



บทที่ 3

### ทฤษฎีและแนวความคิด

โดยที่ความขุ่นในน้ำส่วนใหญ่ปรากฏในรูปคอลลอยด์ (colloid) ดังนั้นจึงต้องรู้ถึงทฤษฎีของคอลลอยด์และใช้เป็นพื้นฐานสำคัญของกระบวนการรวมตะกอน ในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของคอลลอยด์ในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการรวมตะกอนโดยสังเขป จากนั้นจึงกล่าวถึงทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน ซึ่งจำแนกออกเป็นทฤษฎีของขั้นผสมเร็ว (rapid mix - stage) และทฤษฎีของขั้นสมานตะกอน (flocculation stage) นอกจากนี้จะได้กล่าวถึงแนวความคิดในการใช้ตะกอน ตลอดจนแนวความคิดในการควบคุมกระบวนการรวมตะกอนเมื่อมีการใช้ตะกอน ทั้งนี้เพื่อให้ภาพของการวิจัยครั้งนี้ชัดเจนขึ้น

#### 3.1 ทฤษฎีของคอลลอยด์

ทฤษฎีของคอลลอยด์เกี่ยวกับระบบของคอลลอยด์ สภาวะคงตัวของคอลลอยด์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่นในน้ำ และสภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการรวมตะกอน

##### 3.1.1 ระบบของคอลลอยด์

ระบบของคอลลอยด์ประกอบด้วยวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) และวัฏภาคเอกพันธ์ (homogenous phase) ทั้งสองวัฏภาคนี้อาจมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือก๊าซ วัฏภาคกระจายได้แก่ อนุภาคของแข็ง ละอองน้ำ หรือฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายหรือดำรงอยู่อย่างไม่ต่อเนื่องภายในวัฏภาคเอกพันธ์ที่เป็นสารเนื้อเดียวกันหรือต่อเนื่องกัน ขนาดของวัฏภาคกระจายขึ้นอยู่กับแนวทางในการพิจารณา เช่น พิจารณาในด้านขนาดแต่เพียงอย่างเดียว หรือพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างมวลกับประจุไฟฟ้าของอนุภาคนั้น ๆ ใดก็ตามสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำและเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่น อาจประมาณได้ว่ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.001 ถึง 1 ไมครอน<sup>(18)</sup>

อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำได้รับการจำแนกออกเป็นประเภทโดยทฤษฎีที่แตกต่างกัน ทฤษฎีแรกพิจารณาจากสมบัติทางสัมพรรคภาพ (affinity) ของคอลล

ลอยด์ที่มีต่อน้ำ โดยแบ่งออกเป็นไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์ (hydrophobic colloid) และไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ (hydrophilic colloid) ทรรศนะหลังพิจารณาจากระดับความสามารถที่จะดำรงอยู่อย่างกระจายภายในน้ำหรือระดับความคงตัว (stable) โดยตรง โดยแบ่งออกเป็นคอลลอยด์ที่ทวนกลับ (reversible colloid) ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีความคงตัวอยู่เสมอ และคอลลอยด์ที่ไม่ทวนกลับ (irreversible colloid) ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่ไม่คงตัว นอกจากนี้ยังจำแนกคอลลอยด์ที่ไม่ทวนกลับหรือไม่คงตัวออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ดิวเทอร์นัล (diuturnal) หมายถึงคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวประเภทที่มีการรวมตัวกันอย่างช้า ๆ และคาดูคัส (caducous) หมายถึงคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวประเภทที่มีการรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปถือว่าคอลลอยด์ที่คงตัวคือดิิวเทอร์นัล และคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวคือคาดูคัส<sup>(1)</sup> นั่นคือพิจารณาความคงตัวและไม่คงตัวของคอลลอยด์จากอัตราเร็วในการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคนั้นเอง

ดังนั้น คำจำกัดความของคอลลอยด์ที่คงตัวในการวิจัยครั้งนี้จะหมายถึงคอลลอยด์ที่ไม่ทวนกลับประเภทที่มีการรวมตัวกันอย่างช้า ๆ คือดิิวเทอร์นัล โดยนัยนี้กระบวนการรวมตะกอนจึงหมายถึงกระบวนการที่เร่งอัตราการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ กล่าวคือ เปลี่ยนระบบคอลลอยด์จากระบบดิิวเทอร์นัลมาเป็นระบบคาดูคัสนั่นเอง

### 3.1.2 สภาวะคงตัวของคอลลอยด์

สภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค ประจุไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหน่วยแลตทิซ (lattice unit) ของอนุภาคหรือเกิดจากไอออน (ion) ในน้ำที่ถูกดูดติด (adsorp) ที่ผิวของอนุภาค หรือเกิดจากกลุ่มที่สามารถแตกตัวเป็นไอออน (ionizable group) ของอนุภาค โดยทั่วไปชนิดและขนาดของประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนและพีเอช (pH) ของน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำตามธรรมชาติมักจะมีประจุไฟฟ้าลบ

โดยที่ระบบคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและน้ำจะมีประจุไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์จึงถูกควบคุมโดยประจุตรงข้ามภายในน้ำเพื่อคงความเสถียรทางไฟฟ้าของระบบ ปรัชการณณ์ทำให้เกิดทฤษฎีว่ามีประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical-double layer) ล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งได้แก่ ชั้นตรึง (fixed layer) และชั้นกระจาย (diffuse layer) ชั้นตรึงประกอบด้วยประจุไฟฟ้าตรงข้ามที่เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคโดยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์กับประจุ-

ไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำและแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals force) ถัดจากชั้นครึ่ง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำ เนื่องจากความร้อนทำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามซึ่งถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิว ชั้นที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกระจายอยู่ในน้ำดังกล่าวนี้คือชั้นกระจาย ขนาดหรือลักษณะของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ตลอดจนปริมาณและชนิดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (electrical potential) ระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิวและมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิว เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าจะเกิดขึ้นและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง-แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง ดังนั้น ถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักรวมมีค่ามากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสเข้าใกล้กันเพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง

อนึ่ง ในกรณีของคอลลอยด์ที่มีสัมพรรคภาพกับน้ำสูงคือไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์ โมเลกุลของน้ำจะถูกดูดติดและล้อมรอบผิวของคอลลอยด์อยู่เป็นชั้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้การรวมตัวระหว่างอนุภาคเป็นไปได้ยากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามกลไกของสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ประเภทดังกล่าวนี้ยังไม่เป็นที่ทราบชัดเจน<sup>(1)</sup>

### 3.1.3 สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเปลี่ยนจากสภาวะคงตัว มาเป็นสภาวะไม่คงตัวที่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จำแนกออกได้เป็นสี่ประเภท ได้แก่ การอัดตัวของชั้นกระจาย (compression of diffuse layer) การดูดติดและการสะเทินประจุไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization) การดูดติดและเชื่อมต่อนระหว่างอนุภาค (adsorption and interparticle bridging) และการทอหุ้มในผลึก (enmeshment in a precipitate)<sup>(1)</sup>

การอัดตัวของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำ มีปริมาณมากขึ้น ประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีปริมาณมากขึ้นด้วย ยังผลให้ปริมาตรหรือความหนาของชั้นกระจายที่ทำหน้าที่สะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลง การอัดตัวของชั้นกระจายเช่นนี้ทำให้

อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จนแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาค และเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด

การดูดติดและการสะเทินประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามนอกเหนือจากที่มีอยู่ในชั้นตรงและชั้นกระจายถูกดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านี้จะสะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตลอดจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนตัวลงได้ จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

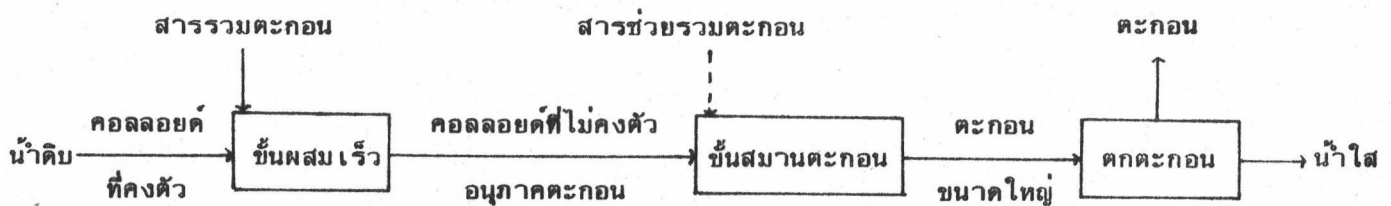
การดูดติดและเชื่อมต่อนี้ระหว่างอนุภาค เริ่มจากการดูดติดด้วยบอนด์ทางเคมี (chemical bond) ระหว่างผิวของคอลลอยด์กับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ อนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ และแยกออกจากน้ำในลักษณะที่เป็นตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ในที่สุด

การห่อหุ้มด้วยผลึก เกิดขึ้นเมื่อมีการตกผลึกของไฮดรอสโพลีเมอร์ (hydraous polymer) ในน้ำ อนุภาคคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกน (nuclei) ของการตกผลึก ถูกห่อหุ้มอยู่ในกลุ่มผลึก และแยกตัวออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่ตกตะกอน

สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวประเภทใดประเภทหนึ่งหรือหลายประเภทร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำและชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวมานี้เป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

### 3.2 ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน

กระบวนการรวมตะกอนประกอบด้วยการทำงานสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนผสมเร็วและขั้นตอนผสมช้า ตะกอน ขั้นตอนผสมเร็วของกระบวนการทำหน้าที่ทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ขั้นตอนผสมช้าทำหน้าที่ผสมคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวและอนุภาคตะกอน (microfloc) ที่ได้จากขั้นตอนผสมเร็วให้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะแยกออกจากน้ำด้วยการตกตะกอน กระบวนการรวมตะกอนมีรูปแบบการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การทำงานของกระบวนการรวมตะกอน

การทำงานของกระบวนการรวมตะกอน เริ่มจากผ่านน้ำดิบที่มีอนุภาคความขุ่นหรือคอลลอยด์ที่คงตัว เข้าสู่ขั้นผสมเร็ว สารรวมตะกอนซึ่งเติมลงในขั้นผสมเร็วจะทำหน้าที่ทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ภายใต้สภาพที่น้ำมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรง คอลลอยด์ที่ถูกทำลายสภาวะคงตัวตลอดจนอนุภาคตะกอนที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างคอลลอยด์กับโพลีเมอร์ของสารรวมตะกอน จะผ่านเข้าสู่ขั้นสมานตะกอนต่อไป ในขั้นสมานตะกอนน้ำจะถูกกวนอย่างช้าๆ ทำให้สารแขวนลอยในน้ำคือคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวกับอนุภาคตะกอนมีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันเป็นตะกอน ซึ่งมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนและการกรองต่อไป อนึ่งในขั้นสมานตะกอน อาจจะมีการเติมสารช่วยรวมตะกอนเพื่อเร่งอัตราสมานตะกอนตลอดจนปรับปรุงคุณภาพตะกอนให้มีความเหนียวและแน่นยิ่งขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการศึกษาในแต่ละกรณี

พฤติกรรมของขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนมีความแตกต่างกันโดยพื้นฐาน กล่าวคือ ปรากฏการณ์ที่เด่นชัดในขั้นผสมเร็วคือปรากฏการณ์ทางเคมีและกายภาพ ปรากฏการณ์ที่เด่นชัดในขั้นสมานตะกอนคือปรากฏการณ์ทางไฮโดรไดนามิกส์ (hydrodynamics)

### 3.2.1 ทฤษฎีของขั้นผสมเร็ว

ทฤษฎีพื้นฐานของขั้นผสมเร็วคือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยสภาวะคงตัวและไม่คงตัวของคอลลอยด์ดังที่ได้กล่าวไว้โดยสังเขปแล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในขั้นผสมเร็ว และพารามิเตอร์ควบคุมประสิทธิภาพของขั้นผสมเร็ว

#### 3.2.1.1 กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ที่เกิดขึ้นในขั้นผสมเร็ว ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพีเอช ชนิดและปริมาณสารรวมตะกอนตลอดจนระดับความปั่นป่วนของ

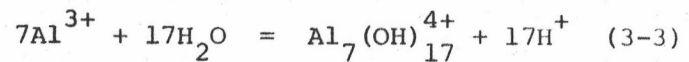
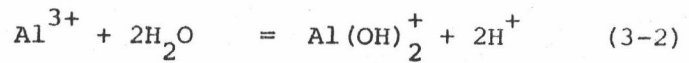
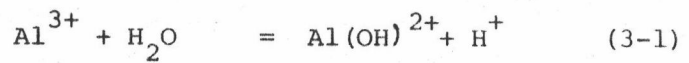
น้ำ ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่นในกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาได้ว่าชนิดของสารรวมตะกอน เป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดประเภทของกลไกในขั้นผสมเร็ว

สารรวมตะกอนที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน จำแนกออกเป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ เกลือของโลหะได้แก่  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$  หรือสารส้ม  $AlCl_3$   $NaAlO_2$   $FeCl_3$   $FeSO_4$   $Fe_2(SO_4)_3$  สารโพลีเมอร์ได้แก่ สารโพลีเมอร์ประจุบวก (cationic polymer) สารโพลีเมอร์ไร้ประจุ (nonionic polymer) และสารโพลีเมอร์ประจุลบ (anionic polymer) ชนิดของสารรวมตะกอนดังกล่าวมาี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประเภทของกลไกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ สารรวมตะกอนที่เป็นเกลือของโลหะอาจทำให้เกิดกลไกแบบกวาด (sweep mechanism) หรือกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization mechanism) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น ลักษณะทางเคมีของน้ำคือพีเอชและปริมาณไอออนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาผสม (mixing time) ในขณะที่สารรวมตะกอนที่เป็นสารโพลีเมอร์จะทำให้เกิดกลไกแบบดูดติดและเชื่อมต้อ (adsorption and bridging mechanism) ทั้งนี้ในกรณีของสารโพลีเมอร์ประจุบวกจะเกิดกลไกดังกล่าวรวมทั้งการสะเทินทางไฟฟ้าอีกด้วย

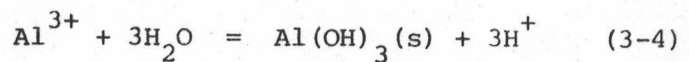
โดยที่สารรวมตะกอนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือสารส้ม ดังนั้นจะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์โดยเกลือของโลหะคือสารส้ม ได้แก่ กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า และกลไกแบบกวาด ดังต่อไปนี้

#### 1. กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก  $Al_2(SO_4)_3$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้  $Al(H_2O)_6^{3+}$  หรือ  $Al^{3+}$  ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ของ  $Al^{3+}$  จะเกิดขึ้นทันทีโดยไลแกนด์ (ligands) ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่ง  $OH^-$  จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นสารคอมเพล็กซ์ (complexes) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (1,3,6) ดังสมการตัวอย่างต่อไปนี้ (4)



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (saturation point) ไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยา (product) สุดท้ายเป็นผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$



ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการดูดติดกับผิวของคอลลอยด์ คือ สารคอมเพล็กซ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก  $\text{Al}^{3+}$  ถึง  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  สารคอมเพล็กซ์ อาจจะมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ<sup>(1,3)</sup> กล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (zero point of charge) ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุลบ เช่น  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$   $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$  ถ้าพีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$  ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการรวมตะกอน จะเกิดสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก เช่น  $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$   $\text{Al}(\text{OH})_3^+$   $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$   $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$

กลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า เกิดจากสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก โดยเริ่มจากการดูดติดระหว่างสารดังกล่าวกับผิวของคอลลอยด์ด้วยโคเวเลนต์บอนด์ (covalent bond) จากนั้นประจุบวกของสารคอมเพล็กซ์จะสะเทินประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง จนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่าและเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด<sup>(3)</sup>

อนึ่ง ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอนมีความสัมพันธ์เป็นสโตอิคิโอเมตริก (stoichiometric) กับความเข้มข้นของคอลลอยด์<sup>(3)</sup> นอกจากนี้ ปริมาณสารรวมตะกอน พีเอช ความเข้มข้นของคอลลอยด์ และระดับความปั่นป่วนของน้ำ ยังมีอิทธิพลต่อกลไกโดยตรง กล่าวคือปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอชกำหนดชนิดและปริมาณของสารคอมเพล็กซ์<sup>(1,3)</sup> ในขณะที่ความเข้มข้นของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำกำหนดโอกาสที่สารคอมเพล็กซ์จะทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์<sup>(5,9)</sup>

## 2. กลไกแบบกวาด

เมื่อเติมสารส้มลงไปใต้น้ำจนมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวไฮโดรลิซิสจะเริ่มจาก  $Al^{3+}$  จนได้  $Al(OH)_3(s)$  ดังแสดงในสมการ (3-4) กลไกแบบกวาดจะเกิดขึ้นโดยผลึก  $Al(OH)_3$  จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก ตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะที่คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในชั้นสมานตะกอน และถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดอย่างเด่นชัดคือ ปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ การตกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากถ้าระดับเกินการอิ่มตัว (extent of oversaturation) ของผลึกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 100 ระดับดังกล่าวนี้แปรตามปริมาณสารรวมตะกอน นอกจากนี้อัตราการตกผลึกยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก อนึ่ง ในกลไกประเภทนี้มีปริมาณสารรวมตะกอนไม่มีความสัมพันธ์ เป็นสโตอิชิโอเมตริกกับความเข้มข้นของคอลลอยด์<sup>(1,3,7)</sup>

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ากลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ในชั้นผสมเร็วทั้งสองประเภทมีความแตกต่างโดยพื้นฐานหลายประการ อย่างไรก็ตามลักษณะรวมกันที่เด่นชัดประการหนึ่งคือผลของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสซึ่งทำหน้าที่ทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก กล่าวคือ ในกรณีของกลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า สารคอมเพล็กซ์จะเกิดขึ้นภายใน  $10^{-10}$  ถึง 1 วินาที และการดูดติดระหว่างสารคอมเพล็กซ์กับผิวของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นภายใน  $10^{-4}$  วินาที<sup>(1,8)</sup> ในกรณีของกลไกแบบกวาดผลึกที่ได้จากไฮโดรลิซิสของสารรวมตะกอนจะเกิดขึ้นภายใน 1 ถึง 7 วินาที<sup>(1,10)</sup> ดังนั้นจึงต้องสร้างความปั่นป่วนของน้ำในชั้นผสมเร็วให้เกิดขึ้นอย่างรุนแรงทั้งนี้เพื่อให้ผลของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสดังกล่าวสามารถสัมผัสและทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ทันทั่วทั้งที่ โดยอาจใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น กวนด้วยเครื่องมือกล (mechanical mixer) ทำให้เกิดไฮดรอลิคจัมพ์ (hydraulic jump) ให้น้ำไหลผ่านคิฟิวเซอร์ (diffuser) ที่มีแผ่นเจาะรู (orifice) ซึ่งเป็นตำแหน่งบ่อนสารรวมตะกอน และใช้เครื่องปั่นตัดในเส้นท่อ (in-line blender) ซึ่งเป็นวิธีทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำอย่างรุนแรงมาก เหมาะสำหรับกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าโดยตรง



### 3.2.1.2 พารามิเตอร์ควบคุมชั้นผสมเร็ว

โดยที่ลักษณะการทำงานของชั้นผสมเร็ว คือ สร้างความปั่นป่วนให้เกิดขึ้นในน้ำอย่างรุนแรงในขณะที่เติมสารรวมตะกอนเพื่อทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ดังนั้น ระดับความปั่นป่วนและเวลาผสม (mixing time) ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำอยู่ภายใต้ความปั่นป่วนดังกล่าว จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือควบคุมการทำงานของชั้นผสมเร็ว พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นดัชนีบอกระดับความปั่นป่วนของน้ำ ได้แก่ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold's number) พาวเวอร์นัมเบอร์ (power number) ฟราวด์นัมเบอร์ (Froude number) และ G หรือความลาดชันของความเร็ว (velocity gradient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการรวมตะกอน Camp & Stein<sup>(20)</sup> ได้ให้นิยามและเสนอสมการคำนวณค่า G ดังต่อไปนี้

$$G = \frac{(P)^{1/2}}{V\mu} \quad (3-5)$$

โดย P คือกำลังงานที่เข้าสู่เรือของเหลว V คือ ปริมาตรของของเหลว และ  $\mu$  คือความหนืดพลศาสตร์ (dynamic viscosity) ของของเหลว ทั้งนี้ค่า G จะมีหน่วยต่อเวลาคือวินาที<sup>-1</sup>

สำหรับพารามิเตอร์ t หรือเวลาผสม เป็นที่น่าสังเกตว่าการพิจารณาอิทธิพลที่แตกต่างกันไป โดยทรศนะแรกพิจารณาจากเวลาที่เกิดกลไก ทรศนะที่สองพิจารณาครอบคลุมไปถึงผลกระทบที่มีต่อชั้นสมานตะกอน โดยในทรศนะแรก Hudson & Wolfner<sup>(21)</sup> Vrale & Jordan<sup>(22)</sup> และ Kawamura<sup>(23)</sup> เสนอว่า t ที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยกว่า 1 วินาที ทั้งนี้พิจารณาจากเวลาของการเกิดสารคอมเพล็กซ์ในกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นภายใน  $10^{-10}$  ถึง 1 วินาที ต่อมา Bratby<sup>(25)</sup> ทำการทดลองพบว่า t ที่เหมาะสมมีค่าน้อยกว่า 8 วินาที โดยใช้เวลาของการเกิดผลึกในกลไกแบบกวาดซึ่งเกิดขึ้นภายใน 1 ถึง 7 วินาที เป็นพื้นฐานในการตัดสินใจ สำหรับอีกทรศนะหนึ่ง Camp<sup>(28)</sup> ทำการทดลองและเสนอว่าค่า t ที่เหมาะสมควรอยู่ในระหว่าง 2 ถึง 2.5 นาที ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอนสูงสุดก่อนที่จะสมานตะกอนในชั้นสมานตะกอนต่อไป นอกจากนี้ Letterman & Quon & Gemmel<sup>(24)</sup> ทำการทดลองพบว่า t ที่เหมาะสมมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 7 นาที และสรุปว่า t ควรีค่าอยู่ในระดับเป็นนาทีโดยให้เหตุผลสนับสนุนว่า เวลาที่นอกเหนือจากเวลาในการเกิดสารคอมเพล็กซ์และผลึก เป็นเวลาสำหรับการสมานตะกอนขั้นต้น (initial flocculation) ซึ่งทำให้การสมานตะกอนในลำดับต่อไปคือในชั้นสมานตะกอนมีประสิทธิภาพ

สูงชันและยังทำให้ได้ตะกอนที่จับตัวดีขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม Bratby<sup>(25)</sup> ระบุจากผลการทดลองว่าค่า  $t$  ที่มากกว่า 2 นาที นอกจากจะไม่เกิดผลดีต่อชั้นสมานตะกอนแล้ว ยังทำลายสมรรถนะของชั้นสมานตะกอนอีกด้วย ที่กล่าวมานี้เป็นทฤษฎีสองด้านที่แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ASCE & AWWA<sup>(27)</sup> และ Ten State Standards<sup>(26)</sup> ยังได้เสนอค่า  $t$  ที่เหมาะสมซึ่งแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้วอีกด้วย โดยเสนอค่า  $t$  10 ถึง 30 วินาที และอย่างน้อย 30 วินาทีตามลำดับ

โดยทั่วไปพารามิเตอร์  $G$  และ  $t$  จะได้รับการพิจารณาควบคู่กันไปในการออกแบบและควบคุมชั้นผสมเร็ว ค่าที่นำมาใช้มักจะกำหนดจากประสบการณ์ หรือเป็นค่าในเชิงเอ็มไพริคัล (empirical value) และขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำ

ในกรณีที่ใช้ใบพัดแบบใบพัดเรือ (propeller impeller) ASCE & AWWA<sup>(27)</sup> แนะนำให้ใช้  $G$  1000 วินาที<sup>-1</sup> ที่  $t$  20 วินาที ไปจนถึง  $G$  700 วินาที<sup>-1</sup> ที่  $t$  มากกว่า 40 วินาที Camp<sup>(28)</sup> แนะนำให้ใช้  $G$  700 ถึง 1000 วินาที<sup>-1</sup> ที่  $t$  2 ถึง 2.5 นาที และ Letterman & Quon & Gemmel<sup>(24)</sup> แนะนำค่า  $t$  ที่เหมาะสม 2.5 นาที ที่  $G$  1000 วินาที<sup>-1</sup> ในกรณีที่ใช้ไฮดรอลิคจัมพ์ค่า  $G$  ที่ใช้โดยทั่วไป<sup>(9)</sup> คือ 800 วินาที<sup>-1</sup> ที่  $t$  2 วินาที ในกรณีที่ใช้คิฟิวเซอร์และเติมสารรวมตะกอนด้วยหัวฉีด (nozzle) Kawamura<sup>(19)</sup> แนะนำให้ใช้  $G$  750 ถึง 1000 วินาที<sup>-1</sup> และ  $t$  1 วินาที และในกรณีที่ใช้เครื่องปั่นตัดในเส้นท่อ Hudson & Wolfner<sup>(21)</sup> แนะนำให้ใช้  $t$  น้อยกว่า 30 วินาที โดย  $G$  มีค่าระหว่าง 3000 ถึง 5000 วินาที<sup>-1</sup>

นอกจากนี้พารามิเตอร์  $G$  และ  $t$  ยังได้รับการเสนอให้ใช้ร่วมกับปริมาณสารรวมตะกอนในการควบคุมการทำงานของชั้นผสมเร็ว โดย Letterman & Quon & Gemmel<sup>(24)</sup> ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสามโดยใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยผงแอคทีเวทคาร์บอน (activated carbon powder) และใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ในเชิงเอ็มไพริคัล ดังต่อไปนี้

$$G \cdot t_{opt} \cdot C^{1.46} = 5.9 \times 10^6 \quad (3-6)$$

โดย  $t_{opt}$  คือ เวลาผสมที่เหมาะสมมีหน่วยเป็นวินาทีและ  $C$  คือ ปริมาณของสารส้มมีหน่วยเป็น  $g/m^3$  ความสัมพันธ์ที่ว่าเป็นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของชั้นผสมเร็วให้มีประสิทธิภาพสูง เช่นในกรณีที่ชั้นผสมเร็วได้รับการออกแบบให้มีค่า  $t$  ที่เหมาะสมแล้ว การควบคุมโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังกล่าว กระทำได้โดยแปรค่า  $G$  ตามปริมาณสารส้มที่ใช้ เพื่อให้ได้เทอม  $G \cdot t_{opt} \cdot C^{1.46}$  มีค่าประมาณ  $5.9 \times 10^6$  อย่างไรก็ตาม ความเบี่ยงเบนจากสมการ (3-6) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของน้ำดิบจริง เป็นสิ่งที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยกันต่อไป

### 3.2.2 ทฤษฎีของชั้นสมานตะกอน

ทฤษฎีของชั้นสมานตะกอนเกี่ยวข้องกับกลไกสมานตะกอน จลนพลศาสตร์ของชั้นสมานตะกอน และพารามิเตอร์ควบคุมชั้นสมานตะกอน ตลอดจนพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอน

#### 3.2.2.1 กลไกสมานตะกอน

การสมานตะกอนคือ การที่อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้ว ตลอดจนอนุภาคตะกอนที่ประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์และโพลีเมอร์ของสารรวมตะกอน เกิดการชนและรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดการสมานตะกอนอาจจำแนกออกเป็นสามประเภทได้แก่<sup>(1)</sup> การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion) การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential setting) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

#### 1. การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูป เป็นพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนหรือสัมผัสกันระหว่างอนุภาคขึ้น<sup>(1,11)</sup> การสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ อัตราสมานตะกอนสามารถแสดงได้ด้วยอัตราที่เปลี่ยนไปของจำนวนอนุภาค ดังต่อไปนี้<sup>(1,12)</sup>

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-4 \alpha \bar{K} T n^2}{3 \mu} \quad (3-7)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรน้ำที่เวลา  $t$   
 $\alpha$  คืออัตราส่วนเกาะติด (sticking ratio) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนที่อนุภาคจะเกาะติดหรือ  
 สมานกันภายหลังจากการชน ดังนั้นจะมีค่าไม่เกิน 1  $\bar{K}$  คือค่าคงที่ของโบลท์มาน (Boltzmann's  
 constant) และ  $T$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์

การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้ เรียกว่า การ  
 สมานตะกอนแบบเพอริโคเนซิส (perikinesis) อัตราสมานตะกอนแบบเพอริโคเนซิสขึ้นกับ  
 ลักษณะทางกายภาพของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิ และขึ้นกับจำนวนของอนุภาค อนึ่งการ  
 สมานตะกอนประเภทนี้จะมีอัตราสมานตะกอนสูงกว่าการสมานตะกอนประเภทอื่น เมื่ออนุภาคมี  
 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน<sup>(1)</sup> และเมื่ออนุภาคตะกอนเพิ่มขนาดจนใหญ่กว่า 1  
 ไมครอน<sup>(14)</sup> การสมานตะกอนแบบเพอริโคเนซิสจะลดบทบาทลงจนเหลือน้อยมาก

## 2. การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์เช่นนี้ เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่  
 ในภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาค  
 ตะกอนหรือตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคตะกอนที่มีขนาดเล็ก-  
 กว่า จนเกิดการชนและสมานกันขึ้นในระหว่างการจมตัว<sup>(11)</sup> อัตราสมานตะกอนสามารถแสดง  
 ได้ด้วยอัตราที่เปลี่ยนแปลงไปของจำนวนตะกอนและอนุภาคตะกอนดังต่อไปนี้<sup>(13)</sup>

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-3\phi dh\alpha}{D^2} \quad (3-8)$$

โดยที่  $\phi$  คือความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน (floc  
 volume fraction)  $h$  คือความลึกของการจมตัว  $d$  และ  $D$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค  
 ตะกอนหรือตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่าตามลำดับ

การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน  
 ดังกล่าวนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังตกตะกอน อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการสมานตะกอนที่เกิดขึ้น  
 ในถังชั้นตะกอน (sludge blanket clarifier) ระหว่างตะกอนภายในชั้นตะกอนกับอนุภาค  
 ตะกอนที่ลอยตัวขึ้นตามทิศทางการไหลของน้ำ ก็สามารถจำลองได้ด้วยสมการ (3-8) ข้างต้นนี้  
 เช่นกัน ในกรณีนี้  $h$  จะหมายถึงความหนาของชั้นตะกอน<sup>(13)</sup>

### 3. การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อเกิดสภาวะการกวนขึ้นในของเหลวคือน้ำ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับน้ำก็จะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดการชนและสมานกันในที่สุด อัตราสมานตะกอนในลักษณะ เช่นนี้สามารถแสดงได้ด้วยอัตราที่เปลี่ยนไปของจำนวนอนุภาค ดังต่อไปนี้<sup>(14)</sup>

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-G}{6} \cdot n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \alpha \quad (3-9)$$

โดยที่ G คือ ความลาดชันของความเร็ว (velocity gradient)  $n_1$  คือจำนวนต่อหน่วยปริมาตรน้ำของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_1$  และ  $n_2$  คือจำนวนต่อหน่วยปริมาตรน้ำของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d_2$

การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางไฮโดรไดนามิกส์เช่นนี้เรียกว่า การสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนซิส (orthokinesis) เมื่อเปรียบเทียบอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดของอนุภาค ปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสมานตะกอนสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนซิสมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน<sup>(1)</sup>

จากที่กล่าวมา จะเห็นว่ากลไกหลักในชั้นสมานตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนคือกลไกสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนซิส ดังนั้นในชั้นสมานตะกอนจึงมีการสร้างสภาวะการเคลื่อนที่ของน้ำให้มีความเร็วที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งต่าง ๆ ในน้ำเพื่อให้เกิดกลไกดังกล่าวขึ้น โดยอาจใช้วิธีทางชลศาสตร์ด้วยการปล่อยให้น้ำไหลผ่านผนังกัน (baffle) หรือใช้วิธีทางกลโดยกวนน้ำด้วยใบพัดแบบต่าง ๆ ได้แก่ แบบใบพาย (paddle) แบบเทอร์ไบน์ (turbine) และแบบใบพัดเรือ (axial flow propeller)

อนึ่ง ในบางกรณีอาจมีการใช้สารช่วยรวมตะกอนหรือสารสมานตะกอน (coagulant aid, flocculant) เพื่อเร่งอัตราสมานตะกอนเช่นสารโพลีเมอร์กลไกสมานตะกอนโดยสารสมานตะกอนดังกล่าวนี้คือกลไกเชื่อมต่อ (bridging mechanism) โดยเริ่มจากอนุภาคคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวจะติดติดกับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ด้วยบอนด์ต่างเคมี เช่น ไฮดรอกไซด์บอนด์ (hydroxide bond) และไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)<sup>(15)</sup> อนุภาคที่ไม่คงตัวดังกล่าวหลายอนุภาคจะเข้าใกล้กันโดยการเชื่อมต่อของโมเลกุลสารโพลีเมอร์จนเกิดการชนและสมานกันในที่สุด อัตราสมานตะกอนโดยสารโพลีเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น

อัตราดูดติดระหว่างอนุภาคกับโมเลกุลสารโพลีเมอร์ และอัตราการชนระหว่างอนุภาคที่ถูกเชื่อมต่อกับโมเลกุลสารโพลีเมอร์<sup>(16)</sup> ทั้งนี้อัตราดูดติดขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของอนุภาคและสารโพลีเมอร์ และมีอัตราเร็วของปฏิกิริยาสูงกว่าอัตราการชน ดังนั้น อัตราสมานตะกอนโดยสารโพลีเมอร์จึงถูกกำหนดโดยอัตราการชนระหว่างอนุภาค<sup>(15-17)</sup> และสามารถแสดงได้ด้วยอัตราที่เปลี่ยนไปของจำนวนอนุภาค ดังต่อไปนี้<sup>(16)</sup>

$$\frac{dn}{dt} = -kn \quad (3-10)$$

โดย K คือ ค่าคงที่ของความเร็ว (rate constant)

ซึ่งขึ้นกับค่า G และ  $\phi$

### 3.2.2.2 จลนพลศาสตร์ของชั้นสมานตะกอน

จลนพลศาสตร์ของการสมานตะกอนแบบออร์โตโคเนซิสซึ่งเป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นในชั้นสมานตะกอน เริ่มจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาค ซึ่งเสนอโดย Smoluchowski<sup>(40)</sup> และ Camp & Stein<sup>(20)</sup> ได้พัฒนาขึ้น เป็นสมการที่แสดงว่าอัตราการชนระหว่างอนุภาคขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของอนุภาค ตลอดจนความลาดชันของความเร็ว ดังต่อไปนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{G}{6} (d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \quad (3-11)$$

โดยที่  $\frac{dn}{dt}$  คืออัตราการชนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า สมการดังกล่าวนี้พัฒนามาจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาค ซึ่งกำหนดขึ้นจากการไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) นอกจากนี้พารามิเตอร์ G ซึ่งเสนอโดย Camp & Stein<sup>(20)</sup> และนำมาใช้ในสมการนี้ก็กำหนดหรือนิยามจากการไหลแบบลามินาร์เช่นกัน ในขณะที่การไหลของน้ำในชั้นสมานตะกอนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)<sup>(41)</sup> หรือในบางกรณีเป็นการไหลที่อยู่ในช่วงเปลี่ยน (transition zone)<sup>(9)</sup> ลักษณะเช่นนี้ทำให้สมการ (3-11) มีความเบี่ยงเบนโดยพื้นฐาน ต่อมา Levich<sup>(41)</sup> ได้เสนอสมการแสดงอัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน ดังต่อไปนี้

$$\frac{dn}{dt} = 12\pi kG (d_1 + d_2)^3 n_1 n_2 \quad (3-12)$$

โดยที่  $K$  คือค่าคงที่และมีค่าประมาณ  $\frac{1}{\sqrt{5}}$  จากผลการทดลองของ Fuchs<sup>(42)</sup> ดังนั้น อัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน คือ

$$\frac{dn}{dt} = \frac{12\pi}{\sqrt{5}} G(d_1+d_2)^3 n_1 n_2 \quad (3-13)$$

จากสมการ (3-11) และ (3-13) จะเห็นว่าอัตราการชนภายใต้การไหลแบบลามินาร์มีค่าน้อยกว่าอัตราการชนภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงประมาณ 7 เท่า อย่างไรก็ตาม Tambo<sup>(34)</sup> พบว่าเมื่อใช้เครื่องมือกลในการกวนน้ำ กำลังงานที่กระจายเข้าสู่ระบบจะมีค่าเพียงประมาณ 10% โดยส่วนใหญ่ของกำลังงานจะอยู่ในน้ำบริเวณขอบใบพัด ทำให้ค่าพลังงานเข้าสู่พื้นที่น้ำไปคำนวณในสมการค่า  $G$  ของ Camp & Stein<sup>(20)</sup> สูงเกินความจริงและได้ค่า  $G$  สูงเกินความจริงในที่สุด ดังนั้น ความเปียงเบนของสมการ (3-11) จึงลดน้อยลง และพอที่จะใช้ทำนายอัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนได้ในกรณีที่ใช้เครื่องมือกลกวนน้ำ

โดยพิจารณาจากผลการศึกษาของ Robeck<sup>(42)</sup> ที่พบว่า น้ำดื่มที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาประกอบด้วยอนุภาคความขุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในขณะที่อนุภาคตะกอนและตะกอนในชั้นสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน Hudson<sup>(14)</sup> ได้พัฒนาสมการ (3-11) ให้ง่ายขึ้น โดยถือว่าขนาดของอนุภาคในน้ำ,  $d_1$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคตะกอนและตะกอน,  $d_2$  นอกจากนี้ยังได้เปลี่ยนเทอม  $\frac{dn}{dt}$  ซึ่งหมายถึงอัตราการชนระหว่างอนุภาคมาเป็นอัตราสมานตะกอน โดยเพิ่มอัตราส่วนเกาะติด,  $\alpha$  ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่สมานตัวกันภายหลังจากการชน เข้าไว้ในเทอมขวามือของสมการ (3-11) ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-G}{6} \cdot d_2^3 \cdot n_1 n_2 \cdot \alpha \quad (3-14)$$

จากสมการ (3-14) Hudson<sup>(14)</sup> เปลี่ยนจำนวนและขนาดของอนุภาคตะกอนหรือตะกอน,  $n_2$  และ  $d_2$  มาอยู่ในรูปของความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน,  $\phi$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\frac{n_2 \pi d_2^3}{6}$  ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-G}{\pi} n_1 \cdot \phi \cdot \alpha \quad (3-15)$$

เมื่ออินทิเกรต (integrate) สมการ (3-15) จะได้สมการ แสดงประสิทธิภาพของชั้นสमानตะกอน ดังนี้

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(\frac{-G\phi\alpha \cdot t}{\pi}\right) \quad (3-16)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรน้ำที่เวลา  $t$  และ  $n_0$  คือจำนวนอนุภาคต่อปริมาตรน้ำเมื่อ  $t = 0$  สมการ (3-16) ที่ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของชั้นสमानตะกอนแปรตามความลาดชันของความเร็ว ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน อัตราส่วนเกาะติด และเวลาสमानตะกอน

อย่างไรก็ตาม สมการ (3-11) ของ Camp & Stein<sup>(20)</sup> ซึ่ง Hudson<sup>(14)</sup> และนักวิจัยจำนวนมากนำมาประยุกต์ใช้ยังมีข้อจำกัดเป็นอย่างมาก กล่าวคือสามารถใช้ได้ในกรณีที่มีขนาดเท่ากันหรือมีขนาดแตกต่างกันสองขนาด Swift & Friedlander<sup>(12)</sup> และ Harris & Kaufman & Krone<sup>(43)</sup> จึงพัฒนารูปแบบของสมการให้สามารถใช้ได้กับอนุภาคที่มีขนาดแตกต่างกันโดยไม่จำกัด ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในชั้นสमानตะกอน ดังต่อไปนี้

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(\frac{-\beta a^3 G\phi\alpha t}{\pi}\right) \quad (3-17)$$

โดยที่  $a$  คืออัตราส่วนระหว่างรัศมีของการชน (collision radius) ต่อรัศมีของอนุภาค และ  $\beta$  คือ ฟังก์ชันการกระจาย (distribution function) ของขนาดอนุภาค

ที่กล่าวมานี้ เป็นสมการสำหรับถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์ (complete stirred tank reactor) ซึ่งทำหน้าที่เป็นถังสमानตะกอนในชั้นสमानตะกอนเพียงใบเดียว โดยทั่วไปชั้นสमानตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาจะประกอบด้วยถังสमानตะกอนหลายใบที่ต่อกันเป็นอนุกรม O'Melia<sup>(1)</sup> ได้เสนอสมการสำหรับอนุกรมถังสमानตะกอน ดังต่อไปนี้

$$\frac{n_m}{n_0} = \left(\frac{4G\phi\alpha \cdot T}{\pi m} + 1\right)^{-m} \quad (3-18)$$



โดยที่  $m$  คือจำนวนถังสมานตะกอน  $n_m$  คือจำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรน้ำในน้ำที่ออกจากถังสมานตะกอนใบสุดท้าย และ  $T$  คือ เวลาสมานตะกอนหรือเวลากักน้ำทั้งหมดของอนุกรมถังสมานตะกอน

อนึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นควบคู่กับการสมานตะกอนในชั้นสมานตะกอน คือ การกร่อน (erosion) หรือการแตกตัว (break up) ของตะกอนอันเกิดจากแรงเฉื่อยภายใต้ความลาดชันของความเร็วที่เกิดขึ้นในน้ำ<sup>(44,45)</sup> Argaman & Kaufman<sup>(36)</sup> ได้เสนอสมการสำหรับถังสมานตะกอนเดี่ยว และอนุกรมถังสมานตะกอนซึ่งครอบคลุมถึงการแตกตัวของตะกอน ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$\frac{n}{n_0} = \frac{1 + K_a G^2 t}{1 + K_b G t} \quad (3-19)$$

$$\frac{n_m}{n_0} = \frac{1 + K_b G^2 T \cdot \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(1 + K_a G T)^i}{m}}{1 + K_a G T \frac{m}{m}} \quad (3-20)$$

โดยที่  $K_a$  คือ ค่าคงที่ในการรวมตัว (aggregation constant) และ  $K_b$  คือค่าคงที่ในการแตกตัว (break-up constant) ในกรณีที่ใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนและอนุภาคความขุ่นเป็นอนุภาคดินเหนียว (clay particle)  $K_a$  จะมีค่า  $10^{-4}$  และ  $K_b$  จะมีค่า  $10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> โดยประมาณ สมการ (3-19) และ (3-20) ซึ่งให้เห็นว่า ที่ประสิทธิภาพเดียวกัน เวลาสมานตะกอนของอนุกรมถังสมานตะกอนจะน้อยกว่าถังสมานตะกอนเดี่ยว และไม่ว่าที่ค่า  $G$  ใด ๆ การสมานตะกอนจะไม่เกิดขึ้น ถ้าเวลาสมานตะกอนไม่มากพอที่จะทำให้อัตราสมานตะกอนสูงกว่าอัตราแตกตัวของตะกอน

### 3.2.2.3 พารามิเตอร์ควบคุมชั้นสมานตะกอน

จากสมการหลักทางจลนพลศาสตร์ของชั้นสมานตะกอน ดังที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนครอบคลุมตั้งแต่ ระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งแสดงในเทอมความลาดชันของความเร็ว เวลาสมานตะกอนซึ่งแสดงในเทอมเวลากักน้ำ ปริมาณตะกอนซึ่งแสดงในเทอมความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน ความสามารถในการสมานตัวภายหลังการชนซึ่งแสดงในเทอมอัตราส่วนเกาะติด การกระจายของขนาดอนุภาคซึ่งแสดงในเทอมฟังก์ชันการกระจาย ไปจนถึงการแตกตัวของตะกอนซึ่งแสดงใน -

เทอมค่าคงที่ของการแตกตัว อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ ปัจจัยที่ได้รับการนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของชั้นสมานตะกอนคือ ความลาดชันของความเร็ว,  $G$  และเวลากักน้ำ, HRT (hydraulic residence time) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรอิสระของชั้นสมานตะกอนและไม่ขึ้นกับการทำงานของชั้นผสมเร็วเช่นพารามิเตอร์อื่นแต่อย่างใด

พารามิเตอร์  $G$  และ HRT มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของตะกอน กล่าวคือ ตะกอนจะมีขนาดจำกัดที่ค่า  $G$  หนึ่ง ๆ และขนาดของตะกอนจะแปรตามค่า HRT ในขณะที่แปรกลับกับค่า  $G$  อย่างไรก็ตาม แม้ว่าที่ค่า  $G$  สูงๆจะทำให้ได้ตะกอนขนาดเล็ก ตะกอนที่ได้จะมีความแน่น (dense) กว่าตะกอนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า  $G$  ที่ต่ำกว่า<sup>(14,30,44,47,53)</sup> ที่กล่าวมาจะเห็นว่า ค่า  $G$  และ HRT ที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพชั้นสมานตะกอนสูงขึ้นเสมอ แต่เมื่อพิจารณาครอบคลุมไปถึงการตกตะกอนซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในระบบผลิตน้ำประปา ค่า  $G$  และ HRT จะต้องมีช่วงค่าจำกัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตะกอนที่จับตัวได้ดี ดังนั้นเมื่อ Camp<sup>(48)</sup> ทำการวิเคราะห์ชั้นสมานตะกอนในระบบผลิตน้ำประปา จึงพบว่าพารามิเตอร์ไร้มิติที่เกิดจากผลคูณระหว่าง  $G$  และ HRT จะมีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง  $2 \times 10^4$  ถึง  $2 \times 10^5$  และค่า  $G$  ที่เหมาะสมคือ 20 ถึง 70 วินาที<sup>-1</sup> ต่อมา Fair, Geyer & Okun<sup>(49)</sup> Gemmel<sup>(50)</sup> และ O'Melia<sup>(1)</sup> ได้เสนอว่า  $G \cdot HRT$  ที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่าง  $10^4$  ถึง  $10^5$  โดยที่  $G$  ควรมีค่าจาก 10 ถึง 100 วินาที<sup>-1</sup> ช่วงค่า  $G \cdot HRT$  และ  $G$  ดังกล่าวมานี้เป็นเกณฑ์ออกแบบและควบคุมชั้นสมานตะกอนกันโดยทั่วไป นอกจากนี้ Andreu-Villegas & Letterman<sup>(51)</sup> ยังได้ทำการทดลองโดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน และใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยคาโอลิไนท์ (kaolinite) ปรากฏผลว่าค่า  $G$  ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 วินาที<sup>-1</sup> ค่า HRT ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 นาที โดยระบุว่าค่า HRT ที่มากไปกว่านี้จะไม่เพิ่มสมรรถนะของการสมานตะกอนแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $G$  ที่เหมาะสม กับ HRT และปริมาณสารส้ม ในเชิงเอมพิริคัลดังต่อไปนี้

$$(G^*)^{2.8} \text{HRT} \cdot C = 44 \times 10^5 \quad (3-21)$$

โดยที่  $G^*$  คือค่า  $G$  ที่ให้ความชุ่มภายหลังการสมานตะกอนและตกตะกอนน้อยที่สุด มีหน่วยเป็นวินาที<sup>-1</sup> HRT มีหน่วยเป็นนาที และ  $C$  เป็นปริมาณสารส้มในช่วง 0 ถึง 50 ก/ม<sup>3</sup> สมการนี้เป็นตัวอย่างที่ดีที่แสดงถึงการพัฒนาพารามิเตอร์  $G$  ซึ่งใช้ออกแบบและควบคุมชั้นสมานตะกอนให้มีความสัมพันธ์ครอบคลุมไปถึงการทำงานของชั้นผสมเร็ว

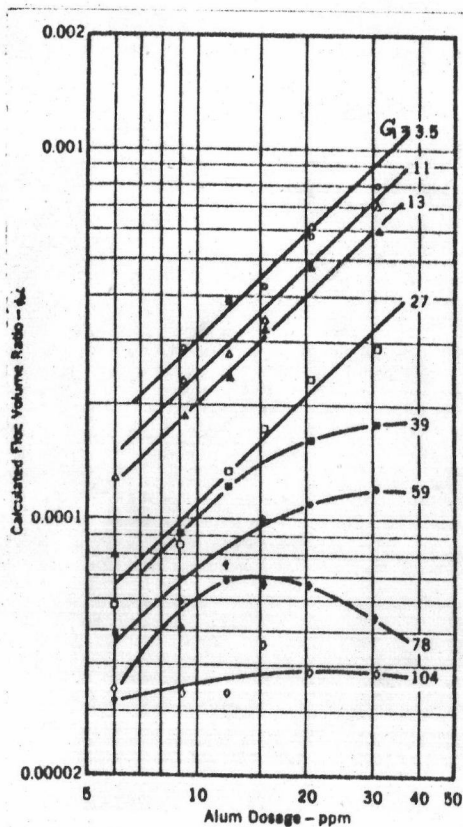
สำหรับพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนได้แก่  $\alpha$  และ  $\beta$  มีบทบาทจำกัดเพียงนำมาใช้ทำนายประสิทธิภาพเท่านั้น  $\alpha$  เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับระดับการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ในชั้นผสมเร็ว O'Melia<sup>(1)</sup> ได้รวบรวมผลการวิจัยของ Swift & Friedlander<sup>(12)</sup> Birkner & Morgan<sup>(16)</sup> และ Hahn & Stumm<sup>(8)</sup> พบว่า ค่า  $\alpha$  มีความแปรปรวนมาก โดยมีค่าจาก 0.010 ถึง 0.448 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการในชั้นผสมเร็วได้แก่ ชนิดของคอลลอยด์ ชนิดของสารรวมตะกอน และระดับความปั่นป่วนในน้ำ ส่วน  $\beta$  เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับจำนวนอนุภาคตะกอนที่ได้จากชั้นผสมเร็ว Harris & Kaufman & Krone<sup>(43)</sup> เสนอสมการสำหรับประมาณค่า  $\beta$  ดังนี้

$$\beta = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} n_i n_j (i^{1/3} + j^{1/3})}{\sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} n_i n_j (i+j)} \quad (3-22)$$

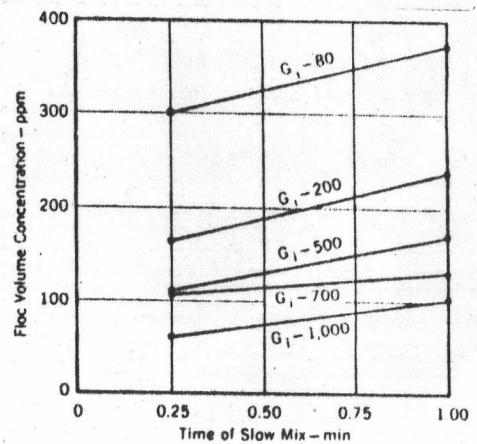
โดยที่  $i$  คือ จำนวนอนุภาคที่ประกอบกันเป็นอนุภาคตะกอนซึ่งมีจำนวน  $n_i$  และ  $j$  คือ จำนวนอนุภาคที่ประกอบกันเป็นอนุภาคตะกอนซึ่งมีจำนวน  $n_j$

สำหรับ พารามิเตอร์ที่แสดงถึงปริมาณตะกอนในชั้นสมานตะกอนคือ  $\phi$  Hudson<sup>(14)</sup> ได้ทำการทดลองโดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนและใช้สมการ (3-16) ในการวิเคราะห์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า  $\phi$  มีค่าแปรตามปริมาณสารรวมตะกอนโดยมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (linear relation) ภายใต้อัตรา  $G$  ของชั้นสมานตะกอนตั้งแต่ 3.5 ถึง 27 วินาที นอกจากนี้ที่ปริมาณสารรวมตะกอนหนึ่ง ๆ  $\phi$  จะมีค่าแปรกลับกับค่า  $G$  ของชั้นสมานตะกอนเสมอ อนึ่ง เป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดลองครั้งนี้ Hudson<sup>(14)</sup> ประมาณว่ามีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 1 ซึ่งเป็นค่าที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยอื่นๆ<sup>(8,12,16)</sup> ต่อมา Camp<sup>(28)</sup> ทำการทดลองโดยใช้  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  เป็นสารรวมตะกอนและคำนวณค่า  $\phi$  จากขนาดและจำนวนของตะกอนที่ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ การทดลองดังกล่าวนี้ครอบคลุมถึงการเปลี่ยนแปลงของ  $\phi$  ทั้งในชั้นผสมเร็วและชั้นสมานตะกอน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.3

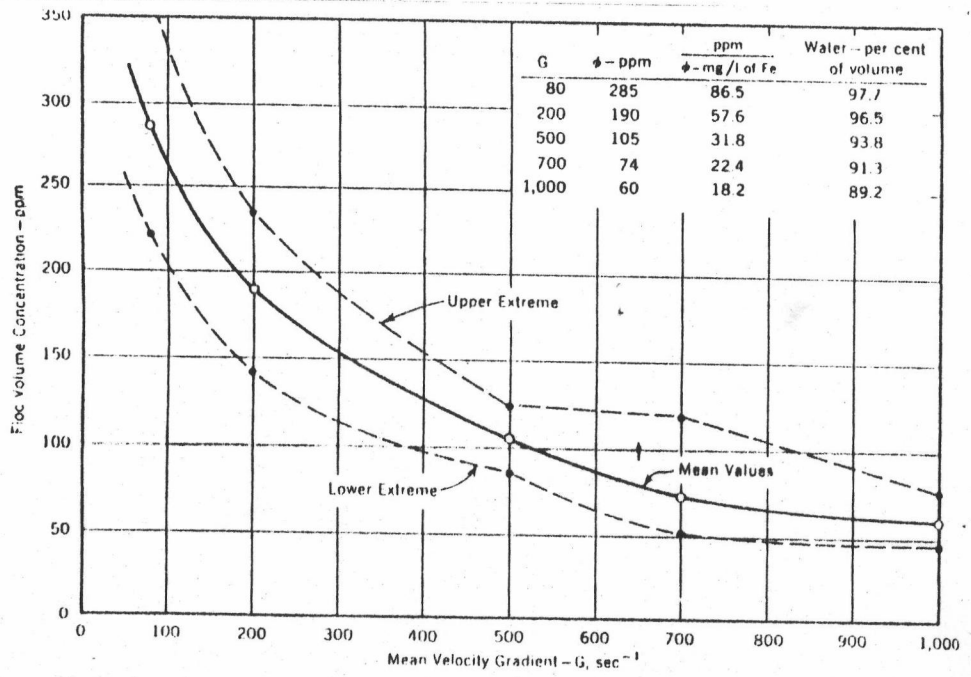
จะเห็นว่า ในขั้นผสมเร็ว  $\phi$  มีค่าแปรกลับกับค่า  $G$  และจะมีค่าคงที่ภายหลังเวลาผสม 3 ถึง 6 นาที (รูปที่ 3.3 ก และ 3.3 ข) เมื่อเข้าสู่ขั้นสมานตะกอน  $\phi$  จะมีค่ามากขึ้นตามเวลาสมานตะกอน (รูปที่ 3.3 ค) ทั้งนี้ Camp<sup>(28)</sup> ได้ให้เหตุผลว่าเกิดจากปริมาณน้ำที่แทรกในตะกอนระหว่างการสมานตะกอน จากการทดลองของ Hudson<sup>(14)</sup> และ Camp<sup>(28)</sup> ดังกล่าวมานี้สรุปได้ว่า  $\phi$  เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับปัจจัยทั้งในขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอน กล่าวคือ  $\phi$  มีค่าแปรตามปริมาณสารรวมตะกอน มีค่าแปรกลับกับค่า  $G$  ทั้งในขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอน มีค่าแปรตามเวลาสมานตะกอน และมีค่าแปรตามเวลาผสมก่อนที่การสมานตะกอนขั้นต้น (initial flocculation) ของขั้นผสมเร็วจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ นั่นคือภายใน 3 ถึง 6 นาที แรกของเวลาผสม



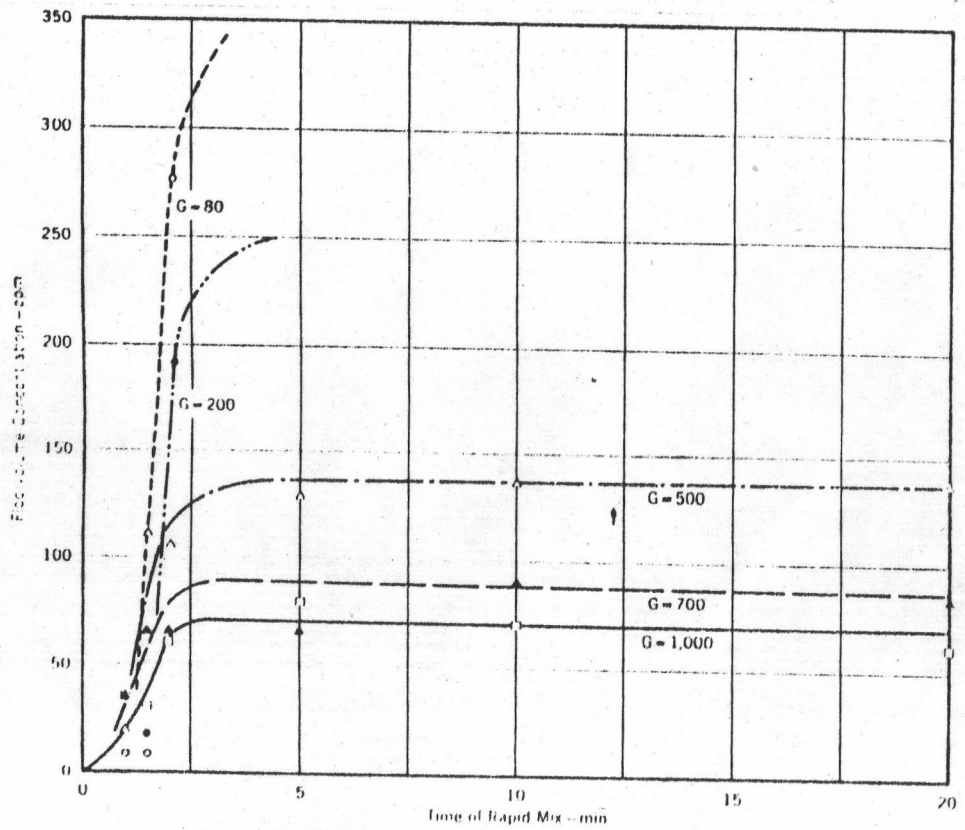
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  กับ ปริมาณสารส้ม และ  $G$  ของขั้นสมานตะกอน



รูปที่ 3.3 ค ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  กับ เวลาสมานตะกอน ภายใต้  $G$  10 วินาที<sup>-1</sup>



รูปที่ 3.3 ก ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  กับ G ในชั้นผสมเร็ว



รูปที่ 3.3 ข ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  กับเวลาผสมในชั้นผสมเร็ว

โดยทั่วไป พารามิเตอร์  $\phi$  จะได้รับการนำมาใช้ออกแบบถังหมุนเวียนตะกอนในตู้และถังขึ้นตะกอนเป็นหลักใหญ่ ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกรณ์ดังกล่าวมีปริมาณตะกอนสูงกว่าในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานมาก ทำให้  $\phi$  มีบทบาทอย่างเด่นชัดทั้งในการสมานตะกอนและการจมตัวของขึ้นตะกอนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ทั้งสอง ในกรณีแรก Ives<sup>(54)</sup> เสนอให้ใช้พารามิเตอร์ไร้มิติ  $G\phi T$  ในการทำนายการสมานตะกอนที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้

$$\frac{L_u}{L_1} G_L \phi_L T_L = \left\{ \frac{(\gamma_s - \gamma)}{4Q\mu f^{9/2}} \right\}^{1/2} \int_{L_1}^{L_u} L \left\{ 1 - \left( \frac{L_1}{L} \right)^2 \right\}^{9/4} dL \quad (3-23)$$

โดยที่  $T_L$  คือเวลากักน้ำที่ระดับ  $L$   $\gamma_s$  และ  $\gamma$  คือน้ำหนักจำเพาะของตะกอนและน้ำตามลำดับ  $L_1$  และ  $L_u$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของส่วนล่างและส่วนบนของรูปตัดโคน (conic frustum) ที่มีมุม  $54^\circ$  ตามลำดับ  $Q$  คืออัตราไหลของน้ำ และ  $f$  คือแฟคเตอร์ของรูปร่างตะกอน (shape factor) Ives<sup>(54)</sup> แนะนำค่าที่เหมาะสมของ  $G\phi T$  สำหรับขึ้นสมานตะกอนของถังปฏิกรณ์ดังกล่าวว่าอยู่ในช่วง 60 ถึง 120 ในขณะที่ Gemmel<sup>(50)</sup> และ O'Melia<sup>(1)</sup> แนะนำค่า  $G\phi T$  ที่เหมาะสมประมาณ 100 สำหรับในกรณีที่สอง Richardson & Zaki<sup>(55)</sup> และ Bond<sup>(56)</sup> ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi$  กับอัตราจมตัวของขึ้นตะกอน ซึ่งนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการทำนายอัตราจมตัวของขึ้นตะกอนในถังปฏิกรณ์ทั้งสอง ดังแสดงในสมการ (3-24) และ (3-25) ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$V_s = V_p (1 - \phi)^n \quad (3-24)$$

$$V_s = V_p (1 - f\phi^{2/3}) \quad (3-25)$$

โดยที่  $V_s$  และ  $V_p$  คือ อัตราจมตัวของขึ้นตะกอนและตะกอนโดด (individual floc) ตามลำดับ และ  $n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งขึ้นกับขนาด ความหนาแน่น และรูปร่างของตะกอน สมการทั้งสองชี้ให้เห็นว่า อัตราจมตัวของขึ้นตะกอนจะลดลงเมื่อ  $\phi$  มีค่ามากขึ้น

### 3.3 การใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอน

ในที่นี้ จะกล่าวถึงการใช้ตะกอนในลักษณะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่แนวความคิดในการใช้ตะกอน ตลอดจนแนวความคิดในการควบคุมกระบวนการเมื่อมีการใช้ตะกอน ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการวิจัยครั้งนี้

### 3.3.1 แนวความคิดในการใช้ตะกอน

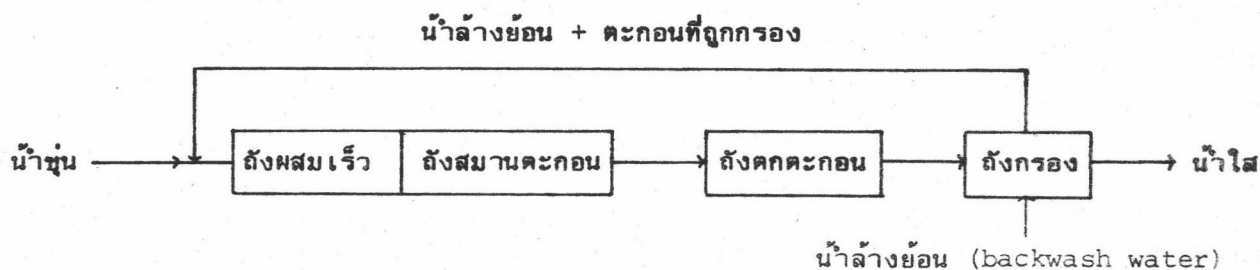
การใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนมีหลักการทางทฤษฎีจากสมการทางจลนพลศาสตร์ของชั้นสมานตะกอนที่แสดงถึงอิทธิพลของปริมาณตะกอนในเทอม  $\phi$  ที่มีต่อประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอน ในที่นี้จะแสดงสมการ (3-16) ซึ่งเสนอโดย Hudson<sup>(14)</sup> เป็นตัวอย่างของสมการทางจลนพลศาสตร์ ดังต่อไปนี้

$$\frac{n}{n_0} = \exp\left(\frac{-Gt\phi\alpha}{\pi}\right)$$

พิจารณาสมการดังกล่าวเป็นสองลักษณะ ลักษณะแรก เมื่อเพิ่มค่า  $\phi$  โดยที่พารามิเตอร์ควบคุมชั้นสมานตะกอนคือ  $G$  และ  $HRT$  มีค่าคงเดิม  $\frac{n}{n_0}$  จะมีค่าน้อยลง นั่นคือประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนสูงขึ้น ลักษณะที่สอง เมื่อลดค่า  $G$  หรือ  $HRT$  จะสามารถทำให้  $\frac{n}{n_0}$  มีค่าเท่าเดิมหรือประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนคงเดิมได้ โดยเพิ่มค่า  $\phi$  ในสัดส่วนเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณตะกอนทำให้ประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนสูงขึ้นและที่ระดับประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนหนึ่ง ๆ การลดค่า  $G$  หรือ  $HRT$  สามารถทดแทนได้ด้วยการเพิ่มปริมาณตะกอน หลักการดังกล่าวนี้กล่าวได้ว่าการประยุกต์ใช้ในสองกรณี กรณีแรกเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน กรณีที่สองเป็นการลดความต้องการกำลังงาน และขนาดของส่วนรวมตะกอนภายในถังหมุนเวียนตะกอนในตัวและถังขึ้นตะกอน การใช้ตะกอนในแต่ละกรณีมีวิธีการที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

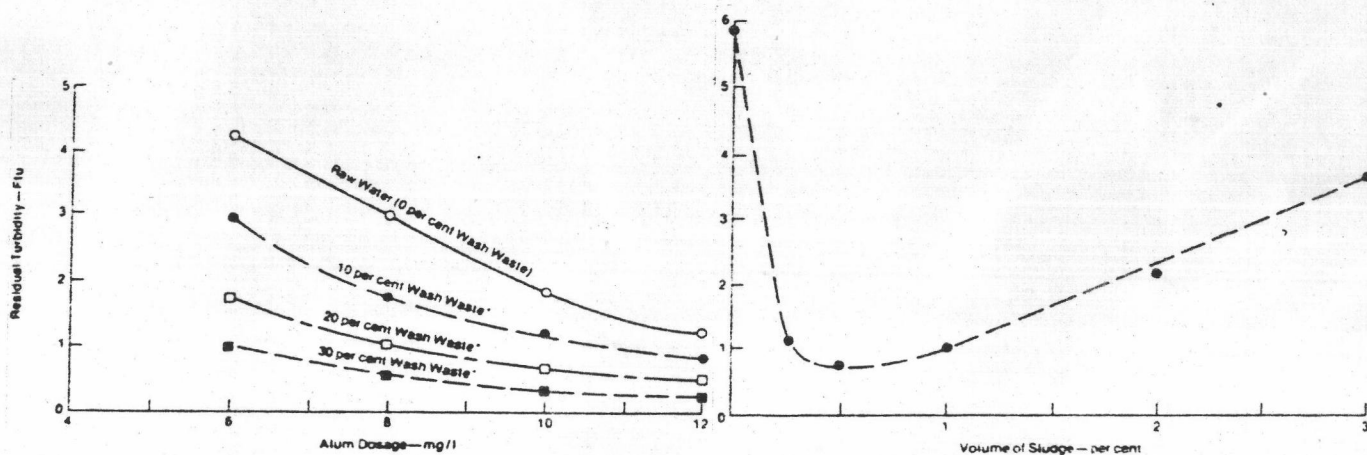
#### 1. การใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน

กระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน (conventional coagulation process) เป็นกระบวนการที่มีการไหลของน้ำผ่านถังผสมเร็ว และถังสมานตะกอนในแนวราบ (horizontal flow) การสมานตะกอนเกิดขึ้นแบบไหลผ่านครั้งเดียว (one-pass flocculation) ไม่มีการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ในกระบวนการอีกแต่อย่างใด ดังนั้นจึงมีปริมาณตะกอนน้อยมากคือมีค่า  $\phi$  อยู่ในลำดับ 0.001<sup>(14)</sup> ลักษณะเช่นนี้ทำให้มีอัตราสมานตะกอนต่ำ หรืออีกนัยหนึ่งต้องใช้เวลาสมานตะกอนในเทอม  $HRT$  มากทำให้ถังสมานตะกอนมีขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพตามต้องการ EPA ได้แนะนำให้มีการใช้ตะกอนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานดังกล่าวนี้ โดยหมุนเวียนน้ำล้างเครื่องกรอง (filter backwash water) กลับเข้าสู่กระบวนการรวมตะกอนอีกครั้งหนึ่ง<sup>(19)</sup> รูปแบบการใช้ตะกอนจากน้ำล้างเครื่องกรองแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแบบการใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอน

ในกรณีของการใช้ตะกอนในลักษณะดังกล่าวนี้ Kawamura<sup>(57)</sup> ได้ทำการทดลองแบบจาร์ (jar test) โดยใช้ น้ำล้างเครื่องกรองจากระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้สารส้ม ในกระบวนการรวมตะกอนมาทดลองในสามลักษณะ คือใช้น้ำล้างเครื่องกรองโดยตรง ใช้น้ำใสที่ได้จากการปล่อยให้ น้ำล้างเครื่องกรองตกตะกอนเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง และใช้ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนของน้ำล้างเครื่องกรองดังกล่าว ผลการทดลองสรุปได้ว่า ในกรณีที่ใช้น้ำล้างเครื่องกรองโดยตรงในช่วง 0 ถึง 30 % ของปริมาณน้ำดิบ ประสิทธิภาพของการสมานตะกอน และการตกตะกอนจะสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ของน้ำล้างเครื่องกรอง (รูปที่ 3.5 ก) ในกรณีที่ใช้น้ำใสของน้ำล้างเครื่องกรองผสมกับน้ำดิบที่อัตราส่วนต่าง ๆ ประสิทธิภาพของการสมานตะกอนจะสูงขึ้น อย่างไรก็ตามโดยที่น้ำใสดังกล่าวมีความขุ่นน้อยกว่าน้ำดิบ จึงเชื่อว่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเกิดจากผลของการเจือจางมากกว่าผลของการเพิ่มปริมาณตะกอน และในกรณีที่ใช้ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนของน้ำล้างเครื่องกรอง ประสิทธิภาพของการสมานตะกอนและการตกตะกอนจะสูงขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อใช้ตะกอนเป็นปริมาณ 0.2 ถึง 1 % ของปริมาณน้ำดิบ (รูปที่ 3.5 ข)



รูปที่ 3.5 ก เมื่อใช้น้ำล้างเครื่องกรองโดยตรงผสมกับน้ำดิบ

รูปที่ 3.5 ข เมื่อใช้ตะกอนที่ได้จากการตกตะกอน 24 ชม. ของน้ำล้างเครื่องกรองผสมกับน้ำดิบ

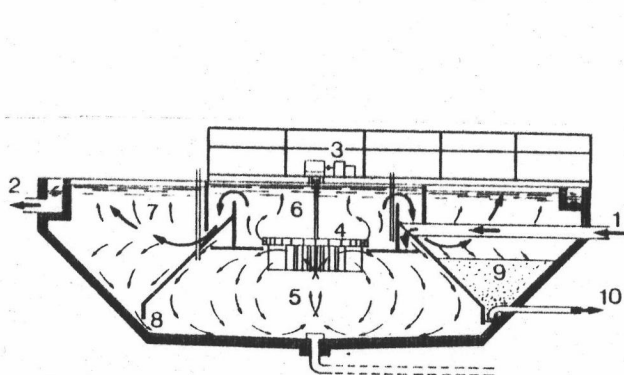


ต่อมา Kawamura<sup>(58)</sup> ทำการทดลองในระบบผลิตน้ำประปาโดยหมุนเวียนน้ำล้างเครื่องกรองกลับมาผสมกับน้ำดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการรวมตะกอน ผลปรากฏว่าเมื่อหมุนเวียนน้ำล้างเครื่องกรองน้อยกว่า 10 % ของน้ำดิบโดยปริมาตร จะไม่เกิดภาระกระตุก (shock load) ในกระบวนการรวมตะกอนแต่อย่างใด และสามารถลดปริมาณสารรวมตะกอนคือ สารส้มได้ถึง 20 % โดยที่ยังคงประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้เท่ากับเมื่อไม่มีการหมุนเวียนน้ำล้างเครื่องกรอง นอกจากนี้ยังพบว่าตะกอนที่มีอายุมากกว่าสองหรือสามวันจะสูญเสียประสิทธิผล (effectiveness) ดังกล่าว

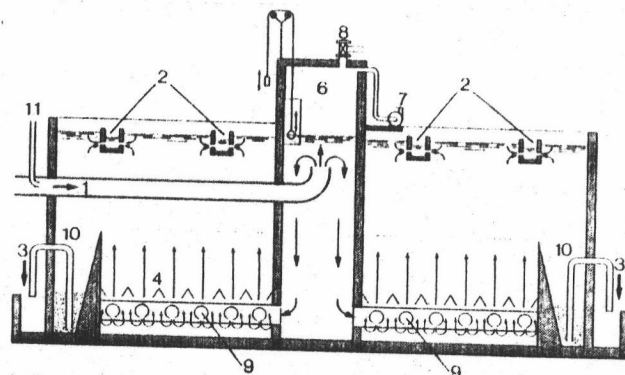
## 2. การใช้ตะกอนในถังหมุนเวียนตะกอนในตัวและถังชั้นตะกอน

ถังหมุนเวียนตะกอนในตัว (sludge recirculation clarifier) เป็นถังปฏิกรณ์ที่รวบรวมกระบวนการรวมตะกอนกับการตกตะกอนไว้ในโครงสร้างเดียวกัน โดยมีลักษณะทางกลศาสตร์ที่บังคับให้ตะกอนหมุนเวียนกลับเข้าสู่ส่วนรวมตะกอนภายในถังตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ก ตะกอนที่หมุนเวียนกลับดังกล่าวนี้อาจเป็นตะกอนจากชั้นตะกอน (sludge blanket) ที่เกิดขึ้นในส่วนตกตะกอนหรือเป็นตะกอนที่ผ่านการอัดตัวบ้างแล้ว (semi-thickened sludge) จากด้านล่างของส่วนตกตะกอน อนึ่ง การสมานตะกอนในถังปฏิกรณ์ประเภทนี้จะเกิดขึ้นทั้งในชั้นสมานตะกอนของส่วนรวมตะกอน และในชั้นตะกอนของส่วนตกตะกอน

ถังชั้นตะกอน (sludge blanket clarifier) เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีลักษณะทางกลศาสตร์ ซึ่งทำให้เกิดดุลยภาพระหว่างอัตราจมตัวของชั้นตะกอนที่เกิดขึ้นกับอัตราไหลขึ้นของน้ำในแนวตั้ง ดังนั้นตะกอนที่เกิดจากกระบวนการรวมตะกอนภายในถังจึงสะสมอยู่ในชั้นตะกอนที่ลอยตัวอยู่ด้วยดุลยภาพดังกล่าว ถังชั้นตะกอนในอุดมคติจะไม่มีการใช้เครื่องมือกลกวนน้ำแต่อย่างใด การผสมเร็วจะเกิดขึ้นในท่อน้ำเข้า และการสมานตะกอนจะเกิดขึ้นในชั้นตะกอนโดยการผสมผสานระหว่างกลไกสมานตะกอนแบบออร์โธโคเนซิสและแบบอัตราจมตัวแตกต่างกัน (differential settling) ตัวอย่างของถังชั้นตะกอนแสดงในรูปที่ 3.6 ข



- 1. Raw water inlet.
- 2. Clarified water outlet.
- 3. Impeller drive.
- 4. Rotor impeller.
- 5. Primary mixing and reaction zone.
- 6. Secondary mixing and reaction zone.
- 7. Clarified water.
- 8. Sludge return.
- 9. Sludge concentrator.
- 10. Excess sludge discharge.



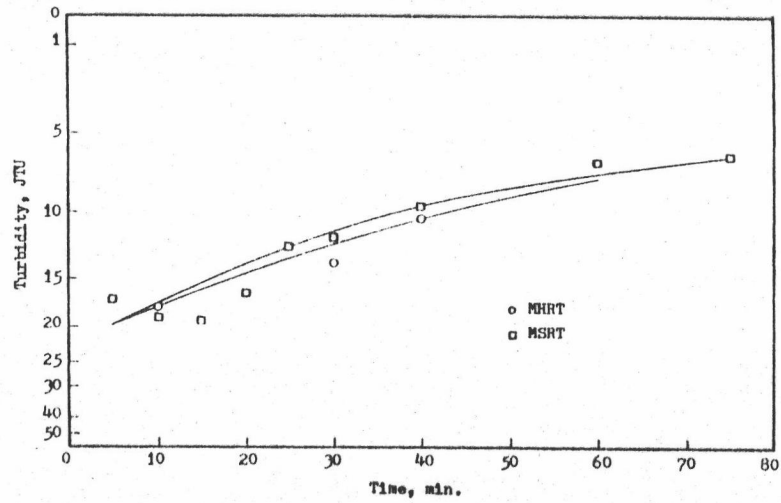
- 1. Raw water inlet.
- 2. Clarified water outlet.
- 3. Sludge discharge.
- 4. Stilling plates.
- 6. Vacuum chamber.
- 7. Vacuum pump.
- 8. Automatic vacuum-breaker
- 9. Raw water perforated distribution piping.
- 10. Sludge concentrators.
- 11. Reagent inlet.

รูปที่ 3.6 ก ตัวอย่างถังหมุนเวียนตะกอนในตัว

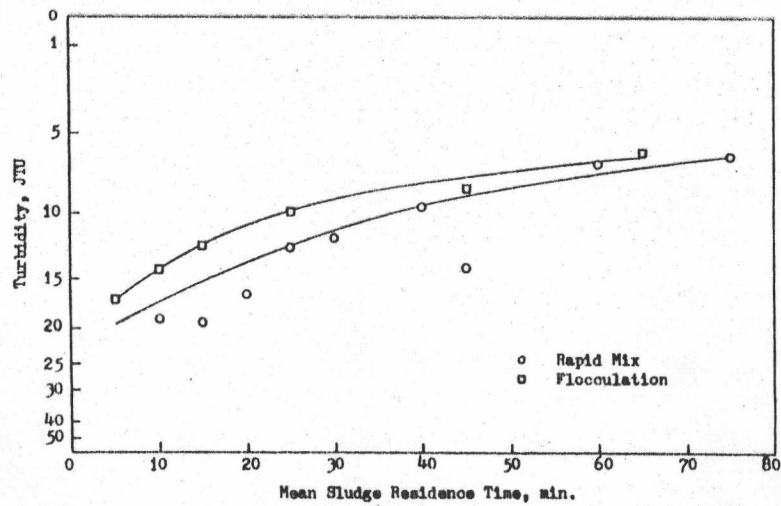
รูปที่ 3.6 ข ตัวอย่างถังชั้นตะกอน

การหมุนเวียนและการสะสมตะกอนดังกล่าวมานี้ ทำให้ตั้งปฏิกรณ์ทั้งสองประเภทมีปริมาณตะกอนสูงมากคือมีค่า  $\phi$  อยู่ในลำดับ 0.1<sup>(14)</sup> ดังนั้นชั้นสมานตะกอนของตั้งปฏิกรณ์ดังกล่าวจึงต้องการค่า G และ HRT น้อยกว่าในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน โดยที่ยังคงประสิทธิภาพไว้ในระดับเดียวกันได้ ทำให้ส่วนที่เป็นกระบวนการรวมตะกอนของถังหมุนเวียนตะกอนในตัวและถังชั้นตะกอนต้องการกำลังงานน้อยกว่า และมีขนาดเล็กกว่ากระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานในที่สุด

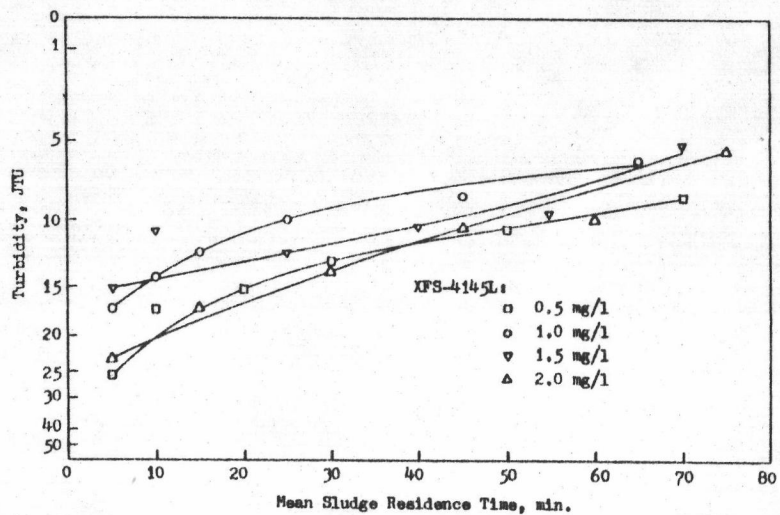
ในกรณีของการใช้ตะกอนในลักษณะดังกล่าวนี้ Karot<sup>(59)</sup> ได้ทำการทดลองแบบจาร์โดยใช้สารโพลีเมอร์ประจุบวกเป็นสารรวมตะกอน วิธีการทดลองกระทำโดยนำตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนภายหลังการสมานตะกอน เดิมลงไปในพื้นที่ผสมเร็วหรือชั้นสมานตะกอนในการทดลองครั้งต่อไป ผลการทดลองปรากฏว่าการเพิ่มปริมาณตะกอนทำให้สามารถลด HRT ของชั้นสมานตะกอนได้โดยที่ยังคงประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ในระดับเดียวกับเมื่อไม่มีการใช้ตะกอน (รูปที่ 3.7 ก) และการเพิ่มปริมาณตะกอนในชั้นสมานตะกอนจะให้ผลดีกว่าการเพิ่มในชั้นผสมเร็ว (รูปที่ 3.7 ข) นอกจากนี้ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าการลดปริมาณสารรวมตะกอนไม่สามารถทดแทนได้ด้วยการเพิ่มปริมาณตะกอน (รูปที่ 3.7 ค) อนึ่ง การทดลองดังกล่าวนี้ใช้เวลากักตะกอนเฉลี่ยหรือ MSRT ( mean solid residence time ) เป็นพารามิเตอร์ควบคุม



รูปที่ 3.7 ก การเพิ่มปริมาณตะกอนทำให้สามารถลด HRT ของชั้นสมานตะกอน



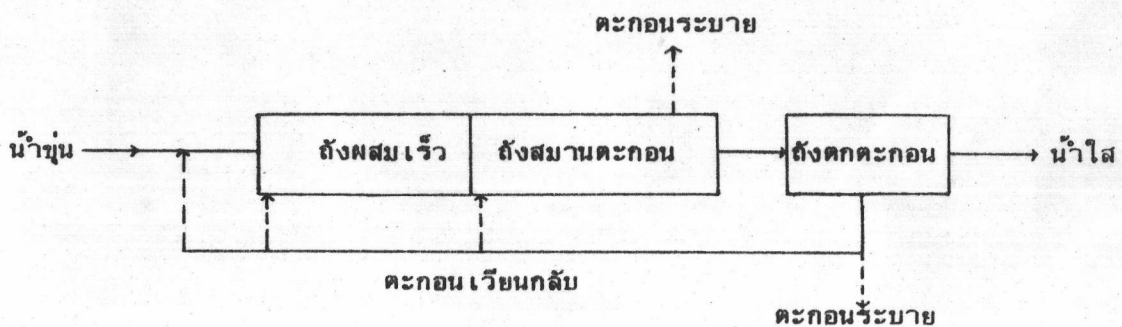
รูปที่ 3.7 ข. การเพิ่มปริมาณตะกอนในชั้นสมานตะกอนให้ผลดีกว่าการเพิ่มปริมาณตะกอนในชั้นผสมเร็ว



รูปที่ 3.7 ค การลดปริมาณสารรวมตะกอนไม่สามารถทดแทนได้ด้วยการเพิ่มปริมาณตะกอน

จากที่กล่าวมา จะเห็นว่าวิธีการใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานและในถังหมุนเวียนตะกอนในตัวกับถังชั้นตะกอน มีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกันไป กล่าวคือ การใช้ตะกอนในถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีลักษณะต่อเนื่อง (continuous feed) ทำให้มีการทำงานที่ อยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) ตลอดเวลา ในขณะที่การใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานมีลักษณะชั่วคราว (intermittent feed) เนื่องจากใช้น้ำล้างเครื่องกรอง ทำให้กระบวนการต้องสูญเสียสภาวะคงที่และต้องใช้เวลาในการปรับการทำงานให้เข้าสู่สภาวะคงที่ทุกครั้งที่มีการใช้ตะกอน นอกจากนี้ปริมาณตะกอนที่นำมาใช้ยังมีอยู่อย่างจำกัด ทั้งนี้เนื่องจาก เป็นเพียงตะกอนส่วนน้อยที่หลุดรอดจากถังตกตะกอน เข้าสู่ถังกรอง ในขณะที่ตะกอนที่นำมาใช้ในถังปฏิกรณ์ทั้งสอง เป็นตะกอนเกือบทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการรวมตะกอน ดังนั้นจึงมีขอบเขตการใช้ตะกอน เป็นปริมาณมากกว่า ที่กล่าวมานี้เป็นข้อที่ดึกว่าของการใช้ตะกอนในถังหมุนเวียนตะกอนในตัวและถังชั้นตะกอน อย่างไรก็ตาม การใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานมีลักษณะที่อยู่ภายใต้การควบคุมมากกว่าการใช้ตะกอนในถังปฏิกรณ์ทั้งสอง ทั้งนี้เนื่องจากสามารถกระทำได้โดยการควบคุมปริมาณน้ำล้างเครื่องกรองที่นำกลับมาใช้โดยตรง ในขณะที่ปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนหรือสะสมอยู่ในถังปฏิกรณ์ทั้งสองถูกควบคุมโดยลักษณะทางชลศาสตร์ภายในถังปฏิกรณ์เกือบสิ้นเชิง จึงกล่าวได้ว่าข้อที่ดึกว่าของการใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานคือมีความยืดหยุ่นในการควบคุมมากกว่า

ดังนั้น ในการพิจารณาใช้ตะกอนในกระบวนการรวมตะกอน จึงควรจะได้กำหนดแนวทางให้มีข้อดีและหลีกเลี่ยงข้อด้อยดังกล่าวข้างต้น รูปแบบการใช้ตะกอนดังแสดงในรูปที่ 3.8 เป็นรูปแบบที่เลือกใช้ในการวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 3.8 รูปแบบการใช้ตะกอนในการวิจัย

โดยรูปแบบการใช้ตะกอนเช่นนี้ จะทำให้การใช้ตะกอนเป็นไปอย่างต่อเนื่องและสามารถนำตะกอนเกือบทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการรวมตะกอนกลับมาใช้อีกโดยหมุนเวียนจากถังตกตะกอน นอกจากนี้การควบคุมปริมาณตะกอนสามารถกระทำได้โดยควบคุมปริมาณตะกอนที่หมุนเวียนจากถังตกตะกอนและที่ระบายออกจากระบบ จากรูป 3.8 จะเห็นว่าอาจนำตะกอนกลับมาใช้ในตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ก่อนหน้ากระบวนการ ถังผสมเร็ว และถังสมานตะกอน ในการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้การหมุนเวียนตะกอนกลับเข้าสู่ถังสมานตะกอน ทั้งนี้โดยยึดถือจลนพลศาสตร์ของชั้นสมานตะกอนที่ว่าด้วยความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างปริมาณตะกอนกับประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอน และโดยพิจารณาจากผลการทดลองของ Karot<sup>(59)</sup> ที่แสดงว่าการเพิ่มปริมาณตะกอนในชั้นสมานตะกอนจะให้ผลดีกว่าการเพิ่มในชั้นผสมเร็ว นอกจากนี้จะเห็นว่ากระบวนการระบายตะกอนกระทำได้ในตำแหน่งต่าง ๆ คือ จากถังสมานตะกอน และจากกันถังตกตะกอน ในการวิจัยครั้งนี้เลือกระบายตะกอนจากถังสมานตะกอน

### 3.3.2 แนวความคิดในการควบคุมกระบวนการเมื่อมีการใช้ตะกอน

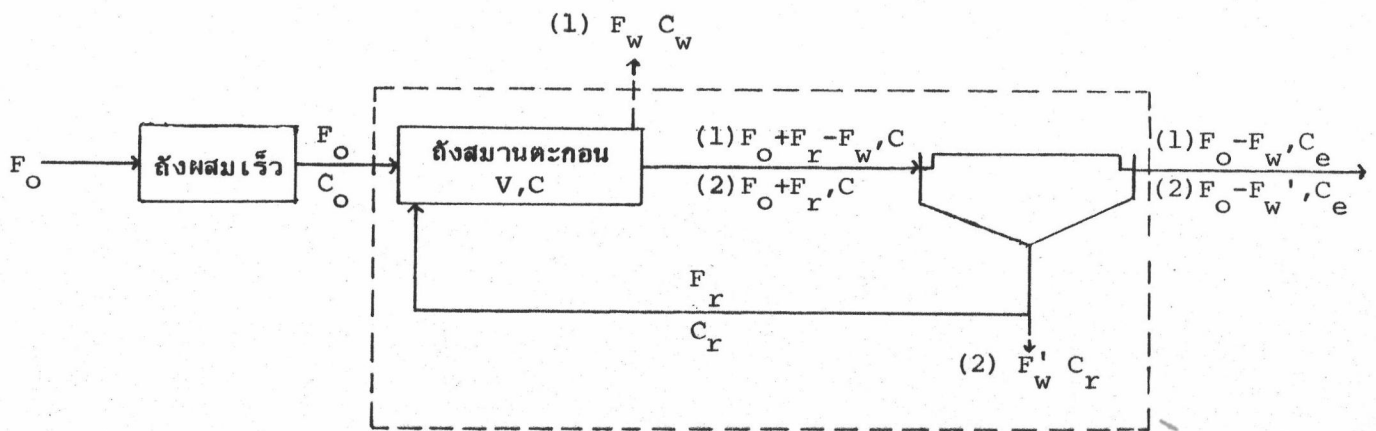
ปัญหาพื้นฐานในการควบคุมกระบวนการรวมตะกอนเมื่อมีการใช้ตะกอน คือทำอย่างไรและจะใช้พารามิเตอร์ตัวใดในการควบคุมปริมาณตะกอนในถังสมานตะกอนให้อยู่ในระดับ - ตามต้องการ จากการพิจารณาเบื้องต้น พบว่าพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณตะกอนคือ SRT หรือเวลากักตะกอน (solid residence time) ซึ่ง Brown & Lamotta<sup>(60)</sup> และ O'Melia<sup>(1)</sup> ได้เสนอให้ใช้เป็นพารามิเตอร์แทนที่ HRT ในพารามิเตอร์ไร้มิติ  $G\phi T$  สำหรับทำนายการสมานตะกอนที่เหมาะสมของถังชั้นตะกอน โดยกำหนดให้ SRT มีค่าดังต่อไปนี้<sup>(1)</sup>

$$SRT = \frac{\text{มวลตะกอนในถังปฏิกรณ์}}{\text{อัตราเพิ่มของตะกอนในถังปฏิกรณ์}} \quad (3-26)$$

ดังนั้น จึงพิจารณาพารามิเตอร์ SRT สำหรับควบคุมการใช้ตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนในการวิจัยครั้งนี้ โดยพิจารณาในด้านความสัมพันธ์ระหว่าง SRT กับปริมาณตะกอน และการควบคุม SRT เพื่อควบคุมปริมาณตะกอน ดังต่อไปนี้

#### 1. ความสัมพันธ์ระหว่าง SRT กับปริมาณตะกอน

รูปที่ 3.9 แสดงกระบวนการรวมตะกอนที่มีการหมุนเวียนตะกอน ซึ่งการระบายตะกอนสามารถกระทำได้โดยระบายจากถังสมานตะกอนหรือจากกันถังตกตะกอนอย่างไร้



รูปที่ 3.9 กระบวนการรวมตะกอนเมื่อมีการใช้ตะกอน

กำหนดให้

$F_o$  คืออัตราไหลของน้ำเข้าสู่กระบวนการรวมตะกอน , ปริมาตร/เวลา

$F_r$  คืออัตราไหลของน้ำตะกอนที่หมุนเวียนจากถังตกตะกอน เข้าสู่ถังสมานตะกอน , ปริมาตร/เวลา

$F_w$  คืออัตราไหลของน้ำตะกอนระบายจากถังสมานตะกอน , ปริมาตร/เวลา

$F'_w$  คืออัตราไหลของน้ำตะกอนระบายจากถังตกตะกอน , ปริมาตร/เวลา

$C_o$  คือความเข้มข้นของอนุภาคตะกอนที่ได้จากขั้นผสมเร็ว , มวล/ปริมาตร

$C$  คือความเข้มข้นของตะกอนในขั้นสมานตะกอน , มวล/ปริมาตร

$C_r$  คือความเข้มข้นของตะกอนจากกันถังตกตะกอน , มวล/ปริมาตร

$C_e$  คือความเข้มข้นของตะกอนในน้ำที่ออกจากถังตกตะกอน , มวล/ปริมาตร

$V$  คือปริมาณของถังสมานตะกอน

จากรูปที่ 3.9 สร้างสมการแสดงสมดุลย์ทางมวล (mass balance equation) ของตะกอน ของระบบที่ประกอบด้วยถังสมานตะกอนและถังตกตะกอน โดยมีสมมุติฐานดังต่อไปนี้

สมมุติฐานข้อแรก การทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์เกิดขึ้นในถังผสมเร็วเท่านั้น ดังนั้น คอลลอยด์ที่ไม่ถูกทำลายสภาวะคงตัวซึ่งเข้าสู่ระบบจะหลุดออกไปกับน้ำที่ออกจากระบบ

สมมุติฐานข้อที่สอง คอลลอยด์ที่ถูกทำลายสภาวะคงตัวในถังผสมเร็วทั้งหมด จะรวมตัวกับไฮดรอสโพลีเมอร์ของสารรวมตะกอน กลายเป็นอนุภาคตะกอนที่ไหลเข้าสู่ระบบ

สมมุติฐานข้อที่สาม ปฏิกิริยาที่สารรวมตะกอนเปลี่ยนรูปเป็นไฮดรอสโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นอนุภาคตะกอนร่วมกับคอลลอยด์ที่ถูกทำลายสภาวะคงตัว เกิดขึ้นในถังผสมเร็วเท่านั้น ดังนั้น มวลของตะกอนจะไม่เพิ่มขึ้นในถังผสมตะกอน

สมการแสดงสมดุลทางมวลของตะกอน คือ

อัตราตะกอนเข้าสู่ระบบ - อัตราตะกอนออกจากระบบ +

อัตราสร้างตะกอนในระบบ = อัตราสะสมตะกอนในระบบ (3-27)

ดังนั้นที่สภาวะคงที่ (steady state) ซึ่งอัตราสะสมตะกอนในระบบเท่ากับศูนย์ เมื่อระบายตะกอนออกจากถังผสมตะกอน จะได้ว่า

$$F_o C_o - \{(F_o - F_w) C_e + F_w C_w\} + 0 = 0 \quad (3-28)$$

เมื่อเกิดการกวนอย่างสมบูรณ์ (complete stirring) ในถังผสมตะกอน นั่นคือ  $C_w = C$  จากสมการ (3-28) จะได้ว่า

$$C = \frac{F_o C_o - (F_o - F_w) C_e}{F_w} \quad (3-29)$$

เนื่องจาก

$$SRT = \frac{\text{มวลของตะกอนในระบบ}}{\text{อัตราการระบายตะกอนออกจากระบบ}} \quad (3-30)$$

สมมุติให้ถังตกตะกอนซึ่งทำหน้าที่หมุนเวียนตะกอนทั้งหมดกลับเข้าสู่ถังผสมตะกอน มีปริมาณตะกอนน้อยมากเมื่อเทียบกับถังผสมตะกอน ดังนั้น จากรูป 3.9 สมการแสดงค่า SRT คือ

$$SRT = \frac{VC}{F_w C_o + (F_o - F_w) C_e} \quad (3-31)$$

แทนสมการ (3-29) ลงในสมการ (3-31) จะได้ว่า

$$SRT = \frac{VC}{F_o C_o} \quad (3-32)$$

เนื่องจาก  $\frac{V}{F} = \text{HRT}$  ดังนั้นจากสมการ (3-32) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C$  กับ  $C_0$  ดังนี้

$$C = C_0 \left( \frac{\text{SRT}}{\text{HRT}} \right) \quad (3-33)$$

สมการ (3-33) แสดงให้เห็นว่า เมื่อไม่มีการหมุนเวียนตะกอนคือ  $\text{SRT} = \text{HRT}$  จะได้  $C = C_0$  นั่นคือความเข้มข้น เชิงมวลของตะกอนในถังสมานตะกอนจะเท่ากับ ความเข้มข้น เชิงมวลของอนุภาคตะกอนที่ได้จากชั้นผสม เรือนั้นเอง และ เมื่อมีการหมุนเวียนตะกอน ความเข้มข้น เชิงมวลของตะกอนในถังสมานตะกอนจะมากขึ้น เป็นจำนวน เท่าซึ่งได้จาก เทอม  $\frac{\text{SRT}}{\text{HRT}}$

โดยที่  $C_0$  ขึ้นกับปริมาณสารรวมตะกอนตลอดจนพารามิเตอร์  $G$  และ  $t$  ของชั้นผสม เรือนั้น (14,28) ดังนั้น เมื่อควบคุมการทำงานของชั้นผสม เรือนั้นให้คงที่ จะสามารถควบคุมปริมาณตะกอนในถังสมานตะกอนได้โดยควบคุมพารามิเตอร์ไร้มิติ  $\frac{\text{SRT}}{\text{HRT}}$  และ เมื่อควบคุมการทำงานของชั้นผสม เรือนั้นตลอดจน  $\text{HRT}$  ของถังสมานตะกอนให้คงที่  $\text{SRT}$  จะเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมหรือกำหนดปริมาณตะกอนในถังสมานตะกอนโดยตรง ข้อพิจารณาดังกล่าวนี้น่าจะนำมาใช้เป็นวิธีการควบคุมปริมาณตะกอนของถังสมานตะกอนในการวิจัยครั้งนี้

## 2. การควบคุม SRT เพื่อควบคุมปริมาณตะกอน

การควบคุม SRT ในกระบวนการรวมตะกอนเมื่อมีการใช้ตะกอนตั้ง - แสดงในรูป 3.9 สามารถกระทำได้โดยระบายตะกอนจากถังสมานตะกอน หรือจากก้นถังตกตะกอน ข้อพิจารณาในที่นี้คือ การระบายตะกอนจากส่วนใดให้การควบคุมกระบวนการที่ง่ายกว่ากัน ดังต่อไปนี้

เมื่อระบายตะกอนจากถังสมานตะกอน จากสมการ (3-30) จะได้

$$\text{SRT} = \frac{VC}{F_w C + (F_o - F_w) C_e} \quad (3-34)$$

เมื่อระบายตะกอนจากก้นถังตกตะกอน จากสมการ (3-30) จะได้

$$\text{SRT} = \frac{VC}{F_w' C + (F_o - F_w') C_e} \quad (3-35)$$



สมมุติให้ความเข้มข้นของตะกอนในน้ำที่ไหลออกจากถังตกตะกอนคือ  $C_e$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงตัดเทอม  $(F_o - F_w)C_e$  และ  $(F_o - F'_w)C_e$  ออกจากสมการ (3-34) และ (3-35) ได้สมการ (3-36) และ (3-37) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$SRT = \frac{V}{F_w} \quad (3-36)$$

$$SRT = \frac{VC}{F'_w C_r} \quad (3-37)$$

สมการ (3-36) แสดงว่า เมื่อระบายตะกอนจากถังสมานตะกอนสามารถใช้  $F_w$  ควบคุม SRT ได้เมื่อทราบค่า  $V$  เพียงค่าเดียว ในขณะที่สมการ (3-37) แสดงว่าเมื่อระบายตะกอนจากถังตกตะกอน จะต้องทราบค่า  $V$   $C$  และ  $C_r$  จึงจะสามารถใช้  $F'_w$  ควบคุม SRT ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีระบายตะกอนจากถังสมานตะกอน เพื่อควบคุมพารามิเตอร์ SRT ในการวิจัยครั้งนี้

จากแนวความคิดในการใช้ตะกอนและแนวความคิดในการควบคุมกระบวนการ เมื่อมีการใช้ตะกอนดังที่ได้กล่าวมา สรุปได้ว่า การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการอยู่บนพื้นฐานทางทฤษฎีของชั้นสมานตะกอนที่ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตะกอนในชั้นสมานตะกอน ประสิทธิภาพของชั้นสมานตะกอนจะสูงขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งจะสามารถลดค่าพารามิเตอร์ควบคุมชั้นสมานตะกอนคือ  $G$  และ  $HRT$  โดยที่ยังคงประสิทธิภาพในระดับเดิมไว้ได้ การใช้ตะกอนในกระบวนการบนพื้นฐานทางทฤษฎีดังกล่าวนี้ กระทำโดยหมุนเวียนตะกอนจากถังตกตะกอนกลับเข้าสู่ถังสมานตะกอน พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ควบคุมปริมาณตะกอนในถังสมานตะกอนคือ SRT ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของอัตราการระบายตะกอนจากถังสมานตะกอน