



บทที่ 3

ทฤษฎี แนวความคิด และการทดลองที่ผ่านมา

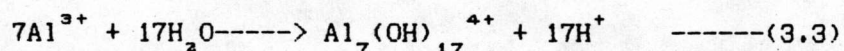
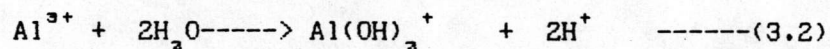
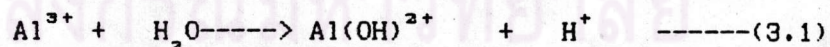
3.1 ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน

ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอนประกอบด้วย ทฤษฎีของการกวนเร็ว (rapid mixing stage) และทฤษฎีของการสมานตะกอน (flocculation stage)

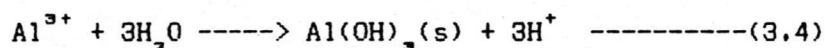
3.1.1 ทฤษฎีของการกวนเร็ว

การกวนเร็วเป็นกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำและทำให้เริ่มเกาะกันเป็นอนุภาคตะกอนขนาดเล็ก ซึ่งเกิดขึ้นโดยการทำลายแรงผลักรังสีกันและกันที่เกิดขึ้นมาจากประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เหล่านั้น

สารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เป็นสารรวมตะกอนที่นิยมใช้กันมากที่สุด เมื่อสารส้มถูกเติมให้กับน้ำจะสามารถละลายกลายเป็นไอออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) และอลูมิเนียม (Al^{3+}), Al^{3+} จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (ไฮโดรไลซิส) ทำให้โมเลกุลของน้ำ 6 ตัว เกาะอยู่โดยรอบอลูมิเนียมซึ่งมีประจุ $3+$ สูตรไอออนของอลูมิเนียมอาจเขียนได้เป็น $Al(H_2O)_6^{3+}$ หรืออย่างสั้นเป็น Al^{3+} อย่างไรก็ตามภายใต้สภาวะพีเอชปกติของโรงผลิตน้ำประปา Al^{3+} จะไม่คงตัวเนื่องจากมันสามารถไฮโดรไลซ์ต่อไปได้ทันทีให้กลายเป็นไอออนต่าง ๆ ของอลูมิเนียมดังนี้



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (Saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ดังสมการ



สารส้มสร้างกลไกของกระบวนการรวมตะกอนได้ 2 แบบคือ กลไกแบบ
 คูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า (charge neutralization) และกลไกแบบกวาด (sweep
 coagulation)

3.1.1.1 กลไกแบบคูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า

กลไกคูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้าจะทำให้ประจุของอนุภาค
 คอลลอยด์ (ซึ่งมักจะมีประจุลบ) ให้เป็นกลางหรือที่เรียกว่าทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์
 (colloid destabilization) การเป็นกลาง (neutralization) เกิดขึ้นได้
 เนื่องจากไอออนที่มีประจุลบของสารส้มคูดติดกับผิวของคอลลอยด์ด้วยโควาเลนต์บอนด์ จากนั้น
 ประจุบวกของสารประกอบนี้จะสะเทินประจุลบของคอลลอยด์ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลด
 ลงจนแรงวัลเดอรวาลส์มีค่ามากกว่าและเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น สารประ
 กอบที่เป็นตัวหลักในการทำปฏิกิริยาของกลไกแบบนี้ ได้แก่ $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$,
 $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ เป็นต้น

ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอน พีเอช ความเข้มข้น
 ของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำมีอิทธิพลต่อกลไกโดยตรงกล่าวคือปริมาณสารรวม
 ตะกอนและพีเอชกำหนดชนิดและปริมาณของสารประกอบอลูมิเนียม ในขณะที่ความเข้มข้นของ
 คอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำกำหนดโอกาสที่สารคอมเพล็กซ์จะทำปฏิกิริยากับ
 คอลลอยด์(2)

3.1.1.2 กลไกแบบกวาด

เมื่อเติมสารส้มลงไปใต้น้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าความ
 เข้มข้นที่จุดอิ่มตัวไฮโดรไลซิสจะเริ่มจาก Al^{3+} จนได้ $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ ดังสมการ (3.4)
 กลไกแบบกวาดจะเกิดโดยผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนใน
 การตกผลึกตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะนี้
 คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นฟlocsขนาดใหญ่ในขั้นตอนการ

สมานตะกอนและจะถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดอย่างเด่นชัดคือปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์

3.1.2 ทฤษฎีของการสมานตะกอน

การสมานตะกอนคือ การที่อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้วตลอดจนอนุภาคตะกอนที่ประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์และโพลีเมอร์ของสารรวมตะกอน เกิดชนกันและรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดการสมานตะกอนอาจจำแนกออกเป็นสามประเภท (3) ได้แก่การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion), การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential setting) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

3.1.2.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคขึ้น การสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น

การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) อัตราการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติกขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิ และขึ้นอยู่กับจำนวนของอนุภาค การสมานตะกอนประเภทนี้จะมีอัตราสูงเมื่อมีอนุภาคขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน (3) และจะลดลงจนเหลือน้อยมากเมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน

3.1.2.2 การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

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

3.1.2.3 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อเกิดสภาวะการกวนขึ้นในของเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับน้ำจะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดการชนและการสมานตัวกันมากที่สุด การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบออร์โธโคเนติก (orthokinetic flocculation) เมื่อเปรียบเทียบอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดอนุภาคปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริโคเนติกมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน

อนุภาคตะกอนในขั้นตอนการสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอนดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนจึงได้แก่กลไกแบบออร์โธโคเนติก

จลนศาสตร์ของการสมานตะกอนแบบออร์โธโคเนติกเริ่มจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาคที่เสนอโดย Smoluchowski และ Camp & Stein ซึ่งได้นำมาขึ้นเป็นสมการที่แสดงว่า อัตราการชนระหว่างอนุภาคขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของอนุภาคตลอดจนความเร็วเกรเดียนต์ตั้งสมการ

$$dn/dt = (G/6)(d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \text{ -----(3.5)}$$

$$dn/dt = \text{อัตราการชนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ}$$

$$G = \text{ความเร็วเกรเดียนต์}$$

$$d = \text{ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคตะกอน}$$

n = จำนวนอนุภาคตะกอนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ

สมการ (3.5) ได้พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาค ซึ่งกำหนดขึ้นมาจากการไหลแบบลามินาร์ ต่อมา Fuchs ได้ทดลองและได้กำหนดสมการแสดงอัตราการชนภายใต้สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ดังสมการ

$$dn/dt = (12\pi/\sqrt{5}) G (d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \quad (3.6)$$

โดยการพิจารณาจากผลการศึกษาของ Robeck พบว่าน้ำดิบที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาประกอบด้วยอนุภาคความขุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในขณะที่อนุภาคตะกอนและตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน Hudson (4) ได้พัฒนาสมการให้ง่ายขึ้นโดยถือว่าขนาดของอนุภาคในน้ำ (d_1) มีค่าน้อยมากเทียบกับขนาดของอนุภาคตะกอนนอกจากนี้ยังได้เปลี่ยนเทอม dn/dt ซึ่งหมายถึงอัตราการชนระหว่างอนุภาคมาเป็นอัตราสมานตะกอนโดยเพิ่มอัตราส่วนการเกาะติด (α) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่สมานตัวกันภายหลังการชนไว้ดังสมการดังนี้

$$dn/dt = - (G/6) d_2^3 \alpha n_1 n_2 \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) Hudson (4) ได้เปลี่ยนจำนวนและขนาดของอนุภาคตะกอน n_2 และ d_2 มาอยู่ในรูปของความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน (ϕ) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\pi n_2 d_2^3 / 6$ ดังนั้น

$$dn/dt = - (G/\pi) n_1 \phi \alpha \quad (3.8)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (3.8) จะได้สมการแสดงประสิทธิภาพของการสมานตะกอนดังนี้

$$n/n_0 = \exp(-G\phi\alpha t/\pi) \quad (3.9)$$

n = จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรน้ำที่เวลา t

n_0 = จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรที่เวลา t_0

สมการ (3.9) ซึ่งให้เห็นว่าประสิทธิภาพของขั้นตอนสมานตะกอนแปรตามความเร็วเกรเดียนท์ ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน อัตราส่วนการเกาะติด และเวลาสมานตะกอน

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นควบคู่กับการสมานตะกอนในขั้นการสมานตะกอนคือการกร่อน (erosion) หรือการแตกตัว (break up) ของตะกอนอันเกิดจากแรงเฉือนภายใต้ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในน้ำ Argaman & Kaufman (5) ได้เสนอสมการสำหรับการสมานตะกอนซึ่งครอบคลุมถึงการแตกตัวของตะกอนในเทอม K_b ดังต่อไปนี้

$$n/n_0 = (1 + k_a Gt) / (1 + k_b G^2 t) \quad \text{-----(3.10)}$$

k_a = ค่าคงที่ในการรวมตัว (agregation constant)

k_b = ค่าคงที่ในการแตกตัว (break-up constant)

3.2 แนวคิดทั่วไปเกี่ยวกับการสมานตะกอน

Tambo (6) ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อความหนาแน่นของฟล็อกและสรุปได้ว่า

- 1) ความหนาแน่นของฟล็อกจะลดลง เมื่อฟล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น
- 2) ความหนาแน่นของฟล็อกจะแปรเปลี่ยนไปถ้าอัตราส่วนระหว่างสารส้ม กับสารแขวนลอยเปลี่ยนแปลงไป
- 3) ความหนาแน่นของฟล็อกจะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับคุณสมบัติของสารแขวนลอยในน้ำ

Camp (7) ได้ทำการวิเคราะห์การสมานตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาพบว่า พารามิเตอร์ไร้มิติที่เกิดจากผลคูณระหว่าง G และ T (เวลาในการสมานตะกอน) ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 2×10^4 ถึง 2×10^5 และค่า G ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 70 วท.^{-1}

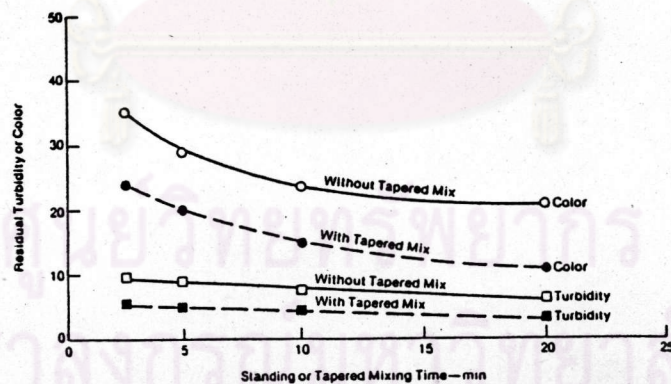
Andreu-Villegas & Letterman (8) ได้ทดลองการสมานตะกอนโดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนและใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยคาโอไลน์ท์ (kaolinite) ปรากฏว่าค่า G ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 วท.^{-1} ค่า T ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 นาที

โดยระบุว่าค่า T ที่มากไปกว่านี้จะไม่เพิ่มสมรรถนะของการสมานตะกอนแต่อย่างใด

พารามิเตอร์ G และ T มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของการสมานตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของฟล็อกกล่าวคือ ฟล็อกจะมีขนาดจำกัดที่ค่า G หนึ่ง ๆ ขนาดฟล็อกจะแปรตาม T ในขณะที่แปรกลับกับค่า G อย่างไม่รู้ทิศทางแม้ว่าค่า G สูง ๆ จะทำให้ขนาดตะกอนเล็กแต่ตะกอนที่ได้จะมีความหนาแน่นกว่าตะกอนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า G ที่ต่ำกว่า (9)

3.3 การศึกษาเกี่ยวกับการสมานตะกอนแบบเทเปอร์ที่ผ่านมา

Kawamura (9) ได้ทำการทดลองการสมานตะกอนแบบเทเปอร์ โดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนการกวนเร็วใช้ค่า G เท่ากับ 300 วัต.^{-1} เป็นเวลา 10 วัต. ตามด้วยการสมานตะกอนในขั้นตอนแรกโดยใช้ค่า G เท่ากับ 150 วัต.^{-1} เป็นเวลา 5 นาที ตามด้วยการสมานตะกอนในขั้นตอนที่สองโดยใช้ค่า G เท่ากับ 75 วัต.^{-1} เป็นเวลา 10 นาทีและการสมานตะกอนในขั้นตอนที่สามใช้ค่า G เท่ากับ 30 วัต.^{-1} เป็นเวลา 15 นาที แล้วปล่อยให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1



Effect of Tapered Mixing on Alum Flocculation for Surface Water

A—turbidity- and color removal by flocculation; surface water turbidity, 86; color, 90; pH, 7.7; alkalinity 140; B—o and •, color; □ and ■, turbidity; 25 mg/l alum dosage for all cases

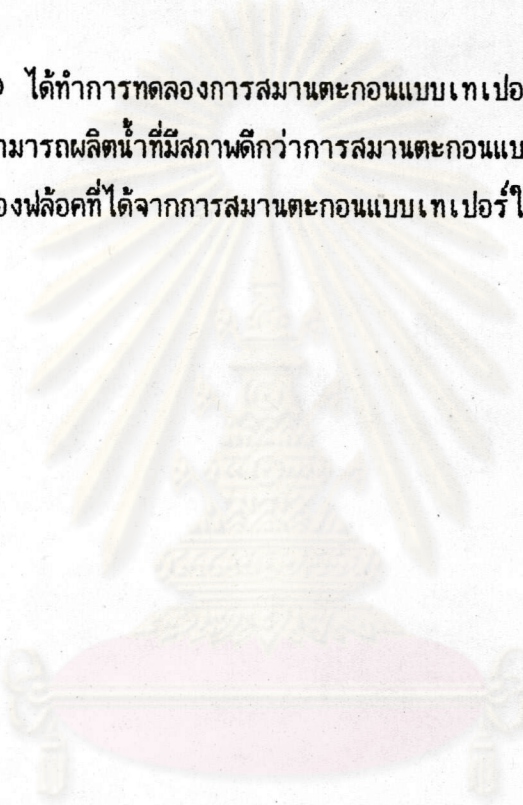
รูปที่ 3.1 แสดงผลของการสมานตะกอนแบบเทเปอร์โดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนกับน้ำในแหล่งน้ำแห่งหนึ่ง

เขาได้สรุปผลการทดลองไว้ว่า

1) การสมานตะกอนแบบเทเปอร์สามารถผลิตน้ำ (หลังจากผ่านการตกตะกอนแล้ว) ที่มีคุณภาพดีว่าการสมานตะกอนแบบทั่ว ๆ ไปเมื่อใช้ปริมาณสารส้มเท่า ๆ กัน

2) การสมานตะกอนแบบเทเปอร์สามารถประหยัดสารเคมีที่ใช้รวมตะกอนได้สูงถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์ของการสมานตะกอนแบบทั่ว ๆ ไป

Ives (10) ได้ทำการทดลองการสมานตะกอนแบบเทเปอร์และได้สรุปว่าการสมานตะกอนแบบเทเปอร์สามารถผลิตน้ำที่มีสภาพดีว่าการสมานตะกอนแบบขั้นตอนเดียวและให้เหตุผลไว้ว่าขนาดเฉลี่ยของฟล็อกที่ได้จากการสมานตะกอนแบบเทเปอร์ใหญ่กว่าการสมานตะกอนแบบทั่วไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย