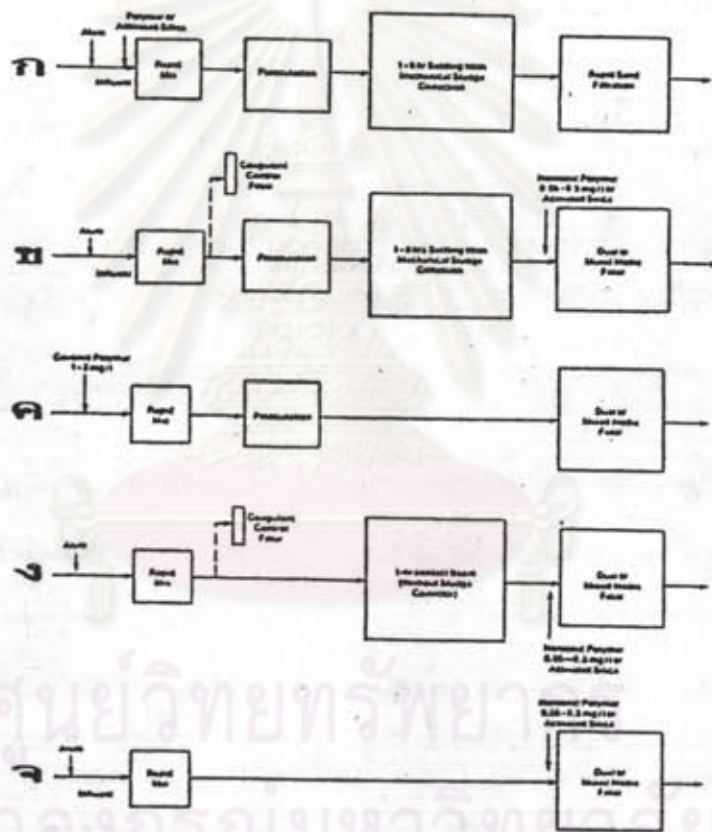




ทฤษฎีและแนวความคิด

การรวมตะกอนเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดอนุภาคแขวนลอยต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่นในน้ำ โดยการทำให้อนุภาคเหล่านี้รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ จนจมตัวหรือกรองออกได้ ดังแสดงผังของกระบวนการได้ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผังของกระบวนการกำจัดความขุ่นแบบต่าง ๆ (3)

- (ก) กระบวนการรวมตะกอน โดยทั่วไป
- (ข) กระบวนการรวมตะกอน โดยทั่วไปที่มีระบบควบคุมปริมาณสารรวมตะกอน
- (ค) กระบวนการกรองโดยตรงที่มีถังกวนเข้า
- (ง) กระบวนการกรองโดยตรงที่มีถังลิ่มผิวส
- (จ) กระบวนการกรองโดยตรงที่มีถังกวนเร็ว

3.1 ทฤษฎีของคอลลอยด์

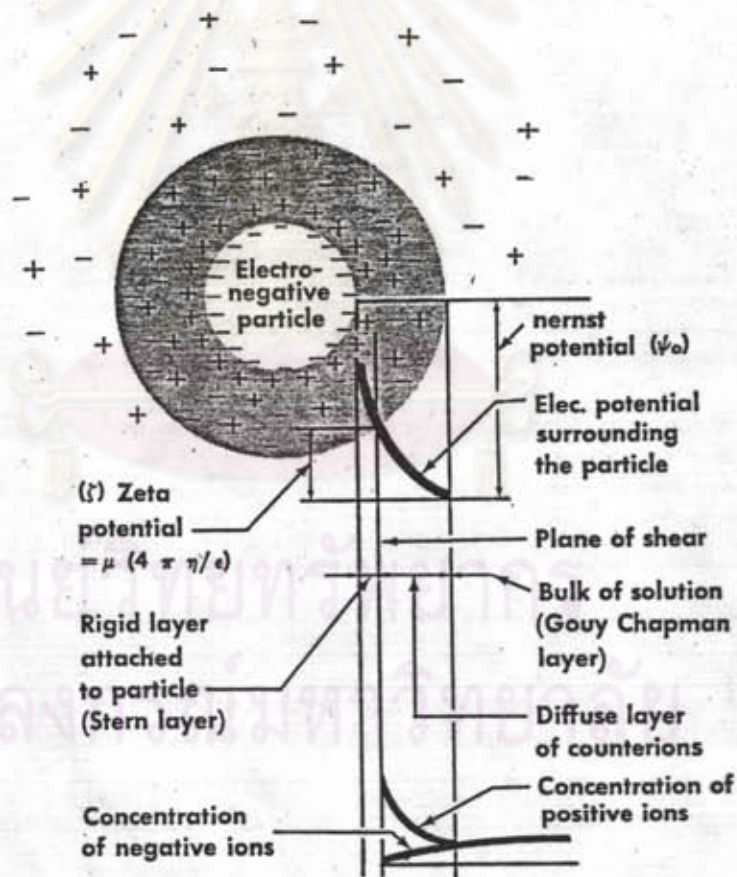
ทฤษฎีของคอลลอยด์จะกล่าวถึงสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ และสภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการรวมตะกอน

3.1.1 สภาวะคงตัวของคอลลอยด์

ระบบของคอลลอยด์ประกอบด้วย วัฏภาคกระจาย (dispersed phase) และวัฏภาคเอกพันธ์ (homogeneous phase) การที่อนุภาคคอลลอยด์กระจายคงสภาพแขวนลอยอยู่ในน้ำ นอกจากจะเป็นเพราะอนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมากจึงจมตัวช้า ยังมีสาเหตุเนื่องจากอนุภาคเหล่านี้มีประจุไฟฟ้าที่ผิว ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของอนุมูลต่าง ๆ จากปฏิกิริยาเคมีที่ผิวของอนุภาค หรือเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหน่วยแลตทิซ (lattice unit) ของอนุภาค โดยการแทนที่ไอออนที่ผิวของอนุภาคด้วย ไอออนต่างชนิดจากภายนอกที่มีประจุต่างกัน หรือเกิดจากไอออนในน้ำที่ถูกดูดซับที่ผิวของอนุภาค โดยทั่วไปชนิดและขนาดของประจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนและพีเอชของน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำตามธรรมชาติมักจะมีประจุไฟฟ้าลบ

โดยที่ประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อไอออนต่าง ๆ ในน้ำ โดยไอออนต่างประจุ (counter-ions) จะถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และไอออนประจุเหมือน (co-ions) จะถูกผลักให้ห่างจากผิว ปรากฏการณ์นี้ทำให้เกิดทฤษฎีว่ามีประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical double layer) ล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งได้แก่ ชั้นถาวร (rigid หรือ Stern layer) และชั้นกระจาย (diffuse layer) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ชั้นถาวรประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำและไอออนต่างประจุ ที่เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคด้วยแรงดึงดูดทางเคมีได้แก่ พันธะทางไอออน (ionic bond) พันธะโคเวเลนต์ (covalent bond) และพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals' force) และแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์กับไอออนต่างประจุในน้ำ ถัดจากชั้นถาวร การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเนื่องจากความร้อน และพฤติกรรมของการผลักและดึงดูดระหว่างกันของไอออน ทำให้ไอออนต่างประจุถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิวชั้นที่ไอออนกระจายอยู่ดังกล่าวนี้อธิบายชั้นกระจาย ขนาดหรือลักษณะของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ตลอดจนปริมาณและขนาดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (electric potential) ระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ โดยศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิวและมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิว เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน แรงผลักระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้านแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างมวลอนุภาค ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะระหว่างอนุภาคลดลง ดังนั้น ถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักระหว่างอนุภาคมีค่ามากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อยเนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสเข้าใกล้กันเพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง



CONCEPT OF THE ZETA POTENTIAL

รูปที่ 3.2 รูปจำลองที่ใช้อธิบายทฤษฎีประจุไฟฟ้าสองชั้น (4)

3.1.2 สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์

ปรากฏการณ์ที่ทำให้คอลลอยด์ในน้ำ เปลี่ยนจากสภาวะคงตัวมาเป็นสภาวะไม่คงตัวที่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นได้ง่าย จำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท (5) ได้แก่

