

บทที่ 3

ทฤษฎี



3.1 ทฤษฎีการรวมตะกอน (Theory of Coagulation)

การรวมตะกอน หมายถึงกระบวนการทั้งหมดของการรวมตัวของอนุภาคซึ่งรวมทั้งการทำลายการคงตัว (destabilization) ของอนุภาคและการขนส่งอนุภาค กระบวนการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์มีอยู่ 2 ขั้นตอน ขั้นแรก การทำลายการคงตัวของอนุภาคเพื่อให้อนุภาคเหล่านั้นสามารถรวมตัวกันได้ถ้าสัมผัสกัน ขั้นที่ 2 การขนส่งอนุภาคที่ถูกทำลายการคงตัวแล้ว เพื่อให้เกิดการสัมผัสระหว่างอนุภาคและสมานตัวเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น ขั้นตอนที่ 2 นี้ เรียกว่า การสมานตะกอน (flocculation) ทฤษฎีการขนส่งอนุภาคอาศัยหลักกลศาสตร์ของไหลและของอนุภาค ทฤษฎีการทำลายการคงตัวของอนุภาค อาศัยหลักเคมีของคอลลอยด์และ เคมีของผิวสัมผัส (interface)

3.1.1 ระบบของคอลลอยด์ (System of Colloids)

ระบบของคอลลอยด์ประกอบด้วยวิภาคที่เป็นเนื้อเดียวหรือคอลลอยด์เนื้อเดียวและวิภาคที่กระจายหรือไม่คอลลอยด์ เนื้อเดียวที่เป็นเนื้อเดียวกันอาจเป็นของแข็ง, ของเหลวหรือก๊าซ วิภาคที่กระจาย ซึ่งเรียกกันว่า หน่วยจลน (kinetic unit) อาจเป็นอนุภาคของแข็งเล็ก ๆ, โมเลกุลขนาดใหญ่, ละอองน้ำหรือฟองอากาศเล็ก ๆ แม้จะไม่ได้มีการตกลงเกี่ยวกับขอบเขตที่แน่นอน แต่โดยปกติแล้วถือว่า ในระบบของคอลลอยด์ทั้งหมดจะต้องมีสารหนึ่งหรือมากกว่าที่มีอย่างน้อย 1 มิติที่อยู่ในพิสัยระหว่าง 1-10 nm และประมาณ 1 μm ในกรณีที่น่าจะเป็นวิภาคคอลลอยด์เนื้อเดียว วิภาคที่กระจายสามารถแบ่งเป็นคอลลอยด์แบบ hydrophobic และ hydrophilic ตามคุณสมบัติทางสัมพรรคภาพ (affinity) ของคอลลอยด์ที่มีต่อน้ำ

อนุภาคคอลลอยด์ของแข็งที่กระจายอยู่ในของเหลว จะมีประจุไฟฟ้า (electric charge) ประจุเหล่านี้ อาจเกิดจาก ionization, electrolytic solution tension lattice imperfections and isomorphous replacements และ ion adsorption

ประจุไฟฟ้าเหล่านี้ก่อให้เกิด electrical double layer

การรวมตัวของอนุภาคเกิดจากการดึงดูดโมเลกุลด้วยแรง vander waals ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับ ionic environment ของการคงตัวที่ด้านการรวมตัวของอนุภาคเป็นผลเนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุที่เหมือนกันทำให้เกิด electrical double layer รอบอนุภาค และสัมพรรคภาพระหว่างอนุภาคตัวทำละลาย การคงตัวของคอลลอยด์แบบ hydrophobic เนื่องมาจากแรงผลักร่วมกันของประจุไฟฟ้าสถิตย์ที่เหมือนกันที่อยู่บนผิวอนุภาคในคอลลอยด์แบบ hydrophilic การคงตัวเนื่องมาจากการกระทำระหว่าง electrical double layer และ hydration หรือสัมพรรคภาพระหว่างอนุภาคกับน้ำ

การทำลายการคงตัวของอนุภาค สามารถทำได้โดย การอัด diffuse double layer การดูดซับเพื่อให้ประจุ เป็นกลาง และการดูดซับทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างอนุภาค

3.1.2 การขนส่งอนุภาค

อัตราการรวมกลุ่มหาได้จากอัตราที่อนุภาคคอลลอยด์ชนกัน (การขนส่งอนุภาค) และประสิทธิภาพของการชนทำให้เกิดการเชื่อมระหว่างอนุภาค (การทำลายการคงตัวของอนุภาค) การทำให้อนุภาคสัมผัสกันอาจทำได้โดย การสมานตะกอนแบบ perikinetic หรือการสัมผัส โดยการเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน, การสมานตะกอนแบบ orthokinetic หรือการสัมผัสเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ เนื้อของ เหลวและการจมตัวด้วยความเร็วต่างกัน การสมานตะกอนแบบ orthokinetic เป็นกลไก (mechanism) ที่มีความสำคัญมากในการผลิตน้ำประปา การจมตัวด้วยความเร็วต่างกัน เป็นกลไกที่สำคัญในถังทำน้ำในแบบชั้นตะกอนหรือโซลิดคอนแทคแคลรีไฟเออร์

ก. เครื่องสมานตะกอนแบบใช้เครื่องมือ

Von Smoluchowski (1917) แสดงสมการของการสมานตะกอนแบบ orthokinetic ดังนี้

$$\frac{dN}{dt} = \frac{G}{6} n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \quad (2)$$

dN/dt = อัตราการกระทบระหว่างอนุภาค 1 และ 2

G = ความเร็วเกรเดียนท์

n_1, n_2 = จำนวนอนุภาค 1 และ 2

d_1, d_2 = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค 1 และ 2

Camp และ Stein (1943) ได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเกรเดียนท์เฉลี่ย

(G) กับพลังงานเข้าถึง (P) ดังนี้

$$G = \left[\frac{P}{\mu v} \right]^{1/2} \quad (3)$$

P = พลังงานเข้าถึง

μ = ความหนืดจลน์ของของเหลว

v = ปริมาตรของถัง

Rushton (1953) หาสมการทางคณิตศาสตร์ของพลังงานที่ต้องการใช้ ในการทำให้เกิดการปั่นป่วนของน้ำ (turbulent condition) ไว้ดังนี้

$$P = \frac{K}{g} \rho N^3 D^5 \quad (4)$$

K = ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่า = 1.0 สำหรับใบพัด 3 แฉก (three bladed propeller) จนถึง 6.3 สำหรับใบพัด 6 แฉก (six flat blades)

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

N = จำนวนรอบการหมุนของใบพัดต่อวินาที

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด

Camp (1955) ได้ทำการวิเคราะห์ถึงสมานตะกอนและพบว่า ในการออกแบบค่าที่เหมาะสมของ Gt_d ควรอยู่ระหว่าง 2×10^4 ถึง 2×10^5 และค่า G ควรอยู่ระหว่าง 20 ถึง 74 วินาที⁻¹ พลังงานที่ใช้ในการทำให้เกิดการสมานตะกอนแบบใช้ใบพัด หาได้จากสมการ

$$P = 1/2 C_D A \rho u^3 \quad (5)$$

C_D = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน = 1.8 สำหรับใบพัดแบบแบน

u = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างใบพัดกับของเหลว มีค่าประมาณ 0.75 เท่าของความเร็วใบพัด

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

A = พื้นที่ของใบพัดที่ใช้กววนของเหลว

Harris, Kaufman และ Krone (1966) โดยอาศัยหลักการจากสมการ Von Smoluchowski (สมการที่ 2) ได้หาสมการสำหรับถึงทำปฏิกิริยาแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) จำนวน 3 ดังได้ดังนี้

$$\frac{n_1^o}{n_1^m} = (1 + K\phi G \frac{t_d}{m})^m \quad (6)$$

n_1^o, n_1^m = ความเข้มข้นของปฏิมอนูภาคในกระแสเข้ากับความเข้มข้นของอนุภาคในกระแสนอกของถังที่ m

K = ค่าคงที่

ϕ = อัตราส่วนปริมาตรตะกอนสมาน

t_d = เวลาที่กักเก็บน้ำในถัง

Andreu-Villagas และ Letterman (1976) ได้ศึกษาและชี้ให้เห็นค่าที่เหมาะสมของเวลาการสมานตะกอนและความเร็ว เกรเดียนต์ที่มีความสัมพันธ์กัน ดังสมการ

$$(G^*)^{2.8} T = K \quad (7)$$

G^* = ค่าความเร็วเกรเดียนท์ที่เหมาะสมของน้ำ, วินาที⁻¹

t_d = เวลาของการสมานตะกอน, นาที

K = 4.9×10^5 , 1.9×10^5 และ 0.7×10^5 สำหรับความเข้มข้นของสารส้มที่ 10

มก./ล., 25 มก./ล. และ 50 มก./ล.

จากสมการที่ 7 สามารถเขียนเป็นสูตรโดยทั่ว ๆ ไป ดังนี้

$$(G)^{2.8} t_d = (44 \times 10^5) / C \quad (8)$$

C = ความเข้มข้นของน้ำสารส้ม มก./ล. มีค่าระหว่าง 0-50 มก./ล.

ค่าที่เหมาะสมสำหรับ G มีค่าระหว่าง 20-50 วินาที⁻¹

ข. เครื่องสมานตะกอนแบบใช้ของแข็งเป็นตัวกลาง

หลักการของเครื่องสมานตะกอนแบบใช้ของแข็งเป็นตัวกลาง โดยการให้น้ำดิบที่ผสมกับสารช่วยตกตะกอนแล้วผ่านตัวกลางพรุน (porous media) ในลักษณะการไหลขึ้น (upflow) ช่องว่างระหว่างเม็ดตัวกลางจะทำให้เกิดแรงเฉือนและเกิดความเร็วสัมพัทธ์ค่อนหน่วยระยะทางเกิดการสัมผัสของอนุภาคและสมานตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น

Camp และ Stein's (1943) ได้หาสมการของความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) จากการที่น้ำไหลผ่านช่องว่างพรุนในลักษณะไหลขึ้น

$$\frac{du}{d\ell} = \left[\frac{gu}{v} \left(\frac{dh}{dz} \right) \right] \frac{1}{2} \quad (9)$$

ซึ่ง $du/d\ell$ = ความเร็วเกรเดียนท์

u = อัตราเร็วของการไหล

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

v = ความหนืดจลน์ของของไหล

dh/dz = ระดับน้ำที่สูงเสีย (head loss) ต่อความหนาของตัวกลาง

Fair และ Hatch (1933) ได้หาสมการความสัมพันธ์ระดับน้ำสูญเสียของการไหลผ่านชั้นตัวกลาง เนื่องจากน้ำหนักของชั้นตัวกลางในรูปของสมการคิฟเฟอเรนเชียล

$$dh \rho_f g = dz (\rho_s - \rho_f) g (1 - \epsilon) \quad (10)$$

ρ_s, ρ_f = ความหนาแน่นของตัวกลางและของเหลวที่ไหลผ่าน

เมื่ออินทิเกรตจะได้ $h = z(Sg - 1)(1 - \epsilon) \quad (11)$

Sg = ความถ่วงจำเพาะของตัวกลาง

ϵ = ความพรุนของตัวกลาง (porosities) สำหรับทรายมีค่าประมาณ 0.70

Fair, Geyer และ Okun (1968) ได้แสดงสมการของ Kozeny การหาระดับน้ำที่สูญเสียเนื่องมาจากคุณสมบัติของตัวกลางในการไหลแบบช้า (laminar)

$$\frac{h}{z} = K' \frac{v}{g} u \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \left(\frac{6}{\psi}\right)^2 \sum_{i=2}^n \frac{x_i}{d_i^2} \quad (12)$$

ซึ่ง x_i คืออัตราส่วน (fraction) ของอนุภาคที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง d_i

K' = สัมประสิทธิ์ของการยอมให้น้ำไหลผ่าน (coefficient of permeability)

u = อัตราเร็วของการไหล

ψ คือ Sphericity

วีระวัฒน์ (1977) ได้หาสมการของความเร็วเกรเดียนท์

$$\begin{aligned} \text{จาก } G &= \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \left[\frac{Q \rho g h}{\mu V} \right]^{1/2} \\ &= \left[\frac{g h}{\mu / \rho \ V / Q} \right]^{1/2} = \left[\frac{g h}{v \ t_d} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (13)$$

- เมื่อ h = ค่าระดับน้ำสูญเสีย (head loss) (เมตร)
 t_d = ระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวกลาง (วินาที)
 v = ความหนืดจลน์ (สโต๊ก)
 g = อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที²)

ระยะเวลาที่น้ำไหลผ่านตัวกลาง (t_d) สามารถหาได้จากสมการ

$$t_d = z/u \quad (14)$$

- โดยที่ z = ความหนาหรือความลึกของตัวกลาง (เมตร)
 u = ความเร็วที่น้ำไหลผ่านตัวกลาง (เมตร/วินาที)

3.2 หลักไฮโดรไดนามิกของถังทำน้ำใสแบบชั้นตะกอน (Hydrodynamic Principle of Sludge Blanket Clarifier)

ชั้นตะกอนประกอบด้วยตะกอนแขวนลอยจำนวนมาก ตะกอนเหล่านี้จะอยู่ในสภาพฟลูอิดไลซ์หรือลอยตัวเคลื่อนที่ไปมาด้วยความเร็วของน้ำที่ไหลขึ้นตามแนวตั้ง ซึ่งตะกอนนี้เกิดจากกระบวนการรวมตะกอน ตะกอนขณะที่ตกตะกอนจะสัมผัสกันทำให้มีขนาดโคขึ้นและความเร็วในการตกตะกอนจะสูงขึ้น ตะกอนนี้จะตกลงมาจนถึงตำแหน่งที่ความเร็วของการไหลของน้ำในแนวตั้งกับความเร็วในการตกของตะกอนสมดุลกัน เนื่องจากตะกอนมีขนาดต่าง ๆ กันและเมื่อตะกอนสะสมมากพอก็จะเกิดชั้นตะกอนแยกออกจากน้ำใสอย่างชัดเจน ซึ่งชั้นตะกอนนี้จะทำหน้าที่กรองตะกอนสมานที่เกิดขึ้นในส่วนล่างของถังขณะไหลผ่านขึ้นไป

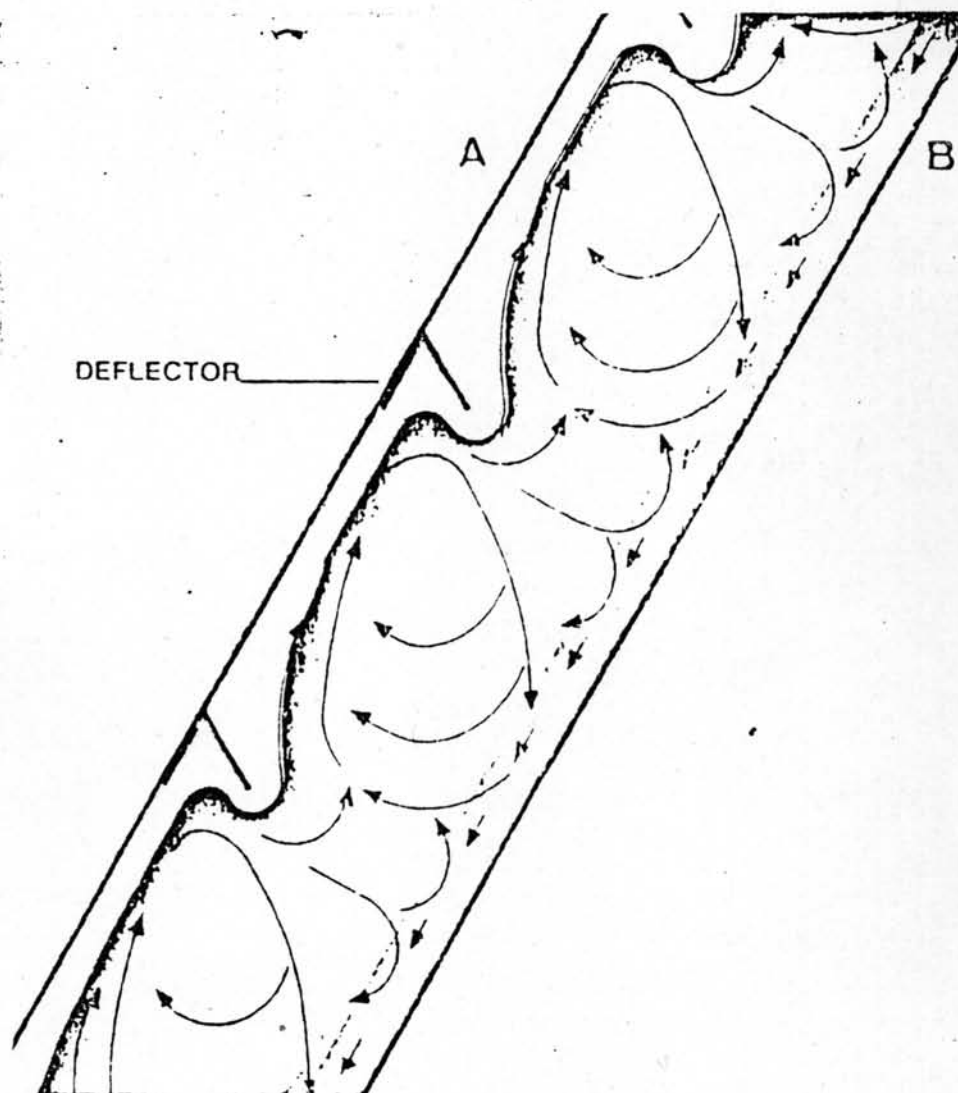
การรักษาภาวะของชั้นตะกอน ทำได้โดยการปรับความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านชั้นตะกอนให้สมดุลกับคุณสมบัติของชั้นตะกอนได้แก่ ความหนาและความเข้มข้นของชั้นตะกอนกับจะต้องให้น้ำที่ไหลผ่านชั้นตะกอนกระจายอย่างสม่ำเสมอ เพราะหากน้ำไหลไม่กระจายสม่ำเสมอ จุดที่มีความเร็วของการไหลขึ้นสูงเกินไป ตะกอนด้านล่างของชั้นตะกอนจะไหลปนขึ้นมาและอาจทำให้ชั้นตะกอนยกตัวลอยขึ้นไปในกระแสน้ำ ในขณะที่เดียวกัน หากความเร็วจุดใดต่ำเกินไป ตะกอนก็

จะตกลงตรงจุดนั้นมาก ทำให้ความเข้มข้นของชั้นตะกอนไม่สม่ำเสมอ (non homogenous concentration) เกิด density current ภายในชั้นตะกอน และเมื่อน้ำไหลผ่านชั้นตะกอนเป็น เวลานาน ตะกอนจะสะสมในชั้นตะกอนจนมีปริมาณมาก เกินขีดจำกัดก็คั่งตั้งตะกอนส่วนเกินออกไป

3.3 การทำงานของถังโวลติคอนแทคแคลอรีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง

ถังโวลติคอนแทคแคลอรีไฟเออร์ชนิดนี้คล้ายกับถังโวลติคอนแทคแคลอรีไฟเออร์โดยทั่วไป แต่ได้ปรับปรุง โดยเพิ่มแผ่นขนานเอียงในแนวตั้งและบนแผ่นขนานเอียงได้ติดตั้งแผ่นตีเฟลกเตอร์ห่างกัน เป็นระยะตามความเหมาะสม จุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของถังให้สูงขึ้น แผ่นขนานเอียงภายในถังจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายในถังให้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยกระจายน้ำที่ไหลขึ้นในแนวตั้งระหว่างแผ่นขนานเอียงให้สม่ำเสมอ ในขณะที่เดียวกันแผ่นตีเฟลกเตอร์ที่ติดตั้งบนแผ่นขนานเอียง จะทำให้เกิดการหมุนเวียนตะกอนในช่วงชั้นตะกอนดีขึ้น (รูปที่ 3.1)

การทำงานของถังโวลติคอนแทคแคลอรีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง สามารถแยกได้ตามขั้นตอนดังนี้ น้ำดิบที่ผ่านการรวมตะกอน (coagulation) จะไหลมาตามท่อนำน้ำดิบเข้าสู่ส่วนล่างของถัง แล้วไหลเข้าที่กระจายน้ำดิบ แล้วไหลขึ้นในแนวตั้งตามช่องว่างระหว่างแผ่นขนานเอียง ในส่วนล่างช่วงที่เป็นชั้นตะกอน (sludge blanket) น้ำที่ผ่านขบวนการรวมตะกอนเริ่มจะรวมตัวกัน เกิดเป็นตะกอนสมานขนาดเล็กปะปนขึ้นมากับน้ำ แผ่นตีเฟลกเตอร์ที่ติดตั้งบนแผ่นขนานเอียง เหล่านี้ จะทำให้เกิดการไหลหมุนเวียน ทำให้เพิ่มจำนวนสัมผัสระหว่างตะกอนที่เข้ามา กับน้ำดิบที่มีขนาดเล็กและตะกอนที่อยู่ในชั้นตะกอน ทำให้เกิดตะกอนที่มีขนาดโตขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกตัวของตะกอนออกจากน้ำ ตะกอนในช่วงของชั้นตะกอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาของน้ำไหลผ่านถัง (เพราะอนุภาคแขวนลอยที่ปะปนมากับน้ำจะแยกตัวออกมารวมกันอยู่ในชั้นตะกอนเป็นส่วนมาก) ดังนั้น ความเข้มข้นตะกอนในชั้นนี้จะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จึงต้องทำให้ตะกอนมีปริมาณที่เหมาะสมโดยให้ตะกอนส่วนเกินล้นผ่านแผ่นกั้น (weir) ซึ่งอยู่ส่วนล่างภายในถังและไหลไปรวมกันอยู่ในที่เก็บตะกอน เมื่อตะกอนเหล่านี้ไปรวมตัวกันเป็นจำนวนมาก ปริมาตรตะกอนจะลดลง โดยการอัดตัวด้วยน้ำหนักตัวเอง พร้อมทั้งจะนำออกจากถัง ส่วนของน้ำใสที่ไหล



รูปที่ 3.1 แสดงการไหลของน้ำระหว่างแผ่นขนานเอียงภายในถังไซลิคคอนแทค
แคลรีไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง (วีระ 2524)

ผ่านขึ้นมาจากชั้นตะกอน ก็จะไหลเข้าที่รับน้ำใสที่ส่วนบนของถัง โดยให้น้ำใสไหลสู่รางน้ำใส
น้ำใสจากรางรับน้ำใสก็จะต่อไปยังถังกรอง