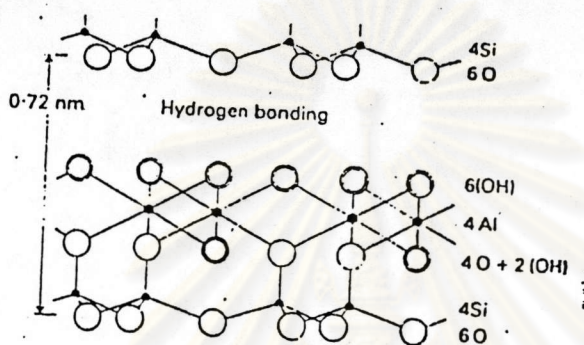


ที่เป็นกรดนี้จะทำให้ silicon tetrahedral sheet แยกตัวออก ทำให้โครงที่เหลือนี้อมีส่วน
ซิลิกา ต่อ อลูมิเนียมเป็น 1:1 ซึ่งก็คือโมเลกุลของแร่ดินคาโอลินนั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของดินคาโอลิน

(Foth 1990)

การเชื่อมระหว่างโมเลกุลแต่ละชุดของแร่ดินคาโอลิน เป็นแรงเชื่อมแบบไฮโดรเจน
บอนด์ ที่เชื่อมอยู่ระหว่าง ออกซิเจน อะตอมของโมเลกุลหนึ่งกับ หมู่ไฮดรอกซิล ของอีก
โมเลกุลหนึ่ง จากคุณสมบัตินี้เองทำให้ แร่ดินเหนียวคาโอลิน เป็นดินเหนียวประเภทไม่พองน้ำ
(nonexpanding clay) โครงสร้างโมเลกุลของแร่ดินเหนียวคาโอลิน สามารถประกอบเป็น
โครงสร้างผลึก หรืออนุภาคแบบ Psuedo-hexagonal crystal ที่มีขนาด 0.2 ถึง 2
ไมครอน

ลักษณะที่สำคัญประการหนึ่งของอนุภาคแร่ดินเหนียวคาโอลิน คือ มีความไม่สมดุล
ทางไฟฟ้าและมักจะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบเนื่องจาก ซิลิเกตไอออน ซึ่งมีประจุบวก 4 ใน

tetrahedral sheet สามารถถูกแทนที่โดยอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีประจุบวก 3 ได้ การแทนที่ของไฮดรอกไซด์นี้มีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นบางจุดมากกว่าจะเกิดการแทนที่แบบกระจายสม่ำเสมอ ลักษณะเช่นนี้ทำให้แร่ดินเหนียวคาโอลินมีความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้า และมักจะมีประจุลบเกิดขึ้น (Gillott, 1987) และเมื่ออนุภาคแร่ดินเหนียวคาโอลินเหล่านี้ ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน เมื่อเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน จะเกิดแรงผลักรังกันและกัน ดังนั้น ปัจจัยที่ทำให้อนุภาคแร่ดินเหนียวคาโอลิน สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพคือแรงผลักระหว่างไฮดรอกไซด์ของแต่ละอนุภาค นอกจากนี้แล้ว เนื่องจากอนุภาคแร่ดินเหนียวที่มีขนาดเล็กมาก คืออยู่ในช่วง $0.2-2 \times 10^{-3}$ มม. ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงของอนุภาคคอลลอยด์ คือ 10^{-6} มม. ถึง 10^{-3} มม. (มันสัน ตัณฑุลเวศม์, 2526) อนุภาคซึ่งมีขนาดเล็กมากจะไม่สามารถตกตะกอน ด้วยน้ำหนักตัวเองในเวลาจำกัด จึงเป็นสาเหตุให้สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้

ทฤษฎีของกระบวนการสร้างตะกอน

ในกระบวนการสร้างตะกอน (coagulation) ประกอบด้วย การทำงานสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการกวนเร็ว และขั้นตอนการสमानตะกอน (Flocculation) ในขั้นตอนการกวนเร็วมีจุดประสงค์ที่จะทำลายสภาวะคงตัว (destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ ที่อยู่ในน้ำ ในขั้นตอนการสमानตะกอน มีจุดประสงค์ที่จะทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายสภาวะคงตัวเกิดการชนกันหรือสัมผัสกันเพื่อให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และสามารถตกตะกอนได้

พฤติกรรมของขั้นตอนการกวนเร็ว และขั้นตอนการสमानตะกอนมีความแตกต่างกันโดยพื้นฐาน กล่าวคือ ปรากฏการณ์ที่เด่นชัดในขั้นตอนการกวนเร็ว คือ ปรากฏการณ์ทางกายภาพและไฟฟ้าเคมี ปรากฏการณ์ที่เด่นชัดในขั้นตอนการสमानตะกอนคือกระบวนการทางอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamics)

ทฤษฎีของการกวนเร็ว

ทฤษฎีพื้นฐานของการผสมเร็วคือ ทฤษฎีที่ว่าด้วยสภาวะคงตัว และไม่คงตัวของอนุภาคแขวนลอย เป็นการอธิบายการที่สภาวะอนุภาคคอลลอยด์ สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำ ชุ่นและการสร้างสภาพที่คอลลอยด์สามารถจับตัวกันได้ (มันสัน ตัณฑกุลเวศม์ , 2526)

ทฤษฎีสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

สภาวะคงตัวของคอลลอยด์ คือสภาวะที่คอลลอยด์ สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำโดยไม่มีการตกตะกอนและแยกจากน้ำ สภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าเหล่านี้อาจเกิดมาจากหลายสาเหตุดังนี้ คือ เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหน่วยแลตทิซ (lattice unit) ของอนุภาคหรือเกิดจากไอออนในน้ำที่ถูกดูดติดที่ผิวของอนุภาค หรือเกิดจากกลุ่มที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนของอนุภาค โดยทั่วไปชนิดและปริมาณของประจุไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนและค่าพีเอชของน้ำ อย่างไรก็ตามอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำตามธรรมชาติมักมีประจุไฟฟ้าลบ

ในระบบคอลลอยด์ที่ประกอบด้วยอนุภาคคอลลอยด์และน้ำจะมีความสมดุลย์ทางไฟฟ้า คือมีประจุไฟฟ้ารวมเท่ากับศูนย์ ดังนั้นประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ จึงถูกควบคุมโดยประจุตรงข้ามภายในน้ำ เพื่อคงความเสถียรของระบบจากปรากฏการณ์ ทฤษฎีที่ว่า มีประจุไฟฟ้าสองชั้น (electrical-double layer) ล้อมรอบอนุภาคคอลลอยด์ ชั้นของประจุไฟฟ้าชั้นแรก คือ ชั้นตรึง (fixed layer) ชั้นของประจุไฟฟ้าชั้นที่สอง คือ ชั้นกระจาย (diffuse layer) ชั้นตรึงประกอบด้วยประจุไฟฟ้าชนิดตรงข้ามที่เกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาค โดยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ กับประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำ ถัดจากชั้นตรึง การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำเนื่องจากความร้อนทำให้ประจุไฟฟ้าตรงข้ามที่ถูกดึงดูดเข้าสู่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ มีความหนาแน่นน้อยลงตามระยะที่ห่างจากผิว ชั้น

ที่ประจุไฟฟ้าตรงข้ามกระจายอยู่ในน้ำดังกล่าวนี้คือชั้นกระจาย ขนาดหรือลักษณะของชั้นกระจายขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ ตลอดจนปริมาณและชนิดของไอออนในน้ำ

ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้า (electrical potential) ระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดบริเวณผิว และมีค่าลดลงตามระยะที่ห่างจากผิว เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน แรงผลักระหว่างอนุภาคจะเกิดขึ้นและมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง แรงผลักระหว่างอนุภาคจะต้านแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะระหว่างอนุภาคลดลง ดังนั้น ถ้าศักย์ไฟฟ้าหรือแรงผลักระหว่างอนุภาคมีค่ามากในขณะที่แรงแวนเดอร์วาลส์มีค่าน้อยเนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสเข้าใกล้กันเพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาวะคงตัวนั่นเอง

ทฤษฎีสภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์

การสร้างสภาวะที่ทำให้คอลลอยด์สามารถรวมตัวกันหรือเปลี่ยนจากสภาวะคงตัวมาเป็นสภาวะไม่คงตัว โดยการเพิ่มอิทธิพลของแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดให้มากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า ถ้าแรงดึงดูดของอนุภาคคอลลอยด์ มีมากกว่าแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ก็สามารถรวมตัวกันได้และไม่สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำ กลไกการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ สามารถจำแนกได้เป็นสี่แบบ คือ การอัดตัวของชั้นกระจาย การดูดติดผิวและการสะเทินประจุไฟฟ้า การดูดติดผิวและเชื่อมต่อบริเวณอนุภาคและการหุ้มห่อในผลึก

การอัดตัวของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำมีปริมาณมากขึ้นประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ยิ่งผลให้ปริมาตรหรือความหนาแน่นของชั้นกระจายมีค่ามากขึ้น ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จน

แรงแวนเตอร์วอลล์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาค และเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาค คอลลอยด์ชั้นในที่สุด

การคอลลอยด์และการสะเทินประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามนอกเหนือจากที่มีอยู่ในชั้นตรงและชั้นกระจายคอลลอยด์ที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านี้จะสะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวตลอดจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงแวนเตอร์วอลล์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนลงได้จนเกิดการรวมตัวระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ชั้น

การคอลลอยด์และการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์เกาะติดบนโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ซึ่งอาจมีผลมาจากประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันหรือเกิดจากแรงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันถือได้ว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่เกาะติดบนโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วและสามารถรวมกับอนุภาคอื่น ๆ ได้ โดยมีสารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

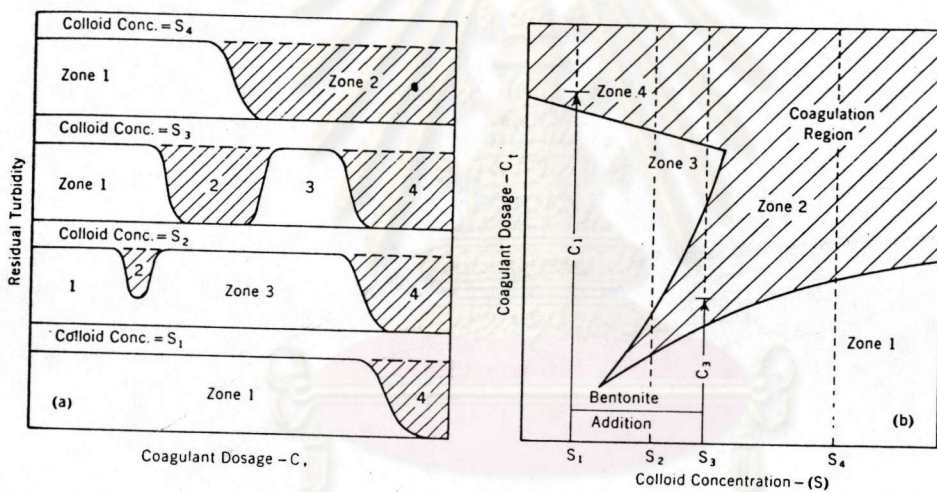
การหุ้มห่อในผลึก เกิดขึ้นเมื่อเติมสารประกอบเกลือของโลหะลงในน้ำมากเพียงพอที่จะมีการตกผลึกเกิดขึ้น อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนของผลึกที่เกิดขึ้นเมื่อมีการรวมตัวเกิดเป็นผลึกใหญ่มีน้ำหุ้มมากสามารถตกตะกอนได้ง่าย

สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าวประเภทใดประเภทหนึ่งหรือหลายประเภทรวมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีและกายภาพของน้ำ และชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นมา เป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการสร้างตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.1.3 กลไกสร้างสภาวะคงตัวของคอลลอยด์

กลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกวนเร็วขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณสารสร้างตะกอน ปริมาณความเข้มข้นของคอลลอยด์ ค่าพีเอชของน้ำ (stumm & o'Melia, 1968) โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสร้างตะกอนกับ ปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ (วัดในรูปพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.2

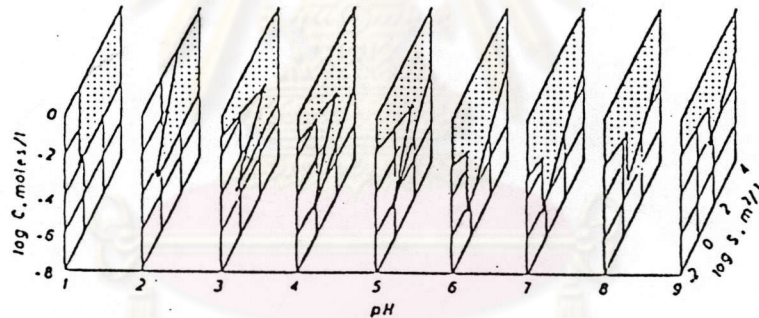


รูปที่ 2.2 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบต่าง (stumm and O'Melia, 1968)

จากรูปที่ จะสามารถแบ่งโซนในแผนภาพของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคได้ 4 โซน (Bratby 1980) ดังนี้

- โซน 1 แสดงถึงกรณีที่มีปริมาณสารส้ม ไม่เพียงพอ และการทำลายเสถียรภาพไม่เกิดขึ้น
- โซน 2 แสดงถึงกรณีที่มีปริมาณสารส้ม มีเพียงพอ และมีการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้น
- โซน 3 แสดงถึงกรณีที่เกิดการมีเสถียรภาพขึ้นมาใหม่ จากการใช้สารส้ม มากเกินไป
- โซน 4 แสดงถึงกรณีที่มีปริมาณสารส้มมีมากจนเกิดการตกผลึก $Al(OH)_3$ และมีการทำลายเสถียรภาพเกิดขึ้น

Stumm & O'Melia (1968) ได้แสดงว่า รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารส้ม กับปริมาณอนุภาคนี้ มีลักษณะแตกต่างกันไปในแต่ละค่า pH ดังแสดงในรูปที่ 2.3

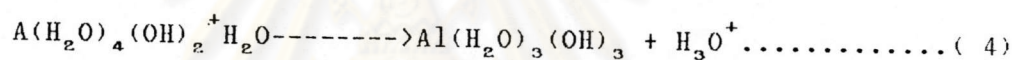
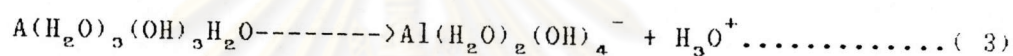
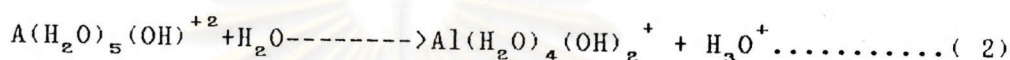
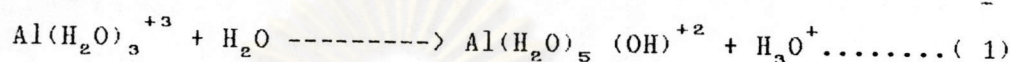


รูปที่ 2.3 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่ค่า PH ต่างๆ
(stumm and O'melia, 1968)

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน ดังนั้น จึงจะกล่าวถึง คุณสมบัติทางเคมี ของสารส้มและกลไกทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์โดยสารส้ม คือ กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า และกลไกแบบกวาด

เคมีของสารส้มในน้ำ

สารส้มเมื่ออยู่ในน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกตัวได้ไฮดรอกไซด์และลบ ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบ $Al(H_2O)_6^{+3}$ ซึ่งเรียกสารประกอบนี้ว่า Aquametalion สารประกอบดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติเป็นกรดที่ไว้เสถียรภาพพร้อมที่จะให้ไฮดรอกไซด์ของไฮโดรเจน (H^+) แก่น้ำทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า Monomeric Hydroxocomplex ต่าง ๆ ดังสมการ

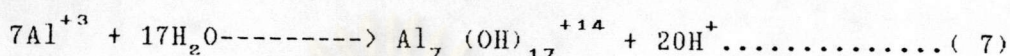
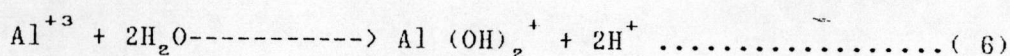
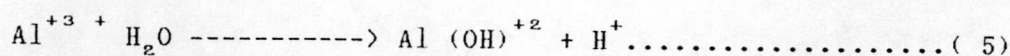


เมื่อ Monomeric hydroxo complex ซึ่งเป็นไฮดรอกไซด์ที่มีอลูมิเนียมเพียงอะตอมเดี่ยวรวมตัวกันจนเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีอลูมิเนียมหลายอะตอม เรียกว่า polymeric Hydroxo Complex เช่น Al_{13} , $Al(OH)^{+2}$, $Al_6(OH)^{+4}_{20}$ สารเชิงซ้อนของอลูมิเนียมที่มีอยู่ในสภาวะปกติของระบบประปามี 4 ชนิด คือ Al^{+3} , $Al(OH)^{+2}$, $Al_6(OH)^{+4}_{20}$ และ $Al(OH)_4^-$ (มันสัน ตันกุลเวศม์, 2526)

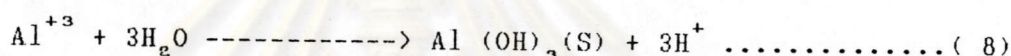
กลไกแบบดูดซับผิวและทำลายประจุ

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จาก $Al_2(SO_4)_3$ จะถูกกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำได้ $Al(H_2O)_6^{+3}$ หรือ Al^{+3} ไฮโดรไลซิสของ Al^{+3}

จะเกิดขึ้นทันทีโดย OH^- จะเข้าแทนที่โมเลกุลของน้ำ เกิดเป็นสารเชิงซ้อนระหว่างอลูมิเนียม
กับไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการตัวอย่างต่อไปนี้



ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารสัมสูงกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว
(Saturation point) ไฮดรอกไซด์จะดำเนินต่อไปจนได้ผลของปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นผลึก
 $\text{Al}(\text{OH})_3$ ดังสมการ



กลไกการดูดซับและทำลายประจุจะเกิดจากสารเชิงซ้อนที่เกิดระหว่างไฮดรอกไซด์จาก Al^{+3}
ถึง $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$ ชนิดของประจุที่อยู่บนสารเชิงซ้อนขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของน้ำ ถ้าพีเอชของ
น้ำมีค่าสูงกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้า (Zero point of charge) ของ $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$
จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุลบ ถ้า พีเอชของน้ำต่ำกว่าจุดสะเทินทางไฟฟ้าของ $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s})$
จะเกิดสารเชิงซ้อนประจุบวก

กลไกการดูดซับผิวและทำลายประจุจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณสารสัมมี
น้อยจนกระทั่งผลคูณของ (Al^{+3}) และ (OH^{-3}) ต่ำกว่าค่า K_{sp} และค่าพีเอชไม่สูงจนเกินไป
กลไกการดูดซับผิวและทำลายประจุมีข้อดีคือใช้ปริมาณสารสัมน้อยและทำให้สลัดจ์มีคุณสมบัติที่ดี คือ
อัดตัวได้แน่นและสามารถนำน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย ข้อเสียของกลไกแบบดูดซับผิวและทำลาย
ประจุ คือ เกิดขึ้นได้ยากมาก เพราะจะต้องใช้เวลาเพียง 10^{-4}

-1 วินาที ที่จะให้ไอออนบวกของสารประกอบเชิงซ้อนเข้าไปเกาะกับอนุภาค คอลลอยด์ ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยเกินไป เพราะถ้าผ่านช่วงเวลานี้ไป ไอออนของสารประกอบเชิงซ้อน จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $Al(OH)_3 (s)$ ซึ่งเป็นขบวนการแบบกวาด นอกจากปัจจัยข้างต้นแล้วยังพบว่า การสร้างลิมฟ์ระหว่างไอออนของสารเชิงซ้อนกับอนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถเกิดได้ในเวลาอันสั้น (มันสัน ตัณฑุเวศม์, 2526)

กลไกแบบกวาด

เมื่อเติมสารส้มลงไปใต้น้ำจมน้ำมีความเข้มข้นมากกว่าความเข้มข้นที่จุดอิ่มตัว ไฮโดรไลซิสจะเริ่มจาก Al^{3+} จนได้ $Al(OH)_3 (s)$ ดังแสดง ในสมการ (8) กลไกแบบกวาดจะเกิดขึ้นโดยผลึก $Al(OH)_3$ จะห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึกตลอดจนกวาดอนุภาคคอลลอยด์ที่ยังคงกระจายในน้ำให้อยู่ในกลุ่มผลึกโดยลักษณะนี้คอลลอยด์จะถูกกำจัดออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่สามารถถูกแยกออกจากน้ำได้โดยการตกตะกอน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกลไกแบบกวาดคือ ปริมาณสารรวมตะกอนและความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือ การตกผลึกจะเกิดขึ้นเร็วมาก ถ้าระดับเกินการอิ่มตัวนอกจากนี้อัตราการตกผลึกยังขึ้นกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นแกนในการตกผลึก สารส้มที่ใช้จะต้องมีปริมาณมากพอที่จะใช้ผลคูณของ Al^{3+} และ $(OH)^{-3}$ มีค่ามากกว่าค่า K_{sp} ค่าพีเอชของน้ำควรอยู่ในช่วง 6-7.5 ข้อดีของกลไกแบบกวาดคือ สามารถเกิดได้ง่าย และข้อเสียคือ ใช้ปริมาณสารส้มมากกว่าและให้สลัดจ์กักตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกยากกว่า

พารามิเตอร์ควบคุมการกวนเร็ว

พารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบ และควบคุมการทำงาน of ขบวนการกวนเร็ว คือความเร็วแรงแคตินิก (G) และเวลากักเก็บ (T) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดพลังงานในการผสม เพื่อที่จะกระจายสารสร้างตะกอนไปในทุกตำแหน่งของถังกวนเร็ว

พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความเป็นป่วน G คำนวณได้จากสมการของ Camp and Stein ดังนี้

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \dots \dots \dots (9)$$

- โดย G = ความเร็วแกรเดียนท์
 P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความเป็นป่วน
 μ = ความหนืด (absolute viscosity)
 V = ปริมาตรของน้ำทั้งหมดในถัง

Letterman Quens and Gernmel (1965) ได้ศึกษาและเสนอว่า นอกจากสูตรในสมการที่ (9) ที่ใช้ในการออกแบบถังกวนเร็วแล้ว ยังได้เสนอสูตรเชิงปฏิบัติการ (empirical formular) ที่รวมเอาค่าความเข้มข้นของสารสร้างตะกอนซึ่งในถังคือสารส้มเข้าไปพิจารณาด้วย

$$(G) * t_{opt} * C^{1.48} \dots \dots \dots (10)$$

- โดยที่ G = ระดับความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมที่สุด (วท.⁻¹)
 t = เวลาที่เหมาะสม (วินาที)
 C = ความเข้มข้นของสารส้ม (ก./ลบ.ม.)

นอกจากนี้แล้วยังได้มีความพยายามที่จะพัฒนากระบวนการกวนเร็วเพื่อให้เกิดการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคโดยประหยัดสารสร้างตะกอนที่สุด นั่นคือ จะต้องทำให้เกิดกลไกแบบตูดติดและทำลายประจุ โดยจะต้องกระจายสารสร้างตะกอนให้ทั่วถึงภายในเวลาน้อยที่สุด ซึ่งอาจจะทำได้โดยใช้อุปกรณ์การกวนเร็วแบบพิเศษ เช่น เครื่องบดในท่อ (In-Line Blender) แต่ในโรงผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปมักใช้อุปกรณ์การกวนเร็วแบบใบพัดซึ่งไม่สามารถให้ความเป็นป่วนสูงเท่าอุปกรณ์เครื่องบดในท่อ สำหรับ ในการคำนวณหาพลังงานที่ให้แก่น้ำโดยการกวนแบบใบพัด สามารถหาได้โดย (มั่นสิน ตัณฑกุลเวศม์, 2526)

$$P = k\rho N^3 D^5 / g \dots\dots\dots (11)$$

โดยที่ k = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของใบพัด ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (ปอนด์ / ลบ.ฟุต)

N = จำนวนรอบของใบพัดต่อวินาที D = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด (ฟุต)

ทฤษฎีของการสमानตะกอน

กระบวนการสमानตะกอน (flocculation) อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้วเกิดชนกันหรือสัมผัส และรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูลเลชันอาจจำแนกออกเป็นส่วนประเภท (O'melie, 1972) ได้แก่ การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion) การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential setting) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์สามารถทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่และชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) และเกิดการชนหรือสัมผัสกันระหว่างอนุภาคขึ้น การสमानกันระหว่างกลุ่มอนุภาคภายหลังการสัมผัส ทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น การสमानตะกอนในลักษณะนี้เรียกว่า การสमानตะกอนแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) จลพลศาสตร์ของการสमानตะกอนแบบเพอริไคเนติกสามารถแสดงโดยสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-4\alpha k T n^2}{3\mu}$$

โดยที่ n คือจำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรน้ำที่เวลา t α คืออัตราการเกาะติด (sticking ratio) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนที่อนุภาคจะเกาะติดกันภายหลังการชนหรือสัมผัสกัน มีค่ามากที่สุดไม่เกิน 1 K คือค่าคงที่โบลท์มาน (Boltzmann's constant) μ คือ ค่าความหนืดสัมบูรณ์ และ T คือค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่า อัตราการสมานตะกอนแบบเพอริโคเนติกขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิและขึ้นกับจำนวนของอนุภาค การสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะลดลงเหลือน้อยมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'melia, 1972)

การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในน้ำ ที่อยู่ในสภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (Static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความเร็วมัธยัสถ์และการชนรวมทั้งสัมผัสกันขึ้นในระหว่างการจมตัว การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังทำน้ำใสแบบชั้นสลัดจ์ (sludge blanket clarifier) และในถังตกตะกอนแนวตั้งทั่วไป จลพลศาสตร์ของการสมานตะกอนด้วยการจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

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

โดย ϕ คือความเข้มข้นเชิงปริมาตรของฟล็อก h คือความลึกของการจมตัว d และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค 2 ขนาด ที่ชนกันในการสมานตะกอนแบบนี้

การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อมีการกวนเกิดขึ้นในเนื้อของเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำมวลหนึ่งๆ จะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับมวลน้ำนั้นๆ ก็จะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดโอกาสการชนและสัมผัสตัวกันมากที่สุด การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic flocculation) เมื่อเปรียบเทียบอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดอนุภาค ปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริไคเนติกมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน โดยทั่วไปอนุภาคที่ไม่อยู่ในสภาวะไม่คงตัวและถูกนำส่งมาอยู่ในขั้นตอนการสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน ดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานของกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงได้แก่ กลไกแบบออร์โธไคเนติก (O'melia, 1972) จลพลศาสตร์ของการสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนติก สามารถแสดงโดยสมการดังต่อไปนี้

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

n_1 คือ จำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรน้ำของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d_1 และ n_2 คือจำนวนอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรน้ำของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d_2 G คือความเร็วแกรเตียนท์

การใช้โพลิเมอร์ เป็นสารช่วยสร้างตะกอน (coagulant aid)

หลังจากการเติมสารสร้างตะกอน (coagulant) เช่น สารส้ม ลงในน้ำดิบแล้ว จะมีการทำลายสภาวะคงตัวของอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคที่ถูกทำลายสภาวะคงตัวแล้วในขั้นตอนนี้เรียกว่าอนุภาคเบื้องต้น อนุภาคเบื้องต้น จะถูกผ่านเข้าไปยังกระบวนการสมานตะกอน เพื่อรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ ที่เรียกว่า ฟล็อก ต่อไป

การเติมโพลิเมอร์หลังจากเกิดอนุภาคเบื้องต้นจะช่วยให้การสमानตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้น โพลิเมอร์ขนาดใหญ่ของโพลิเมอร์จะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมตัวกันได้เร็ว และเกิดฟล็อก ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Schwayer, 1981) ฟล็อกที่แข็งแรงนี้ ให้ผลดีต่อการทำงานของเครื่องสमानตะกอนแบบฟลูอิดไรซ์เบด

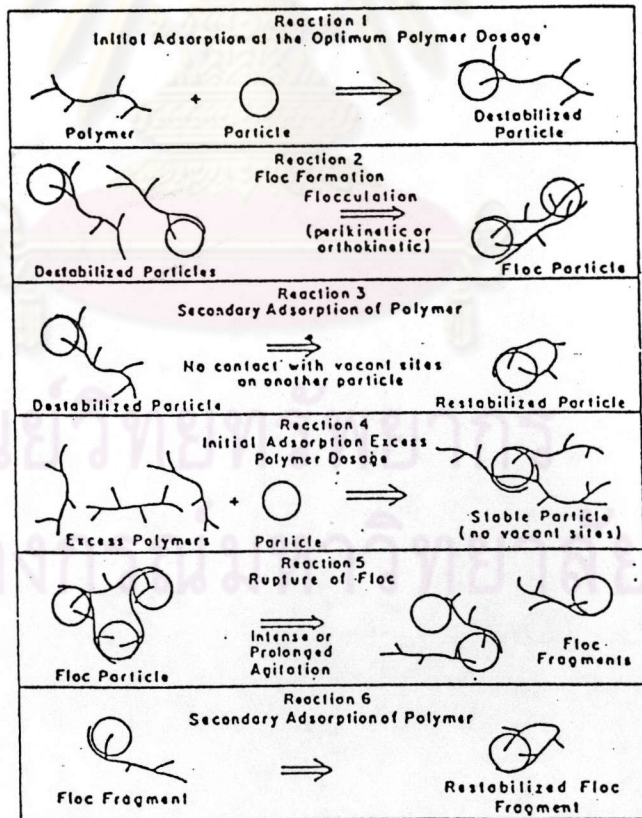
กล่าวคือ ฟล็อกที่แข็งแรงจะสามารถต้านแรงเฉือนของของเหลวที่ไหลผ่าน ซึ่งเกิดจากความปั่นป่วนของการกวนโดยไม้แตกออกเป็นอนุภาคเล็กลง แล้วหลุดออกไปจากถังปฏิกิริยา ดังนั้น โพลิเมอร์จึงนับว่าเป็นสารช่วยในการสमानตะกอนทำให้ระบบสามารถทำงานได้ที่อัตราน้ำล้นผิวสูงขึ้น

โพลิเมอร์ที่ใช้หลังจากการเติมสารส้ม มักเป็นพวกมีประจุลบ (anionic polymer) หรือไม่มีประจุ (nonionic polymer) เนื่องจากมีโมเลกุลขนาดใหญ่ เหมาะกับกลไกที่ใช้โพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นได้จำนวนมาก ทำให้ได้ฟล็อกที่มีน้ำหนักมาก แข็งแรง และแยกออกจากน้ำได้ดี กลไกการทำงานของโพลิเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วย โมเดลที่เรียกว่า polymer bridging ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลโพลิเมอร์ จะประกอบด้วยโมเลกุล (monomer) เชื่อมต่อกัน โมเลกุลที่ประกอบกันเป็นโพลิเมอร์เหล่านี้มักจะมี หมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่สามารถเกาะจับอนุภาคได้ ดังนั้นในโพลิเมอร์หนึ่งโมเลกุล จะมีจุดที่อนุภาคเกาะจับได้หลายแห่ง ในรูปปฏิกิริยาที่ 1 แสดงถึงวิธีการเกาะจับของโมเลกุลโพลิเมอร์ กับอนุภาค หลังจากการเกาะจับนี้ ถ้าโมเลกุลโพลิเมอร์ยังมี หมู่ฟังก์ชันที่เกาะจับอนุภาคได้เหลืออยู่ ก็จะมีโอกาสที่มีการเกาะจับอนุภาคต่อไปเกิดเป็น ฟล็อกขนาดใหญ่มากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในรูปปฏิกิริยาที่ 2 ปฏิกิริยาที่เราต้องการในระบบผลิตน้ำประปา คือ ปฏิกิริยาที่ 1 และ 2 นี้ ซึ่งจะเกิดได้สมบูรณ์จะต้องประกอบด้วยสามปัจจัย 3. ประการ คือ ความเข้มข้นของโพลิเมอร์ที่ใช้ ค่าความเร็วเกรเดียนท์ และเวลากักเก็บ ความไม่พอดีของปัจจัยทั้ง 3 นี้ แม้เพียงปัจจัยเดียว จะมีผลให้อนุภาคมีสภาวะคงตัวกลับคืนมาอีกได้ดังแสดงในรูปปฏิกิริยาที่ 3

อนุภาคถูกเกาะจับหลายตำแหน่งทำให้ไม่มีที่ว่างบนผิวอนุภาคที่จะไปเกาะจับกับหมู่ฟังก์ชันของ โมเลกุลโพลีเมอร์อื่น อนุภาคที่ได้ก็ยังคงมีสภาวะคงตัวต่อไป รูปปฏิริยาที่ 3 อาจเกิดได้ในกรณีที่ การกวนผสมโพลีเมอร์ไม่ทั่วถึง ทำให้หมู่ฟังก์ชันที่เหลือ มีโอกาสกลับมาเกาะที่ อนุภาคที่เกาะอยู่เดิมแล้วมากกว่าจะไปเกาะกับอนุภาคอื่น หรือ อาจเป็นเพราะคุณสมบัติเดิม หรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโมเลกุลโพลีเมอร์เอง ที่ทำให้หมู่ฟังก์ชันเกิดรวมเป็นกลุ่มไม่กระจายตัวออก เพื่อเกาะจับอนุภาค

รูปปฏิริยาที่ 4 แสดงถึงการใช้โพลีเมอร์มากเกินไป ทำให้ไม่มีที่ว่างบนผิวอนุภาคที่จะไปเกาะจับกับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลโพลีเมอร์อื่น อนุภาคที่ได้ก็ยังคงมีสภาวะคงตัวต่อไป รูปปฏิริยาที่ 5 แสดงถึงกรณีที่มีการกวนผสมที่รุนแรง หรือยาวนานมากไป จนทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้ว แตกออก และอาจทำให้เกิดการเกาะติดบน อนุภาคเดิม ฟล็อกที่ได้จะมีสภาวะคงตัวกลับคืนมาอีก ดังรูปปฏิริยาที่ 6



รูปที่ 2.4

กลไกการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วย โพลีเมอร์ (มันสิน, 2526)

ลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติของฟลอค

จุดประสงค์ของกระบวนการเสมานตะกอนคือ การสร้างฟลอคที่มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีในถังตกตะกอน ทั้งนี้เพื่อที่จะลดภาระของเครื่องกรอง เมื่อพิจารณาสมการความเร็วในการตกตะกอนของ stoke

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2 g}{18\mu} \dots\dots\dots (12)$$

- โดยที่
- V_s = ความเร็วของการตกตะกอน ซม./วท.
 - g = ค่าคงที่แรงดึงดูดของโลก ซม./วท.²
 - ρ_p, ρ = ความหนาแน่นของอนุภาคและของน้ำ (กรัม-ลบ. ซม.)
 - μ = ความหนืดสัมบูรณ์ (กรัม/ซม.-วท.)
 - D_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

ความหนาแน่นและขนาดของฟลอคเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลกับค่าความเร็วตกตะกอนโดยที่ขนาดของฟลอคจะมีอิทธิพลมากกว่าความหนาแน่น เมื่อพิจารณาจากสมการที่ จะเห็นเพื่อที่จะให้ฟลอคมีความสามารถตกตะกอนได้ดี จึงจะต้องสร้างฟลอคที่มีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นสูง ปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับขนาดของฟลอคและความหนาแน่น มีหลายปัจจัย ดังนี้ คือ ความเร็วเกรเดียนต์ สัดส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น (ALT-ratio) การใช้โพลีเมอร์

ความเร็วเกรเดียนต์

การเพิ่มความเร็วเกรเดียนต์ จะทำให้ขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้ของฟลอคมีขนาดเล็กลงทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อเพิ่มความเร็วเกรเดียนต์จะทำให้แรงเฉือนมีค่ามากขึ้น แต่จะทำให้ฟลอคมีความหนาแน่นมากขึ้น (LIN, 1982)

สัดส่วนความเข้มข้นสารสัมพันธ์กับความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น (ALT-ratio)

เมื่อเพิ่มค่า ALT-ratio มากขึ้นจะเป็นผลให้ความหนาแน่นของฟล็อกจะลดลง ในน้ำดิบชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้กับระบบผลิตน้ำประปาถ้ามีค่าความขุ่นคงที่การเพิ่มค่า ALT-ratio จะหมายถึงการเพิ่มค่าความเข้มข้นของสารส้ม จึงสรุปได้ว่า สำหรับค่าความขุ่นที่คงที่ การเพิ่มค่าความเข้มข้นสารส้มจะทำให้ความหนาแน่นของฟล็อกน้อยลง (Tambo and Watanabe, 1979) ทั้งนี้สามารถอธิบายจากแบบจำลองการเกิดฟล็อกว่า เมื่ออนุภาคมาเกาะ และรวมตัวกันจนเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สัดส่วนปริมาณช่องว่างต่อปริมาตรทั้งหมดหรือความพรุน (porosity) จะมากขึ้นเป็นเหตุให้ฟล็อกมีความหนาแน่นน้อยลง

การใช้โพลีเมอร์

การใช้โพลีเมอร์ในการเสมานตะก่อนไม่มีผลโดยตรงที่ทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่การใช้โพลีเมอร์ เป็นการช่วยเพิ่มความแข็งแรงของฟล็อก (floc strength) ซึ่งเป็นความสามารถในการทนต่อแรงเฉือนโดยที่ฟล็อกไม่แตกออก ขนาดหน่วยแรงเฉือน (shear strength) สูงสุดที่ฟล็อกทนได้โดยไม่แตกออกนั้น ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่จากการศึกษาความเป็นไปในกระบวนการเสมานตะก่อนจะพบว่า อนุภาคจะมีการรวมตัวให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนถึงขีดจำกัดหนึ่งของขนาด คือ ขนาด ในสภาพที่ แรงเกาะจับระหว่างอนุภาคเท่ากับ แรงที่จะทำให้เกิดการแตกของฟล็อก ดังนั้น ขนาดที่ใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้ของฟล็อกจึงเป็นตัวชี้ความแข็งแรงของฟล็อก ในระบบนี้ๆ การใช้โพลีเมอร์อย่างเหมาะสม จะทำให้ฟล็อกแข็งแรงขึ้น ตามที่กล่าวมาแล้ว Tambo และ Hozumi (1979) พบว่า ขนาดใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้ของฟล็อกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อเพิ่ม pH ใน ช่วง 7.1-8.0 นี้ความเร็วเกรเดียนต์คงที่ค่าหนึ่ง ที่ pH ช่วง 7 ถึง 8 นี้ พบว่า ค่า ALT-ratio ไม่มีผลต่อขนาดฟล็อก แต่ที่ pH เท่ากับ 6.5 พบว่า การลดค่า ALT-ratio มีผลทำให้ขนาดใหญ่ที่สุดของฟล็อกที่เป็นไปได้มีขนาดใหญ่มากขึ้น

นอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ฟลักซ์ที่ผลิตได้ในกระบวนการสมานตะกอน
ใดๆ ควรมีขนาดๆของฟลักซ์ที่ผลิตออกมามีขนาดใกล้เคียงกัน เพราะถ้าขนาดของฟลักซ์ที่ใหญ่ที่
สุดและเล็กที่สุดที่ผลิตออกมามีความแตกต่างกันมาก การออกแบบถังตกตะกอน เพื่อที่จะให้ครอบคลุม
ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ย่อมทำให้เกิดความสิ้นเปลืองมาก จากปัจจัยข้างต้นจะพบว่า
ค่าความเร็วเกรเดียนท์ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานที่ถ่ายเทให้น้ำเป็นปัจจัยที่กำหนดขนาดของฟลักซ์
ถ้าสามารถมีการกระจายพลังงานอย่างทั่วถึง (homogeneity) ในเครื่องสมานตะกอนขนาด
ของฟลักซ์ที่ผลิตออกมา ก็จะมีขนาดใกล้เคียงกัน

สำหรับถังปฏิกริยาที่ใช้ใบกวนได้มีความพยายามที่จะออกแบบ ให้มีการกระจาย
พลังงานอย่างอย่างทั่วถึง (homogeneity) เช่นออกแบบลักษณะใบพัดให้มีขนาดเล็กแต่ครอบคลุม
ทั่วถึง เพื่อหลีกเลี่ยงธรรมชาติของใบกวนที่มีความแตกต่างกันของความเร็วเชิงเส้นเมื่อใบพัดหมุน
จากปลายใบจนถึงจุดศูนย์กลางการหมุนซึ่งทำให้ไม่สามารถถ่ายเทพลังงานให้น้ำอย่างทั่วถึงที่
ความปั่นป่วนต่ำ

x

สภาวะเสมือนการไหล (fluidization)

ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของสภาวะเสมือนการไหล ดังต่อไปนี้

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ (2528) ได้ให้ความหมายของสภาวะเสมือนการไหลไว้ดังนี้ว่า
คือ สภาวะที่ของแข็งที่มีรูปลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสของไหลที่ไหลขึ้นจนทำให้ของแข็งนี้
ซึ่งเดิมอยู่นิ่ง สามารถที่จะร่อนและลอยตัวได้อย่างอิสระของแข็งที่ลู่อยู่ในสภาวะเสมือนการไหล
จะมีคุณสมบัติของของไหล คือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งอยู่ภายในหอตกลงอย่างทั่ว
ถึงและสม่ำเสมอ

พล สาเททอง (2526) ได้กล่าวถึงนิยาม สภาวะเสมือนการไหล คือ การที่อนุภาค
หรือกลุ่มอนุภาคลอยตัวอยู่ในของไหลที่ไหลผ่านโดยไม่หลุดลอยไปกับของไหลและ ไม่กองอยู่เหนือ
แผ่นกระจายการไหล

องค์ประกอบที่มีผลต่อสภาวะเสมือนการไหล

องค์ประกอบที่มีผลต่อสภาวะเสมือนการไหล ได้แก่ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนการไหล (minimum fluidizing Velocity) ความเร็วสุดท้ายของการอยู่ในสภาวะเสมือนการไหล (terminal Velocity of fluidization) ลักษณะของตัวกระจายการไหล ในการเกิดสภาวะเสมือนการไหล ค่าความเร็วของไหลจะต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดสภาวะเสมือนการไหลและจะต้องไม่มีค่ามากกว่า ค่าความเร็วปลาย (terminal velocity) ของเม็ดของแข็ง เพื่อให้เม็ดของของแข็งหลุดออกจากหอคกลอง

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดสภาวะเสมือนการไหล

เมื่อผ่านของไหลเข้าไปในถังปฏิกริยาที่มีกลุ่มเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ โดยเพิ่มความเร็วของของไหลไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ระดับความเร็วหนึ่งกลุ่มอนุภาคจะเริ่มขยับตัว ผิวบนสุดของกลุ่มอนุภาคที่เคยไม่เรียบก็จะเรียบเสมอกันอยู่ในแนวระนาบ ความเร็วนี้เป็นค่าสำคัญมาก เพราะถ้าหากต้องการให้อนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลแล้ว จะต้องใช้ความเร็วของของไหลให้สูงกว่าหรือเท่ากับความเร็วนี้ ความเร็วดังกล่าวเรียกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนการไหล แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าที่ความเร็วนี้อนุภาคจะเริ่มเข้าสู่สภาวะเสมือนการไหลแล้วแต่ถ้าจะให้เกิดสภาวะที่มีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอ จะต้องใช้ความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนการไหล (พล สาเกทอง, 2526)

การคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนการไหลสามารถทำได้โดยใช้สมมติฐานที่ว่าในขณะที่ตัวกลางเริ่มลอยตัวเป็นอิสระอยู่นั้น ตัวกลางอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงสองแรง ที่กระทำบนเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของตัวเม็ดอนุภาคเองกับแรงพยุงจากของไหล หรือเกิดจากแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล (สมศักดิ์ ดำรงเลิศ, 2528)

แรงพอง (แรงเสียดทาน + แรงต้าน) = น้ำหนักของเม็ดของแข็ง
 หรือ (ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวางของชั้นตัวกลาง) x (พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อทดลอง) =
 (ปริมาตรของชั้นตัวกลาง) x (ส่วนของของแข็งในชั้นตัวกลาง) x (ความหนาแน่นประสิทธิผล) ซึ่ง
 เขียนใหม่ได้

$$\Delta p \cdot A = W = (A L_{mf}) (1 - \Sigma_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g_c \dots \dots (13)$$

จัดสมการใหม่เพื่อให้ได้สถานะต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล

$$\Delta p / L_{mf} = (1 - \Sigma_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g_c / g$$

ปริมาณช่องว่างในชั้นตัวกลางต่ำสุด สำหรับขณะที่เริ่มขึ้นจะมีค่า
 มากกว่าปริมาณช่องว่างที่อยู่ในชั้นตัวกลางหนึ่งเล็กน้อย ในขณะที่ชั้นตัวกลางยังอยู่ในลักษณะของค่า
 ต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนการไหลนั้น สมการของความดันตกยังสามารถเอามาประยุกต์ได้
 เมื่อแทนค่าความดันตกในสมการของ ERGUN จะได้

$$\frac{1.75}{\phi_s \Sigma^3 mf} \frac{(D_p V_{mf} \rho_g)^2}{\mu} + \frac{150(1 - \Sigma_{mf})}{\phi_s^2 \Sigma mf} \frac{(D_p V_{mf} \rho_g)}{\mu} = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2}$$

ในชั้นตัวกลางที่ใช้ตัวกลางขนาดเล็ก จะทำให้สามารถใช้ความเร็ว
 ของของไหลเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดสภาวะเสมือนการไหลได้แล้ว เพราะฉะนั้นความเร็วต่ำสุด
 ของการเกิดสภาวะเสมือนการไหลนั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$V_{mf} = \frac{(\phi_s D_p)^2}{150} \frac{(\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu} \frac{(\Sigma^3 mf)}{1 - \Sigma mf} \text{ เมื่อ } Re (20) \dots \dots (14)$$

และสำหรับชั้นตัวกลางที่ใช้น้ำมันขนาดใหญ่ ต้องใช้ความเร็วของของไหลสูงมาก ๆ จึงทำให้โอกาสลอยเป็นอิสระได้ กล่าวคือ ค่าของพลังงานจลน์จะเป็นจุดเด่นในกรณีนี้ ดังนั้นความเร็วต่ำสุดจะทำให้เกิดสภาวะเสมือนการไหล ค่ามวลได้จาก

$$V_{mf}^2 = \frac{\phi s D_p (\rho_s - \rho_g) \cdot g_c \Sigma^3 mf}{1.75 \rho_g} \text{ เมื่อ } Re > 1000 \dots (15)$$

บางครั้งการหาค่าของแฟคเตอร์รูปร่าง (ϕs) และค่าความพรุนต่ำสุด ทำได้ยากมากได้มีการหลีกเลี่ยงที่จะใช้ค่าทั้งสองนี้ โดยพยายามเปลี่ยนให้อยู่ในเทอมของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวกลาง และเนื่องจาก WEN และ YU พบว่า

$$\frac{1}{\phi s \Sigma mf^3} \sim 14$$

และ $\frac{1 - \Sigma_{mf}}{\phi s^2 \Sigma mf^3} \sim 11$

ดังนั้น สมการของ ERGUN เปลี่ยนเป็น

$$\frac{D_p V_{mf} \rho_g}{\mu} = (33.7)^2 + 0.0408 \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g_c}{\mu^2}^{1/2} - 33.7 \dots (16)$$

สำหรับตัวกลางที่มีขนาดเล็ก ความเร็วต่ำสุด ค่ามวลได้ใหม่เป็น

$$V_{mf}^2 = \frac{D_p^2 (\rho_s - \rho_g) g_c}{1650 \mu} \text{ เมื่อ } Re < 20 \dots (17)$$

สำหรับเบดที่มีขนาดใหญ่ ความเร็วต่ำสุด หาได้จาก

$$V_{mf}^2 = \frac{Dp (\rho_s - \rho_g) g_c}{24.5 \mu} \quad \text{เมื่อ } Re > 1000 \dots\dots\dots (18)$$

ในการปฏิบัติพบว่าจะต้องใช้ความเร็วไม่ต่ำกว่า 1.5 เท่าของ V_{mf} จึงจะได้ชั้นตั้งกลางที่อยู่ในสภาวะเสมือนของไหลที่มีการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอ โดยทั่วไปจะใช้ความเร็วประมาณ 3-5 เท่าของ V_{mf} ในการใช้ความเร็วที่สูงกว่า V_{mf} จะต้องคำนึงว่าจะต้องไม่เกินค่าความเร็วปลาย ของอนุภาคมีฉะนั้นจะทำให้อนุภาคไหลออกไปจากถึงปฏิกริยาพร้อมของไหล

2.5.1.2 ความเร็วสุดท้ายของการอยู่ในสภาวะเสมือนของไหล (terminal velocity of fluidization)

ความเร็วของของไหลจะต้องเร็วพอที่จะทำให้อนุภาคอยู่ในสภาวะเสมือนของไหลแล้วยังต้องไม่มากเกินไปจนทำให้ตัวกลางลอยออกจากถึงปฏิกริยา ในการนำไปใช้งาน จึงจำเป็นต้องทราบความเร็วทั้งสองอย่างความเร็วสุดท้ายของการอยู่ในสภาวะเสมือนของไหล หาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$V_t = \left[\frac{4g_c (\rho_s - \rho_g)}{3\rho_s C_d} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (19)$$

ค่า C_d มีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ Re ดังนี้

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad \text{สำหรับ } Re < 0.4$$

$$= \frac{10}{\text{Re}^{1/2}} \quad 0.4 \quad (\text{Re} < 500)$$

$$= 0.43 \quad 500 \quad (\text{Re} > 200,000)$$

เติมค่า C_d ลงในสมการ จะได้

$$V_t = \frac{gC (\rho_s - \rho_g) D_p^2}{18\mu} \quad \text{Re} < 0.4 \dots \dots \dots (20)$$

$$V_t = \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 gC^2}{\rho_g \mu^2 225} D_p^{1/3} \quad (\text{Re} > 500 \dots \dots \dots (21)$$

$$V_t = \frac{3.1 gC (\rho_s - \rho_g) D_p^{1/2}}{\rho_g} \quad 500 < \text{Re} < 200,000 \quad (22)$$

สัญลักษณ์

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของท่อทดลอง (เมตร²)

Dp = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

g = แฟคเตอร์เปลี่ยนหน่วยของแรงและน้ำหนัก

gC = อัตราเร่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/ชม.²)

Lmf = ความสูงต่ำสุดของเบค (เมตร)

ΔP = ความดันลดของเบค (กก./เมตร²)

Re = ค่าของ Reynolds ของอนุภาค = $\frac{\rho_g D_p v}{\mu}$

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

V_{mf} = ความเร็วต่ำสุดของการเกิดสภาวะเสมือนของไหล
(เมตร/ชม.)

W = น้ำหนักของอนุภาค (กก.)

Σmf = ความพรุนต่ำสุด

ϕ_s = แพลเตอร์รูปร่าง

μ = ความหนืดของของไหล (กก./เมตร-ชม.)

ρ_g = ความหนาแน่นของไหล (กก./เมตร³)

ρ_s = ความหนาแน่นของแข็ง (กก./เมตร³)

C_d = ค่าคงที่ เรียกว่า Drag coefficient

ตัวกระจายของไหล (distributor)

ลักษณะของการอยู่ในสภาวะเสมือนการไหลจะสม่ำเสมอหรือไม่ขึ้นอยู่กับตัวกระจายของไหล ตัวกระจายของไหลมีไว้เพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาข้างล่างและให้ของไหลผ่านได้สามารถกระจายของไหลออกได้เต็มผิวหน้าตัดของตัวเครื่องโดยที่ความเร็วของไหลที่เหนือตัวกระจายของไหลควรจะเท่ากันทุกจุด องค์ประกอบที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ถึงปฏิกิริยาจะต้องตั้งให้ได้ตั้งเพื่อจะได้เกิดการหมุนเวียนเกิดได้อย่างสม่ำเสมอและเท่ากันในถังปฏิกิริยา

ความสัมพันธ์ของความเร็วการไหลขึ้นและค่าความพรุนของชั้นตัวกลางที่ขยายตัว

เมื่อเกิดสภาวะเสมือนการไหลขึ้นและเมื่อเพิ่มความเร็วในการไหลขึ้นจะทำให้ชั้นตัวกลางเกิดการขยายตัว (Richardson และ Zaki, 1954) ได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการไหลขึ้นที่เพิ่มขึ้นกับค่าความพรุนที่เพิ่มขึ้น

$$V = V_c \epsilon^n \dots \dots \dots (23)$$

โดย V = ความเร็วในการไหลขึ้นเมื่อคิดเกี่ยวกับหอคอยที่ไม่มี
ตัวกลาง (velocity in empty tower)

ϵ = ค่าความพรุน (porosity)

n = ค่าดัชนี n ของ Richardson และ Zaki ค่าดัชนี n
จะมี ค่าเปลี่ยนตามค่าความเร็วปลายของเม็ดของแข็ง
ที่ใช้เป็นตัวกลาง และขนาดของเม็ดของแข็ง

$$n = 4.65 + 20 \frac{d}{D} \quad (Re_c < 0.2)$$

$$n = (4.4 + 18 \frac{d}{D}) Re_c^{-0.03} \quad (0.2 < Re_c < 200)$$

$$n = 2.4 \quad (Re_c > 500)$$

โดย ค่า d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดของแข็งที่ใช้เป็นตัวกลาง

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของหอคอย

Re_c = ค่า Reynold number ของอนุภาค เมื่อคิดที่
ความเร็วปลาย

สมการ (23) เป็นสูตรเชิงปฏิบัติที่สามารถทำนายค่าความเร็วการไหล
ขึ้นกับค่าความพรุนที่เพิ่มขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสามานตะก่อน

การประยุกต์สภาวะเสมือนการไหลกับการสามานตะก่อน

เมื่อชั้นของตัวกลางอยู่ในสภาวะเสมือนการไหลย่อมเกิดการสูญเสียพลังงานเพื่อพยุง
ให้ตัวกลางลอยอยู่ได้อย่างอิสระและสามารถเกิดการเคลื่อนที่ของตัวกลาง การเคลื่อนที่ของ

Q	= อัตราการไหล	(ม. ³ /วท.)
P	= พลังงานที่กระจายให้น้ำ	วัตต์
v_t	= ความเร็วปลาย	(ม./วท.)
n	= ดัชนีของสมการ Richardson และ Zaki	
μ	= ความหนืดสัมบูรณ์	(กก./ม./วท.)

จากสมการ (27) จะเห็นว่า ค่าความเร็วแกรเดียนต์ จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประสิทธิผล ($\rho_s - \rho$) ความพรุนและค่าความเร็วปลาย (terminal velocity) นั้นย่อมหมายถึง ค่าความเร็วแกรเดียนต์จะขึ้นอยู่กับค่าขนาดของตัวกลางด้วย เพราะค่าความเร็วปลายขึ้นอยู่กับขนาดของตัวกลางและความหนาแน่นประสิทธิผล ตามสมการการตกตะกอนของ stoke

การค้นคว้าที่ผ่านมา

Kenneth J. Ives 1978 ทำการสัณฐานตะกอนของ polystyrene latex ขนาด 1 ไมครอน โดยกระบวนการเสมือนการไหล โดยใช้ PVC เป็นตัวกลาง โดยแปรค่าเวลากักเก็บจาก 1 นาที ถึง 25 นาที โดยการนำกลับมาเวียนอีก (Recycle) พบว่าเวลากักเก็บมีผลโดยตรงต่อขนาดของ polystyrene latex ที่รวมตัวกัน โดยเวลาการสัณฐานตะกอนที่ต่ำที่สุด คือ 10 นาที จะให้ขนาดของ polystyrene latex 8.5 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าขนาดที่เกิดจากเวลากักเก็บตัวอื่นๆ

AG Bhole, Jr Deshpomade and MT Deshmukh (1975) ทำการศึกษาเครื่องสัณฐานตะกอนโดยใช้ทรายความหนาแน่น 2.68 ก./ลบ.ซม. ตัวกลางทรายขนาด 0.30 ถึง 0.35 มม. 0.50 ถึง 0.60 มม. 1.00 ถึง 1.2 มม. ความสูงของตัวกลางสภาพหนึ่ง 22 ซม. โดยแปรค่าการขยายตัว 0%, 3%, 6% และ 12% พบว่า ที่ค่าการขยายตัวต่ำกว่า 12% เกิดการอุดตันในชั้นตัวกลาง และพบว่า ตัวกลางขนาดเล็กให้ค่าความขุ่นที่ผลิตต่ำที่สุด และแนะนำว่า น่าจะลองทดลองกับตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 2.68 ก./ลบ.ซม.