หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีและแนวความคิด

ทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไปและแนวความคิดเกี่ยวกับกระบวนการรวมตะกอนในท่อของการวิจัย มีดังต่อไปนี้

3.1 ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอน

ทฤษฎีของกระบวนการรวมตะกอนจำแนกได้เป็นทฤษฎีของคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ ทฤษฎีของขั้นผสมเร็ว (rapid mix stage) และทฤษฎีของขั้นสมานตะกอน (flocculation stage)

3.1.1 ทฤษฎีของคอลลอยด์

ทฤษฎีของคอลลอยด์เกี่ยวกับระบบของคอลลอยด์ สภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่นในน้ำ และสภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์ซึ่งเป็นพื้นฐานในการกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการรวมตะกอน

3.1.1.1 ระบบของคอลลอยด์

ระบบของคอลลอยด์ประกอบด้วยวัฏภาคกระจาย (dispersed phase) และวัฏภาคเอกพันธ์ (homogenous phase) ทั้งสองวัฏภาคนี้อาจมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือก๊าซ วัฏภาคกระจายได้แก่ อนุภาคของแข็ง ละอองน้ำ หรือฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายหรือดำรงอยู่อย่างไม่ต่อเนื่องภายในวัฏภาคเอกพันธ์ที่เป็นสารเนื้อเดียวกันหรือต่อเนื่องกัน ขนาดของวัฏภาคกระจายขึ้นอยู่กับแนวทางในการพิจารณา เช่น พิจารณาในด้านขนาดแต่เพียงอย่างเดียว หรือพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างมวลกับประจุไฟฟ้าของอนุภาคนั้นๆ อย่างไรก็ตามสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำและเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่น อาจประมาณได้ว่ามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.001 ถึง 1 ไมครอน[48]

อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำได้รับการจำแนกออกเป็นประเภทโดยทรรศนะที่แตกต่างกัน ทรรศนะแรกพิจารณาจากสมบัติทางสัมพรรคภาพ (affinity) ของคอลลอยด์ที่มีต่อน้ำ โดยแบ่งออกเป็นไฮโดรโฟบิคคอลลอยด์ (hydrophobic colloid) และไฮโดรฟิลิคคอลลอยด์ (hydrophilic colloid) ทรรศนะหลังพิจารณาจากระดับความสามารถที่จะดำรงอยู่อย่างกระจายภายในน้ำหรือระดับความคงตัว (stable) โดยตรง โดยแบ่งออกเป็นคอลลอยด์ที่ทวนกลับ (reversible colloid) ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่มีความคงตัวอยู่เสมอ และคอลลอยด์ที่ไม่ทวนกลับ (irreversible colloid) ซึ่งเป็นคอลลอยด์ที่ไม่คงตัว นอกจากนี้ยังจำแนกคอลลอยด์ที่ไม่ทวนกลับหรือไม่คงตัวออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ดิวเทอร์นัล (diuturnal) หมายถึงคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวประเภทที่มีการรวมตัวกันอย่างช้าๆ และคาดูคัส (caducous) หมายถึงคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวประเภทที่มีการรวมตัวกันอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปถือว่าคอลลอยด์ที่คงตัวคือดิวเทอร์นัล และคอลลอยด์ที่ไม่คงตัวคือคาดูคัส[31] นั่นคือพิจารณาความคงตัวและไม่คงตัวของคอลลอยด์จากอัตราเร็วในการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคนั่นเอง

3.1.1.2 <u>สภาวะคงตัวของคอลลอยด์</u>

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

โดยที่ระบบคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและน้ำจะมีประจุไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์จึงถูกควบคุมโดยประจุตรงข้ามภายในน้ำ เพื่อคงความสะเทินทางไฟฟ้าของระบบ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดทฤษฎีว่ามีประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical-double layer) ล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งได้แก่ ชั้นตรึง (fixed layer) และชั้นกระจาย (diffuse layer) ชั้นตรึงประกอบด้วยประจุไฟฟ้าตรงข้ามที่เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคโดยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์กับประจุ

ไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำและแรงแวนเดอร์วาลส์(van der walls force)ถัดจากชั้นครึง การเคลื่อนที่ของไมเลกุลของน้ำเนื่องจากความร้อนทำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามซึ่งถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิว ชั้นที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกระจายอยู่ในน้ำดังกล่าวนี้คือชั้นกระจาย ขนาดหรือลักษณะของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ตลอดจนปริมาณและชนิดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า(electical potential)ระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิวและมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิว เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน แรงผลักเนื่องจากประจุไฟฟ้าจะเกิดขึ้นและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง แรงผลักดังกล่าวนี้จะต้านแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะระหว่างอนุภาคลดลง ดังนั้น ถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักมีค่ามากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อยเนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสเข้าใกล้กันเพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง

3.1.1.3 <u>สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์</u>

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเปลี่ยนจากสภาวะคงตัวมาเป็นสภาวะไม่คงตัวที่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จำแนกออกได้เป็นสี่ประเภท ได้แก่ การอัดตัวของชั้นกระจาย(compression of diffuse layer) การดูดติดและการสะเทินประจุไฟฟ้า(adsorption and charge neutralization) การดูดติดและเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค(adsorption and interparticle bridging) และการห่อหุ้มในผลึก(enmeshment in a precipitate)(31)

การอัดตัวของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำมีปริมาณมากขึ้น ประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีปริมาณมากขึ้นด้วย ยังผลให้ปริมาตรหรือความหนาของชั้นกระจายที่ทำหน้าที่สะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลง การอัดตัวของชั้นกระจายเช่นนี้ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จนแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะ

แรงผลักระหว่างอนุภาค และเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด

การดูดติดและการสะเทินประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามนอกเหนือจากที่มีอยู่ในชั้นตรึงและชั้นกระจายถูกดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านี้จะสะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวลดลงจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนตัวลงได้ จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

การดูดติดและเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค เริ่มจากการดูดติดด้วยบอนด์ทางเคมี (chemical bond) ระหว่างผิวของคอลลอยด์กับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ อนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อด้วยโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ และแยกออกจากน้ำในลักษณะที่เป็นตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ในที่สุด

สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวประเภทใดประเภทหนึ่งหรือหลายประเภทร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำและชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวมานี้เป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

3.1.2 <u>ทฤษฎีของขั้นผสมเร็ว</u>

ทฤษฎีพื้นฐานของขั้นผสมเร็วคือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยสภาวะคงตัวและไม่คงตัวของคอลลอยด์ดังที่ได้กล่าวไว้โดยสังเขปแล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในขั้นผสมเร็ว และพารามิเตอร์ควบคุมประสิทธิภาพของขั้นผสมเร็ว

3.1.2.1 <u>กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์</u>

กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ที่เกิดขึ้นในขั้นผสมเร็วขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพีเอช ชนิดและปริมาณสารรวมตะกอนตลอดจนระดับ

ความปั่นป่วนของน้ำ ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่นในกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาได้ว่าชนิดของสารรวมตะกอนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดประเภทของกลไกในขั้นผสมเร็ว

สารรวมตะกอนที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน จำแนกออกเป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ ชนิดของสารรวมตะกอนดังกล่าวมานี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประเภทของกลไกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ สารรวมตะกอนที่เป็นเกลือของโลหะอาจทำให้เกิดกลไกแบบกวาด(sweep mechanism) หรือกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า(adsorption and charge neutralization mechanism) ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น ลักษณะทางเคมีของน้ำคือพีเอชและปริมาณไอออนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาผสม(mixing time) ในขณะที่สารรวมตะกอนที่เป็นสารโพลีเมอร์จะทำให้เกิดกลไกแบบดูดติดและเชื่อมต่อ(adsorption and bridging mechanism) ทั้งนี้ในกรณีของสารโพลีเมอร์ประจุบวกจะเกิดกลไกดังกล่าวรวมทั้งการสะเทินทางไฟฟ้าอีกด้วย

โดยที่สารรวมตะกอนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือสารส้ม ดังนั้นจะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์โดยเกลือของโลหะคือสารส้ม ได้แก่ กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า และกลไกแบบกวาดดังต่อไปนี้

1. <u>กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า</u>

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก $Al_2(SO_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยไมเลกุลของน้ำได้ $Al(H_2O)_6^{3+}$ หรือ Al^{3+} ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ของ Al^{3+} จะเกิดขึ้นทันทีโดยไลแกนด์(ligands)ชนิดต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง $\overline{OH}$ จะเข้าแทนที่ไมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นสารคอมเพล็กซ์(complexes) ระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน[31,42,41] ดังสมการตัวอย่างต่อไปนี้[32]

$$Al^{3+} + H_2O = Al(OH)^{2+} + H^+ \quad (3\text{-}1)$$

$$Al^{3+} + 2H_2O = Al(OH)_2^+ + 2H^+ \quad (3\text{-}2)$$

$$7Al^{3+} + 17H_2O = Al_7(OH)_{17}^{4+} + 17H^+ \quad (3\text{-}3)$$

ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารส้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว (saturation point) ไฮโดรลิซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกริยา (product) สุดท้าย เป็นผลึก $Al(OH)_3$

$$Al^{3+} + 3H_2O = Al(OH)_3(s) + 3H^+ \quad (3\text{-}4)$$

กลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า เกิดจากสารคอมเพล็กซ์ประจุบวก โดยเริ่มจากการดูดติดระหว่างสารดังกล่าวกับผิวของคอลลอยด์ด้วยโควาเลนท์บอนด์ (covalent bond) จากนั้นประจุบวกของสารคอมเพล็กซ์จะสะเทินประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง จนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่าและเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด (42)

อนึ่ง ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอนมีความสัมพันธ์เป็นสโตอิคิโอเมตริก (stoichiometric) กับความเข้มข้นของคอลลอยด์ (42) นอกจากนี้ปริมาณสารรวมตะกอน พีเอช ความเข้มข้นของคอลลอยด์ และระดับความปั่นป่วนของน้ำ ยังมีอิทธิพลต่อกลไกโดยตรง กล่าวคือปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอชกำหนดชนิดและปริมาณของสารคอมเพล็กซ์ (31,42) ในขณะที่ความเข้มข้นของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำกำหนดโอกาสที่สารคอมเพล็กซ์จะทำปฏิกริยากับคอลลอยด์ (1,33)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. <u>กลไกแบบกวาด</u>

เมื่อเติมสารส้มลงไปในน้ำจนมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวไฮโดรลิซิสจะเริ่มจาก Al^{3+} จนได้ $Al(OH)_3(s)$ ดังแสดงในสมการ (3-4) กลไกแบบกวาดจะเกิดโดยผลึก $Al(OH)_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการ

ตกผลึก ตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะนี้ คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในขั้นสมานตะกอน และถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดอย่างเด่นชัดคือ ปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ การตกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากถ้าระดับเกินการอิ่มตัว (extent of oversaturation) ของผลึกที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 100 ระดับดังกล่าวนี้แปรตามปริมาณสารรวมตะกอน นอกจากนี้อัตราการตกผลึกยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก อนึ่ง ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอนไม่มีความสัมพันธ์เป็นสโตอิคิโอเมตริกกับความเข้มข้นของคอลลอยด์[31,42,41]

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ากลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ในขั้นผสมเร็วทั้งสองประเภท มีความแตกต่างโดยพื้นฐานหลายประการ อย่างไรก็ตาม ลักษณะรวมกันที่เด่นชัดประการหนึ่งคือผลของปฏิกริยาไฮโดรลิซิส ซึ่งทำหน้าที่ทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก กล่าวคือ ในกรณีของกลไกแบบดูดคิดและสะเทินทางไฟฟ้า สารคอมเพล็กซ์จะเกิดขึ้นภายใน 10^{-10} ถึง 1 วินาที และการดูดติดระหว่างสารคอมเพล็กซ์กับผิวของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นภายใน 10^{-4} วินาที [31,13] ในกรณีของกลไกแบบกวาดผลึกที่ได้จากไฮโดรลิซิสของสารรวมตะกอนจะเกิดขึ้นภายใน 1 ถึง 7 วินาที[31,24] ดังนั้นจึงต้องสร้างความปั่นป่วนของน้ำในขั้นผสมเร็วให้เกิดขึ้นอย่างรุนแรงทั้งนี้เพื่อให้ผลของปฏิกริยาไฮโดรลิซิสดังกล่าวสามารถสัมผัสและทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ทันท่วงที โดยอาจใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น กวนด้วยเครื่องมือกล (mechanical mixer) ทำให้เกิดไฮดรอลิคจัมพ์ (hydraulic jump) ให้น้ำไหลผ่านดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) ที่มีแผ่นเจาะรู (orifice) ซึ่งเป็นตำแหน่งป้อนสารรวมตะกอน และใช้เครื่องปั่นคัดในเส้นท่อ (in-line blender) ซึ่งเป็นวิธีทำให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำอย่างรุนแรงมาก เหมาะสำหรับกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าโดยตรง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2.2 พารามิเตอร์ควบคุมขั้นผสมเร็ว

โดยที่ลักษณะการทำงานของขั้นผสมเร็ว คือ สร้างความปั่นป่วนให้เกิดขึ้นในน้ำอย่างรุนแรงในขณะที่เติมสารรวมตะกอนเพื่อทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ดังนั้น ระดับความปั่นป่วนและเวลาผสม (mixing time) ซึ่งเป็นเวลาที่น้ำอยู่ภายใต้ความปั่นป่วนดังกล่าว จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือควบคุมการทำงานของขั้นผสมเร็ว พารามิเตอร์ที่นิยมใช้เป็นดัชนีบอกระดับความปั่นป่วนของน้ำในกระบวนการรวมตะกอนคือ G หรือเกรเดียนท์ของความเร็ว (velocity gradient) Camp & Stein[8] ได้ให้นิยามและเสนอสมการคำนวณค่า G ดังต่อไปนี้

$$G = \left(\frac{P}{V\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3\text{-}5)$$

โดย P คือกำลังงานที่เข้าสู่เนื้อของเหลว V คือปริมาตรของของเหลว และ μ คือความหนืดพลศาสตร์ (dynamic viscosity) ของของเหลว ทั้งนี้ค่า G จะมีหน่วยต่อเวลาคือวินาที$^{-1}$

สำหรับพารามิเตอร์ t หรือเวลาผสม เป็นที่น่าสังเกตุว่าการพิจารณามีทรรศนะที่แตกต่างกันไป โดยทรรศนะแรกพิจารณาจากเวลาที่เกิดกลไก ทรรศนะที่สองพิจารณาครอบคลุมไปถึงผลกระทบที่มีต่อขั้นสมานตะกอน โดยในทรรศนะแรก Hudson & Wolfner[17] Vrale & Jorden[47] และ Kawamura[20] เสนอว่า t ที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยกว่า 1 วินาที ทั้งนี้พิจารณาจากเวลาของการเกิดสารคอมเพล็กซ์ในกลไกดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นภายใน 10^{-10} ถึง 1 วินาที สำหรับอีกทรรศนะหนึ่ง Camp[7] ทำการทดลองและเสนอว่าค่า t ที่เหมาะสมควรอยู่ในระหว่าง 2 ถึง 2.5 นาที ทั้งนี้เพื่อให้ได้ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอนสูงสุดก่อนที่จะสมานตะกอนในขั้นสมานตะกอนต่อไป นอกจากนี้ Letterman & Quon & Gemmel[24] ทำการทดลองพบว่า t ที่เหมาะสมมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 7 นาที และสรุปว่า t ควรมีค่าอยู่ในระดับเป็นนาทีโดยให้เหตุผลสนับสนุนว่าเวลาที่นอกเหนือจากเวลาในการเกิดสารคอมเพล็กซ์และผลึกเป็นเวลาสำหรับการสมานตะกอน

ขั้นต้น(initial flocculation) ซึ่งทำให้การสมานตะกอนในลำดับต่อไปคือในขั้นสมานตะกอนมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและยังทำให้ได้ตะกอนที่จมตัวดีขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตาม Bratby[5] ระบุจากผลการทดลองว่าค่า t ที่มากกว่า 2 นาที นอกจากจะไม่เกิดผลดีต่อขั้นสมานตะกอนแล้วยังทำลายสมรรถนะของขั้นสมานตะกอนอีกด้วย ที่กล่าวมานี้เป็นทรรศนะสองด้านที่แตกต่างกันไป อนึ่ง ASCE & AWWA[4] และ Ten State Standards[45] ยังได้เสนอค่า t ที่เหมาะสมซึ่งแตกต่างจากที่กล่าวมาแล้วอีกด้วยโดยเสนอค่า t 10 ถึง 30 วินาที และอย่างน้อย 30 วินาที ตามลำดับ

โดยทั่วไปพารามิเตอร์ G และ t จะได้รับการพิจารณาควบคู่กันไปในการออกแบบและควบคุมขั้นผสมเร็ว ค่าที่นำมาใช้มักจะกำหนดจากประสบการณ์ หรือเป็นค่าในเชิงเอ็มไพริกัล(empirical value) และขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนในน้ำ

ในกรณีที่ใช้ใบพัดแบบใบพัดเรือ(propeller impeller) ASCE & AWWA[4] แนะนำให้ใช้ G 1000 วินาที$^{-1}$ ที่ t 20 วินาที ไปจนถึง G 700 วินาที$^{-1}$ ที่ t มากกว่า 40 วินาที Camp[7] แนะนำให้ใช้ G 700 ถึง 1000 วินาที$^{-1}$ที่ t 2 ถึง 2.5 นาที และ Letterman & Quon & Gemmel[24] แนะนำค่า t ที่เหมาะสม 2.5 นาที ที่ G 1000 วินาที$^{-1}$ ในกรณีที่ใช้ไฮดรอลิคจัมพ์ค่า G ที่ใช้โดยทั่วไป[1] คือ 800 วินาที$^{-1}$ ที่ t 2 วินาที ในกรณีที่ใช้ดิฟฟิวเซอร์และเติมสารรวมตะกอนด้วยหัวฉีด(nozzle) Kawamura[21] แนะนำให้ใช้ G 750 ถึง 1000 วินาที$^{-1}$ และ t 1 วินาที และในกรณีที่ใช้เครื่องปั่นตัดในเส้นท่อ Hudson & Wolfner[17] แนะนำให้ใช้ t น้อยกว่า 30 วินาที โดย G มีค่าระหว่าง 3000 ถึง 5000 วินาที$^{-1}$

นอกจากนี้พารามิเตอร์ G และ t ยังได้รับการเสนอให้ใช้ร่วมกับปริมาณสารรวมตะกอนในการควบคุมการทำงานของขั้นผสมเร็ว โดย Letterman & Quon & Gemmel[24] ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสามโดยใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยผงแอ็คติเวทคาร์บอน(activated carbon powder) และใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ในเชิงเอ็มไพริกัล ดังต่อไปนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$G.t_{opt}.C^{1.46} = 5.9 \times 10^{6} \qquad (3\text{-}6)$$

โดย t_{opt} คือเวลาผสมที่เหมาะสมมีหน่วยเป็นวินาทีและ C คือปริมาณของสารส้มมีหน่วยเป็น $ก/ล^{3}$

3.1.3 ทฤษฎีของขั้นสมานตะกอน

ทฤษฎีของขั้นสมานตะกอนที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ได้แก่กลไกสมานตะกอนและพารามิเตอร์ควบคุมขั้นสมานตะกอน

3.1.3.1 กลไกสมานตะกอน

การสมานตะกอนคือ การที่อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้วตลอดจนอนุภาคตะกอนที่ประกอบด้วยกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์และไพลีเมอร์ของสารรวมตะกอน เกิดการชนและรวมตัวกันเป็นตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดการสมานตะกอนอาจจำแนกออกเป็นสามประเภทได้แก่[31] การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion) การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential setting) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนหรือสัมผัสกันระหว่างอนุภาคขึ้น[31,18] การสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ได้ตะกอนที่มีขนาดใหญ่

การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้เรียกว่า การสมานตะกอนแบบเพอริไคเนซิส (perikinesis) อัตราสมานตะกอนแบบเพอริไคเนซิสขึ้นกับ

012490

ลักษณะทางกายภาพของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิ และขึ้นกับจำนวนของอนุภาค อนึ่งการสมานตะกอนประเภทนี้จะมีอัตราสมานตะกอนสูงกว่าการสมานตะกอนประเภทอื่น เมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน[31] การสมานตะกอนแบบเพอริไคเนซิสจะลดบทบาทลงจนเหลือน้อยมาก เมื่ออนุภาคตะกอนเพิ่มขนาดจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน[16]

2. <u>การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน</u>

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์เช่นนี้ เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่ในภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาคตะกอนหรือตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีอัตราเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า จนเกิดการชนและสมานกันขึ้นในระหว่างการจมตัว[18] การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังชั้นตะกอน (sludge blanket clarifier) และถังตกตะกอน

3. <u>การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว</u>

เมื่อเกิดสภาวะการกวนขึ้นในของเหลวคือน้ำ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับน้ำก็จะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดการชนและสมานกันในที่สุด การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์ทางไฮโดรไดนามิคส์เช่นนี้เรียกว่า การสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนซิส (orthokinesis) เมื่อเปรียบเทียบอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดของอนุภาค ปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสมานตะกอนสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนซิสมาก เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน[31]

โดยที่อนุภาคตะกอนและตะกอนในขั้นสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน[34] ดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนจึงได้แก่กลไกสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนซิส การสร้างสภาวะการเคลื่อนที่ของน้ำให้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีความเร็วที่แตกต่างกันไปตามตำแหน่งต่างๆ ในน้ำเพื่อให้เกิดกลไกดังกล่าวขึ้น อาจใช้วิธีทางชลศาสตร์ด้วยการปล่อยให้น้ำไหลผ่านผนังกั้น (baffle) หรือใช้วิธีทางกลโดยกวนน้ำด้วยใบพัดแบบต่างๆ ได้แก่ แบบใบพาย (paddle) แบบเทอร์ไบน์ (turbine) และแบบใบพัด (axial flow propeller)

จลนพลศาสตร์ของการสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนซิส นี้เริ่มจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาค ซึ่งเสนอโดย Smoluchowski[37] และ Camp & Stein[8] ได้พัฒนาขึ้นเป็นสมการที่แสดงว่าอัตราการชนระหว่างอนุภาคขึ้นอยู่กับจำนวนและขนาดของอนุภาค ตลอดจนเกรเดียนท์ความเร็วดังต่อไปนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{G}{6}(d_1+d_2)^3 n_1 n_2 \qquad (3\text{-}7)$$

โดยที่ $\frac{dn}{dt}$ คืออัตราการชนต่อหน่วยปริมาตรน้ำ อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า สมการดังกล่าวนี้พัฒนามาจากทฤษฎีที่ว่าด้วยการชนกันระหว่างอนุภาคซึ่งกำหนดขึ้นจากการไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) นอกจากนี้พารามิเตอร์ G ซึ่งเสนอโดย Camp& Stein[8] และนำมาใช้ในสมการนี้ก็กำหนดหรือนิยามจากการไหลแบบลามินาร์เช่นกัน ในขณะที่การไหลของน้ำในขั้นสมานตะกอนเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow)[27] หรือในบางกรณีเป็นการไหลที่อยู่ในช่วงเปลี่ยน (transition zone)[1] ลักษณะเช่นนี้ทำให้สมการ (3-7) มีความเบี่ยงเบนโดยพื้นฐาน ต่อมา Levich[27] ได้เสนอสมการแสดงอัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนดังต่อไปนี้

$$\frac{dn}{dt} = 12\pi kG(d_1+d_2)^3 n_1 n_2 \qquad (3\text{-}8)$$

โดยที่ K คือค่าคงที่และมีค่าประมาณ $\frac{1}{\sqrt{5}}$ จากผลการทดลองของ Fuchs[34] ดังนั้น อัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วน คือ

$$\frac{dn}{dt} = \frac{12\pi}{\sqrt{5}} G(d_1+d_2)^3 n_1 n_2 \qquad (3\text{-}9)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ (3-7) และ (3-9) จะเห็นว่าอัตราการชนภายใต้การไหลแบบลามินาร์มีค่าน้อยกว่าอัตราการชนภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริงประมาณ 7 เท่า อย่างไรก็ตาม Tambo[44] พบว่าเมื่อใช้เครื่องมือกลในการกวนน้ำ กำลังงานที่กระจายเข้าสู่น้ำทั้งระบบจะมีค่าเพียงประมาณ 10% โดยส่วนใหญ่ของกำลังงานจะอยู่ในน้ำบริเวณขอบใบพัด ทำให้ค่าพลังงานเข้าสู่น้ำที่นำไปคำนวณในสมการค่า G ของ Camp & stein[8] สูงเกินความจริงและได้ค่า G สูงเกินความจริงในที่สุด ดังนั้น ความเบี่ยงเบนของสมการ (3-7) จึงลดน้อยลง และพอที่จะใช้ทำนายอัตราการชนระหว่างอนุภาคภายใต้การไหลแบบปั่นป่วนได้ในกรณีที่ใช้เครื่องมือกลกวนน้ำ

โดยพิจารณาจากผลการศึกษาของ Robeck[34] ที่พบว่า น้ำดิบที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาประกอบด้วยอนุภาคความขุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ในขณะที่อนุภาคตะกอนและตะกอนในชั้นสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน Hudson[16] ได้พัฒนาสมการ (3-7) ให้ง่ายขึ้น โดยถือว่าขนาดของอนุภาคในน้ำ, d_1 มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของอนุภาคตะกอนและตะกอน, d_2 นอกจากนี้ยังได้เปลี่ยนเทอม $\frac{dn}{dt}$ ซึ่งหมายถึงอัตราการชนระหว่างอนุภาคมาเป็นอัตราสมานตะกอน โดยเพิ่มอัตราส่วนเกาะติด, α ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของจำนวนอนุภาคที่สมานตัวกันภายหลังการชน เข้าไว้ในเทอมขวามือของสมการ (3-7) ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-G}{6} \cdot d_2^3 \cdot n_1 n_2 \cdot \alpha \qquad (3\text{-}10)$$

จากสมการ (3-14) Hudson[16] เปลี่ยนจำนวนและขนาดของอนุภาคตะกอนหรือตะกอน, n_2 และ d_2 มาอยู่ในรูปของความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน, ϕ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{n_2 d_2^3}{6}$ ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-G}{\pi} n_1 \cdot \phi \cdot \alpha \qquad (3\text{-}11)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่ออินทิเกรท (integrate) สมการ (3-11) จะได้สมการแสดงประสิทธิภาพของขั้นสมานตะกอนดังนี้

$$\frac{n}{n_o} = \exp\left(\frac{-G\phi\alpha.t}{\P}\right) \qquad (3\text{-}12)$$

โดยที่ n คือจำนวนอนุภาคต่อปริมาตรน้ำที่เวลา t และ n_o คือจำนวนอนุภาคต่อปริมาตรน้ำเมื่อ t = o สมการ (3-12) ชี้ให้เห็นว่า ประสิทธิภาพของขั้นสมานตะกอนแปรตามเกรเดียนท์ของความเร็ว ความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน อัตราส่วนเกาะติด และเวลาสมานตะกอน

อนึ่งปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นควบคู่กับการสมานตะกอนในขั้นสมานตะกอนคือ การกร่อน (erosion) หรือการแตกตัว (break up) ของตะกอนอันเกิดจากแรงเฉือนภายในเกรเดียนท์ความเร็วที่เกิดขึ้นในน้ำ[10,46] Argaman & Kaufman[3] ได้เสนอสมการสำหรับขั้นสมานตะกอนซึ่งครอบคลุมถึงการแตกตัวของตะกอนในเทอมค่าคงที่ K_b ดังต่อไปนี้

$$\frac{n}{n_o} = \frac{1 + K_a G^2 t}{1 + K_b G t} \qquad (3\text{-}13)$$

โดยที่ K_a คือค่าคงที่ในการรวมตัว (aggregation constant) และ K_b คือค่าคงที่ในการแตกตัว (break-up constant)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3.2 พารามิเตอร์ควบคุมขั้นสมานตะกอน

จากสมการหลักทางจลนพลศาสตร์ของขั้นสมานตะกอน ดังที่ได้กล่าวมา จะเห็นว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพของขั้นสมานตะกอนครอบคลุมตั้งแต่ ระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งแสดงในเทอมเกรเดียนท์ความเร็ว เวลาสมานตะกอนซึ่งแสดงในเทอมเวลากักน้ำ ปริมาณตะกอนซึ่งแสดงในเทอมความเข้มข้นเชิงปริมาตรของตะกอน ความสามารถในการสมานตัวภายหลังการชนซึ่งแสดงในเทอมอัตราส่วนเกาะติดไปจนถึงการแตกตัวของตะกอนซึ่งแสดงในเทอมค่าคงที่ของการแตกตัว อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปในทางปฏิบัติ ปัจจัยที่

ได้รับการนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของขั้นสมานตะกอนคือ เกรเดียนท์ของความเร็ว, G และเวลากักน้ำ, HRT (hydraulic residence time) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวแปรอิสระของขั้นสมานตะกอนและไม่ขึ้นกับการทำงานของขั้นผสมเร็วเช่นพารามิเตอร์อื่นแต่อย่างใด

พารามิเตอร์ G และ HRT มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของขั้นสมานตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของตะกอน กล่าวคือ ตะกอนจะมีขนาดจำกัดที่ค่า G หนึ่งๆ และขนาดของตะกอนจะแปรตามค่า HRT ในขณะที่แปรกลับกับค่า G อย่างไรก็ตาม แม้ว่าที่ค่า G สูงๆ จะทำให้ได้ตะกอนขนาดเล็ก ตะกอนที่ได้จะมีความแน่น (dense) กว่าตะกอนขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า G ที่ต่ำกว่า (16,22,10,19,30) ที่กล่าวมาจะเห็นว่าค่า G และ HRT ที่มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพขั้นสมานตะกอนสูงขึ้นเสมอ แต่เมื่อพิจารณาครอบคลุมไปถึงการดกตะกอนซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในระบบผลิตน้ำประปา ค่า G และ HRT จะต้องมีช่วงค่าจำกัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ตะกอนที่จมตัวได้ดี ดังนั้นเมื่อ Camp[6] ทำการวิเคราะห์ขั้นสมานตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาจึงพบว่าพารามิเตอร์ไร้มิติที่เกิดจากผลคูณระหว่าง G และ HRT จะมีค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2×10^4 ถึง 2×10^5 และค่า G ที่เหมาะสมคือ 20 ถึง 70 วินาที$^{-1}$ ต่อมา Fair, Geyer & Okun[11] Gemmel[12] และ O'Melia[31] ได้เสนอว่า G.HRT ที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่าง 10^4 ถึง 10^5 โดยที่ G ควรมีค่าจาก 10 ถึง 100 วินาที$^{-1}$ ช่วงค่า G.HRT และ G ดังกล่าวมานี้เป็นเกณฑ์ออกแบบและควบคุมขั้นสมานตะกอนกันโดยทั่วไป นอกจากนี้ Andreu-Villegas & Letterman[2] ยังได้ทำการทดลองโดยใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน และใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์ด้วยคาโอลิไนท์ (kaolinite) ปรากฏผลว่าค่า G ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 50 วินาที$^{-1}$ ค่า HRT ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 นาที โดยระบุว่า HRT ที่มากไปกว่านี้จะไม่เพิ่มสมรรถนะของการสมานตะกอนแต่อย่างใด นอกจากนี้ยังได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า G ที่เหมาะสมกับ HRT และปริมาณสารส้มในเชิงเอ็มไพริกัลดังต่อไปนี้

$$(G^*)^{28}\ HRT.C = 44 \times 10^5 \qquad (3\text{-}14)$$

โดยที่ G* คือค่า G ที่ให้ความขุ่นภายหลังการสมานตะกอนและตกตะกอนน้อยที่สุด มีหน่วยเป็นวินาที$^{-1}$ HRT มีหน่วยเป็นนาที และ C เป็นปริมาณสารส้มในช่วง 0 ถึง 50 ก/ม^3 สมการนี้เป็นตัวอย่างที่ดีที่แสดงถึงการพัฒนาพารามิเตอร์ G ซึ่งใช้ออกแบบและควบคุมขั้นสมานตะกอนให้มีความสัมพันธ์ครอบคลุมไปถึงการทำงานของขั้นผสมเร็ว

3.2 แนวความคิดของกระบวนการรวมตะกอนในท่อ

กระบวนการรวมตะกอนในท่อของการวิจัยนี้หมายถึงกระบวนการซึ่งรวมการผสมเร็วและการสมานตะกอนไว้ในถังปฏิกรณ์เดียวกันคือท่อ แนวความคิดของกระบวนการรวมตะกอนในท่อเริ่มจากการพิจารณากระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไป ตลอดจนการพิจารณาการผสมเร็วในท่อและการสมานตะกอนในท่อ เพื่อพัฒนาให้ได้กระบวนการรวมตะกอนที่ประหยัด ควบคุมได้ง่าย และมีประสิทธิภาพพอสมควร สำหรับนำไปใช้ในระบบประปาที่ให้บริการชุมชนขนาดเล็กหรือระบบประปาชนบท

3.2.1 กระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไป

กระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไปจำแนกเป็นกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน และกระบวนการรวมตะกอนในถังตะกอนสัมผัส (solid contact clarifier)

กระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานประกอบด้วยขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนในถังปฏิกรณ์ที่แยกออกจากกัน กระแสเข้าและออกของกระบวนการไหลในแนวระดับ อนุภาคตะกอนและตะกอนในถังปฏิกรณ์มีความเข้มข้นใกล้เคียงกันและไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ถังปฏิกรณ์ที่ใช้โดยทั่วไปคือถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (complete stirred tank reactor) ซึ่งอาศัยเครื่องมือกลสำหรับสร้างความปั่นป่วนในน้ำ เช่น เทอร์ไบน์ (turbine) หรือใบพัด (propeller) ในถังปฏิกรณ์ผสมเร็ว ใบพาย (paddle) ในถังปฏิกรณ์สมานตะกอน เป็นต้น

ข้อดีของกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานดังกล่าวนี้คือ สามารถแปรค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่สำคัญคือ G โดยแปรการทำงานของเครื่องมือกล และสามารถควบคุมให้ขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนมีประสิทธิภาพสูงสุดในแต่ละขั้น เนื่องจากถังปฏิกรณ์แยกออกจากกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐานก็มีข้อด้อยที่สำคัญกล่าวคือ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายขั้นต้นเนื่องจากถังปฏิกรณ์มีขนาดใหญ่และต้องติดตั้งเครื่องมือกล สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายขั้นดำเนินการโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าค่าไฟฟ้า และต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความรู้ความชำนาญสูง เพื่อควบคุมให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงสุด ได้มีความพยายามปรับปรุงเพื่อแก้ข้อด้วยดังกล่าวนี้โดยอาศัยวิธีทางชลศาสตร์สำหรับสร้างความปั่นป่วนในน้ำแทนเครื่องมือกล เช่น ไฮดรอลิคจัมพ์ (hydraulic jump) ในขั้นผสมเร็ว ผนังกั้น (baffle) ในขั้นสมานตะกอน ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายขั้นต้นและขั้นดำเนินการลงได้ในระดับหนึ่ง และควบคุมการทำงานของกระบวนการได้ง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ต้องใช้เครื่องมือกล

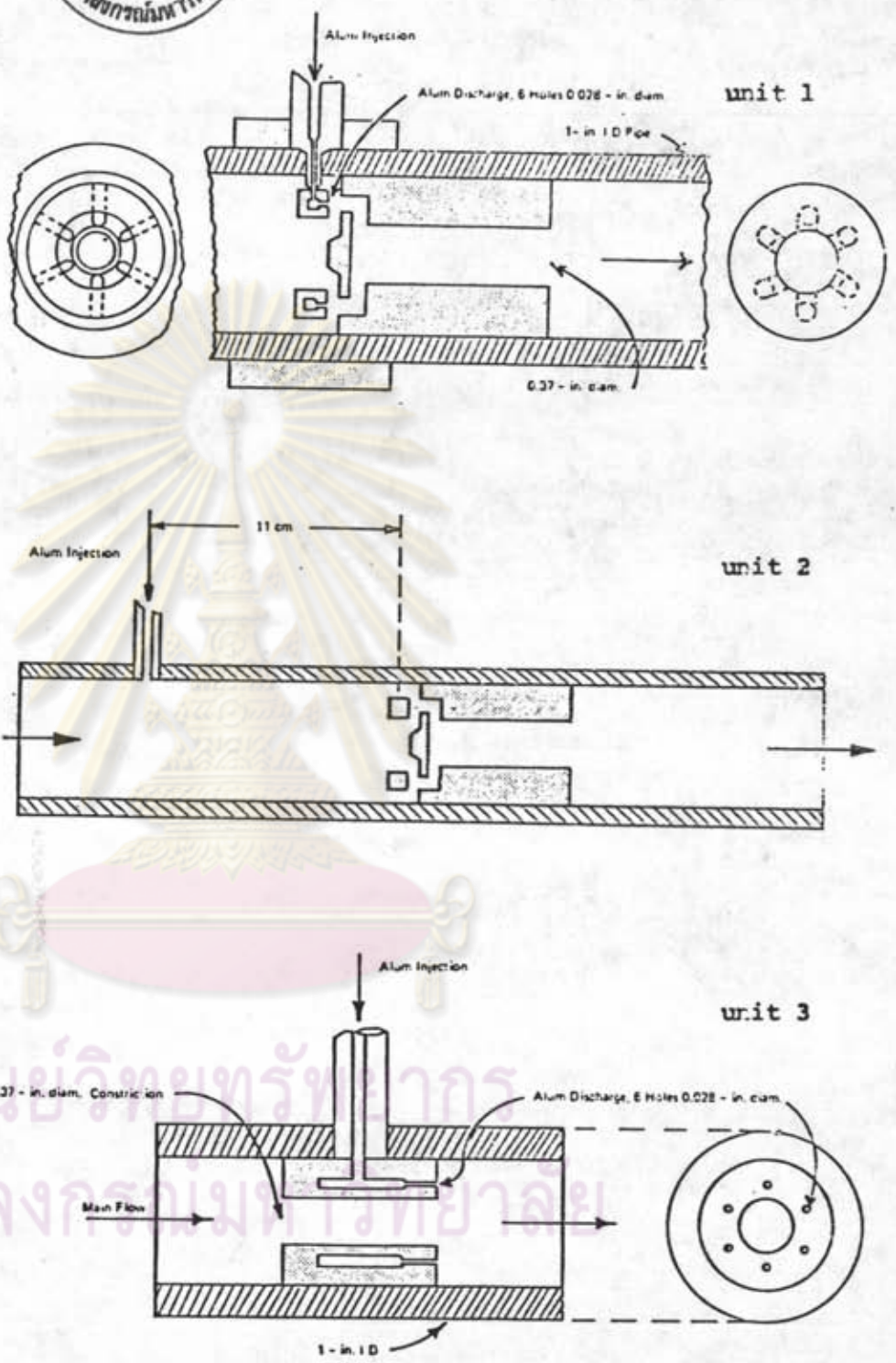
กระบวนการรวมตะกอนในถังตะกอนสัมผัส เป็นกระบวนการรวมตะกอนที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้มีขนาดเล็กลงและใช้เครื่องมือกลน้อยลง เมื่อเทียบกับกระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน การลดขนาดถังปฏิกรณ์กระทำโดยเพิ่มความเข้มข้นของตะกอนในขั้นสมานตะกอนด้วยการหมุนเวียนตะกอนในถังหมุนเวียนตะกอนในตัว (solid recirculation clarifier) หรือด้วยการสร้างคุณภาพให้เกิดชั้นตะกอนในถังชั้นตะกอน (sludge blanket clarifier) ทำให้ขั้นสมานตะกอนมีขนาดเล็กลง การใช้เครื่องมือกลให้น้อยลงกระทำโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบปล็กโฟล (plug flow reactor) แบบท่อสำหรับขั้นผสมเร็ว อย่างไรก็ตามกระบวนการรวมตะกอนในถังตะกอนสัมผัสมีข้อด้อยที่สำคัญคือควบคุมยากหรือต้องใช้ผู้ควบคุมที่มีความรู้ความชำนาญเป็นพิเศษ กระบวนการดังกล่าวจึงนิยมใช้เฉพาะในระบบประปาขนาดใหญ่ซึ่งมีบุคลากรและอุปกรณ์พร้อมมูล

3.2.2 การผสมเร็วในท่อและการสมานตะกอนในท่อ

การผสมเร็วในท่อใช้กันในกระบวนการรวมตะกอนของถังตะกอนสัมผัส ในขณะที่การสมานตะกอนในท่อยังมิได้รับการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน

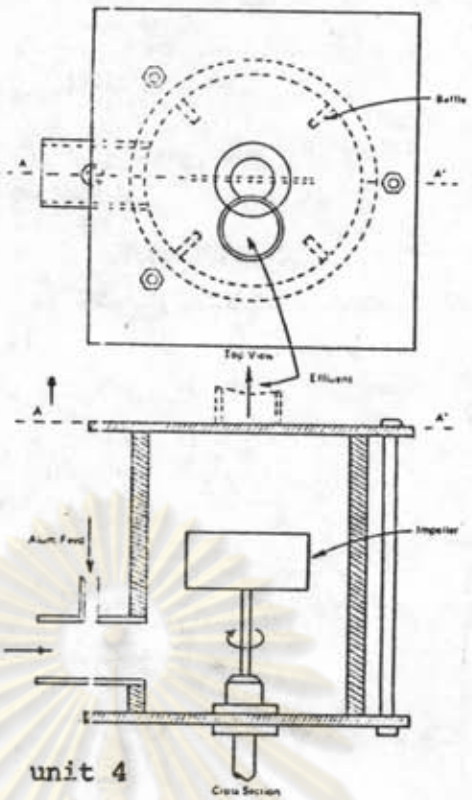
อย่างจริงจัง อนึ่ง ในกรณีของท่อน้ำเข้าของกระบวนการกรองโดยตรง (direct filtration process) ซึ่งมีการเติมสารรวมตะกอน อาจอนุมานได้ว่าเป็นการผสมเร็วในท่อหรือรวมถึงการสมานตะกอนในท่อ อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้คือสารที่กรองได้ง่าย (filtrable solid) มิใช่สารที่ตกตะกอนได้ง่าย (settleable solid) เช่นที่ได้จากกระบวนการรวมตะกอน

Vrale & Jorden[47] ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมเร็วในถังปฏิกรณ์ไหลตรงแบบท่อที่มีลักษณะการเติมสารเคมีแตกต่างกันกับการผสมเร็วในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่ใช้ใบพัดเป็นเครื่องมือกลดังแสดงในรูป 3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระทำโดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของอัตราการรวมตะกอนปรากฏหรือ K_{app} (apparent aggregation rate coefficient) หลังจากผ่านการสมานตะกอนแบบจาร์ซึ่งกำหนดให้คงที่ทุกการทดลอง ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่า การผสมเร็วในถังปฏิกรณ์แบบปล็อกโฟลทุกชนิดให้ประสิทธิภาพการผสมเร็วสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ นอกจากนี้ Vrale & Jorden[47] ประเมินจากผลการทดลองว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผสมเร็วให้สูงขึ้นไม่ต่ำกว่า 3.5 เท่า โดยใช้ถังปฏิกรณ์ปล็อกโฟลแบบท่อแทนที่ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่ใช้เครื่องมือกล อนึ่ง สุรินทร์ พลสมบูรณ์[50] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการผสมเร็วในท่อเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ G และ t โดยการไหลของน้ำในท่อผสมเร็วเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งมีค่า R_e แปรจาก 8,000 ถึง 40,000 ผลการทดลองปรากฏว่า G ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 400 วินาที$^{-1}$ ที่ $20<t<60$ วินาทีและเท่ากับ 2600 วินาที$^{-1}$ ที่ $1<t<20$ วินาที t ที่เหมาะสมมีค่าแปรจาก 2 ถึง 100 วินาทีโดยแปรกลับกับค่า G และ C Gt ที่เหมาะสมมีค่าแปรจาก 10,000 ถึง 20,000 และพบว่าสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง G t และ C ในรูปสมการเอ็มไพริกัล คือ $Gt_{opt}C^{0.64} = 100,000$ เมื่อ t_{opt} คือ t ที่เหมาะสม และ C คือปริมาณสารส้มที่ใช้ (alum dosage)



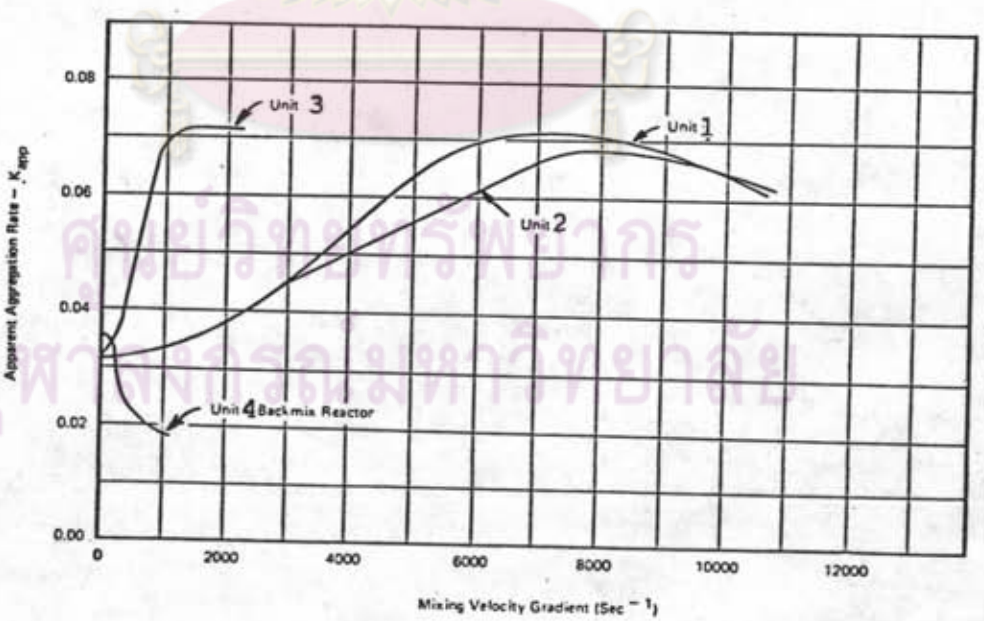
รูปที่ 3.1 (ก) ถังปฏิกรณ์ไหลตรงแบบท่อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



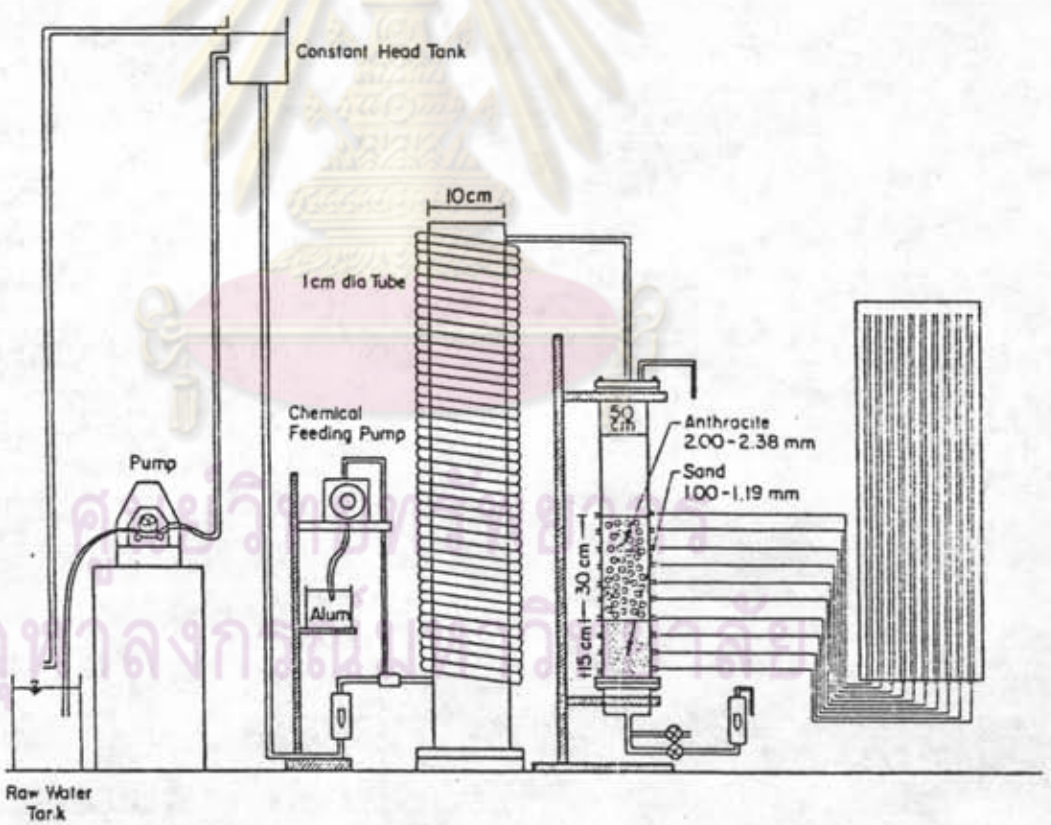
รูปที่ 3.1 (ข) ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่ใช้ใบพัด

รูปที่ 3.1 (ก) และ (ข) ถังปฏิกรณ์ไหลตรงแบบท่อและถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์

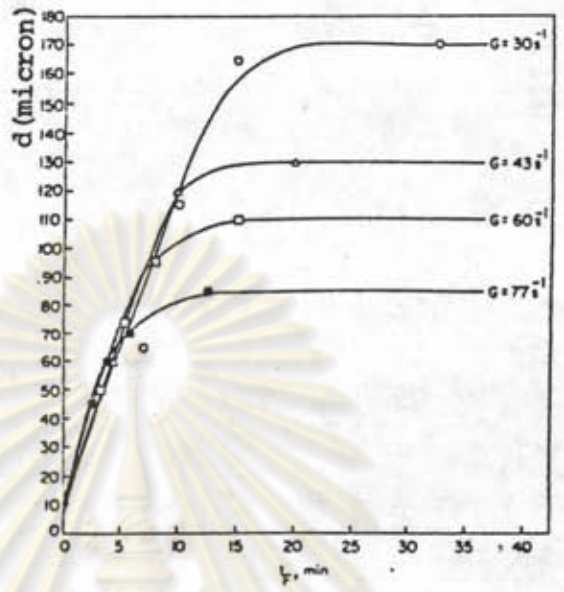


รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Kapp และ G ของถังปฏิกรณ์ผสมเร็วแบบต่างๆ ตามรูปที่ 3.1 (47)

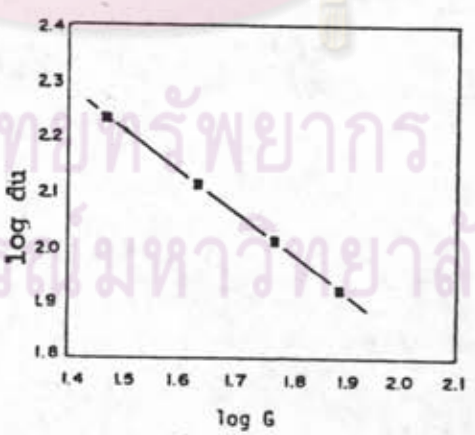
Sawang Notthakun[30] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับกระบวนการกรองโดยตรงที่ประกอบด้วยท่อสมานตะกอนวนเวียน (spiral tube flocculator) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 การไหลของน้ำในท่อสมานตะกอนเป็นการไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) โดยมีค่า Re แปรจาก 404 ถึง 917 ผลการทดลองในส่วนของท่อสมานตะกอนวนเวียนพบว่าประสิทธิภาพของการสมานตะกอนแปรตามขนาดของตะกอนโดยขนาดของตะกอนแปรตาม HRT และแปรกลับกับ G ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ขนาดสูงสุดของตะกอน (ultimate floc size) ถูกกำหนดโดยค่า G ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และพบว่าตะกอนที่ได้จากท่อสมานตะกอนแบบวนเวียนโดยทั่วไปจะมีขนาดสม่ำเสมอที่ค่า HRT และ G หนึ่ง



รูปที่ 3.3 ท่อสมานตะกอนวนเวียนในกระบวนการกรองโดยตรง ตามการทดลองของ Sawang Notthakun[30]



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตะกอนกับ HRT และ G ของท่อสมานตะกอนวนเวียน (30)



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดสูงสุดของตะกอนกับ G ของท่อสมานตะกอนวนเวียน (30)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

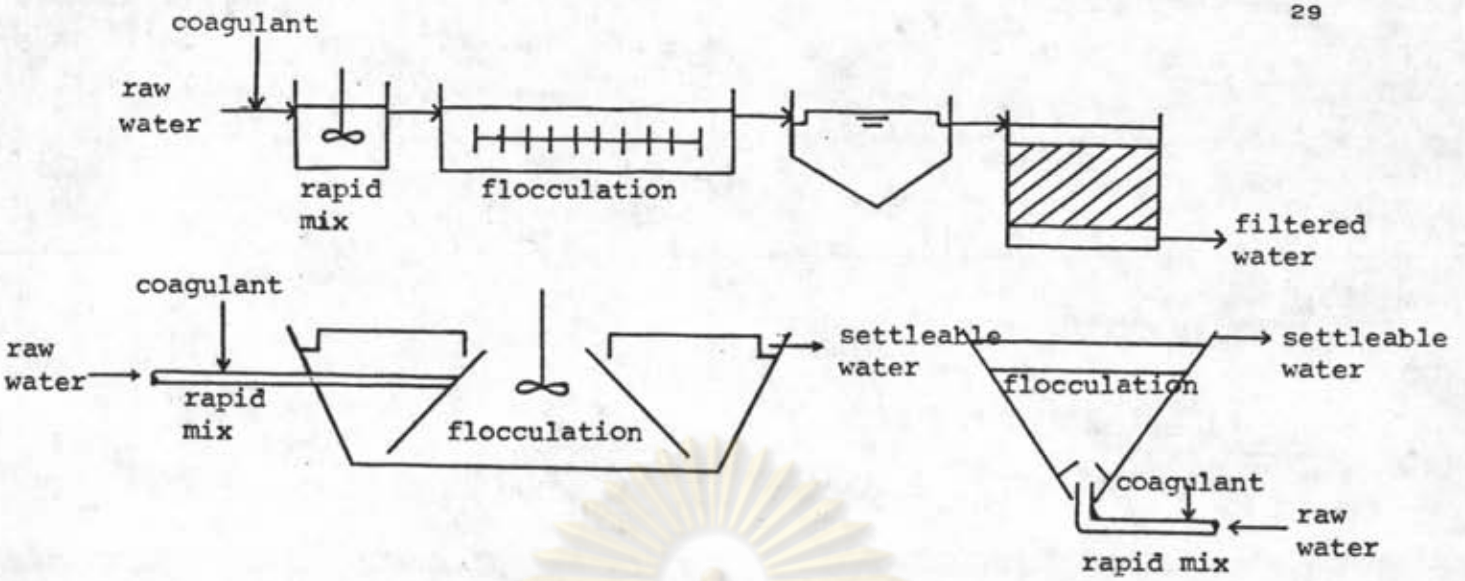
3.2.3 กระบวนการรวมตะกอนในท่อ

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่ากระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไปซึ่งได้แก่ กระบวนการรวมตะกอนแบบพื้นฐาน และกระบวนการรวมตะกอนในถังตะกอนสัมผัส มีลักษณะร่วมที่สำคัญคือ ถังปฏิกรณ์ของขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนแยกออกจากกัน ถังปฏิกรณ์ของขั้นผสมเร็วเป็นถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์หรือถังปฏิกรณ์แบบปลั๊กโฟล และถังปฏิกรณ์ของขั้นสมานตะกอนโดยทั่วไปได้แก่ถังปฏิกรณ์แบบใบพัดกวน ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดข้อด้อยบางประการได้แก่ ค่าใช้จ่ายขั้นต้นและขั้นขั้นจันและขั้นดำเนินการสูง และต้องใช้ผู้มีความรู้ความชำนาญสูงสำหรับควบคุมให้กระบวนการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

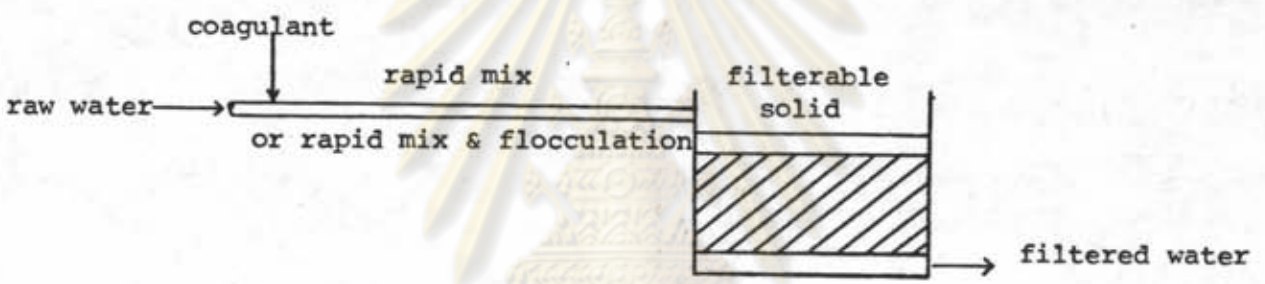
การวิจัยนี้มุ่งถึงการประยุกต์ให้ได้กระบวนการรวมตะกอนที่ประหยัดควบคุมได้ง่าย และมีประสิทธิภาพพอสมควร สำหรับนำไปใช้กับระบบประปาที่ให้บริการชุมชนขนาดเล็กหรือประปาชนบท แนวความคิดหลักของกระบวนการรวมตะกอนเพื่อบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวคือ รวมการผสมเร็วและการสมานตะกอนเข้าไว้ในถังปฏิกรณ์เดียวกัน ใช้ถังปฏิกรณ์แบบปลั๊กโฟลปราศจากเครื่องมือกล ทั้งนี้เพื่อลดค่าใช้จ่ายขั้นต้นและขั้นดำเนินการ กระบวนการรวมตะกอนในท่อสามารถตอบสนองแนวความคิดหลักดังกล่าวได้เป็นอย่างดี โดยผลได้ที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือควบคุมการทำงานของกระบวนการได้ง่าย แม้ว่าอีกนัยหนึ่งจะทำให้ต้องสูญเสียความยืดหยุ่นในการควบคุมที่ได้จากการใช้เครื่องมือไปก็ตาม

รูปที่ 3.6 แสดงถึงความแตกต่างระหว่างกระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไป การผสมเร็วหรือการผสมเร็วและการสมานตะกอนในกระบวนการกรองโดยตรง และกระบวนการรวมตะกอนในท่อตามการวิจัยนี้ จะเห็นว่ากระบวนการรวมตะกอนในท่อแตกต่างจากกระบวนการรวมตะกอนทั่วไปเนื่องจากใช้ถังปฏิกรณ์ปลั๊กโฟลคือท่อโดยรวมขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนเข้าด้วยกัน และแตกต่างจากท่อผสมเร็วหรือท่อรวมตะกอนในกระบวนการกรองโดยตรงเนื่องจากผลที่ได้คือตะกอนที่ตกตะกอนได้ง่ายมิใช่ตะกอนที่กรองได้ง่าย

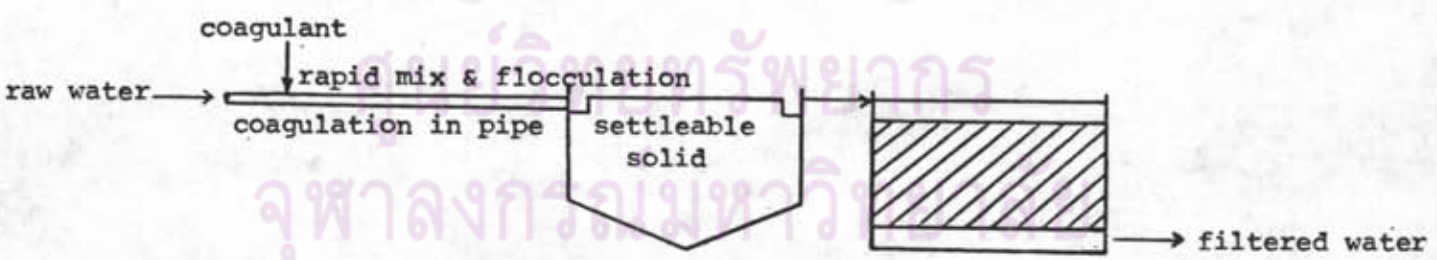
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



กระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไป



กระบวนการกรองโดยตรง



กระบวนการรวมตะกอนในท่อของการวิจัยนี้

รูปที่ 3.6 กระบวนการรวมตะกอนโดยทั่วไป การผสมเร็วหรือการรวมตะกอนในท่อของ กระบวนการกรองโดยตรง และกระบวนการรวมตะกอนในท่อของการวิจัยนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อนึ่ง กระบวนการรวมตะกอนในท่อมุ่งนำไปใช้ในระบบประปาขนาดเล็กที่ประปาชนบทโดยต้องการให้มีประสิทธิภาพพอสมควรสามารถกำจัดความขุ่นให้คงเหลือความขุ่นในกระแสออกอยู่ในเกณฑ์ที่กระบวนการกรองยอมรับได้คือไม่เกิน ๑๐ NTU นั่นคือ ที่ความขุ่นในกระแสเข้าเท่ากับ ๕๐ NTU ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนในท่อซึ่งต้องการจะมีค่า ๘๐% ขึ้นไป ช่วงประสิทธิภาพดังกล่าวนี้อยู่ในระดับที่คาดหวังได้ถ้าสามารถประสานค่า G และ T ของท่อรวมตะกอน มิให้ค่าเกินไปหรือสูงเกินไปจนเกิดปัญหาอย่างรุนแรงกับขั้นผสมเร็วและขั้นสมานตะกอนตามลำดับ ดังนั้น การทดลองเกี่ยวกับกระบวนการรวมตะกอนในท่อของการวิจัยนี้ จึงต้องดำเนินการให้ครอบคลุมตั้งแต่ค่า G ที่ต่ำกว่าลำดับ 10^2 จนถึง 10^3 วินาที $^{-1}$ ซึ่งเทียบเท่าการไหลแบบลามินาร์ถึงปั่นป่วน และครอบคลุมตั้งแต่ค่า T ในระดับวินาทีจนถึงระดับนาที เพื่อให้สามารถหาค่า G และ T ที่เป็นไปได้มากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย