

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน

ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอนประกอบด้วย ทฤษฎีของการกวนเร็ว (rapid mixing stage) และ ทฤษฎีของการสมานตะกอน (flocculation stage)

2.1.1 ทฤษฎีของการกวนเร็ว

ทฤษฎีพื้นฐานของการกวนเร็วคือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยสภาวะคงตัวและไม่คงตัวของ คอลลอยด์ (มันลิน ดัพลเวศม์, 2526) ซึ่งจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

2.1.1.1 ทฤษฎีสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

สภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค ประจุไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหน่วยแลทธิสของอนุภาค หรือเกิดจากไอออนในน้ำที่ถูกดูดติดที่ผิวของอนุภาค หรือเกิดจากกลุ่มที่สามารถแตกตัวเป็น ไอออนในน้ำที่ถูกดูดติดที่ผิวของอนุภาค โดยทั่วไปชนิดและขนาดของประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณ ไอออนและพีเอชของน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำธรรมชาติมักมีประจุไฟฟ้าลบ

โดยที่ประจุคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและน้ำจะมีประจุไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์จึงถูกควบคุมโดยประจุตรงข้ามภายในน้ำ เพื่อคงความเสถียรทางไฟฟ้าของระบบ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดทฤษฎีที่ว่าประจุไฟฟ้าสองชั้นล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งได้แก่ชั้นตรง และชั้นกระจาย ชั้นตรงประกอบด้วยประจุไฟฟ้าของ

อนุภาคคอลลอยด์กับประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำและแรงแวนเดอร์วาลส์ถัดจากชั้นตรง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเนื่องจากความร้อน ทำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามซึ่งถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิว ชั้นที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกระจายอยู่ในน้ำดังกล่าวนี้คือชั้นกระจาย ขนาดหรือลักษณะของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ตลอดจนปริมาณและชนิดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิวและมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิวเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่มาใกล้กันจะเกิดแรงผลักรวมและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง แรงผลักรวมดังกล่าวนี้จะต้านแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างอนุภาคลดน้อยลง ดังนั้นถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักรวมมากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสใกล้กันเพียงพออนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง

#### 2.1.1.2 ทฤษฎีสภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเปลี่ยนจากสภาวะคงตัวมาเป็นสภาวะไม่คงตัวที่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจำแนกออกได้เป็นสี่ประเภท ได้แก่ การอัดตัวของชั้นกระจาย การดูดติดผิวและการสะเทินประจุไฟฟ้า การดูดติดผิวและเชื่อมต่อบetweenอนุภาค และการหุ้มห่อในผลึก

การอัดตัวของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำมีปริมาณมากขึ้นประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ยังผลให้ปริมาตรหรือความหนาแน่นของชั้นกระจายมีค่ามากขึ้น ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จนแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักรวมระหว่างอนุภาค และเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด



การดูดติดผิวและการสะท้อนประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามนอกเหนือจากที่มีอยู่ในชั้นตรงและชั้นกระจายดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านี้จะสะท้อนประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตลอดจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงวนเคอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนลงได้จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

การดูดติดผิวและเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เกาะติดบนโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ซึ่งอาจมีผลมาจากประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันหรือเกิดจากแรงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันถือได้ว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่เกาะติดบนโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วและสามารถรวมกับอนุภาคอื่น ๆ ได้โดยมีสารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

การหุ้มห่อในผลึก เกิดขึ้นเมื่อเติมสารประกอบเกลือของโลหะลงไป ในน้ำมากเพียงพอที่จะมีการตกผลึกเกิดขึ้น อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรวมตัวเกิดเป็นผลึกใหญ่ขึ้นน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ง่าย

สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ประเภทใดประเภทหนึ่งหรือหลายประเภทรวมกัน ทั้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำ และชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นมาเป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

### 2.1.1.3 กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ที่เกิดขึ้นในการกวนเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ พีเอช ชนิดและปริมาณสารรวมตะกอนตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่นในกลไกการทำลายสภาวะคงตัวของคอล-

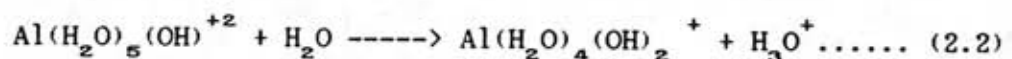
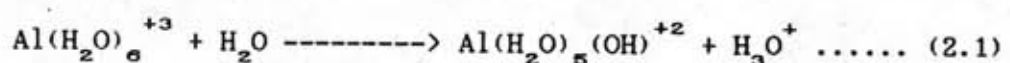
ลอยด์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาได้ว่าชนิดของสารรวมตะกอนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดประเภทของกลไกในชั้นกวนเร็ว

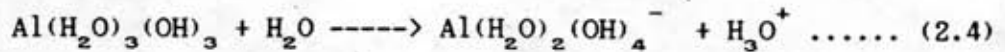
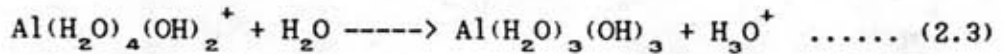
สารรวมตะกอนที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน จำแนกออกเป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ เกลือของโลหะได้แก่  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  หรือสารส้ม,  $AlCl_3$ ,  $NaAlO_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$  สารโพลีเมอร์ได้แก่ สารโพลีเมอร์ประจุบวก สารโพลีเมอร์ประจุลบ และสารโพลีเมอร์ไร้ประจุ ชนิดของสารรวมตะกอนดังกล่าว จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประเภทของกลไกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ สารรวมตะกอนที่เป็นเกลือของโลหะอาจทำให้เกิดกลไกแบบกวาดหรือกลไกแบบตุตตุตและสะเกิบนทางไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น ลักษณะทางเคมีของน้ำคือนีเอชและปริมาณไอออนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาผสม ในขณะที่สารรวมตะกอนเป็นสารโพลีเมอร์จะทำให้เกิดกลไกแบบตุตตุตและเชื่อมต้อ

โดยที่สารรวมตะกอนที่ใช้การวิจัยครั้งนี้คือสารส้ม ดังนั้นจะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยเกลือของสารส้ม ได้แก่กลไกแบบตุตตุตผิวและสะเกิบนทางไฟฟ้าและกลไกแบบกวาด

#### 2.1.1.3.1 เคมีของสารส้มในน้ำ

สารส้มเมื่ออยู่ในน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกตัวได้ ไอออนประจุบวกและลบ ไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบ  $Al(H_2O)_6^{+3}$  ซึ่งเรียกสารประกอบนี้ว่า Aquametal ion สารประกอบดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติเป็นกรดที่ไร้เสถียรภาพพร้อมที่จะให้ไอออนบวกของไฮโดรเจน ( $H^+$ ) แก่น้ำ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Monomeric hydroxo complex ดังสมการ

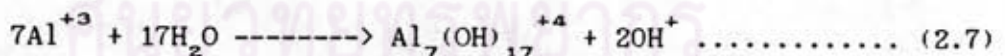
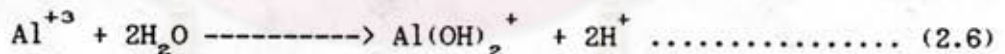
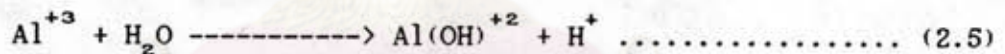




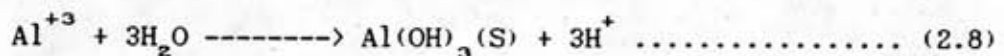
สารส้มสร้างกลไกของกระบวนการรวมตะกอนได้ 2 แบบคือ กลไกแบบดูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า (Adsorption/charge neutralization) และกลไกแบบกวาด (sweep coagulation)

#### 2.1.1.3.2 กลไกแบบดูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  หรือ  $\text{Al}^{+3}$  ไฮโดรไลซิสของ  $\text{Al}^{+3}$  จะเกิดขึ้นทันที โดย  $\text{OH}^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่าง อลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการตัวอย่างต่อไปนี้



ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ดังสมการ



ผลของปฏิกิริยาที่เกิดจากการดูดติดผิวของคอลลอยด์ คือสารเชิงซ้อนซึ่งเกิดขึ้นในระหว่าง ไฮโดรไลซิสจาก  $Al^{+3}$  ถึง  $Al(OH)_3$  กลไกแบบดูดติดผิว และสะท้อนทาง ไฟฟ้าเกิดจากสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก โดยเริ่มจากการดูดติดระหว่างสารดังกล่าว กับผิวของคอลลอยด์ด้วย โควาเลนต์บอนด์ จากนั้นประจุบวกของสารคอมเพล็กซ์จะสะท้อนประจุลบ ของคอลลอยด์ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงจนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่า และเกิดการ รวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ชั้นในที่สุด

ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอน นีเอช ความเข้มข้นของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำมีอิทธิพลต่อกลไกโดยตรงกล่าวคือปริมาณ สารรวมตะกอนและนีเอชกำหนดชนิดและปริมาณของสารเชิงซ้อน ในขณะที่ความเข้มข้นของคอลลอยด์ และระดับความปั่นป่วนของน้ำ กำหนดโอกาสที่สารเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ (Stum W. & O'melia C.R., 1968)

#### 2.1.1.3.3 กลไกแบบกวาด

เมื่อเติมสารส้มลงไปใต้น้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่า ความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว ไฮโดรไลซิสจะเริ่มจาก  $Al^{+3}$  จนได้  $Al(OH)_3$  ดังแสดงในสมการ (2.3) กลไกแบบกวาดจะเกิดขึ้นโดยผลึก  $Al(OH)_3$  จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็น แกนในการตกผลึกตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดย ลักษณะนี้คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากร่วมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในชั้นสมาน ตะกอนและถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดอย่างเด่นชัดคือ ปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ การตกผลึกจะเกิดขึ้นเร็วมาก ถ้าระดับเกินการอิ่มตัวนอกจากนี้อัตราการตกผลึกยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่ เป็นแกนในการตกผลึก

#### 2.1.1.4 พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็ว

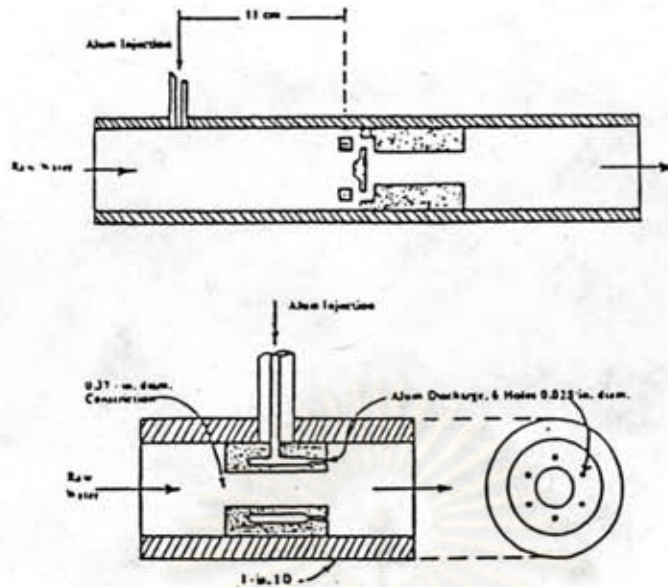
โดยที่ลักษณะการทำงานของชั้นผสมเร็วคือ สร้างความปั่นป่วนให้เกิดขึ้นในน้ำอย่างรุนแรงในขณะที่เติมสารรวมตะกอนเพื่อทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ดังนั้นระดับความปั่นป่วน (G) และเวลาผสม (T) ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำอยู่ภายใต้ความปั่นป่วนดังกล่าว จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือควบคุมการทำงานของชั้นกวนเร็ว Camp and Stein ได้ให้นิยามและเสนอสมการคำนวณค่า G ดังต่อไปนี้

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \dots\dots\dots (2.9)$$

- โดยที่ G = ความเร็วเกรเดียนท์  
 P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน  
 V = ปริมาตรของน้ำ  
 $\mu$  = ความหนืดพลศาสตร์ (dynamic viscosity)

ค่า G ที่เหมาะสมมีค่าไม่น้อยกว่า 300 วินาที<sup>-1</sup> และ T ไม่เกิน 1 นาที ในปัจจุบันการกวนเร็วไม่จำเป็นต้องใช้ถังกวนเร็วแบบเก่าเช่นแบบใบพัด ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ใหม่ ๆ หลายชนิดสามารถสร้างความปั่นป่วนให้น้ำได้ดีเช่นเดียวกับของเก่า เช่น การสร้างความปั่นป่วนของน้ำโดยฉีดสารรวมตะกอนในเส้นท่อ โดยสร้างความปั่นป่วนในท่อแบบต่าง ๆ (Vrale L. and R.M. Jordan., 1971) เช่นระบบ Orifice หรือ Venturi Tube (รูปที่ 2.1) ซึ่งเป็นรูปแบบการกวนเร็วที่เหมาะสมอีกวิธีหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 การกวนเร็วโดยสร้างความเป็นป่วนในท่อแบบ Orifice

### 2.1.2 ทฤษฎีของการเสมานตะกอน

การเสมานตะกอนคือ การที่อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้วตกลงจนอนุภาคตะกอนที่ประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์ และ โพลีเมอร์ของสารรวมตะกอนเกิดขึ้นและรวมตัวกันเป็นฟlocsที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดการเสมานตะกอนอาจจำแนกออกเป็นสามประเภท (O'melia C.R., 1992) ได้แก่การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion) การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

#### 2.1.2.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคขึ้น การเสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น



การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) อัตราการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติกขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิ และขึ้นอยู่กับจำนวนของอนุภาคการสมานตะกอนประเภทนี้จะมีอัตราสูงเมื่อมีอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน (O'melia C.R., 1972) และจะลดลงจนเหลือน้อยมากเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน (Kawamura S., 1976)

#### 2.1.2.2 การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่ในสภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดการชนและสมานกันขึ้นในระหว่างการจมตัว การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถัง ไชลิตคองแทคแบบสลัดจ์แบงเคท (sludge blanket clarifier) และในถังตกตะกอนในแนวตั้งทั่วไป

#### 2.1.2.3 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อเกิดสภาวะการกวนขึ้นในช่องเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับน้ำจะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วยทำให้เกิดการชนและการสมานตัวกันมากที่สุด การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic flocculation) เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดอนุภาคปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติกมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน

อนุภาคตะกอนในขั้นตอนการสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2,000 ไมครอน ดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนจึงได้แก่กลไกแบบออร์โธไคเนติก

จลพลศาสตร์ของการสमानตะกอนแบบออร์โธโคเนติกเริ่มจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาคที่เสนอโดย Camp and Stein (Hudson H.E., 1965) ซึ่งได้พัฒนาขึ้นเป็นสมการที่แสดงว่า อัตราการชนกันระหว่างอนุภาคขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของอนุภาคตลอดจนความเร็วเกรเดียนต์ตั้งสมการ

$$dn/dt = (G/6)(d_1+d_2)^3 n_1 n_2 \dots\dots\dots (2.9)$$

โดยที่

- $dn/dt$  = อัตราการชนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ  
 $G$  = ความเร็วเกรเดียนต์  
 $d_1$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคในน้ำ  
 $d_2$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตะกอน  
 $n_1$  = จำนวนอนุภาคในน้ำต่อหน่วยปริมาตรน้ำ  
 $n_2$  = จำนวนอนุภาคตะกอนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ

## 2.2 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการสमानตะกอน

### 2.2.1 ความเร็วเกรเดียนต์และเวลาผสม

พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบ และควบคุมการทำงานของชั้นสमानตะกอนคือความเร็วเกรเดียนต์ ( $G$ ) และเวลาผสม ( $T$ ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรอิสระของชั้นสमानตะกอน

พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วน  $G$  คำนวณได้จากสมการของ Camp and Stein ดังนี้

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \dots\dots\dots (2.10)$$

- โดยที่  $G$  = ความเร็วเกรเดียนท์  
 $P$  = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน  
 $\mu$  = ความหนืด (dynamic viscosity)  
 $v$  = ปริมาตรของน้ำทั้งหมดในถัง

Andreu-Villegas and Letterman (1974) ได้ศึกษาพบว่า การจะทำให้ฟล็อก-  
 คุเลชันเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เวลา รวมตะกอน หรือ เวลา สัมผัส ( $T$ ) ควรจะมีค่าประมาณ 20-30 นาที  
 การใช้ เวลา รวมตะกอน นานกว่านั้น ไม่เป็นการประหยัด ระดับที่เหมาะสมที่สุดของความปั่นป่วน หรือ  
 $G$  ขึ้นอยู่กับค่าของ  $T$  ตามสมการต่อไปนี้

$$(G^*)^{2.8} T = K \dots\dots\dots (2.11)$$

- โดยที่  $G^*$  = ระดับความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด (วท.<sup>-1</sup>)  
 $T$  = เวลา รวมตะกอน ซึ่งเท่ากับ เวลา กักน้ำ ของถัง กวนช้า (นาที)  
 $K$  = ค่าคงที่ ซึ่งขึ้นกับชนิดและปริมาณของ โคแอกกูแลนท์ ที่ใช้

ในกรณีที่ใช้สารส้มเป็น โคแอกกูแลนท์ ในปริมาณที่ไม่สูงกว่า 50 มก./ล. สมการ  
 (2.11) จะเป็นดังนี้

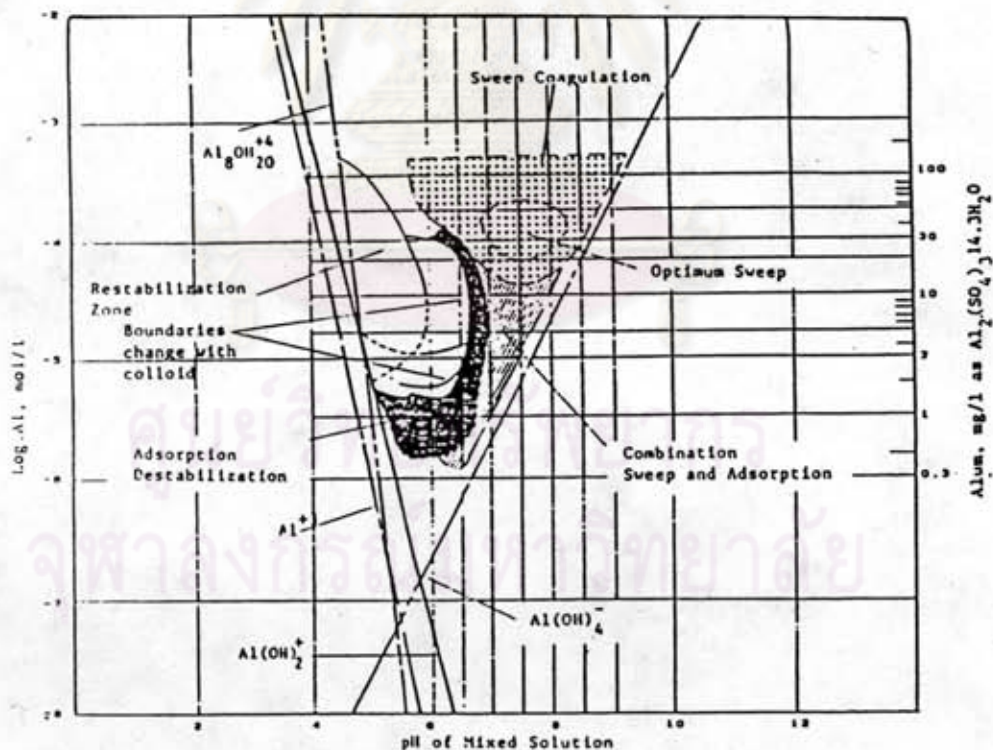
$$(G^*)^{2.8} T = 44 \cdot 10^5 / C \dots\dots\dots (2.12)$$

- โดยที่  $C$  = ความเข้มข้นของสารส้มอยู่ในช่วง 0-50 มก./ล.

$G^*$  หรือความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด หมายถึงค่า  $G$  ที่ทำให้เกิดฟล็อกคุเลชัน  
 แล้วมีความขุ่นเหลืออยู่น้อยที่สุด (หลังจากตกตะกอนแล้ว)  $G^*$  ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 วท.<sup>-1</sup>

### 2.2.2 พีเอชและปริมาณสารส้ม

พีเอชในที่นี้หมายถึง พีเอชสุดท้ายภายหลังจากการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก (O'melia C.R., 1972) เพราะมีผลกระทบท่อการเกิดของสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มในลักษณะต่าง ๆ กันเช่น  $Al^{+3}$ ,  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_3$ , และ  $Al(OH)_4^-$  เมื่อนำสารส้มมาละลายน้ำ สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มที่พีเอช 4-6 จะอยู่ในรูป  $Al(OH)^{+2}$  และ  $Al(OH)_2^+$  ประจวบเหมาะนี้มีประโยชน์มากต่อการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบตูดติดผิวและทำลายประจุในขณะที่มีผลของ  $Al(OH)_3$  ที่มีผลอย่างมากกับกลไกแบบกวาดจะเกิดได้ผลดีที่สุด (optimal) ที่พีเอช 6.8 ถึง 8.2 และใช้สารส้ม 20-50 มก./ล. และที่ค่าพีเอชสูงกว่า 9 สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มจะอยู่ในรูป  $Al(OH)_4^-$  ซึ่งมีประจุนิตเดียวกับประจุคอลลอยด์ (Amirtharajah A. and Mills K.M., 1982)



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

### 2.3 แนวคิดทั่วไปเกี่ยวกับการสมานตะกอน

Tambo N. and Watanabe Y. (1979) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของฟล็อกและสรุปได้ว่า

- 1) ความหนาแน่นของฟล็อกจะลดลงเมื่อฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น
- 2) ความหนาแน่นของฟล็อกจะแปรเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนระหว่างสารส้ม กับสารแขวนลอยเปลี่ยนไป
- 3) ความหนาแน่นของฟล็อกจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับคุณสมบัติของสารแขวนลอยในน้ำ

Camp T.R. and Stein R.C. (1943) ได้ทำการวิเคราะห์การสมานตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาพบว่า พารามิเตอร์ไร้มิติที่เกิดจากผลคูณระหว่าง G และ T (เวลาในการสมานตะกอน) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง  $2 \times 10^4$  ถึง  $2 \times 10^5$  และค่า G ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 70  $\text{วท.}^{-1}$

Andreu-Villegas and Letterman (1974) ได้ทดลองการสมานตะกอนโดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนและใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยคาโอลิไนท์ (kaolinite) ปรากฏว่าค่า G ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 50  $\text{วท.}^{-1}$  และค่า T ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 นาที โดยระบุว่าค่า T ที่มากไปกว่านั้นจะไม่เพิ่มสมรรถนะของการสมานตะกอนแต่อย่างใด

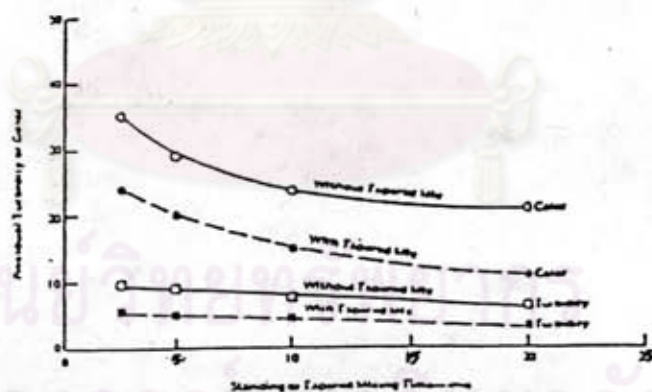
Kawamura S. (1976) ได้สรุปว่าพารามิเตอร์ G ในขั้นตอนการกวนเร็วควรจะอยู่ในช่วง 500 - 1000  $\text{วท.}^{-1}$  และในขั้นตอนการสมานตะกอน พารามิเตอร์ G จะอยู่ในช่วง 25 - 100  $\text{วท.}^{-1}$  พารามิเตอร์ไร้มิติ GT มีค่าอยู่ในช่วง  $10^4$  -  $10^5$  ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ได้รับการยอมรับจากผู้วิจัยหลาย ๆ ท่านและมีที่มาจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการและจากระบบบำบัดหลายแห่ง

พารามิเตอร์ G และ T มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของการสมานตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของฟล็อกกล่าวคือ ฟล็อกจะมีขนาด

จำกัดที่ค่า  $G$  หนึ่ง ๆ ขนาดของฟล็อกจะแปรตาม  $T$  ในขณะที่แปรกลับกับค่า  $G$  อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่า  $G$  สูง ๆ จะทำให้ขนาดตะกอนเล็กแต่ตะกอนที่ได้จะมีความหนาแน่นกว่าตะกอนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า  $G$  ที่ต่ำกว่า

#### 2.4 การศึกษาเกี่ยวกับการสมานตะกอนแบบเทเปอร์ที่ผ่านมา

Kawamura S. (1976) ได้ทำการทดลองการสมานตะกอนแบบเทเปอร์ โดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนการกวนเร็วใช้ค่า  $G$  เท่ากับ  $300 \text{ วัต.}^{-1}$  เป็นเวลา 10 วัต. ตามด้วยการสมานตะกอนในขั้นตอนแรกโดยใช้ค่า  $G$  เท่ากับ  $150 \text{ วัต.}^{-1}$  เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยการสมานตะกอนในขั้นตอนที่สองโดยใช้ค่า  $G$  เท่ากับ  $75 \text{ วัต.}^{-1}$  เป็นเวลา 10 นาที และการสมานตะกอนในขั้นตอนที่สามใช้ค่า  $G$  เท่ากับ  $30 \text{ วัต.}^{-1}$  เป็นเวลา 5 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3



Effect of Tapered Mixing on Alum Flocculation for Surface Water

A—turbidity— and color removal by flocculation: surface water turbidity, 85; color, 90; pH, 7.7; alkalinity 140; B—o and •, color; □ and X turbidity; 25 mg/l alum dosage for all cases

รูปที่ 2.3 แสดงผลของการสมานตะกอนแบบเทเปอร์โดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนกับน้ำในแหล่งน้ำแห่งหนึ่ง

Kawamura ได้สรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้

- 1) การสमानตะกอนแบบเทเปอร์สามารถผลิตน้ำ (หลังจากผ่านการตกตะกอนแล้ว) ที่มีคุณภาพดีกว่าการสमानตะกอนแบบทั่ว ๆ ไป เมื่อใช้ปริมาณสารส้มเท่า ๆ กัน
- 2) การสमानตะกอนแบบเทเปอร์สามารถประหยัดสารเคมีที่ใช้รวมตะกอนได้สูงถึง 30 - 40 เปอร์เซ็นต์ของการสमानตะกอนแบบทั่ว ๆ ไป

Ives K.J (1973) ได้ทำการทดลองการสमानตะกอนแบบเทเปอร์ และได้สรุปว่าการสमानตะกอนแบบเทเปอร์ โดยให้มีการลดระดับ G ไปตามความยาวของถังกวนช้า จะให้ผลดีกว่าการใช้ถังกวนช้าที่มีค่าความเร็วเกรเดียนท์คงที่

## 2.5 เครื่องสमानตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลาง

การที่จะให้ตะกอนที่มีขนาดและรูปร่างเท่า ๆ กันนั้น สิ่งสำคัญก็คือต้องให้น้ำไหลผ่านในเครื่องทำตะกอนที่ความเร็วสัมพันธ์ต่อหน่วยระยะทางเท่า ๆ กันตลอดพื้นที่หน้าตัด เครื่องสमानตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลางสามารถที่จะแก้ปัญหานี้ได้ หลักการของเครื่องสमानตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลาง โดยให้น้ำดิบผสมสารส้มแล้วไหลผ่านชั้นกรวดซึ่งถูกบรรจุในท่อสमानตะกอน เมื่อน้ำดิบที่ผสมสารส้มแล้วไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดกรวด ทำให้เกิดแรงเฉือนและเกิดความเร็วสัมพันธ์ต่อหน่วยระยะทางเกิดการสัมผัสกันของอนุภาค และรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

เครื่องสमानตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลางมุ่งนำไปใช้ประโยชน์ในระบบประปาขนาดเล็กในชนบทของประเทศกำลังพัฒนา โดยต้องการให้มีประสิทธิภาพพอสมควร สามารถกำจัดความขุ่นให้คงเหลือความขุ่นในกระแสออกอยู่ในเกณฑ์ที่กระบวนการกรองยอมรับได้

เครื่องสमानตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลางได้นำมาใช้ในประเทศกำลังพัฒนาหลายประเทศ เพราะมีข้อดีหลายประการคือ

1. ราคาถูกไม่ต้องอาศัยเครื่องจักรกล
2. ติดตั้งง่ายต้องการพื้นที่น้อย
3. ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการทำงาน
4. มีประสิทธิภาพในการทำงาน
5. ไม่ต้องใช้ผู้ชำนาญงานในการควบคุมดูแลการทำงาน

2.5.1 การควบคุมและวัดค่าความเร็วสัมพัทธ์ต่อหน่วยระยะทาง ในเครื่องสมานตะกอน โดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลาง

ความเร็วสัมพัทธ์ต่อหน่วยระยะทาง (G) สามารถหาได้จาก

$$G = [(h\rho gQ)/(\alpha\mu V)]^{1/2}$$

$$= [gh/\alpha\gamma t]^{1/2} \dots\dots\dots (2.13)$$

โดยที่

- G = ความเร็วเกรเดียนท์ (วท.<sup>-1</sup>)  
h = ค่าระดับน้ำที่สูญเสีย (ม.)  
ρ = ความถ่วงจำเพาะของน้ำ (กก./ม.<sup>3</sup>)  
g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (ม./วท.<sup>2</sup>)  
Q = อัตราการไหล (ม.<sup>3</sup>/วท.)  
μ = (dynamic viscosity), (กก./ม.วท.)  
γ = (kinematic viscosity) (ม.<sup>2</sup>/วท.)  
V = ปริมาตรของชั้นกรวด (ม.<sup>3</sup>)  
t = ระยะเวลาที่น้ำไหลหรือสัมผัส (วท.)  
α = ความพรุนของกรวด

จากสมการค่า G สามารถควบคุมได้โดยการควบคุมระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวกลาง และค่าระดับน้ำสูญเสียที่เกิดขึ้น



ค่าระยะเวลาที่น้ำไหลหรือลึ่มฝัสมสามารถควบคุมได้โดยการปรับค่าปริมาณการไหลของน้ำดิบที่ผ่านชั้นตัวกลางไป ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$t = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots (2.14)$$

## 2.6 การศึกษาที่ผ่านมา

การทดลองใช้ชั้นกรวดอัดในท่อเพื่อทำงานเป็นเครื่องสมานตะกอนนั้น ยังไม่ได้มีการตั้งเป็นทฤษฎีหรือทำการทดสอบอย่างกว้างขวางนัก แต่ได้มีผู้วิจัยบางท่านศึกษาการสมานตะกอนโดยใช้ของแข็งเป็นตัวกลางดังต่อไปนี้

BHOLE and MHAISALKAH (1977) ได้ศึกษาถึงผลของความลึกและขนาดของทรายที่มีผลต่อเครื่องสมานตะกอนแบบใช้ชั้นทรายเป็นตัวกลางในรูปของระดับน้ำสูญเสีย การกำจัดความขุ่นและความเร็วเกรเดียนท์ จากการทดลองพบว่า ทรายลึก 40 ซม. ขนาด 1-2 มม. สามารถกำจัดความขุ่นได้ 85 % และถ้าเพิ่มความลึกของทรายเป็น 50 ซม. และ 60 ซม. ก็ไม่สามารถกำจัดความขุ่นได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนขนาดของทรายเป็น 2-3 มม. และ 4-5 มม. พบว่าค่าเฉลี่ยของการกำจัดความขุ่นคือ 80 % ที่ความลึกทั้งสามค่าคือที่ 40, 50 และ 60 ซม. ความเร็วเกรเดียนท์ (G) ขึ้นกับค่าเฮดสูญเสียระหว่างชั้นทราย ความลึก ขนาดของทราย และอัตราการไหลของน้ำ คือ ความเร็วเกรเดียนท์หลังจากการทดลองนาน 4 ชม. พบว่าค่า G จะน้อยที่สุดที่ขนาดของทราย 4-5 มม. ลึก 40 ซม. และจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความลึกและลดขนาดของทรายที่ขนาดของทราย 1-2 มม. ลึก 60 ซม. ให้ความเร็วเกรเดียนท์ที่มากที่สุด และความเร็วเกรเดียนท์ที่น้อยที่สุดเกิดที่ทรายขนาด 4-5 มม. ลึก 40 ซม. มีค่าประมาณ 40  $\text{wt.}^{-1}$  ขนาดของทรายที่เล็กกว่า 4-5 มม. และลึกกว่า 40 ซม. จะให้ค่าความเร็วเกรเดียนท์อยู่ระหว่าง 65  $\text{wt.}^{-1}$  ถึง 130  $\text{wt.}^{-1}$

Trinh Thi Tbann (1985) ได้ศึกษาการทำงานของเครื่องสมานตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลาง โดยการใช้ตัวกลางขนาดต่าง ๆ แปรค่าความลึก อัตราการไหล ความเข้มข้น

ของสารส้มและความขุ่นของน้ำ จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. เเปอร์เซ็นต์การกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารส้ม (แปรความเข้มข้นของสารส้มในช่วง 10-40 มก./ล.)
2. ความเข้มข้นของสารส้มที่แปรเปลี่ยนไปไม่มีผลต่อค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้น
3. ความขุ่นของน้ำที่แปรเปลี่ยนไปไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่ค่า G จะสูงขึ้นถ้าความเข้มข้นของความขุ่นมากขึ้น
4. จากการทดลองพบว่าถ้าอัตราการไหลต่ำจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นดี อัตราการไหลที่ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ดีที่สุดคือ  $6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-ชม.}$  (ทำการทดลอง 4, 6, 8  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-ชม.}$ )
5. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสำหรับตัวกลาง 3 ขนาด (2-3, 3-4, 4-5 มม.) ประมาณ 62-94 % และความลึกประสิทธิภาพมีค่า 65 ซม.
6. ค่า G มีค่าระหว่าง  $18-75 \text{ w.t.}^{-1}$  และ  $Gt$  มีค่าระหว่าง  $2 \cdot 10^3$  ถึง  $2.7 \cdot 10^4$

ยุทธนา มัทฉะวิวงค์ (2523) ได้ศึกษาเครื่องทำตะกอนแบบใช้ของแข็งเป็นตัวกลาง ตัวกลางคือ กรวดขนาดต่าง ๆ โดยเปลี่ยนแปลงความลึก และอัตราการไหล จากการทดลองสรุปได้ว่า

1. ในการทดลองใช้ตัวกลางขนาดเดียวในแต่ละการทดลอง ตัวกลางขนาด 1-5 มม. ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นดีที่สุด
2. ระยะเวลาสมานตะกอน 1-5 นาที
3. อัตราการไหลที่ให้ประสิทธิภาพในการสมานตะกอนที่ดีที่สุดคือ  $0.25-1.23 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-นาที}$
4. ค่า optimum G มีค่าอยู่ระหว่าง 80-250 ต่อวินาที
5. ค่า optimum  $Gt$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $0.20 \cdot 10^4$  ถึง  $2.4 \cdot 10^4$
6. การใช้ตัวกลางหลายขนาดเรียงลำดับจากเล็กขึ้นไปหาใหญ่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ดีกว่าใช้ตัวกลางขนาดเดียวโดยการควบคุมความลึกและอัตราการไหลให้เท่ากัน

Bhole A.G. (1977) ได้สร้างเครื่องสมานตะกอนโดยใช้ชั้นกรวดเป็นตัวกลางแบบ เทเปอร์นำไปใช้ในประเทศอินเดีย และประเทศในแถบลาตินอเมริกา ลักษณะโดยทั่วไปมีดังนี้

1. น้ำไหลขึ้นจากส่วนล่างไปสู่ส่วนบน
2. เปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดโดยเพิ่มหน้าตัดขึ้นตามความสูงที่เพิ่มขึ้นแต่ละช่วง ๆ
3. ภายในเครื่องสมานตะกอนบรรจุกรวด 2 ขนาด  
กรวดขนาด 5-10 มม. บรรจุอยู่ในช่วงล่าง  
กรวดขนาด 10-20 มม. บรรจุอยู่ในช่วงบน
4. ความเร็วเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงจาก  $1230 \text{ วัต.}^{-1}$  บริเวณทางน้ำเข้า และเหลือ  $35 \text{ วัต.}^{-1}$  บริเวณทางน้ำออก
5. อัตราการไหลที่ใช้  $270 \text{ ม}^3/\text{วัน}$
6. ค่า GT ประมาณ  $5.4 \times 10^4$

ศุภวิท เชษะกุล (2531) ได้ศึกษาการสมานตะกอนแบบเทเปอร์โดยใช้สารส้มเป็น สารรวมตะกอนทำการกวนเร็วโดยใช้ค่า G เท่ากับ  $300 \text{ วัต.}^{-1}$  เป็นเวลา 1 นาที แล้วตาม ด้วยการสมานตะกอนแบบเทเปอร์สองขั้นตอน และสามขั้นตอนตามลำดับ พบว่า

การสมานตะกอนแบบเทเปอร์สองขั้นตอน มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้

$$G_1 = 30 \text{ วัต.}^{-1}, T_1 = 3 \text{ นาที}$$

$$G_2 = 20 \text{ วัต.}^{-1}, T_2 = 11 \text{ นาที}$$

การสมานตะกอนแบบเทเปอร์สามขั้นตอน มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมดังนี้

$$G_1 = 50 \text{ วัต.}^{-1}, T_1 = 2 \text{ นาที}$$

$$G_2 = 35 \text{ วัต.}^{-1}, T_2 = 2 \text{ นาที}$$

$$G_3 = 20 \text{ วัต.}^{-1}, T_3 = 8 \text{ นาที}$$

จากการสมานตะกอนแบบเทเปอร์จะให้ค่าความชุ่มที่เหลือที่ต่ำที่สุดน้อยกว่าการสมาน  
ตะกอนแบบทั่ว ๆ ไปและการสมานตะกอนแบบเทเปอร์สามชั้นตอนจะให้ค่าความชุ่มที่เหลือต่ำกว่า  
การสมานตะกอนแบบเทเปอร์สองชั้นตอน ค่า  $G_t$  ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ  $2 \times 10^4$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย