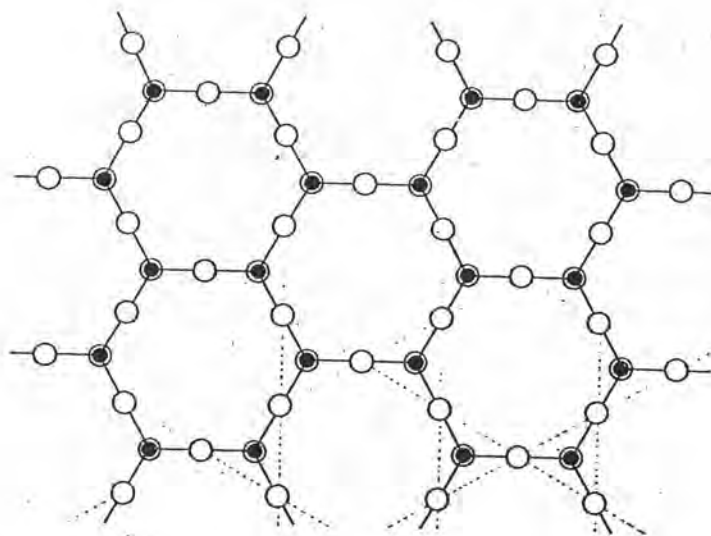


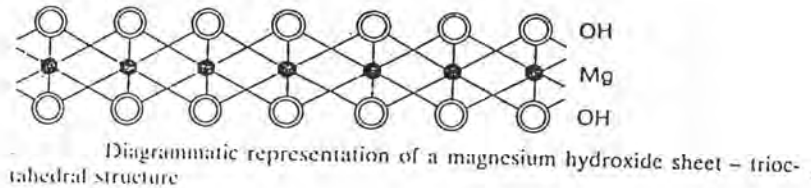
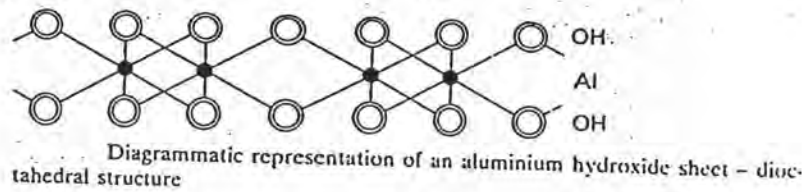
ทฤษฎี และแนวความคิด

องค์ประกอบและลักษณะของน้ำชั้น

ความชื้นที่พบทั่วไปในน้ำผิวดิน มักเกิดจากการมีสารแขวนลอย อันได้แก่ อนุภาคดินเหนียว อยู่ในน้ำ อนุภาคดินเหนียวเหล่านี้มีโครงสร้างพื้นฐานเป็น โมเลกุลประเภทหนึ่งของ sheet silicates (Patrick, 1986) ซึ่งประกอบด้วย การรวมตัวในหลายรูปแบบของ silicon tetrahedral sheet กับ aluminium hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet โมเลกุล ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคดินเหนียว มีลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2

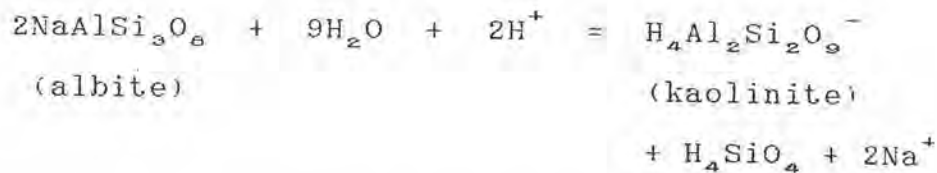


รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ silicon tetrahedral sheet วงกลมสีดำ คืออะตอมซิลิกอน และวงกลมสีขาว คืออะตอมออกซิเจน (Patrick, 1986)

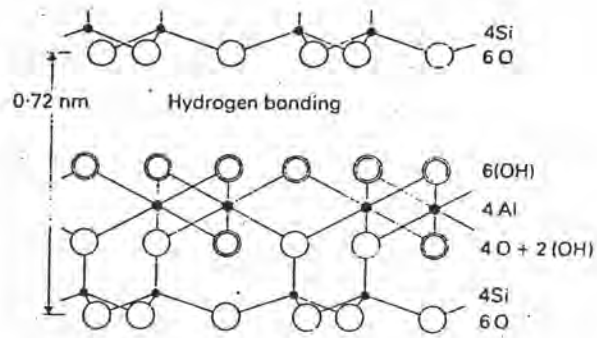


รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ aluminium hydroxide sheet และ magnesium hydroxide sheet (Patrick, 1986)

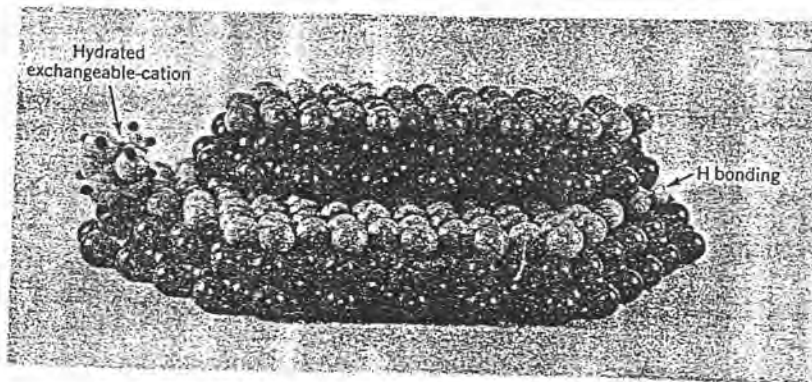
ดินคาโอลิน เป็นดินเหนียวประเภทหนึ่งซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วย silicon tetrahedral sheet และ aluminium hydroxide sheet ดินคาโอลินมีกำเนิดมาจากกลไกการผุพัง (weathering) ของ albite ในสภาพที่เป็นกรด ทำให้ได้ผลึกของดินคาโอลินจากสารละลาย (Foth, 1990) ดังสมการ



นอกจากนั้น ดินคาโอลินยังสามารถเกิดได้จาก กลไกการแยกตัวบางส่วน (partial disintegration) ในสภาพกรดของดินเหนียวที่มีสัดส่วน ซิลิกา ต่อ อลูมินา เท่ากับ 2:1 เช่น montmorillonite กลไกนี้เป็นกลไกการผุพังอีกแบบหนึ่ง ที่ silicon tetrahedral sheet แยกตัวออก ทำให้โครงสร้างที่เหลือมีสัดส่วน ซิลิกา ต่อ อลูมินา เป็น 1:1 ซึ่งคือโมเลกุลของดินคาโอลินดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ก. โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน (Patrick, 1986)



Model of kaolinite showing two offset layers. The upper layer surfaces are composed of hydroxyls (light-colored). These hydroxyl are bonded by the hydrogen of the hydroxyl to the oxygen of adjacent layers, producing a nonexpanding clay. Cation exchange capacity is low and originates at the edges due to deprotonation of exposed hydroxyls. A hydrated cation is adsorbed to such a cation exchange site.

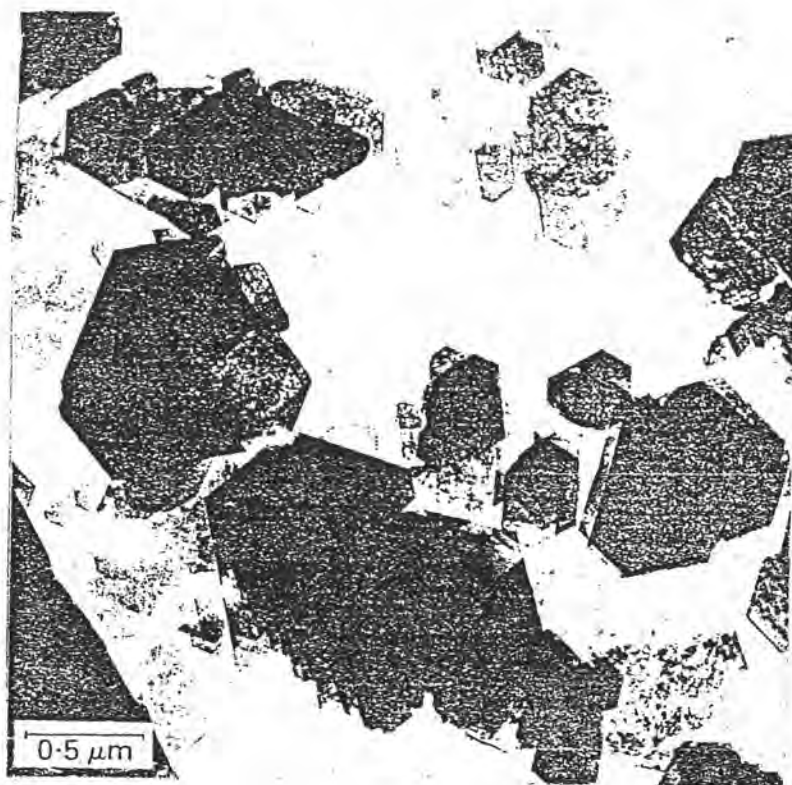
รูปที่ 3.3 ข. โมเดลโครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน (Foth, 1990)

การเชื่อมระหว่างโมเลกุล แต่ละชุดของดินคาโอลิน เป็นแรงเชื่อมของ ไฮโดรเจนบอนด์ ไฮโดรเจนบอนด์นี้เป็นแรงดึงดูดระหว่างออกซิเจนอะตอมของโมเลกุลหนึ่ง กับหมู่ไฮดรอกซิลของอีกโมเลกุลหนึ่ง และ จากสมบัตินี้เองทำให้ดินคาโอลินเป็น ดินเหนียวประเภทไม่พองน้ำ (nonexpanding clay) โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลินสามารถประกอบกัน เป็นโครงสร้างผลึก หรืออนุภาคแบบ psuedo-hexagonal crystal ได้ มีขนาดตั้งแต่ 0.2 - 2 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4

จากโครงสร้างของอนุภาคดินคาโอลินที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าดินคาโอลินมีสมบัติพิเศษ คือ พื้นที่ผิวจำเพาะสูง เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก และมีรูปร่างเป็นแผ่นยาว (sheet) นอกจากนั้นซิลิเกตไอออนซึ่งมีประจุบวก 4 ใน tetrahe-

dral sheet ยังสามารถถูกแทนที่โดยอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวก 3 ได้ (isomorphous replacement) การแทนที่ของไฮดรอกไซด์ จะเกิดขึ้นเป็นบางจุด มากกว่าจะเกิดการแทนที่แบบกระจายสม่ำเสมอ (Gillott, 1987) ลักษณะเช่นนี้ ทำให้ดินคาโอลินมีความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้า และมักมีประจุเป็นลบ

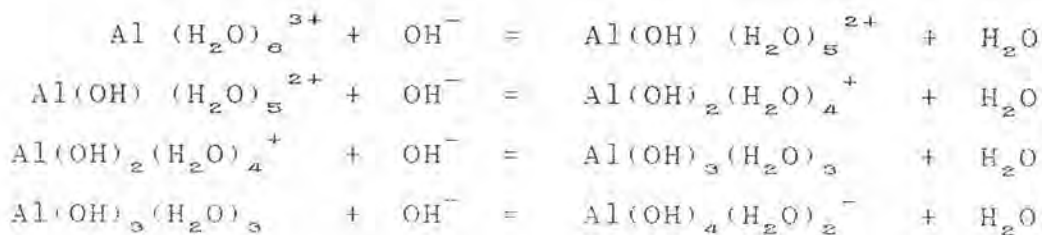
อนุภาคดินคาโอลินซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน ที่เคลื่อนเข้ามาใกล้กัน จะเกิดแรงผลักซึ่งกัน และกัน ดังนั้นปัจจัยหลักที่ทำให้อนุภาคดินคาโอลิน สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพคือ แรงผลักระหว่างไฮดรอกไซด์ของอนุภาค นอกจากนี้ หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลดินคาโอลินบางส่วน จะมีโมเลกุลน้ำเกาะอยู่ และโมเลกุลน้ำนี้เอง จะเป็นสิ่งขวางกั้นไม่ให้อนุภาคเข้ามาสัมผัสกันโดยตรง ซึ่งจะเป็นส่วนที่ทำให้อนุภาคสามารถแขวนลอยได้อย่างมีเสถียรภาพอีกด้วย



