

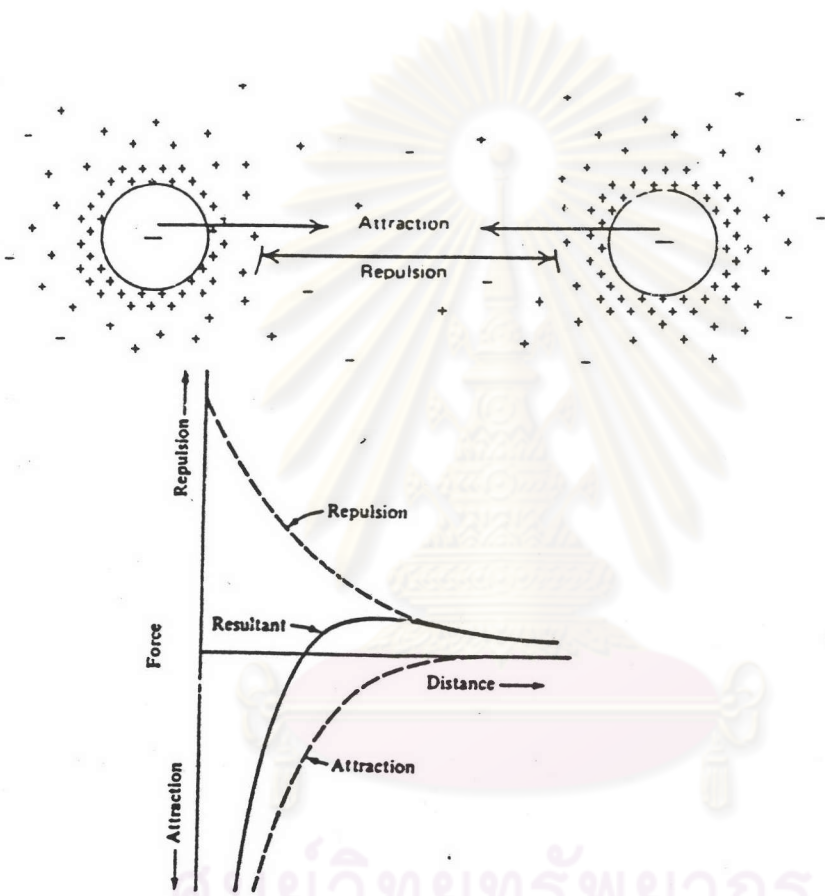


3.1 ความสำคัญของโคแอกกูเลชัน

ความขุ่นที่สร้างปัญหาให้กับโรงผลิตน้ำประปามักเกิดจากอนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า อนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particles) เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเล็กมากทำให้ไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาที่จำกัด ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการทำให้อนุภาครวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่เรียกว่าฟล็อก (floc) เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น กระบวนการซึ่งทำให้อนุภาคคอลลอยด์รวมตัวกันเป็นฟล็อกเรียกว่า โคแอกกูเลชัน (coagulation) โคแอกกูเลชันประกอบด้วยสองขั้นตอนคือ การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (destabilization) และการทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มาสัมผัสกันให้มากที่สุด (transport of colloidal particles) นั่นคือเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วต้องสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคให้เกิดขึ้น และเมื่ออนุภาคสัมผัสกันแล้วควรจะเกาะติดกันแน่นและหลุดน้อยที่สุด

3.2 การเกิดเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ (5)

อนุภาคคอลลอยด์อาจมีเสถียรภาพหรือไม่ก็ได้ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพจะสามารถดำรงสถานะแขวนลอยอยู่ในน้ำโดยไม่ตกตะกอนในระยะเวลานานขึ้น การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวออกจากน้ำถือว่าเป็นการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ เสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค เมื่อแรงผลักรวมกว่าแรงดึงดูดอนุภาคก็จะมีเสถียรภาพ แต่ถ้าแรงดึงดูดรวมกว่าแรงผลักรวมอนุภาคก็จะสามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟล็อกได้ แรงผลักระหว่างอนุภาคเรียกว่า Van der Waals force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคนั้นเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาคหรือซีตาโพเทนเชียล (zeta potential) ผลลัพธ์ของแรงทั้งสองชนิดขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าแรงดึงดูดมีอำนาจเหนือกว่าแรงผลักเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากๆ โดยปกติแล้วแรงผลักซึ่งเกิดจากประจุของอนุภาคจะไม่เปิดโอกาสให้อนุภาคต่างๆ เข้ามาใกล้กันจนเกิดแรงดูดเข้าหากันได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แรงระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ระยะห่างต่างๆ

3.3 การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์

การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์สามารถกระทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย

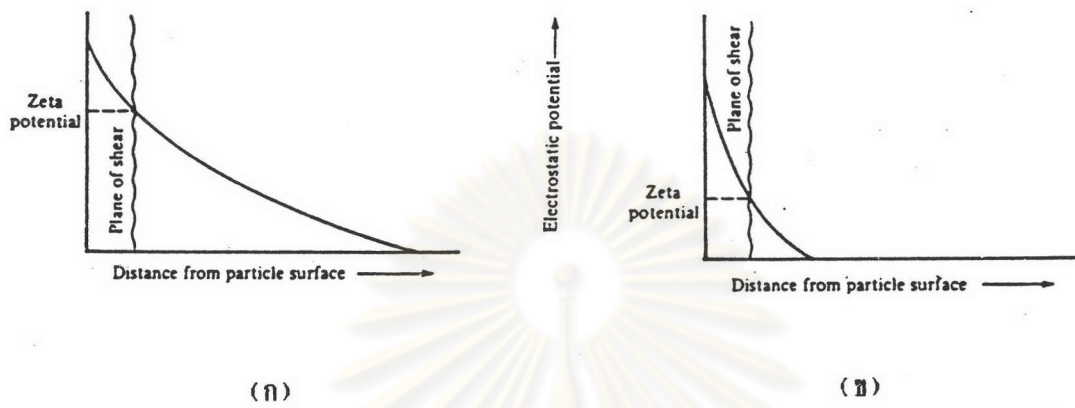
การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค เป็นการเพิ่มจำนวนประจุตรงข้ามในชั้นกระจาย ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลงและซีตาโพเทนเชียลลดลงตามไปด้วย การที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการที่มีประจุบวกเข้าไปออสอยู่ใกล้กับผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุบไม่สามารส่งออกไปไกลเท่าเดิม อนุภาคจะสามารถเข้าใกล้กันได้มากขึ้นจนกระทั่งแรงคูลสามารถทำให้อนุภาคเกาะติดกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

2. การดูดซับและทำลายเสถียรภาพ

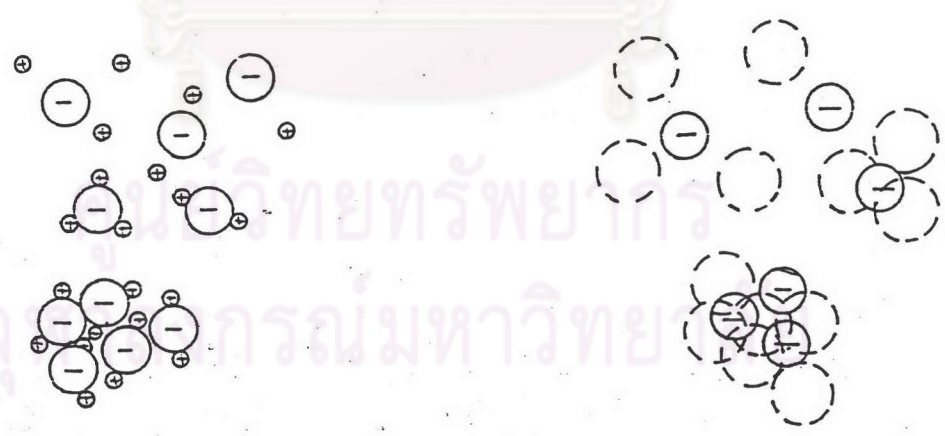
กลไกการดูดซับและทำลายเสถียรภาพ เกิดจากการเติมสารเคมีบางชนิดที่สามารถแตกตัว หรือทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วให้ไอออนต่างประจุซึ่งสามารถดูดซับผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้แรงผลัของอนุภาคลดลงจนอนุภาคสามารถสัมผัสและเกาะติดกันได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3

3. กลไกการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงในน้ำในปริมาณที่พอเพียงที่จะทำให้เกิดการตกผลึกอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกหรืออาจจับตัวร่วมกับผลึก ด้วยกลไกนี้ถือว่าการเพิ่มขนาดและน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์ โดยทำให้รวมตัวกับผลึกขนาดใหญ่เป็นผลให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ผลของการเติมไอออนที่มีประจุตรงข้ามให้กับอนุภาคคอลลอยด์
 (ก) ก่อนการเติมไอออน (ข) หลังจากการเติมไอออนแล้ว



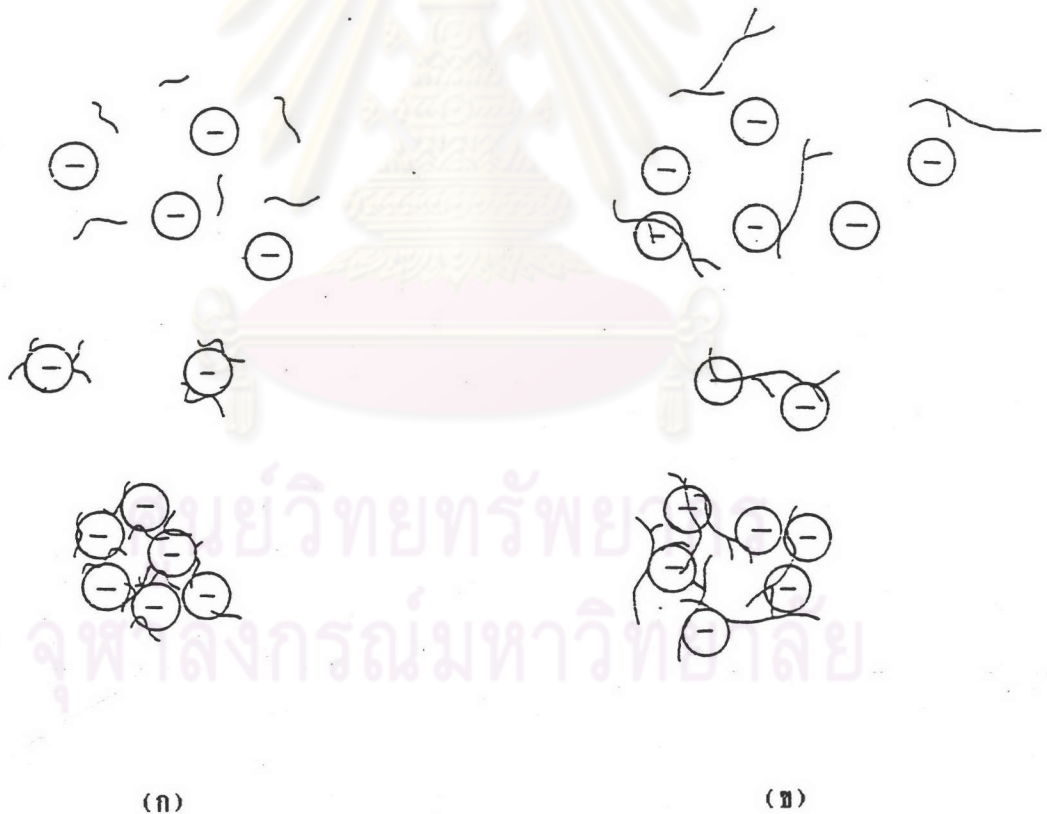
กลไกการคอลลิดและทำลายเสถียรภาพ

กลไกการจับอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบ

รูปที่ 3.3 ลักษณะการเกิดโคแอกกูเลชันโดยกลไกการคอลลิดและทำลายเสถียรภาพและกลไกแบบจับอนุภาคไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น

4. การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาค

โพลีเมอร์เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ซึ่งอาจมีประจุบวก, ประจุลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการใช้โพลีเมอร์ เกิดขึ้นจากการที่โมเลกุลของโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคได้หลายตำแหน่ง การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์หรือแรงปฏิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่ประจุเหมือนกันก็ได้ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีโพลีเมอร์เกาะติดแล้วถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้วสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคหรือฟล็อกเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถตกตะกอนได้เร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะการเกิดโคแอกกูเลชันโดยกลไกการใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาค

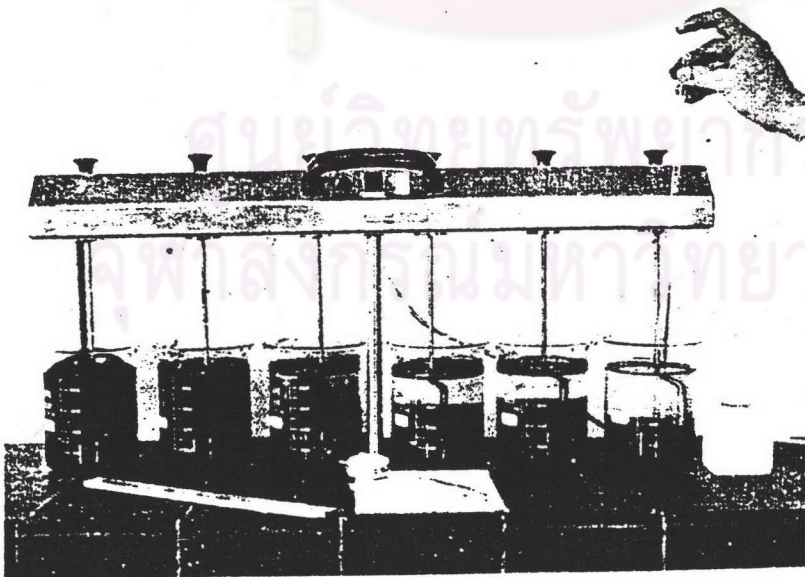
- (ก) โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค
- (ข) โพลีเมอร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

3.4 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์, พีเอช, ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์เอค, ลำดับในการเติมสารเคมี เป็นต้น กระบวนการโคแอกกูแลนต์ที่จะได้ผลที่ดีนั้นจะต้องมีการควบคุมสภาวะต่างๆให้เหมาะสม วิธีการในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้กันมานานและได้รับความนิยมมากคือวิธีการจาร์เทสต์ (jar test)

การควบคุมโดยวิธีจาร์เทสต์

จาร์เทสต์เป็นวิธีทดสอบที่ใช้กันมาตั้งแต่ดั้งเดิม และปัจจุบันยังนิยมการใช้กันอย่างกว้างขวาง จาร์เทสต์เป็นวิธีการทดสอบในบีกเกอร์ (beaker) โดยใช้เครื่องมือทดสอบซึ่งเป็นเครื่องกวนที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ซึ่งโดยทั่วไปจะมีใบพัดกวนน้ำ 6 ใบ (ดังรูปที่ 3.5) ในการทดลองแต่ละครั้งจะเลือกชนิดของสารเคมีและกำหนดสภาวะต่างๆ ได้แก่ ปริมาตรของตัวอย่างน้ำ, ความเร็วและระยะเวลาในการกวนผสมและการกวนช้า และระยะเวลาในการตกตะกอนไว้ค่าหนึ่ง จากนั้นจึงทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนปริมาณสารเคมีในแต่ละบีกเกอร์ ระดับพีเอชนั้นอาจรักษาให้คงที่หรือแปรเปลี่ยนขึ้นอยู่กับความมุ่งหมายในการทดลอง



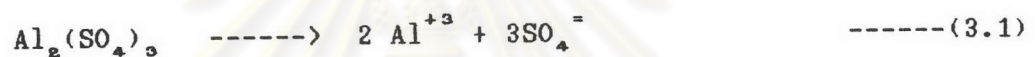
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำจาร์เทสต์

3.5 โคนอกกุลเลขชั้นด้วยสารส้ม

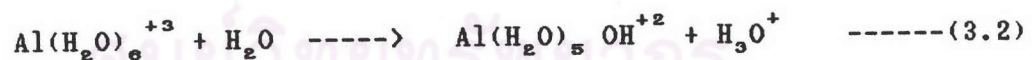
โคนอกกุลเลขชั้นที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ สารส้มและสารประกอบเหล็กบางชนิด สารส้มมีสูตรโมเลกุลคือ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3\text{H}_2\text{O}$ ส่วนสารประกอบเหล็กที่นิยมใช้กันได้แก่ FeCl_3 และ FeSO_4 สำหรับประเทศไทยสารส้มเป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถใช้ได้ดีกับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และสามารถหาได้ง่ายในราคาพอสมควร

3.5.1 เคมีของสารส้มในน้ำ

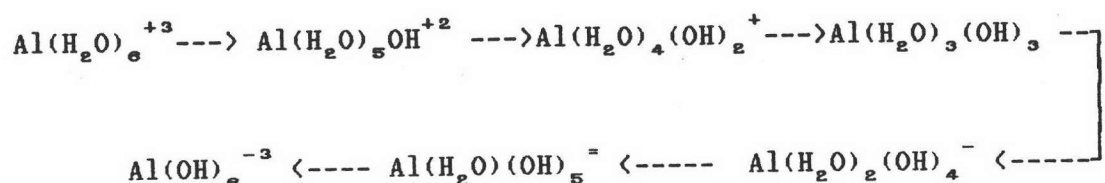
เมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวให้ไอออนบวกและลบดังสมการ 3.1



จากสมการ 3.1 ไอออนของอลูมิเนียมไม่ได้สามารถดำรงอยู่ในรูปไอออนอิสระแต่จะรวมตัวอยู่กับน้ำ 6 โมเลกุล ดังนั้นที่ถูกต้องจึงควรเขียนว่า $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ แต่ในการเขียนโดยทั่วไปจะละโมเลกุลของน้ำไว้ในฐานที่เข้าใจจึงเขียนเพียง Al^{+3} เนื่องจาก Al^{+3} มีคุณสมบัติเป็นกรดซึ่งสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) ให้เป็นไอออนคอมเพล็กซ์ของอลูมิเนียมชนิด monomeric hydroxo complex ดังสมการ 3.2

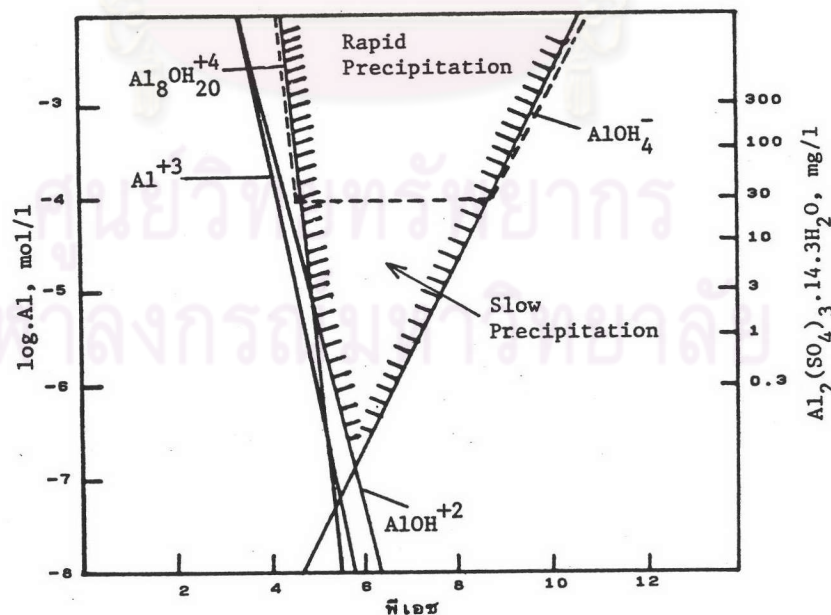


สมการ 3.2 จะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) 1 หมู่ ปฏิกิริยาสามารถเกิดต่อไปได้อีกทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่มากขึ้น ประจุบวกของ Al^{+3} จะลดลงเรื่อยๆจนหมดและกลายเป็นประจุลบตามลำดับดังนี้



ไอออนต่างๆ เหล่านี้ สามารถทำปฏิกิริยาและรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีอลูมิเนียม
 มากกว่าหนึ่งอะตอมได้ จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าสารคอมเพล็กซ์ของอลูมิเนียมที่มีอยู่ในน้ำภายใต้
 สภาวะปกติมี 4 ชนิดคือ Al^{+3} , $Al(OH)^{+2}$, $Al_2(OH)_2^{+4}$ และ $Al(OH)_4^-$ และพีเอชเป็นปัจจัย
 ที่กำหนดความเข้มข้นและชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ซึ่งมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ความสัมพันธ์
 ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆแสดงได้โดย stability diagram
 ในรูปที่ 3.6 จากไดอะแกรมแสดงให้เห็นว่าน้ำที่มีพีเอชต่ำจะมี Al^{+3} มากที่สุด เมื่อพีเอชเพิ่มมากขึ้น
 จะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลงตามลำดับ เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลาง $Al(OH)_3$
 จะเกิดมากกว่าไอออนอื่นๆ และเมื่อพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นด่างไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ นอกจากนี้
 ไดอะแกรมยังแสดงให้เห็นขอบเขตของการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ อีกด้วย อย่างไรก็ตามการตกผลึก
 ของ $Al(OH)_3$ อาจเกิดในอัตราที่ช้ามาก ถ้ามีการใช้สารส้มในปริมาณที่น้อยเนื่องจากไม่มีสารชักนำ
 (seed) ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องใช้ปริมาณสารส้มไม่น้อยกว่า 30 มก./ล. จึงจะมี $Al(OH)_3$ เกิดขึ้น
 ในอัตราที่เร็วพอสมควร พื้นที่ในเส้นประจะแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$

ในการทำโคแอกกูแลนต์ด้วยสารส้มควรมีพีเอชที่เป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย แต่ไม่ควรมี
 พีเอชต่ำ เนื่องจาก Al^{+3} ไม่ดูดซับผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และไม่ควรมีพีเอชสูงเกินไปเนื่องจาก
 จะทำให้ได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุลบ ทำให้เสียประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันกับอนุภาคคอลลอยด์
 ที่มีประจุลบเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.6 Stability diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มี ความขุ่น พื้นที่ภายในเส้นประเป็น
 บริเวณที่มีการตกผลึกของ $Al(OH)_3$ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอก
 เส้นประแต่ยังคงอยู่ในเขตแรงมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ

3.5.2 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ได้โดยกลไกหลัก 2 ประการซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณโคแอกกูแลนต์และพีเอชของน้ำ คือ กลไกแบบคอลลิมิวด์และทำลายประจุและกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก(sweep coagulation) โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มส่วนใหญ่จะมีกลไกเป็นแบบ sweep coagulation โดยอาจมีกลไกการคอลลิมิวด์และทำลายประจุเป็นกลไกร่วมซึ่งมีบทบาทน้อยกว่า

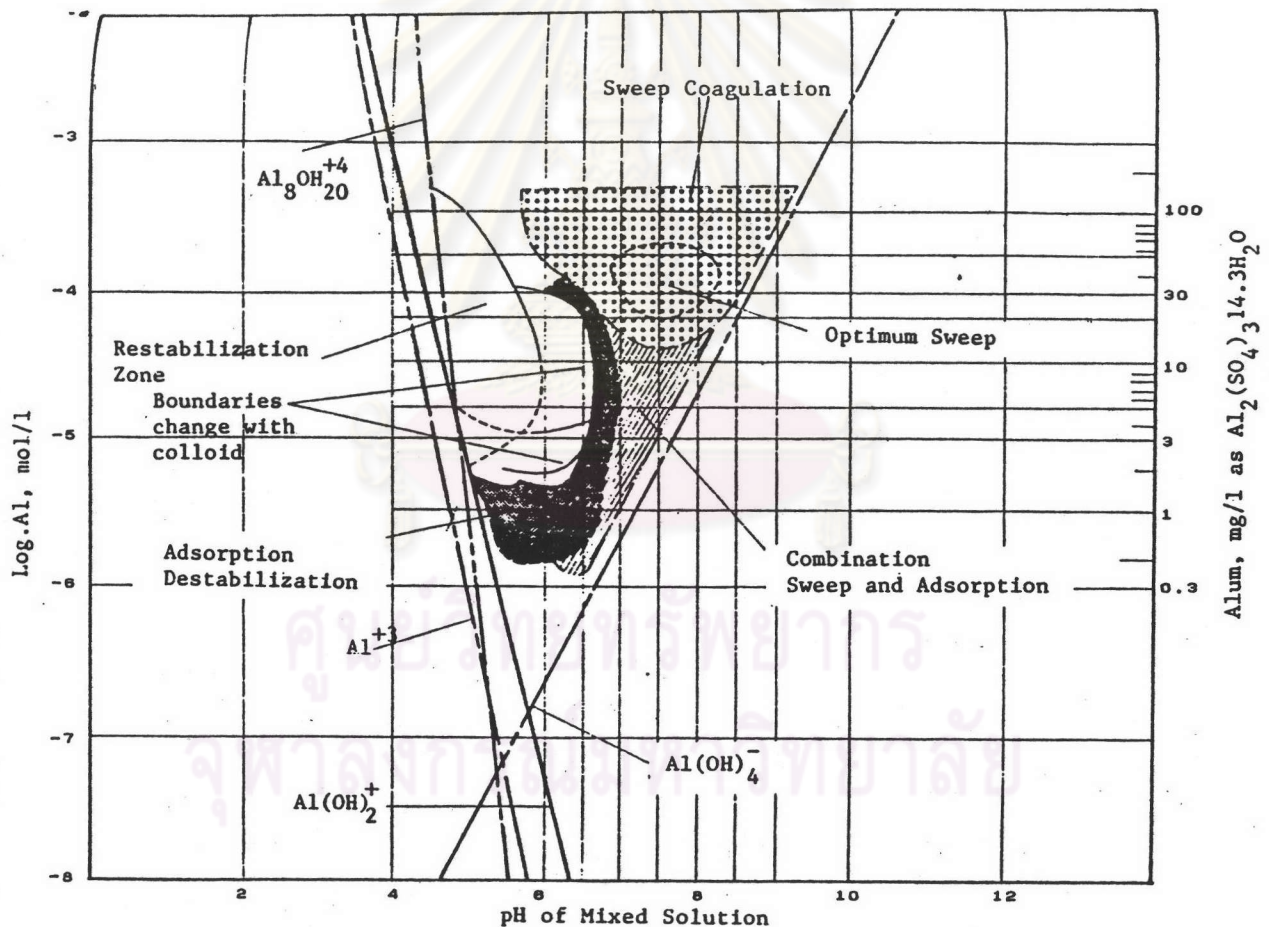
1. กลไกแบบคอลลิมิวด์และทำลายประจุ

กลไกแบบนี้เกิดจากการที่สารส้มแตกตัวให้ไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ เช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al_2(OH)_2^{+4}$ ซึ่งสามารถคอลลิมิวด์ของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันกลายเป็นฟล็อก กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ $[Al^{+3}]$ และ $[OH^-]^3$ มีค่าน้อยกว่า K_{sp} และพีเอชต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป ข้อดีของการเกิดกลไกแบบนี้คือใช้สารส้มปริมาณน้อยและให้สลัดจ์(sludge) ที่มีคุณสมบัติอัดตัวได้แน่นและสามารถดึงน้ำออกได้ง่าย ถึงแม้กลไกแบบนี้จะมีข้อดีดังกล่าวแต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและการควบคุมให้เกิดกลไกแบบนี้มักไม่สามารถกระทำได้อาจเนื่องจากกลไกแบบคอลลิมิวด์และทำลายประจุจะต้องเกิดและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4} -1 วินาที ดังนั้นไอออนคอมเพล็กซ์จะต้องคอลลิมิวด์ของอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลาดังกล่าว มิฉะนั้นไอออนคอมเพล็กซ์ก็จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนกระทั่งเกิดเป็นผลึก $Al(OH)_3$ ทำให้เกิดเป็นกลไกแบบ sweep coagulation

2. กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

สารส้มสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกได้โดยสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะเป็นปุย เมื่อนุภาคคอลลอยด์มาสัมผัสกับผลึกก็จะจับตัวอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมากก็จะได้ฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ที่สามารถตกตะกอนได้ง่าย สารส้มที่ใช้จะต้องมีปริมาณสูงพอจนทำให้ผลคูณของ $[Al^{+3}]$ และ $[OH^-]^3$ มีค่าเกินกว่าค่า K_{sp} และพีเอชของน้ำควรมีค่าอยู่ในช่วง 6-7.5 จึงจะได้ผลดีที่สุด กลไกแบบนี้สามารถเกิดได้ง่ายกว่ากลไกแบบแรกแต่มีข้อเสียคือต้องใช้สารส้มมากและให้สลัดจ์จำนวนมากมีคุณภาพต่ำคืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกได้ยาก

จากการรวบรวมผลการวิจัยเกี่ยวกับโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม และนำมาวิเคราะห์ Amirtharajar ได้เสนอหลักการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มดังแสดงในรูปที่ 3.7 จากไดอะแกรมแสดงให้เห็นว่ากลไกแบบ sweep coagulation จะให้ผลดีที่สุดเมื่อพีเอชมีค่า 6.8-8.2 และปริมาณการใช้สารส้ม 20-50 มก./ล. ส่วนกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุและแบบผสมกัน ระหว่างกลไกทั้งสองแบบทำให้เกิดโคแอกกูเลชันที่ปริมาณการใช้สารส้มน้อยกว่า 10 มก./ล.



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

3.6 โคนอกกู่เลขขึ้นด้วยโพลีเอเลคโตรไลต์ (6)

โพลีเอเลคโตรไลต์จะมี functional group ซึ่งทำให้โพลีเอเลคโตรไลต์อาจเป็นประจุลบ, ประจุบวก หรือไม่มีประจุในกรณีที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ ความเข้มข้นประจุของโพลีเอเลคโตรไลต์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของ functional group หรือความสามารถในการรวมตัวหรือแทนที่ functional group นอกจากนี้จะมีความสามารถในการแสดงประจุของโพลีเอเลคโตรไลต์แล้วยังเป็นตำแหน่งที่มีคุณสมบัติในการดูดซับด้วย ดังนั้นการทำลายเสถียรภาพโดยโพลีเอเลคโตรไลต์นั้นจะรวมกลไกซึ่งเกิดจากการผลของประจุและผลเนื่องจากการดูดซับ โพลีเอเลคโตรไลต์สามารถใช้เป็นได้ทั้งโคนอกกู่แลนต์และโคนอกกู่แลนต์เอคซันอยู่กับระบบและลักษณะการเติม

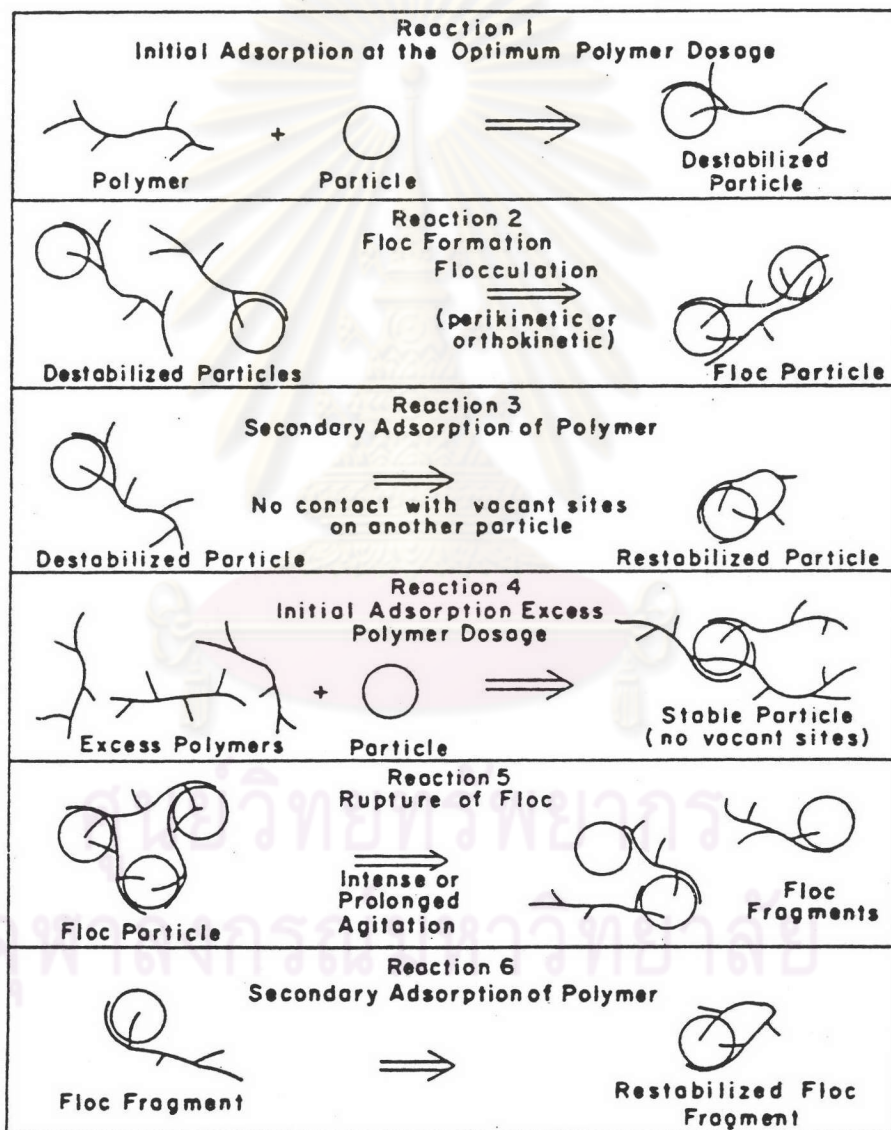
3.6.1 กลไกการทำลายเสถียรภาพโดยโพลีเอเลคโตรไลต์

กลไกที่เกิดจากการให้โพลีเอเลคโตรไลต์สามารถแยกได้เป็น 2 แบบคือกลไกซึ่งเกิดจากการให้โพลีเอเลคโตรไลต์ดูดซับบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์แล้วเชื่อมอนุภาคเหล่านั้นเข้าด้วยกัน และกลไกซึ่งเกิดจากโพลีเอเลคโตรไลต์ซึ่งมีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ดูดซับกับอนุภาค และลดแรงผลักระหว่างอนุภาค กลไกทั้งสองแบบจะสนับสนุนซึ่งกันและกันหรือต่อต้านกันขึ้นอยู่กับว่ามีแรงดึงดูดระหว่างโพลีเอเลคโตรไลต์และอนุภาคคอลลอยด์มากน้อยแค่ไหน ซึ่งกลไกทั้งสองได้แก่กลไกการใช้สะพานเชื่อมอนุภาค (bridging mechanism) และกลไก electrostatic path ตามลำดับ

1. กลไกการใช้สะพานเชื่อมอนุภาค

กลไกการใช้สะพานเชื่อมอนุภาคโดยโพลีเอเลคโตรไลต์ได้รับการยอมรับเนื่องจากความสามารถในการให้โพลีเอเลคโตรไลต์ทำลายเสถียรภาพอนุภาคที่มีประจุเหมือนกัน การสร้างโคนอกกู่เลขขึ้นด้วยกลไกชนิดนี้ประจุนับว่าสำคัญ แต่โพลีเอเลคโตรไลต์ต้องมีโมเลกุลขนาดใหญ่เพื่อเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวจะต้องแข็งแรงเพื่อต้านทานต่อความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคคือพื้นที่ว่างบนอนุภาคที่โพลีเอเลคโตรไลต์สามารถเกาะติดและเชื่อมโยงกันระหว่างอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน พื้นที่ว่างบนอนุภาคจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโพลีเอเลคโตรไลต์ที่เติม ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้มีโพลีเอเลคโตรไลต์ต่ออนุภาคมากเกินไป ทำให้ไม่มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคที่จะสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคใกล้เคียงไปหลายโพลีเอเลคโตรไลต์ที่ไม่ได้รวมตัวกับอนุภาคอื่นกลับมาจับบนตัวเองทำให้อนุภาคได้รับเสถียร

ภาพกลับคืนมาอีก (restabilized particles) นอกจากนั้นการกวนผสมเพื่อให้โพลีอิเล็กโทรไลต์กับอนุภาคสัมผัสกันนั้นก็ไม่ควรกวนให้แรงหรือนานเกินไป เพราะอาจทำให้สะพานเชื่อมอนุภาคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกจากกันได้ดังรูปที่ 3.8

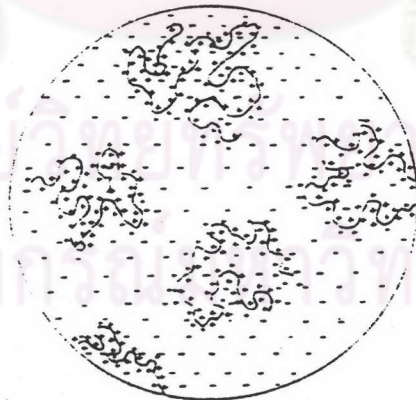


รูปที่ 3.8 กลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์แบบเชื่อมต่อกันด้วยโพลีเมอร์

2. กลไกการเกิดห่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Patch Mechanism)

กลไกนี้ใช้อธิบายพฤติกรรมการเกาะติดหรือทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่ใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคที่ต้องการทำลายเสถียรภาพนั้น หรือการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุลบช่วยในการรวมตะกอนของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพ ด้วยโคแอกกูแลนต์จากสารประกอบจำพวกโลหะ และเกิดปรากฏการณ์แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งการเกิดกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคที่มีการดูดซับบนอนุภาคเพียงไม่กี่ตำแหน่งไม่น่าจะส่งผลเช่นนั้นได้

ปกติอนุภาคต่างๆ จะมีตำแหน่งที่มีประจุบนผิวที่ค่อนข้างจะคงที่ เมื่อเติมโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาค โพลีอิเล็กโทรไลต์ไปเกาะติดอยู่บนผิวของอนุภาคเป็นห่อมๆ ทำให้บนผิวของอนุภาคมีกลุ่มประจุบวกที่มีค่าสูงล้อมรอบด้วยพื้นผิวของประจุลบที่มีค่าน้อยกระจายอยู่ทั่วทั้งอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จึงเกิดอนุภาคที่มีตำแหน่งประจุบนผิวต่างๆกันคือบางส่วนยังคงเป็นลบ บางส่วนกลายเป็นบวก การทำลายเสถียรภาพจะเกิดขึ้น เมื่ออนุภาคซึ่งมีประจุไฟฟ้าที่แตกต่างกันเป็นห่อมๆ เคลื่อนที่มาใกล้กันแล้วเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างห่อมประจุไฟฟ้าที่มีประจุที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.9 การจัดเรียงตัวของโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกบนอนุภาคซึ่งมีความเข้มของประจุลบต่ำ

3.6.2 การใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เอด

Robinson(7) ได้ทำการตรวจสอบ การใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์กับน้ำที่มีความขุ่นสูง(ความขุ่นสูงสุดประมาณ 5000 jtu) โดยใช้โพลีโอเลคโตรไลต์ที่มีประจุบวก, ประจุลบ และไม่มีประจุ พบว่าการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์ชนิดประจุบวกและไม่มีประจุสามารถให้ผลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้ม แต่โพลีโอเลคโตรไลต์ประจุลบไม่สามารถลดความขุ่นให้ได้มาตรฐานของน้ำหลังการตกตะกอนได้ ปริมาณการเติมโพลีโอเลคโตรไลต์ประจุบวกจะมีค่า 1-4 มก./ล. ขึ้นกับความขุ่นของน้ำดิบ (ช่วงความขุ่น 190-2000 JTU)

ตัวอย่างการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่ได้ผลดี มักพบว่าเป็นโพลีโอเลคโตรไลต์ประจุลบ สาเหตุอาจเป็นเพราะว่าอนุภาคฟล็อกซึ่งเกิดจากการใช้สารประกอบของโลหะส่วนใหญ่จะมีประจุบวก มีข้อที่น่าสังเกตว่าการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เอดนั้นไม่จำเป็นว่าจะต้องลดปริมาณการใช้สารประกอบโลหะ เพราะจุดมุ่งหมายในการเติมเป็นการช่วยในการรวมตะกอน ไม่ใช่เป็นการทำลายเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการตกตะกอน, การกรอง และลดปริมาณสลัดจ์ ในกรณีที่มีรายงานว่าการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์โคแอกกูแลนต์เอดสามารถลดปริมาณการใช้สารประกอบของโลหะได้นั้น สาเหตุน่าจะมาจากการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์สามารถลดเวลาในการตกตะกอนได้มากกว่าการทำลายเสถียรภาพ

Cohen และคณะ(8) ได้ทดสอบการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เอดโดยใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์กับน้ำขุ่น พบว่าโพลีโอเลคโตรไลต์ประจุลบนั้นแม้ว่าจะเป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่ได้ผลดีแต่ก็ไม่ปรากฏว่าสามารถลดความขุ่นได้มากกว่าสารใช้สารส้มเพียงอย่างเดียวได้ และปริมาณการเติมจะต้องเหมาะสมถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้อนุภาคได้รับเสถียรภาพกลับมาอีก การใช้โพลีโอเลคโตรไลต์ประจุบวกนอกจากจะสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอดแล้วยังสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้อีกด้วย ส่วนการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์ที่ไม่มีประจุนั้นจะปรากฏว่าได้ผลไม่ดีเท่าในกรณีที่มีประจุ

Black และHannah(9) ทำการทดสอบการลดความขุ่นโดยใช้สารส้มและใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เอด พบว่าการใช้โพลีโอเลคโตรไลต์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอดจะให้ผลดีที่สุดเมื่อประจุของอนุภาคลดลงจนเกือบเป็นศูนย์โดยการใช้สารส้ม และโพลีโอเลคโตรไลต์ประจุบวกจะให้ผลดีที่สุดเมื่อปริมาณการเติมสารส้มน้อย การใช้โพลีโอเลคโตรไลต์เป็นโคแอกกูแลนต์เอดจะสามารถเพิ่มหรือยับยั้งการทำลายเสถียรภาพและการสร้างฟล็อกได้ ขึ้นอยู่กับว่าปริมาณการเติมสารส้มและโพลีโอเลค-

ไตรโตนที่เลือกได้เหมาะสมหรือไม่ แม้ว่างานของ Black และ Hannah จะแสดงให้เห็นว่าการใช้โคแอกกูแลนต์เอดทุกชนิดสามารถสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ ถ้าใช้ปริมาณสารส้มและโคแอกกูแลนต์เอดที่เหมาะสม แต่ Muller และ Burbank(10)พบว่าโพลีเอคไตรโตนที่ไม่มีประจุจะให้ผลดีที่สุดทั้งในด้านอัตราการตกตะกอนและความขุ่นที่เหลืออยู่

3.7 ผลกระทบต่อสุขภาพซึ่งอาจเกิดจากการใช้สารส้มและโพลีเอคไตรโตนสังเคราะห์

3.7.1 ผลกระทบที่อาจเกิดจากการใช้สารส้ม

จากการสัมมนาที่จัดขึ้นในประเทศฮ่องกงในหัวข้อ"อลูมิเนียมในน้ำดื่ม" (1) ซึ่งจัดขึ้นโดยความร่วมมือระหว่าง The International Water Supply Association และ The Water Supplies Department ของรัฐบาลฮ่องกง ได้มีการเสนอว่า อลูมิเนียมมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบประสาทในมนุษย์และโรคอื่น ๆ ที่เกิดในปลาและแพลงค์ตอน

ปริมาณอลูมิเนียมที่สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์จะมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกขับถ่ายไปกับปัสสาวะ อลูมิเนียมในน้ำดื่มจะมีปริมาณเพียงร้อยละ 2 ของปริมาณที่ร่างกายได้รับจากอาหารทั้งหมด แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่าในปริมาณเพียงเท่านี้อาจมีความเกี่ยวข้องกันระหว่างอลูมิเนียมในน้ำดื่มและโรค Alzheimer (โรคเกี่ยวกับความผิดปกติของระบบประสาท) ได้ ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากอลูมิเนียมในน้ำสามารถย่อยสลายและดูดซึมในน้ำได้ดีกว่าในอาหาร

แม้จะยังไม่ได้มีการพิจารณาเลิกการใช้สารประกอบของอลูมิเนียมในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากผลกระทบต่อสุขภาพซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ควรที่จะมีการระมัดระวังในการใช้ให้มากขึ้นเพื่อโอกาสเสี่ยงในการเกิดอันตรายจะได้น้อยลง และควรรักษาเพื่อที่จะหาโคแอกกูแลนต์อื่นทดแทนการใช้สารส้ม

3.7.2 ผลกระทบที่อาจเกิดจากการใช้โพลีเอคโตรไลต์สังเคราะห์

แม้การใช้โพลีเอคโตรไลต์ในการผลิตน้ำประปามีข้อได้เปรียบมากมาย แต่ก็ไม่ใช่ว่าจะไม่มีข้อเสียอยู่เลย โพลีเอคโตรไลต์อาจมีการปนเปื้อนจากโมโนเมอร์หรือสารอื่นซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต หรืออาจทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นที่ใช้ในการผลิตน้ำทำให้เกิดสารที่ก่อให้เกิดมะเร็งได้ จากผลกระทบที่อาจมีต่อสุขภาพในระยะยาวซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ทำให้ในบางประเทศเช่น ญี่ปุ่น มีการห้ามใช้โพลีเอคโตรไลต์สังเคราะห์ในการผลิตน้ำดื่ม(2,3)

3.8 โพลีเอคโตรไลต์จากวัสดุธรรมชาติ

ปัจจุบันมีรายงานว่า การใช้โพลีเอคโตรไลต์สังเคราะห์นั้น อาจมีผลกระทบในระยะยาวต่อสุขภาพของคนเราได้(2,3) จึงทำให้การใช้โพลีเอคโตรไลต์จากวัสดุธรรมชาติเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้น การใช้โพลีเอคโตรไลต์จากวัสดุธรรมชาตินี้ข้อดีคือ ไม่เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ, สามารถย่อยสลายได้ง่ายและสามารถใช้ได้ปริมาณมากโดยไม่มีอันตราย

3.8.1 ชนิดของโพลีเอคโตรไลต์จากแหล่งธรรมชาติ(11)

โพลีเอคโตรไลต์จากวัสดุธรรมชาติ ได้แก่ แป้ง, galactomannans, cellulose derivatives, microbial polysaccharide, gelatins และ glues โพลีเอคโตรไลต์เหล่านี้สามารถละลายน้ำได้และส่วนใหญ่จะไม่มีประจุ แหล่งที่มาและคุณสมบัติของโพลีเอคโตรไลต์แต่ละชนิดเป็นดังนี้

1. แป้ง (Starches)

แป้งได้จากแหล่งต่างๆ เช่น มันฝรั่ง, ข้าวโพด, มันสำปะหลัง และข้าวฟ่าง โพลีแซคคาไรด์ที่ได้จากแป้งต่างๆ เหล่านี้จะมี ขนาดและรูปร่างของอนุภาค, อุณหภูมิในการเกิดเจล, อัตราการพองตัวในสารละลาย และอัตราส่วนของ amylose และ amylopectin ที่แตกต่างกัน โพลีแซคคาไรด์เหล่านี้อาจไม่มีประจุ, มีประจุบวก หรือมีประจุลบขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียม เช่น โพลีแซคคาไรด์ที่มีประจุบวกเนื่องจากการแทนที่ของ quaternary ammonium group และโพลีแซคคาไรด์ประจุลบจากการแทนที่ของ carboxylic group

2. Galactomannans

galactomannan เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วย D-glucose และ D-mannose พบในเอนโดสเปิร์มของพืชตระกูลถั่ว อัตราส่วนของ galactose ต่อ mannose จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พืชชนิดที่มีความสำคัญในการนำไปใช้งานด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำคือถั่ว guar ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่มีประจุ

3. Cellulose derivatives

เซลลูโลสคือคาร์โบไฮเดรตโพลีเมอร์ ประกอบด้วย anhydroglucose ซึ่งมีสูตรเคมี คือ $C_6H_{10}O_5$ เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ในต้นไม้และพืชชั้นสูง ส่วนที่ได้จากเซลลูโลสที่ใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพน้ำคือ carboxy methyl cellulose (CMC)

4. Microbial polysaccharide

microbial polysaccharide คือโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งแบคทีเรียสังเคราะห์ได้จากน้ำตาลที่มีสูตรโครงสร้างง่ายๆ เช่น กลูโคส โดยการหมักร่วมกับ เอนไซม์, สารอาหาร, ออกซิเจน และคะตะไลส์

5. Glue และ Gelatins

glue ที่ใช้ในงานด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำ ได้มาจาก collagen ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเนื้อเยื่อสัตว์พบในผิวหนัง, กล้ามเนื้อ และ กระดูก glue ประกอบด้วยโมเลกุลที่มีขนาดที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ polypeptide อย่างง่ายจนถึงโมเลกุลคอลลาเจนขนาดใหญ่ น้ำหนักโมเลกุลจะแปรผันอยู่ในช่วง 3,000 ถึง 80,000

gelatin เป็นสารประกอบโปรตีนขนาดใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 15,000-250,000 gelatin อาจประกอบด้วยอนุกรมของกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันเป็น polypeptide

3.8.2 การใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์จากวัชพืชธรรมชาติในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

การใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์ในงานปรับปรุงคุณภาพน้ำได้มีมานานแล้ว(12) โดยเริ่มจากการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์จากวัชพืชธรรมชาติ จากบันทึกสันสกฤตในอินเดีย รายงานว่า มีการใช้เมล็ดของต้น nirmali (*Strychnos potatorum*) ในการทำให้น้ำใสมากกว่า 4000 ปีมาแล้ว ในประเทศเปรูมีการทำน้ำให้ใสโดยใช้ยางของใบต้นกระบองเพชรบางชนิด จากรายงานของ Jahn(13) พบว่าหลายประเทศในแอฟริกาเช่น ไนจีเรีย, ชูดาน และทูนีเซีย มีการใช้พืชพื้นเมืองเช่น ถั่วต่างๆ, มะรุม เติมลงในน้ำดื่มเพื่อกำจัดความขุ่นหรือสีและกลิ่น มาเป็นเวลาช้านานแล้ว

การใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์จากพืชส่วนใหญ่จะใช้โครงสร้างของโพลีแซคคาไรด์ ซึ่งจะสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์หรือโคแอกกูแลนต์เอดขึ้นอยู่กับชนิดของพืช พืชบางชนิดอาจเป็นโคแอกกูแลนต์ที่ไม่ดี แต่สามารถเป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่มีประสิทธิภาพสูงได้ และลำดับในการเติมโคแอกกูแลนต์ก็มีความสำคัญด้วยเช่นกัน(13)

ตัวอย่างโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เอด ซึ่งได้จากส่วนต่างๆ ของพืชที่มีชื่อรู้จักกันในประเทศไทยแสดงในตารางที่ 3.1 รายชื่อพืชในภาษาไทยอ้างอิงตามทำเนียบชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์(14)

ตารางที่ 3.1 โคนอกกแฉนที่จากพืชชนิดต่างๆ (21)

Order	Family	Species	ชื่อภาษาอังกฤษ	ชื่อภาษาไทย	ส่วนที่ใช้
Leguminales	Papilionaceae	<u>Vicia faba</u>	broad bean	ถั่วปากอ้า	เมล็ด
		<u>Phaseolus vulgaris</u>	haricot bean	ถั่วแดงหลวง	เมล็ด
		<u>Phaseolus roxborghii</u>	black gram	ถั่วเขียว	เมล็ด
		<u>Cajanus indicus</u>	pigeon pea	ถั่วแระ	เมล็ด
		<u>Lens esculenta</u>	lentil	ถั่วแดง	เมล็ด
		<u>Archis hypogaea</u>	ground nut	ถั่วลิสง	เมล็ด
		<u>Dolichos catiang</u>	cow pea	ถั่วพุ่ม	เมล็ด
		<u>Cyamopsis psoraloides</u>	guar bean	ถั่วกัวร์	เมล็ด
Papaverales	Caesalpinaceae	<u>Tamarindus indica</u>	tamarind	มะขาม	เมล็ด
	Mimosaceae	<u>Acacia catechu</u>	black catechu	สีเสียดเหนือ	เปลือกไม้
	Moringaceae	<u>Moringa Oleifera</u>	horse radish drumstick tree	มะรุม	เมล็ด
Sapindales	Anacardiaceae	<u>Semecarpus anacardium</u>	marking-nut tree	รักขน	เมล็ด
		<u>Mangifera indica</u>	mango	มะม่วง	เมล็ด
Ranales	Annonaceae	<u>Annona squamosa</u>	custard apple	น้อยหน่า	เมล็ด
Rosales	Rosaceae	<u>Prunus dulcis</u>	bitter and sweet almond	อัลมอนด์	เมล็ด
		<u>Prunus armeniaca</u>	apricot	แอปริคอต	เมล็ด
		<u>Prunus persica</u>	peach	ท้อ	เมล็ด
		<u>Hibiscus esculentus</u>	okra	กระเจียบมอญ	เมล็ด
Malvales	Malvaceae	<u>Hibicus sabdariffa</u>	roselle	กระเจียบแดง	เมล็ด

NEERI (12) ในประเทศอินเดีย ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของพืชหลายชนิดในการใช้ เป็น โคนอกกูแลนต์เอค โดยใช้เมล็ดของมะรุม, มะขาม, ถั่วกัวร์, ถั่วแดง และกระเจี๊ยบแดง จากผลการ ศึกษาการใช้โคนอกกูแลนต์เอคจากพืชเหล่านี้ใน ห้องทดลอง, โรงทดลอง และโรงผลิตน้ำจริง โดยใช้ น้ำดิบที่มีความขุ่นอยู่ในช่วง 50-7500 NTU พบว่า

- ปริมาณการเติมจะอยู่ในช่วง 2-20 มก./ล. ในช่วงพีเอช 4-9
- สำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำกว่า 300 NTU การใช้โคนอกกูแลนต์เอคไม่ได้เป็นการประหยัด ค่าสารเคมี
- สำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง การใช้โคนอกกูแลนต์เอคอาจจะสามารถประหยัดการใช้สารส้ม ได้ถึงร้อยละ 40-54
- โคนอกกูแลนต์เอคจะเสื่อมคุณภาพภายในระยะเวลาประมาณ 3 เดือน แม้จะมีการเติม สารกันบูดก็ตาม

การศึกษาใช้โพลีเมอร์จากเมล็ดพืชเหล่านี้ในประเทศอินเดีย จะใช้วิธีการเตรียมที่เหมือนกันคือ

1. ทำความสะอาดเมล็ดคืบ และบดให้เป็นผงละเอียด
2. ร่อนผงแป้งผ่านตะแกรง แล้วผสมโซดาแอสในอัตราส่วน 1:9
3. เติมน้ำ 0.5 ลบ.ม. ลงในผงแป้ง 1 กก. ทำให้เป็นสารละลาย
4. ให้ความร้อนแก่สารละลาย (ไม่จำเป็นต้องเคี้ยว)
5. เติมน้ำให้สารละลายมีปริมาตรเป็น 1 ลบ.ม.

จิราพร(15) ได้ทำการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชชนิดต่างๆ ได้แก่ มะรุม, กระเจี๊ยบแดง, ถั่วแดง, ถั่วลิสง และมะขาม มาทำการทดสอบความสามารถในการใช้เป็นโคนอกกูแลนต์และโคนอกกูแลนต์เอค ร่วมกับสารส้ม พบว่า การใช้เมล็ดพืชดังกล่าวสามารถใช้เป็นโคนอกกูแลนต์ได้แต่ไม่สามารถผลิตน้ำใส ให้ได้คุณภาพเท่าเทียมกับการใช้สารส้มได้ และเหมาะสำหรับใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นมากกว่า 100 NTU สำหรับในการใช้เป็นโคนอกกูแลนต์เอค นั้น จะช่วยประหยัดการใช้สารส้มได้มากกว่าร้อยละ 50

Bulusu(16) ได้ใช้เมล็ดมะขามเป็นโคนอกกูแลนต์เอคร่วมกับการใช้สารส้ม โดยทำการทดลอง กับน้ำในแม่น้ำ Kanhan ซึ่งมีความขุ่น 5000-7000 มก./ล. ปกติต้องใช้สารส้ม 360 มก./ล. เพื่อลด ความขุ่นของน้ำหลังตกตะกอนให้เหลือประมาณ 30 มก./ล. เมื่อใช้โคนอกกูแลนต์เอคจากเมล็ดมะขาม 6 มก./ล. ร่วมกับสารส้ม 160 มก./ล. สามารถลดความขุ่นของน้ำให้เหลือเท่ากับ 30 มก./ล. ได้

จากการทดลองในครั้งนี้ พบว่า การใช้โคแอกกูแลนต์เอคจากเมล็ดมะขามสามารถลดค่าสารส้มลงได้ถึงร้อยละ 51 นอกจากนี้ฟล็อกที่เกิดจากการใช้เมล็ดมะขามเป็นโคแอกกูแลนต์เอคจะเหนียวและแน่น สามารถตกตะกอนได้เร็ว ทำให้เวลาในการตกตะกอนลดลงด้วย ขั้นตอนในการเตรียมโคแอกกูแลนต์เอคจากเมล็ดมะขามมีดังนี้

1. นำเนื้อเมล็ดมะขามแยกเปลือกออกแล้วมาบดให้เป็นผงละเอียด
2. ละลายผงแป้งด้วยน้ำให้มีความเข้มข้นประมาณ 33-40 %
3. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 40 % ในอัตรา สารละลายผงแป้ง 10 ส่วน ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ส่วน ขณะเติมให้คนอย่างสม่ำเสมอ จะได้ก้อนแป้งซึ่งมีอายุการเก็บประมาณ 2 วัน
4. นำก้อนแป้งที่ได้ 1 ส่วนมาละลายน้ำ 5-6 ส่วน ด้วยเครื่องกวนผสม จะได้สารละลายที่มีความเข้มข้นประมาณ 5 %

Jahn(17) ได้ทำการทดลองใช้เมล็ดมะขามเป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดความขุ่น พบว่ามะขามสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้ และการใช้มะขามที่พันธุ์แตกต่างกันก็จะให้ประสิทธิภาพที่ไม่เท่ากันตลอดจนปริมาณการเติมที่เหมาะสมก็แตกต่างกันด้วย ซึ่งประสิทธิภาพที่ไม่เท่ากันของมะขามในแต่ละพันธุ์อาจมีสาเหตุมาจาก อัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างส่วนที่เป็นโคแอกกูแลนต์และส่วนประกอบอื่นของเนื้อเมล็ด, ธรรมชาติทางเคมีที่ต่างกันของโคแอกกูแลนต์ และความยากง่ายของปฏิกิริยาระหว่างโคแอกกูแลนต์และสารแขวนลอยด้วย

Kawamura(3) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติและโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ โดยใช้ chitosan ซึ่งเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกที่ได้จากสาร chitin ที่มีอยู่ในเปลือกของสัตว์จำพวก กุ้ง, ปู และ sodium alginate ซึ่งเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายสีน้ำตาล (kelp) พบว่า การใช้ chitosan เป็นโคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ และสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอคได้เช่นเดียวกับโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ แต่จะสามารถใช้ได้ในช่วงความขุ่นที่กว้างกว่าและใช้ได้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง ส่วนการใช้ sodium alginate ซึ่งเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบ พบว่าสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอคร่วมกับสารส้ม การที่ sodium alginate สามารถใช้แทนโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ได้ดีเนื่องจาก ความปลอดภัย, ความสามารถในการย่อยสลาย และราคาที่พอสมควร



3.9 เมล็ดมะขาม

3.9.1 การใช้ประโยชน์จากเมล็ดมะขาม

มะขาม (*Tamarind indica* Linn., leguminosae) เป็นพืชเขตร้อนที่มีปลูกอยู่ทั่วไปในหลายประเทศเช่น อินเดีย, พม่า, ศรีลังกาและกลุ่มประเทศในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผลของมะขามมีลักษณะเป็นฝักประกอบด้วย เนื้อ, เมล็ด และ เปลือกและเส้นใย คิดเป็นปริมาณร้อยละ 55, 33.9 และ 11.1 ตามลำดับ(18) ดังแสดงในรูปที่ 3.10

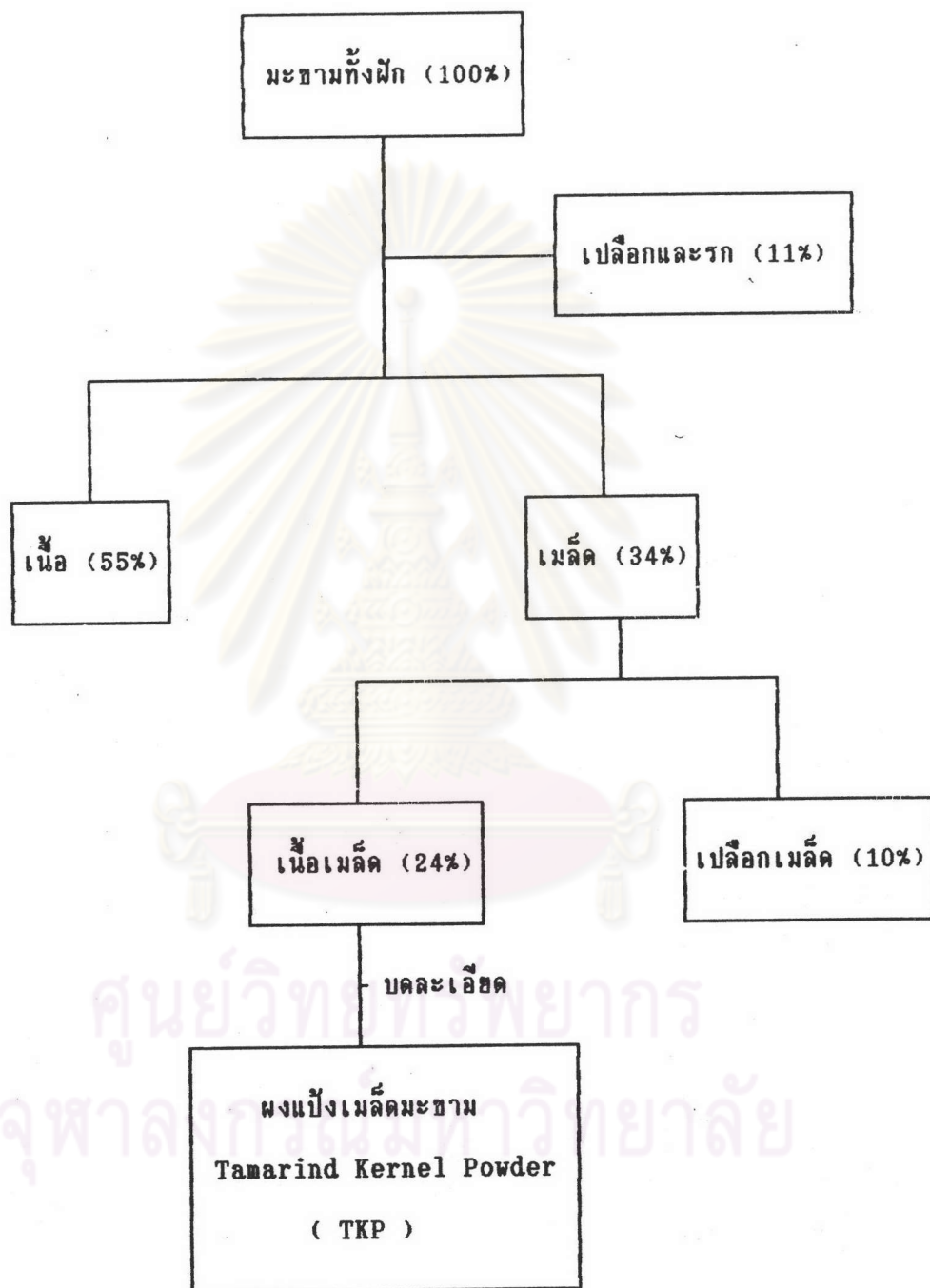
ประเทศไทยมีปริมาณการผลิตมะขามประมาณปีละแสนตัน(4) ทำให้มีเมล็ดมะขามซึ่งเป็นผลพลอยได้ประมาณสามหมื่นตันต่อปี การนำมะขามมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะเป็นการบริโภคในส่วนของเนื้อ ในส่วนของเมล็ดมะขามยังไม่ค่อยมีการใช้ให้เกิดประโยชน์มากนัก ส่วนใหญ่จะใช้คั่วผสมกับกาแฟหรือรับประทานเป็นของขบเคี้ยว ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพื่อนำเอาเมล็ดมะขามมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

ในประเทศอินเดียมีการใช้เมล็ดมะขามเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอผ้าฝ้ายและปอ เพื่อให้เป็นตัวลงพื้น(sizing)และเก็บตกแต่ง(finishing) นอกจากนี้ยังมีรายงานการใช้ประโยชน์อื่นๆอีกมากมายเช่น ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, ยา, สิ่งพิมพ์, เครื่องหนัง และ พลาสติก

3.9.2 องค์ประกอบของผงแป้งเมล็ดมะขาม

เมล็ดมะขามซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตเนื้อมะขามประกอบด้วย เนื้อเมล็ด(kernel) และเปลือกเมล็ด(testa) ประมาณร้อยละ 60-70 และ 30-40 ตามลำดับ (18) องค์ประกอบโดยทั่วไปของเนื้อเมล็ดมะขามจะประกอบด้วย โปรตีนร้อยละ 15.4-22.7, ไขมันร้อยละ 3.9-7.4, เส้นใยร้อยละ 0.7-8.2, คาร์โบไฮเดรตร้อยละ 65.1-72.2 และเถ้าร้อยละ 2.45-3.3

เมล็ดมะขามเมื่อนำมาแยกเอาเปลือกเมล็ดออกแล้วนำเนื้อเมล็ดไปคั่วให้เป็นผงละเอียด จะได้ผงแป้งเมล็ดมะขาม (tamarind kernel powder) ส่วนประกอบของผงแป้งเมล็ดมะขามจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ตามความสามารถในการละลายและการเป็นเจลคือส่วนที่ 1 มีปริมาณร้อยละ 2-4 สามารถละลายในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสได้ ภายใน 2-3 นาที ส่วนที่ 2 เป็นโพลี-



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของมะขามโดยประมาณ

แซคคาไรด์ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้องเมื่อผสมน้ำ 10 เท่าและกวนเป็นเวลา 45 นาที มีอยู่ร้อยละ 20-30 โพลีแซคคาไรด์ส่วนที่ 3 จะไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะละลายในน้ำเดือดใน 20 นาที มีอยู่คิดเป็นร้อยละ 30-35 ส่วนที่ 1 ไม่ใช่โพลีแซคคาไรด์ที่แท้จริงแต่เป็น polyuronide ซึ่งไม่มีคุณสมบัติเป็นเจล แต่ในส่วนที่ 2 และ 3 จะมีความสามารถในการเป็นเจลและการลงพื้นที่ดีมาก ส่วนที่เหลือยังไม่มีการศึกษาว่าเป็นสารพวกใด (19)

คุณสมบัติในการเป็นเจลและการลงพื้นที่ของผงแป้งเมล็ดมะขามเนื่องจากโพลีแซคคาไรด์ที่มีอยู่ในเมล็ดมะขาม โพลีแซคคาไรด์ในเมล็ดมะขามเป็นชนิดไม่มีประจุประกอบด้วย xylose, galactose และ glucose ในอัตราส่วน 1:2:3 (18, 19) เมื่อละลายน้ำให้สารละลายที่เหนียวหนืด (mucilaginous) และเป็นเจลภายใต้พีเอชที่เป็นกรดและเป็นกลางได้ดีแตกต่างจากเปกตินในผลไม้อื่นซึ่งเป็นเจลเฉพาะในสภาพที่เป็นกรดเท่านั้น ทำให้โพลีแซคคาไรด์จากเมล็ดมะขามมีชื่อเฉพาะเรียกว่าเจลโลส (jellose)

3.9.3 การเตรียมผงแป้งเมล็ดมะขาม

การนำเมล็ดมะขามมาใช้ประโยชน์ต้องมีการแยกเปลือกเมล็ดออกเสียก่อน เนื่องจากเมล็ดมะขามมีส่วนของเปลือกเมล็ดซึ่งมีสีและมีสารเคมีที่ทำให้เกิดรสฝาด การปะปนเปลือกเมล็ดลงในผงแป้งเมล็ดมะขามจะทำให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพและการใช้ประโยชน์ของผงแป้งได้ กระบวนการในการผลิตผงแป้งเมล็ดมะขามจากเมล็ดมะขามดิบมีหลักพื้นฐานง่ายๆ คือ ต้องทำการแยกเปลือกเมล็ดที่มีสีน้ำตาลออก จากนั้นนำเอาเฉพาะเนื้อเมล็ดไปบดให้เป็นผงละเอียดตามขนาดที่ต้องการ ในประเทศอินเดียมีการจัดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตผงแป้งเมล็ดมะขามไว้มากมาย ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้สามารถแบ่งออกได้อย่างกว้างๆ เป็น 2 วิธี คือ

1. การนำเมล็ดดิบมาผ่านกระบวนการให้ความร้อน โดยการอบหรือคั่วที่อุณหภูมิ 125-200 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับการทดลอง เพื่อให้เปลือกเมล็ดกรอบร้อนสามารถแยกออกจากเนื้อเมล็ดได้ด้วยวิธีการง่ายๆ เช่น การขัดสี

2. นำเมล็ดดิบมาทำการแยกเปลือกเมล็ดออกเลย โดยไม่ผ่านการอบ การแยกเปลือกทำได้โดยใช้เครื่องจักรที่ทำให้เมล็ดแตกออกหยาบๆ แล้วทำการแยกเปลือกเมล็ดออกไป จากนั้นจึงนำเอาเนื้อเมล็ดมาบดให้เป็นผงละเอียดอีกครั้งหนึ่ง

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการในการเตรียมทั้งสองวิธีแล้ว กระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยและให้ผลผลิตสูง แต่การทำเป็นอุตสาหกรรมจะต้องมีการลงทุนค่าเครื่องจักรและมีการตรวจสอบคุณภาพที่ดี ส่วนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนนั้นจะสามารถทำได้ง่ายกว่าไม่ต้องมีการลงทุนเบื้องต้นมากนัก แต่จะต้องระวังเรื่องคุณภาพของผงแป้ง เพราะการให้ความร้อนที่ไม่เหมาะสมนั้นอาจทำให้ผงแป้งที่ได้มีคุณภาพลดลงได้

3.9.4 ความปลอดภัยในการใช้เมล็ดมะขาม

ในการเตรียมผงแป้งเมล็ดมะขามนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการแยกเอาเปลือกออก มิฉะนั้นอาจเกิดอาการเกี่ยวกับทางเดินอาหาร เช่น ท้องร่วง, ท้องผูกได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์เนื้อเมล็ดไม่มีการบ่งชี้มีสารพิษต่ออย่างใดแต่กลับพบว่ามีผลในการเป็นสารรักษาโรคได้ โดยมีการแนะนำว่าผงแป้งเมล็ดมะขามสามารถใช้เป็นสารรักษาโรคท้องร่วงและบิดได้(18)

วรนนท์และประภาศ (20) ได้ศึกษาถึงคุณภาพทางโปรตีนและความปลอดภัยของเมล็ดมะขาม โดยนำเมล็ดมะขามมาคั่วแล้วแช่น้ำเพื่อลอกเอาเปลือกเมล็ดออก จากนั้นจึงนำเอาเนื้อเมล็ดมาทดสอบจากผลการศึกษาพบว่าเมล็ดมะขามมีคุณค่าทางโปรตีนปานกลาง และไม่พบอาการเป็นพิษหลังจากทดลองฉีดเข้าหนู 7 วัน นอกจากนี้ยังได้มีการนำเอาเนื้อเมล็ดมะขามไปทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเปรียบเทียบกับระหว่างเมล็ดที่ผ่านการคั่วและเมล็ดดิบ พบว่า ปริมาณโปรตีน, ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดทั้งสองแบบไม่แตกต่างกัน แต่ปริมาณเกลือแร่ในเมล็ดที่ผ่านการคั่วจะลดลงอย่างมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย