

บทที่ 3

ทฤษฎี สมมุติฐาน และหลักการ

3.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน

โคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการที่ไร้ทั่วไปในการผลิตน้ำประปา ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือ การกำจัดคอลลอยด์, สารอินทรีย์, อนุภาคที่ทำให้เกิดความขุ่นและสี ฯลฯ โดยการทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคที่เรียกว่า ฟล็อก ซึ่งมีน้ำหนักมากขึ้นและจะตกตะกอนแยกออกจากน้ำอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะต้องใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพของอนุภาคต่างๆ เราเรียกกระบวนการทำลายเสถียรภาพนี้ว่า “กระบวนการโคแอกกูเลชัน” และเมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วนี้เคลื่อนที่มาสัมผัสกันจนรวมกันเป็นฟล็อก ก็เรียกกระบวนการนี้ว่า “ฟล็อกกูเลชัน”

3.1.1 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบ่งได้เป็น 4 แบบ (O' Melia และ Stumm, 1980 อ้างถึงโดย มั่นสิน, 2526) คือ

3.1.1.1 การลดความหนาชั้นกระจาย : เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค มีผลทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงจนทำให้อนุภาคสามารถเข้าใกล้กันได้มากขึ้น

3.1.1.2 การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า : โดยการเติมสารเคมีที่ให้ไอออนที่มีประจุต่างชนิดกับคอลลอยด์ ทำให้เกิดการทำลายประจุของคอลลอยด์ และแรงผลักระหว่างอนุภาคจะลดลง จนอนุภาคสามารถรวมตัวกันได้

3.1.1.3 กลไกแบบกวาด : โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งสามารถเกาะตัวจับกับอนุภาคคอลลอยด์ จนรวมตัวเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ทำให้อนุภาคสูญเสียเสถียรภาพและตกตะกอนได้ ซึ่งระบบประปาส่วนใหญ่จะใช้กลไกนี้ เพราะควบคุมได้ง่าย

3.1.1.4 การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม : โพลีเมอร์เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่และมีปลายอิสระมากมาย การทำลายเสถียรภาพโดยวิธีนี้เกิดขึ้นโดยที่โมเลกุลของสารโพลีเมอร์จะเกาะติดกับอนุภาคคอลลอยด์ เป็นผลให้อนุภาคสูญเสียเสถียรภาพ และอนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งทำให้เกิดฟล็อกขนาดใหญ่

ใหญ่และแยกตัวออกจากน้ำได้ง่าย แต่ถ้าใช้โพธิเมอร์มากเกินไปก็จะมีผลเสียคือ ทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่ขึ้นได้(ดูรายละเอียดในหัวข้อ 3.15)

3.1.2 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันให้ได้ผลดีจะต้องควบคุมสภาวะต่างๆให้เหมาะสม ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันมีหลายประการ (Kawamura, 1996) ดังนี้

1. ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์
2. พีเอชและสภาพค่าง
3. ความรุนแรงและรูปแบบการกวน
4. ระยะเวลาการกวน
5. อุณหภูมิ
6. ลักษณะของอนุภาคในน้ำ

สื่้อแรกสามารถกำหนดได้ด้วยการออกแบบและดำเนินการ ส่วนสองข้อหลังไม่สามารถควบคุมได้ การควบคุมโคแอกกูเลชันจึงมุ่งหมายในการควบคุมปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์และระดับพีเอชที่เหมาะสม การควบคุมสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดโคแอกกูเลชันสามารถทำได้หลายวิธีเช่น ไทเทรตคอลลอยด์และวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าซีตาโพเทนเชียล

3.1.3 การกวนเร็วและกวนช้า

การกวนเร็วเป็นส่วนที่สำคัญในกระบวนการโคแอกกูเลชัน จุดมุ่งหมายของการกวนเร็วก็คือการกระจายสารเคมีในน้ำดิบให้ทั่วถึงและเท่ากันอย่างรวดเร็ว ตัวแปรที่สำคัญในการกวนน้ำก็คือความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) หรือค่า G หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำ ในดังกวนเร็วจะต้องมีความปั่นป่วนสูงทั้งนี้เพื่อให้การกวนผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อมๆกันทุกจุด การกวนเร็วมีหลายทางเลือกเช่น เครื่องกวนในเส้นท่อ, เครื่องกวนสถิตย์, กวนด้วยบิมหรืออาจใช้พาแรลเพลม (Kawamura, 1996) ส่วนน้ำในดังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก เพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นเกิดการแยกออกจากกัน การเคลื่อนไหวในดังกวนช้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคและจับติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ดังกวนเร็วมักมีค่า G ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที⁻¹ แต่ในดังกวนช้ามักมีค่า G อยู่ในช่วง 60-100 วินาที⁻¹ และตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ระยะเวลาของการกวนผสม ซึ่งหมายถึงเวลาสัมผัสระหว่างสารเคมีกับความปั่น

ส่วนใหญ่แล้วถึงความเร็วจะมีเวลาในการกวมนเร็วจะใช้เวลา 1 นาทีหรือน้อยกว่า ในทางปฏิบัติมักถือว่าเวลาสัมผัสเป็นเวลาที่น้ำอาศัยอยู่ในถังหรืออุปกรณ์กวมนเร็วซึ่งหมายถึง เวลากักน้ำ (detention time) พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนในระดับ G อาจคำนวณได้จากสมการแคมป์ และ สไตน์ (อ้างอิงโดยMhaisalkar, Paramasivam and Bhole, 1986) ดังสมการ

$$G = (P/\mu V)^{0.5} \dots\dots\dots(3.1)$$

G = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน (วินาที⁻¹)

P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน (นิวตัน-เมตร/วินาที)

μ = ความหนืดของน้ำ (นิวตัน-เมตร/ตารางเมตร)

V = ปริมาตรน้ำในถังกวมนเร็ว (ลบ.ม.)

สำหรับการกวนน้ำที่ใช้ใบพายในการกวนน้ำพลังงานที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก

$$P = 0.5C_D A \rho v^3 \dots\dots\dots(3.2)$$

C_D = ค่าคงที่สำหรับใบกวนแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 1.8 สำหรับใบกวนแบบใบพาย

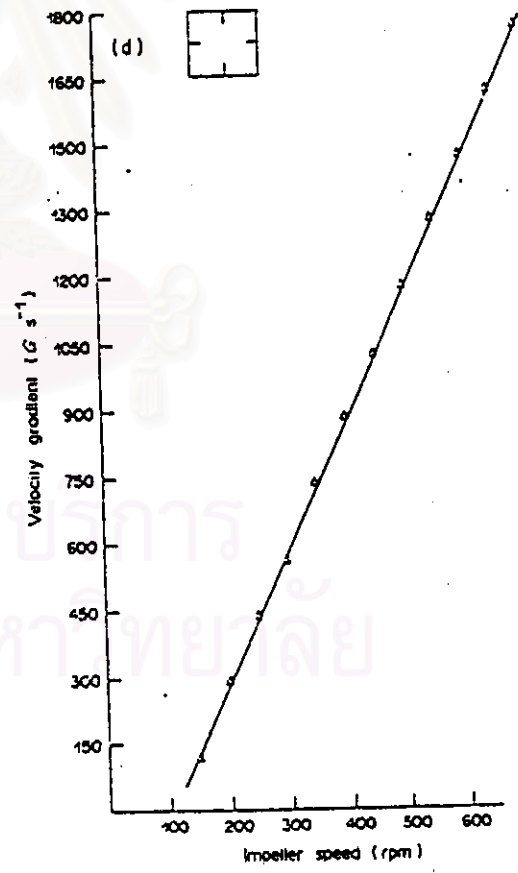
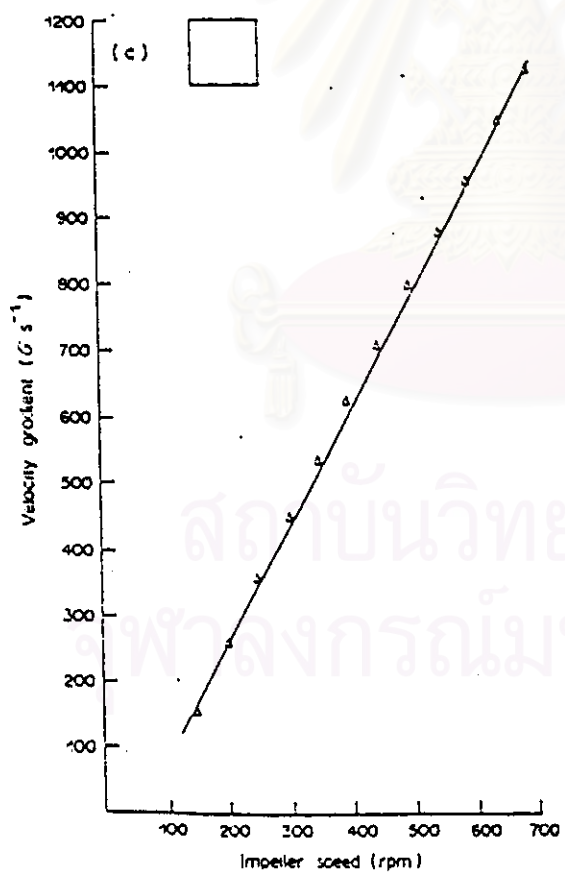
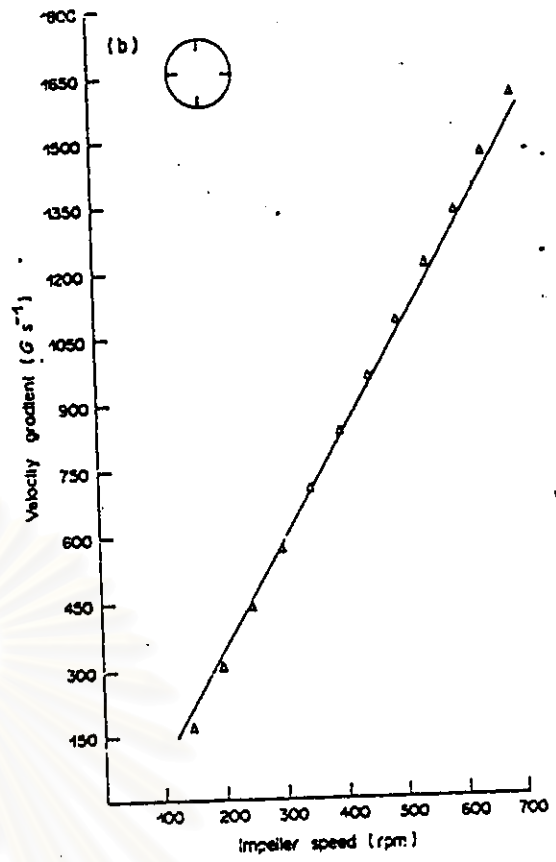
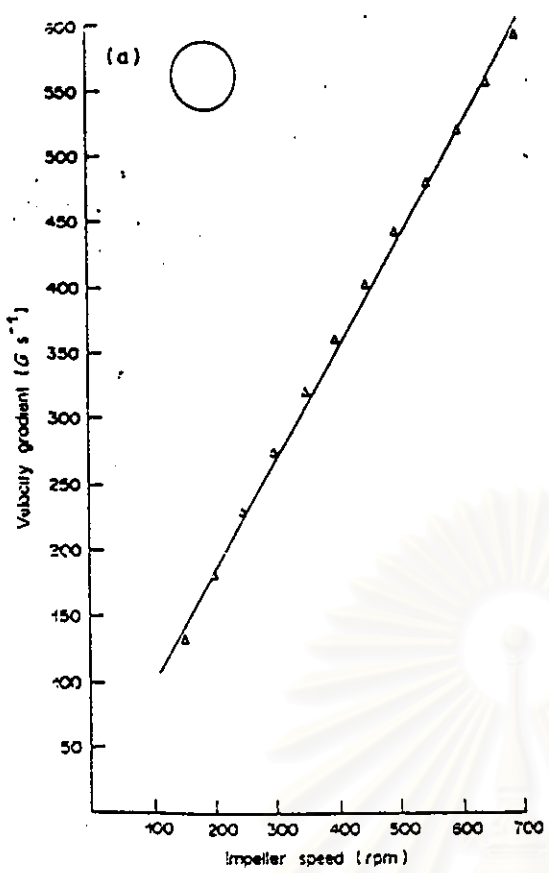
ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (ก.ก./ลบ.ม.)

A = พื้นที่ผิวของใบกวน (ตร.ม.)

v = ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัดเท่ากับ 0.75 เท่าของความเร็วรอบของใบกวน

P = พลังงานที่ต้องการ (วัตต์)

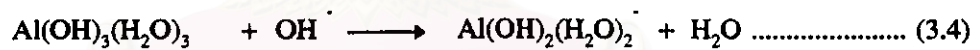
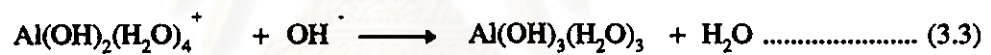
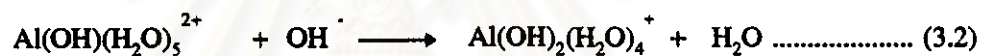
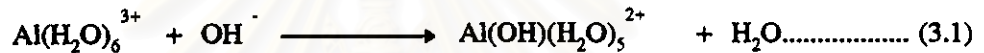
Mhaisalkar, Paramasivam and Bhole (1986)กล่าวว่าจากการใช้งานจริงพลังงานที่ต้องการใช้ไม่สามารถคำนวณจากสมการ 3.1 ได้ แม้แต่รูปแบบการกวมนที่ธรรมดาที่สุด จากรูปที่ 3.1 เป็นรูปแบบถึง 4 แบบซึ่งแตกต่างกันที่รูปทรงและครีบริอบดั่ง (stators) ซึ่งจะให้ค่า G ต่างกัน ดูจากกราฟแล้วถึงความเร็วแบบที่เหลี่ยมพร้อมแผ่นกันจะให้ค่า G สูงที่สุดที่ความเร็วรอบเดียวกัน และถึงกลมไม่มีครีบริอบให้ค่า G ต่ำที่สุดที่ความเร็วรอบเดียวกัน (เป็นการทดลองในขนาดทดลองไม่สามารถนำค่า G และค่าความเร็วรอบไปเทียบกับการใช้งานจริงได้ แต่ดูได้แก่นวมโน้มของผลการทดลอง)



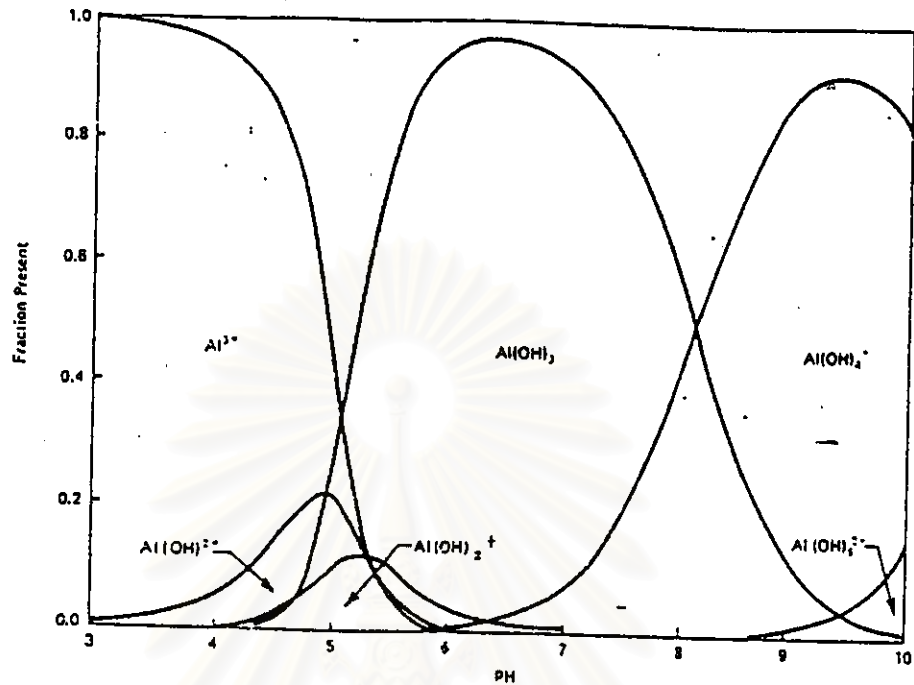
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการกวนและค่า G ในถังที่ต่างกัน 4 แบบ จากการทดลอง(Mhaisalkar ,Paramasivam and Bhole, 1986)

3.2 สารส้ม

สารส้มหรืออะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้กันมาตั้งแต่สมัยโรมัน(Dentel and Gossett ,1988) ในประเทศไทยสารส้มเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย มีชื่อทางเคมีว่า Alumimium Sulfate($Al_2(SO_4)_3$) สารละลายสารส้มจะมีอะลูมิเนียมไอออนซึ่งมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบโดยรอบ อะลูมิเนียมไอออนจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยการแทนที่โมเลกุลน้ำด้วยไอออนต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้เกิดเป็นไอออนอีกหลายประเภท และถ้ามีความเข้มข้นมากพอก็จะเกิดเป็นผลึกของ Alumimium Hydroxide ($Al(OH)_3$) ได้ด้วยดังสมการ



รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่าน้ำที่มีพีเอชต่ำจะมี Al^{3+} มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนที่มีประจุบวกลดลง เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง $Al(OH)_3$ จะเกิดมากกว่าสปีชีส์อื่นๆ และเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นด่าง สารประกอบเชิงซ้อนของไอออนจะมีประจุลบ นอกจากนี้โคอะแกรมยังแสดงให้เห็นขอบเขตของการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ ด้วย อย่างไรก็ตามการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ เกิดได้ในอัตราช้ามากเนื่องจากการใช้สารส้มปริมาณที่น้อยเนื่องจากไม่มีสารชักนำ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องใช้สารส้มไม่น้อยกว่า 30 มก./ล. จึงจะมี $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นในความเร็วพอสมควร

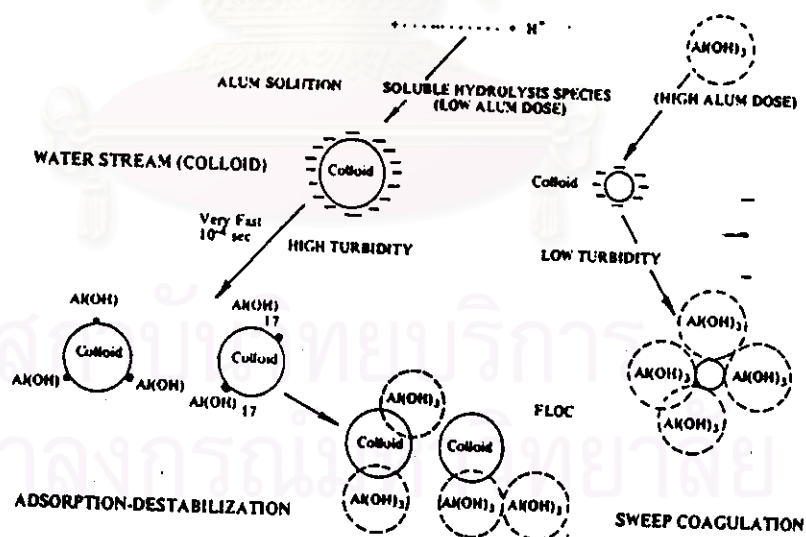
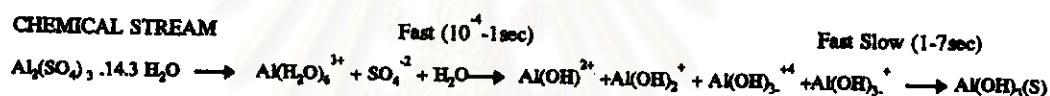


รูปที่ 3.2 ชนิดของอะลูมิเนียมเทียบกับค่าพีเอชของสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ 1×10^{-4} M อะลูมิเนียมเปอร์คลอไรด์ (Committee AWWA. Report, 1971)

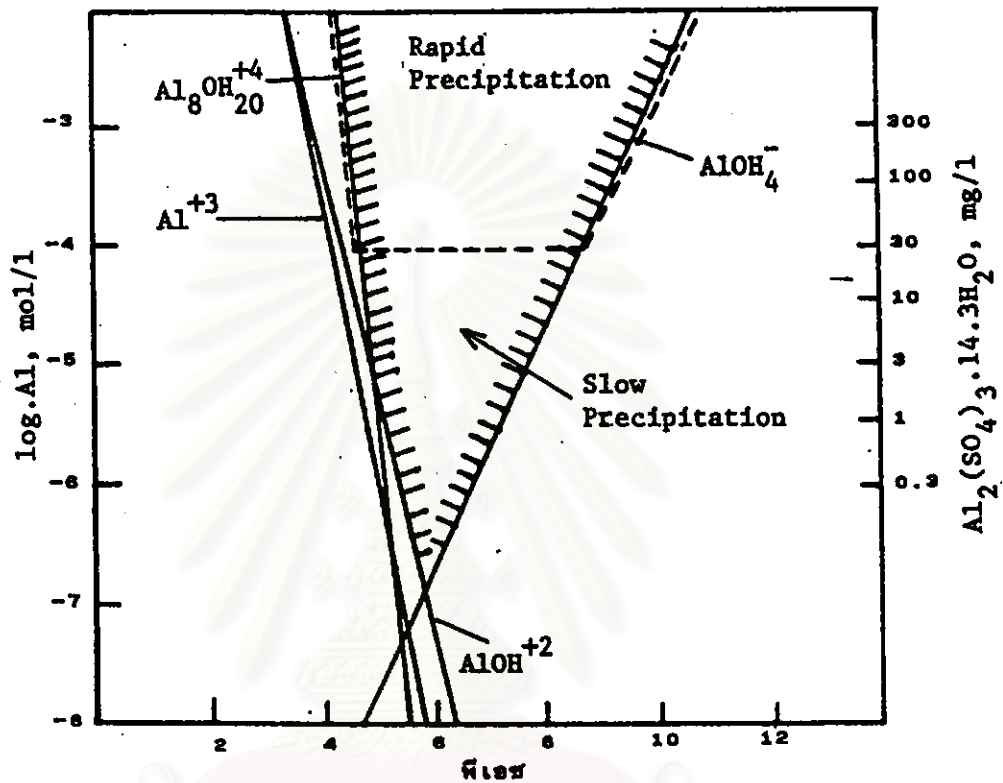
สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณสารโคแอกกูแลนต์และพีเอชของน้ำ คือ

1. กลไกแบบจุดติดผิวและทำลายประจุ สารส้มสร้างกลไกแบบจุดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็นไอออนชนิดต่างๆ เช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^+$ ซึ่งสามารถจุดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆอนุภาคจนกลายเป็นฟล็อก กลไกแบบนี้มีข้อดีคือ ไม่เปลืองสารส้มและให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติคืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือรีคเฮนน้ำออกได้ง่าย ถึงแม้จะมีข้อด้อยบ้างแต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากกลไกนี้ต้องเกิดขึ้นและเสร็จภายในเวลา 10^{-4} - 1 วินาที และความสามารถในการละลายของ $Al(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ จึงยากที่จะเกิดกลไกจุดติดผิวและทำลายประจุขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2. กลไกห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก สารส้มสร้างกลไกแบบกวาดหรือ sweep coagulation โดยการสร้าง $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับ $Al(OH)_3$ ก็จะรวมตัวอยู่กับ $Al(OH)_3$ นั้น ดังรูปที่ 3.3 เมื่อเกิดขึ้นมากๆ ก็จะได้ฟล็อกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่ายกว่า พีเอชของน้ำครวอยู่ในช่วง 6-7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแบบแรกมาก แต่มีข้อเสียคือเปลืองสารส้มและให้สลัดจ์จำนวนมากที่มีคุณภาพต่ำคืออัดตัวไม่แน่นและคิงน้ำออกยาก รูป 3.3 แสดงให้เห็นว่าโคแอกกูเลชันด้วยกลไกแบบกวาดจะได้ผลดีที่สุดที่พีเอช 6.8-8.2 และใช้สารส้ม 20-50 มก./ล. ซึ่งกลไกแบบจุดติดผิวและทำลายประจุหรือแบบผสมทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยสารส้มน้อยกว่า 10 มก./ล.



รูปที่ 3.3 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มทั้ง 2 ประเภท (Amirtharajah and Mills, 1982)



รูปที่ 3.4 Stability Diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มี ความขุ่น พื้นที่ภายในเส้นประเป็นบริเวณที่มีการก่อรูปของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เกิดขึ้นได้รวดเร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประแต่ยังแรงอาจมีการก่อรูปของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Weber, 1972 อ้างถึงโดย มั่นสิน, 2526)

จากรูปที่ 3.4 พื้นที่ในเส้นประแสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในทางปฏิบัติเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงของสภาพด่าง ไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ ดังนั้นการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มให้กับน้ำควรมีพีเอชเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย น้ำที่มีพีเอชต่ำเกินไปก็จะได้ไม่ดีเนื่องจาก Al^{+3} ไม่ดูดซับผิวอนุภาคคอลลอยด์ และน้ำไม่ควรมีพีเอชสูงเกินไปเนื่องจากไอออนประจุลบซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันให้กับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน

3.3 โพลีเมอร์

โพลีเมอร์เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยกลุ่มอนุพันธ์ต่างๆหลายชนิดเพื่อใช้เป็นตัวสร้างสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคหรือฟล็อก เพื่อให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น(0.3-1 มม.) โดยใช้ปริมาณโพลีเมอร์เพียงเล็กน้อย (ประมาณ 0.1-5 มก./ล. แล้วแต่ชนิดของโพลีเมอร์) โพลีเมอร์แบ่งกว้างๆได้ 2 ชนิดคือโพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ(natural polymer)และโพลีเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์(synthetic polymer) และเมื่อพิจารณาถึงประจุที่อยู่บนสายโพลีเมอร์จะสามารถแบ่งโพลีเมอร์ได้เป็น 3 ชนิด (ชงชัยและกาญจนา, 2535) คือ

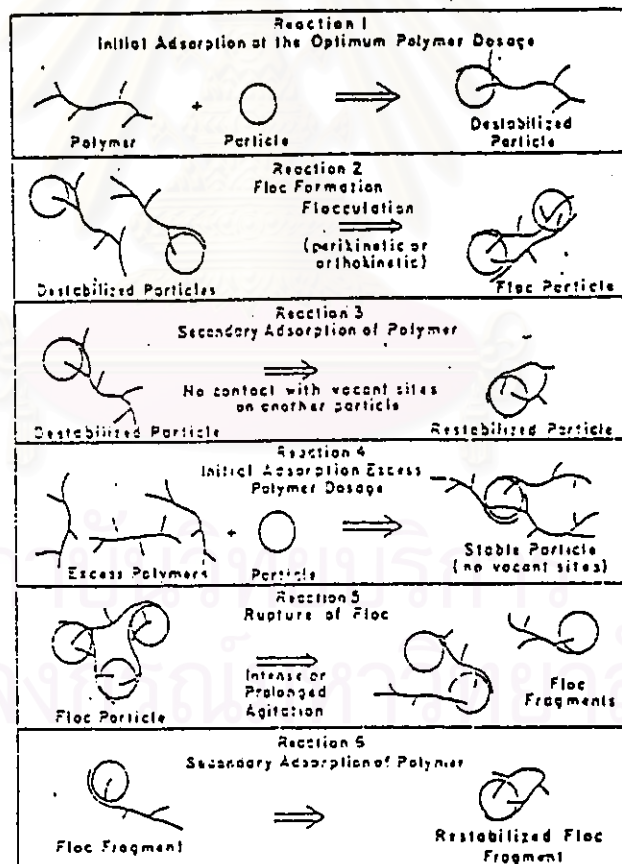
1. โพลีเมอร์ที่มีประจุบวก (cationic)
2. โพลีเมอร์ที่มีประจุลบ (anionic)
3. โพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุ (nonionic)

การใช้โพลีเมอร์ในการสร้างฟล็อกจะต้องใส่โพลีเมอร์หลังการเติมโคแอกกูแลนต์ไปแล้ว 30 วินาที ถึง 2 นาที นอกจากนี้โพลีเมอร์ยังสามารถลดประจุคอลลอยด์ได้อีกด้วยและโดยปกติเพื่อจะไม่มผลต่อกลไกการเกิดปฏิกิริยาของโพลีเมอร์

3.3.1 การใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด

หลังจากการเติมโคแอกกูแลนต์ลงในน้ำดิบแล้ว จะมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “อนุภาคเบื้องต้น” อนุภาคเบื้องต้นนี้จะถูกผ่านเข้าไปยังกระบวนการฟล็อกกูเลชันเพื่อรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ที่เรียกว่าฟล็อกต่อไป การเติมโพลีเมอร์หลังจากเกิดอนุภาคเบื้องต้นจะช่วยให้การสมานฟล็อกเกิดได้ดียิ่งขึ้น โมเลกุลขนาดใหญ่ของโพลีเมอร์จะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมกันได้เร็วและเกิดฟล็อกที่มีความแข็งแรง น้ำหนักมากขึ้นทำให้แยกออกจากน้ำได้ดี กลไกการทำงานของโพลีเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองที่เรียกว่า กลไกสะพานเชื่อมด้วยโพลีเมอร์(polymer bridging) รูป 3.5 ตามทฤษฎีนี้โมเลกุลของโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 1 ของรูป 3.5 การเกาะติดอาจมีผลเนื่องจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว อนุภาคดังกล่าวนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (ดูปฏิกิริยา 2) การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นได้ครบเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่จะเกาะจับบนอนุภาคอื่นก็จะกลับมา

เกาะที่ปลายอนุภาคเดิม (cupuligiriyath 3) ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการ คือทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่างเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) การใช้โพลีเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น (cupuligiriyath 4) อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานไปก็ก่อให้เกิดผลเสียได้เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วจะแตกออกเป็นส่วนตัว (cupuligiriyath 5) และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับบนอนุภาคเดิม (cupuligiriyath 6) เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่ได้อีก

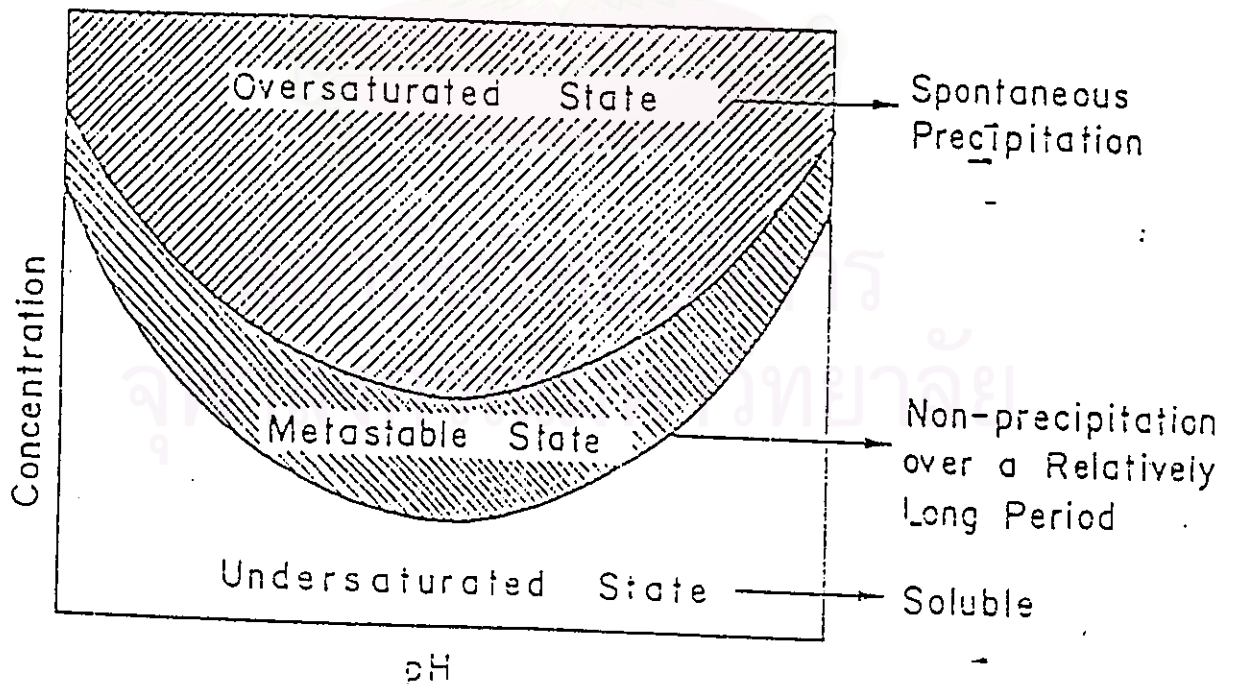


รูปที่ 3.5 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ (Weber 1972, อ้างอิงโดย มั่นสิน, 2528)

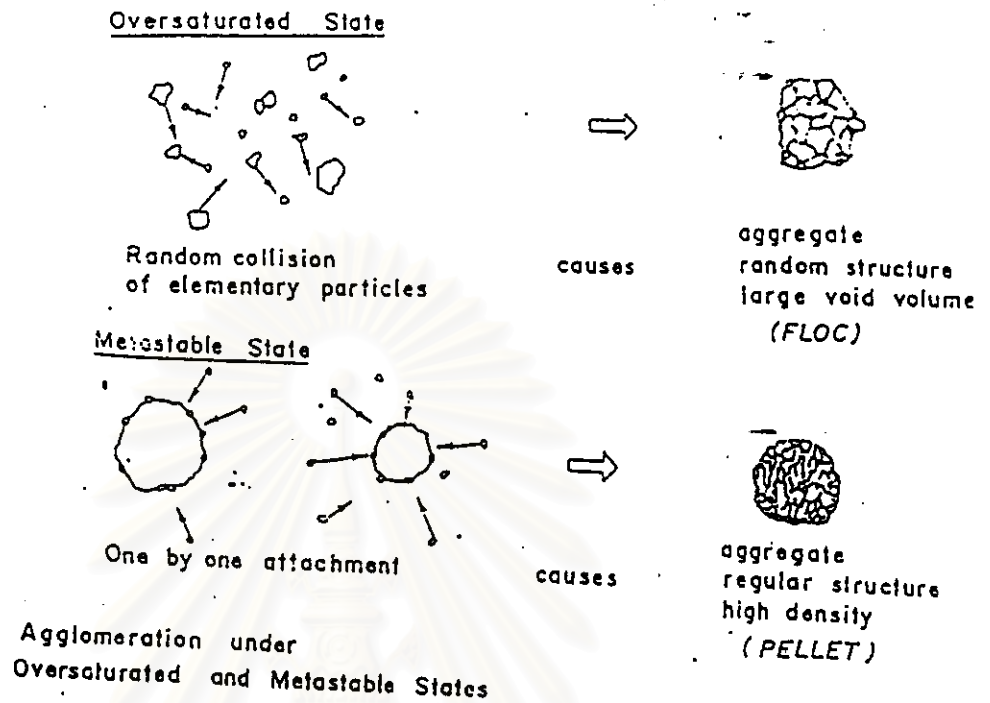
3.4 เพลล็ด

3.4.1 สมมติฐานเบื้องต้นของการกำจัดความขุ่นในกระบวนการสร้างเพลล็ด

สมมติฐานหนึ่งของการสร้างเพลล็ด คือ เพลล็ดจะสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่สารละลายอยู่ในสถานะเสถียรแบบเมตะ (metastable state) กล่าวคือในสถานะดังกล่าวความเข้มข้นสารจะมากกว่าอัตราการละลายได้ของสาร แต่ยังไม่มากพอที่จะเกิดสถานะเกินอิ่มตัวและก่อรูปเป็นของแข็ง (precipitation) หรือเกิดในปริมาณที่น้อยมากแม้ว่าจะปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานาน ดังรูปที่ 3.6 แต่เมื่อมีการเติมสารชนิดเดียวกันกับสารละลายนั้นและอยู่ในสถานะของแข็ง (solid state) โดยให้เพิ่มเข้าอยู่ในสารละลายที่อยู่ในสถานะเสถียรแบบเมตะ จะทำให้สารละลายเหล่านั้นเกิดการจับตัวเป็นของแข็งบนพื้นผิวของของแข็งที่เติมลงไปอย่างรวดเร็วและมีการรวมตัวเป็นของแข็งที่ใหญ่ขึ้นทันที จากหลักการนี้เราสามารถคิดแปลงเป็นกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเพลล็ด โดยการเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปในน้ำขุ่น ซึ่งจะทำให้อนุภาคที่อยู่ในน้ำถูกทำลายเสถียรภาพเกิดเป็นจุดฟล็อก เมื่อทำให้จุดฟล็อกเหล่านี้เข้าไปรวมอยู่กับเพลล็ดที่มีขนาดใหญ่และแข็งแรงภายในอุปกรณ์สร้างเพลล็ด ก็จะเกิดการจับตัวกันระหว่างจุดฟล็อกกับเพลล็ดเหล่านั้น โดยเป็นการจับกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one by one attachment) ทำให้ไม่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายในหรือมีน้อยมากจึงเกิดเพลล็ดที่มีความหนาแน่นสูง ดังรูปที่ 3.7 (Tambo and Matsui 1989)



รูปที่ 3.6 สถานะของสารละลายเมื่ออยู่ในสถานะที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่างกัน (Tambo and Matsui, 1989)



รูปที่ 8.7 เปรียบเทียบการจับตัวเป็นของแข็งในสภาวะปกติกับสภาวะเมตะ(Tambo and Matsui, 1989)

3.4.2 กลไกของกระบวนการสร้างเฟลลิตแบบไหลขึ้น

การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นเกิดขึ้นในหลายขั้นตอนซึ่งแสดงเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ๆ คือ สมมุติว่า การรวมตัวเป็นกลุ่มมวลอันดับหนึ่ง(first level aggregates รูป 3.8) ของอนุภาคขั้นต้น(Primay particle) มี "ความหนาแน่นประสิทธิผล" (effective density) คือ ρ ซึ่งสามารถคำนวณความหนาแน่นประสิทธิผลของกลุ่มมวลอันดับหนึ่งกับอัตราส่วนช่องว่าง (void ratio, ϵ) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้ (Tambo and Wang, 1993)

$$\rho_1 = \rho_0 (1 - \epsilon_1) \dots\dots\dots(3.5)$$

ρ_0 = ความหนาแน่นของอนุภาคขั้นต้น

ρ_1 = ความหนาแน่นประสิทธิผลของการรวมตัวขั้น 1

ϵ_1 = อัตราส่วนช่องว่างของการรวมตัวขั้น 1

ขั้นที่สองของการรวมตัวของกลุ่มมวลอันดับหนึ่งเรียกว่า กลุ่มมวลอันดับสอง(second level aggregates) โดยมีสมการดังนี้

$$\rho_2 = \rho_1 (1 - \epsilon_2) \dots\dots\dots(3.6)$$

จากสมการที่ 3.5 จะได้สมการ

$$\rho_2 = \rho_0 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \dots\dots\dots(3.7)$$

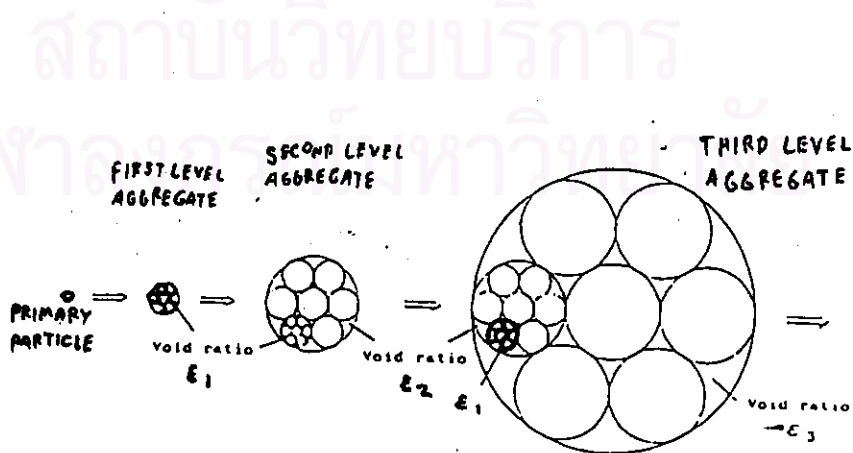
และถ้ามีการรวมตัวไปเรื่อยๆ จะได้สมการดังนี้

$$\rho_i = \rho_{i-1} (1 - \epsilon_i) \dots\dots\dots(3.8)$$

$$= \rho_0(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \dots\dots(1 - \epsilon_{i-1})(1 - \epsilon_i) \dots\dots\dots(3.9)$$

ความหนาแน่นของกลุ่มมวลจะลดลงเรื่อยๆถ้ามีการรวมตัวหลายขั้นตอนตามสมการ รูปที่ 3.8 จะสามารถอธิบายการรวมตัวของกลุ่มมวลอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น

* (หมายเหตุ : ในสมการ 3.8, 3.9 ซึ่งเป็น สมการที่ 6 ในบทความของ Tambo and Wang, 1993 ได้พิมพ์ ตัว ϵ ผิดเป็นตัว ρ จึงขอแก้ไขไว้ ณ ที่นี้)

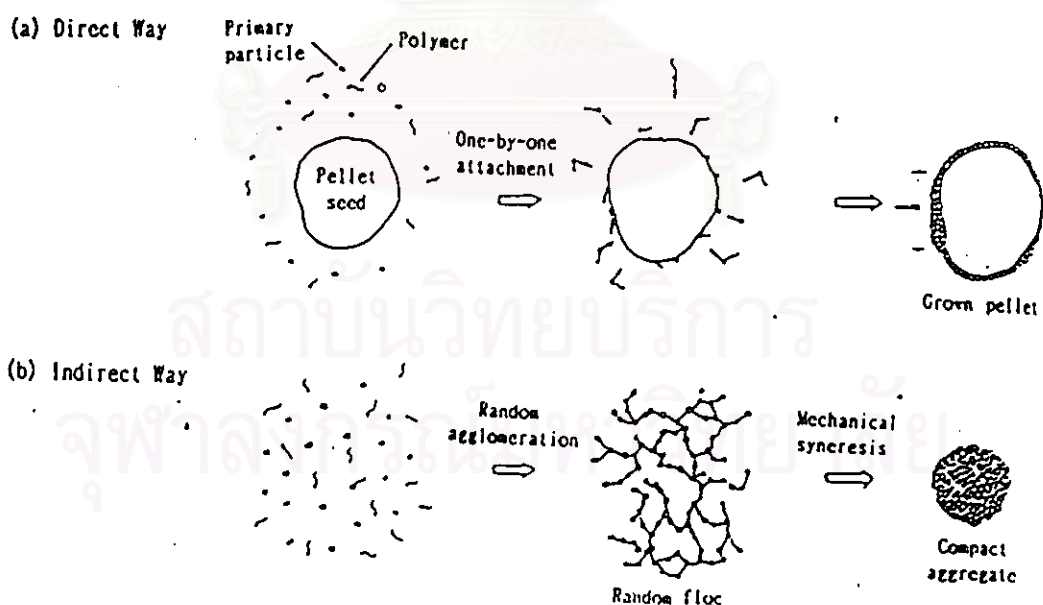


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการรวมกลุ่มมวลในหลายขั้นตอน (Tambo and Wang, 1993)

แต่ในทางปฏิบัติแล้วอาจไม่สามารถอธิบายได้ด้วยวิธีอุดมคติแบบนี้ แต่อย่างไรก็ตาม สมการ 3.8 จะช่วยให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและโครงสร้างของฟล็อกได้ง่ายที่สุด และจากสมการนี้เป็นแนวทางที่จะสร้างฟล็อกที่อัดแน่นได้ 2 ทางคือ

1. จำกัดขั้นของการรวมตัว ดูจากสมการ 3.8 จะพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคจะหนาแน่นที่สุดที่การรวมตัวขั้นที่ 1 หรือ $i = 1$ จะทำให้มวลอนุภาคมีช่องว่างน้อยที่สุด
2. ลดอัตราส่วนช่องว่าง คือให้ $\epsilon_i = 0$ (โดย $i = 2, 3, \dots$) ซึ่งต้องจำกัดอัตราส่วนช่องว่างให้อยู่ที่ขั้นแรก

วิธีที่จะสร้างเพลเล็ตมี 2 ทางคือ ทางตรงคือใช้เพลเล็ตที่มีความหนาแน่นอยู่แล้วเป็นเชื้อ โดยไม่คำนึงถึงระดับขั้นการรวมตัวซึ่งใช้วิธีการจับกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ส่วนทางอ้อมคือ การรวมตัวแบบสุ่ม ดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงการจับแบบหนึ่งต่อหนึ่งและการชนแบบสุ่ม (Tambo and Wang, 1993)

3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประสิทธิผล (effective density) และขนาดของมวลอนุภาคในชั้นเพลต

Tambo and Wang (1993) ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประสิทธิผลและขนาดของมวลอนุภาคในชั้นตะกอนโดยใช้ดินคาโอลินความเข้มข้น 0.3, 1.0, 3.0, 10.0 ก./ล. อัตราน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม. อัตราการไหลอะลูมิเนียมและโพแทสเซียมตามตารางที่ 3.1 พบว่าความหนาแน่นประสิทธิผลของเพลตจะเพิ่มตามความขุ่นน้ำเข้า ตามรูป 3.10 ขนาดของจุลฟล็อกที่เกิดในชั้นกวนเร็ว (วัดโดย microphotographic) ดังตาราง 3.1 แสดงขนาดจุลฟล็อก 4 แบบ Tambo และ Watanabe 1979(อ้างอิงโดย Tambo and Wang, 1993) ได้คำนวณเป็นสมการดังนี้

$$\rho_c = K_c \rho_0$$

$$\rho_c = \text{ความหนาแน่นประสิทธิผลของเพลต}$$

$$\rho_0 = \text{ความหนาแน่นประสิทธิผลของจุลฟล็อก(อนุภาคขั้นต้น)}$$

$$K_c = \text{อัตราส่วน substantial}$$

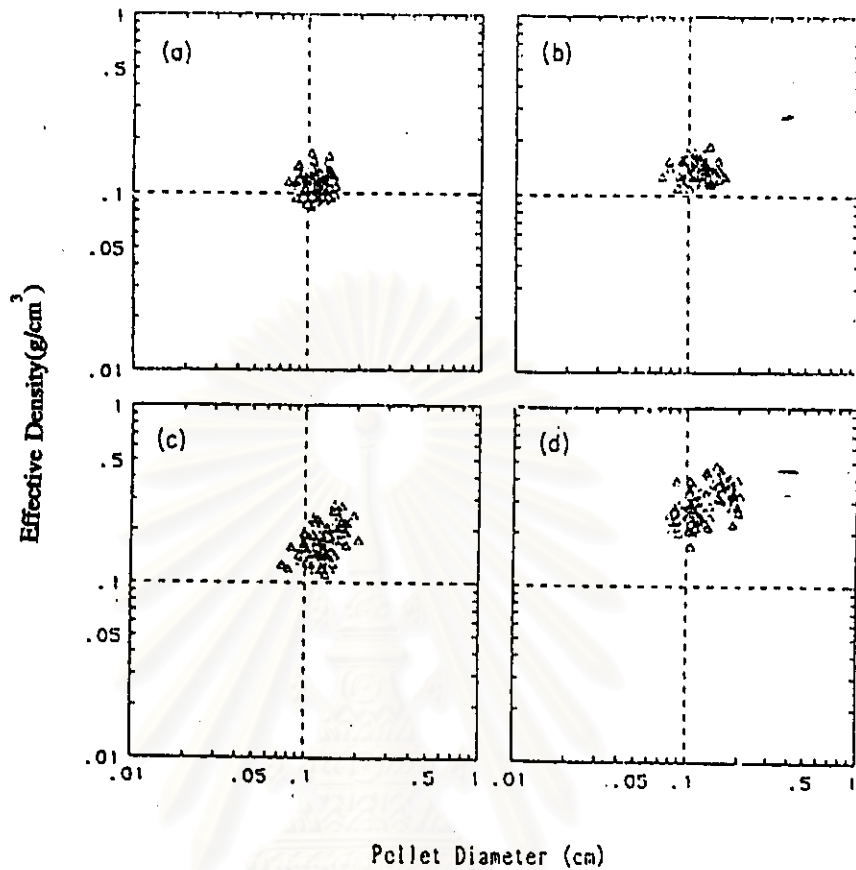
$$= (1-\epsilon_1)(1-\epsilon_2)(1-\epsilon_3)\dots\dots(1-\epsilon_{i-1})(1-\epsilon_i)$$

ตามอุดมคติ กลุ่มมวลรวมชั้นหนึ่ง $\epsilon = 0.40$ จะได้ $K_c = 0.60$ แต่ค่าที่ได้จากตาราง 3.1 K_c อยู่ระหว่าง 0.42 - 0.54 ซึ่งน้อยกว่าค่า K_c ในอุดมคติ ดังนั้นเพลตเกือบทั้งหมดจะมีโครงสร้างที่อัดแน่น

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบอัตราส่วนจุลฟล็อกกับเพลตที่ค่าความขุ่นและปริมาณสารเคมีที่ใช้ (Tambo and Wang, 1993)

ความขุ่นน้ำดิบ	อัตราส่วน ($\times 10^{-3}$)		จุลฟล็อก		เพลต	
	ALT *	PT **	ขนาด(μm)	ρ_0 (mg/cm^3)	ρ_c (mg/cm^3)	K_c
0.3 g/l	6	3	35.1	210	112	0.53
1.0 g/l	3	1.5	25.0	286	139	0.49
3.0 g/l	2	1	16.4	404	170	0.42
10.0 g/l	1	0.5	9.4	687	292	0.42

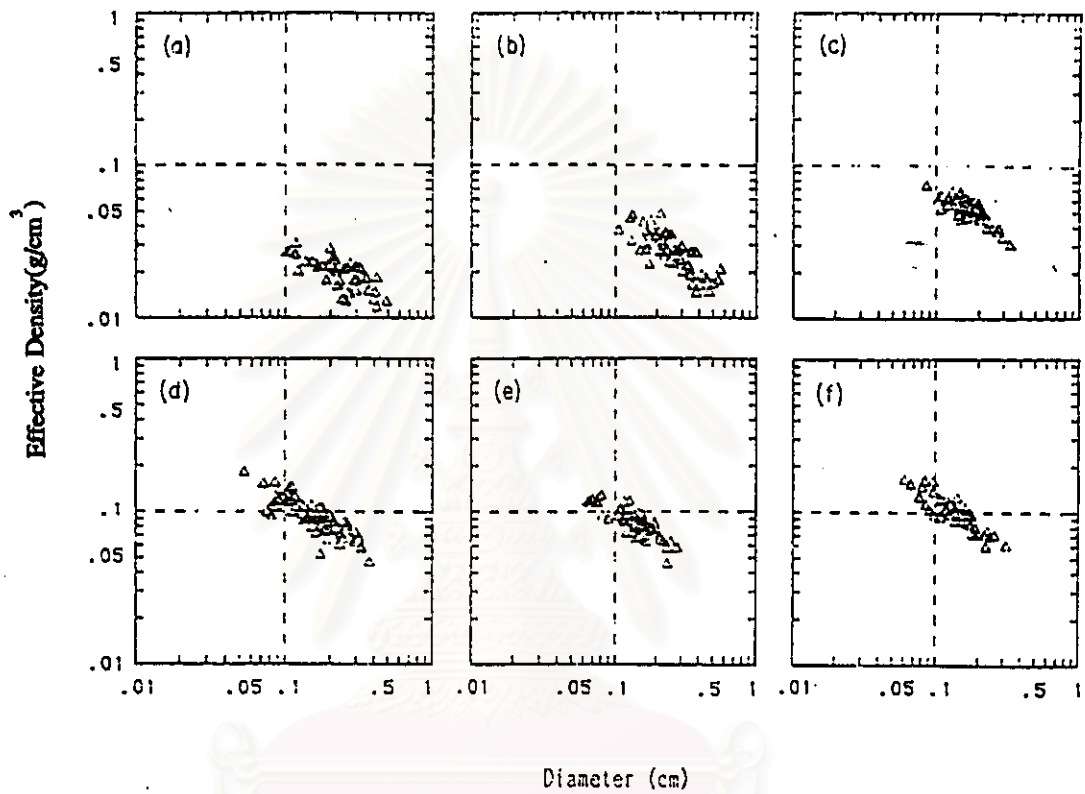
* อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่อความขุ่น ** อัตราส่วนโพแทสเซียมต่อความขุ่น



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกับความหนาแน่นประสิทธิผลที่ 4 ค่าความขุ่น
(a) 0.3 g/l.; (b) 1.0 g/l. ; (c) 3.0 g/l. (d) 10.0 g/l. (Tambo and Wang, 1993)

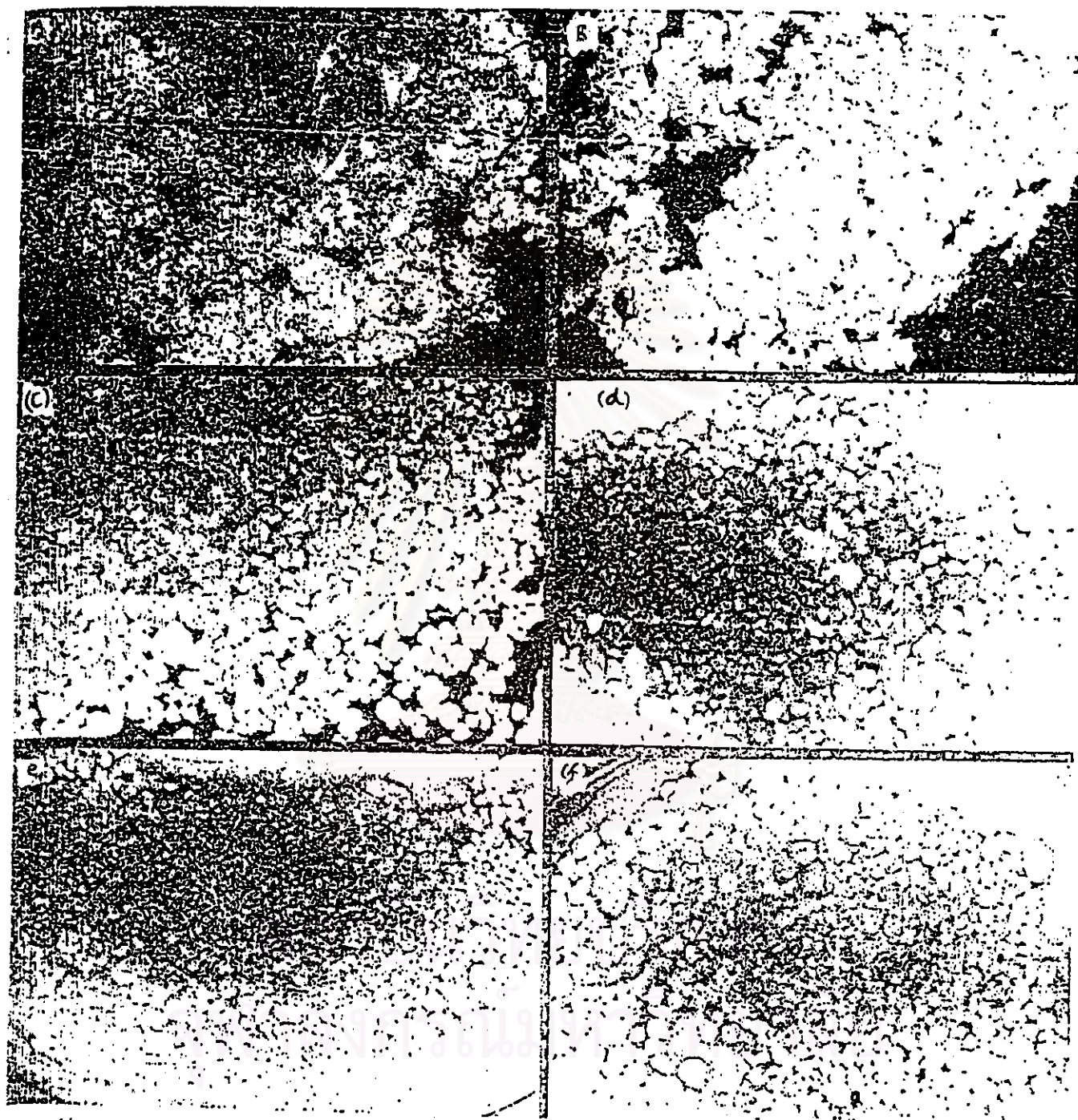
3.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประสิทธิผลและขนาดของมวลอนุภาคในจาร์ เทศ

ทดลองโดยใช้ดินคาโอลินสังเคราะห์ความขุ่นที่ 3 ก./ล. ใช้ PACI และปรับพีเอชที่ขั้นตอนการกวนเร็ว ใช้โพลีเมอร์ที่ขั้นตอนกวนช้าและกวนที่ระยะเวลานานต่าง ๆ กันคือ 15, 30, 60, 120, 240, 360 นาที ระบบนี้ต่างจากระบบจริงคือไม่มีการเติมความขุ่นเข้าระบบ ได้ความสัมพันธ์ความหนาแน่นและขนาดพลล็ดดังรูป 3.11 และ ภาพที่ 3.1



Size-density relation of aggregates in a jar tester agitated for (a) 15 min (b) 30 min (c) 60min (d) 120 min (e) 210 min (f) 360 min

รูปที่ 3.11 ขนาดและความหนาแน่นประสิทธิผลของกลุ่มพอลิเมอร์ในจาร์ทดสอบที่เวลาต่างๆ (Tambo and Wang, 1993)



Variation of the appearance of the aggregates in jar tester having been agitated for
 (a) 15 min (b) 30 min (c) 60min (d) 120 min (e) 210 min (f) 360 min

ภาพที่ 3.1 เฟลด์ของคาโอลินที่มีการกวนในเวลาต่างๆ (Tambo and Wang, 1993)

3.5 การศึกษาที่ผ่านมา

สุชาติ (2526) ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่องการใช้เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์ในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยทดลองวัดประจุของสารส้ม, สารประกอบเหล็ก, โพลีเมอร์ประจุบวกและลบบางชนิด, น้ำสังเคราะห์ และได้ทำจาร์เทสต์กับน้ำสังเคราะห์และน้ำธรรมชาติที่เป็นน้ำดิบที่จะใช้ผลิตน้ำประปาโดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ได้สรุปผลการวิจัยดังนี้

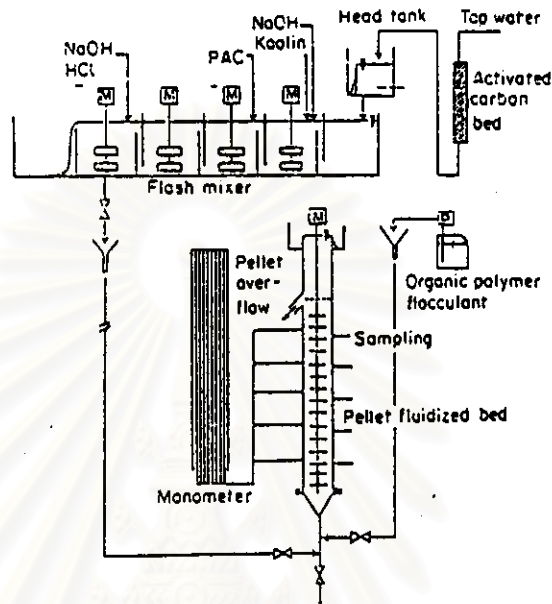
1. เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์สามารถวัดประจุสารส้มและโพลีเมอร์ได้แต่ควรจะรักษาภาวะของการไทเทรตของตัวอย่างที่จะนำมาเปรียบเทียบให้ใกล้เคียงกัน
2. การวัดประจุของน้ำใสจากกระบวนการการโคแอกกูเลชันแบบกวาดสามารถใช้ติดตามและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันได้
3. การวัดประจุของน้ำหลังกวนผสมของการโคแอกกูเลชันที่ใช้กลไกคอลลิดีฟและลดเสถียรภาพ สามารถใช้ติดตามและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันได้
4. ในการวิจัยนั้นยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของโคแอกกูแลนต์กับสมบัติของน้ำที่จะทำโคแอกกูเลชัน จึงยังไม่สามารถใช้เทคนิคการไทเทรตคอลลอยด์ทำนายชนิดและปริมาณที่เหมาะสมของโคแอกกูแลนต์ได้
5. จากผลการวิจัยนั้น สุชาติได้ตั้งสมมติฐานว่า “ ในการโคแอกกูเลชันแบบกวาดบทบาทของสารส้มจะประกอบด้วย

5.1 การสร้างสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวก ซึ่งจะคอลลิดไปบนผิวของอนุภาคเพียงส่วนหนึ่ง

5.2 การสร้างตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะกำจัดอนุภาคประจุลบ ดังนั้นภาวะต่างๆ ซึ่งได้แก่ ความเข้มข้นสารส้ม, พีเอชและความปั่นป่วนในการกวนผสม จะทำให้การโคแอกกูเลชันแบบกวาดได้ผลดีที่สุด คือภาวะที่ทำให้สารส้มสร้างตะกอนไฮดรอกไซด์ได้มากพอที่จะกำจัดอนุภาคประจุลบได้ดีและขณะเดียวกันปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกที่เกิดขึ้นก็จะไม่มากเกินไปจนทำให้อนุภาคที่เปลี่ยนเป็นประจุบวก ซึ่งจะมีเสถียรภาพในน้ำใสมากเกินไป ”

Tambo and Matsui (1989) ได้ทดลองการแยกของแข็ง (ความขุ่น) ด้วยกระบวนการสร้างเพลิงเม็ดแบบไหลขึ้น (fluidized pellet bed) โดยใช้อุปกรณ์ดังรูปที่ 3.12 โดยมีรายละเอียดการทดลองคือ ใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ คินคาโอตินสังเคราะห์ความขุ่น ใส่โพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อน (Accofloc A-110PWG) ที่จุดได้อุปกรณ์ตามรูปที่ 3.12 ความเร็วน้ำ

ไหลขึ้น 18 ม./ชม. แต่ก็เห็นระบบสร้างเพลเล็ตจนมีปริมาณมากและหนาแน่นขึ้น จากนั้นก็แปรค่าอะลูมิเนียม (ในรูปของโพลิอะลูมิเนียมคลอไรด์), โพลีเมอร์, ปริมาณความขุ่น, ความเร็วน้ำไหลขึ้น ความเร็วการกวนและรูปแบบใบกวน

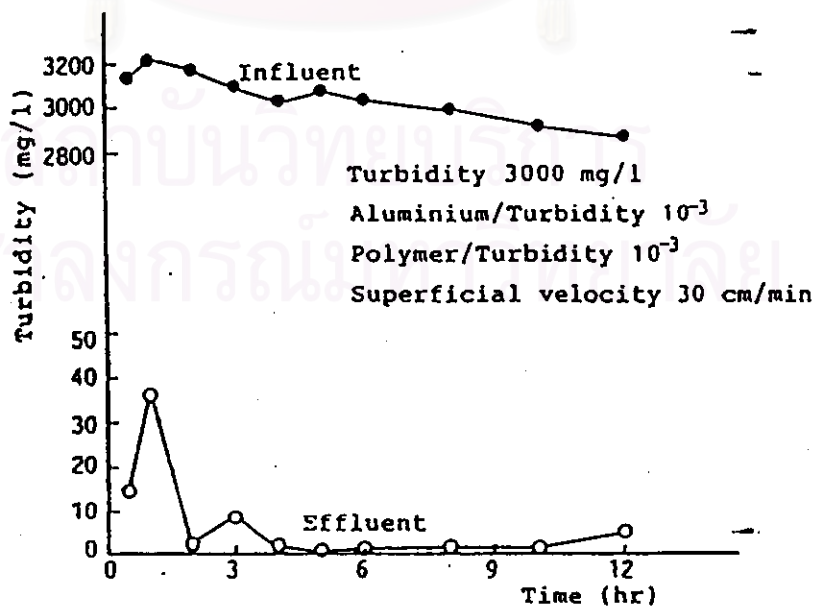


รูปที่ 3.12 มังการทดลอง (Tambo and Matsui, 1989)

ได้ผลการทดลองดังนี้

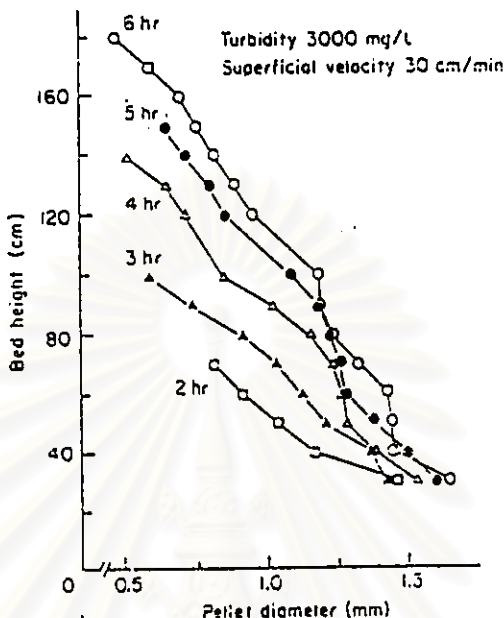
1. ที่ความขุ่นสูง 3000 มก./ล. ค่า ALT และ PT เท่ากับ 0.001 ผลน้ำออกใส

รูป 3.13



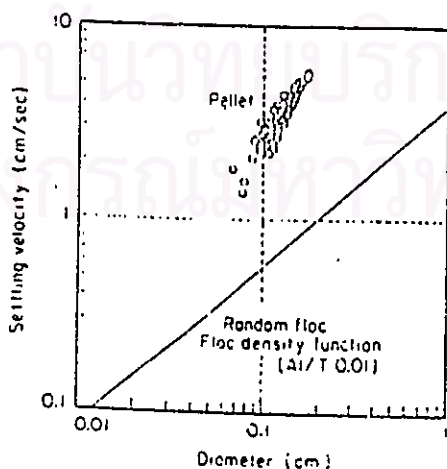
รูปที่ 3.18 ค่าความขุ่นกับเวลา (Tambo and Matsui, 1989)

ขนาดpelletที่ระดับความสูงชั้นpelletแสดงดังรูป 3.14 หลังจาก 6 ชั่วโมง ลักษณะการกระจายของขนาดpelletไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลงมาก



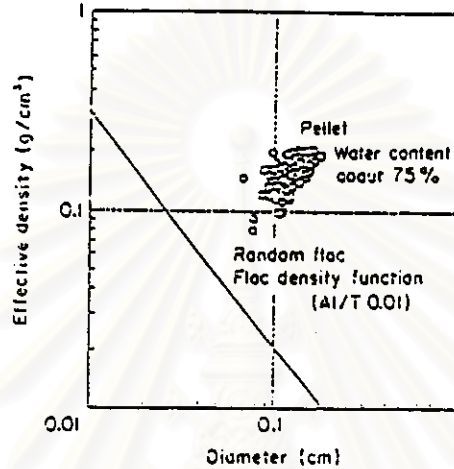
รูปที่ 3.14 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางpelletที่ระดับความสูงชั้นpellet (Tambo and Matsui 1989)

ขนาดpelletและขนาดฟล็อกกับความเร็วจมตัวแสดงดังรูป 3.15 เส้นคำในรูปคือ ความสัมพันธ์ของขนาดของฟล็อกธรรมดา (conventional floc) กับความเร็วจมตัว และกลุ่มจุดกลมๆ คือ ความสัมพันธ์ของขนาดpelletกับความเร็วจมตัว แสดงว่าที่ขนาดpelletและฟล็อกเท่ากันpelletจมตัวได้เร็วกว่าฟล็อกโดยทั่วไป



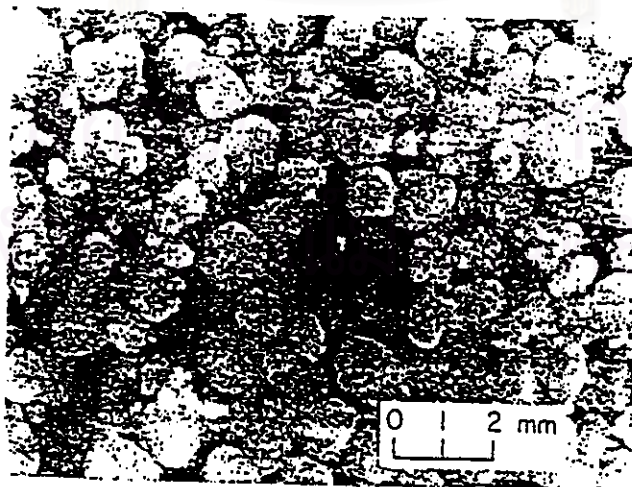
รูปที่ 3.15 ความเร็วในการจมตัวกับขนาดpellet (Tambo and Matsui, 1989)

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดpelletเล็กกับความหนาแน่นแสดงดังรูป 3.16 จำนวนจากผลของความเร็วในการตกตะกอน เส้นค่าในรูปแสดง ความหนาแน่นของฟล็อกธรรมดากับขนาดpelletเล็ก ซึ่งแสดงได้ว่าpelletเล็กมีความหนาแน่นสูงกว่าฟล็อกธรรมดาในขนาดเท่ากัน



Density of pellet and floc.

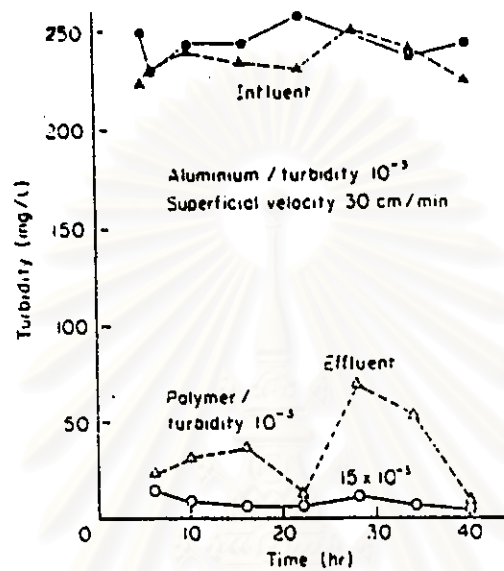
รูปที่ 3.16 ความหนาแน่นกับขนาดpelletเล็ก (Tambo and Matsui, 1989)



Pellet particles.