1. การอัดตัวของชั้นกระจาย (double-layer compression) เกิดขึ้นเมื่อปริมาณไอออนต่างประจุในน้ำมีมากขึ้น ความหนาแน่นของไอออนต่างประจุในชั้นกระจายจะมีมากขึ้นด้วย ทำให้ความหนาของชั้นกระจายที่ทำหน้าที่สะท้อนประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลงอนุภาคคอลลอยด์จึงมีโอกาสเข้าใกล้กันได้มากขึ้น จนแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันได้

2. การดูดติดและสะท้อนประจุไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization) เกิดขึ้นเมื่อไอออนต่างประจุถูกดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์จึงลดลงทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักทางไฟฟ้าระหว่างอนุภาคที่ลดลงได้ จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

3. การห่อหุ้มด้วยผลึก (enmeshment in a precipitate) เกิดขึ้นเมื่อมีการตกผลึกของไฮดรอลิโพลีเมอร์ (hydrous polymer) อนุภาคคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกน (nuclei) ของการตกผลึก ถูกห่อหุ้มอยู่ในกลุ่มผลึกและแยกตัวออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่ตกตะกอน

4. การดูดติดและเชื่อมต้อระหว่างอนุภาค (adsorption and inter-particle bridging) เริ่มจากการดูดติดด้วยพันธะทางเคมีระหว่างผิวของคอลลอยด์กับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ อนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อด้วยโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ และแยกออกจากน้ำในลักษณะที่เป็นตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ในที่สุด

การทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ประเภทใดประเภทหนึ่ง หรือหลายประเภทร่วมกันดังกล่าวมานี้เป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

3.2 ทฤษฎีของการกวนเร็ว

การกวนเร็วเป็นกระบวนการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ด้วยสารรวมตะกอน

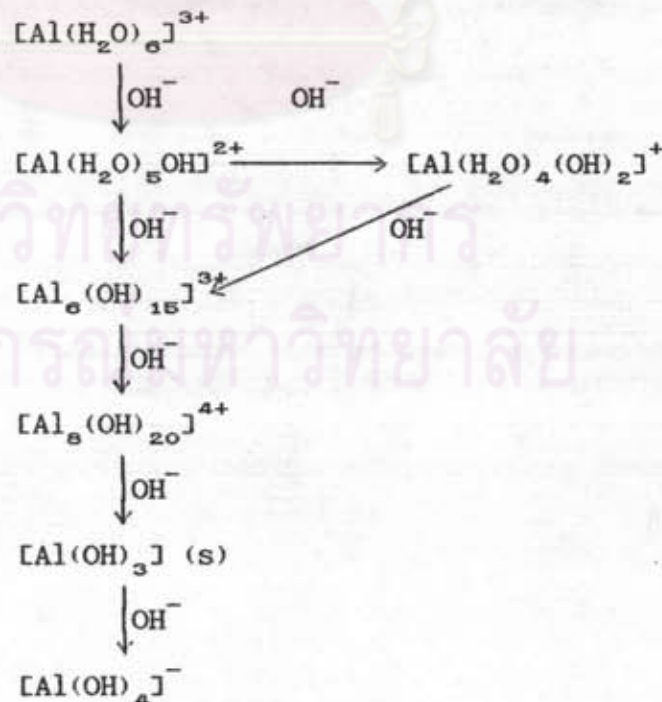
ประเภทกลไกที่เกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบ ชนิดและปริมาณสารรวมตะกอน ตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ

สารรวมตะกอนที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน จำแนกออกเป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ โดยที่สารรวมตะกอนที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้คือสารส้มซึ่งเป็นเกลือของโลหะชนิดหนึ่ง ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงปฏิกิริยาเคมีของสารส้มในน้ำ กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ด้วยสารส้ม และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

3.2.1 ปฏิกิริยาเคมีของสารส้มในน้ำ

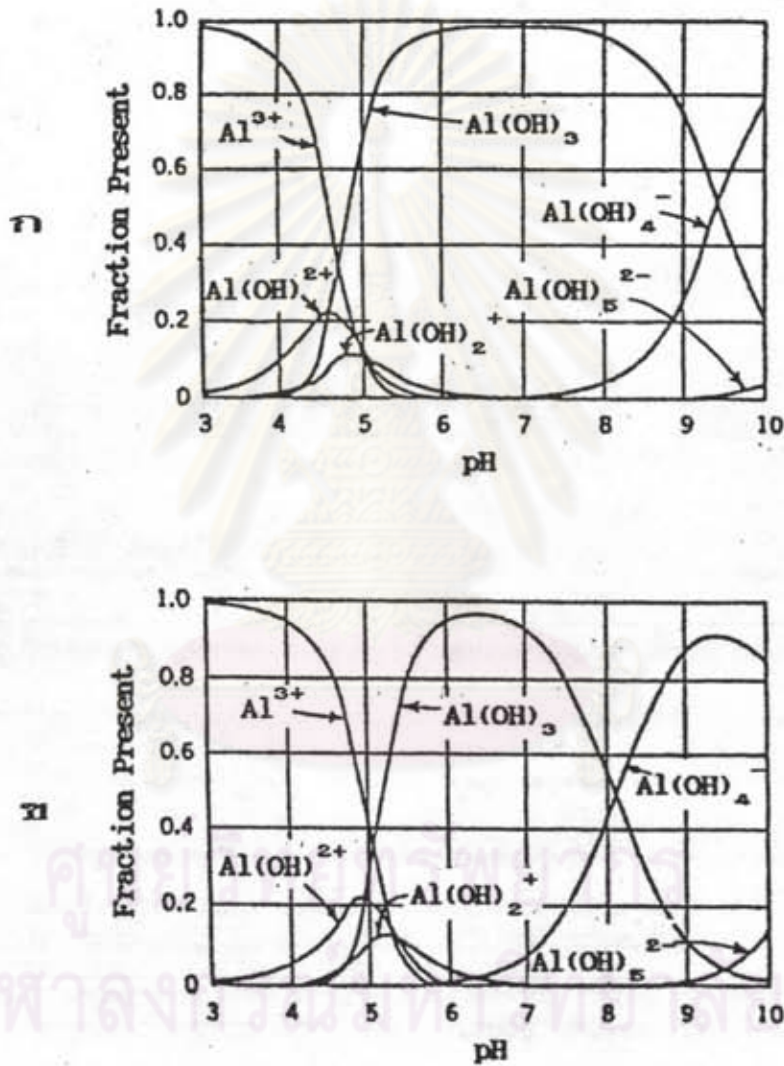
ปฏิกิริยาเคมีของสารส้มเมื่อเติมลงในน้ำจะมีความซับซ้อนและไม่คงตัว เนื่องจากเกิดสารเชิงซ้อนชั่วคราวก่อนที่จะกลายเป็นผลึก $Al(OH)_3$

Matijevic และ Rubin (6) พบว่าอลูมิเนียมไอออนที่ได้จากเกลือของอลูมิเนียมละลายน้ำจะถูกไฮเดรต (hydrated) ด้วยน้ำ 6 โมเลกุลได้ $Al(H_2O)_6^{3+}$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า aquometal ion ไฮโดรลิซิส (hydrolysis) ของ $Al(H_2O)_6^{3+}$ จะเกิดขึ้นทันทีโดยลิแกนด์ (ligands) ชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่ง OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสารส้มในน้ำ (7)

สารเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสารส้มในน้ำ ได้แก่ $Al(H_2O)_5OH^{2+}$ $Al(H_2O)_4(OH)_2^+$ $Al_6(OH)_{15}^{3+}$ $Al_7(OH)_{17}^{4+}$ $Al_8(OH)_{20}^{4+}$ $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ $Al(OH)_3$ $Al(H_2O)_2(OH)_4^-$ $Al(H_2O)(OH)_5^{2-}$ และ $Al(OH)_6^{3-}$ ชนิดและปริมาณของสารเชิงซ้อน ที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสและอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสขึ้นกับปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอช ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ ของอลูมิเนียม และ พีเอช (8)

(ก) ความเข้มข้นของอลูมิเนียมเปอร์คลอเรต (aluminium perchlorate)

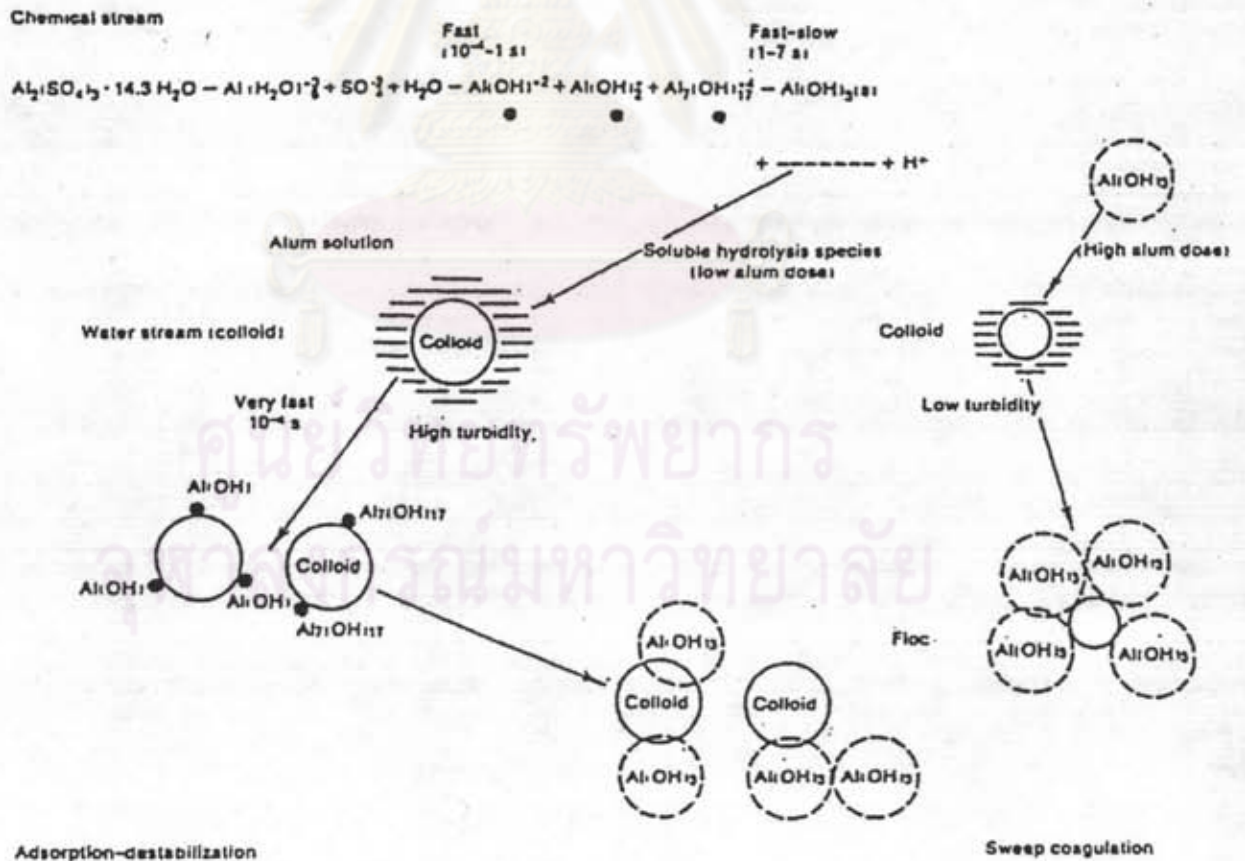
1×10^{-3} โมล/ล.

(ข) ความเข้มข้นของอลูมิเนียมเปอร์คลอเรต (aluminium perchlorate)

1×10^{-4} โมล/ล.

3.2.2 กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ด้วยสารส้ม

กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ในน้ำตามธรรมชาติทั่วไปด้วยสารส้ม
 จำแนกได้ 2 ประเภทได้แก่ กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization mechanism) และกลไกแบบกวาด (sweep mechanism) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ประเภทของกลไกที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ลักษณะทางเคมีของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพีเอช ความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ และระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาผสม (mixing time) โดยปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอชกำหนดชนิดและปริมาณสารเชิงซ้อน ในขณะที่ความเข้มข้นของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำกำหนดโอกาสที่สารเชิงซ้อนทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ นอกจากนี้ชนิดของอุปกรณ์กวนเรี่ยยังมีอิทธิพลต่อประเภทของกลไกอีกด้วย



รูปที่ 3.5 กลไกของกระบวนการรวมตะกอนด้วยสารส้ม (6)

1. กลไกแบบคูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า

กลไกแบบนี้เกิดจากสารเชิงซ้อนประจุบวกถูกคูดติดกับผิวของคอลลอยด์ ด้วยพันธะทางเคมี ประจุบวกของสารเชิงซ้อนจะสะเทินประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง จนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่าและเกิดการรวมตัวระหว่างคอลลอยด์ชั้นในที่สุด

ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสได้สารเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ เกิดขึ้นเร็วมากภายใน 10^{-1} ถึง 1 วินาทีและการคูดติดระหว่างสารเชิงซ้อนกับผิวของคอลลอยด์จะเกิดขึ้นภายใน 10^{-4} วินาที (5, 9) ดังนั้นจึงต้องสร้างความปั่นป่วนของน้ำในชั้นเวลานี้เร็วให้เกิดขึ้นอย่างรุนแรง ทั้งนี้เพื่อให้สารเชิงซ้อนจากผลไฮโดรลิซิสดังกล่าว สามารถสัมผัสและทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ทันที่ที่ Hudson และ Wolfner (10) จึงได้แนะนำให้ใช้อุปกรณ์กวนเร็วแบบปั่นตัดในท่อ (in-line blenders)

2. กลไกแบบทวาด

กลไกแบบนี้เกิดขึ้นโดยผลึก $Al(OH)_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก ตลอดจนทวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะนี้ คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในชั้นสมานตะกอน และถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนต่อไป

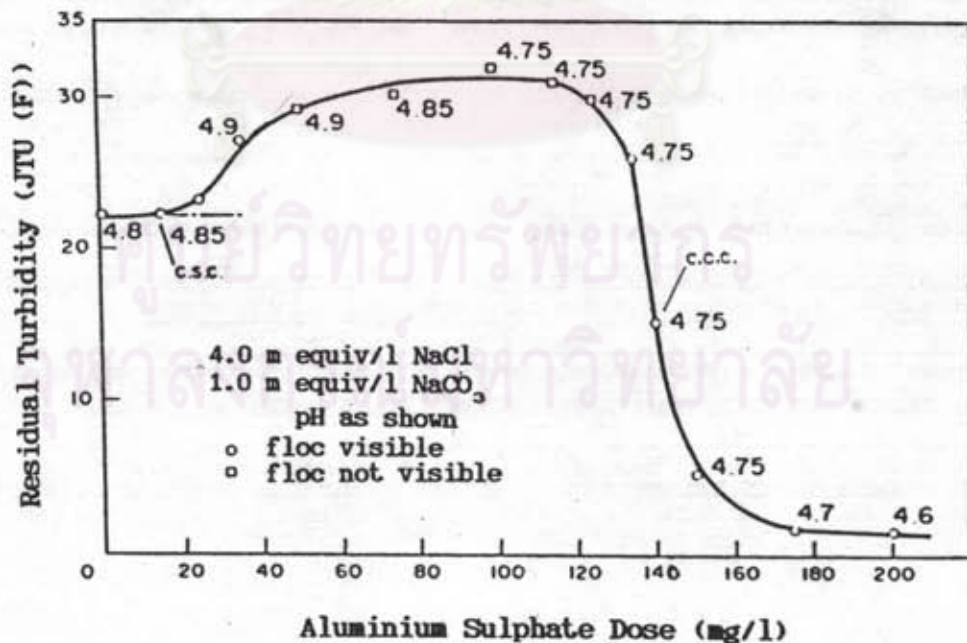
ผลึกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากไฮโดรลิซิสจะเกิดขึ้นภายใน 1 ถึง 7 วินาที (11) อัตราการตกผลึกจะขึ้นกับปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอช โดยที่การตกผลึกจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากถ้าระดับเกิดการอิมิตัวของผลึกที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่า 100 ระดับดังกล่าวนี้แปรตามปริมาณสารรวมตะกอน นอกจากนี้ยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึกและระดับความปั่นป่วนของน้ำอีกด้วย เมื่อพิจารณาถึงกลไกนี้จึงไม่ค่อยจำเป็นต้องกระจายสารรวมตะกอนให้ผสมกับน้ำดิบอย่างทันทีทันใดเหมือนกลไกแบบคูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า

3.2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

สารรวมตะกอนที่เป็นเกลือของโลหะทั่วไป ได้แก่ สารประกอบของอลูมิเนียมและสารประกอบของเหล็ก ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกในชั้นเวลานี้เร็วที่ใช้เกลือของโลหะเป็นสารรวมตะกอนมีดังต่อไปนี้

1. ปริมาณสารรวมตะกอน

ประเภทกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจะพิจารณาพร้อมกันระหว่างปริมาณสารรวมตะกอน ความเข้มข้นของคอลลอยด์ และพีเอช ดังตัวอย่างการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ไอน์ที่มีความเข้มข้น 50 มก./ล. ด้วยสารส้มที่ช่วงพีเอช 4.6 ถึง 4.9 แสดงในรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าการทำลายสภาวะคงตัวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารรวมตะกอนจนถึงปริมาณที่คอลลอยด์เริ่มเกิดสภาวะคงตัวอีกที่ CSC (critical stabilization concentration) อาจเกิดการดูดติดด้วยสารเชิงซ้อนประจุบวกหรือเกิดการอัดตัวของชั้นกระจายด้วย H^+ และ aquometal ion ช่วงนี้การรวมตะกอนจะช้า (slow coagulation) เมื่อความเข้มข้นของสารรวมตะกอนเพิ่มจนเกือบถึงค่าเหมาะสมที่ CCC (critical coagulation concentration) ประจุของอนุภาคคอลลอยด์จะเปลี่ยนเป็นตรงข้ามกับของเดิม (charge reversal) เนื่องจากสารเชิงซ้อนประจุบวกถูกดูดติดผิวของคอลลอยด์มากเกินไป ทำให้เกิดสภาวะคงตัวได้อีก (restabilization) ช่วงสุดท้ายเมื่อใช้ความเข้มข้นมากกว่าค่า CCC จะเกิดการรวมตะกอนเร็วมาก (rapid coagulation) จากการทำอนุภาคคอลลอยด์ถูกห่อหุ้มด้วยผลึกไฮดรอกไซด์โพสิทีฟและเกิดการตกตะกอนพร้อมผลึก



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้มกับความขุ่นที่เหลือ ที่พีเอชมีค่าในช่วง 4.6 ถึง 4.9 (12)

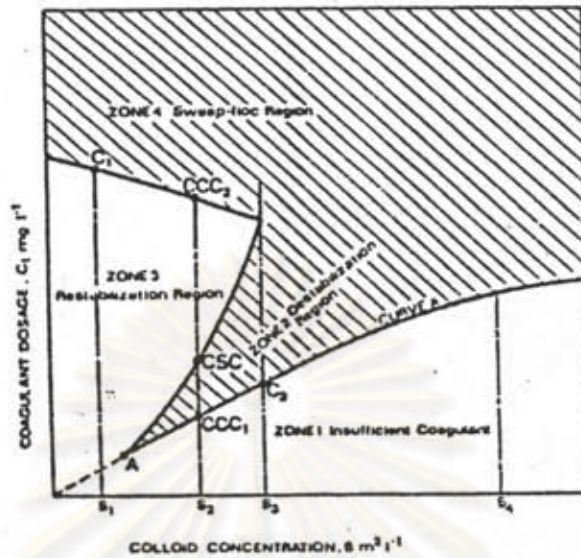
2. ชนิด ขนาด และความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์

ความขุ่นในน้ำผิวดินทั่วไปมักเกิดจากอนุภาคดินเหนียว ชนิดของอนุภาคดินเหนียวมีผลกระทบต่อปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ และมีช่วงประสิทธิผล (effective range) ในการกำจัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนต่างกัน กล่าวคืออนุภาคดินเหนียวที่มีค่า BEC (base exchange capacity) น้อย จะมีความต้องการปริมาณสารรวมตะกอนและมีช่วงประสิทธิผลในการกำจัดน้อยกว่าอนุภาคดินเหนียวที่มีค่า BEC มาก (13, 14, 15, 16) ขนาดของอนุภาคก็มีอิทธิพลต่อปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมและลักษณะสมบัติของตะกอนที่ได้ โดยน้ำดิบที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะใช้ปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมมาก (17, 18) และการรวมตะกอนของอนุภาคขนาด 1 ไมครอน จะได้ตะกอนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าของอนุภาคที่มีขนาด 1 ถึง 5 ไมครอน (17) นอกจากนี้ความเข้มข้นของคอลลอยด์ยังมีอิทธิพลต่อปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ที่พีเอชคงที่ของน้ำดิบตามธรรมชาติ ความสัมพันธ์นี้จะพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

น้ำดิบที่มีความเข้มข้นของคอลลอยด์ต่ำ (S_1) การใช้ปริมาณสารรวมตะกอนน้อย ทำให้โอกาสเกิดกลไกแบบดูดติดและทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคน้อยด้วย เนื่องจากมีอนุภาคเป็นเป้าสัมผัสต่ำ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณสารรวมตะกอนไม่น้อยกว่าค่า C_1 ให้ได้ผลิกไฮดรอสโพลิเมอร์เพียงพอที่จะเป็นเป้าสัมผัสและกวาดอนุภาคคอลลอยด์ให้อยู่ในกลุ่มผลิก เพื่อกำจัดด้วยการตกตะกอนต่อไป จะเห็นว่าช่วงที่เกิดกลไกแบบกวาดนี้ เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคเพิ่มขึ้นจะใช้ปริมาณสารรวมตะกอนลดลง เนื่องจากมีอนุภาคเป็นเป้าสัมผัสเพิ่มขึ้นนั่นเอง

น้ำดิบที่มีความเข้มข้นของคอลลอยด์สูง (S_2 และ S_3) จะใช้ปริมาณสารรวมตะกอนลดลงได้ เนื่องจากโอกาสสัมผัสระหว่างสารเชิงซ้อนประจุบวกและคอลลอยด์เพิ่มขึ้น เกิดกลไกแบบดูดติดและทำลายสภาวะคงตัว แต่ช่วงที่เกิดกลไกแบบนี้ที่ค่า CCC_1 ถึง CSC จะแควบการใช้ปริมาณสารรวมตะกอนมากกว่าค่า CSC จะทำให้อนุภาคกลับมีสภาวะคงตัวได้ ดังนั้นการกำจัดคอลลอยด์จะเกิดขึ้นได้อีกเมื่อใช้ปริมาณสารรวมตะกอนมากกว่าค่า CCC_2 โดยการห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลิกที่เกิดขึ้นของกลไกแบบกวาด

น้ำดิบที่มีความเข้มข้นของคอลลอยด์สูงมาก (S_4) จะใช้ปริมาณสารรวมตะกอนมากขึ้นจากการที่มีประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณสารรวมตะกอนนี้จะเป็นการเพิ่มผลิกไฮดรอสโพลิเมอร์ ดังนั้นอิทธิพลของกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์จึงเกิดทั้งแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า และแบบกวาด



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของคอลลอยด์, S กับปริมาณสารรวมตะกอน, C_c (19)

3. พีเอช

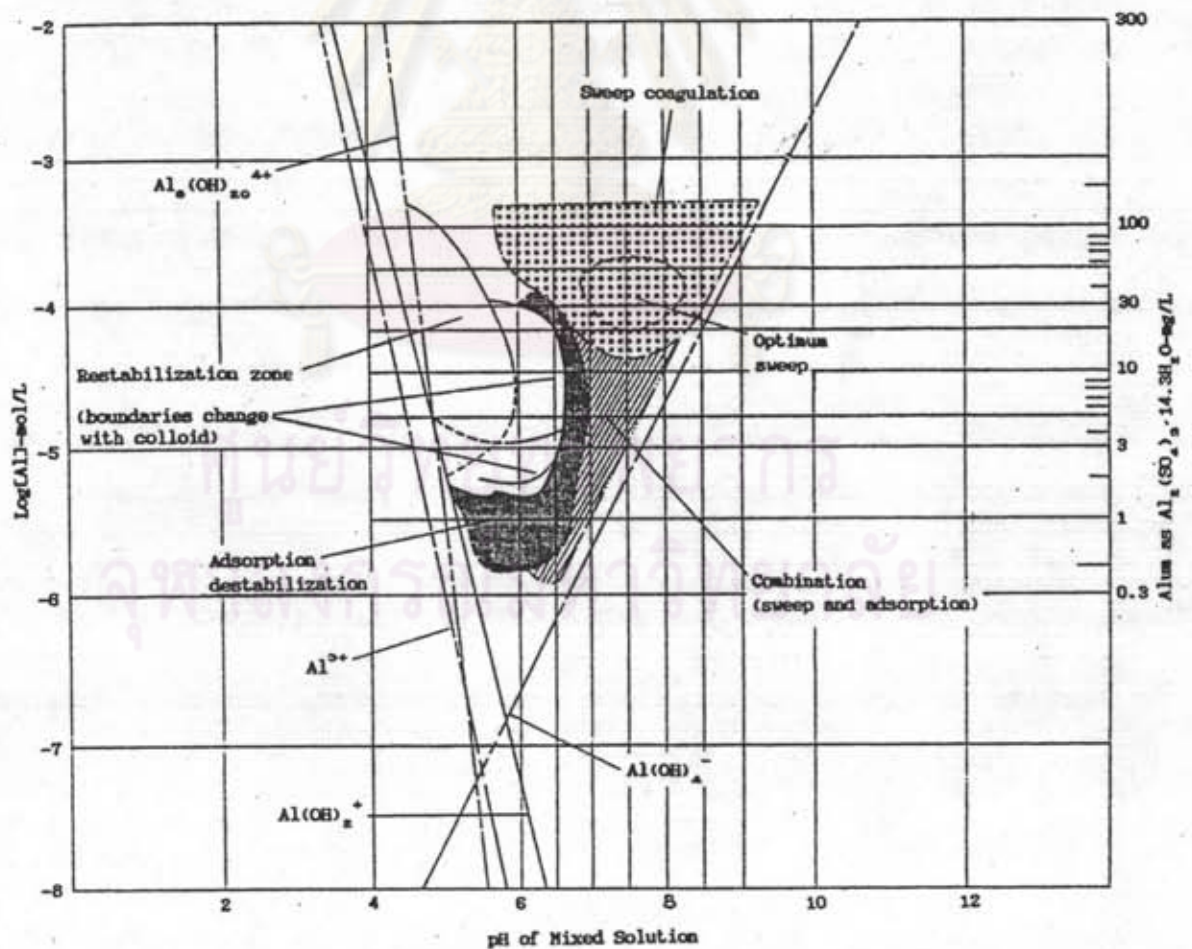
พีเอชของน้ำมีอิทธิพลต่อสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ (14, 20) และประเภทของกลไกที่เกิดขึ้นจากการที่พีเอชมีผลต่อปริมาณสารเชิงซ้อนชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของสารรวมตะกอน ดังนั้นการปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ชนิดของสารเชิงซ้อนที่ให้ประสิทธิผลต่อกระบวนการรวมตะกอนจะสามารถใช้ปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมลดลงได้ การควบคุมกลไกที่ใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 โดยพีเอชของกระบวนการรวมตะกอนนี้หมายถึง พีเอชสุดท้ายภายหลังจากการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ ในทางปฏิบัติของกระบวนการรวมตะกอนในระบบผลิตน้ำประปาจะใช้ความเข้มข้นของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทั้งหมดในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-4} โมล/ล. ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาอิทธิพลของพีเอชที่มีต่อกลไกได้ดังนี้

ที่พีเอชมีค่าน้อยกว่า 4 อลูมิเนียมส่วนใหญ่อยู่ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ ซึ่งสามารถทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ด้วยการอัดตัวของชั้นกระจาย ด้วยกลไกแบบที่มีปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมจะไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ และการใช้สารรวมตะกอนมากเกินไปไม่ทำให้คอลลอยด์กลับมีสภาวะคงตัว

ที่พีเอชมีค่าในช่วง 4 ถึง 6 จะได้สารเชิงซ้อนประจุบวกมากขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของกลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าจะมีมากขึ้น เมื่อใช้ปริมาณสารรวมตะกอนมากเกินไป สารเชิงซ้อนประจุบวกเหล่านี้จะทำให้คอลลอยด์กลับมีสภาวะคงตัวได้อีก

ที่พีเอชมีค่าในช่วง 6 ถึง 8 ปริมาณสารเชิงซ้อนประจุบวกจะลดลงและได้ผลึก $Al(OH)_3$ เพิ่มขึ้น อิทธิพลของกลไกแบบกวาดจะยิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารรวมตะกอน

ที่พีเอชมีค่ามากกว่า 8 อลูมิเนียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารเชิงซ้อนประจุลบซึ่งไม่มีประโยชน์ต่อกระบวนการรวมตะกอนให้กับคอลลอยด์ที่มีประจุลบเหมือนกัน แต่ Black และ Chen (19) ได้ทำการศึกษากำจัดความขุ่นของอนุภาคดินเหนียวหลายชนิดด้วยสารส้ม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นที่ค่าพีเอชมากกว่า 10 ก็ยังสูงอยู่ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอิทธิพลของผลึกไฮดรอกไซด์ (hydrous-oxide crystal) จะอยู่ในรูป $nAl_2O_3 \cdot H_2O$ ที่พีเอชสูง โดยอาจเกิดจากอิทธิพลร่วมกันทั้งประจุลบของ $Al(OH)_4^-$ และประจุบวกของ Al_2O_3



รูปที่ 3.8 แผนภูมิที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมกลไกของกระบวนการรวมตะกอนด้วยสารส้ม (6)

4. สภาพทางไอออน

ชนิดและความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในน้ำมีผลต่อสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ และมีผลต่อลักษณะสมบัติของผลึกที่ได้จากไฮโดรลิซิสของสารรวมตะกอนประเภทเกลือของโลหะ ยังผลให้มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนต่างกัน ประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นจะขึ้นกับไอออนประจุลบมากกว่าไอออนประจุบวก

ความเป็นค่าซึ่งเป็นไอออนประจุลบชนิดหนึ่ง เมื่อมีปริมาณที่เพียงพอจะช่วยเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ให้พีเอชของกระบวนการรวมตะกอนที่ใช้เกลือของโลหะเหมาะสม โดยทำให้ช่วงพีเอชที่มีประสิทธิภาพต่อการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น และทำให้ใช้ปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมลดลง

5. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อลักษณะสมบัติของน้ำ ได้แก่ ความหนืด และความหนาแน่น ตลอดจนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี ยังผลสืบเนื่องต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนและตกตะกอน ถึงแม้ว่าอุณหภูมิจะมีอิทธิพลต่อระยะเวลาการเกิดตะกอนน้อย (21) แต่ก็มีผลต่อขนาดของตะกอนที่ได้ (22)

6. ระดับความปั่นป่วนและเวลากวนผสม

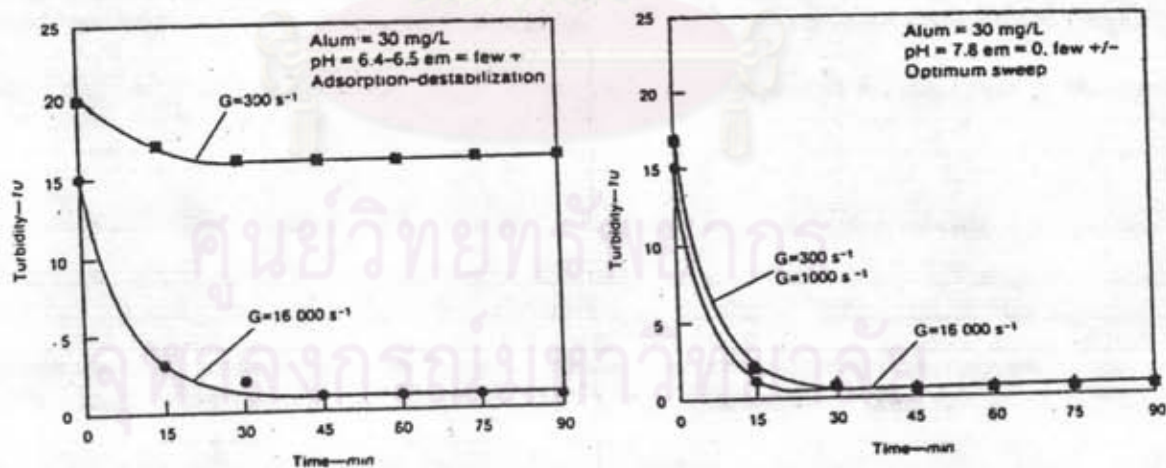
การกวนเร็วเป็นการสร้างความปั่นป่วนให้เกิดขึ้นในน้ำอย่างรุนแรงในขณะเติมสารรวมตะกอนเพื่อทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์อย่างทั่วถึงได้รวดเร็ว ดังนั้นระดับความปั่นป่วนและเวลากวนผสม จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของชั้นกวนเร็ว

Camp และ Stein (23) ได้ประยุกต์ Stokes' theory (ทฤษฎีของสโตก กล่าวว่ เกรเดียนต์ความเร็วเท่ากับรากที่สองของการสิ้นเปลืองพลังงาน ณ จุดหนึ่งหารด้วยความหนืดทางพลศาสตร์ของของไหล) ให้สัมพันธ์กับพลังงานที่ใช้ทั้งหมด เรียกว่า เกรเดียนต์ความเร็วเฉลี่ย (root-mean-square velocity gradient), G ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้เป็นดัชนีบอกระดับความปั่นป่วนของน้ำ

$$G = (P/\mu V)^{0.5} = (W/\mu)^{0.5} \quad (3.1)$$

โดยที่ P คือกำลังที่เข้าสู่เนื้อของไหล μ คือความหนืดทางพลศาสตร์ของของไหล V คือปริมาตรของของไหล W คือฟังก์ชันการสิ้นเปลืองหรือกำลังที่สูญเสียต่อหน่วยปริมาตรของของไหล ทั้งนี้ค่า G จะมีหน่วยต่อเวลาคือ วินาที⁻¹

การสร้างความปั่นป่วนในน้ำอย่างรุนแรงในขณะที่เติมสารรวมตะกอนจะ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ (24) โดย Amirtharajah และ Mills (6) ได้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของ G ที่มีต่อประสิทธิภาพของกลไกทำลายสภาวะ คงตัวของคอลลอยด์ประเภทต่าง ๆ จากการทดลองที่ใช้ค่า G 300 1000 และ 16000 วินาที⁻¹ โดยให้ค่าของผลคูณ GT เท่ากับ 18000 20000 และ 16000 ตามลำดับ ผลการทดลองดังแสดง ตัวอย่างในรูปที่ 3.9 พบว่ากลไกทำลายสภาวะคงตัวแบบคอลลอยด์และสะเทิมทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อการกวนผสมให้ค่า G สูงมาก แต่ถ้าเกิดกลไกแบบกวาดแล้วระดับค่าของ G จะไม่มีบทบาท มากนักต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการรวมตะกอน อย่างไรก็ตามจะต้องมีขีด จำกัดต่อพลังงานที่ให้เพื่อสร้างความปั่นป่วนสำหรับอุปกรณ์กวนเร็วชนิดต่าง ๆ กัน Bratby (25) ทำการทดลองการกวนเร็วแบบแบทช์ (batch test) ที่ใช้น้ำดิบจาก Lago Descoberto พบ ว่า G ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 625 วินาที⁻¹ Francois และ Van Haute (26, 27) ทำการ ทดลองพบว่า การสร้างความปั่นป่วนในชั้นกวนเร็วมากเกินไปจะทำให้ได้ขนาดตะกอนจากชั้นสमान ตะกอนลดลง นอกจากนี้ Camp (28) ทำการทดลองพบว่าเกรเดียนต์ความเร็วของการกวนเร็วที่ มากเกินไป (G 12500 วินาที⁻¹) จะลดสมรรถนะของชั้นสमानตะกอนอีกด้วย



รูปที่ 3.9 อิทธิพลของ G ที่มีต่อประสิทธิภาพของการรวมตะกอน (6)

- (ก) กลไกแบบคอลลอยด์และสะเทิมทางไฟฟ้า
(ข) กลไกแบบกวาด

สำหรับพารามิเตอร์ T หรือเวลากววมผสมเป็นที่น่าสนใจกว่าการพิจารณา มีทรณะที่แตกต่างกันไป โดยทรณะแรกพิจารณาจากเวลาที่เกิดกลไก ทรณะที่สองพิจารณา ครอบคลุมไปถึงผลกระทบที่มีต่อชั้นสมานตะกอน โดยทรณะแรก Hudson และ Wolfner (10) Vrale และ Jordan (29) และ Kawamura (1) เสนอว่า T ที่เหมาะสมควรมีค่าน้อยกว่า 1 วินาที ทั้งนี้พิจารณาจากเวลาของการเกิดสารเชิงซ้อนในกลไกติดติดและสะเทินทางไฟฟ้า สำหรับ อีกทรณะหนึ่ง Camp (28) และ Letterman, Quon และ Gemmell (11) ทำการทดลอง พบว่า T ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในระดับเป็นนาทีโดยให้เหตุผลว่า เวลาที่นอกเหนือจากเวลาในการ เกิดสารเชิงซ้อนและพลิกเป็น เวลาสำหรับการสมานตะกอนขึ้นต้น ซึ่งจะทำการสมานตะกอนใน ลำดับต่อไปไม่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นยังผลให้ได้ตะกอนที่จมตัวดีขึ้น อย่างไรก็ตาม Bratby (25) และ Francois และ Van Haute (26) ระบุจากผลการทดลองว่าค่า T ที่มากกว่า 2 นาที จะลด สมรรถนะของชั้นสมานตะกอนโดยได้ขนาดตะกอนลดลง อนึ่ง ASCE, AWWA และ CSSE (30) และ Ten State Standards (31) ยังได้เสนอค่า T ที่เหมาะสมซึ่งแตกต่างจากที่กล่าวมา แล้วอีกด้วย โดยเสนอค่า T 10 ถึง 30 วินาที และอย่างน้อย 30 วินาที ตามลำดับ

โดยทั่วไปพารามิเตอร์ G และ T จะได้รับพิจารณาควบคู่กันไปในการ ออกแบบและควบคุมชั้นกวนเร็ว ค่าที่นำมาใช้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือที่ทำให้เกิดความปั่นป่วน ในน้ำ นอกจากนี้พารามิเตอร์ G และ T ยังได้รับการเสนอให้ใช้ร่วมกับปริมาณสารรวมตะกอนอีก ด้วย (11)

7. ชนิดของถังปฏิกรณ์กวนผสม

ขนาด รูปร่าง และลักษณะของถังกวมผสมตลอดจนชนิดของเครื่องมือกล ที่ใช้สำหรับสร้างความเร็วปั่นป่วนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนที่จุดเติมสารรวมตะกอน จะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น (11, 29, 32, 33, 34)

การใช้อุปกรณ์กวนเร็วแบบถังปฏิกรณ์กวมผสมจะ ให้ประสิทธิภาพได้ต่ำกว่าแบบถังปฏิกรณ์ไหลตรง (29) ทั้งนี้อาจเนื่องจากการไหลลัดทาง (short circuit) ของมวลน้ำในถังปฏิกรณ์กวมผสม นอกจากนี้ถังปฏิกรณ์ไหลตรงยังให้ประสิทธิภาพของพลังงานทั้งหมดที่ กระจายเข้าสู่เนื้อของไหลสูงกว่า โดยประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 60 % ของถังปฏิกรณ์ไหลตรงแบบ ท่อ (33) และ 15 % ของถังปฏิกรณ์กวมผสมที่ใช้ใบพายเป็นเครื่องมือกล (34)

3.3 แนวความคิดของกระบวนการกวนเร็วในท่อ

การใช้ท่อเป็นอุปกรณ์กวนเร็วได้รับการพัฒนาในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เนื่องจากความต้องการในการผลิตน้ำประปาด้วยระบบที่ประหยัด ควบคุมง่ายและมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามข้อมูลในการออกแบบ พารามิเตอร์ควบคุมที่เหมาะสม และสมรรถนะในการใช้งานของการกวนเร็วในท่อที่มียังคงอยู่ในขอบเขตจำกัด

Hudson และ Wolfner (1967) ใช้สมการพื้นฐานของ Camp (35) สำหรับคำนวณค่าเกเรเดียนต์ความเร็วของการกวนผสมในท่อที่อุณหภูมิ 4 °ซ (10) ดังนี้

$$G = 172 (f/D)^{0.5} v^{1.5} \quad (3.2)$$

โดยที่ f คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อของคาร์ซี-ไวสบัค D คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อมีหน่วยเป็นฟุต v คือความเร็วของการไหลในท่อมีหน่วยเป็นฟุต/วินาที

Vrale และ Jorden (1970) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกวนเร็วในถังปฏิกรณ์ไหลตรงแบบท่อที่มีลักษณะการเติมสารเคมีแตกต่างกัน กับการกวนเร็วในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่ใช้ใบพัดเป็นเครื่องมือกล การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระทำโดยเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของอัตรารวมตะกอนปรากฏ หรือ K_{app} (apparent aggregation rate coefficient) หลังจากผ่านการสมานตะกอนแบบจาร์ซึ่งกำหนดให้คงที่ทุกการทดลอง ผลการทดลองพบว่า การกวนเร็วในถังปฏิกรณ์ไหลตรงทุกชนิด ให้ประสิทธิภาพการกวนเร็วสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยที่เกเรเดียนต์ความเร็วที่เหมาะสมของการกวนเร็วในถังปฏิกรณ์ไหลตรงที่ใช้เกลียวของโลหะเป็นสารรวมตะกอนประมาณ 1200 ถึง 2500 วินาที⁻¹ และเวลาผสมที่สภาวะเหมาะสมประมาณ 0.5 ถึง 1 วินาที อย่างไรก็ตามระดับความปั่นป่วนที่จุดเติมสารรวมตะกอนก็เป็นสิ่งที่ควรพิจารณาอย่างยิ่ง (29)

Stenquist และ Kaufman (1972) ได้ทำการทดลองการกวนเร็วในท่อที่มีสภาพการไหลแบบปั่นป่วน จุดเติมสารรวมตะกอนเป็นรูเจาะบนกริด (grid) ใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์คาโอลินเป็นน้ำดิบ และได้สรุปว่าจำนวนรูเจาะบนกริดที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงในชั้นสมานตะกอนควรน้อยกว่า 1 รูต่อพื้นที่ของกริด 1 ตารางนิ้ว นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของความปั่นป่วนของน้ำต่อการกวนเร็วตามความยาวท่อ แต่เนื่องจากความซับซ้อนของอุปกรณ์ทำให้ทำไปประยุกต์ใช้งานได้ยากและสูญเสียหัวน้ำสูง (36)

Wilson (1972) ได้ทำการศึกษาการกวนเร็วด้วยถังปฏิกรณ์แบบเวนจูรี (venturi-type tubular reactor) กับแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ใบพัดเป็นเครื่องมือกล พบว่าถังปฏิกรณ์กวนเร็วแบบเวนจูรีจะช่วยให้สมรรถนะของถังสमानตะกอนดีกว่า ยังผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความทึบสูงกว่า (37)

Delichatsios และ Probststein (1975) ได้ศึกษากระบวนการรวมตะกอนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วน ผลการทดลองพบว่าการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าไมโครสเกลของ Kolmogorov จะแสดงผลเหมือนทฤษฎีที่ใช้ในการทำนายอัตราเร็วของการรวมตะกอน สำหรับอนุภาคที่ใหญ่กว่าไมโครสเกลของ Kolmogorov พบว่าไม่สามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอนได้ เพราะเกิดการแตกตัวอย่างรวดเร็วของตะกอนเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนของของเหลวในท่อ (38)

Delichatsios และ Probststein (1975) ได้เสนอแนะว่าการรวมตะกอนในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนโดยมีการหมุนเวียนตะกอนกลับมาใช้ นอกจากจะลดความยาวท่อที่ใช้แล้วยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ เนื่องจากการผสมในท่อที่มีสภาพการไหลแบบปั่นป่วนจะทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกันในระยะเวลาสั้น และการเพิ่มสมรรถนะโดยการป้องกันการตกตะกอนและการแตกตัวของตะกอนสามารถออกแบบได้ง่าย (39)

Kawamura (1976) ได้เสนอแนะเกดท์ออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบ injection nozzle-type reactor ดังต่อไปนี้ ความเร็วของการไหลของสารรวมตะกอนที่ injection nozzle 6 ถึง 7.6 ม./วินาที เกรเดียนต์ความเร็วอยู่ในช่วง 750 ถึง 1000 วินาที⁻¹ เวลาผสม 1 วินาที และความเข้มข้นของสารละลายสารส้มก่อนเติมไม่เกิน 1 % (16)

Chao และ Stone (1979) ได้เสนอแนะว่าการกวนเร็วในท่อมืดดีกว่าการกวนเร็วในถังกวนผสม ด้วยเหตุที่ว่าเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูก ง่ายในการบำรุงรักษาและเดินระบบ (36)

Grohmann , Reiter และ Wiesmann (1981) ได้ทำการศึกษาการสमानตะกอนขั้นต้นด้วยท่อวนเวียน (turbular reactor) พบว่าเวลาของการกวนผสม 14 วินาทีเพียงพอที่จะได้อนุภาคตะกอน (40)

Bratby (1981) ได้เสนอแนะว่าเวลาของการกวนผสมในถังกวนเร็วที่ใช้อุปกรณ์แบบท่อควรอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 8 วินาที (25)

Güven และ Benefield (1983) ได้เสนอแนะว่าการออกแบบท่อเป็นอนุกรมกัน
เร็วควรพิจารณาถึงอัตราส่วนโมเมนตัมฟลัก (momentum flux ratio) (41) ซึ่งหาได้ดังนี้

$$M_r = Q_r v_r = (v_r D_r)^2 \tag{3.3}$$

โดยที่ M_r คืออัตราส่วนโมเมนตัมฟลัก Q_r คืออัตราส่วนของอัตราไหลของสารรวม
ตะกอน (Q_j) กับอัตราไหลของน้ำในท่อ (Q) v_r คืออัตราส่วนของความเร็วของสารรวมตะกอน
(v_j) กับความเร็วของน้ำในท่อ (v) D_r คืออัตราส่วนของขนาดท่อนำสารรวมตะกอน (D_j) กับ
ขนาดท่อความเร็ว (D)

เมื่อสภาพการไหลสมระหว่างน้ำดิบกับสารรวมตะกอนที่ให้ค่า M_r เหมาะสม จะทำให้
ระยะทางและเวลาของการกวนผสมทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกันลดลง โดยที่สภาวะเหมาะสมของการ
กวนผสมในท่อแบบฉีดผสมด้านข้างเดียว (single side jet) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และ
สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีดังต่อไปนี้

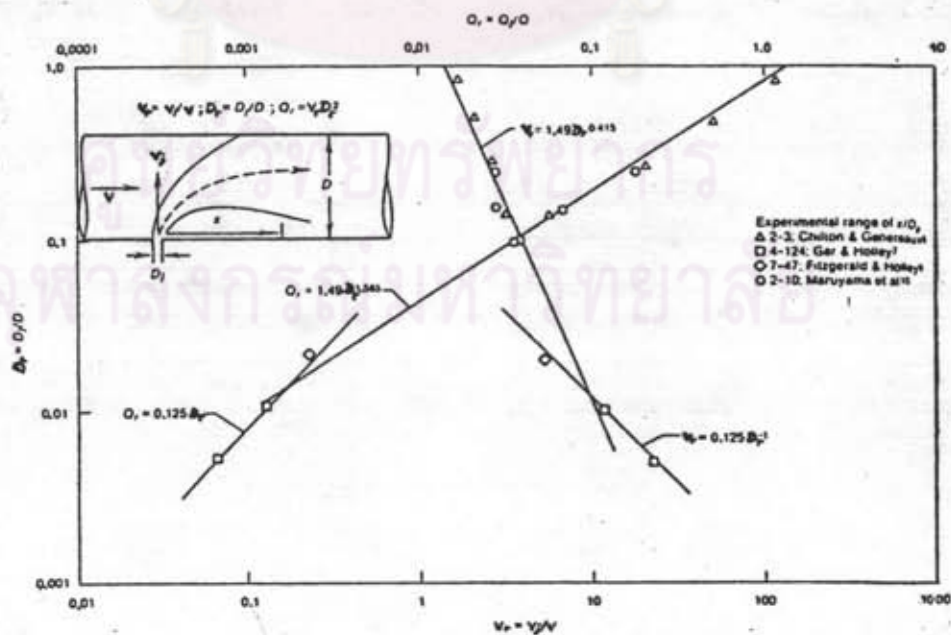
กรณีที่ 1. เมื่อค่า D_r น้อยกว่า 0.021 จะได้ว่า M_r ที่เหมาะสมมีค่าคงที่ดังนี้

$$M_r^* = 0.0156 \tag{3.4}$$

กรณีที่ 2. เมื่อค่า D_r มากกว่า 0.098 จะได้ว่า M_r ที่เหมาะสมขึ้นกับ D_r ดังนี้

$$M_r^* = 2.22 D_r^{1.17} \tag{3.5}$$

โดยที่ M_r^* คืออัตราส่วนโมเมนตัมฟลักที่เหมาะสม



รูปที่ 3.10 สภาวะเหมาะสมของการกวนเร็วในท่อแบบฉีดสารรวมตะกอนเข้าด้านข้างเดียว (41)

สุรินทร์ พลสมบูรณ์ (2528) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการกวนเร็วในท่อแนวระดับ เพื่อหาค่าเหมาะสมของ G และ T โดยการไหลของน้ำขุ่นสังเคราะห์เป็นโทไนท์ในท่อกวนเร็ว เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีค่า N_{Re} แปรจาก 8000 ถึง 40000 ผลการทดลองปรากฏว่า G ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 400 วินาที^{-1} ที่ $20 < T < 60 \text{ วินาที}$ และเท่ากับ 2600 วินาที^{-1} ที่ $1 < T < 20 \text{ วินาที}$ T ที่เหมาะสมมีค่าแปรจาก 2 ถึง 100 วินาที โดยแปรกลับกับค่า G และ C GT ที่เหมาะสมมีค่าแปรจาก 10000 ถึง 20000 และพบว่าสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง G T และ C ในรูปสมการเอ็มไพริคัล คือ $GT_{opt} C^{0.64} = 100000$ เมื่อ T_{opt} คือเวลาการผสมที่เหมาะสม และ C คือความเข้มข้นของสารส้ม (42)

พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็วในท่อ สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 เกเรเดียนต์ความเร็วของการกวนผสมในท่อ

การกวนผสมในท่ออาศัยพลังงานกลศาสตร์ โดยกำลังที่เข้าสู่เนื้อของเหลวในท่อจะเกิดจากความสูญเสียหัวน้ำต่าง ๆ อาจเนื่องจากการเสียดทานระหว่างของเหลวและพื้นผิวภายในของท่อ หรือจากการเปลี่ยนแปลงขนาดท่ออย่างกระทันหัน หรือมีสิ่งกีดขวางภายในท่อ หรือจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของสายน้ำที่ท่อโค้ง ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น จะได้ว่า (35)

$$P = \rho Q g H_L \quad (3.6)$$

โดยที่ P คือกำลังงานที่เข้าสู่เนื้อของไหลมีหน่วยเป็นวัตตัน ม./วินาที ρ คือความหนาแน่นของของไหลมีหน่วยเป็น กก./ม.³ Q คืออัตราไหลของของไหลมีหน่วยเป็น ม.³/วินาที g คือความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงมีหน่วยเป็น ม./วินาที² H_L คือค่าสูญเสียหัวน้ำมีหน่วยเป็น ม. การวิจัยนี้ความสูญเสียหัวน้ำจะเกิดจากแรงต้านทานจากความฝืด ดังนั้น G จึงหาได้ดังต่อไปนี้

$$G = (\rho Q g H_f / \mu V)^{0.5} = (g v H_f / \nu L)^{0.5} \quad (3.7)$$

โดยที่ H_f คือค่าสูญเสียหัวน้ำเนื่องจากความเสียดทานมีหน่วยเป็น ม. ν คือความหนืดทางจลน์ของของไหลมีหน่วยเป็น ม.²/วินาที v คือความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อมมีหน่วยเป็น ม./วินาที L คือความยาวท่อมมีหน่วยเป็น ม. ค่า H_f สามารถหาได้จากสมการของดาร์ซี-ไวส์บัค ดังต่อไปนี้

$$H_f = (fL/D) (v^2/2g) \quad (3.8)$$

โดยที่ f คือสัมประสิทธิ์ของความเสียดทาน D คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อมีหน่วยเป็น ม. ค่า f ขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ ความขรุขระของผิวท่อ ขนาดท่อ และอื่นๆ สภาวะการไหลทั่วไปจำแนกออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ การไหลแบบลามินาร์ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ดังนั้นการหาค่าเกรเดียนต์ความเร็วของการกวนผสมภายในท่อจึงจำแนกได้ 2 ประเภทดังต่อไปนี้

1. สภาวะการไหลในท่อแบบลามินาร์

สภาวะการไหลแบบลามินาร์ จะอยู่ในช่วงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2000 (43) ความขรุขระของผิวภายในท่อจะไม่มีผลต่อความสูญเสียหัวน้ำ โดย f จะขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ดังต่อไปนี้

$$f = 64/N_R = 64\nu/vD \quad (3.9)$$

โดยที่ N_R คือตัวเลขเรย์โนลด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ vD/ν จากสมการ (3.7) (3.8) และ (3.9) หาเกรเดียนต์ความเร็วของการกวนผสมในท่อแบบลามินาร์ได้ดังต่อไปนี้

$$G = 5.66 v/D \quad (3.10)$$

2. สภาวะการไหลในท่อแบบปั่นป่วน

สภาวะการไหลแบบปั่นป่วน จะอยู่ในช่วงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4000 (43, 44) สำหรับการไหลในช่วงที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ 2000 ถึง 4000 จะเป็นช่วงเปลี่ยนสภาพ (transition zone) การเปลี่ยนแปลงของการไหลในช่วงนี้ขึ้นกับสภาพของท่อและการไหล (44) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนี้ การสูญเสียหัวน้ำจะขึ้นกับความขรุขระของผิวภายในท่อดังต่อไปนี้ (19)

สำหรับท่อที่ผิวภายในเรียบ

$$H_f = 0.54 \times 10^{-3} L v^{1.75} / D^{1.25} \quad (3.11)$$

สำหรับท่อที่ผิวภายในค่อนข้างหยาบ

$$H_f = 0.78 \times 10^{-3} L v^{1.86} / D^{1.25} \quad (3.12)$$

สำหรับท่อที่ผิวภายในหยาบ

$$H_f = 1.15 \times 10^{-3} L v^{1.95} / D^{1.25} \quad (3.13)$$

สำหรับท่อที่ผิวภายในหยาบมาก

$$H_f = 1.68 \times 10^{-3} L v^2 / D^{1.25} \quad (3.14)$$

ค่าสูญเสียหัวน้ำที่ได้นี้ เมื่อแทนลงในสมการ (3.7) จะได้เกรเดียนต์ความเร็วของการกวนผสมในท่อแบบปั่นป่วน

3.3.2 เวลาพักของการกวนผสมในท่อ

เวลาพักเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งถึงเวลาผสม ที่ให้โอกาสสัมผัสระหว่างสารรวมตะกอนและอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของความขุ่นในน้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาในการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้นเร็วมาก ในทางปฏิบัติถือว่าเวลาผสมเป็นเวลาที่มีน้ำอยู่ในอุปกรณ์กวนเร็ว

เวลาพักหรือเวลากวนผสมภายในท่อทุกสภาวะการไหลหาได้ดังต่อไปนี้

$$T = V/Q = L/v \quad (3.15)$$

โดยที่ T คือเวลากักมีหน่วยเป็น วินาที

ศูนย์วิทยพัชยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย