุติฐานว่า "ในการโคแอกกูเลชั่นแบบกวาด บทบาทของสารส้มประกอบด้วย

1. การสร้างสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวก ซึ่งดูดติดไปบนผิวของอนุภาคเพียงส่วนหนึ่ง

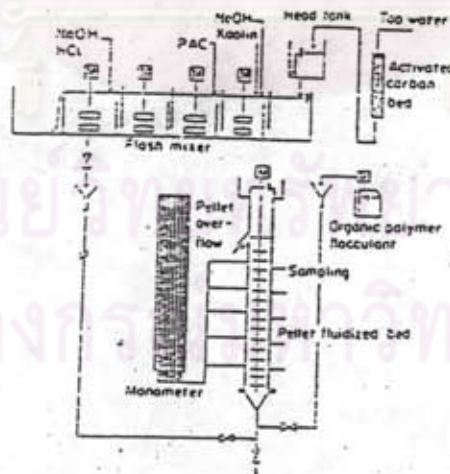
2. การสร้างตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่กำจัดอนุภาคประจุลบ ดังนั้นภาวะต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นของสารส้ม, พีเอช และความปั่นป่วนในการกวนผสม ฯลฯ ที่ทำให้การโคแอกกูเลชั่นแบบกวาดได้ผลดีที่สุด คือภาวะที่ทำให้สารส้มสร้างตะกอนไฮดรอกไซด์ได้มากพอที่กำจัดอนุภาคประจุลบได้ดี และขณะเดียวกันปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกที่เกิดขึ้นก็ไม่มาก

เกินไปจนทำให้มีอนุภาคที่เปลี่ยนเป็นประจุบวก

- J.Mallevalle, A.Bruchet และ F.Fiessinger(1984) ศึกษาถึงความปลอดภัยในการใช้สารโพลีเมอร์ในการผลิตน้ำประปาโดยโพลีเมอร์ที่นำมาศึกษาครั้งนี้เป็นโมโนเมอร์อะครีลาไมน์พบว่าสามารถใช้ความเข้มข้นสูงสุดถึง 500 มก./ล โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและมีประสิทธิภาพเมื่อใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 500 มก./ล. โดยที่ไม่มีผลกระทบต่อรสชาติและขนส่งสลัดจ์ ซึ่งมีเสถียรภาพในน้ำใส มากเกินไป

- Dempsey et al (1985) ได้แสดงให้เห็นว่าโพลีอะลูมินัมคลอไรด์มีความสามารถดีกว่าสารส้ม เมื่อค่าพีเอชมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับสารส้ม ลดค่าความเป็นด่างน้อยกว่าสารส้มและกำจัดสารประกอบอินทรีย์ตามธรรมชาติได้ดีกว่าสารส้ม และโพลีอะลูมินัมคลอไรด์มีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้มเมื่ออุณหภูมิของน้ำมีค่าต่ำ

- Tambo และ Matsui (1987,1989) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารแขวนลอยในน้ำโดยใช้ fluidized pellet bed separator เพื่อบำบัดน้ำที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง ซึ่งใช้แนวความคิดของภาวะเสถียรแบบเมตะ โดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปใต้น้ำขุ่น เพื่อทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์กลายเป็นจุลฟล็อกและเมื่อให้จุลฟล็อกเหล่านี้ไปรวมกับเม็ดตะกอน จะทำให้เกิดการจับตัวระหว่างจุลฟล็อกและเม็ดตะกอนแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one by one attachment) เกิดเป็นเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์การทดลองของ Tambo และ Matsui
(Tambo and Matsui, 1987)

อุปกรณ์การทดลองที่ใช้แสดงในรูป 3.21 โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. เติมน้ำสารโคแอกกูแลนต์ซึ่งในการทดลองนี้ใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์เพียงจำนวนเล็กน้อยลงในสารแขวนลอยของดินคาโอลินไนท์ที่ค่าพีเอชเป็นกลาง เพื่อให้ผิวของอนุภาคดินเหนียวเป็นกลางมีโอกาสชนอนุภาคอื่น ๆ ได้ซึ่งอนุภาคเบื้องต้นก็จะเกิดขึ้นในชุดอุปกรณ์กวนเร็ว

2. บริเวณด้านล่างซึ่งเป็นทางเข้าของฟลูอิดไดซ์ เบด (fluidized bed) จะเติมน้ำสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่มีประจุลบอย่างอ่อน (Accofloc A-110 PWG) เพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวแก่จุลฟล็อก โดยให้จุลฟล็อกสัมผัสกับโพลีเมอร์ซึ่งจะแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคเบื้องต้นด้วย

3. อนุภาคเบื้องต้นจะถูกส่งไปยัง ฟลูอิดไดซ์ เบด จากทางด้านล่างและเกิดการสัมผัสแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ในขั้นแรกของการสร้างเม็ดตะกอนจะเกิดการสร้างเม็ดตะกอนเทียมเป็นตัวทำให้เกิดอนุภาคเบื้องต้น โดยใช้กระบวนการสมานตะกอนที่ใช้กันโดยทั่วไปที่อัตราการไหลขึ้นต่ำและมีการเติมน้ำโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อม และเพิ่มการไหลให้เร็วขึ้นถึง 30 ซม./นาที ภายในเวลา 30 นาที และก็จะรักษาให้คงที่ในอัตราไหลนี้ต่อไป

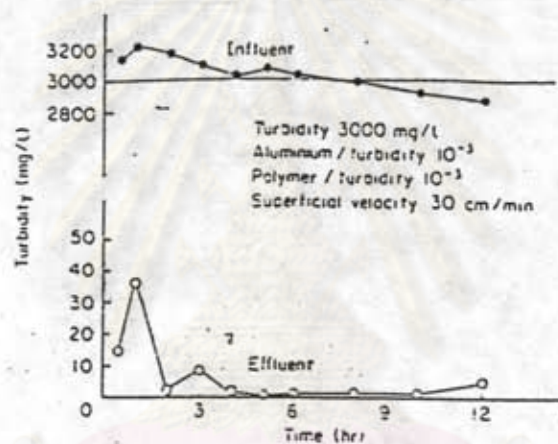
4. เพื่อที่จะทำให้เม็ดฟล็อกเพิ่มขึ้นจากเม็ดฟล็อกเดิม ด้วยการสัมผัสแบบหนึ่งต่อหนึ่งของอนุภาคเบื้องต้น ต้องอาศัยการกวนด้วยแรงและขนาดของใบพัดที่เหมาะสม เพื่อหยุดการเติบโตของกลุ่มฟล็อกที่ไม่ปกติ ซึ่งจะทำให้เม็ดตะกอนที่เกิดขึ้นมีความหนาแน่นสูง และมีความแข็งแรงและจะมีรูปร่างกลม ซึ่งสลัดจ์ของเม็ดตะกอนที่ระบายออกจากชั้นตะกอนจะแยกน้ำออกได้ง่ายและรวดเร็ว

5. ในขั้นตอนการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นได้ถูกทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้งภายใต้เงื่อนไขการทำงานต่าง ๆ ซึ่งขึ้นกับปริมาณอะลูมิเนียมและปริมาณของโพลีเมอร์ ความเข้มข้นของสารแขวนลอยคาโอลิน อัตราการไหลขึ้น อัตราการกวนของใบพัดและรูปร่างช่วงห่างของใบพัด

6. การวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ วัดค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำดิบและน้ำที่ผ่านการบำบัดการเปลี่ยนแปลงของผลต่าง ความดัน ตลอดจนความสูงของชั้นเม็ดตะกอน และลักษณะกายภาพของเม็ดฟล็อก เช่นความหนาแน่นและเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดฟล็อก

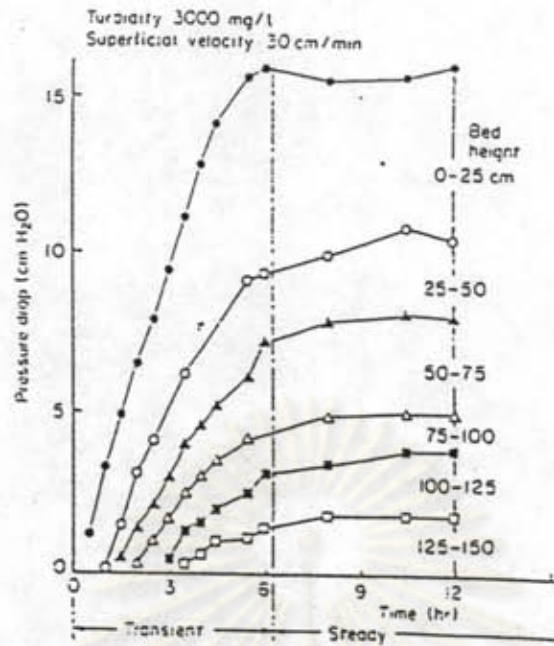
ที่ความเข้มข้นสารแขวนลอย 3000 มก./ล.

ผลการทดลองดังรูปที่ 3.22 ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่มีค่าสูงมากจะถูกบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราไหลขึ้น 30 ซม.ต่อนาที โดยใช้เวลากักน้ำ 5 นาที อัตราส่วนของอะลูมิเนียมกับความขุ่น (AL/T) มีค่าเท่ากับ 10^{-3} และค่าอัตราส่วนของโพลีเมอร์กับความขุ่น (P/T) มีค่าเท่ากับ 10^{-3} และน้ำที่ผ่านการบำบัดมีความใสมาก



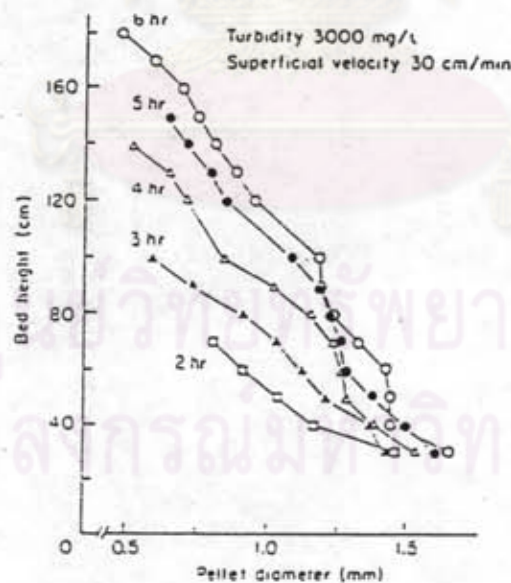
รูปที่ 3.22 สมรรถนะในการกำจัดความขุ่นกับเวลา (Tambo และ Matsui, 1987)

ค่าความดันลดตลอดชั้นตะกอนต่อเวลาจะมีค่าดังแสดงในรูป 3.23 ซึ่งชี้ให้เห็นได้ว่าหลังจาก 6 ชั่วโมงจากการเริ่มเดินระบบชั้นตะกอนจะเข้าสู่ภาวะสมดุลซึ่งค่าความดันลดที่วัดได้มีค่าน้อยมากซึ่งเท่ากับ 15 เซนติเมตรน้ำ



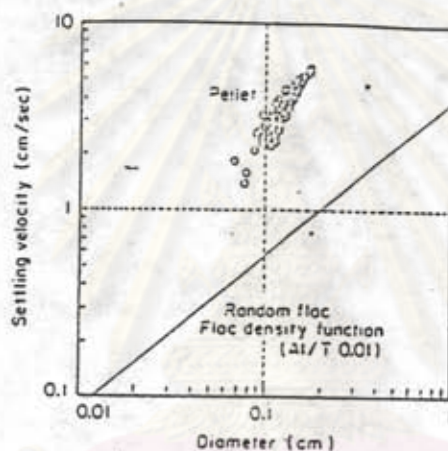
รูปที่ 3.23 กราฟแสดงค่าความดันตกกับเวลา (Tambo และ Matsui, 1987)

ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดฟล็อกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ กันดังรูปที่ 3.24 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของตะกอนที่เวลา 6 ชั่วโมง แสดงว่าเกิดสมดุลระหว่างการเกิดเม็ดฟล็อกและการแตกตัว การหลุดลอยออกไปจากระบบของเม็ดฟล็อก



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน (Tambo และ Matsui, 1987)

ในรูป 3.25 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน และความเร็วในการตกตะกอนเส้นทึบที่แสดงในรูปแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของการเกิดฟล็อกแบบสุ่ม โดยทั่วไปที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน เม็ดตะกอนจะมีค่าความเร็วในการตกตะกอนมากกว่าฟล็อกธรรมดาถึง 10 เท่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างเม็ดตะกอนกับฟล็อกซึ่งในรูปแสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของเม็ดตะกอน จะมีค่าการกระจายของเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ ค่าการกระจายของฟล็อกธรรมดา

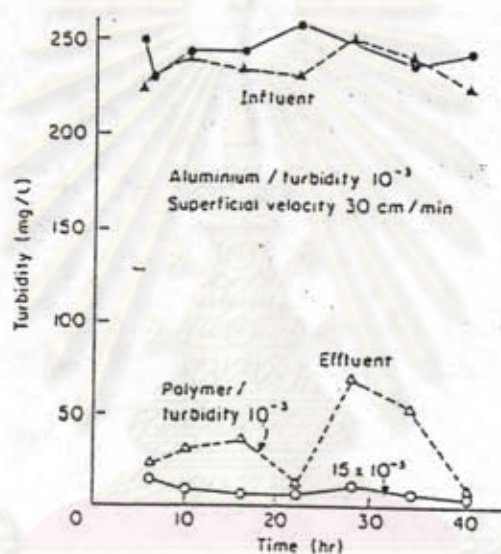


รูปที่ 3.25 ความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอนและฟล็อก
(Tambo และ Matsui, 1987)

ที่ความเข้มข้นสารแขวนลอย 250 มก./ล.

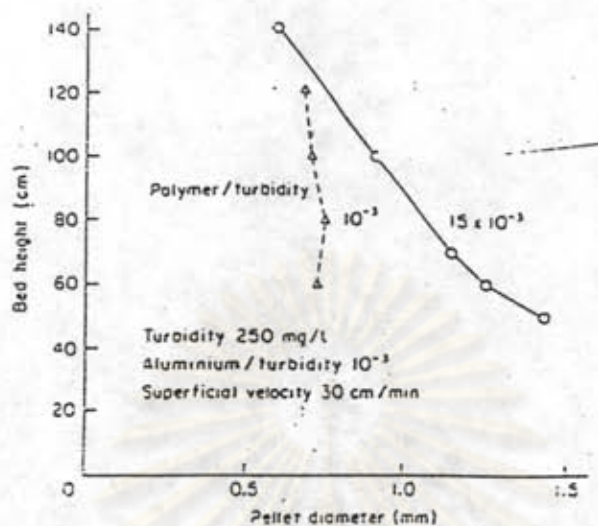
ในรูปที่ 3.26 แสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของน้ำดิบกับน้ำที่ผ่านออกจากระบบกับเวลาที่ผ่านไปซึ่งค่าความเข้มข้นของน้ำดิบมีค่าเท่ากับ 250 มก./ล. และใช้ค่าอัตราส่วน AL/T เท่ากับ 10^{-3} เหมือนในกรณีความเข้มข้นสารแขวนลอย 3000 มก./ล. อย่างไรก็ตาม ค่าอัตราส่วนของโพสิเมอร์ กับความขุ่น (P/T) จะเปลี่ยนไปเนื่องจากค่า P/T เท่ากับ 10^{-3} ให้คุณภาพน้ำที่ผ่านออกจาก

ระบบไมติซึ่งปรับปรุงได้โดยการเพิ่มค่า P/T ขึ้นอีกประมาณหนึ่งลำดับ ซึ่งหมายความว่าจำนวนสัมบูรณ์ของปริมาณโพลีเมอร์ที่ต้องการมีค่าเกือบเท่ากับค่าเดิมของทั้งสองกรณี



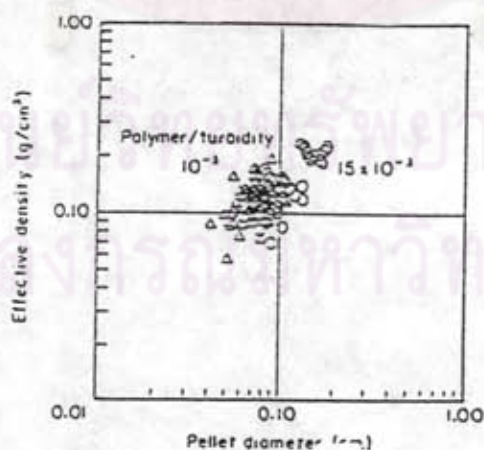
รูปที่ 3.26 สมรรถนะของการกำจัดความขุ่นกับเวลาที่ความเข้มข้นสารแขวนลอย 250 มก./ล. (Tambo และ Matsui, 1989)

ในรูปที่ 3.27 แสดงให้เห็นถึงค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง กับค่าอัตราส่วนโพลีเมอร์ ต่อค่าความขุ่น 2 ค่า ที่ค่า P/T 15×10^{-3} จะมีการกระจายขนาดของเม็ดตะกอนดี และให้น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพดี เมื่อค่า P/T ลดลงเท่ากับ 10^{-3} จะให้การกระจายเม็ดตะกอนในแนวตั้งซึ่งทำให้การบำบัด ไม่ให้ผลดีเท่าที่ควร



รูปที่ 3.27 แสดงการเปรียบเทียบของการกระจายค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอน ที่ความสูงชั้นเม็ดตะกอนในระดับต่างๆ (Tambo และ Matsui, 1989)

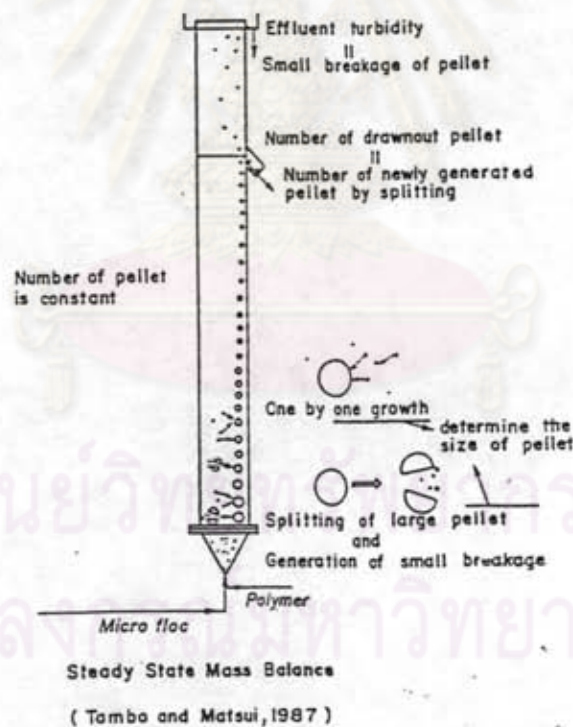
ในรูปที่ 3.28 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของเม็ดตะกอนในกรณี ที่ความเข้มข้นสารแขวนลอยเท่ากับ 250 มก./ล. ซึ่งค่าความเข้มข้นของน้ำดิบและอัตราส่วนของปริมาณโพลีเมอร์ไม่มีผลที่เด่นชัดต่อความหนาแน่นของเม็ดตะกอน



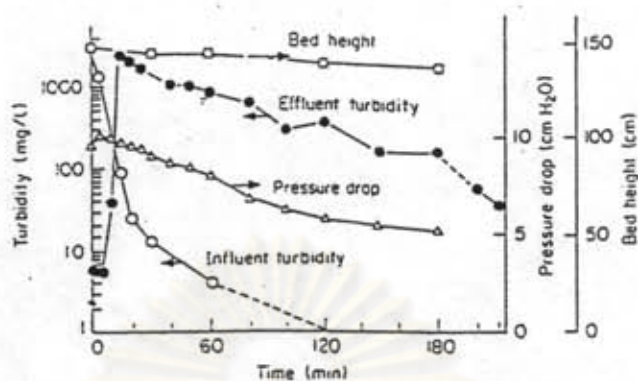
รูปที่ 3.28 ความหนาแน่นของเม็ดตะกอน (Tambo และ Matsui, 1989)

ที่สภาวะคงตัวของชั้นตะกอน

ที่สภาวะคงตัวการเกิดเม็ดตะกอนแบบการสัมผัสแบบหนึ่งต่อหนึ่งของจุลฟล็อกและอัตราการแตกตัวของฟล็อกที่เกินโดยการกวนของใบพายแสดงในรูปที่ 3.29 ส่วนที่แตกออกของเม็ดตะกอน จะเป็นแกนกลางให้จุลฟล็อก สัมผัสกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง จำนวนเม็ดตะกอนที่เพิ่มขึ้นโดยการแตกตัวจะเท่ากับจำนวนของเม็ดตะกอนที่ระบายออกจากชั้นเม็ดตะกอนที่สภาวะสมดุลและเม็ดตะกอนขนาดเล็ก ๆ ก็จะหลุดออกไปจากระบบและกลายเป็นความขุ่นของน้ำที่บำบัดจากระบบ ซึ่งผลดังแสดงในรูปที่ 3.30 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงเม็ดตะกอนที่แตกตัวอย่างต่อเนื่องในชั้นเม็ดตะกอนและเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กก็จะเกิดขึ้น ถึงแม้ว่าน้ำที่เข้าระบบจะไม่มี ความขุ่นเลย แต่ก็ยังสังเกตเห็นว่ามีความขุ่นของน้ำที่ออกจากระบบตลอดเวลา



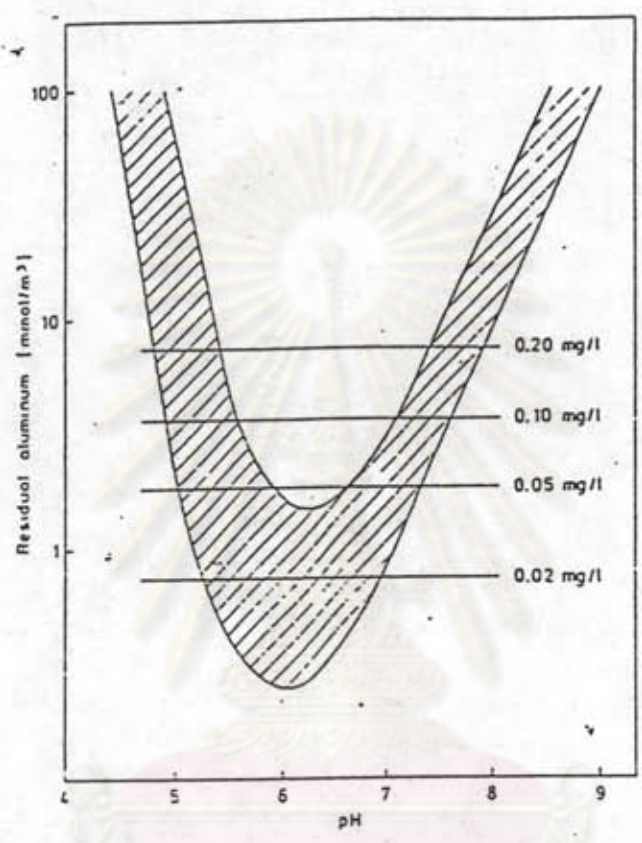
รูปที่ 3.29 สมดุลมวลของระบบเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว (Tambo และ Matsui, 1989)



รูปที่ 3.30 แสดงถึงลักษณะของชั้นเม็ดตะกอนเมื่อไม่มีความขุ่นของน้ำดิบสังเคราะห์
เข้าระบบ (Tambo และ Matsui, 1989)

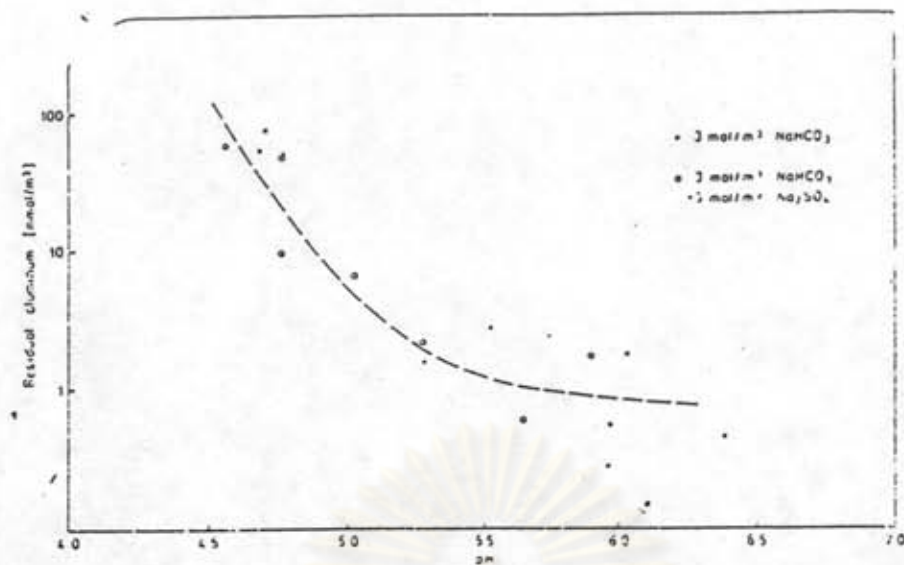
- T. Viraraghavan และ C.H. Wimmer (1988) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เพื่อใช้แทนสารส้ม จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ (7, 10, 20 องศาเซลเซียส) ปริมาณที่เหมาะสมของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ในช่วง 20 ถึง 40 มก./ล. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ปริมาณเพียง 2/3 เท่าของปริมาณสารส้มที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นและจากการศึกษาพบว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จะทำให้ค่าพีเอชลดลงน้อย

- M.R. Jekel และ B. Heinzmann (1989) ได้ทำการศึกษาอะลูมิเนียมในน้ำดื่ม โดยหาปริมาณอะลูมิเนียมจากค่าการละลายของตะกอนไฮดรอกไซด์ (solubility of hydroxide precipitate) ซึ่งขึ้นกับค่าพีเอชและได้ทำกราฟแสดงช่วงของอะลูมิเนียมละลายน้ำ กับพีเอช ที่พีเอชต่ำกว่า 3 มีอะลูมิเนียมละลายน้ำในรูป Al^{3+} ขณะที่ช่วงพีเอช 3 - 5 เกิดการรวมตัวกันเป็นโมโนและโพลีนิวเคลียร์ แคตไอออนิก ไฮดรอกซี (mono and polynuclear cationic hydroxy - species) และมีการตกตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และมีค่าการละลาย (solubility) เท่ากับ 10^{-2} โมล/ลิตร ที่พีเอช 4 แต่ที่ พีเอช 5 มีค่าเท่ากับ 10^{-5} โมล/ลิตร และประมาณว่าค่าต่ำสุดของค่าการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ มีค่าเท่ากับ $3 - 4 \cdot 10^{-7}$ โมล/ลิตร (เทียบเท่ากับ 10 มก./ล.) ที่พีเอชระหว่าง 6 - 7 และที่พีเอชมากกว่า 7 มีการรวมตัวในรูปอะลูมิเนต (aluminat) ละลายน้ำ คือ $[Al(OH)_4]^{-}$ เพิ่มขึ้น ซึ่ง M.R. Jekel และ B. Heinzmann ได้เสนอกาฟสรุปค่าระหว่างอะลูมิเนียมละลายน้ำกับพีเอช ดังรูปที่ 3.31

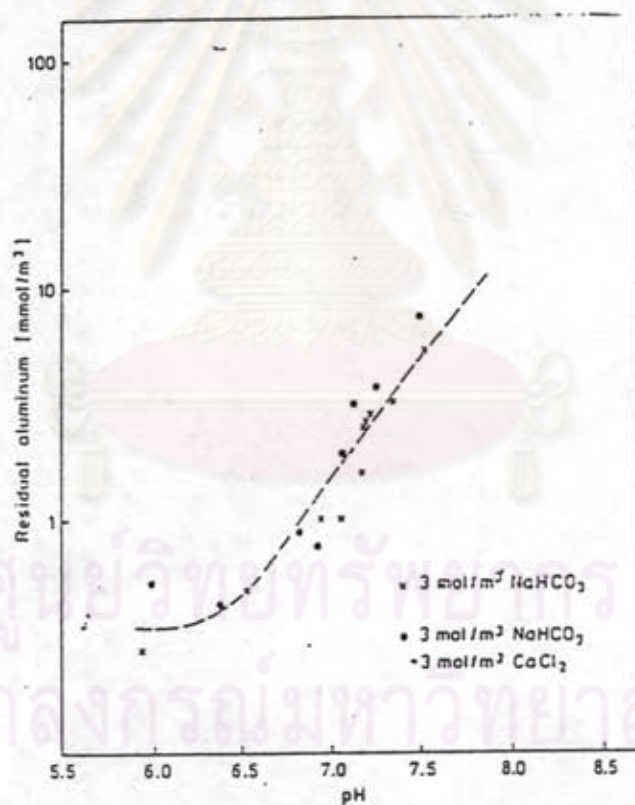


รูปที่ 3.31 แสดงความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในน้ำหลังจากการกรองด้วยเมมเบรน (ขนาดรู 0.05 - 0.45 μm) จากการทำจาร์เทสต์ (เวลา 1 ชม.) (M.R. Jekel และ B. Heinzmann , 1989)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.32 แสดงความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในน้ำ ที่พีเอชต่ำ ทั้งที่มี และ ไม่มีซัลเฟต
(M.R. Jekel และ B. Heinzmann , 1989)



รูปที่ 3.33 แสดงความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในน้ำ ที่พีเอชสูง ทั้งที่มี และ ไม่มีแคลเซียม
(M.R. Jekel และ B. Heinzmann , 1989)

พบว่าค่าอะลูมิเนียมละลายน้ำตามเกณฑ์กำหนด 0.2 มก./ล. พีเอชควรอยู่ในช่วง 5.5 , 7.4 แต่ถ้าต้องการควบคุมค่าอะลูมิเนียมไว้ที่ 0.05 มก./ล. พีเอชควรอยู่ในช่วง 5.9 , 6.6 และจากการศึกษานี้พบว่า ซัลเฟตและแคลเซียมไม่มีผลต่อการละลายของอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.32 และ 3.33

- Benschoten และ Edzwald (1990) ได้ทำการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้ สารส้มและโพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโคแอกกูแลนต์ทั้งสอง การทดลองทั้งหมดใช้วิธีจาร์เทสต์ซึ่งมีวิธีการทำโดยใส่น้ำตัวอย่าง ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส และปรับให้มีค่าพีเอชประมาณ 4 โดยใช้ 0.1 นอร์มอลของกรดไฮโดรคลอริก ใส่ลงไปนบิกเกอร์ขนาด 250 มล.จากนั้นจึงเติมโคแอกกูแลนต์ให้มีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเท่ากับ 13.5 มก./ล. แล้วจึงปรับค่าพีเอชของน้ำด้วย 0.1 นอร์มอล NaHCO_3 และ/หรือ NaOH จนได้ค่าพีเอชที่ต้องการแล้วนำไปเข้าเครื่องกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ทำเช่นนี้ที่ละบิกเกอร์จนครบทั้ง 6 บิกเกอร์โดยแต่ละบิกเกอร์จะมีพีเอชต่างกัน เมื่อครบแล้วจึงปรับความเร็วรอบให้เหลือ 20 รอบต่อนาทีแล้วทำการกวนช้าพร้อมกันทั้ง 6 บิกเกอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำน้ำใสที่ได้มาวิเคราะห์ค่าพีเอช , อุณหภูมิ , ปริมาณอะลูมิเนียมละลายน้ำ ความขุ่นตกค้างและ Electrophoretic Mobility (EPM) จากนั้นจึงทำการทดลองเหมือนข้างต้นอีก แต่คราวนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 4 องศาเซลเซียสโดยใช้อ่างปรับอุณหภูมิผลการทดลองสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอะลูมิเนียมในน้ำ เนื่องจากสารส้มพบว่าอะลูมิเนียมจะแสดงรูปแบบของโมโนเมอร์ (monomer) เกือบทั้งหมด ส่วนอะลูมิเนียมจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโพลีอะลูมินัมคลอไรด์จะแสดงในรูปแบบของโพลีเมอร์ ถึง 90 %

ต่อมาเขาได้ทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบหาความแตกต่างของสารส้ม และโพลีอะลูมินัมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง พบว่า รูปแบบของอะลูมิเนียมที่เกิดจากการละลายตะกอนของสารส้มยังเป็นโมโนเมอร์แสดงว่าตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ส่วนโพลีอะลูมินัมคลอไรด์แสดงรูปแบบของโพลีเมอร์ 90 % เหมือนก่อนทำให้ตกตะกอนซึ่งแสดงให้เห็นว่าขณะตกตะกอนโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ยังคงรักษาสภาพของโพลีเมอร์ของอะลูมิเนียมไว้ได้ และยังสามารถได้ว่าตะกอนของสารส้มมีขนาด (25 ถึง 100 ไมโครเมตร) ใหญ่กว่าตะกอนของโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ (< 25 ไมโครเมตร) มีลักษณะเป็นปุยเกาะกันไม่แน่น แต่ตะกอนของโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเล็กกว่าแต่ก็มีลักษณะกลมเกาะติดกันเป็นกลุ่ม ที่พีเอชมากกว่า 9 ขึ้นไป

ตะกอนของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ได้จึงจะเหมือนกับตะกอนที่เกิดจากสารส้ม และยังพบว่าอนุภาคมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารส้ม แต่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์น้อยมาก

ต่อมาทำการทดลองเพื่อแยก FA (fulvic acid) จากน้ำโดยการตกตะกอนใช้สารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ โดยทำการทดลอง 3 แบบด้วยกัน

1. การทดลองจาร์เทสต์ขนาดเล็ก ใช้น้ำที่มี FA อยู่ 2 , 5 และ 10 มก. ดีไอซี/ล. ปริมาณ 200 มล. ที่อุณหภูมิห้อง (22.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส) ดำเนินการทดลองโดยใช้วิธีจาร์เทสต์เหมือนกับตอนแรกทุกประการแล้ววิเคราะห์ค่า พีเอช , อุณหภูมิ , การดูดกลืนแสงยูวี (254 นาโนเมตร), ปริมาณอะลูมิเนียมละลายน้ำ , ความขุ่นตกค้าง และ Electrophoretic Mobility (EPM) ผลการทดลองพบว่า สารส้มสามารถกำจัด FA ออกจากน้ำได้ดีกว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เล็กน้อยและที่พีเอช 7 ทั้งสองตัวจะสามารถแยก FA ออกจากน้ำได้ดีกว่าพีเอช 5 ประมาณ 8 ถึง 11 % แต่จะใช้ปริมาณมากกว่าถึง 2 เท่า และเพื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม หากต้องการประสิทธิภาพในการกำจัด FA ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป จะต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.5 ถึง 7 เหมือนกัน

2. การทำจาร์เทสต์ขนาดใหญ่ ทำการทดลองจาร์เทสต์โดยใช้ถังรวมตะกอนชนิด 21. Wagner แทนโดยกำหนดตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองนี้คือ ชนิดของโคแอกกูแลนต์ (สารส้มและโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์), พีเอช (5.5 และ 7), ดีไอซี (2 และ 10 มก./ล.) และอุณหภูมิ (4 และ 22 ± 1 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่า ทั้งสารส้ม และโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์กำจัด FA ในน้ำ (โดยการวัดค่าดีไอซี) ที่พีเอช 7 ได้ดีกว่าที่พีเอช 5.5 และพบว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์กำจัดความขุ่นได้ดีกว่าสารส้มทั้งที่พีเอช 7 และที่พีเอช 5 ส่วนที่อุณหภูมิที่ 4 องศาเซลเซียส จะพบว่าความขุ่นตกค้างมีค่าสูงแต่ฟล็อกยังคงตกตะกอนได้ดีทั้งนี้อาจเป็นเพราะเกิดการหมุนเวียนของมวลน้ำเนื่องจากอุณหภูมิ

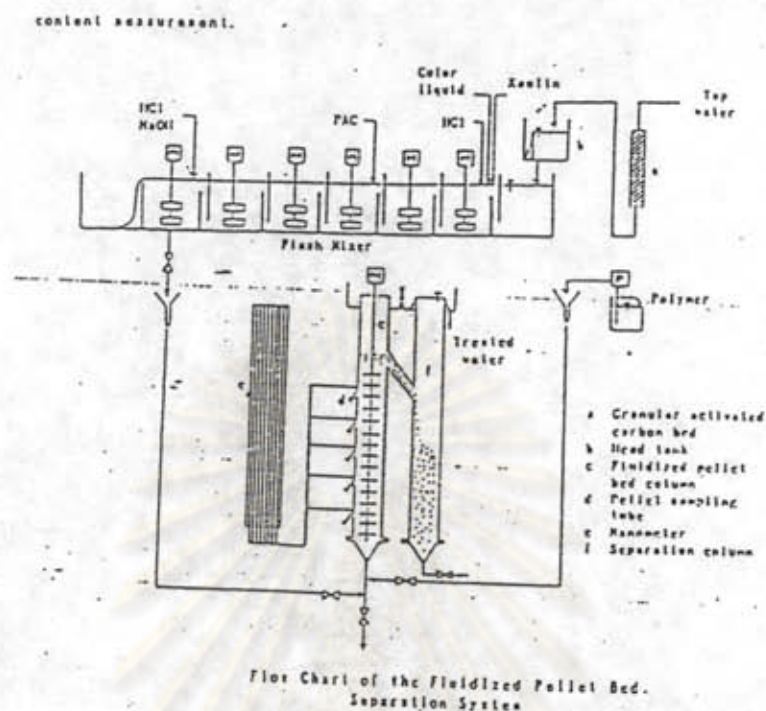
3. การศึกษาแบบซ้ำซ้อน ทำการทดลองโดยใช้ 200 มล. ของ FA ที่ความเข้มข้น 2 มก./ล. ปรับค่าพีเอชให้ได้ 5 หรือ 7 แล้วเติมสารส้มหรือโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ให้มีความเข้มข้น 0.2 , 0.5 หรือ 1.0 มก. อะลูมิเนียม/มก. ของ FA หลังจากเติมโคแอกกูแลนต์แล้วจึงปรับค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ จากนั้นจึงทำการกรองสารละลายทันทีด้วยตะแกรงขนาด 0.22 ไมโครเมตรแล้วทำการวิเคราะห์ Al speciation, พีเอชการดูดกลืนแสงยูวี ผลการทดลองพบว่าแนวโน้มของการเกิด

Al complexation เนื่องจากโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และสารส้มเหมือนกันที่พีเอชเดียวกันที่พีเอช 5 พบว่าเกิด Al complexation เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น ส่วนที่พีเอช 7 พบว่า Al complexation น้อยลงเมื่อความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่าโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์มีความแตกต่างจากสารส้ม กล่าวคือเมื่อมีการแตกตัวในน้ำ โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์แสดงรูปแบบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโพลีเมอร์ ส่วนสารส้มจะแสดงรูปแบบของโมโนเมอร์ และยังก่อรูปในสถานะของแข็งที่แตกต่างกันจึงน่าจะให้ผลการเกิดโคแอกกูแลนต์ที่แตกต่างกันด้วย

- Tambo and Wang (1992) ได้ทำการศึกษาเรื่อง treatment of highly turbid and colored water by fluidised pellet bed separation โดยใช้โพลีเมอร์โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ และใช้โพลีเมอร์นอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนต์เอด

วิธีการทดลอง

1. ใช้น้ำสังเคราะห์ด้วยสีที่ได้จากน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษซึ่งมีสีค่าปริมาณสีหลายความเข้มข้น (100 , 200 , 500 , 1000 , 1500 และ 2000 หน่วยสี) และความขุ่นสังเคราะห์ 1000 300 , 100 มก./ล.
2. ทำจาร์เทสต์เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่เหมาะสมของการทำโคแอกกูแลนต์ที่ได้ผล
3. เมื่อมีการสังเคราะห์น้ำให้ได้ความขุ่นและสีที่ต้องการแล้ว ทำการปรับพีเอช ให้ได้ตามต้องการโดยใช้กรดไฮดรอกลอริก จากนั้นน้ำจะถูกผ่านเข้าสู่อุปกรณ์กวนเร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพด้วยโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ จากนั้นจึงผ่านน้ำเข้าสู่อุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนทางด้านล่างโดยเติมโพลีเมอร์นอนไอออน เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนต์เอด ความเร็วของน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที ภายในอุปกรณ์ให้พลังงานกลด้วยการกวนใบพัดที่ความเร็ว 36 รอบต่อนาทีและที่ระดับ 145 ซม. มีท่อน้ำล้นเพื่อให้น้ำและเม็ดตะกอนที่ไหลขึ้นมาถึงระดับนี้ไหลล้นลงสู่อุปกรณ์สำหรับแยกน้ำและเม็ดตะกอนโดยเม็ดตะกอนจะตกลงสู่ด้านล่างและน้ำผลิตจะไหลล้นออกทางด้านบน (รูปที่ 3.34)



รูปที่ 3.34 อุปกรณ์การทดลองของ Tambo and Wang
(Tambo and Wang , 1992)

ผลการทดลอง

1. การกำจัดสีและความขุ่นได้ผลดีเมื่ออัตราส่วนระหว่างสีและความขุ่นมีค่าน้อยกว่า 1 หรือเท่ากับ 1 ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที
2. อนุภาคสีที่ละลายได้ถูกกำจัดได้ดีมากกว่า 90 % และกำจัดความขุ่นได้ 100% (กรณีที่กำลังกำจัดได้ 100% ความขุ่นต้องมีค่าสูงกว่าสีมาก ๆ)
3. ช่วงของเม็ดตะกอนที่ทำงานได้ดีคือ 0.02-0.1 ก./ลบ.ซม. มีความชื้นน้อยกว่า 90% ในการกำจัดตะกอนก็ใช้วิธีการกรองแยกโดยไม่ต้องใช้วิธีทำให้เข้มข้นเลย
4. ที่พีเอช 5 (กรดอ่อน) พบว่าสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ดีที่สุด

- บัณฑิต (2535) ได้ศึกษาการผลิตน้ำใสแบบฟลูอิดไดซ์เบดของเม็ดตะกอน ที่ความเร็ว น้ำไหลขึ้น 30 และ 40 ซม./นาทึ โดยมีเวลากักน้ำในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน 8.33 และ 6.25 นาที ตามลำดับ และมีเวลาในการกำจัดความขุ่นในชั้นเม็ดตะกอน 5.0 และ 3.8 นาที ตามลำดับ โดย น้ำดิบที่มีความขุ่นสังเคราะห์ 50 เอ็นทึ ถูกบำบัดด้วยการใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลน ต์ในปริมาณ 1 , 2 , 3 และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์แอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนต์เอดในปริมาณ 0.1, 0.2 และ 0.3 มก./ล. รวมทั้งใช้ความเร็วในการกวของใบพัดกวนน้ำที่ 5,10 และ 15 รอบต่อ นาที ได้ผลการศึกษาดังนี้

1. การใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ ปริมาณมากจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ปริมาณน้อยดังนั้นการใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์ปริมาณน้อยต้องอาศัย ปริมาณโพลีเมอร์แอนไอออนเพิ่มมากขึ้น จึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ

2. การใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณมาก จะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณน้อยต้องอาศัยปริมาณโพลีอะลูมินัมคลอไรด์มากขึ้นจึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดตะกอนอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 มิลลิเมตร และความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอน อยู่ระหว่าง 40 ถึง 70 ซม./นาทึ

4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาทึ ต้องการความเร็วของใบพัดกวนช้าในทางตรงกันข้ามที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาทึ ต้องการใช้ความเร็วของใบพัดกวนช้ามากกว่า

5. วิธี fluidized pellet-floc bed clarifier สามารถลดความขุ่นจาก 50 เอ็นทึเหลือน้อยกว่า 3 เอ็นทึ

6. ผลของการบำบัดน้ำด้วยวิธี fluidized pellet-floc bed clarifier สามารถบำบัดน้ำมากกว่าการใช้ถังตะกอนแบบธรรมดา 9 เท่าและมากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทค 3 เท่ารวมทั้งการใช้พื้นที่และขนาดของถังตกตะกอนน้อยกว่าทั้ง 2 วิธีข้างต้นด้วย

- นฤชา (2535) ได้วิจัยถึงการก่อเม็ดตะกอนโดยสารส้ม เป็นกระบวนการกำจัดความขุ่น โดยการสร้างเม็ดตะกอนให้เกิดขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนเพื่อดักจับอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากถังกวนเร็วด้วยวิธีการแบบไหลขึ้น ทำการวิจัยโดยใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลินให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้ความเร็วใบพัดในอุปกรณ์กวนเร็ว 100 รอบ/นาที ตัวแปรที่ควบคุมศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 5 , 10 , 20 , 30 มก./ล. ความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบเท่ากับ 0.05 , 0.1 , 0.2 , 0.3 มก./ล. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 , 40 ซม./นาที ความเร็วของใบพัดกวนน้ำในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน 5 , 10 , 15 รอบ/นาที จากการวิจัยพบว่า

1. ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในไม่เกิน 3 ชั่วโมง โดยเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมากขึ้น
2. การเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมากขึ้น ทำให้ความขุ่นของน้ำผลิตน้อย
3. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบ ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (0.05 ถึง 0.01 มก./ล.) มีผลกระทบต่อความขุ่นของน้ำผลิตมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นสูง (0.2 ถึง 0.3 มก./ล.) คือ มีความขุ่นน้ำผลิตเท่ากับ 0.35 ถึง 8.5 เทียบกับ 0.18 ถึง 1.8 ตามลำดับ
4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที ทุกค่าความเร็วใบพัดหากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู จะต้องใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 5 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.1 ถึง 0.3 มก./ล. หรือความเข้มข้นของสารส้ม 10 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.05 มก./ล.
5. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ทุกค่าความเร็วใบพัดหากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู จะต้องใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 5 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.1 ถึง 0.3 มก./ล. หรือความเข้มข้นของสารส้ม 20 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.05 มก./ล.
6. ด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 และ 40 ซม./นาที และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบสูง คือในระดับ 0.1 , 0.2 , 0.3 มก./ล. ให้ค่าความขุ่นของน้ำที่ผลิตไม่แตกต่างกันนัก

7. ที่ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบต่ำหรือ 0.05 มก./ล. เมื่อทำการทดลองโดยความเร็วที่ไหลขึ้น 40 ซม./นาที จะมีค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที

8. ที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำสูงทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่าที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำต่ำ

9. อิทธิพลของความเร็วใบพัดที่มีต่อความขุ่นของน้ำผลิตลดลง เมื่อความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบเพิ่มขึ้น

10. เม็ดตะกอนที่อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน มีความเร็วในการตกตะกอนกว่าเม็ดตะกอนที่อยู่ด้านบน

11. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นตะกอนเดียวกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมาก เม็ดตะกอนมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบน้อย

12. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นตะกอนเดียวกัน การบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ได้ความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอนสูงกว่า เมื่อบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที

- ปริญา (2535) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงชั้นเม็ดตะกอนที่ระดับต่าง ๆ (70, 90, 110 และ 130 ซม.) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น โดยมีการใช้โพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ในปริมาณ 1, 2, 3 และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์แอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนต์เอดในปริมาณ 0.1 มก./ล. โดยมีการใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ทดลองที่ช่วงห่างใบพัด 4 ค่า คือ 5, 10, 15 และ 20 ซม. จากการวิจัยพบว่า

1. ปริมาณโพลีอะลูมินัมคลอไรด์ที่ใช้ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจน ต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่ปริมาณโพลีอะลูมินัมคลอไรด์สูงมีแนวโน้มในการกำจัดความขุ่นดีขึ้น

2. รูปแบบของช่วงห่างใบพัดที่ใช้สำหรับระบบเม็ดตะกอน ควรมีรูปแบบที่มีความถี่ของใบพัดเรียงจากตอนล่างสุดตอนบนมีค่ามากไปหาน้อย (เมื่อเปรียบเทียบกับผลกับบัณฑิต , 2535) เนื่องจากรูปแบบใบพัดดังกล่าว ให้ค่าความปั่นป่วนที่เหมาะสมต่อระบบของเม็ดตะกอนที่มีวัฏจักรการก่อตัวและแตกออกที่เกิดอยู่ภายในตลอดเวลา ที่บริเวณตอนล่างของอุปกรณ์สมานตะกอน จะมีการแตกตัวของเม็ดตะกอน และได้ส่วนที่แตกออกที่มีขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ส่วนบนดังนั้นทางส่วนล่างจึงต้องการแรงปั่นป่วน (ค่า G) ที่มากกว่าส่วนบน

3. ความสูงชั้นเม็ดตะกอนมากขึ้นจะให้ผลการกำจัดความขุ่นดีขึ้น เนื่องจากระบบมีช่วงความยาวในการกำจัดความขุ่นที่มากขึ้นทำให้ที่ออกจากระบบมีความขุ่นน้อยลงจากการวิจัยพบว่าที่ความสูงชั้นเม็ดตะกอน 130 ซม.เป็นความสูงที่ให้ผลการกำจัดความขุ่นดีที่สุด

4. เวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้นเม็ดตะกอน ทำให้มีการสะสมของการจับตัวเป็นของแข็งบนผิวของเม็ดตะกอนมีมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเม็ดตะกอนมีขนาดใหญ่ และหนักกว่าเม็ดตะกอนที่เวลาการเดินระบบน้อยๆ เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่นี้เมื่อถูกแรงเฉือนของใบพัดกวนน้ำและความปั่นป่วนอย่างต่อเนื่อง ตลอดความยาวของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนจะทำให้เม็ดตะกอนเหล่านั้นแตกออก ได้เม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ผิวบนของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนดังนั้นจึงพบว่าเม็ดตะกอนจะมีขนาดจัดเรียงจากใหญ่ไปเล็กจากตอนล่างไปสู่ตอนบนของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน และเมื่อทำการวัดอัตราเร็วในการตกจมตัวและขนาดของเม็ดตะกอนจากตอนบนสู่ตอนล่างของชั้นเม็ดตะกอนจะได้ค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

5. การวัดขนาดและความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนของผู้ทำการทดลองแต่ละคนอาจมีผลที่ไม่เหมือนกัน อาจเกิดจากการเลือกสุ่มตัวอย่างของเม็ดตะกอนที่มีความหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของผลที่ได้ของคน ๆ เดียวกันย่อมให้ผลที่สอดคล้องกันตลอดการทดลอง

6. ค่าเอสเอส มีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นที่ออกมาจากระบบอย่างเห็นได้ชัดกล่าวคือที่เงื่อนไขใด ๆ ที่มีผลต่อความขุ่นก็จะมีผลต่อเอสเอสที่ออกมาจากระบบด้วยเช่นกัน หรือกล่าวง่าย ๆ ได้คือ ระบบที่กำจัดความขุ่นได้ดีจะมีของแข็งอนุภาคเล็ก ๆ หลุดออกจากชั้นเม็ดตะกอนได้น้อยไปด้วย ซึ่งจากการทดลองจะได้ เอสเอส อยู่ในช่อง 6.5 ถึง 21 มก./ล.

7. ระบบกำจัดความขุ่นโดยใช้ระบบเม็ดตะกอน ในเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง สามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบที่ 50 เอ็นทียู ได้ถึง 89% โดยใช้ปริมาณสาร PACI สูงสุดเพียง 4 มก./ล. โพลีเมอร์ต่ำถึง 0.1 มก./ล. โดยระบบยังสามารถใช้อัตราการไหลขึ้นได้ถึง 40 ซม./นาที

- อาชวน (2536) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นในกระบวนการเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น พบว่า โพลีเมอร์แอนไอออน และโพลีเมอร์นอนไอออนมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ดมากกว่าโพลีเมอร์แคตไอออนภายใต้เงื่อนไขในการทดลองเดียวกัน การใช้โพลีเมอร์นอนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าการใช้โพลีเมอร์แอนไอออน ถึงแม้ว่าโพลีเมอร์นอนไอออนมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าการใช้โพลีเมอร์นอนไอออนและโพลีเมอร์แอนไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าโพลีเมอร์นอนไอออนและโพลีเมอร์แอนไอออนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำขนาดและความเร็วในการจมตัวของเม็ดตะกอนมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์แอนไอออนและโพลีเมอร์นอนไอออน การใช้โพลีเมอร์ในปริมาณน้อย (0.05 มก./ล.) ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนสูง (60 ซม./นาที) ทำให้มีความขุ่นตกค้างในน้ำผลิตมากและพบว่าเม็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความหนาแน่นสูงกว่าเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากมีอะลูมิเนียมอยู่ในเม็ดตะกอนมากกว่าซึ่งจะทำให้เม็ดตะกอนหลวม และการใช้โพลีเมอร์ในปริมาณมากจะกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าการใช้โพลีเมอร์ในปริมาณน้อย แต่ว่าการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณมากจะทำให้เม็ดตะกอนหลวมและคุณภาพน้ำที่ได้ไม่ดีเท่าการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ในปริมาณน้อย ซึ่งการศึกษาพบว่า การใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 1 มก./ล. และโพลีเมอร์นอนไอออน 0.3 มก./ล. ให้คุณภาพน้ำที่ดีที่สุด

- Shun Yin Lee และ J. Gregory (1991) ได้ทำการศึกษาถึงผลของความหนาแน่นประจุและ มวลโมเลกุลของโพลีเมอร์แคตไอออนในการรวมตะกอน โดยใช้โพลีเมอร์แคตไอออน 4 ชนิด ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งแตกต่างกันทั้งความหนาแน่นประจุและมวลโมเลกุลในการรวมตะกอนในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซิลิกา 65 มก./ล. ผลการทดลองเปลี่ยนความเข้มข้นของโพลีเมอร์ A พบว่า ที่ความเข้มข้นต่ำ (25 ไมโครกรัม/ลิตร) ไม่เกิดการรวมตะกอนใน 15 นาที แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นโพลีเมอร์พบว่า เกิดการรวมตะกอนค่อนข้างเร็วใช้เวลาในการรวมตะกอนน้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ ดังรูปที่ 3.35 และเมื่อศึกษาถึงผลของความแรงประจุในน้ำ โดยการเติมโซเดียมคลอไรด์ ลงในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างกันพบว่า ความแรงประจุบวก (Na^+) มากการรวมตะกอนเกิดขึ้นตลอดช่วงของความเข้มข้นของโพลีเมอร์ ทำให้ใช้โพลีเมอร์ที่ความเข้มข้นต่ำได้ การ

ใช้โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นประจุต่างกันที่ความเข้มข้นเดียวกัน พบว่าโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นประจุต่ำแทบไม่เกิดการรวมตะกอน แต่ถ้าใช้โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นประจุสูงพบว่า การรวมตะกอนเกิดขึ้นเร็วและลดเวลาในการใช้รวมตะกอนลง และการใช้โพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นประจุสูงสามารถใช้ความเข้มข้นน้อยกว่าโพลีเมอร์ที่มีความหนาแน่นประจุต่ำ ดังตารางที่ 3.3 โพลีเมอร์ D สามารถใช้ความเข้มข้นเพียงครึ่งหนึ่งของโพลีเมอร์ C เมื่อทดลองโดยใช้โพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่างกันโดยที่ความหนาแน่นประจุเท่ากัน (โพลีเมอร์ B และ C) พบว่าโพลีเมอร์ C ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่ามีประสิทธิภาพในการรวมตะกอนได้ดีกว่าโพลีเมอร์ B ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ สันนิษฐานว่าเกิดการเชื่อมต่อด้วยโพลีเมอร์ (bridging effect) ซึ่งในทางปฏิบัติ การเลือกใช้โพลีเมอร์ที่มีประจุสูงมวลโมเลกุลต่ำให้ประสิทธิภาพดี แต่ในกรณีที่มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยสูงและต้องการความแข็งแรงของฟล็อกมากควร เลือกโพลีเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงมาใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

Shun Yin Lee และ J. Gregory (1991)

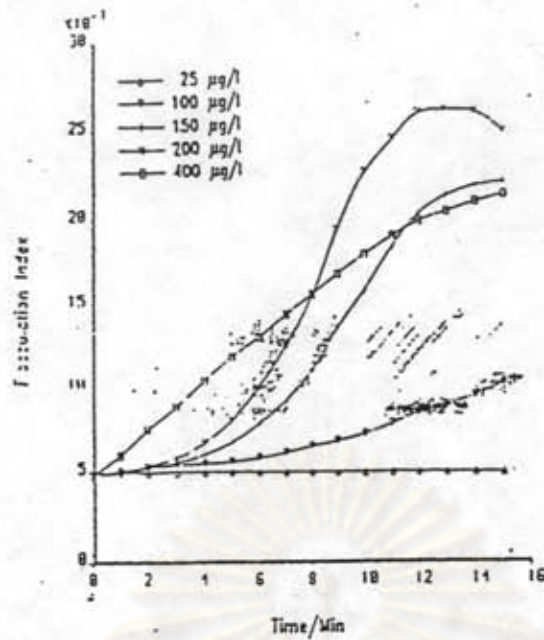
TABLE 1 Properties of Polymers Used

Polymer	% Cationic	Intrinsic Viscosity (cm ³ /g)	Molecular Mass*	Diameter ^b (nm)
A	10	6	2.4 x 10 ⁴	100
B	30	2	4.5 x 10 ⁵	60
C	30	6.5	2.7 x 10 ⁴	110
D	50	7	3.0 x 10 ⁴	140

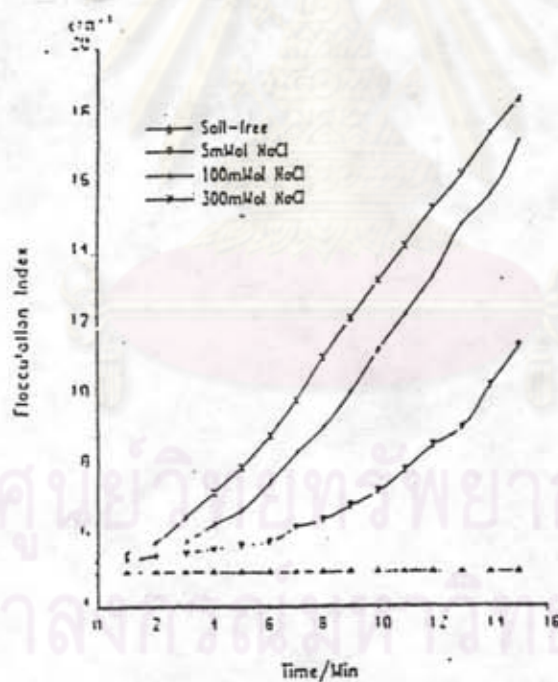
* Calculated from the hydrodynamic radius values given by the manufacturer. Mark-Houwink equation, with constants $k = 1.7 \times 10^{-4}$ cm³/g and $a = 0.66$.

^b Determined by photon correlation spectroscopy, or from diffusion coefficients.

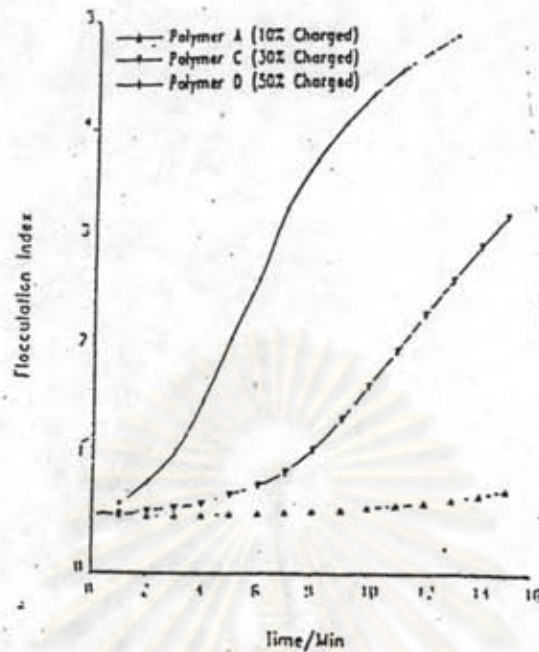
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.35 แสดงผลของปริมาณโพลีเมอร์ต่าง ๆ กัน กับอัตราการรวมตะกอน
(Shun Yin Lee และ J. Gregory , 1991)



รูปที่ 3.36 แสดงผลระหว่างค่าประจุต่าง ในน้ำกับอัตราการรวมตะกอนโดยใช้
ความเข้มข้นโพลีเมอร์ A 25 มก./ล.
(Shun Yin Lee และ J. Gregory , 1991)

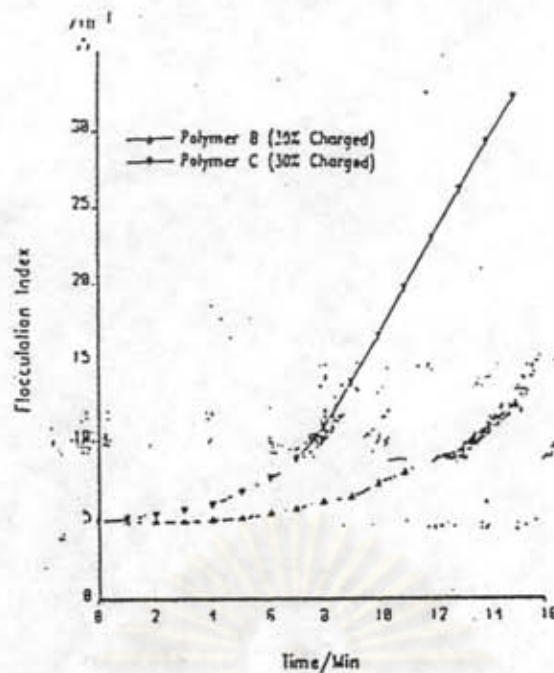


รูปที่ 3.37 แสดงผลระหว่างความหนาแน่นประจุโพลีเมอร์ กับอัตราการรวมตะกอน
(Shun Yin Lee และ J. Gregory , 1991)

ตารางที่ 3.3 ความเข้มข้นที่เหมาะสมและ Mobility data ของโพลีเมอร์แคตไอออน
ที่ใช้ในการทดลอง (Shun Yin Lee และ J. Gregory , 1991)

TABLE 2 Optimum Dosages and Mobility Data

Polymer	Optimum Flocculation Dosage ($\mu\text{g/l}$)	Dosage to give Zero Mobility ($\mu\text{g/l}$)	Maximum Positive Mobility ($\mu\text{m s}^{-1}/\text{V cm}^{-1}$)
A	200	235	0.5
B	100	140	1.4
C	100	110	1.3
D	50	65	2.3



รูปที่ 3.38 แสดงผลของมวลโมเลกุลของโพลีเมอร์แคตไอออน ที่ความเข้มข้น 25 มก./ล.
(Shun Yin Lee และ J. Gregory , 1991)

- S. Kawamura (1991) ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการใช้โพลีเมอร์จากธรรมชาติ ในการผลิตน้ำประปา โดยใช้โคโตแซนและโซเดียมอัลจิเนทในการศึกษาโคโตแซน (สกัดได้จาก เปลือกกุ้งและกระดองปู) เป็นสารที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ มีมวลโมเลกุลสูง (ประมาณ 1,000,000) มีคุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์ประจุบวก ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และใช้ใน กระบวนการผลิตน้ำประปา ซึ่ง US.EPA. ได้รับรองให้ใช้ในการผลิตน้ำประปาและสามารถใช้ใน ความเข้มข้นสูงถึง 10 มก./ล. ส่วนโซเดียมอัลจิเนท ผลิตมาจากสาหร่ายสีน้ำตาลใช้ในการผลิตน้ำ ประปาในญี่ปุ่นเป็นเวลาเกือบ 30 ปี มีคุณสมบัติเป็นโพลีเมอร์ประจุลบ เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก ไม่ เป็นพิษ ตะกอนที่ได้จากการใช้โซเดียมอัลจิเนทสามารถรีดน้ำออกได้ง่าย ใช้ความเข้มข้นน้อยทำให้ ประหยัดค่าสารเคมี และในการศึกษานี้พบว่า โคโตแซนสามารถลดความขุ่นของน้ำได้ดีโดยใช้ช่วง ความขุ่น 70 ถึง 3200 เอ็นทียู. ใช้โคโตแซนเพียงอย่างเดียว ใช้ปริมาณ 0.25-1 มก./ล. มีความ ขุ่นตกค้าง 10-25 เอ็นทียู. แต่ถ้าใช้ร่วมกับสารส้มในปริมาณ 0.05+8 มก./ล. จนถึง 0.15+20 มก./ล. สารส้ม มีความขุ่นเหลือ 4-10 NTU. ในขณะที่ใช้สารส้ม เพียงอย่างเดียวต้องใช้ความเข้มข้นถึง 10-300 มก./ล. มีความขุ่นตกค้าง 5-90 เอ็นทียู. (ดังตารางที่ 3.4)

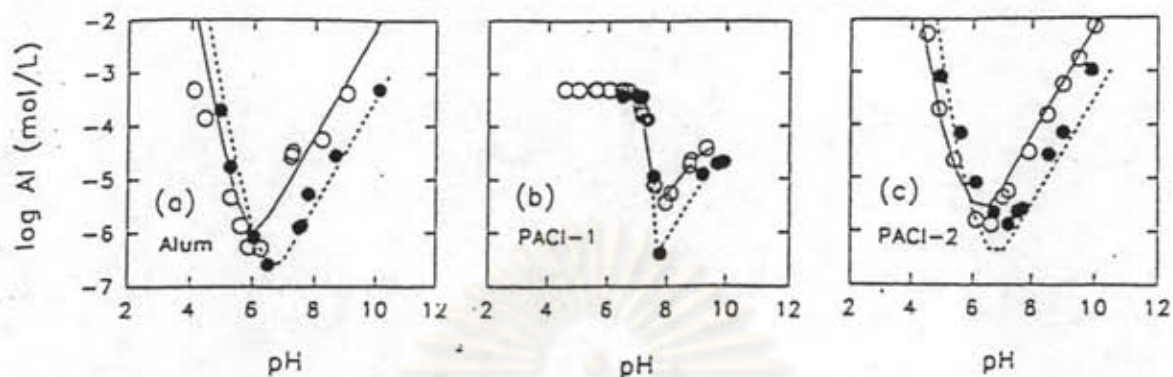
ตารางที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพของไคโตแซนเมื่อนำมาใช้เป็นโคแอกกูแลนต์
และโคแอกกูแลนต์เอ็ด (S. Kawamura , 1991)

TABLE 2
*Efficiency of chitosan as a primary coagulant and a coagulant aid**

Raw Water Turbidity ntu	Alum mg/L	Residual Turbidity ntu	Chitosan as Primary Coagulant mg/L	Residual Turbidity ntu	Chitosan as Coagulant Aid	Residual Turbidity ntu
3,200	300	90	1.00	10	0.15	4
1,100	100	10	1.00	10	-20 mg/L alum 0.1	3
400	30	5	0.25	25	+20 mg/L alum 0.1	5
50	10	14	0.25	18	+5 mg/L alum 0.05 +4 mg/L alum	10

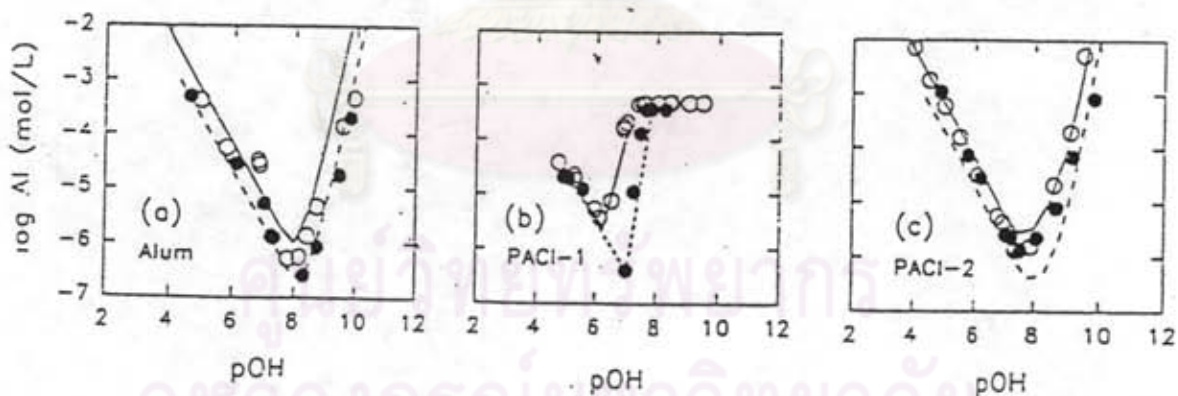
- Nguyen Chuong (1992) ได้นำโพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์สำหรับทำน้ำประปาที่โรงประปาบางเขน และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โพลีอะลูมินัมคลอไรด์มีประสิทธิภาพดีกว่าสารส้ม กล่าวคือสามารถกำจัดความขุ่นและสีได้ดีกว่าสารส้ม สามารถใช้ในช่วงพีเอชที่กว้างคือ 3 ถึง 10 และน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยโพลีอะลูมินัมคลอไรด์จะมีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมมีค่าน้อยกว่าการบำบัดด้วยสารส้ม และมีความสามารถในการกำจัดสีได้เกือบ 100 % และกำจัดความขุ่นได้มากกว่า 90 %

- J.E. Van Benschoten , J.K. Edzwald และ M.A. Rahman (1992) ได้ทำการศึกษา ถึงผลของอุณหภูมิและพีเอชต่ออะลูมิเนียมในน้ำที่ใช้สารส้ม และโพลีอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์โดยทำการทดลองทางห้องปฏิบัติการและในภาคสนามโดยในภาคสนามทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากโรงผลิตน้ำประปา 5 แห่ง ความสามารถในการละลายของอะลูมิเนียมวัดโดยเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงในน้ำปราศจากประจุ เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลทางสนาม จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมแปรตามค่าพีเอชและอุณหภูมิ โดยมีค่าความเข้มข้นอะลูมิเนียมละลายน้ำมีค่าต่ำสุดที่ค่า pOH = 8 (รูปที่ 3.39, 3.40) และเมื่อทำการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยนำมาพล็อตกราฟกับค่า pOH พบว่า ค่าอะลูมิเนียมละลายน้ำจะมีค่าต่ำสุดที่ค่า pOH = 7.5 - 8 และพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะลูมิเนียมจะละลายน้ำได้มากขึ้น ดังรูปที่ 3.41



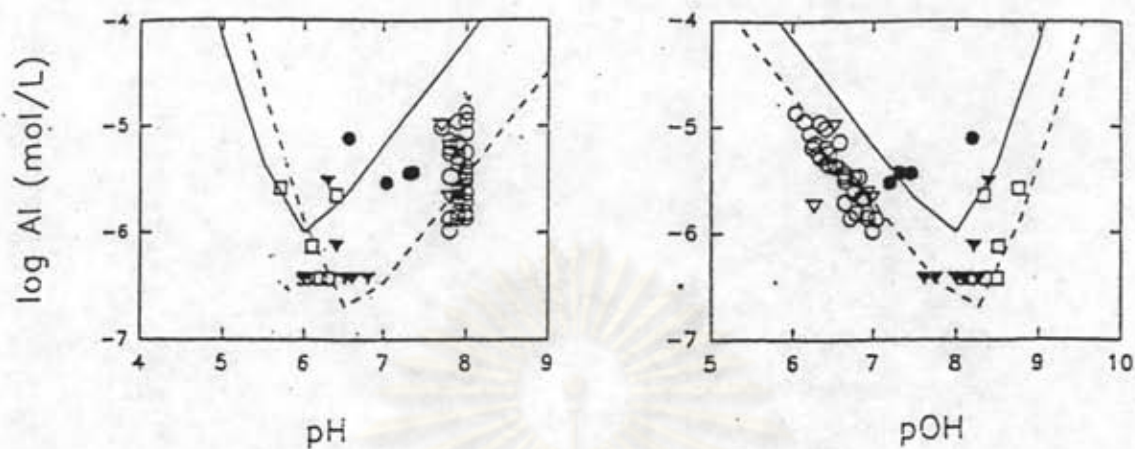
รูปที่ 3.39 แสดงอะลูมิเนียมละลายน้ำกับค่า พีเอช ในน้ำปราศจากประจุ

(J.E. Van Benschoten , J.K. Edzwald และ M.A. Rahman ,1992)

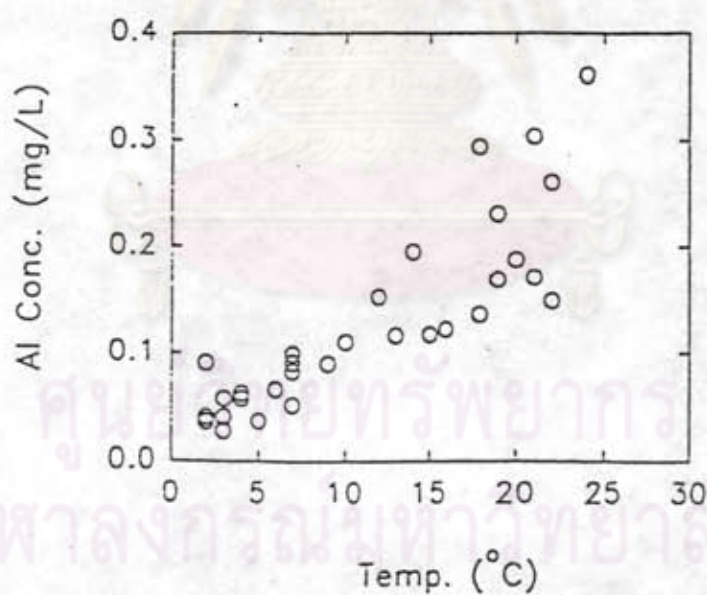


รูปที่ 3.40 แสดงอะลูมิเนียมละลายน้ำกับค่า พีโอเอช ในน้ำปราศจากประจุ

(J.E. Van Benschoten , J.K. Edzwald และ M.A. Rahman ,1992)



รูปที่ 3.41 ความเข้มข้นอะลูมิเนียมที่ละลายในน้ำผลิต ของโรงประปาทั้ง 5 แห่ง
(J.E. Van Benschoten , J.K. Edzwald และ M.A. Rahman ,1992)



รูปที่ 3.42 ความเข้มข้นอะลูมิเนียมในน้ำ กับ อุณหภูมิ
(J.E. Van Benschoten , J.K. Edzwald และ M.A. Rahman ,1992)

- J. Gregory (1993) ได้เสนอหลักการเกี่ยวกับแรงปฏิริยาต่างๆของคอลลอยด์ที่เกี่ยวข้องในการแยกของแข็งออกจากของเหลว พบว่าแรงระหว่างอนุภาคในน้ำมีความสำคัญเป็นพิเศษเมื่ออนุภาคมีขนาดเท่าคอลลอยด์ โดยการประมาณขั้นต้นของแรงระหว่างอนุภาคมีความสัมพันธ์เชิงเส้นขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและจะแรงขึ้นเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงการแยกอนุภาคเล็กเล็กออกจากน้ำโดยกระบวนการต่างๆเช่นโคแอกกูเลชัน, การกรอง, การลอย จะขึ้นอยู่กับการรวมตัวของคอลลอยด์

แรงปฏิริยาที่สำคัญระหว่างคอลลอยด์ มีแรงวันเดอร์วาลส์, แรงปฏิริยาทางไฟฟ้า, แรงไฮเดรชัน, ปฏิริยาไฮโดรโฟบิก และปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับโพลีเมอร์ เช่น แรงผลึกสเตอริก และ การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นปฏิริยาในระยะสั้น ซึ่งมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยในการส่องผ่านอนุภาค แต่จะมีผลมากต่อประสิทธิภาพการชน และเกาะยึดกันระหว่างอนุภาค

1. แรงวันเดอวาลส์ เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและอะตอมซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนค่าพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และระยะห่างระหว่างโมเลกุล เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กันมาก

2. แรงปฏิริยาทางไฟฟ้า เป็นแรงผลักที่เกิดขึ้นจากศักย์ไฟฟ้า ซึ่งชักนำโดยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่ง electrical double layer จะมีอิทธิพลอย่างมากต่อแรงปฏิริยาระหว่างประจุ ซึ่งการเพิ่มประจุบวก จะทำให้ diffuse layer ลดลงทำให้แรงผลักลดลง และอนุภาคเข้าใกล้กันมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่า Zeta potential ลดลง ทำให้ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้

3. Hydration effect เกิดจากที่คอลลอยด์มีน้ำล้อมอยู่โดยรอบเป็นแรงผลักที่มีค่าสูงซึ่งจะแตกต่างจากแรงผลักรของ electrical double layer ต้องใช้แรงมากที่บังคับให้อนุภาคต่างๆเกาะจับกันเป็น กลุ่มก้อนเพราะโมเลกุลของน้ำ จะกีดขวางไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กัน

4. Hydrophobic Interaction เป็นแรงดึงดูดระหว่างผิวไฮโดรโฟบิก มีค่ามากกว่าแรงวันเดอวาลส์ มีระยะดึงดูด ใกล้กว่าแรงวันเดอวาลส์ แรงนี้มีผลในการลดแรงผลักรทางไฟฟ้า

5. Steric Interaction เกิดขึ้นในกรณีที่มีโพลีเมอร์มากเกินไป ทำให้เกิดเสถียรภาพกับคอลลอยด์เกิดแรงผลักรระหว่างประจุ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Steric Stabilization ทำให้แรงวันเดอวาลส์ลดลง ซึ่งอธิบายได้โดยการที่อนุภาคเข้าใกล้กันมากผิวที่สัมผัสรวมถึงสายไฮโดรฟิลิก เมื่อสายนี้ละลายในน้ำเกิดการเกยกัน (overlap) ระหว่างผิว ก็จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำแรงผลักร

ระหว่างประจุ ซึ่งจะมีค่ามากในขณะที่ระยะห่างระหว่างประจุมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งทำให้แรงวันเดอวาล์ลลดลง และองค์ประกอบที่สำคัญของระดับความเสถียรของสเตรอิก คือความหนาของผิวที่ติดติดกัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคซึ่งความหนานี้ยากที่จะตรวจสอบได้

6. การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ โดยการใช้โพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อมอนุภาค ซึ่งความเข้มข้นของโพลีเมอร์ที่พอเหมาะจะไม่ทำให้เกิด Steric Interaction ทำให้เกิดการติดติดของอนุภาคเกิดเป็นฟล็อก ซึ่งการเชื่อมที่ได้ผลมักพบในการใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ จะเพิ่มโอกาสในการติดติดอนุภาค ซึ่งการต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ที่เหมาะสมเกิดขึ้นเมื่อผิวของอนุภาคถูกติดติดด้วยโพลีเมอร์เพียงครั้งหนึ่ง การใช้โพลีเมอร์ประจุลบได้ผลดี ถึงแม้ว่าจะมีประจุเหมือนกัน และการใช้โพลีเมอร์ประจุบวก จะทำให้เกิดการเสถียรภาพของคอลลอยด์ ดังนั้น โพลีเมอร์ประจุบวกจะมีความหนาแน่นของประจุบวกสูง ส่วนน้ำหนักโมเลกุลจะมีความสำคัญรองลงไป

7. Combine Interaction เป็นปฏิกริยารวมของแรงวันเดอวาล์ลและแรงปฏิกริยาทางไฟฟ้า ซึ่งผลรวมของแรงดังกล่าว จะให้พลังงานรวมของแรงปฏิกริยาระหว่างอนุภาค โดยที่เมื่ออนุภาคยึดติดอนุภาคด้วยแรงวันเดอวาล์ล แต่เมื่อมีแรงปฏิกริยาทางไฟฟ้าจะเกิดแรงผลักรวมและทำให้อนุภาคเข้าใกล้กันเหมือนเดิม ซึ่งทำให้แรงวันเดอวาล์ลมีค่ามากขึ้น

จากหลักการต่าง ๆ ที่ได้เสนอมาช้างต้นนี้ ได้นำมาอธิบายกลไกและการใช้งานในทางปฏิบัติดังนี้

1. โคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน

การเติมเกลือของเหล็กและอะลูมิเนียม ซึ่งจะทำให้ประจุของอนุภาคลดลงถ้าอนุภาคมีเสถียรภาพสูง (ประจุลบมาก หรือเกิด steric repulsion) การเพิ่มความเข้มข้นของสารโคแอกกูแลนต์ย่อมเป็นสิ่งจำเป็น สิ่งสำคัญในการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันได้จากความหนาแน่นของฟล็อกซึ่งทำได้โดยการกวนอย่างเบา ๆ การชนกันระหว่างอนุภาคทำให้โครงสร้างของฟล็อกแน่นเข้า ซึ่งใช้ได้ผลในถังตกตะกอนแบบไหลขึ้น

2. Depth filtration

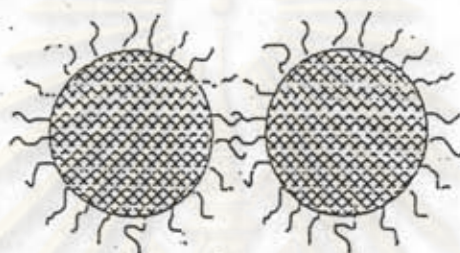
เป็นปฏิกริยาระหว่างสารกรองกับคอลลอยด์ โดยการเติมสารลงไปเพื่อทำให้อคอลลอยด์ติดกับสารกรอง

3. Cake filtration

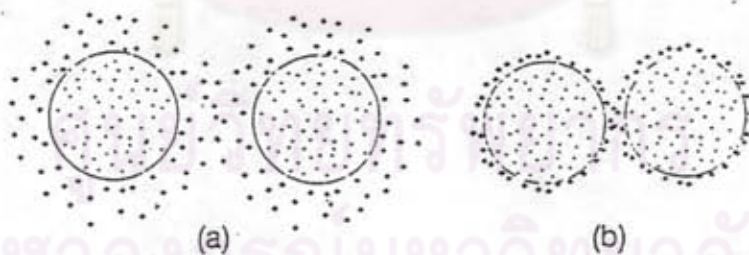
โดยการทำให้อนุภาครวมตัวกัน มีผลสำคัญในการดึงน้ำออกจากสลัดจ์

4. Fouling of microfiltration membrane

ลดการอุดตันในแผ่นเมมเบรนโดยการทำให้โคแอกกูเลชัน ก่อนที่จะทำการกรองด้วยเมมเบรน ทำให้ยืดอายุในการกรองได้



รูปที่ 3.43 แสดงปฏิกิริยาการดูดติดอนุภาคโดยปลายอิสระของโพลีเมอร์ซึ่งแรงผลักสเตอริก (steric repulsion) เกิดขึ้น เมื่อปลายอิสระของโพลีเมอร์เกยกัน (J. Gregory , 1993)



รูปที่ 3.44 ก) แสดงกลไกการต่อเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์
ข) แสดงการกลับมาที่มีเสถียรภาพใหม่ของคอลลอยด์ซึ่งเกิดจากโพลีเมอร์ (J. Gregory , 1993)