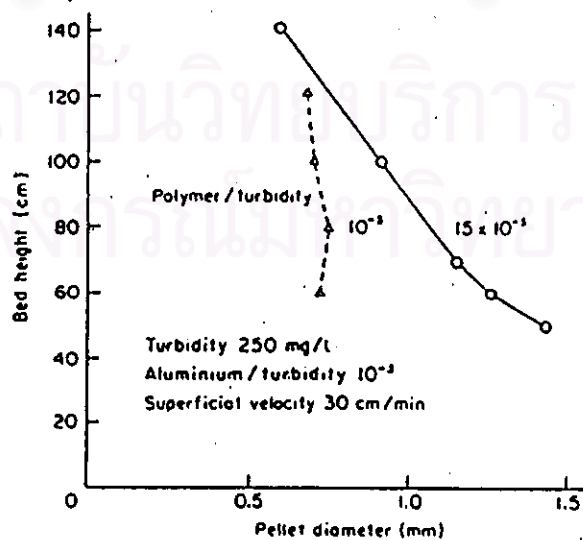
ภาพที่ 3.2 ภาพถ่ายของpelletเล็ก (Tambo and Matsui, 1989)

2. ที่ความขุ่น 250 มก./ล. ค่า ALT เท่ากับ 0.001 และ PT เท่ากับ 0.001 ปรากฏว่าน้ำที่ผลิตได้ค่าความขุ่นไม่คงที่ จึงลองเพิ่มPT เป็น 0.015 ซึ่งได้ผลที่ดี คือน้ำออกใส เหมือนกับการทดลองที่ความขุ่น 3000 มก./ล. จากผลการทดลองที่ได้อาจตั้งสมมุติฐานได้ว่า การใช้ระบบนี้กับน้ำความขุ่นต่ำจะมีต้นทุนสูงกว่าน้ำความขุ่นสูง ตามรูป 3.17



รูปที่ 3.17 ความขุ่นเทียบกับเวลา (Tambo and Matsui, 1989)

ผลของขนาดเพลเล็ตกับระดับความสูงชั้นเพลเล็ต จะเห็นได้ว่าที่ PT 0.015 เพลเล็ตชั้นต่างๆ จะมีขนาดใหญ่กว่าด้านบน ซึ่งต่างจากที่ PT 0.001 ขนาดเพลเล็ตจะไม่ต่างกันนัก ตลอดทั้งชั้นเพลเล็ต ดังรูปที่ 3.18



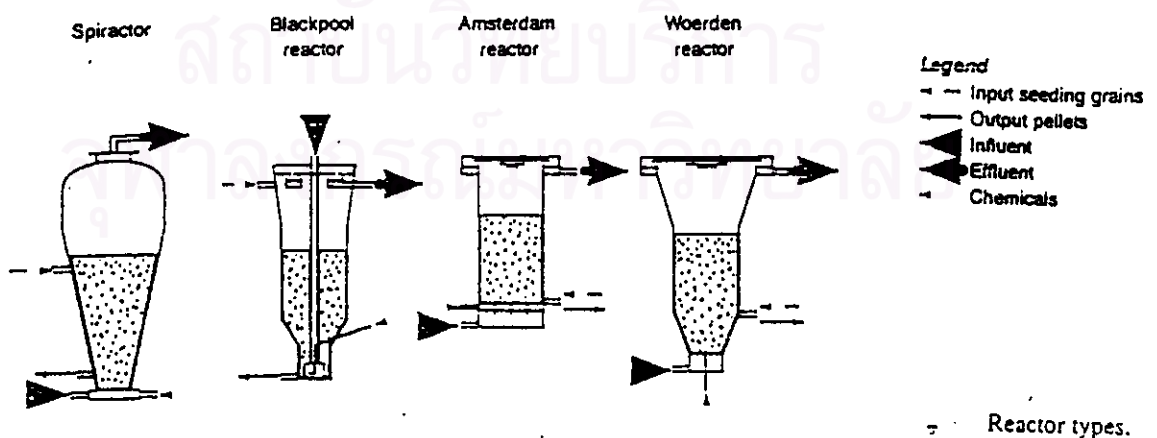
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเพลเล็ตกับความสูงชั้นเพลเล็ต (Tambo and Matsui, 1989)

3.ผลของจุดที่ใส่โพลีเมอร์กับความขุ่นน้ำผลิตและความหนาแน่นเพลล็ด
แสดงตามตารางที่ 3.1 ได้ผลว่าจุดที่ดีที่สุดต่อระบบคือที่ได้ชั้นเพลล็ด

ตารางที่ 3.2 ผลของจุดเติมโพลีเมอร์ (Tambo and Matsui, 1989)

จุดที่เติมโพลีเมอร์	ความขุ่นน้ำออก (มก./ล.)	ความหนาแน่นประสิทธิผล (ก./มล.)
ใต้ชั้นเพลล็ด	<10	0.15
ใต้ถังกวนเร็ว	25	0.11
ในถังกวนเร็ว	25	0.08
ในถังกวนเร็วพร้อมโคแอกกูแลนต์	เพลล็ดไม่เกิด	

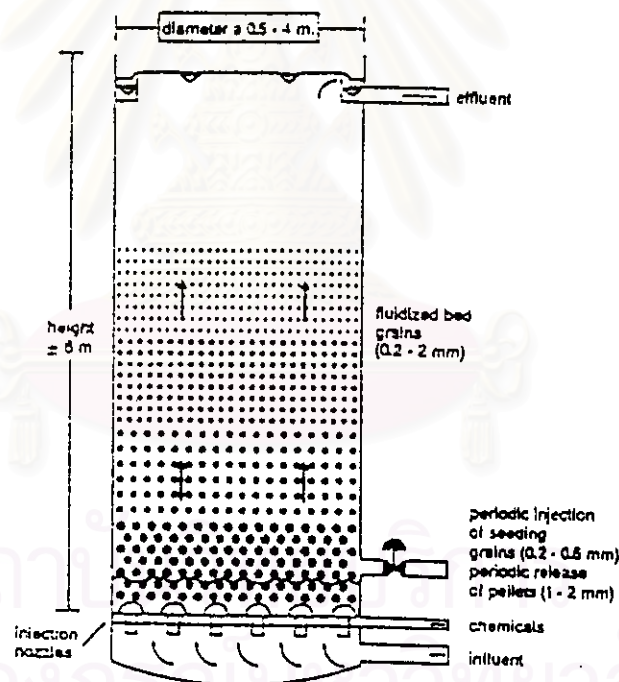
Dijk and Wilms (1991) ได้เขียนไว้ว่าระบบสร้างเพลล็ดสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการกำจัดความกระด้าง, กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียและการนำกลับมาใช้ใหม่ของโลหะจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 3.19 รูปแบบดังปฏิกิริยาของการกำจัดความกระด้างแบบต่างๆ (Dijk and Wilms , 1991)

Dijk and Wilms ได้เขียนเรื่องกระบวนการสร้างเมล็ดในการกำจัดความกระด้างของน้ำไว้อย่างละเอียด (จะขอไม่กล่าวถึงในที่นี้)

Scholler and Dijk (1991) ได้เขียนในหนังสือเกี่ยวกับทางด้านโลหะการไว้ว่า กระบวนการสร้างเมล็ดสามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (recovery) ของโลหะและแอนไอออนจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับโลหะเช่น นิกเกิล ทองแดง สังกะสี หรือฟลูออไรด์ โดยมีรูปแบบดังปฏิกิริยาดังรูป 3.20



รูปที่ 3.20 รูปแบบดังปฏิกิริยากระบวนการสร้างเมล็ดในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ (Scholler and Dijk, 1991)

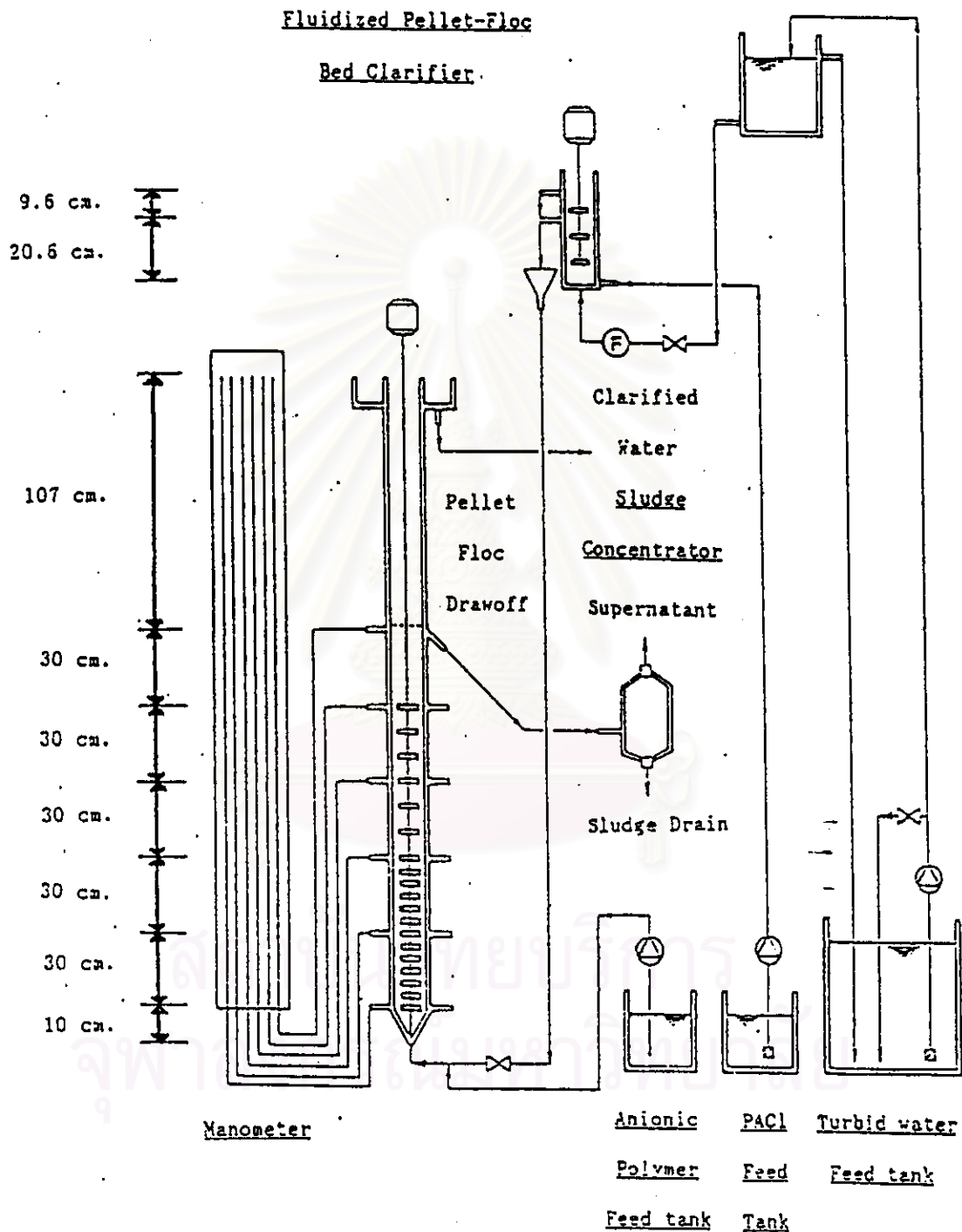
บัณฑิต ชาญณรงค์ (2535) ทดลองการกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างฟlocs แบบไหลขึ้นโดยมีอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.21 ที่มีอัตราการไหลขึ้น 18 และ 24 ม./ช.ม. โดยมีเวลากักน้ำสั้นมากเพียง 5 และ 3.8 นาที ใช้น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นเท่ากับ 50 เอ็นทียู ใช้โพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์และโพธิเมอร์ประจุลบที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.3 มก./ล. และความเร็วในการกวนของใบพัดเท่ากับ 5, 10, 15 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่า

1. การใช้โพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4 มก./ล. จะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการที่ใช้โพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์ปริมาณน้อยกว่า และถ้าจะใช้โพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์ปริมาณน้อยลงจะต้องใช้โพธิเมอร์ประจุลบที่มากขึ้นจึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ การแปรค่าโพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์จาก 1-4 มก./ล. ได้ค่าความขุ่น 0.4 - 13 เอ็นทียู แล้วแต่การทดลอง
2. การใช้โพธิเมอร์ประจุลบในปริมาณมาก จะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าใช้โพธิเมอร์ประจุลบในปริมาณน้อย ถ้าใช้โพธิเมอร์ประจุลบในปริมาณน้อย จะต้องอาศัยโพธิอะลูมิเนียมคลอไรด์ ปริมาณสูงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ
3. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางฟlocs อยู่ระหว่าง 0.2-0.3 มม. และความเร็วในการจมตัวของฟlocs ประมาณ 24-42 ม./ นาที
4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ช.ม. ต้องการความเร็วรอบในการกวนต่ำกว่าเมื่อใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 ม./ช.ม. ทดลองที่ 15, 10, 5 รอบต่อนาที
5. การกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างฟlocs แบบไหลขึ้น จากน้ำดิบความขุ่น 50 เอ็นทียู สามารถทำให้น้ำที่ผลิตได้มีความขุ่นต่ำกว่า 3 เอ็นทียู
6. การกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างฟlocs แบบไหลขึ้น สามารถผลิตน้ำได้มากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบธรรมดา 9 เท่า และมากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบไซลิดคอนเทคต์ 3 เท่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Rapid-Mix Tank

Head Tank



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์การทดลองสร้างเพลเล็ต(บัณฑิต 2535)

นฤชา ฤชุพันธุ์ (2535) ได้ทำการทดลองการสร้างเพลลีดโดยใช้สารส้มในอุปกรณ์สร้างเพลลีด ซึ่งสังเคราะห์ความขุ่นจากดินคาโอลินให้มีความขุ่นเท่ากับ 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มที่ 5, 10, 20, 30 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุลบเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 มก./ล. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 และ 24 ม./ช.ม. และ อัตราการกวนในอุปกรณ์สร้างเพลลีดเท่ากับ 5, 10, 15 รอบ/นาที จากผลการทดลองพบว่า

1. การเพิ่มความเข้มข้นสารส้มมากขึ้นจาก 5-30 มก./ล. ทำให้ความขุ่นของน้ำผลิตลดลง ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู
2. การกวนด้วยความเร็วใบพัดต่ำที่ 5 รอบ/นาทีจะให้ความขุ่นน้ำผลิตต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกวนที่ 10 และ 15 รอบ/นาที ตั้งแต่ 8.5-0.18 เอ็นทียู
3. เพลลีดที่ระดับความสูงในชั้นเพลลีดต่ำจะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเพลลีดที่ระดับความสูงในชั้นเพลลีดสูง (ชั้นเพลลีดสูง 130 ซม. เก็บตัวอย่างที่ 130, 100, 70, 40 และ 30 ซม. จากก้นอุปกรณ์)
4. การเพิ่มความเข้มข้นโพลีเมอร์มากขึ้นจาก 0.05-0.3 มก./ล. จะให้ความขุ่นน้ำผลิตต่ำลง ตั้งแต่ 8.5 - 0.18 เอ็นทียู
5. การผลิตน้ำที่ความเร็วไหลขึ้น 24 ม./ช.ม. จะได้ความเร็วในการจมตัวของเพลลีดสูงกว่าการผลิตน้ำที่ความเร็ว 18 ม./ช.ม.
6. ที่ความสูงชั้นเพลลีดเดียวกัน เพลลีดของการทดลองที่ใช้โพลีเมอร์สูงกว่าจะมีความเร็วในการจมตัวมากกว่าการทดลองที่ใช้โพลีเมอร์น้อยกว่า
7. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารส้มตั้งแต่ 5-30 มก./ล. ไม่มีผลกระทบต่อความเร็วในการจมตัวของเม็ดเพลลีด

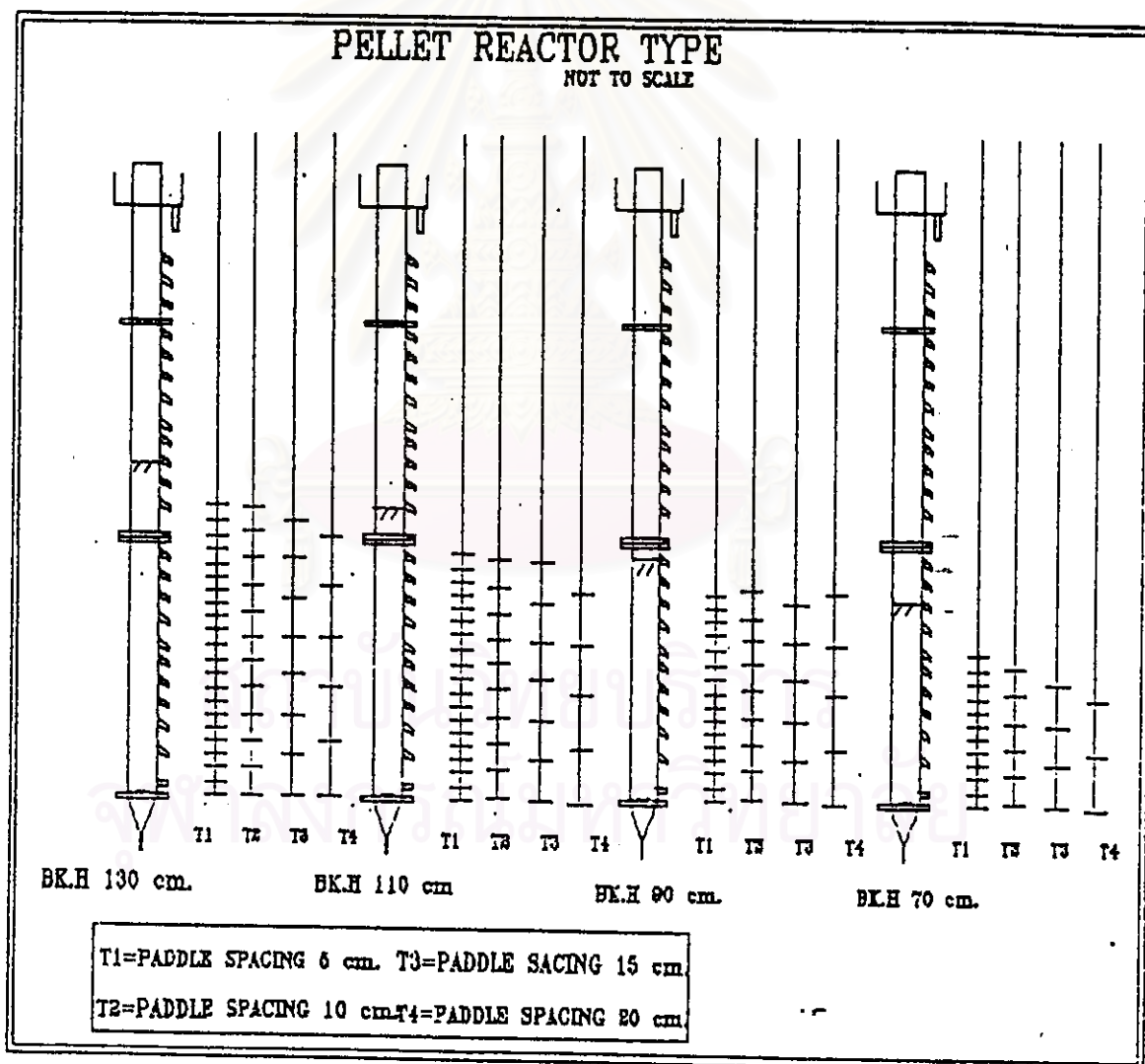
ปริญญา ฅ นคร (2535) ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของความสูงชั้นเพลลีดที่ระดับ 70, 90, 110 และ 130 ซม. กับประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ปริมาณ 1, 2, 3 และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด 0.1 มก./ล. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ช.ม. รูปแบบใบพัด 4 แบบมีช่วงห่างระหว่างใบพัด 5, 10, 15 และ 20 ซม. ตามรูป 3.22 จากการทดลองพบว่า

1. การเพิ่มปริมาณโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์จาก 1-4 มก./ล. มีแนวโน้มในการกำจัดความขุ่นได้ดีขึ้นแต่ไม่เด่นชัดนักในปริมาณที่ใกล้กันแต่จะเห็นชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบที่ 1 กับ 4 มก./ล. ที่ 4 มก./ล. สามารถกำจัดความขุ่นได้ 85-89 %

2.รูปแบบใบพัดน่าจะมีรูปแบบที่มีความถี่ของใบพัดเรียงจากตอนล่างสู่ตอนบน มีค่ามากไปหาน้อย ซึ่งคาดว่ารูปแบบดังกล่าวจะให้ค่าความปั่นป่วนที่เหมาะสมต่อระบบของเพลเล็ตที่มีการก่อตัวและแตกออกที่เกิดอยู่ภายในระบบตลอดเวลา

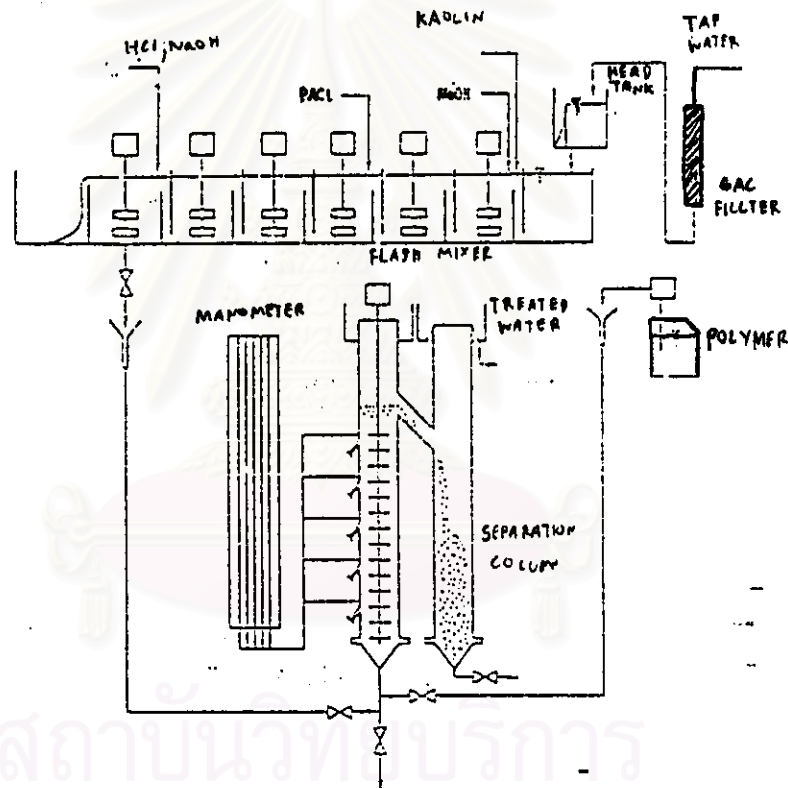
3.ความสูงชั้นเพลเล็ตมากขึ้นจาก 70-130 ซม. น้ำผลิตจะมีคุณภาพสูงขึ้น ซึ่งคาดว่าระบบมีช่วงเวลาที่ยาวขึ้นในการกำจัดความขุ่นตามความสูงชั้นเพลเล็ต สามารถกำจัดความขุ่นได้ 84-85 %

4.เวลาในการเดินระบบมากขึ้นจาก 1-6 ชม.จะทำให้เพลเล็ตมีขนาดใหญ่ขึ้น และน้ำหนักมากขึ้น



รูปที่ 3.22 รูปแบบการจัดใบพัดในแต่ละระดับชั้นเพลเล็ตที่ทดลอง (ปริญญา, 2535)

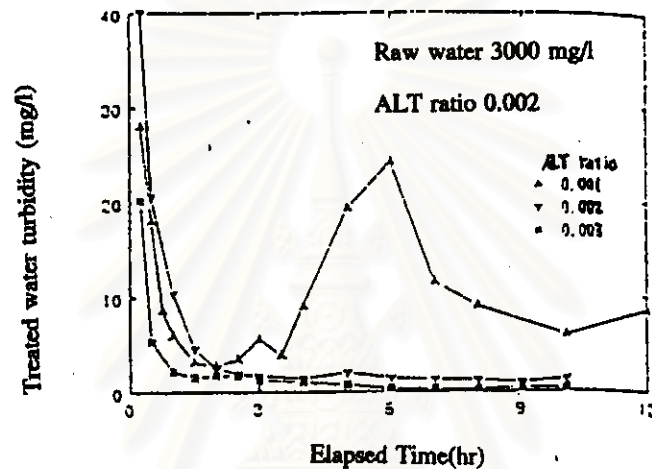
Tambo and Wang (1993) ทำการทดลองศึกษาบทบาทของอะลูมิเนียมและโพลีเมอร์ในกระบวนการสร้างฟlocs แบบไหลขึ้น ตัวแปรต่างๆในการควบคุมโคแอกกูเลชันและปริมาณอะลูมิเนียมและโพลีเมอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละความขุ่นน้ำดิบ โดยมีรายละเอียดทั่วไปคือ ใช้ดินคาโอลินผสมกับน้ำประปาสร้างอนุภาคความขุ่นขนาดประมาณ 0.55 ไมโครเมตร โคแอกกูแลนต์คือโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ (10 % Al_2O_3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตามรูปที่ 3.23 โดยแบ่งเป็นหลายการทดลองดังนี้คือ



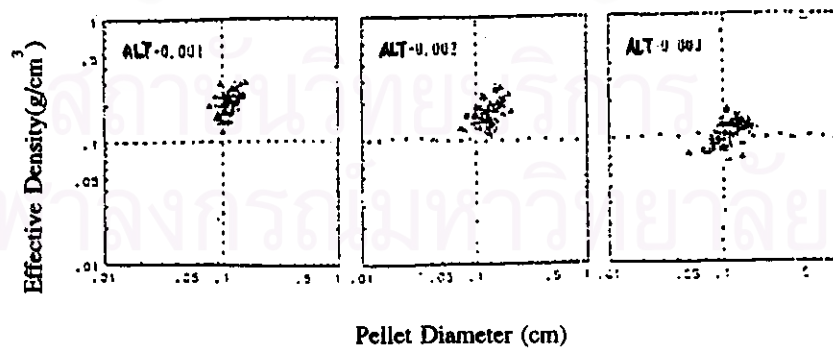
รูปที่ 3.23 ผังการทดลอง (Tambo and Wang, 1993)

1. Tambo ทดลองหาค่า ALT โดยกำหนดค่า PT เท่ากับ 0.001 และแปรค่า ALT 4 ค่าคือ 0.001, 0.002, 0.003 และ 0.004 ได้ผลการทดลองคือที่ ALT 0.004 ไม่สามารถสร้างฟlocs ได้ และที่ ALT 0.001 เกิดฟlocs ขึ้นแต่ฟlocs จะเกาะติดผนังกระบอกทดลองและที่

แกนใบ ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของระบบที่แท้จริงได้และความขุ่นน้ำผลิตไม่คงตัว (ไม่อยู่ในภาวะสมดุล) ตามรูปที่ 3.24 ที่ ALT 0.002 0.003 ชั้นเพลเล็ตเกิดขึ้นได้ดี ตามรูป 3.25 ได้หาความสัมพันธ์ของขนาดและความหนาแน่นประสิทธิผลของเพลเล็ตกับอัตราส่วน ALT ดังแสดงในรูป 3.25 ซึ่งจะพบว่า เมื่อค่า ALT มากขึ้นเพลเล็ตจะมีความหนาแน่นประสิทธิผลลดลงตามลำดับ อาจประมาณได้ว่าถ้า ALT สูงขึ้นเรื่อยๆ เพลเล็ตจะคล้ายฟล็อกมากยิ่งขึ้น



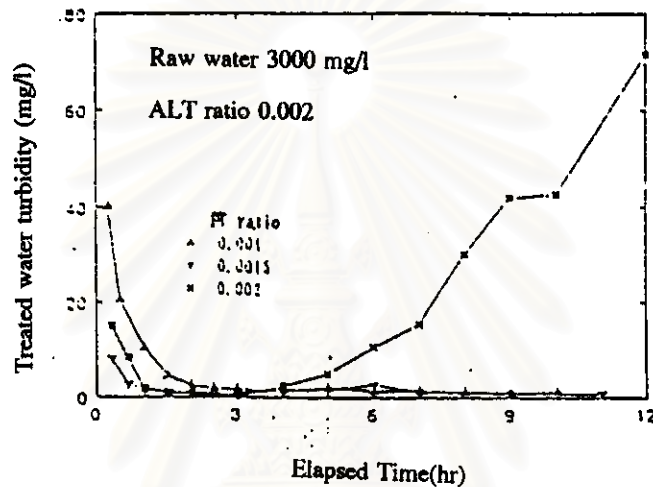
รูปที่ 3.24 ความขุ่นน้ำผลิตกับเวลาที่ ALT ต่างๆ (Tambo and Wang, 1993)



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความหนาแน่นเพลเล็ตกับค่า ALT (Tambo and Wang, 1993)

2. ทดลองหาค่า PT ที่เหมาะสม โดยกำหนดค่า ALT คงที่ที่ 0.002 และแปรค่า PT 4 ค่าได้แก่ 0.0005, 0.001, 0.0015, 0.002 ปรากฏว่าที่ PT 0.0005 ไม่สามารถเกิดเพลิงเกิดได้ผลการทดลองดังรูป 3.26 และสรุปผลดังนี้คือ

-ระบบต้องการโพลีเมอร์แต่ถ้ามากเกินไประบบจะเสียดุล รูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ค่าความขุ่นน้ำผลิตกับเวลาที่ค่า PT ต่างกัน(Tambo and Wang ,1993)

-เพลิงเล็กขนาดเล็กจะอยู่ข้างบน เพลิงเล็กขนาดใหญ่อยู่ข้างล่าง และที่โพลีเมอร์มากไปจะทำให้เกิดกลุ่มเพลิงเล็กเกาะอยู่ตามจุดต่างๆ ซึ่งอาจจะทำให้การเก็บผลผลิตพลาดได้

- ระบบที่ทำงานได้ดีจะต้องประกอบด้วย

1. เพลิงเล็กความหนาแน่นสูง
2. เกิดภาวะสมดุลของระบบ
3. น้ำที่ผลิตได้จะต้องใส

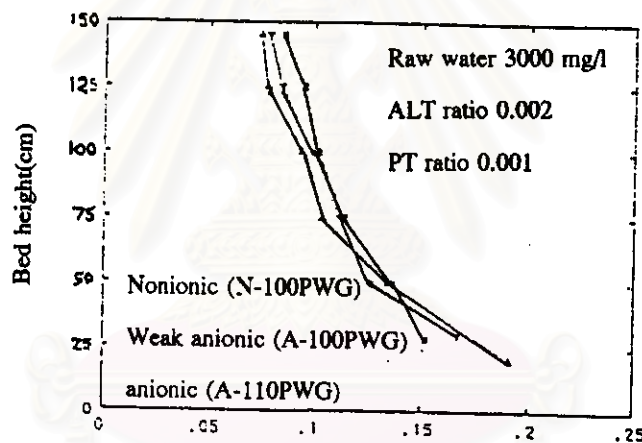
จากการทดลองแปรค่าอะลูมิเนียมและโพลีเมอร์ พบว่าที่ ALT 0.002 และ PT 0.001 เป็นจุดที่เหมาะสมที่สุดในการทดลอง(ทดลองที่น้ำดิบความขุ่น 3000 มก./ล.)

3.ทดลองหาผลของประจุโพลีเมอร์ที่มีต่อระบบ โดยใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันหรือใกล้เคียงกันคือ โพลีเมอร์ไม่มีประจุ N-100 PWG (MW 1600x10⁴)

โพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อน A-100 PWG (MW 1700×10^4) โพลีเมอร์ประจุลบ A-110 PWG (MW 1600×10^4) ทดลองที่สภาวะเดียวกันที่ความขุ่น 3000 มก./ล. อัตราน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม. ALT 0.002 และ PT 0.001 ได้ผลดังนี้

1. ไม่มีผลแตกต่างกันอย่างชัดเจนของขนาดเพลลิตในระบบ ตามรูปที่ 3.27

2. ผลของประจุของโพลีเมอร์ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของเพลลิต สรุปได้ว่า โพลีเมอร์ไม่มีประจุและโพลีเมอร์ประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากันจะให้ผลต่อระบบพอๆ กัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

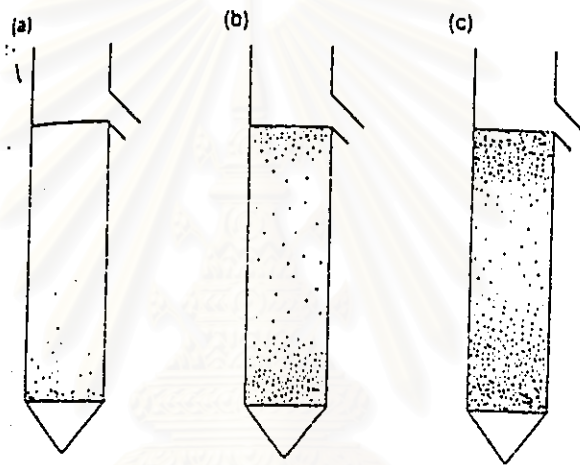


รูปที่ 3.27 ผลของโพลีเมอร์ต่างประจุในชั้นเพลลิต (Tambo and Wang, 1993)

Tambo, Wang and Matsui (1993) ทำการทดลองเกี่ยวกับลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในกระบวนการสร้างเพลลิตแบบไหลขึ้นโดยวิธีการใส่อินดิเคเตอร์ เมธิลีนบลู (Methylene blue) ผสมกับดินคาโอลินทำให้อนุภาคความขุ่นมีสีฟ้า ซึ่งแปรค่าความขุ่นที่ 3, 1 และ 0.3 ก./ล. ใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และโพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอค อัตราน้ำไหลขึ้น 18 เมตร/ชั่วโมง กวนเพลลิตด้วยความเร็ว 36 รอบ/นาที ค่า G ที่ได้ประมาณ 30 s^{-1} ความสูงชั้นเพลลิตเท่ากับ 145, 125, 100, 75, 50 และ 25 ซม. โดยที่ช่วงแรกเดินระบบแบบธรรมดาโดยใช้คาโอ

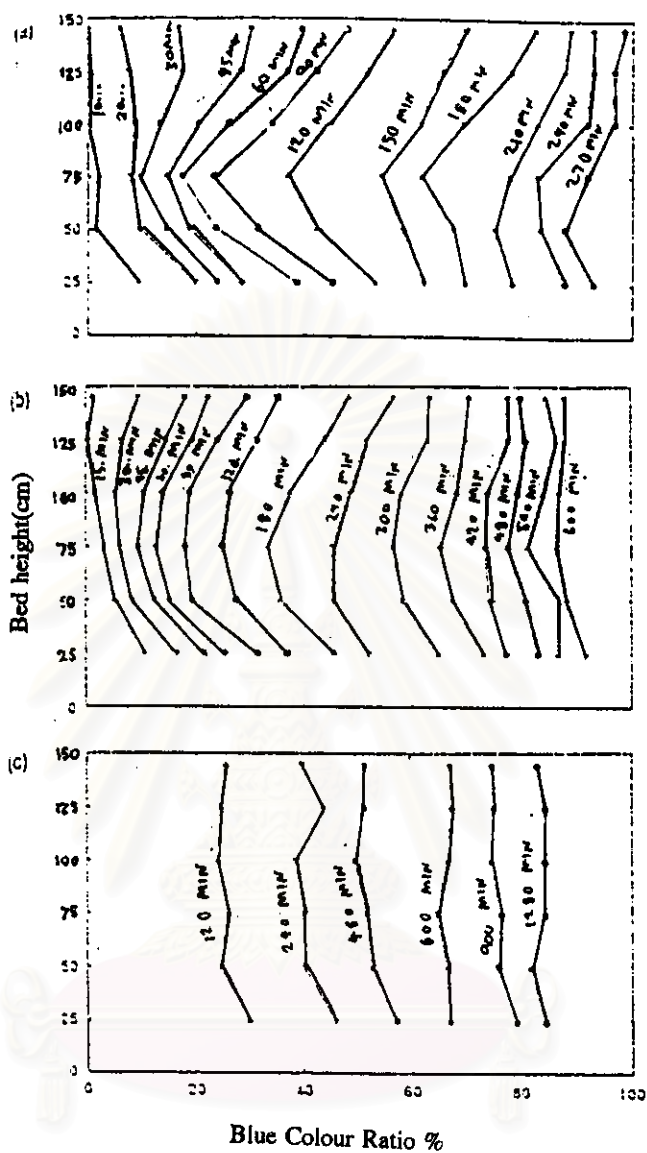
ลินสีขาวพอลิเมอร์ถึงสภาวะคงตัว แล้วจึงเดินระบบด้วยคาโอลินสีฟ้า (สีจากอินดิเคเตอร์) จากการทดลองพบว่า

1. ที่ความขุ่น 3000 มก./ล. หลังจากเดินระบบด้วยคาโอลินสีฟ้า 15 นาที เพลล็ดที่ระดับต่ำกว่า 30 ซม.เปลี่ยนเป็นสีฟ้า แต่ข้างบนยังคงเป็นสีขาวอยู่ 30 นาทีผ่านไปเพลล็ดส่วนบนเปลี่ยนเป็นสีฟ้าแต่ตรงส่วนกลางความเข้มข้นน้อยกว่าส่วนบน พอเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง ความเข้มสีฟ้าก็เข้มข้นขึ้น ตามรูป 3.28



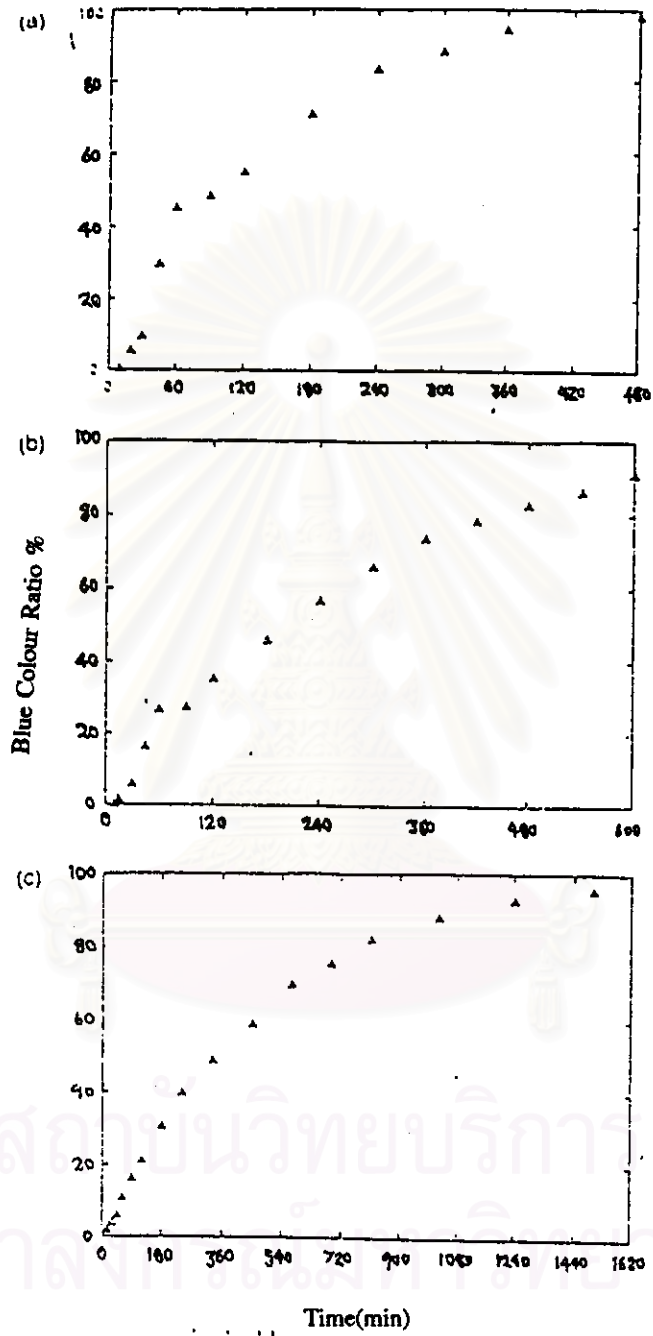
รูปที่ 3.28 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เวลา 15, 30 และ 60 นาทีตามลำดับ (Tambo, Wang and Matsui, 1993)

2. ที่ความขุ่น 1000 มก./ล. และ 300 มก./ล. ลักษณะการเคลื่อนที่ต่างกับที่ 3000 มก./ล. คือ ความเข้มสีจะใกล้เคียงกันทั้งชั้นตะกอนไม่ต่างกันมากนักแต่จะใช้เวลานานมากกว่าในการที่ความเข้มสีจะกระจายทั่วชั้นเพลล็ด ตามรูปที่ 3.29 และที่จุดที่เพลล็ดถันออกลงกระบอกแยก วัตถุประสงค์ส่วนความเข้มสีกับเวลาจะได้ดังรูปที่ 3.30 ซึ่งหมายความว่าที่ความขุ่นยิ่งสูง การกระจายของอนุภาคความขุ่นจะใช้เวลานานกว่า



Profile of blue colour ratio at kaolin concentration of (a) 3 g/l (b) 1 g/l (c) 0.3 g/l

รูปที่ 3.29 การกระจายของอนุภาคสีกับความสูงของชั้นตะกอนที่เวลาต่างๆ (Tambo, Wang and Matsui, 1993)



รูปที่ 3.30 อัตราส่วนสีที่ได้ออกทางกระบอกแยกเฟสเทียบกับเวลาที่ความเข้มข้น a) 8 ก./ด. b) 1.0ก./ด. c) 0.3ก./ด. (Tambo, Wang and Matsui, 1993)

Tambo and Wang (1993) ได้ทำการทดลองการกำจัดสีและความขุ่นโดยใช้กระบวนการสร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้น โดยสังเคราะห์สีจากน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษซึ่งน้ำจะมีสีค่า จากนั้นก็แปลงค่าสีหลายค่า ส่วนความขุ่นสังเคราะห์จากคินคาโอลินที่ปริมาณ 1000, 300 และ 100 มก./ล. โคนอกกูดแลนต์ที่ใช้คือโพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์และโพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคนอกกูดแลนต์เอค อัตราน้ำไหลขึ้น 18 เมตร/ชั่วโมง กวนเพลล็ดด้วยความเร็ว 36 รอบ/นาที ค่า G ที่ได้ประมาณ 30 s^{-1} ความสูงชั้นตะกอนเท่ากับ 145 ซม. ลักษณะอุปกรณคล้ายรูปที่ 3.12

จากการทดลองพบว่า

1. การกำจัดสีขึ้นอยู่กับความขุ่นด้วยคือ ที่อัตราส่วนระหว่างความขุ่นกับสี ต้องไม่เกิน 1 ต่อ 1 จะให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ตามตารางที่ 3.3

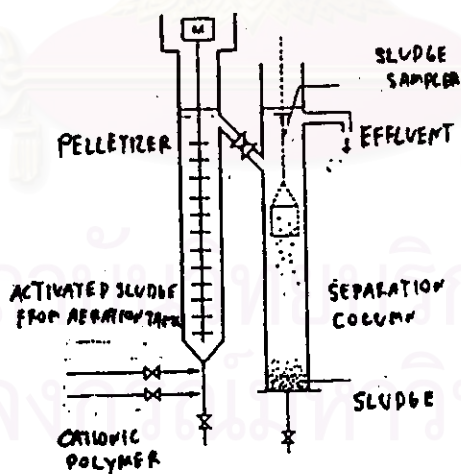
ตารางที่ 3.3 แสดงสถานะของเพลล็ดในชั้นตะกอนในอัตราส่วนระหว่างความขุ่นกับสี (Tambo and Wang , 1993)

ค่าความขุ่น (มก./ล. คาโอลิน)	ค่าความเข้มข้นสี (หน่วยสี)	สถานะเพลล็ด
1000	100	เป็นเพลล็ดที่ดี
	200	เป็นเพลล็ดที่ดี
	500	เป็นเพลล็ดที่ดี
	1000	เป็นเพลล็ดที่ดี
	1500	กลุ่มมวลขนาดใหญ่แต่ไม่เป็นเพลล็ด
	2000	ฟล็อกธรรมดา
300	300	เป็นเพลล็ดที่ดี
	600	กลุ่มมวลขนาดใหญ่แต่ไม่เป็นเพลล็ด
	900	ฟล็อกธรรมดา
100	100	เป็นเพลล็ดที่ดี

2. ความหนาแน่นเฟลล็ดประมาณ 0.02-0.2 ก./ซม.³ ความชื้นเฟลล็ดน้อยกว่า 90 %

3. ที่พีเอชประมาณ 5 จะกำจัดสีและความขุ่นดีที่สุด

Tambo , Ozawa, Kiihara, and Ohba 1993 ทำการทดลองใช้กระบวนการสร้างเฟลล็ดแบบไหลขึ้นในการทำแยกของแข็ง(สร้างตะกอนให้เป็นเฟลล็ด)ของกระบวนการแอกติเวเตด สกัดจตามรูปที่3.31โดยมีรายละเอียดคือ ใช้กระบอบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 220 ซม. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30-60 ซม./ซม. เวลาถักน้ำ 3-6 นาที กวนด้วยความเร็ว 30-40 รอบ/นาที ใช้ โพลีเมอร์ประจุบวก 10-20 มก./ล. ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.4 สรุปว่าระบบนี้สามารถแยกของแข็งได้อย่างรวดเร็ว

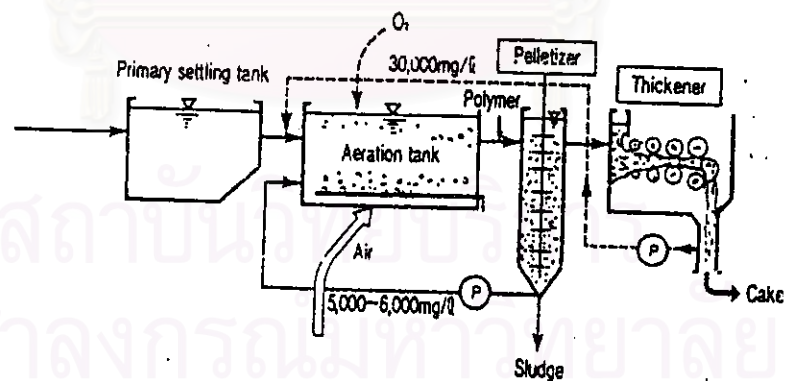


รูปที่ 3.31 ผังการทดลอง(Tambo, Ozawa, Kiihara and Ohba, 1993)

ตารางที่ 3.4 ผลการทดลอง (Tambo, Ozawa, Kihara and Ohba, 1993)

MLSS ในระบบ AS	1500-2000 มก./ล.
ความเข้มข้นสลัดจ์ในอุปกรณ์สร้างเม็ดเล็ก	10000-15000 มก./ล.
ขนาดเฉลี่ยของเม็ดเล็ก	5-10 มม.
ความขุ่นน้ำออก	3-5 มก./ล.
บีโอดีของน้ำออก	2-5 มก./ล.

นอกจากนี้ผู้ทำการทดลองยังได้ออกแบบการทดลองที่จะนำกลับสลัดจ์เข้มข้นดังรูปที่ 3.32 ซึ่งระบบสร้างเม็ดเล็กในการทดลองนี้จะทำหน้าที่แทนถังตกตะกอน แต่จะมีประสิทธิภาพสูงกว่ามากหลายเท่า

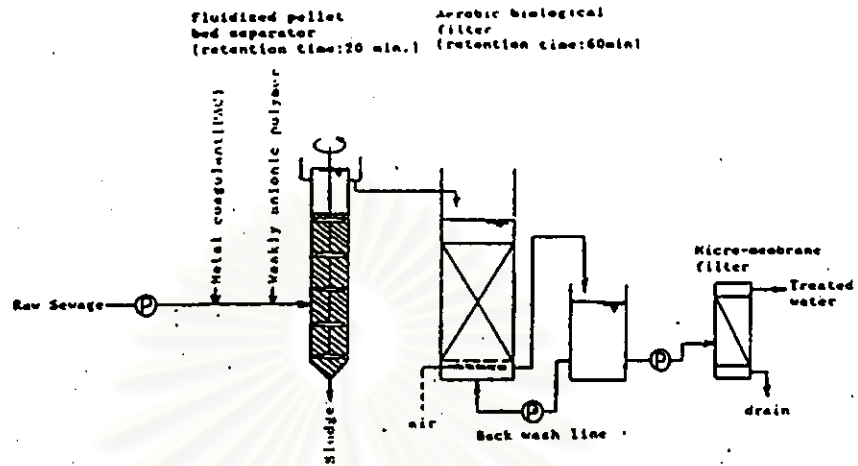


รูปที่ 3.32 ผังระบบที่ประยุกต์ใช้กระบวนการสร้างเม็ดเล็กในกระบวนการ AS (Tambo Ozawa, Kihara and Ohba, 1993)

อาซวัน อิมเอิบธรรม (2536) ทำการทดลองผลของโพลีเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 0, 1 และ 3 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุบวก 2 ชนิดๆ ละ 0.3 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุอย่างละ 2 ชนิดๆ ละ 0.05, 0.1, 0.3 มก./ล. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 และ 36 ม./ช.ม. สังเคราะห์ความขุ่นที่ 50 เอ็นทียู โดยใช้ดินคาโอลิน จากการทดลองพบว่า

1. โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุเหมาะที่จะเป็นโคแอกกูแลนต์เอคในกระบวนการสร้างเพลเลตแบบไหลขึ้น ส่วนโพลีเมอร์ประจุบวกยังไม่มีข้อสรุปเนื่องจากระบบยังไม่เข้าสู่สภาวะคงตัว
2. ความขุ่นของน้ำผลิตที่สภาวะคงตัวมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วของน้ำไหลขึ้น แต่มีค่าแปรผกผันกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ
3. การใช้โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุปริมาณน้อย (0.05 มก./ล.) ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวช้าและน้ำผลิตมีความขุ่นสูงกว่า 5 เอ็นทียู
4. การใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ปริมาณ 3 มก./ล. มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ปริมาณ 1 มก./ล. เนื่องจากปริมาณอะลูมิเนียมมากทำให้เพลเลตอัดตัวไม่แน่น เพลเลตจะเบาทำให้มีความขุ่นของน้ำผลิตสูงขึ้นด้วย
5. โพลีเมอร์ไม่มีประจุ (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 8-10 ล้าน) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าโพลีเมอร์ประจุลบ (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-11 ล้าน) แม้จะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า
6. การใช้โพลีเมอร์ประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (11 ล้าน) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าการใช้โพลีเมอร์ประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า (10 ล้าน)
7. การใช้โพลีเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น
8. ขนาดและความเร็วในการจมตัวของเพลเลตมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของโพลีเมอร์

Suzuki, Tambo and Ozawa (1993) ได้ทดลองใช้กระบวนการสร้างเพลเลตในการบำบัดน้ำเสียโดยประกอบด้วยเครื่องกรองชีวแบบเดิมอากาศและเครื่องกรองไมโครเมมเบรน มีแผนผังอุปกรณ์ดังรูป 3.33 ทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงบำบัดน้ำเสีย Suseigawa ใน Sapporo โดยมีสภาพการทำงานดังตารางที่ 3.5 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.33 ผังอุปกรณ์การทดลอง (Suzuki, Tambo and Ozawa, 1993)

ตารางที่ 3.5 สภาพการทดลอง (Suzuki, Tambo and Ozawa, 1993)

กระบวนการ	สภาวะการทดลอง
อุปกรณ์สร้างเพลดัด	น้ำไหลขึ้น ความเร็วน้ำไหลขึ้น 200-300 ม./วัน โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ 10-15 มก. Al_2O_3 / ล. โพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อน 1.5 มก./ล.
เครื่องกรองชีวะ	น้ำไหลลง สารกรองขนาด 5- 20 มม. ชั้นกรองสูง 1000-1200 มม.
เครื่องกรองเมมเบรน	ความดันลด 20-100 กิโลปาสกาล ฟลักซ์ 2.5 ม./วัน ขนาดรีเจกชัน 0.2 มก.

ตารางที่ 3.6 ผลการทดลอง (Suzuki, Tambo and Ozawa, 1993)

	น้ำดิบ	น้ำออกจากอุปกรณ์ สร้างเพลิงเตี๊ต	น้ำออกจากเครื่อง กรองชีวะ	น้ำออกจากเครื่อง กรองเมมเบรน
ความขุ่น(เอ็นทียู)	103.1	9.6	1.43	0.03
ของแข็ง(มก./ล.)	146.1	13.8	1.92	-
บีโอดี(มก./ล.)	139.5	29.8	4.66	1.94
ซีโอดี(มก./ล.)	283.8	73.9	36.5	25.0

สรุปได้ว่าระบบนี้จะใช้ PACl ประมาณ 10-15 มก./ล. Al_2O_3 กับโพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อนประมาณ 1-2 มก./ล. กระบวนการทั้งหมดกินเวลาประมาณ 1.5 ชั่วโมง สามารถกำจัดบีโอดีและฟอสเฟตได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

1. ในระบบสร้างเพลิงเตี๊ต ฟอสเฟตและของแข็งแขวนลอยถูกกำจัดในเวลาประมาณ 20 นาทีและไม่มีฟอสเฟตแยกออกจากสลัดจ์

2. ในระบบสร้างเพลิงเตี๊ต สามารถลดบีโอดีแขวนลอยได้และเครื่องกรองชีวะแบบเติมอากาศจะกำจัดบีโอดีละลายน้ำโดยมีเวลากักประมาณ 1 ชั่วโมง ฟอสเฟตที่ถูกกำจัดในระบบนี้จะเหมือนถูกกำจัดด้วยจุลชีพ

วิจารณ์ ดันดิธรรม(2537) ทำการวิจัยศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของด่างน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ที่ความเข้มข้น 10, 15, 20, 30 มก./ล. ร่วมกับโพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด ที่ความเข้มข้น 0.3 มก./ล. แปรค่าความเร็วรอบการกวนที่ 5, 10, 15, และ 20 รอบต่อนาที และแปรค่าอัตราน้ำล้างผิว 4 ค่าคือ 30, 40, 50 และ 60 ชม.ต่อนาที สังเคราะห์ความขุ่นที่ 50 เอ็นทียูโดยใช้ดินคาโอลิน มีข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มความเร็วรอบการกวนจาก 5 ถึง 20 รอบต่อนาที จะทำให้ค่าความขุ่นน้ำผลิตเพิ่มขึ้น

2. การเพิ่มอัตราน้ำล้างผิว จาก 30 ถึง 60 ชม.ต่อนาที จะทำให้ค่าความขุ่นน้ำผลิตเพิ่มขึ้น

3.ความสัมพันธ์ระหว่าง ความขุ่นน้ำผลิตกับความเข้มข้นของสารส้มขึ้นอยู่กับ อัตราน้ำล้นผิวดังนี้

3.1 ช่วง 30.-45 ชม./นาที่ การเพิ่มค่าความเข้มข้นสารส้มในช่วง 10 -30 มก./ล. จะทำให้ความขุ่นต่ำลง

3.2 ช่วง 5-60 ชม./นาที่ การเพิ่มค่าความเข้มข้นสารส้มในช่วง 10 -30 มก./ล. จะทำให้ความขุ่นเพิ่มขึ้น

4.การเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10 ถึง 30 ชม.จะทำให้ค่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในถังลดลง

5.การเพิ่ม ความเร็วรอบการกวน ในช่วง 5 ถึง 20 รอบต่อนาที จะมีผลให้ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในถังลดลง

คณิต ม่วงศิริ(2538) ทำการทดลองโดยใช้โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 มก./ล.และใช้โพลีเมอร์ประจุลบ, โพลีเมอร์ประจุบวก, โพลีเมอร์ไม่มีประจุเข้มข้น 0.3 มก./ล เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ด ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. ตัวแปรอิสระคือพีเอช 7 ค่าที่ 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 และ 8 สังเคราะห์ความขุ่นที่ 50 เอ็นทียู โดยใช้คินคาโอลิน จากผลการวิจัยพบว่า

1. โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์อาศัยกลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่ค่าพีเอชต่ำ และอาศัยโครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่เกาะยึดอนุภาคคอลลอยด์ที่ค่าพีเอชสูง ในขณะที่โพลีเมอร์ประจุลบอาศัยกลไกการต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ในการสร้างเฟลลัด โพลีเมอร์ไม่มีประจุอาศัยการต่อเชื่อมผสมกับการทำลายประจุ ส่วนโพลีเมอร์ประจุบวกอาศัยประจุบวกในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์และกลไกการต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ในการสร้างเฟลลัด

2. ที่พีเอชต่ำในช่วงที่วิจัย ความขุ่นตกค้างในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าสูงกว่าที่พีเอชสูงอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญ และทุกเงื่อนไขการทดลองความขุ่นในน้ำที่ออกจากระบบมีค่าต่ำกว่า 5 เอ็นทียู

3. พีเอชไม่มีผลต่อความเร็วในการจมตัวของเฟลลัด , ความสูงของชั้นเฟลลัด แต่มีผลต่อขนาดเฟลลัดอยู่บ้างแต่มีรูปแบบที่ไม่ชัดเจน

4. พีเอชมีผลต่อปริมาณอะลูมิเนียมในน้ำ ซึ่งปริมาณอะลูมิเนียมในน้ำมีค่าต่ำเมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 - 7.0 และมีค่าไม่เกิน 200 ไมโครกรัม/ ล .

สุรเชษฐ์ พลวณิช (2539) ได้ทำการวิจัยกับน้ำดิบจริงที่โรงงานผลิตน้ำบางเขน ใช้สารส้ม เป็นโคแอกกูแลนต์เข้มข้น 0-25 มก./ล. โคแอกกูแลนต์เอดเป็นโพลีเมอร์ประจุลบมวลโมเลกุลสูง โพลีเมอร์ไม่มีประจุมวลโมเลกุล 12 ล้าน และโพลีเมอร์ประจุบวกมวลโมเลกุลสูง ที่ความเข้มข้น 0.3 มก./ล.เท่ากัน ความเร็วน้ำไหลขึ้น 12 ม./ชม. จากการวิจัยพบว่า

1. กระบวนการสร้างเพลลิตแบบไหลขึ้นนี้สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูงได้ ภายในเวลา 13 นาที นับจากน้ำดิบเริ่มเข้าสู่ระบบจนเป็นน้ำผลิตออกจากระบบไป
2. ปริมาณสารส้ม 0, 10, 15, 20 และ 25 มก./ล.ที่ใช้ในกระบวนการผลิต คุณภาพน้ำที่ได้มีความแปรผันตรงกับปริมาณสารส้มที่ใช้
3. โพลีเมอร์ไม่มีประจุและประจุบวกปริมาณ 0.3 มก./ล. สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพและความเร็วในการจมตัวของเพลลิตสูงกว่ากรณีใช้โพลีเมอร์ประจุลบปริมาณ 0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์หรือโคแอกกูแลนต์เอด
4. สารส้มอาศัยกลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ หรือการห่อหุ้มอนุภาค ด้วยผลึกในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในขณะที่โพลีเมอร์ประจุลบอาศัยกลไกการต่อเชื่อมอนุภาคด้วยสายโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์เอง โพลีเมอร์ไม่มีประจุอาศัยกลไกการต่อเชื่อมร่วมกับการสะเทินประจุ และโพลีเมอร์ประจุบวกอาศัยกลไกการดูดติด การสะเทินประจุ และการต่อเชื่อมด้วยสายโครงสร้างโมเลกุลของโพลีเมอร์

กานตพันธุ์ พิศาลสุขสกุล (2539) ศึกษาการหมุนเวียนเพลลิตเพื่อลดปริมาณความต้องการสารเคมีในการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการสร้างเพลลิต โดยหมุนเวียนเพลลิตจากส่วนบนของชั้นเพลลิตกลับไปที่ส่วนล่างของอุปกรณ์สร้างเพลลิต ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ โพลีเมอร์ไม่มีประจุปริมาณ 0.1-0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์และ/หรือโคแอกกูแลนต์เอด กำหนดอัตราเวียนเพลลิตจาก 0-0.4 ของอัตราน้ำเข้าระบบ เดินระบบนานอย่างน้อย 72 ชั่วโมง ความขุ่นจากแม่น้ำเจ้าพระยาเปลี่ยนแปลงจาก 20-400 เอ็นทียู จากการวิจัยพบว่า

1. การเวียนเพลลิตที่ความขุ่นน้ำดิบต่ำ (20-100 เอ็นทียู) จะสามารถผลิตน้ำที่ความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียูได้โดยไม่ต้องใช้สารส้มเลย และใช้โพลีเมอร์ไม่มีประจุเพียง 0.1 มก./ล. และที่ความขุ่นสูง (100-400 เอ็นทียู) ใช้สารส้มเพียง 15.12 มก./ล. ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.1 มก./ล. ก็สามารถผลิตน้ำที่ความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียูได้
2. การเวียนเพลลิตด้วยอัตรา 0.1-0.4 ของอัตราน้ำเข้า ไม่มีผลชัดเจนต่อขนาดของเพลลิต

3. ความเร็วจมตัวและความหนาแน่นของเพลล็ดจะสูงขึ้นเมื่ออัตราการเวียนเพลล็ดสูงขึ้น

4. เมื่อใช้ปริมาณโพลีเมอร์ไม่มีประจุสูงขึ้นมีแนวโน้มว่าความต้องการสารส้มต่ำลงและระยะเวลาในการผลิตน้ำต่ำลง(ผลิตน้ำที่ความขุ่น 5 เอ็นทียูหรือน้อยกว่า)

กฤติกา อารีย์สว่างกิจ(2540) ศึกษาสมมูลมวลของกระบวนการสร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้นกับน้ำดิบจากคลองประปา แบ่งการทดลองเป็น 2 ช่วงคือช่วงน้ำดิบความขุ่น 100-240 เอ็นทียูใช้สารส้มปริมาณความเข้มข้น 18-25 มก./ล.เป็นโคแอกกูแลนต์ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุปริมาณ 0.3 มก./ล.เป็นโคแอกกูแลนต์เอค ช่วงน้ำดิบความขุ่น 30-60 เอ็นทียู ใช้สารส้มปริมาณความเข้มข้น 3-10 มก./ล.เป็นโคแอกกูแลนต์ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุปริมาณ 0.3 มก./ล.เป็นโคแอกกูแลนต์เอค พบว่า

1.ปริมาณของแข็งหรือเพลล็ดในระบบมีการสะสมเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เดินระบบ ปริมาณของแข็งที่เข้าสู่ระบบมีค่ามากกว่าปริมาณที่ออกจากระบบจนกระทั่งระบบเข้าสู่สถานะคงตัวจึงมีค่าปริมาณของแข็งที่เข้าสู่ระบบใกล้เคียงกับปริมาณที่ออกจากระบบ

2.การสะสมตัวของเพลล็ดขึ้นกับปัจจัยหลายประการได้แก่ความขุ่นน้ำดิบ, ความขุ่นน้ำผลิต และปริมาณเพลล็ดเริ่มต้นในการเดินระบบ เมื่อมีมวลเพลล็ดเริ่มต้นในกระบวนการมากจะสามารถดักจับอนุภาคความขุ่นที่เข้าสู่ระบบได้มากกว่า

3.เพลล็ดที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกัน คือระหว่าง 0.18-0.28 มม.

Shimizu , Tambo, udo , Ozawa and Hamaguchi 1994) ได้ทดลองใช้ระบบสร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ AFPB(anaerobic fluidized pellet bed)เป็นขั้นแรกแล้วต่อด้วยระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ รูปที่ 3.34 ซึ่งระบบ AFPB ทำหน้าที่เสมือนถังตกตะกอนขั้นต้นและถังแอนแอโรบิกพร้อมกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

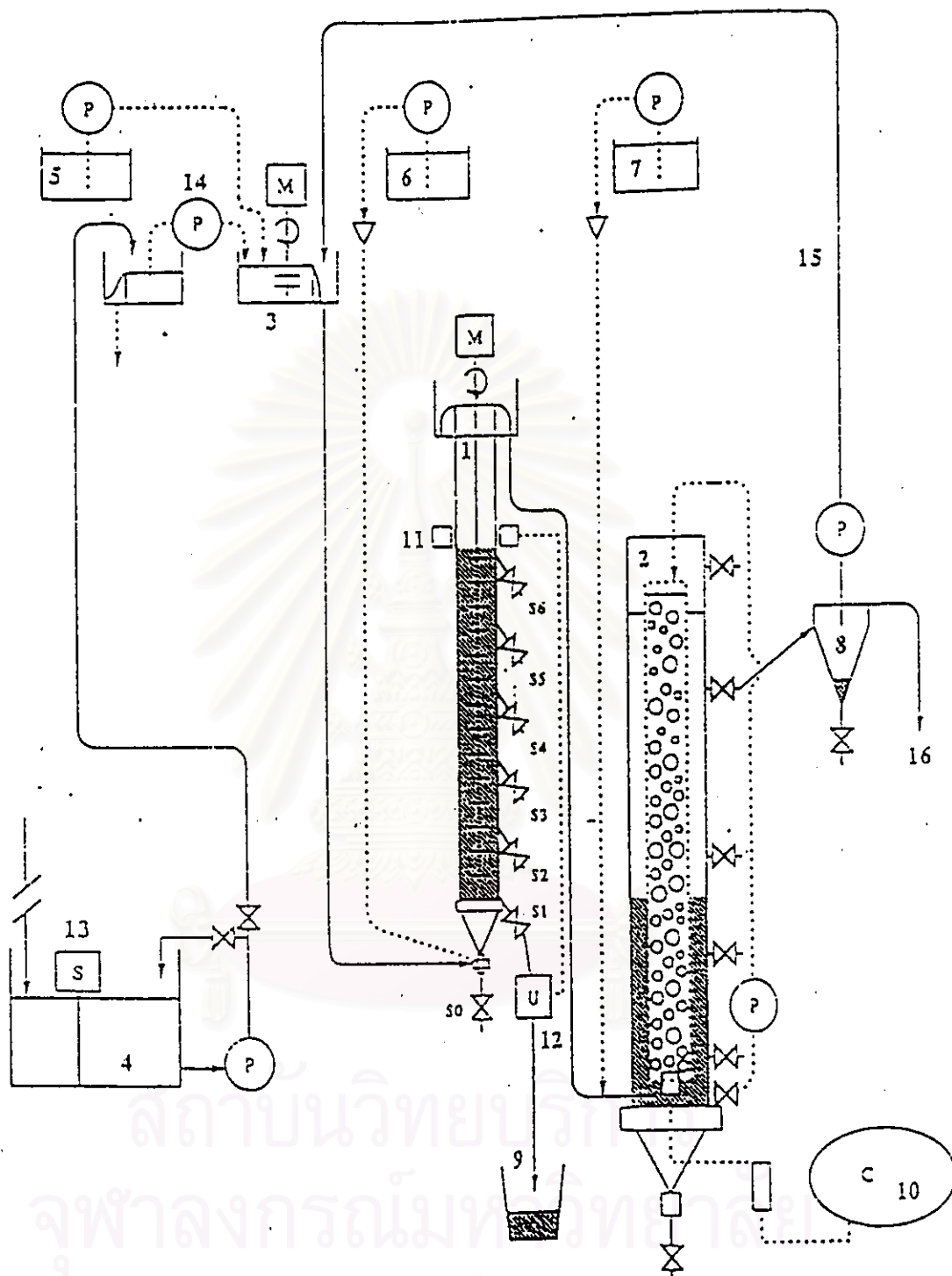
น้ำที่เข้าระบบเป็นน้ำเสียจริงจากโรงบำบัดน้ำเสีย Suseigawa ในSapporo น้ำเสียจะผ่านตะแกรงขนาดความถี่ 2.5 ตารางมิลลิเมตร แล้วเข้าระบบกวนเร็ว 200 รอบต่อนาที ซึ่งเติม PACI ในขั้นตอนนี้ จากนั้นก็เข้าสู่ระบบ AFPB โดยเติมโพลีเมอร์ประจุลบที่กั้นถัง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 ซม. สูง 200 ซม. ใบกวนหมุนด้วยความเร็ว 2 รอบต่อนาที(G ประมาณ 45 s⁻¹)16 ใบ ชั้นเพลล็ดสูง 175 ซม. น้ำล้นออกด้านบนจากนั้นก็เข้าสู่ระบบแอกติเวเตดสลัดจ์ เป็นกระบอกทรงกลม 2 ชั้น มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกระบอกใน 10 ซม.ซึ่งเป็นส่วนเดิมอากาศ และ

กระบอกนอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ซม.เป็นส่วนตักตะกอน จะมีการเติมโพลีเมอร์ประจุบวก เพื่อช่วยในการตักตะกอนสลัดจ์ด้วย สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในระบบ AFPB ของแข็งแขวนลอย, คอลลอยด์และสารประกอบฟอสฟอรัสจะรวมกันโดย PACI และโพลีเมอร์ประจุลบ เป็นฟลอคขนาดใหญ่ตักตะกอนอย่างรวดเร็ว
2. AFPB ยังสามารถกำจัดไนโตรเจนและสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยกระบวนการทางชีวะอย่างมีประสิทธิภาพ
3. ระบบนี้สามารถกำจัด ซีไอดี,ของแข็งแขวนลอย,สารประกอบฟอสฟอรัส และไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพในเวลาแค่ 4 ชั่วโมง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Experimental apparatus 1.AFPB bioreactor 2. aeration tank with settler 3.flash mix
 4.sewage reservoir 5.PAC reservoir 6.anionic polymer reservoir 7 Cationic polymer reservoir
 8.effluent reservoir 9. waste sludge 10. air compressor 11. photosensor 12. solenoid valve 13
 14. pump 15. effluent

รูปที่ 3.34 ผังระบบบำบัดน้ำเสีย (Shimizu, Tambo, Kudo, Ozawa and Hamaguchi, 1994)