

บทที่ 3
ทฤษฎีและแนวความคิด

การผลิตน้ำประปาที่สะอาดเหมาะแก่การอุปโภคบริโภคนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำจัดสารเจือปนที่อยู่ในน้ำธรรมชาติ ได้แก่ อนุภาคคอลลอยด์ และสารต่าง ๆ ที่อยู่ในน้ำพวกอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเล็กมาก ถ้าปล่อยให้ตกตะกอนตามธรรมชาติจะใช้เวลานานมาก เพราะมีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพจากประจุไฟฟ้าทำให้รวมตัวกันยาก จำเป็นต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย

การกวนเร็วเป็นขั้นตอนในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เมื่อเติมสารรวมตะกอนลงในน้ำ การกวนเร็วที่จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรง เพื่อให้การกระจายของสารรวมตะกอนเป็นไปอย่างรวดเร็วและทั่วถึง

3.1 ทฤษฎีของการกวนเร็ว

ทฤษฎีพื้นฐานของการกวนเร็วคือ
ของคอลลอยด์ (26) ซึ่งจะกล่าวได้ดังต่อไปนี้

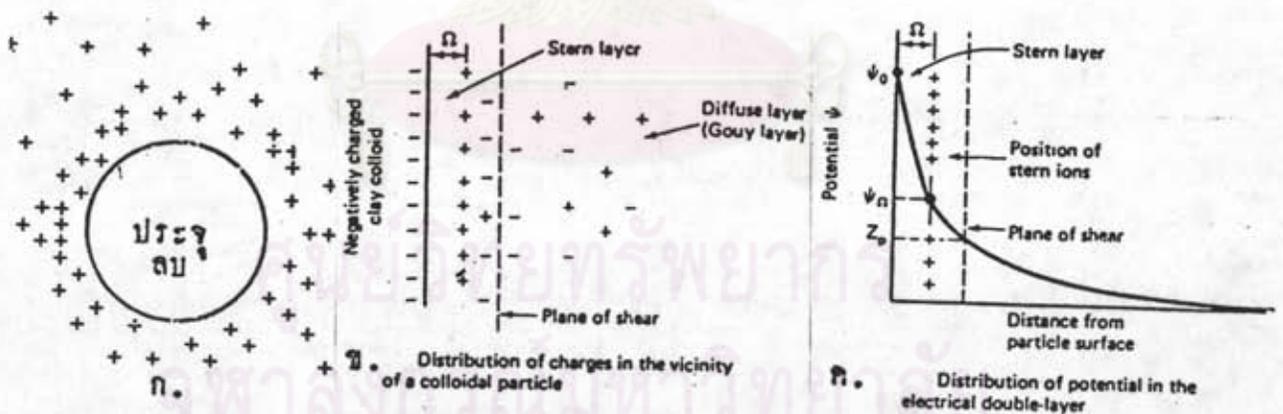
ทฤษฎีว่าด้วยสภาวะคงตัวและไม่คงตัว

3.1.1 ทฤษฎีสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

สภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ ที่กระจายในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผิวอนุภาค ประจุไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหน่วยแลตทิซของอนุภาค หรือเกิดจากไอออนในน้ำที่ถูกดูดติดที่ผิวของอนุภาค โดยทั่วไปชนิดและขนาดของประจุไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนและพีเอชของน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในธรรมชาติมักมีประจุไฟฟ้าลบ

โดยที่ประจุคอลลอยด์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็ง และน้ำจะมีประจุไฟฟ้ารวมเป็นศูนย์ ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์จึงถูกควบคุมโดยประจุตรงข้ามภายในน้ำ เพื่อคงความเสถียรทางไฟฟ้าของระบบ ปรัชญาการนี้ทำให้เกิดทฤษฎีว่ามีประจุไฟฟ้าสองชั้นล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งได้แก่ชั้นตรง และชั้นกระจาย ชั้นตรงประกอบด้วยประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์กับประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำและแรงแวนเดอร์วาลส์ถัดจากชั้นตรงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเนื่องจากความร้อนทำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้าม ซึ่งถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิว ชั้นที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกระจายอยู่ในน้ำดังกล่าวนี้คือชั้นกระจายขนาดหรือลักษณะการกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ตลอดจนปริมาตรและชนิดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิวและมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิวเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่มาใกล้กัน จะเกิดแรงผลักรวมและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลงแรงผลักรวมดังกล่าวนี้จะต้านแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างอนุภาคลดน้อยลง ดังนั้นถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักรวมมีค่ามากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสใกล้กันเพียงพออนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง



รูปที่ 3.1 โมเดลที่ใช้อธิบาย Electrical Double Layer Theory (31)

3.1.2 ทัศนวิสัยภาวะไม่คงตัวของอนุภาคคอลลอยด์

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ เปลี่ยนจากสภาวะคงตัวมาเป็นสภาวะไม่คงตัว ที่มีการรวมตัวระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จำแนกออกได้เป็นสี่ประเภท ได้แก่ การอัดตัวของชั้นกระจาย การดูดติดผิวและการสะเทินประจุไฟฟ้า การดูดติดผิวและเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาค และการหุ้มห่อในผลึก

การอัดตัวของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำมีปริมาณมากขึ้น ประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ยิ่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นกระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จนแรงแวนเดอร์วาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคและเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด

การดูดติดและการสะเทินประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามนอกเหนือจากที่มีอยู่ในชั้นตรงและชั้นกระจายดูดติดที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านั้นจะสะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตลอดจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์ สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนลงได้ จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

การดูดติดผิวและเชื่อมต่อกันระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เกาะติดบนโมเลกุลของสาร โพลีเมอร์ ซึ่งอาจมีผลมาจากประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันหรือเกิดจากแรงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าที่เหมือนกัน ถือได้ว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่เกาะติดบน โมเลกุลของสาร โพลีเมอร์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วและสามารถรวมกับอนุภาคอื่น ๆ ได้โดยมีสาร โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

การหุ้มห่อในผลึก เกิดขึ้นเมื่อเติมสารประกอบเกลือของ โลหะลงไปในน้ำมากเพียงพอที่จะมีการตกผลึกเกิดขึ้น อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรวมตัวเกิดเป็นผลึกใหญ่มีน้ำหนักมากสามารถตกตะกอนได้ง่าย

สภาวะ ไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวประเภทใด ประเภทหนึ่งหรือหลายประเภทรวมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำ และชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้มาเป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

3.2 กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

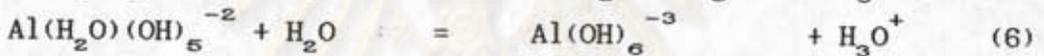
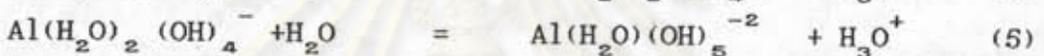
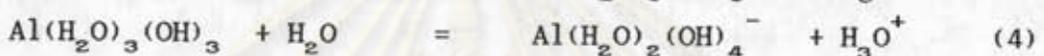
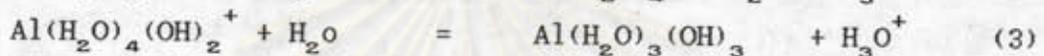
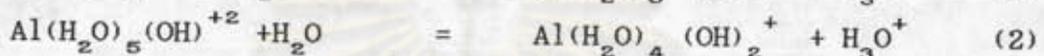
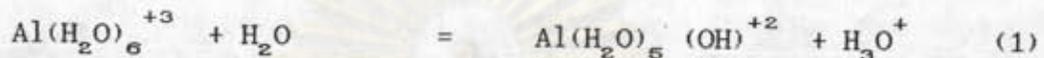
กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ ที่เกิดขึ้นในการกวนเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ พีเอช ชนิดและปริมาณสารรวมตะกอนตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่น ในกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามอาจพิจารณาได้ว่า ชนิดของสารรวมตะกอนเป็นปัจจัยพื้นฐานที่กำหนดประเภทกลไกในชั้นกวนเร็ว

สารรวมตะกอนที่ใช้ในกระบวนการรวมตะกอน จำแนกออกเป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ เกลือของโลหะได้แก่ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ หรือสารส้ม, $MgCO_3$, $CaCO_3$, $FeCl_3$, $FeSO_4$ สารโพลีเมอร์ได้แก่ สารโพลีเมอร์ประจุบวก สารโพลีเมอร์ประจุลบและสารโพลีเมอร์ไร้ประจุ ชนิดของสารรวมตะกอนดังกล่าว จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประเภทของกลไกที่เกิดขึ้น กล่าวคือ สารรวมตะกอนที่เป็นเกลือของโลหะอาจทำให้เกิดกลไกแบบกวาดหรือกลไกแบบตุตตุตและสะเทินทางไฟฟ้าทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณสารรวมตะกอนที่ใช้ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น ลักษณะทางเคมีของน้ำคือพีเอชและปริมาณไอออนในน้ำและระดับความปั่นป่วนของน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาผสม ในขณะที่สารรวมตะกอนเป็นสารโพลีเมอร์จะทำให้เกิดกลไกแบบตุตตุตและเชื่อมต้อ

โดยที่สารรวมตะกอนที่ใช้การวิจัยครั้งนี้คือสารส้ม ดังนั้นจะกล่าวถึงกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยเกลือของสารส้มได้แก่กลไกแบบตุตตุตและสะเทินทางไฟฟ้าและกลไกแบบกวาด

เคมีของสารส้มในน้ำ

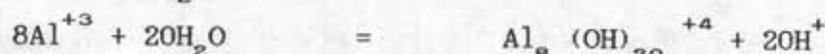
สารส้มเมื่ออยู่ในน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกตัว ได้ไฮดรอกไซด์ไอออนและลิวอิสกรด ไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบ $Al(H_2O)_6^{+3}$ ซึ่งเรียกสารประกอบนี้ว่า Aquametal ion สารประกอบดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติเป็นกรดที่ไร้เสถียรภาพพร้อมที่จะให้ไฮดรอกไซด์ไอออนของไฮโดรเจน (H^+) แก่ น้ำ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Monomeric hydroxo complex ต่าง ๆ ดังสมการ



ในสมการ (1) - (6) ปฏิกิริยาและชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารส้มและพีเอช ปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมดุลเคมีของสารส้มในน้ำ

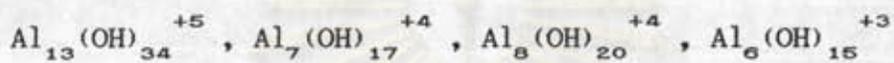
3.2.1 กลไกแบบจุดติดและสะเทินทางไฟฟ้า

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไอออนจาก $Al_2(SO_4)_3$ จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $Al(H_2O)_6^{+3}$ หรือ Al^{+3} ไฮดรอกไซด์ไอออนของ Al^{+3} จะเกิดขึ้นทันที โดย OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างอลูมิเนียมกับไฮดรอกไซด์ไอออน (10, 17, 23) ดังสมการตัวอย่างต่อไปนี้



ในกรณีที่มีความเข้มข้นของสารลึ้มสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวไฮโดรไลซิสจะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก $Al(OH)_3$

ผลของปฏิกิริยาที่จะเกิดการตกตะกอนของคอลลอยด์ คือสารเชิงซ้อนซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างไฮโดรไลซิสจาก Al^{+3} ถึง $Al(OH)_3$ สารคอมเพล็กซ์อาจมีประจุลบหรือบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำกล่าวคือ ถ้าพีเอชของน้ำสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ $Al(OH)_3$ จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุลบเช่น $Al(OH)_4^-$ ลักษณะที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในกระบวนการรวมตะกอนจะเกิดสารเชิงซ้อนประจุบวก เช่น



กลไกตกตะกอนและสะเทินทางไฟฟ้า เกิดจากสารคอมเพล็กซ์ประจุบวกโดยเริ่มจากการตกตะกอนระหว่างสารตั้งกล่าว กับผิวของคอลลอยด์ด้วยโควาเลนต์บอนด์ จากนั้นประจุบวกของสารคอมเพล็กซ์จะสะเทินประจุลบของคอลลอยด์ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงจนแรงแวนเดอร์วาลส์มีค่ามากกว่าและเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด (2)

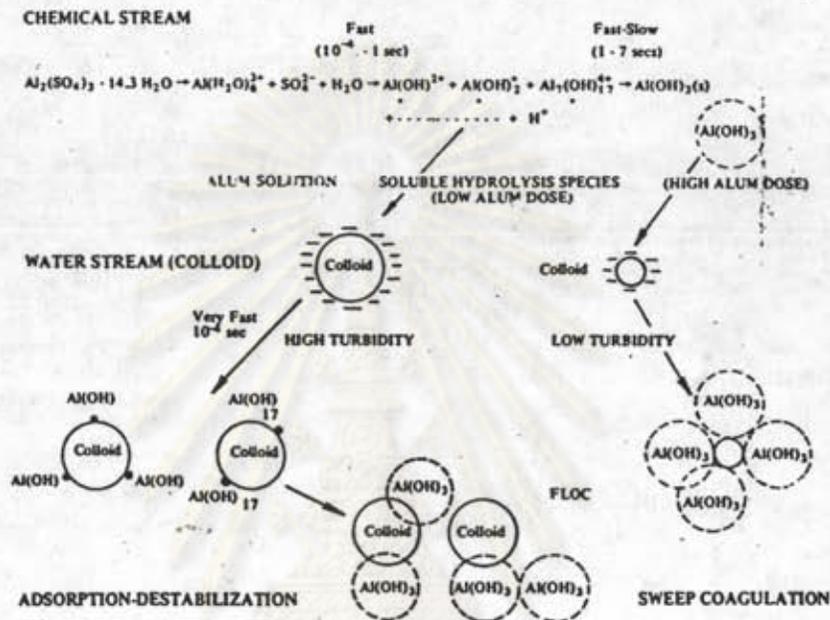
ในกลไกประเภทนี้ปริมาณสารรวมตะกอนมีความสัมพันธ์ เป็นสโตอิโคมेटริกกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ นอกจากนี้ปริมาณสารรวมตะกอน พีเอช ความเข้มข้นของคอลลอยด์ และระดับความปั่นป่วนของน้ำยังมีอิทธิพลต่อกลไกโดยตรง กล่าวคือปริมาณสารรวมตะกอนและพีเอชกำหนดชนิดและปริมาณของสารเชิงซ้อน ในขณะที่ความเข้มข้นของคอลลอยด์และระดับความปั่นป่วนของน้ำ กำหนดโอกาสที่สารเชิงซ้อนจะทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ (2,3)

3.2.2 กลไกแบบกวาด

เมื่อเติมสารลึ้มลงไปใต้น้ำจะมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัวไฮโดรไลซิสจะเริ่มจาก Al^{+3} จนได้ $Al(OH)_{3(s)}$ ดังแสดงในสมการ (3) กลไกแบบกวาดจะเกิดขึ้นโดยผลึก $Al(OH)_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึกตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายใต้น้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึก โดยลักษณะนี้คอลลอยด์จะถูก

กำจัดออกจากน้ำ พร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ในชั้นสมานตะกอนและถูกแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดอย่างเด่นชัดคือ ปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ การตกผลึกจะเกิดขึ้นเร็วมากถ้าระดับเกินการอิ่มตัวนอกจากนี้อัตราการตกผลึกยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก



รูปที่ 3.2 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มทั้ง 2 ประเภท (21)

3.2.3 กลไกแบบผสม

เป็นกลไกทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ร่วมกัน ระหว่างกลไกแบบจุดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองไม่เด่นชัดสภาวะดังกล่าวจัดว่าเป็นกลไกแบบผสม ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ปริมาณสารส้มและพีเอชของน้ำดิบภายหลังการทำลายเสถียรภาพสูงขึ้นกว่ากลไกการทำลายเสถียรภาพแบบจุดติดผิวและทำลายประจุแต่จะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่ากลไกแบบกวาด

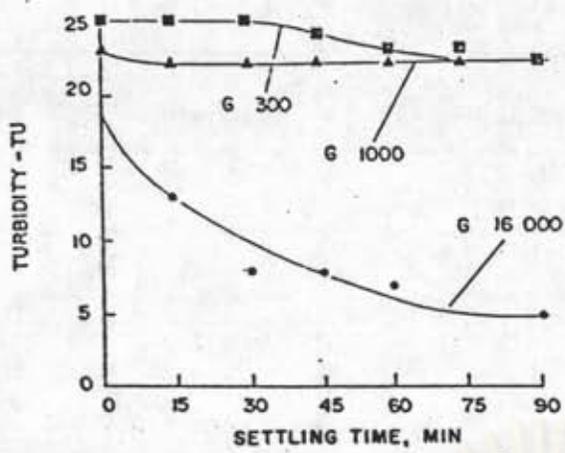
3.3 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการกวนเร็ว

3.3.1 ความเร็วเกรเดียนท์ (Velocity Gradients)

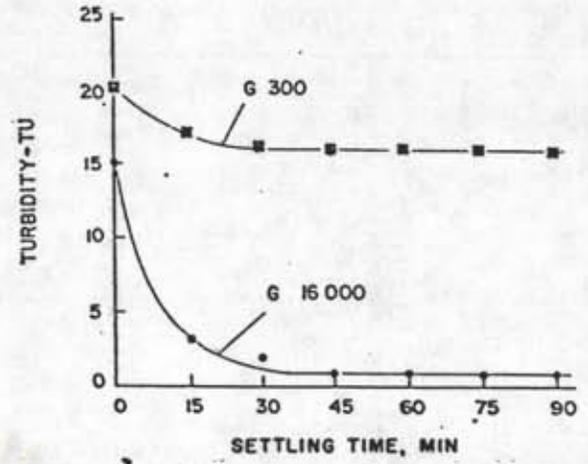
ความเร็วเกรเดียนท์ "G" หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำ การกวนเร็วจะต้องมีระดับ G สูงมาก ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการผสมระหว่างสารเคมี น้ำ และคอลลอยด์ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อม ๆ กันทุกจุด ในทางตรงกันข้ามการกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก เพื่อป้องกันมิให้ตะกอนฟล็อกเกิดการแตกแยก ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเร็วเกรเดียนท์มีความสำคัญต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นอย่างยิ่ง ระดับ G ที่เหมาะสมสำหรับการกวนเร็วต้องไม่น้อยกว่า $300 (\text{วท})^{-1}$ และสำหรับการกวนช้ามีค่าไม่เกิน $60-100 (\text{วท})^{-1}$

Amirtharajah และ Mills(3) พยายามแสดงให้เห็นว่า G มีความสำคัญต่อการกำหนดชนิดของกลไกโคแอกกูเลชันด้วย จากการทดลองของวิศวกรทั้งสองท่านพบว่า กลไกแบบตุตติตติผิวและทำลายประจุจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อการกวนเร็วมีค่า G สูงมาก ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.3 (ก) ซึ่งจะเห็นได้ว่าโคแอกกูเลชันที่ $G = 16,000 (\text{วท})^{-1}$ เกิดขึ้นได้ดีมากกว่าที่ $G = 300$ และ $1000 (\text{วท})^{-1}$ รูปที่ 3.3 (ข) ก็แสดงเช่นเดียวกันว่าโคแอกกูเลชันแบบตุตติตติผิว จะเกิดได้ดีที่ G สูงมาก ๆ ในภาพหลังนี้ยังแสดงอีกด้วยว่า การเพิ่มปริมาณสารส้ม (จาก 5 มก/ล ในรูปที่ 3.3(ก) เป็น 30 มก/ล ในรูปที่ 3.3(ข)) ทำให้โคแอกกูเลชันได้ผลดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ากลไกเป็นแบบ Sweep coagulation แล้ว Amirtharajah และ Mills พบว่าระดับ G ไม่มีบทบาทมากนักในการกำหนดประสิทธิภาพของโคแอกกูเลชัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.4(ก) และ (ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



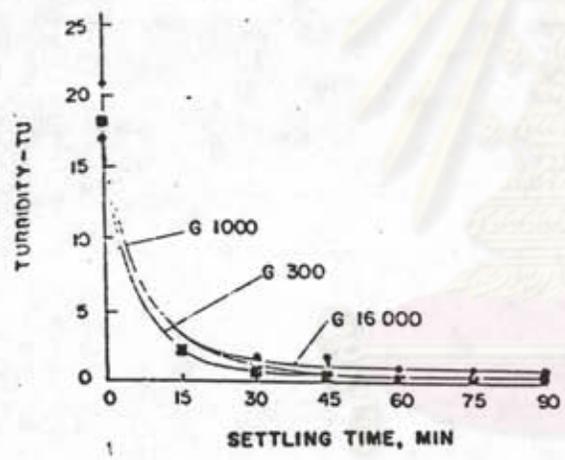
(ก)



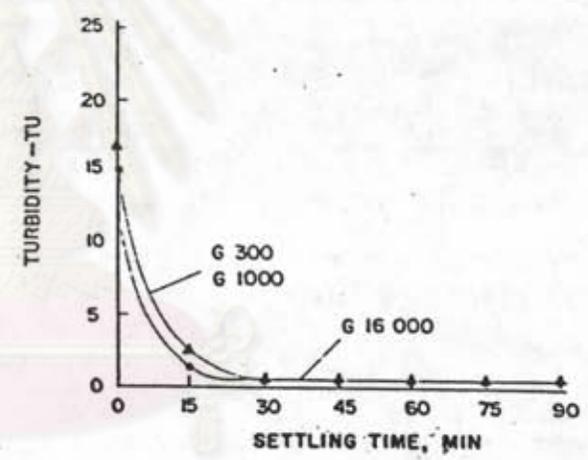
(ข)

ภาพที่ 3.3 กลไกการทำลายเสถียรภาพแบบคอลลอยด์และทำลายประจุ

- ก) ปริมาณสารส้ม 5 มก/ล พีเอช 7
- ข) ปริมาณสารส้ม 30 มก/ล พีเอช 4-6.5



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 กลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาด

- ก) ปริมาณสารส้ม 15 มก/ล พีเอช 7.7-8
- ข) ปริมาณสารส้ม 30 มก/ล พีเอช 7.8

3.3.2 เวลากักน้ำ (Detention time or Mixing time)

เวลากักน้ำ หมายถึงระยะเวลาที่ใช้ในการกระจายสารละลายเคมี และ ครอบคลุมถึงระยะเวลา ที่สารประกอบเชิงซ้อนเคมีสัณฐานโมเลกุลคอลลอยด์ เพื่อทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ ให้อยู่ในสภาพพร้อมที่จะรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทั่วไปแล้วเวลาในการกระจายสารเคมี มักจะหมายถึงเวลาในการกักน้ำในขณะที่ทำการกวนเร็ว (Rapid Mixing)

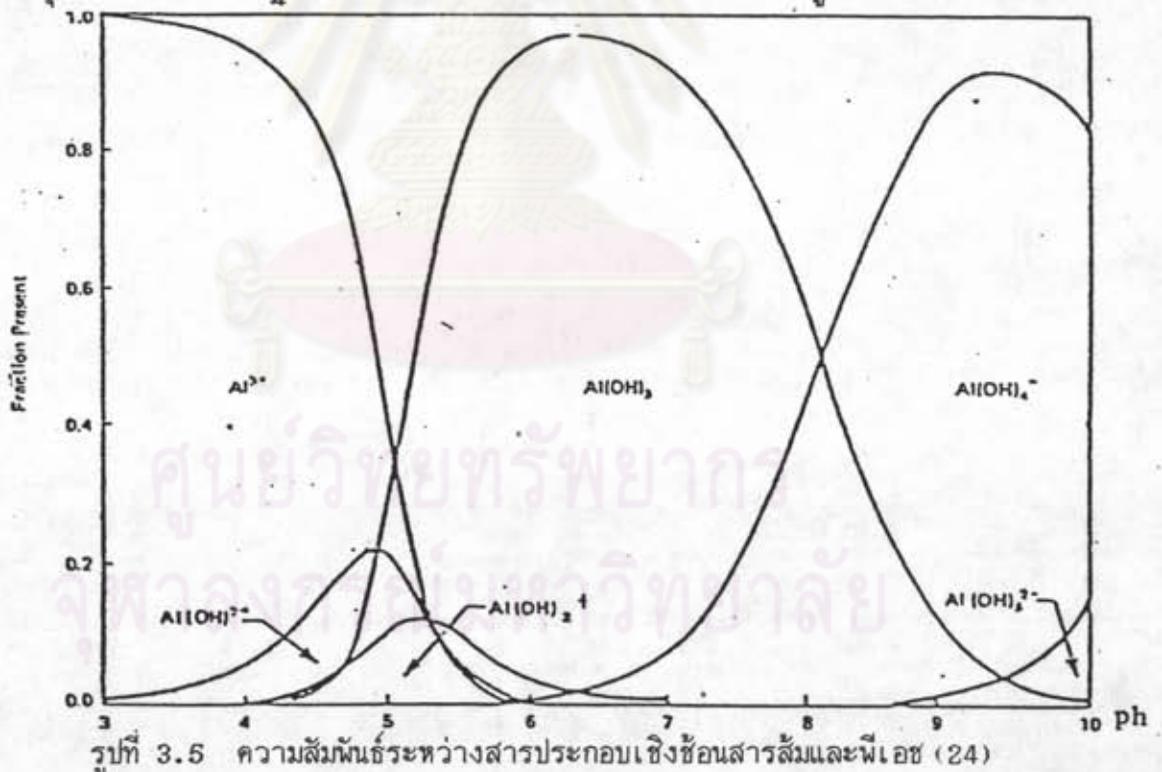
ในการออกแบบระบบการกวนเร็ว ASCE และ AWWA ได้เสนอแนะให้ใช้เวลากักน้ำ 10-30 วินาที โดยอาศัยอุปกรณ์การกวนน้ำที่มีพลังงานสูง (0.25-1.0 hp/mgd) แต่ในปัจจุบันที่เชื่อกันว่า เวลากักน้ำที่เหมาะสมของการกวน ควรมีค่าไม่เกิน 1 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สอดคล้องกับปฏิกิริยาเคมีไฮโดรไลซิสของสารส้ม การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบคอลลอยด์ และทำลายประจุจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 10^{-4} -1.0 วินาที และ 1-7 วินาที สำหรับกลไกแบบกวาด เนื่องจากระยะเวลาที่ค่าต่ำมาก อุปกรณ์เบลนเดอร์ (Blender) ซึ่งถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมีความสามารถให้การกวนน้ำ และกระจายสารส้มได้ทั่วถึงจะมีบทบาทเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชัน (4)

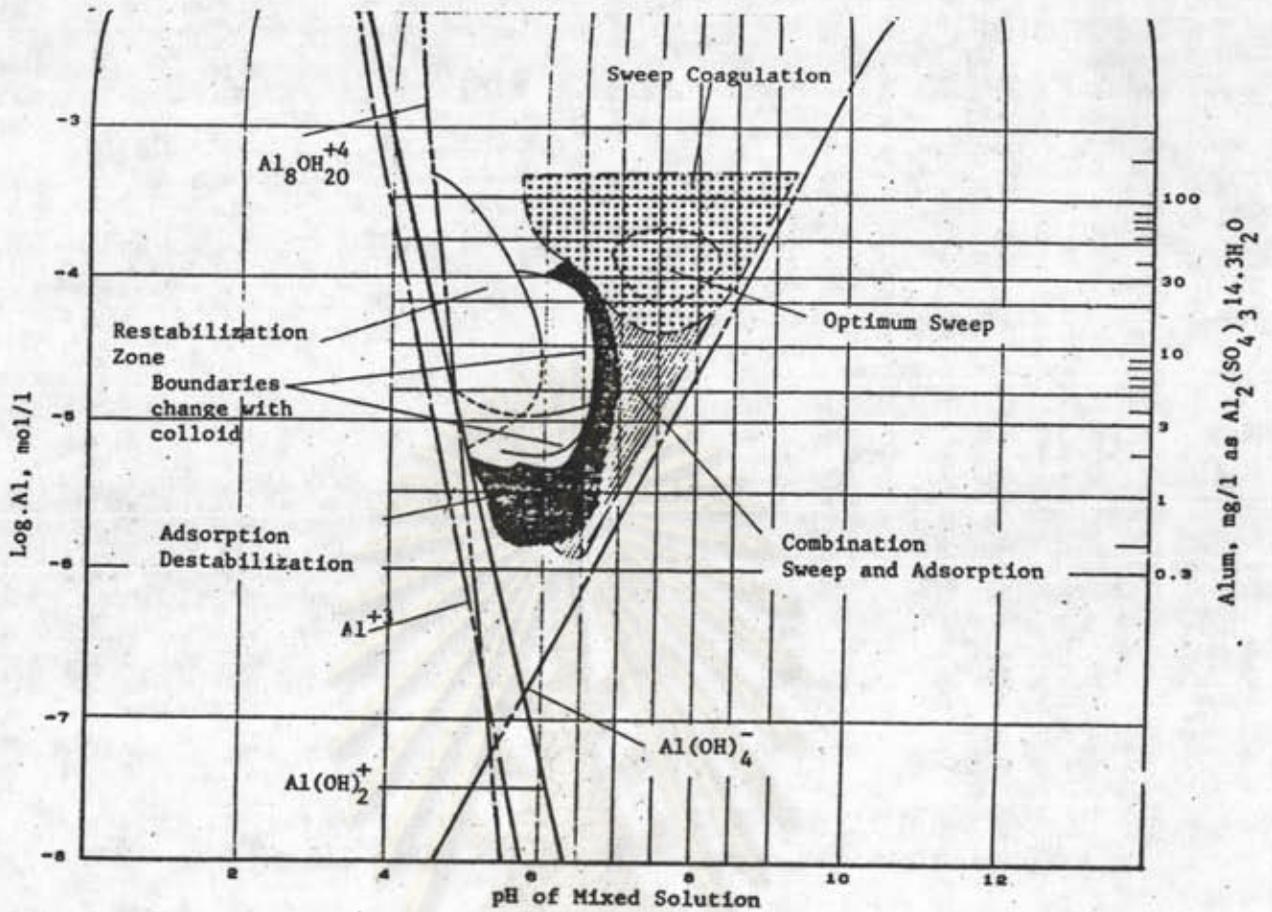
3.3.3 พีเอช (pH)

พีเอช หมายถึง พีเอชสุดท้ายภายหลังจากการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ (17) ซึ่งถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในกระบวนการโคแอกกูเลชัน ทั้งนี้เพราะมีผลกระทบต่อ การเกิดของสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มในลักษณะต่าง ๆ กัน อาทิเช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)^{+2}$, Al^{+3} และ $Al(OH)_4^-$ (ดูภาพที่ 3.5) เมื่อนำสารส้มมาละลายในน้ำปฏิกิริยาเคมีไฮโดรไลซิสทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนสารส้มที่มีประจุบวกและลบในสภาพน้ำดิบที่เป็นกรดและต่างตามลำดับ สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มที่อยู่ระดับพีเอช 4-6 จะอยู่ในรูป $Al(OH)^{+2}$ และ $Al(OH)_2^+$ ประจุบวกเหล่านี้จะมีประโยชน์มาก ต่อการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบคอลลอยด์และทำลายประจุเช่นเดียวกับผลึกของ $Al(OH)_3$ ที่มีบทบาทสูงมากในกลไกแบบกวาดผลึก $Al(OH)_3$ จะปรากฏในช่วงพีเอช 6-8 ในกรณีที่มีพีเอชสูงมากกว่า 9 นั้น อิทธิพลของสารประกอบเชิงซ้อน

ของสารส้ม จะอยู่ในรูปสารละลายประจุลบของ Al(OH)_4^- ประจุลบนี้ไม่มีผลดีต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน เนื่องจากเป็นประจุชนิดเดียวกับของคอลลอยด์

Amirtharajah และ Mills ได้กำหนดให้พีเอชเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมกลไกโคแอกกูเลชัน (ดูภาพที่ 3.6) น้ำดิบที่มีพีเอชสุดท้ายต่ำกว่า 5 สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มจะมีประจุบวก เมื่อปริมาณสารส้มต่ำ ความหนาแน่นของประจุจะลดลง การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันที่น้ำดิบความขุ่นต่ำ จะทำได้ยาก ทั้งนี้ เนื่องจากเป้าหมายในการส้มผัสดำ เมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 5-7 สารส้มจะอยู่ในลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกมากขึ้น และเหมาะสมกับการทำลายเสถียรภาพแบบคอลลอยด์และทำลายประจุในสภาวะดังกล่าว หากมีการเพิ่มปริมาณสารส้ม ก็อาจทำให้เกิดการผกผันของประจุบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ เกิดปรากฏการณ์คืนกลับของเสถียรภาพ (Restabilization) อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวยากตกตะกอนช้า พีเอช 7-8 นั้น สารประกอบเชิงซ้อนของสารส้มจะมีประจุบวกลดลง แต่ปริมาณของผลึก Al(OH)_3 จะเพิ่มขึ้น เกิดกลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์แบบผสม และแบบกวาด เมื่อเพิ่มปริมาณสารส้มมากยิ่งขึ้น ถ้าเพิ่มพีเอชสูงกว่า 8 จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบ เช่น Al(OH)_4^- ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการโคแอกกูเลชัน



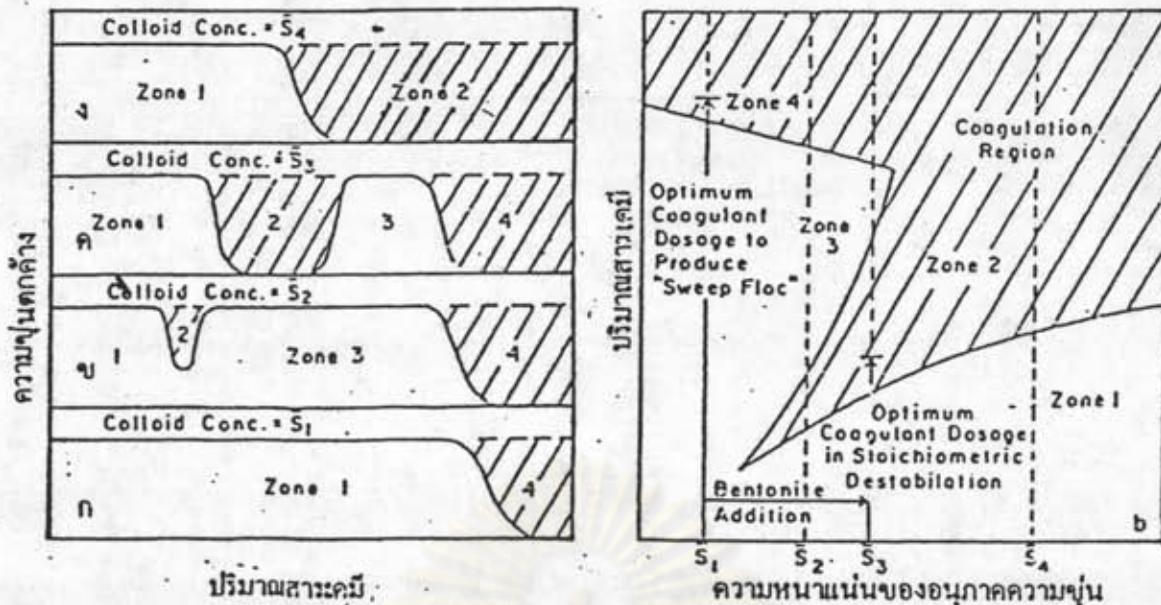


รูปที่ 3.6 แผนภูมิที่ใช้ในการควบคุมกลไกโคแอกกูเลชันของสารส้ม (31)

3.3.4 อิทธิพลของระดับความขุ่น

ระดับความขุ่นในน้ำ หมายถึง ความหนาแน่นของอนุภาคความขุ่นในน้ำ ความหนาแน่นของอนุภาคความขุ่นมากย่อมหมายถึง เป้าสัมผัสและประจุบนผิวอนุภาคความขุ่นสูง ลักษณะเช่นนี้จะมีผลต่อการควบคุมกลไกโคแอกกูเลชัน O'melia ได้กำหนดบทบาทของความขุ่นไว้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ปริมาณสารเคมี
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความขุ่นตกค้างและสารเคมี (17)

3.3.4.1 เมื่อระดับน้ำดิบความขุ่นต่ำ

น้ำดิบความขุ่นต่ำ (S_1) (ดูภาพ 3.7 (ก)) จะมีเป่าลัมฟ์ต่ำ เมื่อปริมาณสารส้มไม่สูงพอ การควบคุมกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุทำได้ยาก บทบาทของกลไกแบบกวาดจะมากขึ้น แต่ก็จะใช้ปริมาณสารส้มเพิ่มมากขึ้นด้วย ปริมาณสารส้มจะอยู่ในรูปของผลึก $Al(OH)_3$ ผลึกเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นเป่าลัมฟ์ และทำหน้าที่ในการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์จะถูกยึดเกาะด้วยผลึก $Al(OH)_3$ และในที่สุดก็จะตกตะกอน (พื้นที่แลเงา 4)

3.3.4.2 ระดับความขุ่นสูง

น้ำดิบความขุ่นสูง (S_2 & S_3) (ดูภาพ 3.7 ข.ค) การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน ทำได้ง่ายเมื่อปริมาณสารส้มต่ำจะเกิดกลไกแบบดูดติดผิว และทำลายประจุ (พื้นที่แลเงา 2) จะมีช่วงการทำงานแคบ เมื่อปริมาณสารส้มเพิ่มขึ้น จะทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ได้มากขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นสัดส่วนตรงต่อกัน หลังจากนั้นถ้ามีการเพิ่มสารส้มต่อไปอีก ก็จะทำให้เกิดกลไกการคืนกลับของเสถียรภาพ (พื้นที่แลเงา 3) และกลไกแบบกวาด (พื้นที่แลเงา 4)

3.3.4.3 ระดับความขุ่นสูงมาก

น้ำดิบที่มีความขุ่นสูงมาก (S 4) (ดูภาพที่ 3.7 ง) การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์จะใช้ปริมาณสารส้มมาก ทั้งนี้เนื่องจากประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์มาก ภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ บทบาทของกลไกแบบคอลลอยด์และทำลายประจุ จะมากกว่ากลไกแบบกวาด ทั้งนี้ เพราะจะใช้ปริมาณสารส้มต่ำกว่านั่นเอง

3.3.5 สภาพการไอออน

ความเข้มข้นและชนิดของไอออนต่าง ๆ ในน้ำมีผลต่อสภาวะคงตัวของคอลลอยด์และคุณสมบัติของผลึกที่ได้จากไฮโดรไลซิสของสารรวมตะกอนประเภทเกลือของโลหะ ตลอดจนทำให้มีช่วงพีเอชที่เหมาะสมของกระบวนการรวมตะกอนต่างกัน ประสิทธิภาพของการกำจัดความขุ่นจะขึ้นกับไอออนประจุลบมากกว่าไอออนประจุบวก

ความเป็นต่างซึ่ง เป็น ไอออนประจุลบชนิดหนึ่ง เมื่อมีปริมาณที่เพียงพอจะช่วยเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ให้พีเอชของกระบวนการรวมตะกอนที่ใช้เกลือของโลหะเหมาะสม โดยทำให้ช่วงพีเอชที่มีประสิทธิผลต่อการกำจัดความขุ่นเพิ่มขึ้น และทำให้ใช้ปริมาณสารรวมตะกอนที่เหมาะสมลดลง

3.3.6 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อคุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ ความหนืดและความหนาแน่น ตลอดจนมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาเคมี และต่อประสิทธิภาพของกระบวนการรวมตะกอน (5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

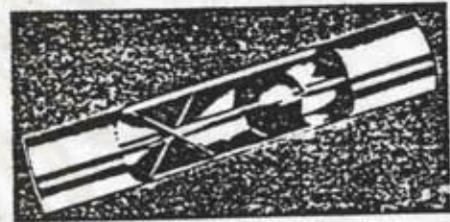
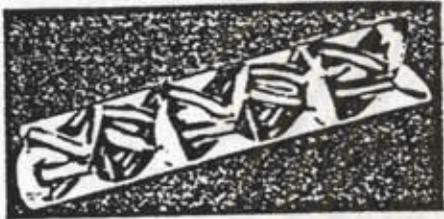
3.3.7 ชนิดของปฏิกรณ์กวนผสม

ขนาด รูปร่าง และลักษณะของถังกวนผสมตลอดจนชนิดของเครื่องมือที่ใช้สำหรับสร้างความเป็นป่วนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนที่จุดเติมสารรวมตะกอนจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น การใช้ปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์จะให้ประสิทธิภาพได้ดีกว่าแบบปฏิกรณ์ไหลตรงทั้งนี้อาจเนื่องจากการไหลลัดทาง (short circuit) ของมวลน้ำในปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ นอกจากนี้ปฏิกรณ์ไหลตรงยังให้ประสิทธิภาพของพลังงานทั้งหมดที่กระจายเข้าสู่เนื้อของไหลสูงกว่าปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ (4,5,6,7)

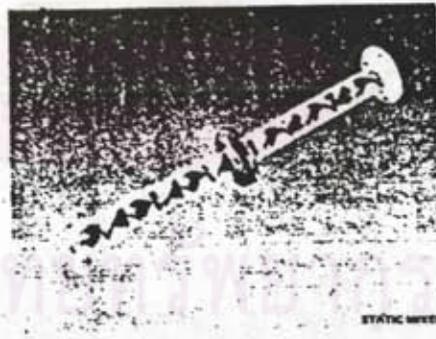
3.4 แนวความคิดของกระบวนการกวนเร็วในเส้นท่อ

การกวนเร็วในเส้นท่อได้เริ่มนิยมนำมาใช้กันมาก ในระบบการผลิตน้ำประปา เนื่องจากเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน และประหยัดค่าใช้จ่าย แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญบางประการคือ ความยาวของท่อซึ่งต้องยาวมากเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งแม้ว่าในปัจจุบันได้มีการใช้ตัวสถิตย (Static mixer) ติดอยู่ภายในท่อเพื่อลดความยาวท่อ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องราคาซึ่งมีราคาแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และถ้าจะประดิษฐ์ขึ้นเอง ก็กระทำได้ไม่ง่ายนักและเสียเวลานาน ซึ่งถ้ามีการใช้กรวดเป็นตัวกลางภายในเส้นท่อจะสามารถลดค่าใช้จ่าย และความยาวที่ต้องการลงได้มาก ตลอดจนควบคุมการทำงานของกระบวนการได้ง่ายขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีต้องใช้เครื่องมือกล แต่ข้อมูลในการออกแบบพารามิเตอร์ และประสิทธิภาพในการกวนเร็วที่มีอยู่ยังคงอยู่ในขอบเขตจำกัด เครื่องกวนเร็วในเส้นท่อแบบใช้ตัวสถิตย จัดเป็นอุปกรณ์กวนเร็วที่มีลักษณะการไหลแบบปลั๊กโฟล (plug flow) ส่วนประกอบที่สำคัญคือ มีตัวกลางในท่อที่ทำเป็น ใบพัดเกลียวติดอยู่คงที่ภายในท่อ ทำให้น้ำที่ไหลผ่านมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรง โดยอาศัยต้นพลังงานในระบบท่อน้ำดิบซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องสูบน้ำ เครื่องกวนเร็วในเส้นท่อแบบใช้ตัวสถิตย เพิ่งมีการค้นคว้าพัฒนาอย่างจริงจัง โดยบริษัท โทวเคมิคัล และบริษัท เคนิกส์ จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตและวิจัยขบวนการโพลีเมอร์ไรเซชัน เพื่อทำพลาสติคและเส้นใยสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ที่มีชื่อเสียงมากของอเมริกา (8)

เครื่องกวมเร็วในเส้นท่อแบบใช้ตัวสติกที่พัฒนา โดยบริษัท โดวเคมีคัล ได้พัฒนา มาสองชนิด คือ ชนิดความดันลดต่ำ และชนิดเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (ดูรูปที่ 3.8) ส่วนของบริษัท เคนิกส์ ตัวกลางคงที่ในท่อซึ่งเป็นใบเกลียวนั้นจะมีลักษณะเป็นริบบิ้นสั้น ๆ ความยาวประมาณ 1.5 ถึง 2.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกวมเร็ว (ดูรูปที่ 3.9) เครื่องกวมเร็วในเส้นท่อ เส้นท่อแบบใช้ตัวสติกที่พัฒนาล่าสุดเป็นแบบของบริษัท ไลท์นิน ภายใต้ชื่อการค้าว่า อินไลเนอร์ (Inliner) โดยออกแบบเป็นใบพัดขนาดเล็ก สามารถประกอบกันเป็นริบบิ้นที่บิดซ้ายขวาได้ (ดูรูปที่ 3.10) โดยใช้ใบพัด 6 ใบ หรือจะสลับใบอีก 4 ใบ ขวางทางการไหลเพื่อ สร้างความปั่นป่วนเพิ่มก็ได้ ทำให้แบบไลท์นินมีประสิทธิภาพในการกวมมากกว่าแบบอื่น ๆ โดยที่ใบ พัดย่อยแบ่งของเหลวออกเป็น 3 ส่วน ทำให้ของเหลวถูกซอยให้ละเอียดในแนวยาวมากกว่า แบบเคนิกส์



รูปที่ 3.8 แบบโดว ชนิดความดันลดต่ำ



รูปที่ 3.9 แบบเคนิกส์ มีลักษณะเป็นริบบิ้นสั้น ๆ ความยาวประมาณ 1.5 ถึง 2.5 เท่าของ เส้นผ่าศูนย์กลางท่อให้การผสมทั้งในแนวการไหลและในแนวรัศมี เป็นแบบที่นิยมใช้กัน มากที่สุด



รูปที่ 3.10 แบบไล์นิน เนื่องจากออกแบบมาเป็นใบพัดขนาดเล็กสามารถประกอบกันเป็นริบบิ้นที่ บิดซ้าย-ขวาได้โดยใช้ใบพัด 6 ใบ หรือจะสลับใบอีก 4 ใบวางทิศทางทวนไหลเพื่อสร้างการ อลวนเพิ่มก็ได้ ทำให้แบบไล์นินมีประสิทธิภาพในเรื่องการกวนมากกว่าแบบอื่น ๆ การที่ใบพัดย่อย แบ่งลำของเหลวออกเป็น 3 ส่วนทำให้ซอยของเหลวในแนวยาวมากกว่าแบบเคนคัสอีก 50% นอก จากนั้นการที่เป็นใบย่อยจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นอีกมาก เครื่องกวนนี้แบบไล์นินที่ถูกหุ้ม ด้วยฉนวนที่ดีจะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน มากกว่า

สุรินทร์ พลสมบูรณ์ (1985) ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็วในท่อ แนวนระดับพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นขึ้นอยู่กับค่า ความเร็วเกรเดียนท์ (G) เวลาพัก น้ำ (T) และความเข้มข้นของสารละลายสารส้ม (C) นอกจากนี้ความเข้มข้นของสารละลาย สารส้มมีผลโดยตรงต่ออัตราเร็วในการตกตะกอนของฟล็อกอีกด้วย (9)

Vrale และ Jordan (1970) ได้ทำการทดลองอุปกรณ์กวนเร็วประเภทต่าง ๆ และได้สรุปว่า อุปกรณ์กวนเร็วที่มีการไหลแบบปลັก โฟลว์จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบถังกวนสมบูรณ์ (4)

ASCE และ AWWA (1971) ได้เสนอแนะให้ใช้เวลาพักน้ำ 10-30 วินาที โดยใช้ อุปกรณ์กวนเร็วที่มีพลังงานสูง (0.25-1.0 hp/mgd) แต่ปัจจุบันเชื่อกันว่าเวลาที่พักน้ำที่เหมาะสม มีค่าไม่เกิน 1 วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่สอดคล้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารส้ม การทำลาย เสถียรภาพคอลลอยด์แบบตูดติตติวและทำลายประจุเกิดขึ้นในช่วง 10^{-4} -1 วินาที และ 1-7 วินาที สำหรับกลไกแบบกวาด (10,11)

Kawamura (1976) ได้เสนอแนวการออกแบบอุปกรณ์กวนเร็วแบบ injection nozzle-type reactor โดยที่ความเร็วของการไหลของสารรวมตะกอนที่ injection nozzle 6 ถึง 7.6 ม./วินาที ความเร็วเกรเดียนท์อยู่ในช่วง 750 ถึง 1000 วินาที⁻¹ และความเข้มข้นของสารรวมตะกอนก่อนเติมไม่เกิน 1% (12,13)

Stenquist และ Kaufman (1972) ทำการทดลองกวนเร็ว ในท่อที่มีสภาพการไหลแบบปั่นป่วน จุดเติมสารรวมตะกอนเป็นรูเจาะบนกริด (grid) ได้สรุปว่าจำนวนรูเจาะบนกริดที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง ในชั้นสมานตะกอนควรมีอย่างน้อย 1 รู ต่อพื้นที่ของกริด 1 ตารางนิ้ว (14)

Wilson (1972) ทำการทดลองการกวนเร็วด้วยถังปฏิกรณ์แบบเวนจูรี (venturi type tubular reactor) กับแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ใบพัดเป็นเครื่องมือกล พบว่าถังปฏิกรณ์กวนเร็วแบบเวนจูรีจะช่วยให้สมรรถนะของชั้นสมานตะกอนดีกว่า ยังผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นสูงกว่า (15)

Chao และ Stone (1979) ได้เสนอแนะว่าการกวนเร็วในท่อมีข้อดีว่าการกวนเร็วในถังกวนเร็วผสม ด้วยเหตุที่เป็นระบบที่ไม่ซับซ้อน ราคาถูกง่ายในการบำรุงรักษาและเดินระบบ (14)

Bratby (1981) ได้เสนอแนะว่าเวลาของการกวนเร็วที่ใช้อุปกรณ์แบบท่อยาวอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 8 วินาที (16)

พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็วในท่อ สามารถหาได้ดังนี้

3.4.1 พลังงานที่ใช้ในการไหลเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (17)

$$P = \rho QGH \dots \dots \dots (3.1)$$

- โดยที่ P = พลังงานที่ใช้ในการไหล, วัตต์
 p = ความหนาแน่นของน้ำ, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
 Q = อัตราการไหลจริงของน้ำในท่อ, ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
 g = ค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วง, เมตรต่อวินาทีต่อวินาที
 H = ค่าหัวน้ำสูญเสียเนื่องจากการไหล, เมตร

3.4.2 ความเร็วเกรเดียนท์ ซึ่ง Camp และ Stein ได้ให้สมการเสนอค่า G ไว้ดังนี้

$$G = (P/uV)^{1/2} \dots\dots\dots (3.2)$$

- โดย G = ความเร็วเกรเดียนท์, ต่อวินาที
 u = ความหนืดสมบูรณ์, นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร
 V = ปริมาตรจริงของอุปกรณ์กวนเร็ว, ลูกบาศก์เมตร
 P = พลังงานที่ใช้ไปในการไหล, วัตต์

จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 จะได้

$$\begin{aligned} G &= (pQgH/uV)^{1/2} \\ &= (gH/vT)^{1/2} \\ &= (gvH/vL)^{1/2} \dots\dots\dots (3.3) \end{aligned}$$

- โดยที่ v = ความหนืดจลน์ = u/p, ตารางเมตรต่อวินาที
 T = เวลาที่กวน, วินาที
 v = ความเร็วจริงของการไหลของน้ำในท่อ, เมตรต่อวินาที
 L = ความยาวของอุปกรณ์กวนเร็ว, เมตร

3.4.3 เวลาที่กวน ซึ่งถือว่าเป็นเวลาที่น้ำอยู่ในอุปกรณ์กวนเร็ว หาได้ดังนี้

$$T = V/Q = L/v \dots\dots\dots (3.4)$$

- โดยที่ T = เวลาที่กวนมีหน่วยเป็นวินาที