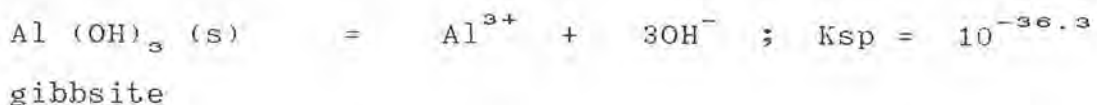
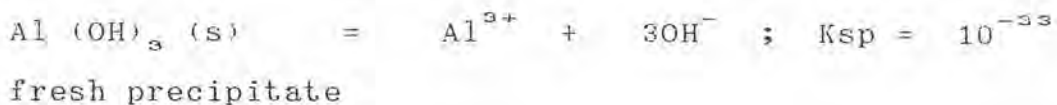
รูปที่ 3.4 รูปถ่ายอนุภาคดินคาโอลิน
(Patrick, 1986)

เคมีของสารส้มในน้ำ

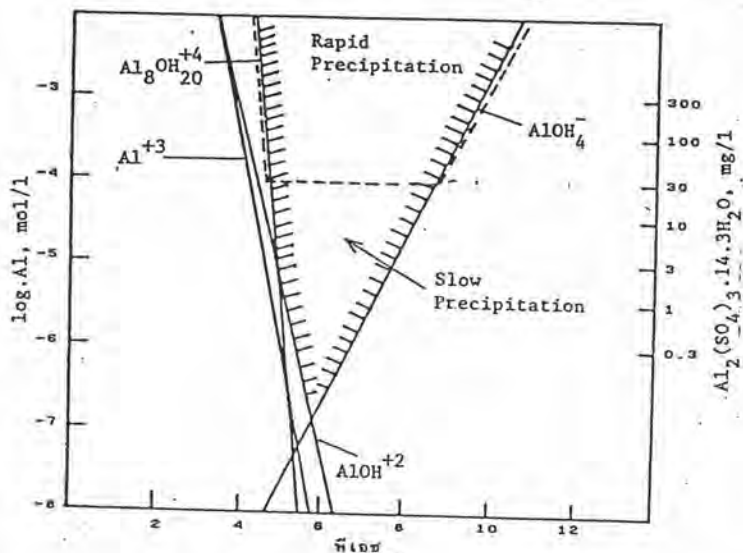
สารส้มเป็นสารเคมีที่ใช้กันทั่วไปในระบบผลิตน้ำประปา มีชื่อทางเคมีว่า aluminium sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) สารละลายสารส้มจะมีอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยการแทนที่โมเลกุลน้ำด้วยไฮดรอกไซด์ต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำ โดยเฉพาะไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกไซด์หลายประเภท และถ้ามีความเข้มข้นมากพอก็จะเกิดเป็นผลึกของ aluminium hydroxide ได้ด้วย ดังสมการ



aluminium hydroxide ที่เกิดขึ้นมี solubility product constant (Ksp) ต่ำมาก ค่า Ksp ของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่ (fresh precipitate) จะแตกต่างจากค่า Ksp ของผลึกที่ต่อมามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในเป็น gibbsite ดังนี้ (Snoeyink and Jenkins, 1980)

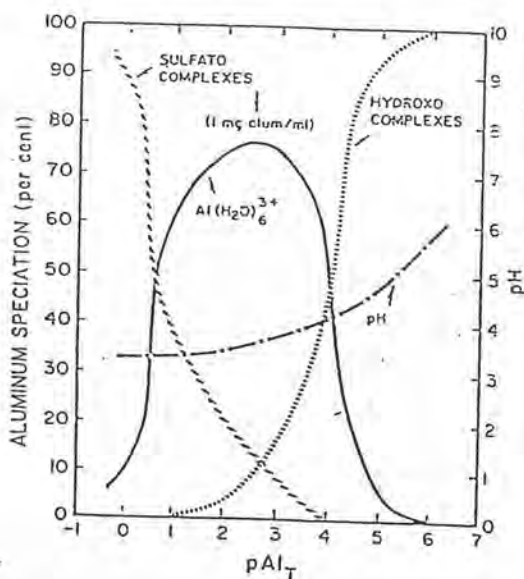


ปริมาณไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ชนิด และมากน้อยเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับ ค่า pH หรือ ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ (Bratby, 1980) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับ ปริมาณไฮดรอกไซด์ประเภทต่าง ๆ สามารถแสดงได้ด้วย stability diagram ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 stability diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ (มันสัน, 2526)

นอกจากนี้ประเภทของไอออนที่พบ ยังขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของอลูมิเนียมไอออนอีกด้วย Sanks (1978) ได้แสดงอิทธิพลของ ความเข้มข้นของอลูมิเนียมไอออน ที่มีต่อปริมาณไอออนประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารประกอบอลูมิเนียมต่าง ๆ กับ ความเข้มข้นของอลูมิเนียมในสารละลายสารส้ม (Sanks, 1978)

การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นด้วยสารส้ม

เสถียรภาพของอนุภาคในน้ำขึ้นอยู่กับแรงดูด และแรงผลักระหว่างอนุภาค ถ้าแรงผลักมากกว่าแรงดูด อนุภาคต่างๆจะไม่รวมตัวกัน และแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ซึ่งถือว่า อนุภาคเหล่านั้นมีเสถียรภาพ การมีเสถียรภาพของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำนั้นเองเป็นสาเหตุทำให้น้ำมีความขุ่น ถ้ามีการทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง และ ทำให้อนุภาคสามารถรวมตัวกันได้ อนุภาคเหล่านั้นก็จะไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป และสามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยการตกตะกอน และ/หรือ การกรอง

แรงดูดระหว่างอนุภาค เรียกว่า van der Waals force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเกิดจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค ซึ่งโดยปกติแล้ว แรงผลักจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค จะทำให้ อนุภาคต่างๆไม่สามารถเข้ามาใกล้กันจนมีแรงดูดติดกันได้ ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจึงมุ่งไปที่ การทำลาย หรือ ลดอิทธิพลของแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยอาศัยกลไกทางเคมี และฟิสิกส์ระหว่างสารส้ม กับอนุภาคความขุ่น

ปริมาณ โคแอกกูแลนต์ และ ปริมาณสารแขวนลอย มีส่วนสำคัญในการกำหนดกลไกของการทำลายเสถียรภาพ Stumm & O'Melia (1968) ได้พบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคแอกกูแลนต์กับ ปริมาณอนุภาคความขุ่น (วัดในรูปของพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

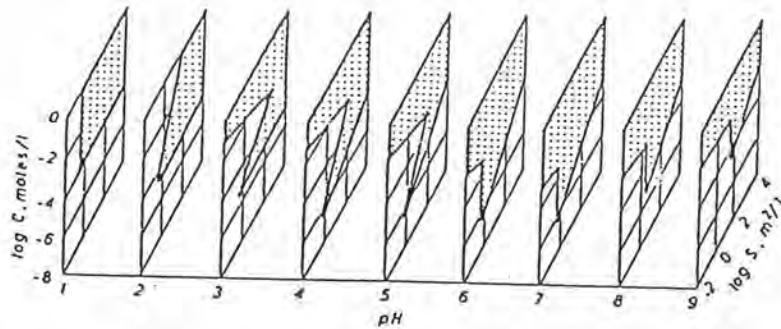
รูปที่ 3.7

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่างๆ
(Stumm and O'Melia , 1968)

จากรูปที่ 3.7 จะพบว่าสามารถแบ่งโซนใน diagram ของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารส้ม กับปริมาณอนุภาค ได้ 4 โซน (Bratby ,1980) ดังนี้

- โซน 1 แสดงถึงกรณีที่ปริมาณสารส้ม ไม่เพียงพอ และ การทำลายเสถียรภาพไม่เกิดขึ้น
- โซน 2 แสดงถึงกรณีที่ปริมาณสารส้ม มีเพียงพอ และ มีการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้น
- โซน 3 แสดงถึงกรณีที่เกิดการมีเสถียรภาพขึ้นมาใหม่ จากการใช้สารส้ม มากเกินไป
- โซน 4 แสดงถึงกรณีที่ปริมาณสารส้มมีมากจนเกิดการตกผลึก $Al(OH)_3$ และมีการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้น

Stumm & O'Melia (1968) ได้แสดงว่า รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้ม กับปริมาณอนุภาคนี้ มีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละค่า pH ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่ค่า pH ต่าง ๆ (Stumm and O'Melia , 1968)

กลไกการทำลายเสถียรภาพที่เกิดขึ้น จึงได้รับอิทธิพลมาจากความเข้มข้นของสารส้ม pH และ ปริมาณอนุภาคความขุ่นดังกล่าวมาข้างต้น ประเภทของกลไกที่สำคัญในการทำลายเสถียรภาพ คือ

1. กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย (compression of diffused layer) โดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้าม (ในที่นี้คือไอออนของ Al ซึ่งมีประจุบวก) กับประจุไฟฟ้าของอนุภาค (มักมีประจุลบ) ทำให้ไอออนประจุบวกที่กระจายอยู่รอบๆ อนุภาคไปอ่ออยู่ใกล้ผิวของอนุภาคมากขึ้น ชั้นไอออนที่กระจายอยู่รอบอนุภาคจึงมีความหนาลดลง อำนาจประจุลบของอนุภาคซึ่งเป็นต้นเหตุของแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงลดลงด้วย

กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย มักเกิดได้ดีกับ ไอออนที่มีประจุบวก (Weber, 1972) เช่น $Al(H_2O)_6^{3+}$ และ Hydroxo Complex ต่าง ๆ เนื่องจากไอออนที่มีประจุบวกเหล่านี้มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบอยู่มาก จึงไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ แต่ก็มีผลลดความหนาชั้นกระจายได้มากกว่า ไอออนที่มีประจุน้อยหลายเท่า (เช่น Al^{3+} ให้ผลดีกว่า Ca^{2+} ถึง 1000 เท่า)

ในกรณีที่มี pH สูงๆ ไอออนส่วนใหญ่ จะมีประจุลบ ซึ่งเหมือนประจุของอนุภาค การลดอิทธิพลของประจุอนุภาค หรือ ลดความหนาของชั้นกระจายจึงไม่เกิดขึ้น ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงมาก ๆ อนุภาคจะถูกทำลายเสถียรภาพโดยกลไกลดความหนาของชั้นกระจายได้มากขึ้น (Bratby, 1980) ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมไอออนที่มีประจุบวกซึ่งเหมาะกับกลไกนี้ เกิดในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพได้มาก อนุภาคเบื้องต้นที่ได้จากการทำลายเสถียรภาพนี้อยู่ใกล้กันมากพอที่จะชนกัน เกิดเป็นอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยง่าย ก่อนที่ไอออน และผลึกจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสช่วงต่อมา จะทำให้เกิดกลไกแบบอื่น

2. กลไกการดูดติดผิวและทำลายประจุ (adsorption-destabilization) โดยการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุไฟฟ้าของอนุภาค ทำให้ไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้ เข้าถึงผิวของอนุภาค และ ทำลายศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค กลไกดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกที่เกิดขึ้นได้ดีกับไอออนที่มีประจุน้อย เช่น $Al(OH)(H_2O)_5^{2+}$ และ $Al(OH)_2(H_2O)_4^+$ ซึ่งสามารถเกาะติดผิวอนุภาคได้ (Sanks, R.L., 1978) การเติมสารส้มลงในน้ำ จะทำให้เกิด ไอออนคอมเพล็กซ์ ตามลำดับจนกลายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ภายในเวลา 1-7

วินาที (มันลิน, 2526) ดังนั้นถ้าไม่สามารถทำให้ไอออนคอมเพล็กซ์ดูดติดผิวอนุภาคทั้งหมดได้ ภายในเวลาน้อยกว่า 1 วินาที จะมีผลึก $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นได้โดยง่าย เนื่องจากความสามารถในการละลายของ ผลึก $Al(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำมาก และทำให้เกิดกลไกแบบ sweep coagulation การเกิดผลึก $Al(OH)_3$ จึงมีผลไปขัดขวางการเกิดกลไกแบบดูดติดผิว ดังนั้นสรุปได้ว่ากลไกแบบดูดติดผิวนี้จะเกิดได้ดีในกรณีดังต่อไปนี้

- ความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้มีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ (Al^{+3}) และ $(OH^-)^3$ ต่ำกว่าค่า Ksp ความเข้มข้นของสารส้มที่ใช้มากเกินไปจะทำให้ ประจุของอนุภาคเปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้าม (จากลบเป็นบวก) ซึ่งจะส่งผลให้อนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืนมาอีก (restabilization)

- ค่า pH ไม่สูงเกินไปจนมี OH^- มาก ซึ่งจะช่วยเร่งการเกิดผลึก $Al(OH)_3$ หรือ ถ้ามี pH ต่ำเกินไป จะมีไอออนประจุบวกสูงซึ่งจะทำให้ไม่สามารถเกาะติดกับผิวอนุภาคได้

- ความทั่วถึงของความปั่นป่วนในบริเวณที่เติมสารส้ม ประกอบกับความเข้มข้นของอนุภาคจะต้องมีมากพอ ที่จะทำให้ไอออนดูดติดผิวอนุภาคทั้งหมดได้ภายในเวลา น้อยกว่า 1 วินาที

3. กลไกจับอนุภาคความขุ่นไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น หรือกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) เป็นกลไกที่อาศัย การสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเป็น絮สามารถเกาะจับกับอนุภาค และรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตกตะกอนได้ง่าย กลไกนี้สามารถเกิดได้ดีในที่ซึ่งมีค่า pH อยู่ในช่วงประมาณ 6-7.5 ถ้า pH สูงหรือต่ำเกินไปจะทำให้เกิดผลึก $Al(OH)_3$ น้อย ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อกลไกแบบนี้

ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ (น้ำมีความขุ่นน้อย) จะทำให้อนุภาค เบี่ยงต้นจากการทำลายเสถียรภาพโดยกลไกสองกลไกแรก มีโอกาสน้อยที่จะสัมผัสรวมตัวกัน ในขณะเดียวกัน ถ้าเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม จะมีการตกผลึก $Al(OH)_3$ มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดมีปริมาณมากพอที่ทำให้เกิดการสมานตะกอนอย่างสมบูรณ์ในขั้นตอนต่อไป ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพในกรณีที่มีน้ำมีความขุ่นน้อย จึงมักจะอาศัยกลไกแบบกวาดนี้

ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูง (น้ำมีความขุ่นมาก) อนุภาคจำนวนมากจะช่วยทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการตกผลึก ทำให้อัตราการตกผลึกสูงขึ้น การ

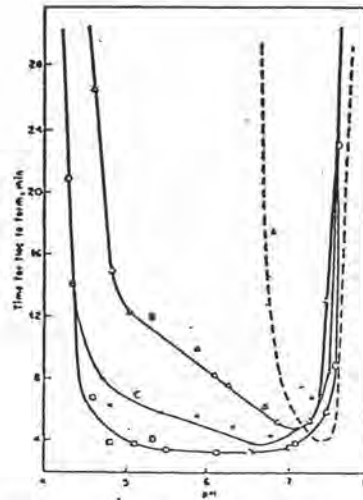
ที่อัตราการตกผลึกสูงขึ้นนี้เป็นผลดี คือ ทำให้ใช้เวลากักน้ำในถังปฏิกริยาน้อยลง จากกลไกต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่า การทำลายเสถียรภาพ เกิดขึ้นในลักษณะที่ซับซ้อน และมีหลายกลไกสามารถเกิดได้พร้อมกัน ดังนั้น ความเข้มข้นของสารส้มที่เหมาะสมจึงต้องหามาจากการทดลอง ซึ่งวิธีการที่มักใช้กันทั่วไป คือ การทำ jar test โดยทดลองแปรค่า สารส้ม pH และ เปรียบเทียบหาค่าความเข้มข้นของสารส้ม ที่ทำให้ได้ผลความขุ่นในน้ำหลังการตกตะกอน ต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามสภาพแวดล้อมของการทดลองในห้องปฏิบัติการ ย่อมแตกต่างจากสภาพการทำงานจากระบบจริง ซึ่งจะมีผลทำให้ผลที่ได้จาก jar test แตกต่างจาก ผลการทำงานจากระบบจริง Hudson , Jr (1981) ได้แนะนำว่า ในการทำ jar test ควรมีการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ปริมาณสารส้ม ความเข้มข้นสารละลายสารส้ม ค่า pH อุณหภูมิ วิธีการเติมสารส้ม เวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน เป็นต้น

ค่าความเข้มข้นของสารส้มที่ต้องการ นอกจากจะขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นของอนุภาค และประเภทของกลไกหลัก ในการทำลายเสถียรภาพดังที่กล่าวมาแล้ว Miller (1925) และ Packham (1962) ยังพบว่าไอออนลบต่าง ๆ ในน้ำมีผลต่อช่วงค่า pH ที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพ ดังนี้ (Bratby ,1980)

1. คลอไรด์ไอออนในปริมาณสูงจะมีผลทำให้ ค่า pH ที่เหมาะสมเคลื่อนไปทางด้านกรดเล็กน้อย

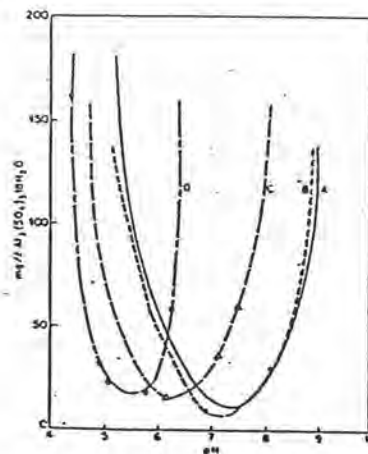
2. ซัลเฟตไอออน ที่ความเข้มข้น 25-250 มก./ลิตร จะทำให้บริเวณที่เหมาะสมในการทำลายเสถียรภาพขยายออกไปทางด้าน pH เป็นกรด การขยายตัวนี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณซัลเฟตไอออน ที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.9)

3. ฟอสเฟตไอออนเพียงปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ ช่วงค่า pH ที่เหมาะสมเคลื่อนไปทางด้านกรด โดยการขยายช่วง pH ที่เหมาะสมมีน้อยมาก (รูปที่ 3.10)



Effect of Sulphate Ion on Time of Formation of Alum Floc. Broadening of the pH Zone of Coagulation by Sulphate Ion. Curve A, Alum (35 mg l^{-1}) and Sodium Hydroxide; Curve B, Addition of $25 \text{ mg l}^{-1} \text{ SO}_4$; Curve C, addition of $50 \text{ mg l}^{-1} \text{ SO}_4$; Curve D, Addition of $125 \text{ mg l}^{-1} \text{ SO}_4$. (From Black *et al*⁽³⁾, with the permission of the American Chemical Society.

รูปที่ 3.9 อิทธิพลของซัลเฟตไอออนที่มีต่อเวลาในการเกิดฟลอค (Bratby, 1980)



Effect of Orthophosphate on pH Zone of Coagulation. Points on the Curves Represent the Alum Dosage Required to Reduce 50 mg l^{-1} of Clay Turbidity to One-Half its Original Value. Curve A, Alum Alone, No PO_4 ; Curve B, $4.8 \text{ mg l}^{-1} \text{ PO}_4$ Added; Curve C, $48 \text{ mg l}^{-1} \text{ PO}_4$ Added; Curve D, $475 \text{ mg l}^{-1} \text{ PO}_4$ Added. Presence of Orthophosphate Displaces the pH Zone of Coagulation Towards the Acid Side. (After Packham⁽³⁸⁾).

รูปที่ 3.10 อิทธิพลของออร์โธฟอสเฟตที่มีต่อค่า pH ในกระบวนการรวมตะกอน (Bratby, 1980)

การกวนเร็วในท่อ

อุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไป ในการกวนเร็ว มีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (completely stirred tank reactor) ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือกลเพื่อสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำ ข้อดีของอุปกรณ์ประเภทนี้ คือสามารถแปรค่าพารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็ว เช่น ความเร็วเกรเดียนท์ (G) ได้โดยการปรับความเร็วรอบการหมุนของเครื่องมือกล แต่อย่างไรก็ตามการกวนเร็วแบบนี้มีข้อด้อยที่สำคัญ คือต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการสร้างถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ ต้องติดตั้งเครื่องมือกลรวมทั้งต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล

อุปกรณ์อีกประเภทหนึ่งที่ได้มีการพัฒนาเพื่อการกวนเร็ว คือ ใช้วิธีทางชลศาสตร์ สร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำแทนการใช้เครื่องมือกล และวิธีการอย่างหนึ่งทางชลศาสตร์ คือการกวนเร็วในท่อ การกวนเร็วโดยไม่ใช้เครื่องมือกลเช่นนี้ทำให้สามารถลด ค่าก่อสร้าง และการบำรุงรักษา ลงได้ในระดับหนึ่ง ลักษณะของการกวนผสมเป็นแบบ jet mixing สัมพันธ์กับการไหลรูปแบบ plug flow ซึ่ง Vrale และ Jordan (1971) ได้ทำการทดลองการกวนเร็วด้วยอุปกรณ์รูปแบบต่าง ๆ และพบว่า การกวนเร็วในท่อมี่ประสิทธิภาพดีกว่า กวนเร็วในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ โดยเฉพาะในกรณีที่น้ำขุ่นที่เข้ามามีปริมาณอนุภาคมากพอ ที่จะเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่นด้วยกลไกดูดติดผิว และทำลายประจุ เป็นกลไกหลัก ด้วยเหตุนี้ อุปกรณ์กวนเร็วในท่อ จึงต้องการสารส้มปริมาณน้อยกว่า อุปกรณ์กวนเร็วในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ซึ่งมักเกิดการรวมตะกอนด้วยกลไกแบบกวาดเป็นกลไกหลัก

ความเร็วเกรเดียนท์ (G , หน่วย ต่อวินาที) สำหรับการกวนเร็วในท่อ สามารถคำนวณหาได้จากการวัดค่าความสูญเสียแรงดันดังสมการ (Bratby, 1980)

$$G = (\rho g h / \mu t)^{1/2} \dots \dots \dots (3.1)$$

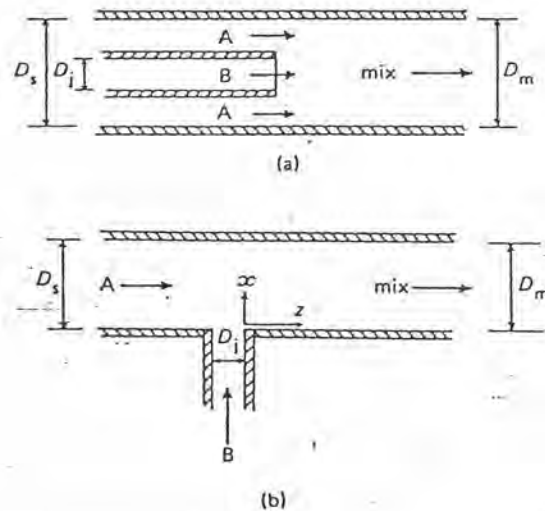
โดยที่

- ρ = ความหนาแน่นน้ำที่ไหลผ่านท่อกวนเร็ว หน่วย กก./ม.³
- g = ค่าคงที่ของความเร่งจากแรงโน้มถ่วง หน่วย ม./วินาที
- h = ค่าความสูญเสียแรงดัน หน่วย ม.
- μ = ความหนืดจลน์ หน่วย กก./ม.วินาที

t = เวลาที่กักน้ำในการไหลผ่านท่อ หน่วย วินาที

การกวนผสมแบบ jet กระแสของสารลึ้มซึ่งมีความเร็วสูงจะเคลื่อนผ่านเข้าไปในกระแสน้ำดิบ ซึ่งมีความเร็วต่ำกว่า ความแตกต่างระหว่างความเร็วนี้จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของมวลน้ำดิบเข้ามาสู่ลำกระแสดสารลึ้ม และ มีการผสมกันเกิดขึ้น (Revill, 1985)

การกวนผสมแบบ jet ในท่อแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การฉีดผสมในทิศทางเดียวกับแนวท่อ (coaxial jet mixer) และการฉีดผสมเข้าด้านข้างท่อ (side-entry jet mixer) ดังแสดงในรูปที่ 3.11



(a) Coaxial jet mixer; (b) side-entry jet mixer

รูปที่ 3.11 รูปแบบการกวนผสมแบบ jet ในท่อ
(Harnby, Edwards and Nienow, 1985)

Chao and Stone (1979) พบว่าการฉีดผสมในทิศทางเดียวกับท่อ มีประสิทธิภาพดีกว่าการฉีดผสมเข้าด้านข้างท่อ แต่อย่างไรก็ตาม การฉีดผสมเข้าด้านข้างท่อ ก็มีข้อได้เปรียบ คือ ง่ายต่อการก่อสร้าง และบำรุงรักษามากกว่า รวมทั้งเหมาะกับการผสมระหว่างกระแสที่มีขนาดต่างกันมาก

พฤติกรรมของ jet ที่ฉีดเข้าด้านข้างท่อ จะมีกระแสเคลื่อนไต่ไปตามแนวท่อ ตามทิศทางการไหลของกระแสหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่ง Reilly ได้ทำการทดลอง และ พบว่า (Revill, 1985)

$$x/D_j = (\rho_j * v_j^2 / \rho_m / v_m^2)^{0.4} * (Z/D_j)^{0.3} \dots (3.2)$$

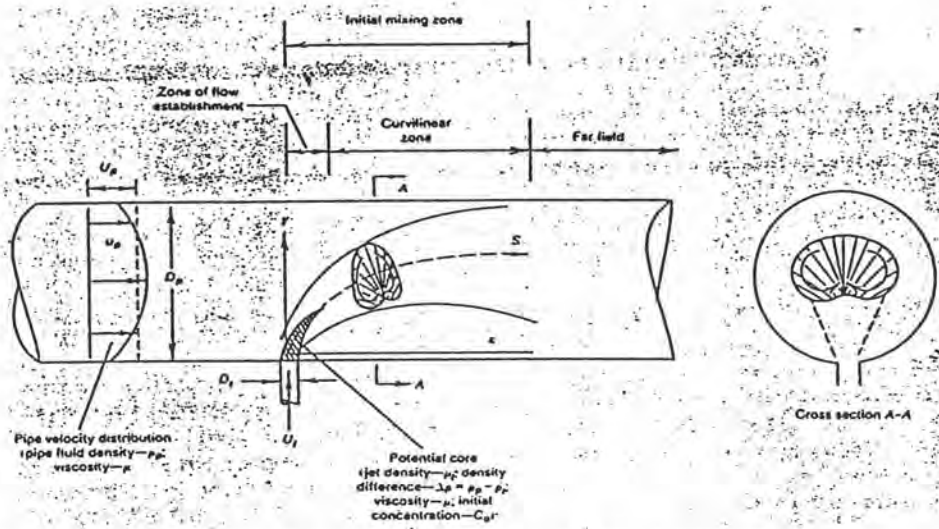
โดยที่

- x = ระยะทางที่ jet เคลื่อนทะลุเข้าไปในกระแสหลัก
- D_j = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อฉีด
- v_j = ความเร็วที่ออกจากท่อฉีด
- ρ_j = ความหนาแน่นของกระแส jet
- v_m = ความเร็วการไหลของกระแสหลัก
- ρ_m = ความหนาแน่นของกระแสหลัก
- Z = ระยะทางจากจุดเชื่อมต่อ jet ไปตามแนวท่อกระแสหลัก

อัตราส่วนของโมเมนต์พลิกซ์หาได้จากสมการ

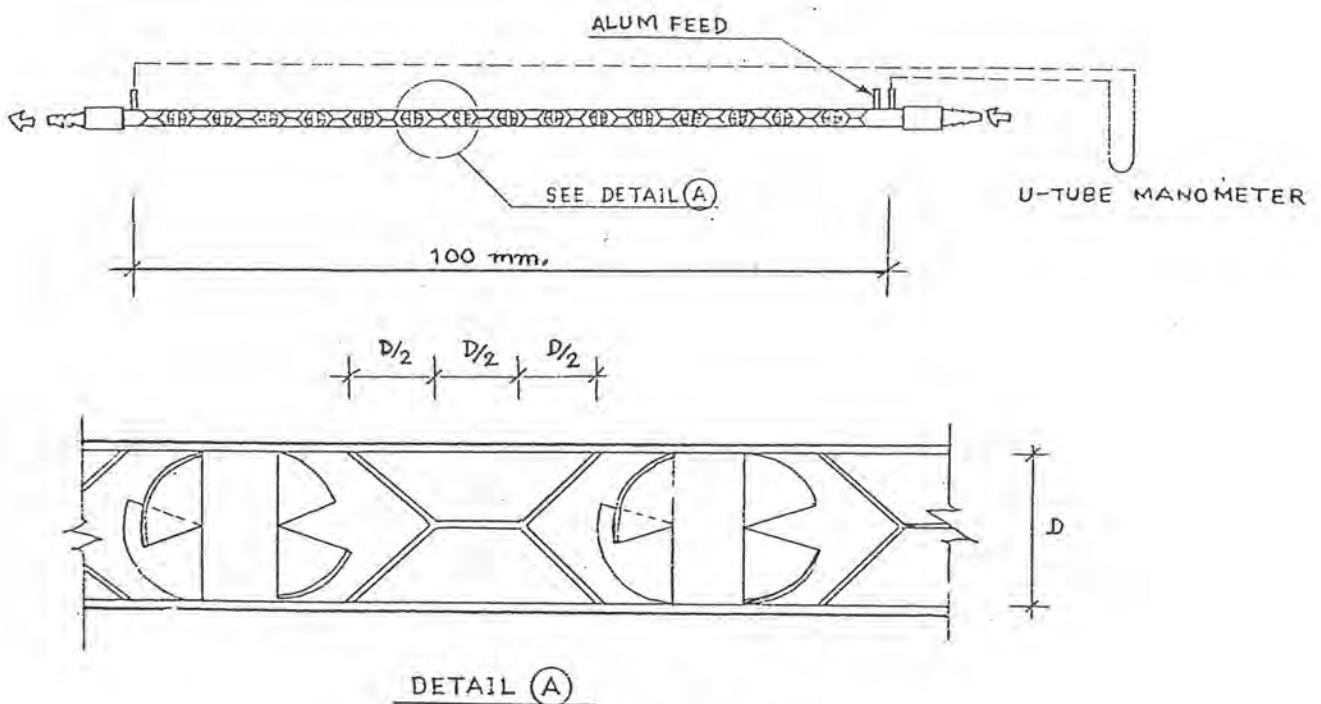
$$M_r = \rho_j * v_j^2 / \rho_m / v_m^2 \dots \dots \dots (3.3)$$

ถ้า $M_r < 1.5$ ค่าโมเมนต์ของ jet จะน้อย เมื่อเทียบกับกระแสหลัก ซึ่งเป็นเหตุทำให้กระแส jet ไม่สามารถเคลื่อนออกมาจากระนาบของจุดเชื่อมต่อ jet กับท่อกระแสหลักได้ กระแส jet จะเคลื่อนไปตามแนวผนังท่อกระแสหลัก ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการกวนผสม ดังนั้นการออกแบบการกวนผสมแบบ jet จะต้องสร้าง jet ที่มีความเร็วเพียงพอด้วย



รูปที่ 3.12 การกระจายของกระแส jet ที่ฉีดเข้าข้างท่อ
(Chao and Stone, 1979)

ท่อทวนเร็วที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นแบบมีใบพัดติดอยู่ด้านในของท่อขนาด 20 มม. ยาว 1.00 ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ใบพัดที่มีอยู่จำนวนมากในท่อนี้จะทำให้ระยะทางในการทวนผสม มากกว่าท่อที่ไม่มีใบพัด และ ทำให้การทวนผสมเกิดสมบูรณ์ ในท่อที่สั้นลงได้



รูปที่ 3.13 ท่อทวนเร็วที่ใช้ในการทดลอง

การสมานตะกอน

การสมานตะกอน คือ การที่อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วตลอดจนอนุภาคตะกอนที่ประกอบด้วย กลุ่มอนุภาคที่มาเกาะติดกับโพลิเมอร์เกิดการชน และรวมตัวกันเป็นอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการสมานตะกอน ได้แก่ การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion) การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling) และ การสร้างเม็ดตะกอน (pellet flocculation)

1. การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion)

การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน เกิดจากโมเลกุลของน้ำซึ่งแปรรูปพลังงานความร้อนเป็นพลังงานจลน์ เคลื่อนที่ผ่านอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ เมื่อมีการชนกันของโมเลกุลจะทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนกันระหว่างอนุภาคขึ้น การชน และรวมตัวกันของอนุภาค จากการเคลื่อนที่แบบนี้ เรียกว่า perikinetic flocculation ในทางปฏิบัติ การเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลเช่นนี้สามารถสร้างสัมพัทธ์ให้กับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ถึง 1 ไมครอนเท่านั้น ดังนั้นการสมานตะกอนโดยวิธีนี้จึงมีบทบาทน้อยมากในกระบวนการผลิตน้ำประปา

2. การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion)

การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว เกิดจากการกวนเนื้อของเหลว ทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่ไปกับของเหลวมีความเร็วแตกต่างกัน (เกิดความเร็วเกรเดียนท์) แล้วชนกัน และรวมตัวกันในที่สุด การชน และรวมตัวกันของอนุภาคแบบนี้เรียกว่า orthokinetic flocculation ซึ่งสามารถสร้างสัมพัทธ์ระหว่างอนุภาค ได้ในอัตราที่สูงกว่าแบบแรกเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน วิธีการที่ทำให้ของเหลวซึ่งในที่นี้ คือ น้ำ มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันอาจใช้วิธีทางชลศาสตร์ ด้วยการปล่อยน้ำให้ผ่านผนังกัน หรือใช้วิธีกลโดยกวนน้ำด้วยใบพัด ก็ได้

Camp และ Stein (1943) ได้ศึกษาการเกิดฟลอค จากการชนกันของอนุภาค และได้เสนอสมการ

$$N = G/6 * N_1 * N_2 * (d_1 + d_2)^3 \dots\dots\dots (3.4)$$

โดยที่

- N = จำนวนครั้งการชนของอนุภาค
- G = ความเร็วเกรเดียนท์
- N₁ = จำนวนอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d₁
- N₂ = จำนวนอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d₂

การชนกันของอนุภาค ไม่ได้ทำให้เกิดการเกาะรวมตัวกันได้ทุกครั้ง ถ้าพิจารณาประสิทธิภาพของการชนของอนุภาคประกอบด้วย (Hudson Jr, 1965) และขนาดอนุภาค d₁ น้อยกว่า d₂ มาก จะได้ว่า

$$-dN_1/dt = N = G/6 * \beta * N_1 * N_2 * d_2^3 \dots\dots\dots (3.5)$$

โดยที่

β = อัตราส่วนการเกาะรวมตัว (sticking ratio)

กำหนดให้ ปริมาตรฟลอคต่อหน่วยปริมาตรน้ำ , $\phi = N_2 * \pi * d_2^3 / 6$ เมื่อแทนค่า N₂ ในเทอมของ ϕ ในสมการ (3.5) จะได้ว่า

$$-dN_1/dt = G / \pi * \beta * \phi * N_1 \dots\dots\dots (3.6)$$

อินทิเกรต สมการ (3.6) ในช่วงเวลา t = 0 ถึงเวลา t จะได้ว่า

$$N_t / N_0 = e^{- (\beta * \phi * G / \pi) * t} \dots\dots\dots (3.7)$$

โดยที่

- N₀ = จำนวนอนุภาคที่เวลาเริ่มต้น
- N_t = จำนวนอนุภาคที่ยังไม่ได้รวมตัว ที่เวลา t

ขณะที่อนุภาครวมตัวกันเป็นฟลอคนั้น ฟลอคบางส่วนจะถูกแรงเฉือนทำให้แตกออกได้อีก ดังนั้นประสิทธิภาพการสमानตะกอน จึงไม่เพียงขึ้นอยู่กับความสามารถในการเกาะรวมตัวกันของอนุภาค แต่ยังขึ้นอยู่กับ อัตราการแตกตัวของฟลอคอีกด้วย Argaman (1971) ได้เสนอสมการในการสमानตะกอนในระบบที่มีถึงสमानตะกอนหลายถึง ดังนี้

$$n^i / n^{i+1} = (1 + K_A * G * T/m) / (1 + K_B * G^2 * T/m) \dots\dots\dots (3.8)$$

โดยที่ n^i, n^{i+1} = ความเข้มข้นสารแขวนลอยในถังที่ $i, i+1$
 K_A = ค่าคงที่ในการรวมตัว
 K_B = ค่าคงที่ในการแตกของฟลอค
 T/m = เวลาที่ก้นน้ำเฉลี่ยในถัง 1 ถึง

3. การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling)

การสमानตะกอนจากการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน จะเกิดขึ้นในสภาพที่อนุภาคมีการจมตัว โดยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะจมตัวด้วยอัตราเร็วสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก จนเกิดการชน และรวมตัวกันขึ้นในระหว่างการจมตัว พฤติกรรมเช่นนี้สามารถเกิดได้ในชั้นตะกอน หรือ บริเวณ clarification zone ซึ่งมีการเคลื่อนที่ และสัมผัสกันระหว่างอนุภาคขนาดต่างๆ กลไกนี้จึงมีความสำคัญต่อการสร้างชั้นตะกอนที่ดี ในระบบถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน

4. การสร้างเม็ดตะกอน (pellet flocculation)

การสमानตะกอนจากการสร้างเม็ดตะกอน เกิดขึ้นเมื่อมีสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดที่ยังไม่มีการตกผลึก และต้องการเวลาในการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาวะสมดุล (equilibrium state) สภาพของสารละลายนี้เรียกว่า metastable state (Tambo, 1991) ถ้าทำให้สารละลายนี้ ผสมกับ อนุภาคจำนวนมาก ๆ การตกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว บนผิวของอนุภาค และมักจะได้เม็ดตะกอนในกรณีของอนุภาคดินเหนียวที่ถูกทำลายเสถียรภาพ แล้วได้นำมาควนผสมกับ อนุภาค

ประเภทเดียวกันซึ่งมีขนาดใหญ่ โดยมีการเติมโพลีเมอร์ จะทำให้เกิดการเกาะติดระหว่างอนุภาคแบบ หนึ่งต่อหนึ่ง เกิดเป็นเม็ดตะกอนที่แข็งแรง และหนาแน่นสูง

โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ ปัจจัยที่ได้รับการนำมาใช้ ในการออกแบบ และควบคุมการทำงานของชั้นสมานตะกอน คือ ความเร็วเกรเดียนต์, G (velocity gradient) และเวลากักน้ำ, HRT (hydraulic residence time) พารามิเตอร์ G และ HRT มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอน นอกจากนี้ ยังมีอิทธิพลต่อขนาด และลักษณะทางกายภาพของตะกอน กล่าวคือขนาดของตะกอนจะแปรตามค่า HRT ในขณะที่แปรกลับกับค่า G อย่างไรก็ตามแม้ว่าที่ค่า G สูงๆ จะทำให้ได้ตะกอนขนาดเล็ก ตะกอนที่ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าตะกอนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า G ที่ต่ำกว่า (Lin, 1982)

ที่กล่าวมาจะเห็นว่า ค่า G และ HRT ที่มากขึ้นทำให้ชั้นสมานตะกอนดีขึ้นเสมอ แต่เมื่อพิจารณาครอบคลุมไปถึงการตกตะกอน ซึ่งเป็นกระบวนการต่อไปในระบบผลิตน้ำประปา ค่า G และ HRT จะต้องมีส่วนจำกัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตะกอนที่จับตัวได้ดี ดังนั้นเมื่อ Camp ทำการวิเคราะห์ชั้นสมานตะกอนในระบบผลิตน้ำประปา จึงพบว่าพารามิเตอร์ไร้มิติที่เกิดจากผลคูณระหว่าง G และ HRT จะมีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2×10^4 ถึง 2×10^5 และค่า G ที่เหมาะสมคือ 20 ถึง 70 วินาที⁻¹ (Camp, 1955) ต่อมา Fair, Geyer & Okun (1968) ได้เสนอว่า ค่า $G \cdot HRT$ ที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่าง 10^4 ถึง 10^5 และค่า G ควรมีค่าจาก 10 ถึง 100 วินาที⁻¹ ช่วงค่า $G \cdot HRT$ และ G ดังกล่าวมานี้ เป็นเกณฑ์ออกแบบ และควบคุมชั้นสมานตะกอนกันโดยทั่วไป

นอกจากนี้จากการทดลองของ Hudson (1965) และ Camp (1968) ยังพบว่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน, ϕ (floc volume concentration) เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับปัจจัยทั้งในชั้น การทำลายเสถียรภาพอนุภาค และชั้นสมานตะกอน กล่าวคือมีค่าแปรตามความเข้มข้นของ coagulant และ HRT ในทางตรงข้าม ϕ มีค่าแปรผกผันกับค่า G ทั้งในชั้นผสมเร็ว และชั้นสมานตะกอน ค่า ϕ นี้จึงมีบทบาทสำคัญในการสมาน และการจับตัวของตะกอนในถังน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนที่จะทำการวิจัยนี้ การเพิ่มค่า ϕ อาจจะทำให้ประสิทธิภาพการสมานตะกอนสูงขึ้น หรือในอีกแง่หนึ่ง การเพิ่มค่า ϕ จะช่วยให้ประสิทธิภาพการสมานตะกอนคงเดิมได้ ถ้าจำเป็นต้องลดค่า G และ HRT

การใช้โพลิเมอร์เป็น coagulant aid

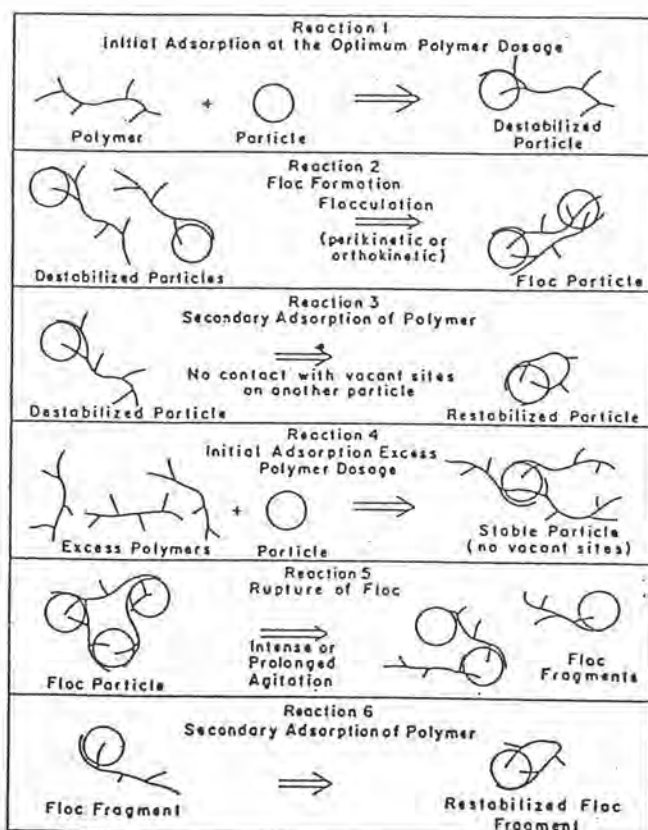
หลังจากการเติม coagulant เช่น สารส้ม ลงในน้ำดิบแล้ว จะมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคความขุ่น อนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วในที่นี้ขอเรียกว่า อนุภาคเบื้องต้น อนุภาคเบื้องต้น จะถูกผ่านเข้าไปยังกระบวนการสมานตะกอน เพื่อรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ที่เรียกว่า ฟลอค ต่อไป

การเติมโพลิเมอร์หลังจากเกิดอนุภาคเบื้องต้นจะช่วยให้การสมานตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้น โมเลกุลขนาดใหญ่ของโพลิเมอร์จะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมตัวกันได้เร็ว และเกิดฟลอค ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Schwayer, 1981) ฟลอคที่แข็งแรงนี้ ให้ผลดีต่อการทำงานของ ดั่งทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน กล่าวคือ ฟลอคที่แข็งแรงจะสามารถต้านแรงเฉือนของของเหลวที่ไหลผ่าน ซึ่งเกิดจากความปั่นป่วนของการกวาดโดยไม่แตกออกเป็นอนุภาคเล็กอง แล้วหลุดออกไปจากถัง ดังนั้น โพลิเมอร์จึงนับว่าเป็นสารช่วยในการสมานตะกอนทำให้ระบบสามารถทำงานได้ที่อัตราน้ำล้นผิวสูงขึ้น

โพลิเมอร์ที่ใช้หลังจากการเติมสารส้ม มักเป็นพวกมีประจุลบ (anionic polymer) หรือไม่มีประจุ (nonionic polymer) เนื่องจากมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เหมาะกับกลไกที่ใช้โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นได้จำนวนมาก ทำให้ได้ฟลอคที่มีน้ำหนักมาก แข็งแรง และแยกออกจากน้ำได้ดี กลไกการทำงานของโพลิเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วย โมเดลที่เรียกว่า polymer bridging (รูปที่ 3.14) ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลโพลิเมอร์ จะประกอบด้วยโมเลกุล (monomer) เชื่อมต่อกัน โมเลกุลที่ประกอบกันเป็นโพลิเมอร์เหล่านี้มักจะมี หมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่สามารถเกาะจับอนุภาคได้ ดังนั้นในโพลิเมอร์หนึ่งโมเลกุล จะมีจุดที่อนุภาคเกาะจับได้หลายแห่ง ในรูปปฏิกิริยาที่ 1 แสดงถึงวิธีการเกาะจับของโมเลกุลโพลิเมอร์ กับอนุภาค หลังจากการเกาะจับนี้ ถ้าโมเลกุลโพลิเมอร์ยังมี หมู่ฟังก์ชันที่เกาะจับอนุภาคได้เหลืออยู่ ก็จะมีโอกาสที่มีการเกาะจับอนุภาคต่อไปเกิดเป็น ฟลอคขนาดใหญ่มากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปปฏิกิริยาที่ 2 ปฏิกิริยาที่เราต้องการในระบบผลิตน้ำประปา คือ ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 นี้ ซึ่งจะเกิดได้สมบูรณ์จะต้องประกอบด้วยความพอดี ของปัจจัย 3 ประการ คือ ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ที่ใช้ ค่าความเร็วเกรเดียนท์ และ เวลาที่น้ำในถังปฏิกิริยา ความไม่พอดีของปัจจัยทั้ง 3 นี้ แม้เพียงปัจจัยเดียว จะมีผลให้

อนุภาคมีเสถียรภาพกลับคืนมาอีกได้ดังแสดงในรูปปฏิกิริยาที่ 3 อนุภาคถูกเกาะจับหลายตำแหน่ง ทำให้ไม่มีที่ว่างบนผิวอนุภาคที่จะไปเกาะจับกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลโพลิเมอร์อื่น อนุภาคที่ได้ก็ยังคงมีเสถียรภาพต่อไป รูปปฏิกิริยาที่ 3 อาจเกิดได้ในกรณีที่ การกวนผสมโพลิเมอร์ไม่ทั่วถึง ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่เหลือ มีโอกาสกลับมาเกาะที่ อนุภาคที่เกาะอยู่เดิมแล้วมากกว่าจะไปเกาะกับอนุภาคอื่น หรือ อาจเป็นเพราะคุณสมบัติเดิม หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโมเลกุลโพลิเมอร์เอง ที่ทำให้หมู่ฟังก์ชันเกิดรวมเป็นกลุ่มไม่กระจายตัวออก เพื่อเกาะจับอนุภาค

รูปปฏิกิริยาที่ 4 แสดงถึงการใช้โพลิเมอร์มากเกินไป ทำให้ไม่มีที่ว่างบนผิวอนุภาคที่จะไปเกาะจับกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลโพลิเมอร์อื่น อนุภาคที่ได้ก็ยังคงมีเสถียรภาพต่อไป รูปปฏิกิริยาที่ 5 แสดงถึงกรณีที่มีการกวนผสมที่รุนแรง หรือยาวนานมากไป จนทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นแล้ว แตกออก และอาจทำให้เกิดการเกาะติดบน อนุภาคเดิม ฟลอคที่ได้จะมีเสถียรภาพกลับคืนมาอีก ดังรูปปฏิกิริยาที่ 6



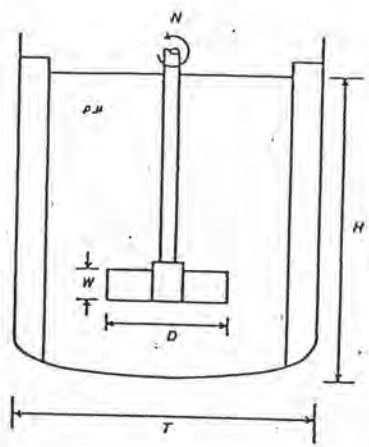
รูปที่ 3.14 กลไกการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลิเมอร์ (มันลีน, 2526)

การสมานตะกอนโดยใช้ไบกวน

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การสมานตะกอน เป็นการเกาะรวมตัวของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว ซึ่งสามารถเกิดได้จากการทำให้อนุภาคเหล่านั้น เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน คือเกิดความเร็วเกรเดียนท์ ,G ค่า G มีค่าแปรผันโดยตรงกับ รากที่สองของกำลังงานรวมที่ไบกวนกระทำต่อของเหลว และ กำลังงานรวมนี้ ประกอบด้วย กำลังงานย่อยที่ทำให้ไบกวนแต่ละส่วนสามารถเคลื่อนไหวได้ เพื่อกระจายพลังงานให้กับส่วนต่าง ๆ ของของเหลว ถึง 2 ถึงที่มีการกววนที่ให้ค่า G เท่ากัน อาจมีลักษณะไบกวนแตกต่างกัน และมีรูปแบบการกระจายพลังงานต่างกันได้ ดังนั้นค่า G ที่เหมาะสมสำหรับระบบหนึ่ง ๆ จะเป็นพารามิเตอร์ควบคุมเฉพาะระบบหนึ่ง ๆ เท่านั้น แม้แต่การนำผลจากระบบจำลองไปใช้ในระบบจริง ถ้าต้องการให้ได้ผลเหมือนกัน ก็อาจต้องเปลี่ยนแปลงค่า G ให้เหมาะสม (Oldhsue and Mady ,1978)

สำหรับของเหลวประเภทหนึ่ง กำลังงานที่ต้องการสำหรับการกวนผสมขึ้นอยู่กับขนาด และรูปร่างของไบกวนรวมถึงตัวถังซึ่งเป็นตัวแปรอิสระหลายตัวดังแสดงในรูปที่ (3.15) (Hornby ,Edwards and Nienow ,1989)

$$P = \text{func} [\rho , \mu , N , g , D , T , W , H , \dots] \dots \dots \dots (3.9)$$



รูปที่ 3.15 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกำลังงานในการกวนผสม (Hornby, Edwards and Nienow, 1989)

เนื่องจากตัวแปรมีมาก และมีลักษณะซับซ้อนมาก จึงไม่สามารถหาฟังก์ชันตามสมการข้างต้นได้ อย่างไรก็ตามโดยวิธี dimensional analysis จะสามารถสร้างตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้

$$P / (\rho * N^3 * D^5) = \text{func} [(\rho * N * D^2) / \mu, (N^2 * D) / g, T/D, W/D, \dots] \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

โดยกำหนดให้

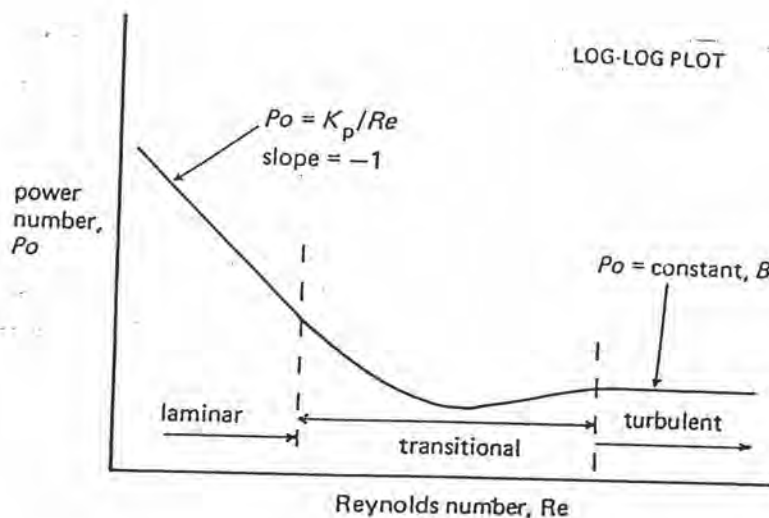
$$P / (\rho * N^3 * D^5) = P_o = \text{Power number} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

$$(\rho * N * D^2) / \mu = Re = \text{Reynolds number} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

$$(N^2 * D) / g = Fr = \text{Froude number} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

เทอม Fr จะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่เกิด vortex เมื่อค่า Re น้อยกว่า 300 ค่า Fr จะมีผลน้อยจนตัดทิ้งได้ สำหรับกรณี Re มีค่ามาก การลดอิทธิพลของ Fr ทำได้โดยใช้ติดตั้งแผ่นประทะ (baffle) หรือติดตั้งใบกวนเยื้องศูนย์กลาง

เส้นกราฟความสัมพันธ์ ระหว่าง P_o กับ Re เรียกว่า power curve ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง (รูปที่ 3.16) คือ



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Power number กับ Reynolds number (Harnby, Edwards and Nienow, 1989)

1. ช่วง Re มีค่าต่ำ (laminar range) จะพบว่ากระแสได้รับอิทธิพลจาก แรงจากความหนืด (viscous force) เป็นหลัก ค่าความชันของ power curve (กราฟ log-log) เท่ากับ -1 ซึ่งแทนได้ด้วยสมการ

$$P_o = K_D / Re \quad \dots\dots\dots(3.14)$$

โดยที่ $K_D =$ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับ รูปร่าง ขนาดของระบบ

จากสมการ (3.12) และ (3.14) แทนค่าลงในสมการ (3.11) จะได้

$$P = K_D * \mu * N^2 * D^3 \quad \dots\dots\dots(3.15)$$

2. ช่วง Re มีค่าปานกลาง (transition range) จะพบว่า P_o จะมีค่าตามสมการที่ (3.11) ซึ่งหาได้จากการทดลอง

3. ช่วง Re มีค่าสูง (turbulent range) จะพบว่า P_o มีค่าคงที่ นั่นคือ

$$P_o = K_D \quad \dots\dots\dots(3.16)$$

จากสมการ (3.16) แทนค่าลงในสมการ (3.11) จะได้

$$P = K_D * \rho * N^3 * D^5 \quad \dots\dots\dots(3.17)$$

แรง (drag force) , F_D ที่กระทำต่อใบกวนแต่ละใบหาได้จากสมการ (Barnes and Wilson ,1983)

$$F_D = C_D / 2 * \rho * v^2 * A \quad \dots\dots\dots(3.18)$$

โดยที่

$C_D =$ drag coefficient (ขึ้นอยู่กับรูปร่างใบกวน)

$\rho =$ ความหนาแน่นน้ำ หรือของเหลวที่กวน

$v =$ ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบกวน กับน้ำ

$A =$ พื้นที่ใบกวน

ดังนั้น ค่ากำลังงานที่ใบกวนแต่ละใบให้แก่ น้ำ จะเป็นตามสมการ

$$P = C_D / 2 * \rho * v^3 * A \quad \dots\dots\dots(3.19)$$

ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบกวนกับน้ำ จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วใบกวน
ดังสมการ

$$v = (1-k_2) * v_0 \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

$$= (1-k_2) * (2 * \pi * r * N) \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

โดยที่

k_2 = อัตราส่วนระหว่างความเร็วกระแส น้ำ ต่อ
ความเร็วใบกวน

v_0 = ความเร็วใบกวน

r = ระยะทางระหว่างแกนหมุน กับจุดบนใบกวนที่พิจารณา

N = ความเร็วรอบใบกวน

เมื่อพิจารณากำลังงานย่อยที่ใบกวนกว้าง w ยาว dr และห่างจากแกน
หมุน r โดยการแทนค่า v จากสมการ (3.21) ลงในสมการ (3.19) จะได้ว่า

$$dP = n/2 * C_D * \rho * w * (1-k)^3 * dr * (2 * \pi * r * N)^3 \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

กำลังงานสำหรับใบกวนแบบ paddle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $= D$ และ
มีแกนหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D_0 โดยอินทิเกรตสมการ (3.22) จากช่วง
 $r=D_0$ ถึง $r=D$ จะได้ว่า

$$P = n/8 * C_D * \rho * w * (1-k)^3 * (2 * \pi * N)^3 * (D^4 - D_0^4) \quad \dots\dots\dots (3.23)$$

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนหมุน D_0 มีขนาดเล็กกว่า เส้นผ่านศูนย์กลาง
ใบกวน D มาก จึงสามารถประมาณค่ากำลังงานตามสมการ (3.23) ได้ดังนี้

$$P = n/8 * C_D * \rho * w * (1-k)^3 * (2 * \pi * N)^3 * D^4 \quad \dots\dots\dots (3.24)$$

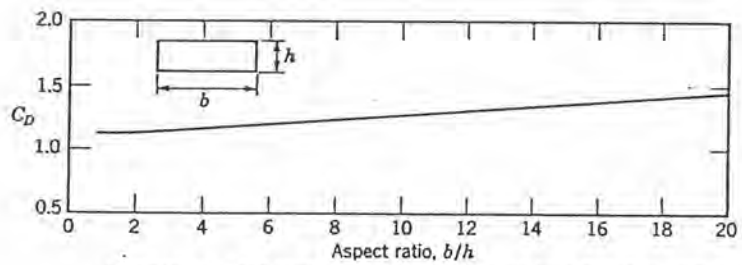
จัดรูปสมการ (3.24) ใหม่จะได้

$$P = \left(\frac{n}{8} * C_D * (1-k)^3 * (2*\pi)^2 * w/D \right) * \rho * N^3 * D^5 \dots\dots\dots (3.25)$$

จากสมการ (3.17) และสมการ (3.25) จะได้ว่า

$$K_D = \left(\frac{n}{8} * C_D * (1-k)^3 * (2*\pi)^2 * w/D \right) \dots\dots\dots (3.26)$$

ค่า C_D สำหรับใบกวนแบบ paddle ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง ความยาวของใบกวน กับความกว้างใบกวน ดังรูปที่ 3.17 (Fox and McDonald ,1985)



Variation of drag coefficient with aspect ratio for a flat plate of finite width normal to the flow with $Re_n > 1000$.

รูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างใบกวน กับ drag coefficient (Fox and McDonald, 1985)

ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติของฟลอค

Vold (1963) ได้เสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ของโครงสร้างฟลอค ซึ่ง Sutherland (1966) พบว่าแบบจำลองของ Vold ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง โดยเฉพาะเมื่อฟลอคประกอบด้วย อนุภาคมากกว่า 500 หน่วย พบว่าความหนาแน่นของฟลอคไม่ลดลง (Francois and Van Haute, 1985)

Vadas et al (1973) พบว่า การเพิ่มความปั่นป่วนของการกวนผสม (mixing intensity) จะทำให้ได้ฟลอคมีรูปร่างเป็นทรงกลมมากขึ้น ซึ่ง Francois และ Van Haute (1985) เสนอว่า ฟลอคที่มีรูปร่างขรุขระ (tortuous) จะเกาะกันดีกว่าฟลอครูปร่างเป็นเส้น หรือทรงกลม ฟลอคมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนอนุภาคแข็ง และ ส่วนช่องว่าง ซึ่งมีน้ำแทรกอยู่

ลักษณะของฟลอคสามารถแสดงได้ด้วยพารามิเตอร์สำคัญ 2 ประการ คือ ความหนาแน่น (density) และ ความแข็งแรง (strength) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของฟลอค สำหรับระบบหนึ่ง ๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อความหนาแน่นฟลอค ได้แก่

1. ความเร็วเกรเดียนท์ และขนาดของฟลอค การเพิ่มค่าความเร็วเกรเดียนท์ จะทำให้ได้ฟลอคขนาดเล็กลง แต่จะมีความหนาแน่นมากขึ้น (Lin, 1982) ฟลอคที่พบในระบบประปาหนึ่ง ๆ มีได้หลายขนาด ฟลอคที่มีขนาดใหญ่มักจะมี ความหนาแน่นน้อยกว่าฟลอคขนาดเล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้จากโมเดลของการเกิดฟลอคที่ว่า เมื่ออนุภาคมาเกาะรวมตัวกันเป็นฟลอคมากขึ้น ๆ สัดส่วนของปริมาตรช่องว่างระหว่างการเกาะกันของอนุภาค เทียบกับ ปริมาตรรวมจะมากขึ้นตามลำดับ

2. ความเข้มข้นของสารส้ม หรือ สัดส่วนระหว่าง ความเข้มข้นของสารส้ม กับ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น (ALT-ratio) Tambo และ Watanabe (1979) พบว่าความหนาแน่นฟลอคจะลดลงเมื่อ ALT-ratio เพิ่มขึ้น ถ้าความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่นมีค่าคงที่ จะได้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารส้มจะทำให้ความหนาแน่นของฟลอคลดลง

3. ลักษณะผิวสัมผัส ระหว่าง อนุภาคที่มารวมตัวกันเป็นฟลอค ซึ่งมีผลต่อ ประสิทธิภาพในการชนกันของอนุภาค Gregory (1993) มีความเห็นว่า ถ้าประสิทธิภาพของการชนกันของอนุภาค (collision efficiency) สูง คือ

เกือบทุกอนุภาคที่ชนกันจะเกาะกันแล้ว ฟลอคที่ได้จะมีโครงสร้างลักษณะเปิด คือ มีความหนาแน่นต่ำกว่า การเกิดฟลอคจาก อนุภาคที่มีแรงผลักระหว่างกันเล็กน้อย (ประสิทธิภาพการชนไม่สูงมากนัก) ทำให้การเกาะกันเป็นในลักษณะที่อนุภาคขนาดเล็กกว่า แทรกในช่องว่างของอนุภาคที่ใหญ่กว่า ดังนั้นการใช้โพลิเมอร์เป็นสารเคมีช่วยในการรวมตะกอน ซึ่งทำให้การเกาะกันของอนุภาคเกิดเร็ว และ แข็งแรง นั้น ไม่ได้มีผลโดยตรงที่ทำให้ฟลอคมีหนาแน่นเพิ่มขึ้น

ความแข็งแรงของฟลอค (floc strength) เป็นความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนโดยที่ฟลอคไม่แตกออก ขนาดหน่วยแรงเฉือน (shear strength) สูงสุดที่ฟลอคทนได้โดยไม่แตกออกนั้น ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่จากการศึกษาความเป็นไปในกระบวนการสมานตะกอน จะพบว่า อนุภาคจะมีการรวมตัวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงขีดจำกัดหนึ่งของขนาด คือ ในสภาพที่ แรงเกาะจับระหว่างอนุภาค เท่ากับ แรงที่จะทำให้เกิดการแตกของฟลอค ดังนั้น ขนาดที่ใหญ่ที่สุดของฟลอค จึงเป็นตัวชี้ความแข็งแรงของฟลอค ในระบบนั้น ๆ การใช้โพลิเมอร์อย่างเหมาะสม จะทำให้ฟลอคแข็งแรงขึ้น ตามที่กล่าวมาแล้ว Tambo และ Hozumi (1979) พบว่า ขนาดใหญ่ที่สุดของฟลอค ได้รับอิทธิพลจาก pH และ ALT-ratio กล่าวคือ ขนาดใหญ่ที่สุดของฟลอคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่ม pH ในช่วง 7.1-8.0 ที่ความเร็วเกรเดียนต์คงที่ค่าหนึ่ง ที่ pH ช่วง 7 ถึง 8 นี้ พบว่า ค่า ALT-ratio ไม่มีผลต่อขนาดฟลอค แต่ที่ pH เท่ากับ 6.5 พบว่า การลดค่า ALT-ratio มีผลทำให้ขนาดใหญ่ที่สุดของฟลอค มีขนาดใหญ่มากขึ้น

ทฤษฎีของการตกตะกอน

ลักษณะการตกตะกอนขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น และคุณสมบัติของอนุภาค ตัวอย่างเช่น น้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยต่ำอาจตกตะกอนเป็นแบบโดด หรือรวมกลุ่มก็ได้ ทั้งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาค ถ้าอนุภาคแขวนลอยไม่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่ม การตกตะกอนจะเป็นแบบโดด เช่น การตกตะกอนของเม็ดกรวด ถ้าอนุภาคแขวนลอยสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่ม หรือเป็นก้อน การตกตะกอนจะเป็นแบบรวมกลุ่ม ตัวอย่างเช่น การตกตะกอนของอนุภาคจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation)

ในกรณีที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่มาก การตกตะกอนของแต่ละอนุภาคจะถูกขัดขวางโดยอนุภาคอื่น ๆ ทำให้ไม่สามารถตกตะกอนได้อย่างอิสระ อนุภาคจึงตกตะกอนด้วยความเร็ว ช้ากว่าความสามารถที่แท้จริงของมัน ลักษณะการตกตะกอนเช่นนี้ เรียกว่า การตกตะกอนแบบมีอุปสรรค (hindered settling)

ถ้าให้ V_s เป็นอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบโดดซึ่งคำนวณได้จากสูตรของ Stoke และให้ V_h เป็นอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบมีอุปสรรค เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s กับ V_h ดังนี้

$$V_h = f(\phi) * V_s \dots \dots \dots (3.27)$$

โดยที่ $f(\phi)$ เป็นอุปสรรคในการตกตะกอน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอนุภาค ϕ เมื่อความเข้มข้นต่ำ การตกตะกอนจะเป็นแบบโดด นั่นคือ $f(\phi)$ เท่ากับ 1 แต่เมื่อความเข้มข้นสูงมากพอ $f(\phi)$ จะน้อยกว่า 1 ทำให้ V_h น้อยกว่า V_s

Bond ได้พัฒนาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_h กับ V_s โดยพิจารณาอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) จำนวน (n^3) อนุภาค ที่แขวนลอยอยู่ในช่องเหลวปริมาตร l^3 ดังนั้นปริมาตรรวมของอนุภาค, V และ ค่าความเข้มข้นโดยปริมาตรของอนุภาค ϕ จึงเป็นไปตามสูตรดังนี้ (Barnes and Wilson, 1983)

$$V = f_1 * n^3 * d^3 \dots \dots \dots (3.28)$$

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \text{ค่าคงที่เกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาค} \\
 \phi &= \text{ปริมาตรของอนุภาค / ปริมาตรของเหลว} \\
 \phi &= f_1 * n^3 * d^3 / l^3 \dots\dots\dots (3.29)
 \end{aligned}$$

จัดรูปสมการ (3.29) ใหม่จะได้ว่า

$$n^3 * d^3 / l^3 = (\phi / f_1)^{2/3} \dots\dots\dots (3.30)$$

ถ้าพิจารณาพื้นที่ตามแนวราบ ขนาด l^2 ขึ้นอนุภาคหนาเพียง 1 อนุภาค จะมีพื้นที่หน้าตัดของการไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค, A ดังนี้

$$\begin{aligned}
 A &= l^2 - f_2 * n^2 * d^2 \dots\dots\dots (3.31) \\
 f_2 * n^2 * d^2 &= \text{พื้นที่ของอนุภาคที่ขวางการไหล} \\
 f_2 &= \text{ค่าคงที่เกี่ยวกับรูปร่างของอนุภาค}
 \end{aligned}$$

โดยทั่วไป การตกตะกอนเป็นการเคลื่อนที่ ของกลุ่มอนุภาคผ่านน้ำที่อยู่นิ่ง แต่ถ้า ผู้สังเกตเคลื่อนที่ไปพร้อมกับกลุ่มอนุภาค ก็จะเห็นว่า เป็นการเคลื่อนที่ของน้ำ ผ่านกลุ่มอนุภาคที่อยู่นิ่ง โดยหลักการนี้ ถ้าพิจารณาการไหลของน้ำผ่านชั้นตะกอนในถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน อาจตั้งสมมติฐานได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \text{ความเร็วการไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคภายในชั้นตะกอน} &= V_u \\
 \text{ความเร็วการไหลขึ้นเหนือชั้นตะกอน (upflow velocity)} &= V_h
 \end{aligned}$$

จากกฎของความต่อเนื่องจะได้ว่า

$$\text{อัตราการไหลของน้ำภายในชั้นตะกอน} = \text{อัตราการไหลของน้ำเหนือชั้นตะกอน}$$

$$V_u * (l^2 - f_2 * n^2 * d^2) = V_h * l^2 \dots\dots\dots (3.32)$$

$$V_u * (1 - f_2 * n^2 * d^2 / l^2) = V_h \dots\dots\dots (3.33)$$

แทนค่า $n^2 \cdot d^2 / l^2$ จากสมการ(3.30) ลงในสมการ(3.33) จะได้

$$V_h = V_u \cdot (1 - f_2 \cdot (\phi / f_1')^{2/3})$$

หรือ

$$V_h = V_u \cdot (1 - f' \cdot \phi^{2/3}) \dots \dots \dots (3.34)$$

โดยที่

$$f' = f_2 / f_1'^{2/3}$$

สมการที่ (3.34) นี้ ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า น้ำจะต้องไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค ที่ประกอบกันเป็นกลุ่มฟลอคทั้งหมด ซึ่งจะเป็นจริงได้ในกรณีที่กลุ่มฟลอคมีความพรุน (porosity) มากพอ หรือไม่หนาแน่นมากเกินไป ในความเป็นจริง อาจมีบางส่วนของช่องว่างในฟลอคที่ไม่มีน้ำไหลผ่านก็เป็นไปได้ ดังนั้นสมการนี้ จึงใช้ไม่ได้ในกรณีที่ กลุ่มฟลอคมีความหนาแน่นมาก

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ การออกแบบ และควบคุมการทำงานของถังตกตะกอนนั้นจะอาศัยข้อมูลจากการทดลอง เช่น การนำตะกอน หรือ กลุ่มฟลอคมาตกตะกอนในกระบอกตวง และ วัดความเร็วช่วงเริ่มต้น (initial settling velocity) ของการตกตะกอนแบบมีอุปสรรค จะพบว่า ความเร็วในการตกตะกอนช่วงแรก, V_1 จะมีความสัมพันธ์ กับ ความเร็วตกตะกอนของอนุภาคฟลอคโดด (Karlinske, 1948) ดังสมการ

$$V_1 = V_u - k \cdot \phi \dots \dots \dots (3.35)$$

โดยที่

$$k = \text{ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของฟลอค}$$

ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอน, ϕ ในระบบหนึ่ง ๆ มีความสัมพันธ์กับ ค่าความหนาแน่น ในหน่วยน้ำหนักต่อปริมาตร, C ได้ตามสมการ

$$\phi = f \cdot C^p \dots \dots \dots (3.36)$$

โดยที่

$$f = \text{ค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค}$$

ถ้า p มีค่าประมาณเท่ากับ 1 จะได้ว่า solid loading ของถังตกตะกอน, q มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} q &= V_s * C \\ q &= (\phi/f) * (V_s - k*\phi) \dots\dots\dots (3.37) \end{aligned}$$

จากสมการที่ (3.37) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มค่า ϕ จะทำให้ q เพิ่มขึ้นได้ นั่นคือ ถังตกตะกอนจะสามารถรองรับมวลจากกระแสเข้าได้มากขึ้น แต่ถ้าเพิ่ม ϕ มากเกินไป จะทำให้เทอม $k*\phi$ มากขึ้น คือ q ลดลง นั่นคือ ถังตกตะกอนจะรับมวลจากกระแสเข้าได้ต่ำลง ดังนั้น จะต้องมีการเดินระบบที่ค่า ϕ ที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ระบบ สามารถรับมวลจากกระแสเข้าได้สูงสุด จากสมการที่ (3.37) สามารถคำนวณหาค่า ϕ ที่จะทำให้ q สูงสุดได้ดังนี้

$$\begin{aligned} dq / d\phi &= V_s/f - 2*k*\phi/f = 0 \\ \phi &= V_s / (2*k) \dots\dots\dots (3.38) \end{aligned}$$

แทนค่า ϕ ในสมการ (3.38) ในสมการ (3.37) จะได้ค่า q สูงสุด

$$q_{max} = (V_s)^2 / (4*k*f) \dots\dots\dots (3.39)$$

ลักษณะของถังตกตะกอนที่ใช้ในการทดลองนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ซึ่งเล็กกว่าถังตกตะกอนที่ใช้จริงมากพอสมควร สัดส่วนระหว่างขนาดอนุภาคกับเส้นผ่านศูนย์กลางถึงที่แตกต่างกันอาจมีผลทำให้ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในระบบจำลอง ต่างจากระบบจริง Denn (1980) ได้กล่าวถึงอิทธิพลของผนัง (wall effect) ที่มีต่อการตกตะกอนของอนุภาคขนาด D_p ในถังทรงกระบอกขนาด D_c จาก dimensional analysis จะพบว่า drag coefficient, C_D ของอนุภาคที่ตกตะกอนโดยได้รับอิทธิพลจากผนัง จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง D_p กับ D_c ดังสมการ

$$C_D' = C_D (R_o, D_p/D_c) \dots\dots\dots (3.40)$$

โดยที่ C_D = Drag coefficient ของอนุภาคในถังขนาด D_c
 C_D = Drag coefficient ของอนุภาคเมื่อไม่มีอิทธิพล
 ของผนัง

กรณีที่การตกตะกอนเป็นลักษณะอนุภาคโตด ตาม Stokes' law จะได้ว่า

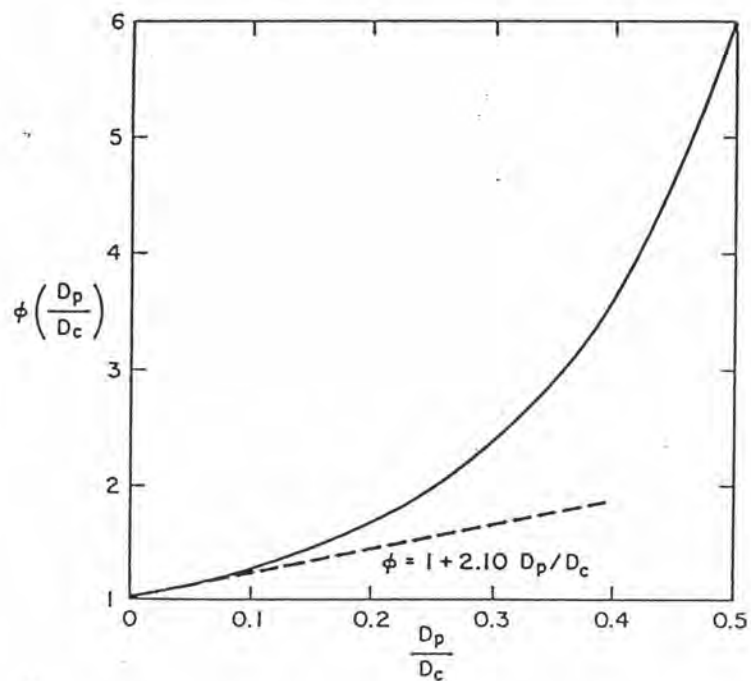
$$C_D = 24/R_e * \phi(D_p/D_c) \dots\dots\dots (3.41)$$

$\phi(D_p/D_c)$ คือ ฟังก์ชันที่เพิ่มค่า C_D มีค่าดังแสดงในรูปที่ 3.18 ถ้า
 ปลอดในระบบทดลองมีขนาด 5 มม. จะได้ค่า D_p/D_c เท่ากับ 0.033 ซึ่งจากรูป
 ที่ 3.18 จะได้ $\phi(D_p/D_c)$ มีค่าเท่ากับ 1.07 หรือค่า C_D จะเพิ่มขึ้น 1.07 เท่า
 ความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคโตด, v_D เป็นดังสมการ

$$v_D = [4/3 * g * d * (\rho_p - \rho) / \rho / C_D]^{1/2} \dots (3.42)$$

โดยที่ d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
 ρ_p = ความหนาแน่นอนุภาค
 ρ = ความหนาแน่นน้ำ

จากสมการที่ (3.42) จะเห็นได้ว่า การผลการเพิ่มค่า C_D อีก 1.07
 เท่า จะทำให้ค่า v_D ลดลงประมาณ 1.03 เท่า ซึ่งน้อยมาก ดังนั้นใน
 กรณีของการทดลองนี้ ผลของ wall effect ถือว่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่า Drag coefficient กับ ค่าอัตราส่วนขนาดอนุภาคต่อขนาดภาชนะที่ตกตะกอนแบบโตน (Denn, 1980)

ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบด

การลอยตัวของอนุภาคตะกอน เนื่องจากแรงพยุงของน้ำบริเวณ clarification zone ภายใน ถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน มีลักษณะเป็น fluidized bed การรักษาสภาวะ fluidized ให้อยู่ในสภาพคงที่ได้จะต้องทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลขึ้น สูงเพียงพอที่จะสมดุลกับ ความเร็วการตกตะกอนของกลุ่มอนุภาค ทฤษฎีฟลูอิดไดซ์เบดจากการทดลองของ Ergun (สมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ , 2528 ;Denn, 1980) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า packed bed friction factor , F_{D} กับ Reynolds number, R_{D} ในการไหลของ ของเหลวผ่านชั้นอนุภาคโดยให้

$$F_{\text{D}} = D_{\text{D}} * e^3 * |\Delta P| / (\rho * V^2 * (1-e) * L) \dots\dots (3.43)$$

$$R_{\text{D}} = D_{\text{D}} * V * \rho / (\mu * (1-e)) \dots\dots\dots (3.44)$$

- D_{D} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
 e = ความพรุนของชั้นอนุภาค = ปริมาตรช่องว่าง/ปริมาตรทั้งหมด
 ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
 V = ความเร็วการไหลก่อนผ่านเข้าชั้นอนุภาค
 μ = ความหนืดจลน์
 $|\Delta P|$ = ความแตกต่างของแรงดันของของเหลวก่อนและหลังผ่านชั้นอนุภาค
 L = ความหนาของชั้นอนุภาค

ผลการทดลองของ Ergun ได้สมการดังนี้

$$F_{\text{D}} = 150 / R_{\text{D}} + 1.75 \dots\dots\dots (3.45)$$

ในกรณีที่ R_{D} มีค่าน้อย ($R_{\text{D}} < 10$) ค่า F_{D} จากสมการที่ (3.45) จะประมาณค่าได้จาก

$$F_D = 150 / R_{DP} \dots\dots\dots (3.46)$$

จากสมการที่ (3.43) จัดรูปใหม่จะได้

$$|\Delta P| / L = F_D * \mu * V^2 * (1-e) / (D_p * e^3) \dots\dots\dots (3.47)$$

แทนค่า F_D จากสมการที่ (3.46) และ R_{DP} จากสมการที่ (3.44) ลงในสมการที่ (3.47) จะได้

$$|\Delta P| / L = 150 * V * \mu * (1-e)^2 / (D_p^2 * e^3) \dots\dots (3.48)$$

การที่อนุภาคสามารถลอยตัวอยู่ได้ ในสภาพ fluidized bed เนื่องจากสมดุลระหว่างแรงพยุงจากของไหล กับแรงจากน้ำหนักของชั้นอนุภาค นั่นคือ

$$\text{แรงดันตกในชั้นอนุภาค} = \text{น้ำหนักชั้นอนุภาคในช่องไหล}$$

โดยที่

$$|\Delta P| * A = A * L * (1-e) * (\rho_p - \rho) * g \dots\dots\dots (3.49)$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดรวมของการไหล}$$

$$\rho_p = \text{ความหนาแน่นของอนุภาค}$$

จากสมการที่ (3.49) จัดรูปใหม่จะได้

$$|\Delta P| / L = (1-e) * (\rho_p - \rho) * g \dots\dots\dots (3.50)$$

สมการ จากสมการที่ (3.48) และ (3.50) ถ้าจัดค่า $\Delta P / L$ ออก จะได้

$$V = (\rho_p - \rho) * g * D_p^2 * e^3 / (150 * \mu * (1-e)) \dots\dots (3.51)$$

โดยที่ $V = V_f =$ ความเร็วเริ่มต้นที่เริ่มเกิดสภาพ fluidized bed

ถ้าความเร็วน้ำไหลขึ้นไปยังชั้นตะกอนต่ำกว่า v_f จะไม่เกิดสภาพ fluidized bed การเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้น จะทำให้ความดันลด, ΔP เพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นเท่ากับ v_f ซึ่งเป็นความเร็วที่เพียงพอ ที่จะพยุง ชั้นอนุภาคให้เกิดสภาพ fluidized bed อนุภาคจะมีสภาพเหมือนไม่มีน้ำหนัก สามารถลอยตัวอยู่ได้ ถ้าเพิ่มความเร็วน้ำไหลขึ้นไปอีก ความดันลด, ΔP จะไม่เพิ่มขึ้น เนื่องจากไม่มีน้ำหนักส่วนที่เหลือของอนุภาคที่จะมาต้านแรงดันน้ำ ชัดจำกัดของความเร็วน้ำไหล ขึ้นอยู่กับ ค่าความเร็วตกตะกอนของอนุภาค, V_u ตามกฎของ Stoke

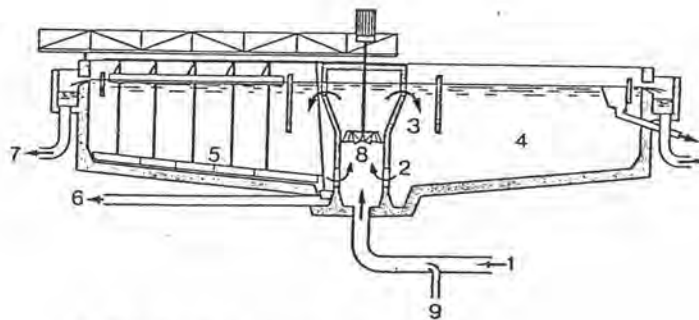
$$V_u = (\rho_p - \rho) * g * D_p^2 / (18 * \mu) \dots \dots \dots (3.52)$$

ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้นมากกว่า V_u อนุภาคจะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นไปกับน้ำและหลุดออกไปจากชั้นตะกอน การทำงานของถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนโดยทั่วไป จึงมีการควบคุมให้อัตราการไหลขึ้น ใน clarification zone อยู่ในช่วง V_u ถึง V_u จากการศึกษาของ Bond (Barnes and Wilson, 1983) ได้มีข้อเสนอแนะว่าอัตราการไหลขึ้นไม่ควรเกินกว่า 0.55 เท่าของความเร็วตกตะกอนของอนุภาค เพื่อให้ได้ชั้นตะกอนที่มีเสถียรภาพ

ลักษณะ และการทำงานของถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน

ถังกวนเร็ว ถังกวนช้า ถังตกตะกอน และถังกรองทราย เป็น อุปกรณ์ที่ใช้กันทั่วไปมานานแล้วในกระบวนการผลิตน้ำประปา ต่อมาได้มีการพัฒนา สร้างอุปกรณ์ที่สามารถรวมการทำงานของถังกวนเร็ว ถังกวนช้า และถังตกตะกอน ไว้ด้วยกันเรียกว่า ถังโซลิตคอนแทคแคลรีไฟเออร์ ในที่นี้จะกล่าวถึงถังประเภท นี้เฉพาะแบบหมุนเวียนตะกอน (รูปที่ 3.19) ซึ่งมีออกแบบให้ภายในถังถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสำหรับการผสม (mixing zone) และส่วนสำหรับแยกตะกอนออกจากน้ำใส (clarification zone) (Sanks, 1978 ; Dregremont, 1979)

ใน mixing zone จะมีการสร้างฟลอคจากน้ำดิบผสมกับสารเคมี โดยการกวนผสมด้วยใบกวน ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดการสमानตะกอนแล้ว ยังมีส่วน ช่วยในการดูดฟลอคจาก clarification zone ขึ้นมาผสมกับอนุภาคที่เข้ามาใหม่ ด้วย (Committee report, 1951 ; Sanks, 1978) ฟลอคที่หมุนเวียนกลับ มาผสมนี้ จะช่วยให้กลไกการสร้างฟลอคใหม่เกิดได้รวดเร็ว และ สมบูรณ์มากขึ้น ดังนั้น การสमानตะกอนในถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน จึงเกิดขึ้นด้วย 2 กลไก หลัก คือ เกิดจากความเร็วเกรเดียนต์โดยการกวนด้วยใบกวน และ เกิดจากการ จมตัวด้วยอัตราเร็วต่างกัน น้ำ และ ฟลอค ที่สร้างขึ้นจากส่วนนี้ จะไหลไปยัง clarification zone



Radial flow tank with sludge return to centre feed clarifier, reproduced by courtesy of Dégremont 1, Raw water inlet; 2, sludge recycling; 3, floc maturing; 4, clarification zone; 5, scrapers; 6, excess sludge; 7, treated water outlet; 8, mixing turbine for raw water and recycled sludge; 9, reagent feed.

รูปที่ 3.19

ถังทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน

(Barnes and Wilson ,1983)

ฟลอคที่ไหลไปยัง clarification zone มีหลายขนาด (Bratby, 1980) กลุ่มฟลอคที่มีขนาดใหญ่จึงมีความเร็วตกตะกอน มากกว่าอัตราน้ำล้นผิว จะตกตะกอนลงมาลอย อยู่ในตำแหน่งที่มีความเร็วไหลขึ้น เทียบกับอนุภาค เท่ากับ ความเร็วตกตะกอนแบบมีอุปสรรค (hindered settling velocity) และ สะสมตัวเกิดเป็นชั้นตะกอน (sludge blanket) ขึ้น กลุ่มฟลอคที่มีขนาดเล็กจะถูกแรงพยุงของน้ำทำให้เคลื่อนที่ไป และถูกดักกักไว้ภายในชั้นตะกอน ดังนั้น น้ำที่ผ่านชั้นตะกอนขึ้นไป จะมีแต่น้ำใสเท่านั้น ตะกอนที่สะสมมากขึ้นจะต้องมีการระบายออกจากถัง ในอัตราเดียวกับตะกอนที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อรักษาให้ระบบอยู่ในสภาวะคงที่

กระบวนการกำจัดความขุ่น โดยถึงทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอน ที่กล่าวมานี้ อาศัยกลไกต่างๆ หลายกลไก ดังที่ได้กล่าวในรายละเอียดมาแล้ว เริ่มด้วยการสร้างฟลอค จากอนุภาคความขุ่น และสารเคมี โดยอาศัยกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค และการสमानตะกอน จากนั้นจึงอาศัยกลไกการตกตะกอน และกลไกการตีกอนุภาค เพื่อแยกฟลอคออกจากน้ำใส กลไกต่างๆ เหล่านี้มีความสำคัญ และส่งผลต่อเนื่องซึ่งกัน และกัน

ถึงทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนมักจะหมุนเวียนตะกอนในทิศทางเดียวกับการตกตะกอนด้วยอัตราการไหลสูงกว่าอัตราน้ำล้นผิว ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนเสมือนถูกเร่งให้ตกตะกอน เร็วมากขึ้น ซึ่งมากกว่าการตกตะกอนแบบมีอุปสรรค ดังนั้น อัตราน้ำล้นผิวของระบบนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วการตกตะกอนของอนุภาคเดี่ยวมากกว่า ความเร็วการตกตะกอนของกลุ่มอนุภาค (Kalinske, 1948)

ถึงทำน้ำใสแบบหมุนเวียนตะกอนมี ข้อดีที่ประหยัดค่าก่อสร้าง และใช้พื้นที่น้อย แต่ก็มีข้อเสียเช่นเดียวกับถึงทำน้ำใสแบบสัมผัสตะกอนทั่วไปคือ มีความยืดหยุ่นต่ำ ไม่เหมาะกับการทำงานในสภาพที่มีการแปรผันอัตราการไหล หรือความขุ่นของน้ำดิบสูง ดังนั้นการออกแบบระบบถึงประเภทนี้ มักจะไม่สามารถออกแบบเพื่อให้มี ค่าความปลอดภัย (safety factor) ได้มากนัก เนื่องจากจะมีผลต่อการทำงาน ค่าความปลอดภัยของระบบจึงควรไปเผื่อไว้ที่หน่วยอื่น ๆ เช่น ให้มีถังเก็บน้ำใสที่จุมากขึ้น เมื่อระบบมีปัญหา และต้องใช้เวลา start up จะได้มีน้ำสำรองจ่ายให้ประชาชน (Committee Report, 1951)