

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตกตะกอน (Coagulation or Flocculation)

กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) คือ กระบวนการในการทำให้คอลลอยด์หลาย ๆ อนุภาคจับตัวเป็นฟlocs ซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่าย กระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอน คือ การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่มากระแทกกันมากที่สุด (Transport of colloidal particles)

กระบวนการฟลอคคูเลชัน (Flocculation) คือ การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพหรือยังก็ได้ เกิดการสัมผัสและเกาะติดกันเป็นฟlocs

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ หรืออาจเรียกว่า ฟลอคคูแลนต์ (flocculant) สารเคมีที่ช่วยให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulation aid) หรือ ฟลอคคูแลนต์เอ็ด (flocculant aid) ซึ่งจะใช้เพียงลำพังไม่ได้

โดยธรรมชาติ สิ่งเจือปนที่อยู่ในน้ำอาจเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โดยแบ่งตามขนาดได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. อนุภาคแขวนลอย (Suspended Particles) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.001 มิลลิเมตร ขึ้นไป
2. อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particles) มีขนาดตั้งแต่ 0.000001-0.001 มิลลิเมตร ซึ่งอาจเป็นพวกไวรัส แบคทีเรีย สาหร่าย หรือตะกอนดิน

การที่อนุภาคคอลลอยด์และสารแขวนลอยอื่น ๆ สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานาน ๆ โดยไม่ตกตะกอน เรียกว่ามีเสถียรภาพ ดังนั้นการทำให้ตกตะกอนก็คือ การทำลายเสถียรภาพนั้น ๆ เมื่อไม่มีเสถียรภาพคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยก็จะรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ การที่อนุภาคมีเสถียรภาพและอยู่ในน้ำได้โดยไม่มีการรวมตัวกัน เพราะจะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้า คือมีประจุไฟฟ้าเหมือนกัน ก็จะทำให้เกิดการผลักกัน จึงทำให้เกิดเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ลอยอยู่ในน้ำ ดังนั้นการใส่สารเคมีที่มีประจุบวกลงในน้ำที่มีอนุภาคที่เป็นประจุลบ จึงทำให้อนุภาคถูกทำลาย เสถียรภาพที่ประจุไฟฟ้าเป็นกลาง และสามารถรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นและตกตะกอนได้ (สุขสม แฉ่งสว่าง, 2546)

น้ำมีความขุ่นเนื่องจากมีอนุภาคเล็ก ๆ แขนงลอยอยู่ อนุภาคเล็ก ๆ เหล่านี้จะจมตัวลงในน้ำได้ช้า อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะจมตัวได้เร็วกว่าอนุภาคขนาดเล็กหลายเท่าตัว ความเร็วในการจมตัวของอนุภาคเป็นไปตาม Stoke 's Law

$$V_t = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu}$$

เมื่อ V_t คือความเร็วในการจมตัวของอนุภาค (ซม./วินาที)

g คือความเร่งของแรงดึงดูดของโลก (ซม./วินาที²)

ρ_s คือความหนาแน่นของอนุภาค (กรัม/ซม.³)

ρ คือความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/ซม.³)

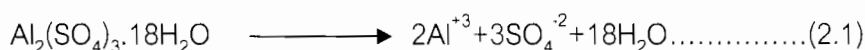
μ คือความหนืดของน้ำ (กรัม/ซม.วินาที)

d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ซม.)

จะเห็นว่าความเร็วในการจมตัวของอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคกับน้ำ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะจมตัวได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะจมตัวได้อย่างช้า ๆ ดังนั้นในการกำจัดอนุภาคละเอียดที่แขวนลอยออกจากน้ำ ทำได้โดยทำให้อนุภาคเล็ก ๆ เกาะกันเป็นก้อนที่โตขึ้น เพื่อทำให้อนุภาคจมตัวลงได้เร็วขึ้นทำให้ได้น้ำใสในระยะเวลาอันสั้น กระบวนการที่นำมาใช้เพื่อการนี้เรียกว่า กระบวนการรวมตัวของตะกอน (Flocculation) และกลุ่มของอนุภาคที่มาเกาะกันเรียกว่า ฟลอค (Floc) (เน่งน้อย ศรีสุวรรณ, 2539)

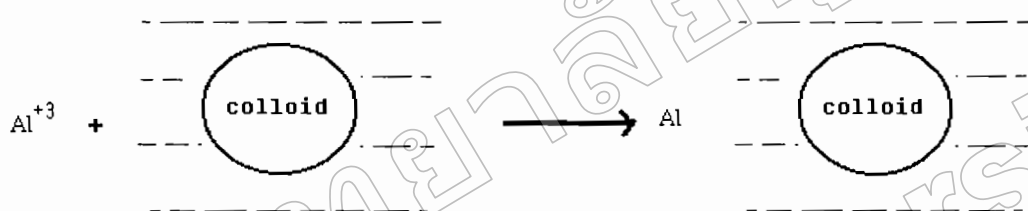
อนุภาคที่เป็นตะกอนแขวนลอยและอนุภาคคอลลอยด์ไม่สามารถจมตัวได้ด้วยน้ำหนักของมันเอง เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้าลบ เมื่อแต่ละอนุภาคมาพบกันก็จะผลักรากันจึงไม่สามารถรวมตัวกันได้ ดังนั้นการทำให้อนุภาคเล็ก ๆ เหล่านี้รวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ จึงต้องเติมสารเคมีเพื่อทำลายประจุลบให้ตะกอนจับตัวกันได้ การทำให้อนุภาคเล็กจับตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ด้วยสารเคมีเรียกว่า chemical coagulation สารเคมีที่ใช้เรียกว่า coagulant หรือ flocculant ที่รู้จักกันดีได้แก่สารส้ม (alum) ปูนขาวและเพอร์ริกคลอไรด์ ซึ่งเป็นสารประกอบของโลหะหนักที่ละลายตัวในน้ำได้อนุภาคของโลหะที่มีประจุบวกสูง เช่น Al^{+3} เป็นต้น

เมื่อเติมสารละลายสารส้มลงไปในน้ำ สารส้มจะสลายตัวให้ Al^{+3} ดังสมการที่ 2.1



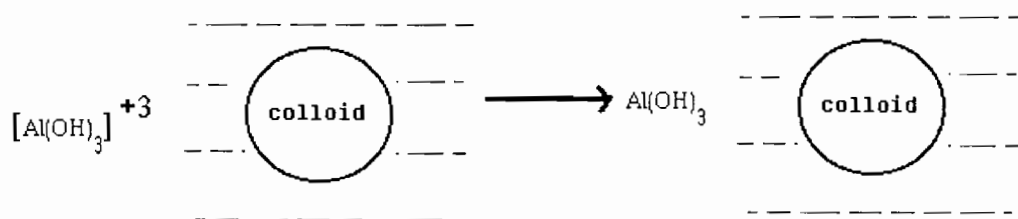
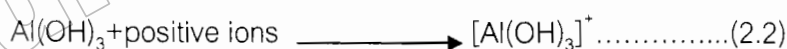
Al^{+3} จะรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์จน

อนุภาคคอลลอยด์สามารถจับกันเป็นอนุภาคใหญ่ได้ แสดงได้ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2-1 การรวมตัวของ Al^{+3} กับอนุภาคคอลลอยด์

นอกจากนี้ Al^{+3} ยังทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็น $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นตะกอนเล็ก ๆ สามารถรวมตัวกับอนุภาคอื่น ๆ ที่มีประจุบวกเกิดเป็นตะกอนที่มีประจุบวกไปจับกับอนุภาคคอลลอยด์กลายเป็นตะกอนใหญ่ได้เช่นกัน ดังสมการที่ 2.2 และแสดงได้ดังภาพที่ 2-2

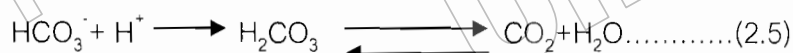


ภาพที่ 2-2 การจับอนุภาคคอลลอยด์เป็นตะกอนขนาดใหญ่

$[Al(OH)_3]^+$ ที่เหลืออยู่ก็จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคลบอื่นเช่น SO_4^{2-} ดังสมการที่ 2.3



เนื่องจาก Al^{3+} มีประสิทธิภาพสูงกว่า $[Al(OH)_3]^+$ ในการทำลายประจุไฟฟ้าลบของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติมสารละลายสารส้มลงไปจะต้องผสมอย่างรวดเร็วโดยทันที เมื่ออนุภาคคอลลอยด์เริ่มจับตัวกันเป็นก้อนเล็ก ๆ ที่มองเห็นได้ชัด จะต้องเปลี่ยนจากการผสมอย่างรวดเร็วมาเป็นการกวนอย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้ตะกอนเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นแตกตัว และเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสจับกันเป็นตะกอนใหญ่โดยทั่วไปเวลาที่ใช้ในการผสมเร็วประมาณ 3 นาที และเวลาในการผสมช้าประมาณ 12 นาที ตะกอนที่เกิดขึ้นแยกออกได้โดยการตกตะกอนหรือโดยการทำให้ลอย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.4 และ 2.5



เมื่อสารส้มละลายน้ำจะเกิด H^+ ขึ้น ซึ่งทำให้น้ำมีสภาพเป็นกรดคือมีค่าพีเอชลดลง สารประกอบไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่มีอยู่ในน้ำจะช่วยไม่ให้พีเอชลดลงโดยทำปฏิกิริยากับ H^+ (เสริมพลวัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2518)

2.1.1 คุณสมบัติของอนุภาคแขวนลอย

อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำจะมีชั้นของอิออนเคลือบอยู่รอบๆ ผิวของอนุภาคเรียกว่า Electrical Double Layer ถ้าหากอนุภาคชนิดหนึ่งมีอิออนบวกมากกว่าอิออนลบ อนุภาคนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ถ้ามีอิออนลบมากกว่าอิออนบวก อนุภาคนั้นจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของอิออนบวก และอิออนลบที่ปะปนอยู่ในน้ำ (H^+ และ OH^-) หรือค่าพีเอชนั่นเอง ที่เป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าและเครื่องหมายของศักย์ไฟฟ้า

2.1.2 แรงระหว่างอนุภาคแขวนลอยในของไหล

อนุภาคในน้ำตามธรรมชาติจะมีชั้นประจุไฟฟ้าอยู่รอบ ๆ ที่ผิวของอนุภาค (Electrical Double Layer) ทำให้มีแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตซึ่งกันและกัน ในขณะที่เดียวกันอนุภาคที่อยู่ใกล้กันจะมีแรงดึงดูดระหว่างกัน เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมากขึ้นทั้งแรงผลักและแรงดูด

จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นโอกาสที่อนุภาคจะจับติดกันหรือผลักรออกจากกันจึงขึ้นอยู่กับว่าแรงดึงดูดหรือแรงผลักรอย่างไหนจะมากกว่ากัน

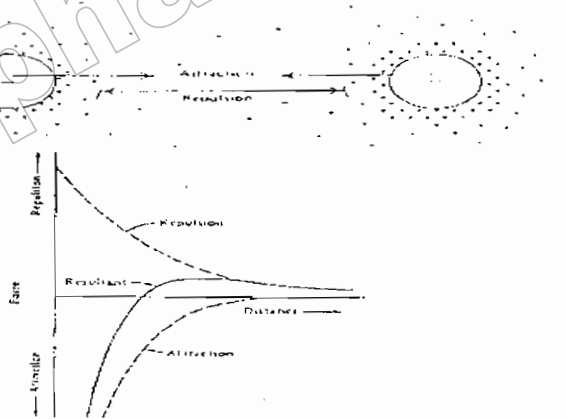
2.1.3 กลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กลไกของกระบวนการโคแอกกูเลชันประกอบด้วย 2 ขั้นตอนคือ

2.1.3.1 การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์

คอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอนในเวลาสั้น ๆ เสถียรภาพของคอลลอยด์นั้นขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักรต้องสูงกว่าแรงดึงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดึงดูดมีมากกว่าแรงผลักร อนุภาคคอลลอยด์ก็จะสามารถจับตัวกันเป็นก้อนฟลอค ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดไป (อัศวิน กิตติชัชวาล, 2539)

แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van Der Waal force ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ หรือ ซีตาโพเทนเชียล (Zeta Potential) ผลลัพธ์ของแรงทั้ง 2 ชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาค แสดงได้ดังภาพที่ 2-3 แรงดูดจะมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักรเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมาก ๆ แต่โดยปกติแล้วแรงผลักรซึ่งเกิดจากประจุของอนุภาคจะไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่าง ๆ เข้ามาใกล้กันจนแรงดูดสามารถดึงดูดอนุภาคเข้าหากันได้



ภาพที่ 2-3 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่าง ๆ (อัศวิน กิตติชัชวาล, 2539)

การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ

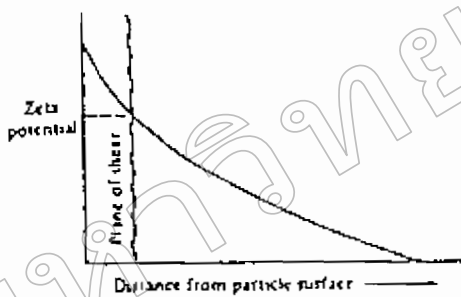
1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer) กลไกนี้เป็นการทำลาย

เสถียรภาพของคอลลอยด์โดยลดค่าซีตาโพเทนเชียล เนื่องจากการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรง

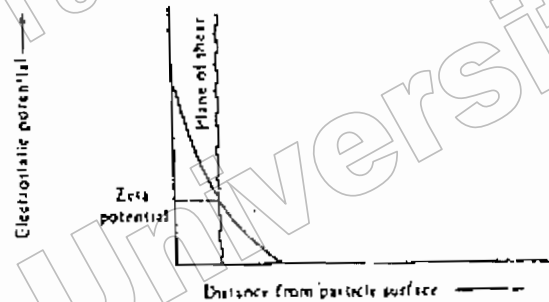
ข้ามกันกับประจุของอนุภาค ผลที่ได้ก็คือชั้นกระจายมีความหนาลดลงทำให้ซีตาโพเทนเชียลลดลงด้วย แสดงได้ดังภาพที่ 2-4

2. การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า (Adsorption & Charge

Neutralization) กลไกนี้เกิดขึ้นโดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์และสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ แสดงได้ดังภาพที่ 2-5 เช่นในกรณีที่อนุภาคมีประจุไฟฟ้าลบ การเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าบวกลงไปจะทำให้อนุภาคมีประจุไฟฟ้าเป็นกลาง หากการเติมสารเคมีเป็นไปอย่างเหมาะสม ก็จะทำให้อนุภาคถูกสะเทินทางประจุไฟฟ้า กลายเป็นกลาง ซึ่งทำให้อนุภาคไม่เกิดการผลึกกันและสามารถรวมตัวกันได้

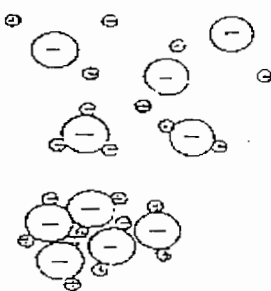


ก) ก่อนการเติมไอออน

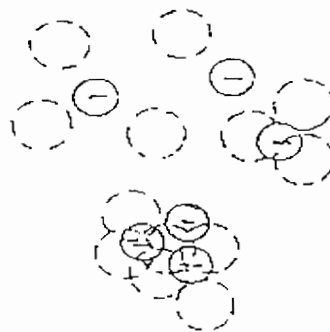


ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว

ภาพที่ 2-4 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (อัศวิน กิตติชัชวาล, 2539)



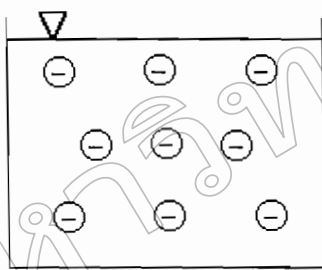
ก) กลไกการดูดติดและทำลายเสถียรภาพ



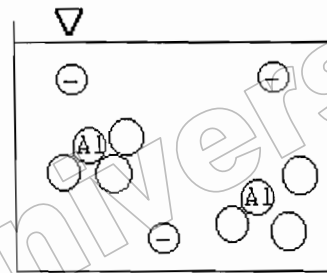
ข) กลไกแบบจับอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ

ภาพที่ 2-5 ลักษณะการเกิดโคแอกกูเลชันโดยกลไกการดูดติดและทำลายเสถียรภาพและกลไกแบบจับอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (อัศวิน กิตติชัชวาล, 2539)

3. การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบ (Sweep Coagulation) กลไกนี้เกิดขึ้นได้โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งมีลักษณะเหนียวที่สามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ได้ ทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น กลไกนี้เกิดขึ้นในทางปฏิบัติค่อนข้างยาก เพราะการเติมสารเคมีให้เกิดการสะเทินทางประจุไฟฟ้าของอนุภาคพอลิเมอร์ได้ค่อนข้างยาก โดยส่วนใหญ่จะเติมสารเคมีจนเกินจุดสะเทินทางประจุไฟฟ้า ตัวอย่างเช่นการเติมสารส้ม (Alum , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ลงในน้ำเพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ แสดงได้ดังภาพที่ 2.6



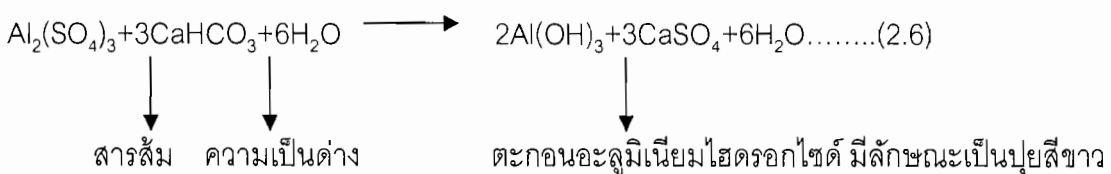
ก) ก่อนการเติมสารตกตะกอน



ข) เริ่มการเติมสารตกตะกอน

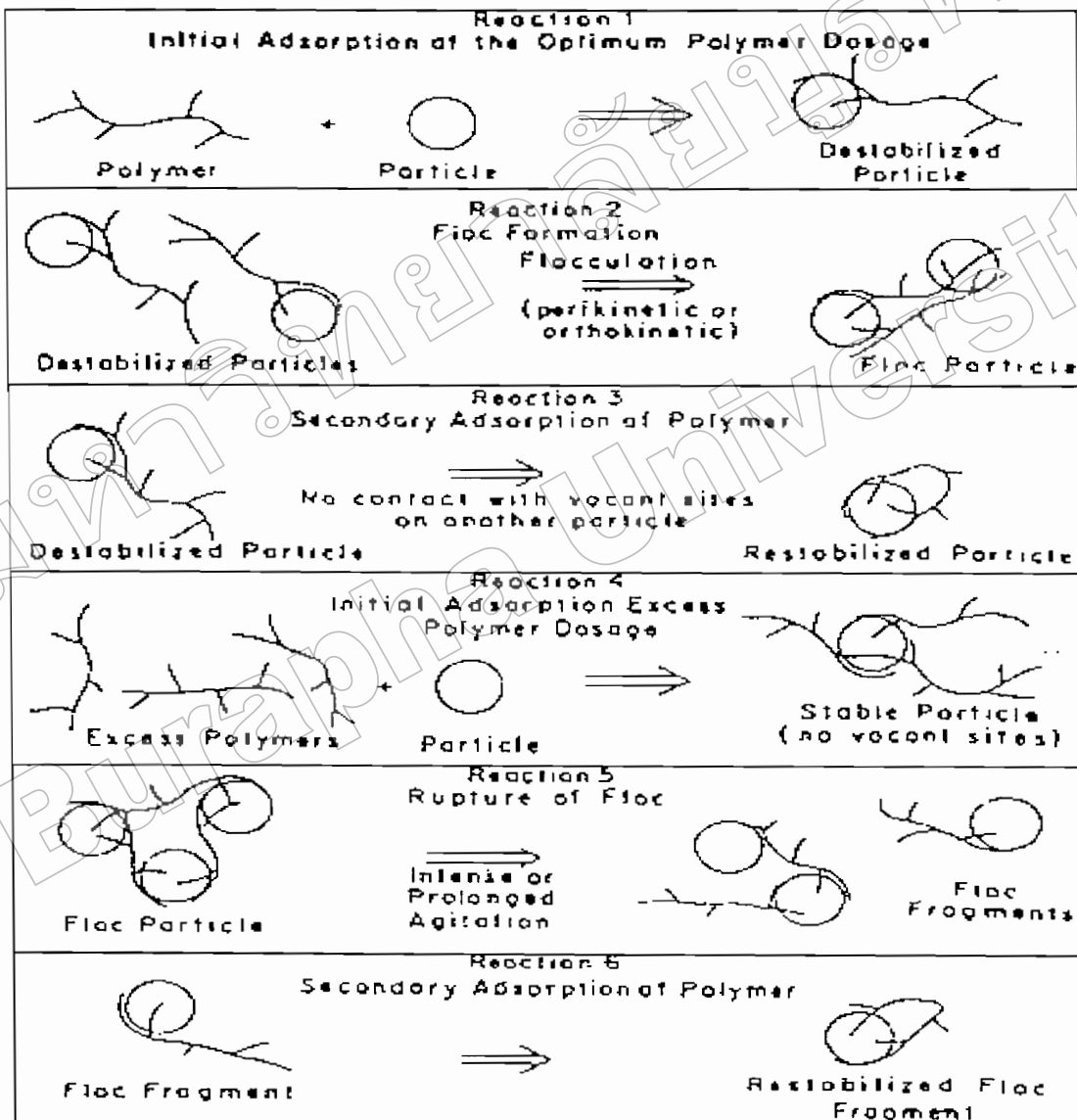
ภาพที่ 2-6 อนุภาคตะกอนก่อนเติม และเริ่มเติมสารตกตะกอน (สุขสม สว่างแจ้ง, 2546)

เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำปริมาณมากขึ้นไปเรื่อย ๆ จนเกินจุดสะเทินทางประจุไฟฟ้าของอนุภาค ปริมาณอนุมูลนิยมไฮดรอกไซด์ที่เกิดการทำปฏิกิริยากับความเป็นด่าง (Alkalinity) ในน้ำเกิดเป็นตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังสมการที่ 2.6



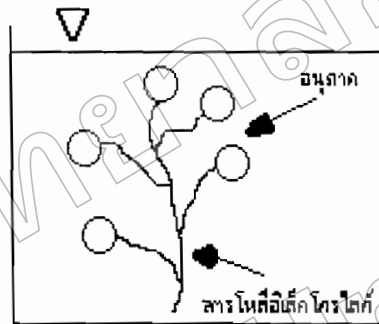
ตะกอน $\text{Al}(\text{OH})_3$ มีสภาพเป็นกลางและเป็นปุย จะสามารถดูดจับตะกอนที่มีประจุได้ทั้งในน้ำ และทำให้เกิดการตกตะกอน ตะกอน $\text{Al}(\text{OH})_3$ สามารถรวมตัวกันเองทำให้มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ (สุขสม แฉ่งสว่าง, 2546)

กระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารลิ่มเป็นโคแอกกูแลนต์ในระบบผลิตน้ำประปาที่พบอยู่เสมอเป็นตัวอย่างของกลไกชนิดนี้ แสดงได้ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 กลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แบบเชื่อมต่อด้วยโพลิเมอร์ (อัศวิน กิตติขัณฑล, 2539)

4. การใช้สารพอลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging) สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารพอลิเมอร์มีประจุไฟฟ้าประจำตัว เรียกว่า สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีคุณลักษณะพิเศษคือมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งก้านสาขา ซึ่งในกรณีที่มีประจุไฟฟ้า ก็จะมีประจุไฟฟ้าตามกิ่งก้านของโครงสร้าง ทำให้มีคุณสมบัติสะท้อนประจุไฟฟ้าดูดซับ ทำลายเสถียรภาพของอนุภาคได้มากกว่า สารเคมีจำพวกสารอนินทรีย์ เช่น สารส้ม แสดงได้ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การดูดซับอนุภาคของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ (สุขสม แฉ่งสว่าง, 2546)

การทำลายเสถียรภาพด้วยการใช้พอลิเมอร์เกิดจากการที่โมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถเกาะติดอยู่บนอนุภาคได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลมาจากประจุที่แตกต่างกันหรือแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของพอลิเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์ อนุภาคที่มีพอลิเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระของพอลิเมอร์เหลืออยู่สำหรับที่จะเกาะติดอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (Destabilized particles) และเมื่ออนุภากดังกล่าวไปจับตัวกับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีพอลิเมอร์เป็นตัวเชื่อม ก็จะได้ฟลอคที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย แต่ถ้ามีการเติมพอลิเมอร์มากเกินไป พอลิเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคจนกระทั่งไม่มีที่ว่างสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของพอลิเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่

2.1.3.2 การทำให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นง่ายกว่าเดิม ดังนั้นเมื่ออนุภาคมาสัมผัสกันก็จะเกาะติดแน่นเป็นก้อนฟ

ล้อยค (อัศวิน กิตติขีวาล, 2539) ปรากฏการณ์การสร้างสัมผัสที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกัน เช่น

2.1.3.2.1 เพอริไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Perikinetic flocculation) เป็นกลไกที่เกิดจากการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบ เป็นไปเองตามธรรมชาติ เป็นการเคลื่อนที่แบบอาศัยความร้อน เป็นกระบวนการที่ไม่ใช้พลังงานจากภายนอก แต่ใช้ระยะเวลานานมาก สามารถสร้างสารสัมผัสกับคอลลอยด์ขนาดเล็กกว่า 0.1-1 ไมครอน

2.1.3.2.2 ออร์โธไคเนติก ฟลอคคูเลชัน (Orthokinetic flocculation) เป็นกลไกที่ทำให้เกิดความแรงต่างระดับของอนุภาค เช่น อาศัยการกวนช้า ๆ หรือบังคับให้น้ำไหลด้วยความเร็วที่เปลี่ยนแปลง เป็นเหตุให้อนุภาคต่าง ๆ มีอัตราการเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน จึงมีการสัมผัสกันเกิดขึ้น

กระบวนการโคแอกกูเลชัน มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ขั้นตอนเพื่อให้สารเคมีกระจายไปในน้ำอย่างทั่วถึงและเกิดตะกอนได้ดี คือ

1. การกวนเร็ว (Flash Mixing or Rapid Mixing) การกวนเร็วมีหน้าที่ดังนี้

- ทำหน้าที่กระจายสารเคมี ให้ผสมลงในน้ำอย่างทั่วถึงโดยใช้ระยะเวลาที่น้อยที่สุด

ที่สุด

- เพื่อทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาค เพื่อให้เกิดการรวมเป็น

ตะกอนเกิดขึ้น

เมื่อน้ำที่มีอนุภาคปะปนอยู่ผสมกับสารเคมีโดยผ่านการกวนเร็ว อนุภาคขนาดเล็ก เช่น คอลลอยด์จะก่อตัวเป็นตะกอนขนาดเล็กซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าขนาดเท่าปลายเข็มหมุด (Pin Floc) ตะกอนขนาดเล็กนี้จะเป็นจุดเริ่มต้นในการก่อตัวของตะกอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในกระบวนการสร้างตะกอนต่อไป

ขั้นตอนการกวนเร็วมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะหากสารเคมีที่เติมลงไปไม่มีการกระจายตัวอย่างทั่วถึงในน้ำ กระบวนการการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจะไม่มีประสิทธิภาพและสารเคมีที่เติมลงไปนั้น แทนที่จะทำปฏิกิริยากับอนุภาคแต่อาจทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของน้ำแทน เช่น สารส้มจะทำปฏิกิริยากับความเป็นด่างเกิดเป็นตะกอน ทำให้ต้องใช้สารเคมีในการทำการสร้างตะกอนปริมาณมากขึ้นกว่าเดิม

อุปกรณ์กวนเร็วที่ใช้ระบบผลิตน้ำประปาและระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อให้สารเคมีกระจายได้อย่างทั่วถึง มีอยู่หลายแบบ เช่น การออกแบบระบบโครงสร้างของระบบบำบัด ทำให้น้ำไหลลงจากที่สูงสู่ที่ต่ำอย่างรวดเร็ว หรือทำให้น้ำเปลี่ยนทิศทางไปมา หรืออาจใช้อุปกรณ์ทางเครื่องกล เช่น ใบพัดกวนหรือใช้ท่อผสม (Static Mixer)

การทำให้น้ำเกิดการปั่นป่วน ได้มีการกำหนดความหมายเพื่อจะได้นำมาใช้ ในการออกแบบการกวนเร็ว โดยเรียกความปั่นป่วนของน้ำว่า ความปั่นป่วนเกรเดียน (Velocity Gradient) โดยใช้สัญลักษณ์แทนว่า G โดยที่ Camp และ Stein ได้เสนอสมการเพื่อการ คำนวณค่า G จากพลังงานที่ทำให้น้ำเกิดการปั่นป่วนดังสมการที่ 2.7

$$G = \frac{P}{\mu V} \dots\dots\dots (2.7)$$

โดยที่ G = Velocity Gradient หน่วยเป็น sec^{-1}

P = พลังงานที่ใช้ทำให้น้ำปั่นป่วนหน่วยเป็น watt.m/sec

μ = ความหนืดของน้ำ หน่วยเป็น N.sec/m^2

V = ปริมาตรของน้ำในช่องกวนเร็ว หน่วยเป็น m^3

2. การกวนช้า (Flocculation) จุดมุ่งหมายของการกวนช้า จำแนกได้ดังนี้คือ

- เป็นระบบรวมตะกอนหรือสमानตะกอนที่ถูกทำลายเสียสภาพจาก

ขั้นตอนการกวนเร็วแล้ว

- เป็นการสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำ เพื่อให้อนุภาคที่ถูกทำลาย

เสียสภาพและเกิดเป็นตะกอนขนาดเล็กแล้วมีการเคลื่อนที่และมีโอกาสสัมผัสกัน เกิดการเกาะติด ก่อตัวให้มีน้ำหนัก และขนาดเพิ่มขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) การควบคุมการลดหลั่นของของ ความปั่นป่วนเกรเดียน (G) จากมากลงมาน้อย เพื่อทำให้ฟล็อกเกิดการรวมตัวได้ดี และไม่ทำให้เกิด การตกตะกอนไปเสียก่อนหรือเกิดการแตกตัวของฟล็อก เนื่องจากความปั่นป่วนมากเกินไป Camp ได้ทำการศึกษาดังกวนช้า (Flocculation Basin) หลาย ๆ ประเภทซึ่งสามารถใช้งานได้ค่อนข้างดี และได้กำหนดโดยใช้ค่า GT เป็นตัวแทนว่า GT ที่เหมาะสมสำหรับถังกวนช้าควรอยู่ในช่วง

$2 \times 10^4 - 2 \times 10^5$ โดยที่ค่า G อยู่ในช่วง $20 - 70 \text{ sec}^{-1}$ และ T คือระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ (Detention time) ในช่วงถังกวนช้านั้น ๆ มีหน่วยเป็นวินาที

ประสิทธิภาพของการรวมตัวของตะกอนในกระบวนการโคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านเคมีและฟิสิกส์ดังนี้

1. ปัจจัยทางด้านเคมี

1.1 สารสร้างตะกอน (Coagulant) การเลือกชนิดของสารเคมีต้องมีการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาชนิดและปริมาณที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดีที่สุด ได้แก่

1.1.1 เกลือของโลหะ (Coagulant)

เกลือของโลหะที่ใช้ในกระบวนการรวมตัวของตะกอนได้แก่ สารส้ม ปูนขาว เฟอร์ริกคลอไรด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต สารพวกเกลือของโลหะจะไปลดความหนาของชั้นประจุรอบ ๆ อนุภาค (Electrical Double Layer Compression) ทำให้ความหนาของชั้นประจุบางลงหรือยุบหายไป มีผลทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคลดลง อนุภาคจึงยึดติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ เกลือของโลหะที่มีวาเลนซ์สูงจะให้ผลดีกว่าหรือใช้ปริมาณน้อยกว่าเกลือของโลหะที่มีวาเลนซ์ต่ำ

1.1.2 สารพอลิเมอร์ (Polymer)

พอลิเมอร์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีลักษณะเป็นโซ่ยาว อาจมีกิ่งก้านสาขาบ้างแล้วแต่ชนิดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะจับยึดอนุภาคหลายอนุภาคเข้าด้วยกัน ด้วยแขนโซ่ที่ยาวนั้นคล้าย ๆ กับสะพานยึด ทำให้เกิดฟลอคเกาะกันอย่างหลวม ๆ ด้วยโครงสร้างแบบสามมิติ โดยไม่ต้องคำนึงว่าอนุภาคมีแรงผลักระหว่างประจุมากน้อยเพียงใด

นอกจากนั้นการยึดของกลุ่มอนุภาคค่อนข้างแข็งแรง ยากที่จะแตกหลุด เนื่องจากควรถ่ายเทหรือขนส่งผ่านท่อ นอกจากบางอนุภาคที่จับยึดกันอย่างหลวม ๆ ในส่วนนอกของกลุ่มอนุภาคเท่านั้น การเกิดฟลอคโดยการใส่สารพอลิเมอร์นั้นจะได้ฟลอคที่โตขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระหว่างการกวน ขนาดของฟลอคจะถูกควบคุมโดยสมดุลระหว่างอัตราการโตกับอัตราการแตกจากแรงเฉือนเนื่องจากการกวน ขนาดของฟลอคและขนาดของอัตราการจมตัวของตะกอนขึ้นอยู่กับความแรงของการกวน ขนาดของฟลอคและอัตราในการใส่สารพอลิเมอร์ ขนาดของฟลอคและอัตราการการจมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มความแรงในการกวน นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณพอลิเมอร์ที่จับกับฟลอคขนาดใหญ่จะมีน้อยกว่าฟลอคขนาดเล็ก การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของขนาดฟลอคจะลดโอกาสในการจับพอลิเมอร์กับผิวของฟลอคเพราะฟลอคที่โตขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวลดลง และอัตราการจมตัวและขนาดของฟลอคจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่จะใช้ในกระบวนการรวมตะกอน

1.2 พีเอช (pH) ค่าพีเอชในน้ำจะมีผลต่อการรวมตัวของตะกอนเพราะค่าพีเอช (H^+, OH^-) ในน้ำจะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคให้เป็นบวกหรือเป็นลบขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนบวกและไอออนลบที่ปะปนอยู่ในน้ำ การปรับสภาพความเป็นกรดต่างของน้ำให้ได้ค่าพีเอชที่อนุภาคมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวที่น้อยที่สุด หรือไม่มีเลย (Point of Zero Charge) ทำให้แรงผลักระหว่างอนุภาคมีน้อยที่สุด อนุภาคจึงถูกดึงดูดเข้ามาใกล้และเกาะติดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ในที่สุด

1.3 อุณหภูมิ (Temperature, °C) อุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์เคมีต่ำลง และระยะเวลาในการเกิดฟล็อกนานขึ้นหรือต้องใช้ปริมาณสารสร้างตะกอนเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้อนุภาคมีการแพร่ได้มากขึ้น อนุภาคจึงมีโอกาสชนกันมากขึ้น ประสิทธิภาพของการรวมตัวของตะกอนจึงดีขึ้นด้วย อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วงปกติ และอุณหภูมิของน้ำที่ไม่เปลี่ยนแปลงจึงไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ต่อการรวมตัวของตะกอน

2. ปัจจัยทางด้านฟิสิกส์

2.1 การชนกันระหว่าง ปกติอนุภาคเล็ก ๆ (10 ไมครอนลงไป) น้ำจะเคลื่อนไหวโดยตัวเองเนื่องจาก Brownian Movement ซึ่งทำให้ออกาสชนกันได้แต่ถ้าอนุภาคเล็กมาก (เล็กกว่า 1 ไมครอน) โอกาสในการชนกันมีน้อยมาก อัตราการยึดติดกันมีน้อยมากจึงต้องอาศัยการกวนเพื่อเร่งให้อนุภาควิ่งชนกันบ่อยและแรงขึ้นจึงเป็นผลให้มีการยึดติดกันระหว่างอนุภาคเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามการกวนแรงเกินไป แรงน้ำจะดึงอนุภาคที่เกาะติดกันทำให้อัตราการเกิดการรวมตัวของตะกอนน้อยลง การกวนที่มีความแรงน้อยเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้น้ำขุ่นจากการแตกตัวของฟล็อก

2.2 ความเข้มข้นของอนุภาคในสารแขวนลอย ความเข้มข้นของอนุภาคในสารแขวนลอยมีความสำคัญต่อมีความสำคัญต่อการรวมตัวของตะกอนและการจมตัวของตะกอน ในน้ำที่มีความเข้มข้นของอนุภาคมากจะทำให้เกิดการรวมตัวของตะกอนได้ดี เพราะอนุภาคอยู่ชิดกันมีโอกาสในการชนกันและติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ในขณะที่เดียวกันในน้ำที่มีอนุภาคแขวนลอยอยู่น้อย ขนาดของฟล็อกและอัตราการจมตัวของฟล็อกจะต่ำไปด้วย เนื่องจากโอกาสในการชนกันและเกาะติดกันของอนุภาคมีน้อย

2.3 ความเร็วในการจมตัวของอนุภาค (Floc Settling Rate) การไหลของน้ำขึ้นสู่ปากถังมีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำล้นมาก โดยที่อนุภาคต้องมีขนาดโตพอที่จะจมตัวได้เร็วกว่า น้ำที่ไหลสวนขึ้นไป มิฉะนั้นอนุภากดังกล่าวจะถูกน้ำพัดพาขึ้นไปกับน้ำล้นด้วย ยังผลให้น้ำล้นกลับขุ่นขึ้นมาอีก

2.4 อัตราการเติมสารสร้างตะกอน มีความสำคัญต่อคุณภาพน้ำขึ้นโดยเฉพาะ การเติมสารพอลิเมอร์ หากเติมสารพอลิเมอร์ในอัตราที่เร็วขึ้นจะได้กลุ่มอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและจมน้ำได้เร็วมากแต่น้ำที่ใสได้น้อยลง นอกจากนี้อัตราการเติมสารพอลิเมอร์กับการกวนควรมีความสัมพันธ์กัน เพราะการกวนต่อไปอีกหลังหยุดปั๊มพอลิเมอร์ ทำให้อนุภาคตามขอบฟุ้งออก แดกหลุดออกมาทำให้น้ำที่ใสแล้วขุ่นขึ้นมาอีก (แน่น้อย ศิริสุวรรณ, 2539)

2.2 ไดอะตอม (Diatom)

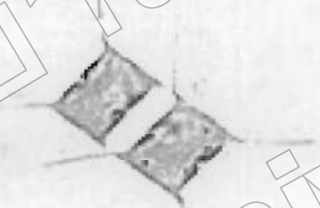
ไดอะตอมส่วนใหญ่เป็นสาหร่ายเซลล์เดี่ยว ที่อาจพบในลักษณะที่รวมกันเป็นกลุ่มเซลล์ หรือเป็นเส้นสาย (กาญจนาภรณ์ ลิ้มโนมนต์, 2527) เซลล์ของไดอะตอมประกอบด้วยเปลือกมีซิลิกา (silica) เป็นองค์ประกอบ ส่วนใหญ่มีสีน้ำตาลซึ่งเกิดจากรงควัตถุชื่อไดอะโตมิน (diatomin) ที่อยู่ภายในคลอโรพลาสต์ โดยรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงได้แก่ คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) แคโรทีนอยด์ (carotenoid) ไดอะโตแซนธิน (diatoxanthin) ไดอะไดโนแซนธิน (diadinoxanthin) แซนโทฟิลล์ (xanthophyll) อาหารสะสมของไดอะตอมเป็นพวกหยดน้ำมันหรือไขมัน (สมถวิล จริตควร, 2540) สาหร่ายเซลล์เดี่ยวที่นำมาใช้เป็นอาหารของสัตว์น้ำวัยอ่อน แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. ใช้เป็นอาหารลูกกุ้ง ได้แก่ *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp., *Cyclotella nana*, *Phaeodactylum* sp., *Dunaliella* sp., *Gymnodium plandeus*, *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis* sp., *Nitzschia closterium*, *Isochrysis galbana*, *Rhizosolinia* sp., *Exuviella* sp. และ *Chlorella* sp.
2. ใช้เป็นอาหารลูกปลา ได้แก่ *Chlorella* sp. และ *Isochrysis galbana*
3. ใช้เป็นอาหารลูกหอย ได้แก่ *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp., *Cyclotella nana*, *Dunaliella* sp., *Gymnodium plandeus*, *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis* sp., *Nitzschia closterium*, *Isochrysis galbana*, *Monochrysis lutherii*, *Chamydomonas* sp. และ *Nanochloris* sp. (มุสดี ศิริพยัคฆ์, 2529)

ไดอะตอมที่นิยมนำมาอนุบาลสัตว์น้ำวัยอ่อนมีหลายชนิด เช่น *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros calcitrans*, *Navicula* sp. และ *Thalassiosira* sp. (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2540)

2.2.1 คีโตเซอรอส (*Chaetoceros calcitrans*)

Chaetoceros calcitrans จัดอยู่ใน Division Chromophyta Class Bacillariophyceae Order Biddulphiale (centricdiatom) Suborder Coscinopiscineae Family Chaetoceraceae Genus *Chaetoceros* (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542) เป็นไดอะตอมเซลล์เดี่ยว ๆ รูปทรงกระบอก ฝาเซลล์รูปรียาว 5-16 ไมครอน แบนหรือมนเล็กน้อยตรงกลางฝา รอยต่อของฝาเซลล์ส่วนที่ครอบซ้อนกัน (girdle bands) มักกว้างกว่า 1 ใน 3 ของความสูงของเซลล์ มีเส้นขน 4 เส้น ยาว 4-5 เท่าของความยาวของฝาเซลล์ เส้นขนยื่นออกจากมุมฝาเซลล์ทำมุมเป็นเส้นทแยงมุมกับเซลล์เมื่อดูทางด้านข้าง (สุนีย์ สุวภีพันธ์, 2527 อ้างจาก Takano, 1968) แสดงได้ดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 ลักษณะของ *Chaetoceros calcitrans* (ที่มา: www.csiro.au/image/marine-algae.jpg, 1 march 2005)

2.2.2 การเพาะเลี้ยงสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*

การเพาะเลี้ยงไดอะตอมชนิดนี้ให้ได้ปริมาณมากในเชิงเศรษฐกิจ สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเป็นสิ่งสำคัญ ปกติไดอะตอมต้องการอาหารที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ธาตุอาหารที่สำคัญคือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปตัสเซียม นอกจากนี้ยังต้องการสารอาหารที่มีปริมาณน้อยเช่น เหล็ก แมงกานีส รวมทั้งปัจจัยทางกายภาพเช่น แสง ความเค็ม อุณหภูมิ ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเจริญของ *Chaetoceros calcitrans* ซึ่ง *Chaetoceros calcitrans* สามารถทนต่ออุณหภูมิได้สูง แต่ไม่ควรเกิน 37 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตดีที่สุดในช่วง 20-30 องศาเซลเซียส ความเค็มที่เหมาะสมคือ 17-25 ส่วนในพัน อัตราการเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้าช่วงความเข้มแสงระหว่าง 500-10,000 ลักซ์ น้ำที่ใช้เลี้ยงจะต้องทำการฆ่าเชื้อพวกแบคทีเรียที่อาจปนมากับน้ำทะเลด้วยหม้อนึ่งความดัน (autoclave) นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเช่นเครื่องแก้วต่าง ๆ ต้องทำการฆ่าเชื้อให้เรียบร้อย โดยเครื่องแก้วขนาดน้อยกว่า 1 ลิตร ใช้เวลาฆ่าเชื้อประมาณ 15 นาที ถ้าความจุ

ของเครื่องแก้วมากกว่านี้ต้องใช้เวลาถึง 45 นาที นอกจากการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันแล้ว การฆ่าเชื้อด้วยคลอรีนหรือคลอโรกซ์เป็นอีกวิธีที่นิยม ความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ 1.0-2.0 ส่วนในล้านทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้วค่อยให้อากาศเพื่อกำจัดคลอรีนให้หมดไป ประมาณ 2-3 ชั่วโมง ก็จะสามารถนำน้ำทะเลไปใช้งานได้

ลัดดา วงศ์รัตน์ (2541, หน้า 37) รายงานว่า การเพาะเลี้ยง *Chaetoceros calcitrans* ในภาชนะความจุ 200 ลิตร อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ โดยการให้อากาศที่ผสม CO_2 เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ ในอัตรา 5 ลิตรต่อนาทีและเติมอาหาร ความหนาแน่นเริ่มต้นของไดอะตอม 1×10^6 เซลล์ต่อลิตร จะสามารถผลิตไดอะตอมที่มีความหนาแน่นถึง $28-30 \times 10^6$ เซลล์ต่อมิลลิลิตร ในเวลา 3-4 วัน ภาชนะที่ใช้เป็นรูปทรงกรวยสูง ใช้แสงสว่างแบบฟลูออเรสเซนต์

สุนีย์ สุวภีพันธ์ (2527) เก็บรักษาดีไดเซอรอสไว้ในตู้เย็นที่มีอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส และเก็บในภาชนะขนาด 1 ลิตร โดยใส่อาหารเลี้ยงเชื้อเพียง 700 มิลลิลิตร สามารถเก็บไว้ได้นาน 1 ปี โดยนำออกมาปรับแสงที่อุณหภูมิพอเหมาะทุก ๆ 3 เดือน

2.2.3 การลอยตัวในน้ำของแพลงก์ตอนพืช (ลัดดา วงศ์รัตน์, ม.ป.ป.)

การลอยตัวในน้ำของแพลงก์ตอนพืชขึ้นอยู่กับปัจจัยเช่น การสังเคราะห์แสงของเซลล์ขึ้นกับปริมาณแสง ดังนั้นแพลงก์ตอนต้องเคลื่อนไหวตลอดเวลาตลอด ไม่เช่นนั้นจะจมลงพื้น เซลล์จะลอยน้ำอยู่ในระดับที่มีแสงเพียงพอ ระยะเวลาในการปรับแสงเพียงพอต้องอาศัยกลไกการจมตัวลงสู่พื้นให้ช้าที่สุด การลอยตัวอาศัยแรงช่วยมีค่าเท่ากับน้ำหนักของน้ำที่มีค่าเท่ากับปริมาตรของเซลล์ลบด้วยน้ำหนักของเซลล์โดยใช้สูตรของ Smayda

$$F = gkd^3(p' - p)$$

โดย F คือแรงที่ช่วยให้เซลล์ลอยอยู่ในน้ำ

g คืออัตราเร็วที่เซลล์จมอยู่บนพื้น เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

kd^3 คือปริมาตรของเซลล์

p' คือความหนาแน่นของแพลงก์ตอนพืช

p คือความหนาแน่นของสารละลายซึ่งเซลล์อยู่

$(p' - p)$ คือความหนาแน่นที่มากเกินไป

การปรับตัวทางสรีระของความหนาแน่นภายในเซลล์

1. อาหารสะสมประเภทไขมัน ทำให้มีผนังหนา ลอยตัวในน้ำได้ดี
2. ช่องว่างที่มีอากาศ ประกอบด้วยไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่ เกิดจากเยื่อที่หุ้มช่องว่างเหล่านี้ฉีกขาดลงโดยความกดอากาศสูงจับปล้น ทำให้จมตัวลงสู่ทะเลทันที
3. การควบคุมองค์ประกอบออสโมนของของเหลวในเซลล์

2.3 ไคโตซาน

2.3.1 ไคติน (Chitin) และไคโตซาน (Chitosan)

2.3.1.1 ไคติน (Chitin)

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส (cellulose) พบได้โดยทั่วไปในสิ่งมีชีวิต บริเวณโครงสร้างแข็งภายนอก (exoskeleton) ของสัตว์ในไฟลัมอาร์โทรพอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคลาสครัสเตเชีย ได้แก่ กุ้ง ปู กุ้ง ตลอดจนพวกแมลง นอกจากนี้ยังพบในผนังเซลล์ของเห็ด รา ยีสต์อีกด้วย

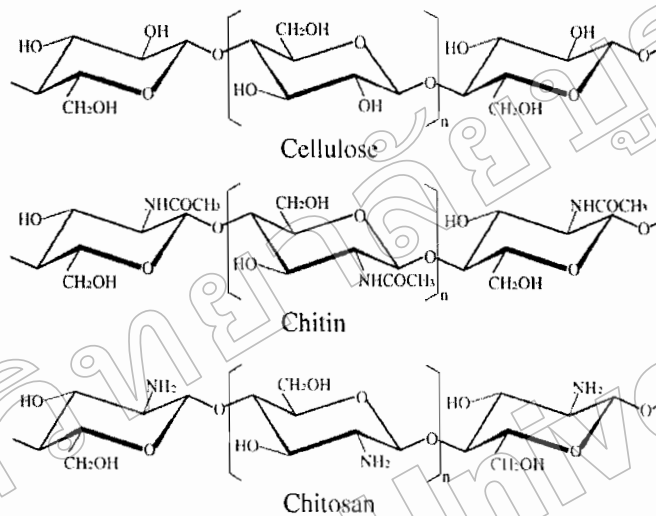
ไคตินมีสูตรโครงสร้างคล้ายคลึงกับเซลลูโลสต่างกันตรงที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 จะเป็นหมู่อะซิทามิโด (acetamido ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{CH}_3$)) ไคตินจึงเป็นพอลิเมอร์ของ N-acetylglucosamine นับพันหน่วย โดยไคตินที่พบในธรรมชาติจะมีบางหน่วยที่ไม่มีหมู่อะซิทิล (acetyl ($-\text{CO}-\text{CH}_3$)) และมีชื่อทางเคมีว่า poly- $\beta(1,4)$ -2-acamido-2-deoxy-D-glucose (เขาวภา ไหวพริบ, 2536)

ในธรรมชาติไคตินอยู่ในรูปของแข็ง มีคุณสมบัติละลายได้ในกรดอินทรีย์ เช่น กรดเกลือ กรดฟอสฟอริก กรดอินทรีย์เจือจาง แต่จะไม่ละลายในน้ำต่างเจือจาง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่น ๆ จึงนิยมใช้ไคตินในรูปของแข็งโดยตรง (พัชรนันท์ กิจสกุลไพศาล, 2542)

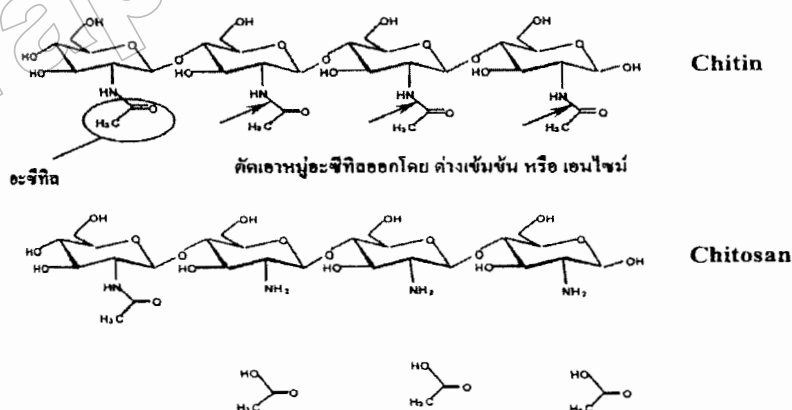
2.3.1.2 ไคโตซาน (Chitosan)

ไคโตซานเป็นสารพอลิเมอร์และเป็นอนุพันธ์ของไคตินที่ได้จากการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะซิทิล (Deacetylation) ออกจากสายของไคตินด้วยด่างเข้มข้น ทำให้โครงสร้างทางเคมีของไคตินเปลี่ยนไป โดยหมู่ acetamido ($\text{NH}-\text{CO}-\text{CH}_3$) เปลี่ยนเป็นหมู่อะมิโน (amino (NH_2)) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 ดังนั้นไคโตซาน คือ พอลิเมอร์ของ D-glucosamine (2-amino-2-deoxy-D-glucose) (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543) มีชื่อทางเคมีว่า poly- $\beta(1,4)$ -2-amino-2-deoxy-D-glucose (เขาวภา ไหวพริบ, 2536) ไคโตซานนั้นพบครั้งแรกโดย Rouget ในปี 1859 แสดงได้ดังภาพที่ 2-10 และภาพที่ 2-11 ตามลำดับ

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีประจุบวก สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด สารละลายมีลักษณะขุ่นหนืด และมีความใส สามารถขึ้นรูปได้หลายแบบ เช่น เส้นใย เป็นเม็ด เป็นแผ่นบาง ใช้ทำสารเคลือบผิว เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นสารช่วยตกตะกอนในการบำบัดน้ำเสีย ทำให้น้ำผลไม้ใส สามารถกำจัดโลหะหนัก ตลอดจนการตรึงเอนไซม์ (พัชรนันท์ กิจสกุลไพศาล, 2542)



ภาพที่ 2-10 โครงสร้างทางเคมีของ Cellulose, Chitin and Chitosan (ที่มา: Ravindra, 1998)



ภาพที่ 2-11 ระดับการกำจัดหมู่อะซีติลในโครงสร้างของไคติน (ที่มา: จิราภรณ์ เชาวลิตสุภูมิ มาวาสิ, 2544)

จากการหายไปของหมู่อะซิติก ทำให้ไคโตซานมีส่วนของโมเลกุลที่แอคทีฟ และพร้อมที่จะทำปฏิกิริยาอย่างว่องไวอยู่หลายหมู่ หมู่ที่เด่น ๆ คือ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) ตรงคาร์บอนหมู่ที่ 2 หมู่แอลกอฮอล์ (CH_2OH) ตรงคาร์บอนตัวที่ 6 และหมู่แอลกอฮอล์ที่คาร์บอนตัวที่ 3 และเพราะหมู่ที่แอคทีฟนี้เองทำให้ไคโตซานถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง

สารไคโตซานละลายได้ดีในกรดอินทรีย์ (organic acid) เช่น กรดอะซิติก กรดมาลิก กรดทาทาริก กรดซิตริก กรดโพพานิก สารละลายไคโตซานมีสมบัติเป็นแคทไอออนิกโพลิเมอร์ (cationic polymer) และมีสมบัติพิเศษในการดูดซับทั้งไอออนบวกและลบได้ (สุปราณี วิวัฒน์ชัยวงศ์, วิชุดา มงคลศรีลักษณ์, และสมพล ยศวิริยะพาณิชย์, 2542; ปิวย อุณใจ, 2544)

2.3.2. กระบวนการผลิตไคตินและไคโตซาน

การผลิตไคตินและไคโตซาน ประกอบด้วยหลักการที่สำคัญ 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.3.2.1 กระบวนการกำจัดโปรตีน (deproteination) โดยการทำปฏิกิริยากับ

สารละลายด่าง โซดาไฟ ($NaOH$) ในกระบวนการนี้โปรตีนส่วนใหญ่จะถูกขจัดออกไปจากวัตถุดิบ ซึ่งทำให้ไขมันบางส่วนและรงควัตถุบางชนิดมีโอกาสดูดซับออกไปด้วย อย่างไรก็ตามการพิจารณาใช้กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบที่จะนำมาใช้

2.3.2.2 กระบวนการกำจัดเกลือแร่ (demineralization) โดยการนำวัตถุดิบหรือ

วัตถุดิบซึ่งผ่าน กระบวนการกำจัดโปรตีนมาแล้ว มาทำปฏิกิริยากับสารละลายกรด ซึ่งส่วนมากใช้กรดเกลือ (HCl) ทำให้เกลือแร่ส่วนใหญ่ ได้แก่ หินปูน ($CaCO_3$) ซึ่งจะถูกกำจัดออกไปโดยเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทำให้บางส่วนของรงควัตถุและโปรตีนที่ละลายได้ในกรดยอมถูกกำจัดออกไปด้วยในขั้นตอนนี้ด้วยเช่นกัน วัสดุที่ได้คือ ไคติน (chitin)

2.3.2.3 กระบวนการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติก (deacetylation) เป็นการ

เปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ใช้ในการกำจัดหรือลดหมู่อะซิติก (CH_3CO-) เพื่อให้เกิดเป็นไคโตซาน (chitosan) ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นของหมู่อะมิโน ($-NH_2$) บนโมเลกุลของไคติน และหมู่อะมิโนนี้มีความสามารถในการรับโปรตอนจากสารละลาย ซึ่งช่วยให้การละลายดีขึ้นเพราะมีสมบัติเป็นประจุบวก (cation) ส่วนใหญ่เมื่อปริมาณของหมู่อะซิติก ถูกกำจัดไปมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป สารไคโตซานที่ได้ สามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์หลายชนิด อาทิเช่น กรดอะซิติก กรดโพพานิก กรดแลคติก กรดบิวทิริก และกรดซิตริก เป็นต้น การลดหมู่อะซิติกกระทำโดยใช้ด่างที่เข้มข้นสูง ตั้งแต่ 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ดังนั้น พารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาสารไคโตซานก็คือ ค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติก (%DD)

โคโตซานได้จากปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติล (deacetylation) ของโคติน ซึ่งก็คือพอลิเมอร์ของ $\beta(1,4)$ -2-acamido-2-deoxy-D-glucose หรือเรียกง่าย ๆ ว่า พอลิเมอร์ของ glucosamine การเกิดโคโตซานนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติล การทำปฏิกิริยาการกำจัดหมู่อะซิติลคิดเป็นหน่วยร้อยละ (percentage degree of deacetylation, %DD) กล่าวคือ ถ้า %DD เกินกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปแล้ว สามารถใช้พอลิเมอร์นั้นทำให้เกิดอนุพันธ์ที่ละลายในกรดอินทรีย์ได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าการลดลงของหมู่อะซิติลในโคติน ผลที่ได้คือ การเพิ่มหมู่เอมิโน ซึ่งเป็นการเพิ่มสมบัติการเป็นสารที่มีประจุบวก (polycationic activity) บนพอลิเมอร์ทำให้เกิดสภาพการเป็นโคโตซานเพิ่มขึ้น (สวลี จันทรกระจ่าง, 2542)

2.3.3 สมบัติทางเคมีกายภาพของโคโตซาน

2.3.3.1 การละลาย (solubility)

การละลายเป็นกระบวนการหนึ่งที่ทำให้เกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของสารกับตัวทำละลาย ดังนั้นการที่พอลิเมอร์หนึ่ง ๆ ละลายได้ดีจึงขึ้นอยู่กับการยอมให้โมเลกุลของตัวทำละลายแทรกผ่านเข้าไปในระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ โคโตซานมีโครงสร้างที่แข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ดังนั้นโมเลกุลของตัวทำละลายจึงไม่สามารถแทรกผ่านและทำพันธะกับสายโซ่ของโคโตซาน จึงพบว่าโคโตซานจะไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป (สุวบุญ จิราญชัย และคณะ, 2544) เช่น น้ำ ค้าง แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีพีเอชน้อยกว่า 6 กรดอะซิติกและกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายโคโตซาน เนื่องจากจะแตกตัวให้หมู่เอมิโนเป็นอออนบวก และสามารถสร้างพันธะอออนกับอออนลบที่แตกตัวอยู่ในกรด นอกจากกรดสองชนิดแล้ว กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และกรดฟอสฟอริก สามารถละลายโคโตซานได้เช่นกันแต่ภายใต้อุณหภูมิที่สูงปานกลาง (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543)

2.3.3.2 น้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight)

น้ำหนักโมเลกุลเป็นสมบัติสำคัญในการบอกคุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของโคโตซาน โคโตซานจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1×10^5 ถึง 1.2×10^6 ขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการผลิต นั่นคือน้ำหนักโมเลกุลของโคโตซานจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของหมู่อะซิติลที่ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน (ภาวดี เมระคานนท์ และคณะ, 2543) การหาน้ำหนักโมเลกุลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ศึกษาสมบัติการกระเจิงของแสง การศึกษาสมบัติความหนืด และการใช้วิธีทางโครมาโตกราฟี (วิภาวี ไฮเว่น, 2543)

2.3.3.3 ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล (Degree of deacetylation)

ระดับการกำจัดหมู่อะซีติล เป็นตัวบ่งชี้ความเป็นไคโตซาน เนื่องจากไคโตซานเป็น ไคโพลิเมอร์ระหว่างสองโมโนเมอร์คือ N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ถ้าสัดส่วนที่อยู่รวมกันของโมโนเมอร์แรกมากกว่าจะมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลต่ำ แสดงสมบัติเด่นของ ไคติน แต่ถ้าสัดส่วนของโมโนเมอร์หลังมากกว่าจะมีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซีติลสูง แสดงสมบัติเด่นของไคโตซาน (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543) ดังนั้นกรณีที่พอลิเมอร์มีหน่วยของ ไคโตซานเกินกว่า 70-75 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป จะเรียกโมเลกุลนั้นว่า ไคโตซาน (สุวบุญ จิรชาญชัย และคณะ, 2544) ระดับการกำจัดหมู่อะซีติลเป็นปัจจัยพื้นฐานทางโครงสร้างที่มีความสำคัญต่อ สมบัติของไคโตซาน เช่น การละลาย ความหนืด การดูดความชื้น การดูดซับไขมัน และ ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการนำไปประยุกต์ใช้ (มงคล สุขวัฒนา สิ้นทรี, 2544)

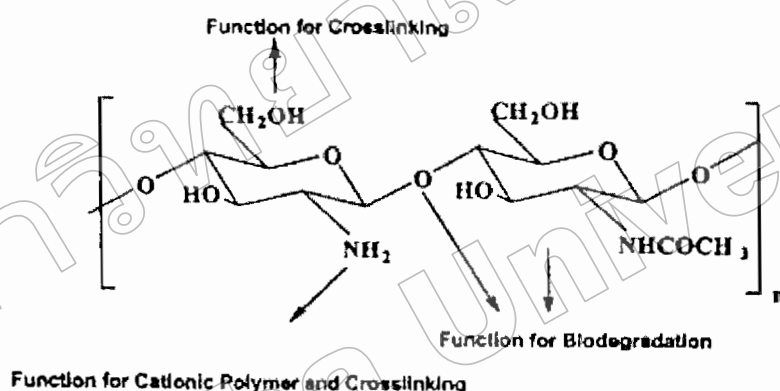
2.3.3.4 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ระดับการกำจัด หมู่อะซีติล น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ionic strength ความเป็นกรด – ด่าง (pH) และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายโพลิเมอร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายโพลิเมอร์จะให้ผลความหนืดที่แตกต่างกันเช่น ความหนืด ของไคโตซานในกรดอะซีติก จะเพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่า pH ลดลงในขณะที่ความหนืดของ ไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริก จะเพิ่มขึ้น เมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น (สุวบุญ จิรชาญชัย และคณะ, 2544)

สารโพลีแซคคาไรด์ที่มีโมเลกุลเป็นเส้นยาวจะให้ความหนืดสูงกว่าสารที่มีโมเลกุล กิ่งก้าน ถ้าความเข้มข้นเท่ากันหรือมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน โมเลกุลที่มีกิ่งก้านมากจะพองตัวได้น้อยกว่าโมเลกุลที่ไม่มีกิ่งก้านเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน การมีประจุบวกทำให้ความหนืดของ สารละลายเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการผลึกของโมเลกุล เมื่อทำการกวนโมเลกุลไม่สามารถเคลื่อนที่ เป็นเส้นตรงได้ การต้านทานการไหลจึงเกิดขึ้นมาก นอกจากนี้ยังเกิดจากการพองตัวที่เกิดขึ้นมาก โดยเฉพาะโมเลกุลเป็นสายยาวและสามารถยืดออกได้เต็มที่ การใส่สารที่มีประจุลบไปทำให้ความ หนืดเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสารชนิดนี้มีผลต่อรูปร่างและขนาดของโมเลกุล นอกจากนี้ยังมีผล ต่ออนุมูลที่มีประจุตรงข้ามที่ละลายอยู่ (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2538)

2.3.3.5 ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา

ไคโตซานประกอบด้วย 3 หมู่ฟังก์ชันที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาคือหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สอง (C-2) หมู่ primary alcohol ($-CH_2OH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่หก (C-6) และหมู่ secondary alcohol ($-CHOH$) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สาม (C-3) โมเลกุล แสดงได้ดังภาพที่ 2-12 การปรับปรุงโครงสร้างทางเคมี (chemical modification) ของทั้งสามหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถก่อให้เกิดวัสดุต่าง ๆ ในการใช้งานที่แตกต่างกัน การนำไปใช้งานนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางเคมีและกายภาพ ได้แก่ ระดับการกำจัดหมู่อะซิติล ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณโปรตีน ความหนืด และน้ำหนัก



ภาพที่ 2-12 หมู่ฟังก์ชันที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (ที่มา: สุวบุญ จิราญชัย และคณะ, 2544)

2.3.3.6 ความสามารถในการสร้างตะกอนและตกตะกอน (Flocculation and Coagulation)

ไคโตซานเป็นตัวสร้างตะกอน (flocculant) และตัวตกตะกอน (coagulation) ที่ดี เนื่องจากการมีหมู่อะมิโนจำนวนมากที่สามารถแตกตัวเป็นประจุบวกและจับกับสารที่มีประจุลบได้ เช่น โปรตีน สีย้อม และพอลิเมอร์อื่น ๆ นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถจับกับโลหะหนักได้ โดยไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานจะทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน ทำให้อิออนของโลหะสามารถสร้างพันธะเชิงซ้อนกับหมู่อะมิโนได้ ดังนั้นไคโตซานที่มีค่าระดับการกำจัดหมู่อะซิติลสูงจะมีอัตราการดูดซับหรือความสามารถในการจับกับอิออนของโลหะสูง ความสามารถในการจับกับอิออนของโลหะของไคโตซานยังขึ้นอยู่กับอีกหลายปัจจัย เช่น ความเป็นผลึก และความสามารถในการดึงดูดน้ำของไคโตซาน (ภาวดี เมธะคานนท์ และคณะ, 2543)

2.4 การประยุกต์ใช้โคโคซานเป็นโคแอกกูแลนต์

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชั่น เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ หรืออาจเรียกว่า ฟลอคคูแลนต์ (flocculant) สารเคมีที่ช่วยให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนต์ เอ็ด (Coagulation aid) หรือ ฟลอคคูแลนต์ เอ็ด (flocculant aid) ซึ่งจะใช้เพียงลำพังไม่ได้ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชั่นในน้ำเสียมียหลายชนิด แต่ชนิดที่ใช้มากที่สุดแสดงได้ดังตารางที่ 2-1 (จรรุธน์ เชาว์เลิศ, สุกัญญา ไชยสุริยานันท์, และสุทธิรักษ์ ศรีกุลธนาภิจ, 2543).

ตารางที่ 2-1 สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนเคมี

สารเคมี	สูตรโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล
สารส้ม	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666.7
เฟอร์รัสซัลเฟต	$Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$	278.0
ปูนขาว	$Ca(OH)_2$	56as CaO
เฟอร์ริกคลอไรด์	$FeCl_3$	162.1
เฟอร์ริกซัลเฟต	$Fe_2 (SO_4)_3$	400

ที่มา: มั่นสิน ต้นตุลเวศน์ (2532)

ในปัจจุบันสารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ สารส้มซึ่งเป็นสารประกอบของอลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีดังนี้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (Aluminium Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมา ได้แก่ สารประกอบของเหล็ก เช่น $Fe SO_4 \cdot 7 H_2O$ (Ferrous sulfate) เป็นต้น ส่วนโคแอกกูแลนต์เอ็ดที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือ สารโพลิเมอร์ (Polymer) หรือโพลิอิเล็กโทรไลต์ Polyeletrolyte ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง สารโพลิเมอร์สามารถแบ่งได้อย่างกว้าง ๆ 2 ประเภท คือ โพลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural polymer) เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เจลลาติน (Gelatin) และแป้ง (Starch) เป็นต้น และโพลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์เป็นการนำโมโนเมอร์หนึ่งหรือสองชนิดรวมกันซึ่งจะสามารถสังเคราะห์ให้ได้โดยตรงตามที่ต้องการได้ โดยสามารถทำให้มีขนาดที่แตกต่างกันเป็นผลทำให้มีน้ำหนักโมเลกุล ที่แตกต่างกันสามารถกำหนดกลุ่มของประจุและจำนวนประจุที่ต้องการได้ และยังสามารถจัดการเกี่ยวกับโครงสร้างของ

โพลิเมอร์ให้เป็นเส้นตรงหรือกิ่งก้านสาขาได้ โพลิเมอร์บางครั้งอาจเรียกว่าโพลิอิเล็กโทรไลต์ เมื่อพิจารณาถึงประจุที่อยู่บนสายโพลิเมอร์ (Polymer chain) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามประจุไฟฟ้า ได้แก่

- สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าบวก (Cationic Polyelectrolyte) เช่น polyacrylamide

- สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ชนิดที่มีประจุไฟฟ้าลบ (Anionic Polyelectrolyte) เช่น polyamide สารสั้ม

- สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ ชนิดที่ไม่มีประจุ (Nonionic Polyelectrolyte) ดังนั้นจะสามารถแบ่งชนิดของโพลิเมอร์ได้ 3 ชนิด ตามประจุที่มีอยู่ เช่น แป้ง (starch) (สุขสม สว่างแจ้ง, 2546)

โพลิเมอร์สามารถสร้างโคแอกกูเลชันให้กับน้ำขึ้นได้ 2 วิธี ซึ่งต้องอาศัยสมบัติในการจับกับอนุภาคคอลลอยด์ วิธีแรก เป็นการทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลิเมอร์ที่มีประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดสิ้นไป วิธีที่สอง เป็นการสร้างโคแอกกูเลชัน โดยมีโพลิเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลาย ๆ ตัว ซึ่งกรณีนี้ประเภทของโพลิเมอร์ไม่ใช่เรื่องสำคัญ เพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือโพลิเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อสามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวจะต้องแข็งแรงและสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำ ด้วยเหตุนี้โคแอกกูเลชันที่เกิดจากวิธีสร้างสะพานนี้จึงต้องการโพลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ซึ่งมักจะเป็นชนิดลบหรือไม่มีประจุ (มันลิน ตันทูลเวศน์, 2532) โดยสารที่ใช้ในการตกตะกอนดังที่กล่าวมามีสมบัติในการตกตะกอนต่างกัน แสดงได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 สมบัติของสารเคมีที่ใช้ตกตะกอน

ชนิดสารตกตะกอน	ข้อดี	ข้อเสีย
อลูมิเนียมซัลเฟต	-ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย -จับตัวเป็นก้อนกับคอลลอยด์ได้ดี -ใช้งานง่าย สะดวก	-เป็นเกลือของกรดที่ละลายน้ำได้ดี -ทำให้เกิดความกระด้างถาวรที่เพิ่มขึ้น -ต้องเพิ่มค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการจับตัวเป็นก้อน
เฟอร์รัสซัลเฟต	-ตกตะกอนได้ดีที่พีเอชกว้างประมาณ 4-11 -เวลาในการตกตะกอนสั้นกว่าสารส้ม -ตะกอนที่ได้มีขนาดใหญ่ -ประหยัดกว่าสารส้ม ราคาถูกกว่า	-มักให้ตะกอนสีน้ำตาลแดง -เกิดการกัดกร่อน ถ้าอยู่ในรูป Fe^{3+}
ปูนขาว	-สร้างตะกอนได้ดี ทำให้พีเอชหลังตกตะกอนมีค่าสูงขึ้น	-เกิดตะกอนมาก
โคโคซาน	-การรวมตัวเป็นฟล็อกขนาดใหญ่มีและตกตะกอนได้เร็ว -ไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่เกิดพิษ	-ไม่ละลายน้ำ ต่าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่ละลายในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์ -เกือบทุกชนิดที่มีพีเอชน้อยกว่า 6

ที่มา: นภา วัฒนยงค์ (2544)

การตกตะกอนสาหร่ายนั้น สามารถใช้สารเคมีได้หลายชนิด เช่น สารส้ม เฟอร์ริคคลอไรด์ ปูนขาว เป็นต้น การเลือกใช้สารตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับความสะดวกในด้านการซื้อหา ราคา และระยะเวลาที่สาหร่ายการตกตะกอนลงมา ได้มีผู้ศึกษาการตกตะกอนสาหร่ายโดยใช้สารตกตะกอนชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 สารตกตะกอนที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวสาหร่าย

Coagulant agent	Concentration (mgL ⁻¹)	Referent
Alum	75-100	McGarry (1970)
Alum	25-170	Van Vuuren & Van Vuuren (1965)
Lime	300-400	Van Vuuren & Van Vuuren (1965)
FeCl ₃	30	Ives (1959)
Cationic polyelectrolytes	50-100	Tilton <i>et al.</i> (1972)
Cationic polyamine (Dow c-31)	3	Tenney <i>et al.</i> (1969)
Ca(OH) ₂	100	Nigam <i>et al.</i> (1980)
Chitosan	50	Nigam <i>et al.</i> (1980)
Alum	70	Lavoie <i>et al.</i> (1984)
Chitosan	30	Lavoie <i>et al.</i> (1984)

ที่มา : Morales, de la Noue, and Picard (1985)

ยูวดี อินสำราญ (2543 อ้างจาก Flokman & Wachs, 1973) รายงานว่า ปกติเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชมีประจุลบจะแขวนลอยอยู่ในน้ำเลี้ยง เพราะมีประจุเดียวกัน แต่เมื่อใส่สารตกตะกอนลงไปจะทำให้แพลงก์ตอนพืชตกตะกอน เพราะสารตกตะกอนเป็นสารอนินทรีย์เมื่อนำไปละลายน้ำจะแตกตัวให้ประจุบวกและประจุลบ โดยเซลล์ของแพลงก์ตอนพืชมีประจุลบจะมารวมกับอนุภาคของสารอนินทรีย์ที่มีประจุบวก ทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ และน้ำหนักเพิ่มขึ้นจึงตกลงสู่พื้นด้านล่าง

การใช้สารโคโคซานซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งทำงานเป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน ตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้ของเสียที่แขวนลอย ในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ และพอใหญ่มากเกินก็ตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนก็จะทำงานคล้าย ๆ กันคือจะไปจับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา โดยโคโคซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบ ซึ่งทำได้ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อม กรดไขมันอิสระ ต้องเข้ามาเกาะกับประจุบวกของโคโคซาน (ป้วย อุ่นใจ, 2544) โคโคซานมีการรวมตัวเป็นฟล็อกเร็วที่ความเข้มข้นของตะกอนสูง รวมทั้งได้ฟล็อกขนาดใหญ่และตกตะกอน

ได้เร็ว ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีปัญหาเรื่องความเป็นพิษ ทำให้มีการนำไคโตซานมาใช้ในการตกตะกอนสารหลายชนิด แสดงได้ดังตารางที่ 2-4 และการนำไคโตซานมาใช้ในการตกตะกอนกระบวนการต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2-5

มหาวิทยาลัยบูรพา
Burapha University

ตารางที่ 2-4 ประสิทธิภาพการตกตะกอนสาหร่ายด้วยโคโคโตซาน

ชนิดของสาหร่าย	ความเข้มข้นโคโคโตซาน (mgL ⁻¹)	pH	ร้อยละการลดลงของตัวแปร					สูตรคำนวณ	เอกสารอ้างอิง
			Turbidity	SS	TSS	OD	Protein	อื่นๆ	
สาหร่ายน้ำจืด	5	7-9	90	-	-	-	-	-	Divakaran and Pailtai (2002 a)
<i>Spirulina</i>									
<i>Oscillatoria</i>									
<i>Chlorella</i>									
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	10	6.5	-	-	-	75	-	-	Lubian (1989)
<i>Phaeodactylum</i>						100		% Flocculation efficiency = (ODเริ่มต้น-ODหลัง)/OD เริ่มต้นx100	
<i>tricornutum</i>								โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 678 nm	
<i>Rhodomonas baltica</i>						75			
<i>Phaeodactylum</i>	20	9.9	-	-	-	90	-	-	Sirin et al (1990)
<i>tricornutum</i>									
สาหร่ายแบบผสมสาหร่าย	5-20	6-9	-	-	-	95-100	-	-	Buelna et al (1990)
สีเขียว (<i>Chlorella</i> sp.)									
สาหร่ายน้ำเค็ม	40	-	-	-	-	100	-	-	Morales, de la Noue, and Picard (1985)
								% Flocculation efficiency = (ODเริ่มต้น-ODหลัง)/OD เริ่มต้นx100	
								โดยใช้ความยาวคลื่นที่ 678 nm	

ตารางที่ 2-4 (ต่อ)

ชนิดของสาหร่าย	ความเข้มข้น โคโคธาน (mgL ⁻¹)	pH	ร้อยละการลดลงของตัวแปร					สูตรคำนวณ	เอกสารอ้างอิง
			Turbidity	SS	TSS	OD	Protein	อื่นๆ	
<i>Dunaliella salina</i>	200	4.25-8.65	-	-	-	17-97	-	-	จิรา พรหมเจริญ และคณะ (2537)
	43.3-346.3	8	-	-	-	65-98	-	-	
	130	8	-	-	-	85-100	-	-	
<i>Neochloris oleoabundans</i>	100 (82.60 %DD, MW 1.50x10 ⁵ Da)	7.2	95	-	-	-	-	-	Beach et al (2012)
<i>Chaetoceros gracilis</i>	40-80	7-9	-	-	-	-	-	85	Lertsutthiwong et al (2009)
<i>Microalgae- bacterial</i>	214	-	-	-	-	92	-	-	Riano et al (2012)
<i>Chlorella vulgaris</i>	100	7	99	-	-	-	-	-	Lee et al (2012)

ตารางที่ 2-5 สรุปการใช้โคโติซานในการตกตะกอนกระบวนการต่าง ๆ

ชนิดของกระบวนการผลิต	ชนิดโคโติซาน	ความเข้มข้นโคโติซาน (mgL ⁻¹)	pH	รายละเอียดการลดลงของตัวแปร					เอกสารอ้างอิง
				Turbidity	SS	TSS	OD	Protein	
kaolinite	-	1	7.5	90	-	-	-	-	Divakaran & Pailla. (2001)
การผลิตเต้าหู้	80 %DD, MW	30	5	97.10,	97.40,	38.40,	95.40,	84.13,	ภาณุเชษฐ รักกันแสง (2548)
	1.28x10 ⁶ Da			97.51	97.59	43.32	95.82	92.42	
ความเข้มข้นมะนาว	81.23 %DD	50	-	62.23	-	-	62.23	-	นิตยา เดชชีวะ (2547)
การผลิตเนยแข็ง	-	5000	5.9	93.30	-	-	-	-	อุไรรัตน์ รัตนวิจิตร (2545)
เกาต์									
การผลิตเนยแข็ง	-	5000	6	99.48	-	-	-	-	ธนานันท์ วัฒนมงคล (2545)
เกาต์									
น้ำล้างตูรีมิ	84%DD, 38.32x10 ⁵ MW+อัลจีเนต 30 mg/l	-	-	97	-	-	-	83	Wibowo et al (2004)
Demineralized water (DW) และ Tab water (TW)	89.5-95 %DD, MW 4.51x10 ⁴ -30.83x10 ⁴ Da	0.1	5-6	95	-	-	-	-	Roussy et al (2005)
ตะกอนของ river silt	-	5	7	80	-	-	-	-	Divakaran and Pailla. (2002 b)
colloid	69-92 %DD	5	-	5-110 NTU	-	-	-	-	Chen et al (2003)

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ชนิดของกระบวนการผลิต	ชนิดโคโคซาน	ความเข้มข้นโคโคซาน (mgL ⁻¹)	pH	ร้อยละการลดลงของตัวแปร					เอกสารอ้างอิง
				Turbidity	SS	TSS	OD	Protein	
น้ำทิ้งจากการผลิตไวน์	-	120	4.5	90	-	-	-	-	Cheng et al (2005)
น้ำทิ้งที่ได้จาก DBW (Dry Bean Wastewater)	-	60-80	5	97.10,	97.40,	38.40,	95.40,	84.13,	Moore, Johnson, and Sistrunk (1987)
ตะกอนน้ำทิ้งจากการผลิตนม	-	25	7	94.3	-	-	-	-	Chi and Cheng (2006)
การแยกกลับโปรตีนและไขมันจากน้ำล้างปลาของโรงงานผลิตทูริมี	-	-	-	-	-	-	-	-	จรรยา อินทมนั และคณะ (2553)
กระบวนการผลิตเต้าหู้	-	300	5.8	97	-	-	-	-	Hye, Ji, Hong, and Samuel (1994)
กระบวนการผลิตเต้าหู้	>80 %DD, MW 1.50x10 ⁵ Da	30	5.8	97	-	-	-	41.9	Jun et al (1994)

ตารางที่ 2-5 (ต่อ)

ชนิดของกระบวนการ	ชนิดโคโคซาน	ความเข้มข้นโคโคซาน (mgL ⁻¹)	pH	ร้อยละการลดลงของตัวแปร					เอกสารอ้างอิง
				Turbidity	SS	TSS	OD	Protein	
ผลิต	โรงงานแปรรูปอาหารทะเล	10	4.7	-	70	-	-	-	วิไล ทบพล (2535)
	น้ำเสียจากโรงงานถุงมือยาง	PAC 12 mg/l + Chitosan 3 mg/l	8.5-9.0	64.89	64.77	-	-	-	พรรศวรรณ อินทสิงห์ (2545)
น้ำทิ้งโรงงานฆ่าสัตว์ปีก	-	10	7	-	-	64-94	-	-	จารุรัตน์ และคณะ (2543)
	กระบวนการผลิตเต้าหู้	2.5-15	-	-	82-97	-	-	-	Shahidi et al (1999)
โรงงานฆ่าสัตว์ปีก	-	5-30	6.3-7	-	77-94	-	-	-	Bough et al (1975)
โรงงานแปรรูปไข่	-	100-200	-	-	70-90	-	-	-	Bough (1975 a)
โรงงานแปรรูปผัก	-	10	-	-	94	-	-	-	Bough (1975 b)
โรงงานปลาป่น	-	-	7.2-7.8	-	-	75	-	-	Guerrero et al (1997)
ความขุ่นน้ำทะเล (Kaoline)	-	18	8.1	97.5	-	-	-	-	Altaher (2012)
การชะล้างดิน	-	5	6	-	-	-	85	-	Chatterjee et al (2009)

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนสาหร่าย

2.5.1 ชนิดของสาหร่าย

สาหร่ายแต่ละชนิดมีความสามารถในการตกตะกอนได้แตกต่างกัน บางชนิดสามารถตกตะกอนได้เร็ว เช่น สาหร่ายที่มีขนาดเซลล์ใหญ่และหนัก ขณะที่บางชนิดจะตกตะกอนได้ช้า เช่น สาหร่ายที่มีขนาดเซลล์เล็ก

Morales, de la Noue, and Picard (1985) ศึกษาการเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Skeletonema costatum*, *Dunaliella salina*, *Thalassiosira nordenskoldii*, *Chlorella* sp. และ *Thalassionema* sp. โดยใช้โคโตซานในการตกตะกอน พบว่าสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Skeletonema costatum*, *Dunaliella salina*, *Thalassiosira nordenskoldii* และ *Chlorella* sp. ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้โคโตซานเข้มข้น 80, 45, 40 และ 40 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ ส่วน *Thalassionema* sp. เก็บเกี่ยวได้ 95.25 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้โคโตซานเข้มข้น 90 ส่วนในล้านส่วน

Lubian (1989) ศึกษาการเก็บเกี่ยวสาหร่าย 11 ชนิด โดยใช้โคโตซาน พบว่าสาหร่ายส่วนใหญ่เก็บเกี่ยวได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้โคโตซานเข้มข้น 40-80 ส่วนในล้าน

จำเนียร ชีวรักษ์ (2528) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของชนิดและความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 6 ชนิด คือ *Chlorella* sp.1, *Chlorella* sp.2, *Chlorella* sp.3, *Chaetoceros calisitrans*, *Isochrysis galbana* และ *Thalassiosira pseudonana* ด้วยสารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม โซเดียมไฮดรอกไซด์ เฟอริคคลอไรด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Chlorella* sp.1, *Chlorella* sp.2, *Chlorella* sp.3, *Chaetoceros calisitrans*, *Isochrysis galbana* และ *Thalassiosira pseudonana* ได้ 7.44, 4.986, 6.103, 0.973, 0.976 และ 3.400 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้สารตกตะกอนและความเข้มข้นระดับเดียวกัน

ยุวดี อินสำราญ (2543) ศึกษาผลของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 4 ชนิด คือ *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acutus* และ *Closterium acerorum* โดยใช้สารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม เฟอริคคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าสาหร่ายที่เหลือในส่วนใดของ *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acutus* และ *Closterium acerorum* มี 3, 22, 1 และ 17 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้สารตกตะกอนและความเข้มข้นระดับเดียวกัน

ภรณ์ หวังจำรวงศ์ และคณะ (2543) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina* sp. และสาหร่ายเซลล์เดียวพวกไดอะตอม *Achnanthes* sp. ด้วยสารละลาย 2 ชนิด คือสารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีน ใช้วิธีจาร์เทสต์ พบว่าสามารถกำจัดสาหร่าย *Spirulina* sp. และ *Achnanthes* sp. ได้ 95.95 เปอร์เซ็นต์ และ 95.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อใช้สารตกตะกอนและความเข้มข้นระดับเดียวกัน

Millamena, Aujero, and Borlongan (1990) ศึกษาเทคนิคการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chuii*, *Skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงและให้อาหารลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยตกตะกอนด้วยสารส้มและปูนขาว ใช้วิธีจาร์เทสต์ในการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว พบว่าสามารถเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chuii*, *Skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* ได้ 94.80, 91.10, 96.50 และ 28.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อใช้สารตกตะกอนและความเข้มข้นระดับเดียวกัน

Pushparaj, Pelosi, Torzillo, and Materassi (1993) ศึกษาประสิทธิภาพการตกตะกอนของสาหร่าย *Tetraselmis suecica*, *Spirulina platensis* และ *Rhodopseudomonas palustris* ด้วย *Praestol* พบว่าสามารถตกตะกอนสาหร่าย *Tetraselmis suecica*, *Spirulina platensis* และ *Rhodopseudomonas palustris* ได้ 70, 70 และ 86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.5.2 ความหนาแน่นของสาหร่าย

สาหร่ายที่มีความหนาแน่นต่างกันจะตกตะกอนได้ไม่เท่ากันเนื่องจากความเข้มข้นของสาหร่ายที่มากหรือน้อยไปนี้มีขนาดที่ไม่เหมาะสมกับความสามารถที่สารตกตะกอนจะสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนได้

จิรา พรหมเจริญ และคณะ (2537) ได้ศึกษาการตกตะกอนสาหร่ายดุนาเลียเอลาโดยใช้สารละลายโคโคซานที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 39,000–504,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพการตกตะกอนจะไม่แตกต่างกันโดยประสิทธิภาพการตกตะกอนมีถึงเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์

Morales, de la Noue, and Picard (1985) ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Skeletonema costatum*, *Dunaliella salina*, *Thalassiosira nordenskoldii*, *Chlorella* sp. และ *Thalassionema* sp. ด้วยโคโคซาน ที่ความหนาแน่นของสาหร่ายแตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย พบว่า *Skeletonema costatum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์

ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 3.0×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร *Dunaliella salina* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 2.2×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร *Thalassiosira nordenskoldii* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 5.7×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร *Chlorella* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นของสาหร่ายตั้งแต่ 80.4×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร และ *Thalassionema* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 95.20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นของสาหร่าย 3.0×10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร

ภรณี หวังจำรวงศ์ และคณะ (2543) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina* sp. และสาหร่ายเซลล์เดียวพวกไดอะตอม *Achnanthes* sp. ที่ความหนาแน่นประมาณ 2,500 5,000 และ 10,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีน ด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar-test) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายจะลดลงเมื่อความหนาแน่นของสาหร่ายเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้นของสารตกตะกอนเดียวกัน โดยประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อสาหร่ายมีความหนาแน่น 2,500 5,000 และ 10,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายสารส้มสูงสุด (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าเป็นร้อยละ 99.95, 99.47 และ 95.07 ตามลำดับ ในสาหร่าย *Spirulina* sp. และร้อยละ 99.23, 99.57 และ 91.72 ตามลำดับในสาหร่าย *Achnanthes* sp. สำหรับความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนสูงสุด (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าเป็นร้อยละ 92.95 89.54 และ 93.31 ตามลำดับในสาหร่าย *Spirulina* sp. และร้อยละ 94.29 89.57 และ 84.57 ตามลำดับ ในสาหร่าย *Achnanthes* sp.

2.5.3 ชนิดของสารตกตะกอน

สารตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีคุณภาพในการตกตะกอนได้ไม่เท่ากัน บางชนิดสามารถตกตะกอนได้ดี ขณะที่บางชนิดตกตะกอนได้ไม่ดี

จำเนียร ชีวรักษ์ (2528) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของชนิดและความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 6 ชนิด คือ *Chlorella* sp.1, *Chlorella* sp.2, *Chlorella* sp.3, *Chaetoceros calisitrans*, *Isochrysis galbana* และ *Thalassiosira pseudonana* ด้วยสารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม โซเดียมไฮดรอกไซด์ เพอริคลอไรด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ชนิดของสารตกตะกอนมีผลต่อการตกตะกอนของสาหร่าย โดย *Chlorella* sp.1 เมื่อตกตะกอนด้วยสารส้มจะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือเพอริคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Chlorella* sp.2 เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม

ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Chlorella* sp.3 เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และไซโตียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Chaetoceros calisitrans* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Isochrysis galbana* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และไซโตียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Thalassiosira pseudonana* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้มาก

ธิดา เพชรมณี และมาวิทย์ อัครอารีย์ (2538) ได้ศึกษาการตกตะกอนคลอโรลล่าน้ำเค็มเพื่อลดปริมาตรในการนำไปเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยอูมิเนียมซัลเฟตและสารส้มพบว่าสารส้มจะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนคลอโรลล่าน้ำเค็มได้มากกว่าอูมิเนียมซัลเฟตประมาณ 82.9 เปอร์เซ็นต์ และ 77.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทำให้มีปริมาตรลดลง และสะดวกในการขนย้ายไปเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกุ้งต่อไป

ยุวดี อินสำราญ (2543) ศึกษาผลของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 4 ชนิด คือ *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acutus* และ *Closterium acerorum* โดยใช้สารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม เพอริคลอไรด์ ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่าชนิดของสารตกตะกอนมีผลต่อการตกตะกอนของสาหร่ายโดย *Spirulina platensis* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Chlorella vulgaris* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Scenedesmus acutus* การตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ *Closterium acerorum* เมื่อตกตะกอนด้วยเพอริคลอไรด์จะให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือสารส้ม ไซโตียมไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ ซึ่งทำให้สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้มาก

ภรณ์ หวังธำรงวงศ์ และคณะ (2543) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน *Spirulina* sp. และสาหร่ายเซลล์เดียวพวกไดอะตอม *Achnanthes* sp. ที่ความหนาแน่นประมาณ 2,500 5,000 และ 10,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีน ใช้วิธีจาร์เทสต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่าย

Spirulina sp. เมื่อใช้สารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีนในการตกตะกอนจะสามารถกำจัดสาหร่ายได้ถึง 99.95 และ 99.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขณะที่ *Achnanthes* sp. เมื่อใช้สารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีนในการตกตะกอนจะสามารถกำจัดสาหร่ายได้ถึง 99.23 และ 99.57 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Millamena, Aujero, and Borlongan (1990) ได้ศึกษาเทคนิคการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chuii*, *Skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงและให้อาหารลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยตกตะกอนด้วยสารส้มและปูนขาว ใช้วิธีจาร์เทสต์ในการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยว พบว่า สาหร่ายที่ตกตะกอนด้วยสารส้มและปูนขาวจะมีประสิทธิภาพในการตกตะกอนแตกต่างกัน ตามชนิดของสารตกตะกอน

2.5.4 ความเข้มข้นของสารตกตะกอน

สารตกตะกอนแต่ละชนิดถ้าใช้ในปริมาณที่ไม่เท่ากันจะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ความเข้มข้นให้เหมาะสม

จิรา พรหมเจริญ และคณะ (2537) ได้ศึกษาการตกตะกอนสาหร่ายดุนาเลียเอลาโดยใช้สารละลายโคโคซานความเข้มข้นต่างกัน ซึ่งถ้าใช้โคโคซานความเข้มข้นตั้งแต่ 43–346 ส่วนในล้านส่วน พบว่าการตกตะกอนสาหร่ายที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 60 ส่วนในพันส่วน ความเข้มข้นของโคโคซานที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือ 130 ส่วนในพันส่วน จะทำให้สาหร่ายตกตะกอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Morales, de la Noue, and Picard (1985) ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวสาหร่ายสาหร่าย *Skeletonema costatum*, *Dunaliella salina*, *Thalassiosira nordenskoldii*, *Chlorella* sp. และ *Thalassionema* sp. โดยใช้โคโคซานความเข้มข้นแตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย พบว่า *Skeletonema costatum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของโคโคซาน 80 ส่วนในล้านส่วน *Dunaliella salina* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของโคโคซานตั้งแต่ 45 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป *Thalassiosira nordenskoldii* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของโคโคซาน 40 ส่วนในล้านส่วน *Chlorella* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของโคโคซานตั้งแต่ 30 ส่วนในล้านส่วน ขึ้นไป และ *Thalassionema* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 95.20 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของโคโคซาน 90 ส่วนในล้านส่วน

Gualtieri, Barsanti, and Passarelli (1988) ได้ศึกษาการตกตะกอน *Euglena gracilis* โดยใช้ไคโตซานความเข้มข้นแตกต่างกัน พบว่า ความเข้มข้นของไคโตซานที่เหมาะสมสามารถตกตะกอน *Euglena gracilis* ได้ 96–98 เปอร์เซ็นต์

Lubian (1989) ได้ศึกษาการเก็บรวบรวมสาหร่าย 11 ชนิด โดยใช้ไคโตซาน พบว่าความเข้มข้นของไคโตซาน 10-80 ส่วนในล้านส่วน แตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย พบว่า *Tetraselmis buergeri* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 42 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของไคโตซาน 80 ppm *Phaeodactylum tricornutum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของไคโตซาน 10 ส่วนในล้านส่วน *Chaetoceros calcitrans* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของไคโตซาน 20 ส่วนในล้านส่วน *Rhodomonas baltica* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของไคโตซาน 10 ส่วนในล้านส่วน โดยสาหร่ายส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพในการตกประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของไคโตซาน 40-80 ส่วนในล้านส่วน

จำเนียร ชีวรักษ์ (2528) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของชนิดและความเข้มข้นของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญหลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 6 ชนิด คือ *Chlorella* sp.1, *Chlorella* sp.2, *Chlorella* sp.3, *Chaetoceros calsitrans*, *Isochrysis galbana* และ *Thalassiosira pseudonana* ด้วยสารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม โซเดียมไฮดรอกไซด์ เฟอริคคลอไรด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 5 ระดับ คือ 50, 100, 150, 200 และ 250 ส่วนในล้านส่วน. ในห้องปฏิบัติการ พบว่า ความเข้มข้นของสารตกตะกอนมีผลทำให้การเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืชบางชนิดแตกต่างกันโดย *Chlorella* sp.1 จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 7.44 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน *Chlorella* sp.2 จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 4.986 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยสารส้มที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน *Chlorella* sp.3 จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 6.753 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน *Chaetoceros calsitrans* จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 2.346 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน *Isochrysis galbana* จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 2.603 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน *Thalassiosira pseudonana* จะสามารถเก็บเกี่ยวได้ถึง 2.783 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อตกตะกอนด้วยเฟอริคคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน

ธิดา เพชรมณี และมาวิทย์ อัสวอารีย์ (2538) ศึกษาการตกตะกอนคลอโรลล่าน้ำเค็ม เพื่อลดปริมาณในการนำไปเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยอลูมิเนียมซัลเฟตและสารส้มที่ ระดับความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ส่วนในล้านส่วน เป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที ปรับ pH อยู่ในช่วง 6.5–7.0 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะว่าถ้า pH ต่ำหรือสูงเกินไปตะกอนจะตกได้ไม่ดี พบว่า คลอโรลล่าน้ำเค็มจะตกตะกอนได้มากขึ้น ที่ปริมาณ อลูมิเนียมซัลเฟตและสารส้มที่เหมาะสม คือ 50 และ 100 ส่วนในล้านส่วน ตามลำดับ

ภรณ์ หวังธำรงวงศ์ และคณะ (2543) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายสีเขียว แกมน้ำเงิน *Spirulina* sp. และสาหร่ายเซลล์เดียวพวกไดอะตอม *Achnanthes* sp. ที่ความหนาแน่นประมาณ 2,500 5,000 และ 10,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ด้วยสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายสารส้มและสารละลายคลอรีน ที่ความเข้มข้น 0, 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีจาร์เทสต์ (Jar-test) พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสาหร่ายทั้ง 2 ชนิดด้วยสารละลาย สารส้มและสารละลายคลอรีนที่ความเข้มข้นเดียวกันไม่ต่างกัน เมื่อระดับความเข้มข้นของสาร ตกตะกอนเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะมีมากขึ้นด้วย และที่ความเข้มข้นของสาร ตกตะกอนที่มีค่าเท่ากัน พบว่า ปริมาณความหนาแน่นของสาหร่ายที่เพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพ ลดลง ($p < 0.05$) โดยประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อสาหร่ายมีความหนาแน่น 2,500, 5,000 และ 10,000 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายสารส้มสูงสุด (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าเป็นร้อยละ 99.95, 99.47 และ 95.07 ตามลำดับในสาหร่าย *Spirulina* sp. และร้อยละ 99.23, 99.57 และ 91.72 ตามลำดับในสาหร่าย *Achnanthes* sp. สำหรับความเข้มข้นของสารละลายคลอรีนสูงสุด (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีค่าเป็นร้อยละ 92.95, 89.54 และ 93.31 ตามลำดับในสาหร่าย *Spirulina* sp. และร้อยละ 94.29, 89.57 และ 84.57 ตามลำดับในสาหร่าย *Achnanthes* sp.

ยุวดี อินสำราญ (2543) ศึกษาผลของสารตกตะกอนที่มีต่อการเก็บเกี่ยวและการเจริญ หลังการเก็บเกี่ยวแพลงก์ตอนพืช 4 ชนิด คือ *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acutus* และ *Closterium acerorum* โดยใช้สารตกตะกอน 4 ชนิด คือ สารส้ม เพอร์คลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มีระดับความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ คือ 50, 100, 150, 200 และ 250 ส่วนในล้านส่วน พบว่า *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus acutus* และ *Closterium acerorum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน มากสุดเมื่อใช้เพอร์คลอไรด์ ความเข้มข้น 250 ส่วนในล้านส่วน

Millamena, Aujero, and Borlongan (1990) ได้ศึกษาเทคนิคการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chui*, *skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงและให้อาหารลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน 2 ชนิด คือสารส้มและปูนขาว ด้วยวิธีจาร์เทสต์ พบว่า *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chui*, *skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* ที่ตกตะกอนด้วยสารส้มที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเป็นร้อยละ 84.10, 83.80, 85.30 และ 10.50 ตามลำดับ ขณะที่ตกตะกอนด้วยปูนขาวที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเป็นร้อยละ 94.80, 91.10, 96.50 และ 28.20 ตามลำดับ พบว่าการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอนจะไม่มีผลต่อสาหร่าย *Isochrysis galbana* ทั้งที่ตกตะกอนด้วยสารส้มและปูนขาว

2.5.5 พีเอช

การตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ดังนั้นในภาวะที่การตกตะกอนมี pH ไม่เหมาะสมจะทำให้การตกตะกอนเกิดได้ไม่ดี

จิรา พรหมเจริญ และคณะ (2537) ได้ศึกษาการตกตะกอนสาหร่ายดุนาลิเอลาโดยใช้พีเอชแตกต่างกัน 4.25-8.65 พบว่าการตกตะกอนสาหร่ายที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 60 ส่วนในพันส่วน ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนจะอยู่ประมาณ 7.5 จะทำให้สาหร่ายตกตะกอนได้มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์

Morales, de la Noue, and Picard (1985) ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวสาหร่าย *Skeletonema costatum*, *Dunaliella tertiolecta*, *Thalassiosira nordenskoldii*, *Chlorella* sp. และ *Thalassionema* sp. โดยใช้พีเอชแตกต่างกันตามชนิดของสาหร่าย ได้แก่ *Skeletonema costatum* ใช้พีเอชช่วง 7.4-9.3 *Dunaliella salina* ใช้พีเอชช่วง 6.5-8.4 *Thalassiosira nordenskoldii* ใช้พีเอชช่วง 7.6-9.4 *Chlorella* sp. ใช้พีเอชต่ำกว่า 7.7 และ *Thalassionema* sp. ใช้พีเอชช่วง 7.1-9.0 พบว่า *Skeletonema costatum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.4 *Dunaliella salina* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.1 ลงไป *Thalassiosira nordenskoldii* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.6 *Chlorella* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.1 ลงไป และ *Thalassionema* sp. จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 95.20 เปอร์เซ็นต์ ที่พีเอช 7.1

Lubian (1989) ได้ศึกษาการเก็บรวบรวมสาหร่าย 11 ชนิด โดยใช้โคโตซาน พบว่า เมื่อไม่ควบคุมฟิเอย *Tetraselmis buergeri* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อฟิเอยเท่ากับ 8 สาหร่ายส่วนใหญ่จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 75 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เมื่อฟิเอย 6.5 *Phaeodactylum tricornutum* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 100 เปอร์เซ็นต์ *Chaetoceros calcitrans* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 75 เปอร์เซ็นต์ *Rhodomonas baltica* จะมีประสิทธิภาพการตกตะกอน 75 เปอร์เซ็นต์

Millamena, Aujero, and Borlongan (1990) ได้ศึกษาเทคนิคการเก็บเกี่ยวและเก็บรักษาสาหร่าย *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chui*, *skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยงและให้อาหารลูกสัตว์น้ำวัยอ่อน โดยตกตะกอนด้วยสารตกตะกอน 2 ชนิด คือสารส้มและปูนขาวซึ่งใช้ฟิเอยช่วง 5.5–8.0 ในการตกตะกอนด้วยสารส้มและฟิเอยช่วง 8.5–10 โดยการตกตะกอนด้วยปูนขาว ด้วยวิธีจาร์เทสต์ พบว่า *Chaetoceros calcitrans*, *Tetraselmis chui*, *skeletonema costatum* และ *Isochrysis galbana* ที่ฟิเอย 6.5 เมื่อตกตะกอนด้วยสารส้ม จะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเป็นร้อยละ 84.10, 83.80, 85.30 และ 10.50 ตามลำดับ ขณะที่ฟิเอย 9.5 เมื่อตกตะกอนด้วยปูนขาวจะมีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวเป็นร้อยละ 94.80, 91.10, 96.50 และ 28.20 ตามลำดับ พบว่าการตกตะกอนด้วยสารตกตะกอนจะไม่มีผลต่อสาหร่าย *Isochrysis galbana* ทั้งที่ตกตะกอนด้วยสารส้มและปูนขาว

2.5.6 เวลาในการตกตะกอน

ระยะเวลาในการตกตะกอนสาหร่ายแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพแตกต่างกันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ความเข้มข้นของสาหร่าย ชนิดของสารตกตะกอน ความเข้มข้นของสารตกตะกอนและความเป็นกรด-ด่าง

จิรา พรหมเจริญ และคณะ (2537) ได้ศึกษาการตกตะกอนสาหร่ายดุนาเลียเอลาโดยใช้เวลาในการตกตะกอน 10 นาที และ 60 นาที ด้วยโคโตซาน พบว่าการตกตะกอนสาหร่ายที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 60 ส่วนในพันส่วน ประสิทธิภาพการตกตะกอนจะไม่แตกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที และ 60 นาที จะทำให้สาหร่ายตกตะกอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

ธิดา เพชรหมณี และมาวิทย์ อัสวารี (2538) ศึกษาการตกตะกอนคลอเรลลาน้ำเค็มเพื่อลดปริมาณการนำไปเพาะเลี้ยงในบ่อเลี้ยงกุ้งกุลาดำโดยอลูมิเนียมซัลเฟตและสารส้มเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที พบว่า คลอเรลลาจะตกตะกอนได้มากขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น โดยคลอเรลลาที่ตกตะกอนด้วยอลูมิเนียมซัลเฟตและสารส้ม มีประสิทธิภาพการตกตะกอนถึง 77.20 และ 82.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเวลา 60 นาที

นอกจากการนำไคโตซานมาตกตะกอนสารห่วยแล้วยังได้มีการศึกษาโดยใช้ไคโตซานในการตกตะกอนในกระบวนการอื่น ๆ เช่น

ทรรศวรรณ อินทตสิงห์ (2545) ได้ศึกษาการลดปริมาณสารแขวนลอยของน้ำเสียจากโรงงานถุงมือยาง โดยแยกเอาอนุภาคสารแขวนลอยออกจากรู้น้ำทิ้งโดยใช้สารช่วยสร้างตะกอนไคโตซานเพื่อลดค่าความขุ่นและปริมาณสารแขวนลอยก่อนปล่อยทิ้ง พบว่า พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนน้ำเสียด้วยไคโตซาน คือ 8.5-9.0 เมื่อไคโตซานเป็นสารช่วยสร้างตะกอนทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพดีที่สุดในที่สุด คือ สามารถลดความขุ่นจาก 50.06 ลงอยู่ระหว่าง 22.30-41.68 NTU และสารแขวนลอยทั้งหมดจาก 141 ลงอยู่ระหว่าง 63-118 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนพอลิเมอร์สังเคราะห์จะบำบัดได้ดีลดลงมา ปริมาณ พีเอชและไคโตซานที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือ พีเอชเข้มข้น 12 มิลลิกรัมต่อลิตรร่วมกับไคโตซาน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อคิดเป็นร้อยละเฉลี่ยในการกำจัดมวลสารสามารถลดค่าความขุ่นได้ถึงร้อยละ 64.89 สารแขวนลอยทั้งหมดร้อยละ 64.77 และซีไอดีร้อยละ 28.48 เมื่อทดลองใช้ไคโตซานเป็นสารช่วยสร้างตะกอนเติมลงในระบบบำบัดน้ำเสีย เอเอส พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดดีกว่าระบบบำบัดเดิมที่ใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ประจุลบ สามารถลดค่าสารแขวนลอยทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 96.97 ของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมดร้อยละ 25.90 ซีไอดีร้อยละ 83.28 และบีไอดีร้อยละ 87.16

Bough (1975) ได้ศึกษาการเก็บเกี่ยวสารอินทรีย์จากโรงงานแปรรูปไข่ โดยใช้ไคโตซานร่วมกับพอลิเมอร์ที่มีประจุลบ (Betz 1130) พบว่าสามารถลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและซีไอดีได้ร้อยละ 72 และ 76 ตามลำดับ

Bough (1975) ได้ศึกษาการใช้สารอิลโคโตรไลต์ในการจับประจุบวกและประจุลบจากน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตผัก เช่น การนำเปลือกที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปพริกเม็ดใหญ่จะมีปริมาณของแข็งที่แขวนลอย 69 เปอร์เซ็นต์ และเป็นน้ำทิ้ง 18 เปอร์เซ็นต์ จะทำการบำบัดโดยโพลิอะคริลาไมด์ที่เป็นประจุบวก (Cationic acrylamide or Natron86) และอลัม (Alum) ที่ความเข้มข้น 1-214 มิลลิกรัมต่อลิตร ไล้ของพริกเม็ดใหญ่จะใช้ Natron86 และเฟอริคคลอไรด์ในการลดของแข็งที่แขวนลอยได้ถึง 82 และ 86 เปอร์เซ็นต์ ผักใบเขียวบรรจุกระป๋องจะพบของแข็งที่แขวนลอย 80 เปอร์เซ็นต์ และค่า COD 23 เปอร์เซ็นต์จากการล้างผักใบเขียว ทำการทรีตเมนต์ด้วยดินและผสมกับพอลิเมอร์ประจุลบ (WT-3000) เพื่อลดปริมาณของแข็งที่แขวนลอย ที่ความเข้มข้น 2-910 มิลลิกรัมต่อลิตร ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ไคโตซานเป็นโคเอกกูแลนท์ และลดความขุ่นของน้ำทิ้งจากกระบวนการแปรรูปผักกระป๋อง พบว่าการใช้ไคโตซานเป็นโคเอกกูแลนท์ สามารถลดปริมาณสารแขวนลอยและนำตะกอนที่ได้นั้นมาใส่ในอาหารสัตว์ได้อีกด้วย

Bough, Shewfelt, and Slater (1975) ได้ศึกษาการลดปริมาณของแข็งและเกินเกี่ยวของแข็งออกจากร้านน้ำทิ้งโรงงานแปรรูปสัตว์ปีก 3 แหล่ง คือน้ำทิ้งรวม (composite effluent) น้ำทิ้งจากส่วนทำความเย็น (chiller effluent) และน้ำทิ้งจากการลวก (Scalding effluent) พบว่าสามารถลดค่า ของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และค่าซีไอดี

Moore, Johnson, and Sistrunk (1987) ได้ศึกษาน้ำเสียที่ได้จาก SBW (Snap Bean Wastewater) และ DBW (Dry Bean Wastewater) โดยใช้โพลีเมอร์ประจุบวกและประจุลบอย่างละแปดชนิดพบว่า มีเพียงโพลีเมอร์ประจุบวก 2 ชนิดเท่านั้นที่สามารถลดความขุ่นได้ การบำบัดน้ำทิ้งจาก SBW โดยใช้ Flocculite 250 ที่ความเข้มข้น 10 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และการบำบัดน้ำทิ้งจาก DBW ด้วยไคโตซานที่ความเข้มข้น 60-80 มิลลิกรัมต่อลิตรพบว่า สามารถลด ความขุ่นได้ 81 และ 91 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าซีไอดี 21 และ 23 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งรวม 25 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งแขวนลอย 54 และ 44 เปอร์เซ็นต์ ของแข็งละลายน้ำได้ 22 และ 0 เปอร์เซ็นต์ ในไตรค-ไนโตรเจน 0 และ 39 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัสรวม 74 และ 18 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Hye, Ji, Hong, and Samuel (1994) ได้ศึกษาการใช้ไคโตซานและเกลืออนินทรีย์ เพื่อใช้เป็นโคแอกกูแลนต์จากกระบวนการผลิตเต้าหู้ พบว่าการใช้ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัมต่อลิตรของไคโตซาน ที่ pH 5.8 สามารถลดความขุ่นได้ถึง 97 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการใช้เกลือเฟอร์ริกซัลเฟต (Ferric sulfate; $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) สามารถลดความขุ่นได้ดีที่สุด คือมากกว่าการใช้เกลืออนินทรีย์อื่น ๆ อีก 3 ตัว คือ เฟอร์ริกคลอไรด์ (Ferric chloride; FeCl_3) แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride; CaCl_2) และ อลูมิเนียมซัลเฟต (Aluminum sulfate; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ในขณะที่สารเชิงซ้อนระหว่างไคโตซานกับเฟอร์ริกซัลเฟตไม่สามารถลดความขุ่นได้เพิ่มขึ้น

Huang and Shiu (1996) ได้ศึกษาปฏิกิริยาในการตกตะกอนระหว่างสารส้มและตะกอน โดยทดสอบด้วยวิธีจาร์เทสต์ โดยศึกษาในลักษณะโมเดล คือสังเกตพฤติกรรมในการจับกันของสารส้มและตะกอนระหว่างการตกตะกอน ซึ่งสารส้มจะเข้าทำปฏิกิริยากับ humic acid และ salicylic acid พบว่าการจับตัวของตะกอนในการตกตะกอนลงมาขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล