



บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

ทฤษฎีของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ในการผลิตน้ำประปาขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ การกำจัดความขุ่นหรือสารแขวนลอย ความขุ่นที่สร้างปัญหาให้กับการผลิตน้ำประปาเกิดจากอนุภาคขนาดเล็กที่เรียกว่า คอลลอยด์ ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 10^6 มม. จนถึง 10^3 มม. เนื่องจากการที่คอลลอยด์มีขนาดเล็กมากทำให้มันไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด และการที่อนุภาคคอลลอยด์มีประจุไฟฟ้า จึงทำให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาค ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อนุภาคต่าง ๆ กระจายอยู่ในน้ำโดยไม่รวมกันเป็นก้อนหรือฟลอค เพื่อจะทำให้มีขนาดใหญพอที่จะตกตะกอนได้ จึงทำให้คอลลอยด์กระจายอยู่ทั่วไปในน้ำได้ จึงมีความจำเป็นในการทำให้เกิดการจับกลุ่มของอนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ จนเป็นฟลอคซึ่งสามารถตกตะกอนได้ง่าย กระบวนการที่จะทำให้อ่อนนุ่มหลาย ๆ อนุภาครวมตัวกันเป็นฟลอคเรียกว่า "โคแอกกูเลชัน" (Coagulation)

โคแอกกูเลชันต้องมี 2 ขั้นตอน คือ

ก. ต้องทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น

ข. ต้องทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสกัน (Transport of Colloidal Particles) ให้มากที่สุด เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม และควรให้อนุภาคเกาะติดแน่นและหลุดน้อยที่สุด (มันสิน ,2526)

1. เสถียรภาพของคอลลอยด์

คอลลอยด์นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้ โดยไม่ตกตะกอนภายในเวลาอันสั้น ตารางที่ 2 - 1 จะแสดงความสามารถในการตกตะกอนของคอลลอยด์เปรียบเทียบกับอนุภาคดินเหนียวและแบคทีเรีย จะเห็นว่าคอลลอยด์ใช้เวลา 2 - 200 ปีในการตกตะกอนได้ตัวเอง

ตารางที่ 2-1 ขนาดและความสามารถในการตกตะกอนของอนุภาคต่าง ๆ

| ขนาดอนุภาค (มม.) | ขนาดอนุภาค (ไมครอน) | ชนิดของอนุภาค | เวลาที่ใช้ในการ ตกตะกอนในน้ำ จนได้ระยะทาง 1 เมตร |
|-----------------------|-------------------------|---------------|---|
| 10^{-2} | 10 | ดินเหนียว | 2 ชม. |
| 10^{-3} | 1 | แบคทีเรีย | 8 วัน |
| 10^{-4} | 10^{-1} | คอลลอยด์ | 2 ปี |
| 10^{-5} | 10^{-2} | คอลลอยด์ | 20 ปี |
| 10^{-6} | 10^{-3} | คอลลอยด์ | 200 ปี |

ที่มา : Water Treatment Handbook , 1991

เสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นอยู่กับแรง 2 ชนิดคือ

1. แรง Van der Waals เป็นแรงดูด ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและรูปแบบของคอลลอยด์
2. แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้า (Electrostatic Repulsive Force) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณประจุไฟฟ้าที่ผิวของคอลลอยด์

การที่คอลลอยด์มีเสถียรภาพอยู่ได้เนื่องจากมีแรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้ามากกว่าแรงดูด ดังนั้นการลดแรงผลักระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ จนทำให้มีค่าน้อยกว่าแรงดูด จะทำให้คอลลอยด์สามารถเข้ามาใกล้กันและจับตัวกันเป็นฟlocs ซึ่งเป็นการทำให้คอลลอยด์เสียเสถียรภาพ

2. การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

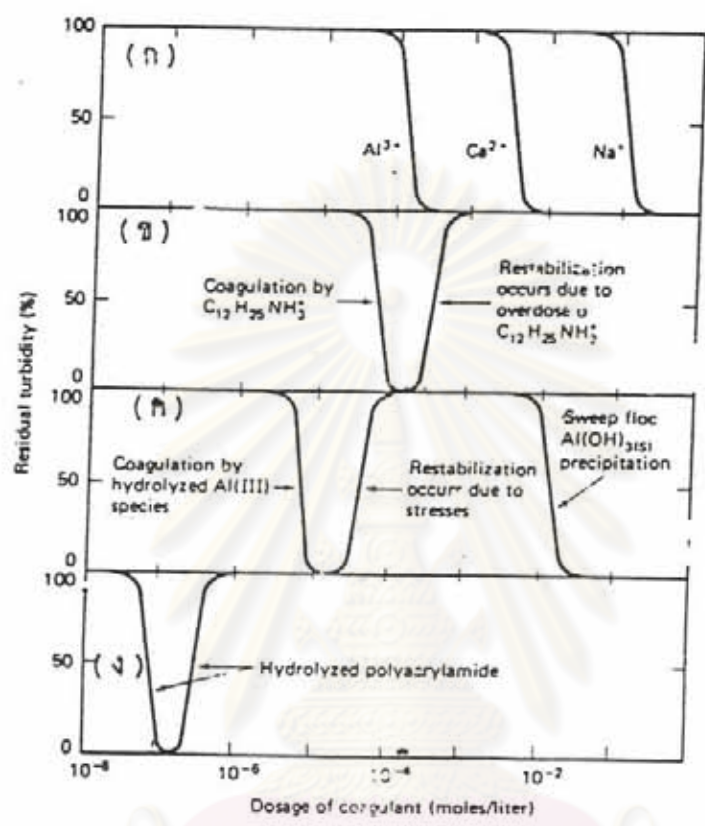
การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถกระทำโดยอาศัยกลไก 4 แบบ คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)
2. การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาค (Adsorption & Charge Neutralization)
3. การจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น (Sweep Coagulation)
4. การใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ (Polymer Bridging)

2.1 กลไกการลดความหนาของชั้นกระจาย กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นจำนวนอิเล็กตรอนที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง และมีผลให้ซีตาโพเทนเชียล ซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์มีค่าลดลงตามไปด้วย เนื่องจากมีประจุบวกเข้าไปออกันที่บริเวณใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้น ทำให้อำนาจของประจุลบของคอลลอยด์ไม่สามารถส่งออกไปได้ไกลเท่าเดิมในการทำลายเสถียรภาพโดยกลไกนี้ ปริมาณสารตัวนำไฟฟ้าที่มีอิเล็กตรอนบวกที่เติมเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคอลลอยด์ นอกจากนี้ไม่ว่าจะเติมอิเล็กตรอนบวกมากเพียงใด จะไม่สามารถทำให้คอลลอยด์เปลี่ยนประจุไฟฟ้าจากลบเป็นบวก (Charge Reversal) ได้ (รูปที่ 2-1 ก.)

2.2 กลไกการดูดซับและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ กลไกนี้เกิดขึ้นโดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับคอลลอยด์ และสามารถ ดูดซับบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ การดูดซับจะมีผลในทางลดอำนาจศักย์ไฟฟ้า และทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ การที่อิเล็กตรอนจากสารเคมีที่เติมลงไปสามารถเกาะติดบนผิวของอนุภาคได้ การทำลายศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์จึงได้ผลดีกว่ากลไกลดความหนาของชั้นกระจายที่อิเล็กตรอนบวกที่เติมไม่สามารถเข้าถึงผิวของคอลลอยด์ได้ จึงทำให้ปริมาณที่ต้องการน้อยกว่า ปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้จะแปรผันตรงกับปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ นอกจากนี้กลไกแบบดูดซับสามารถเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามกับของเดิมได้ เมื่อใช้โคแอกกูแลนต์ในปริมาณที่มากเกินไป (รูปที่ 2-1 ข.)

2.3 กลไกการจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึกสารประกอบที่สร้างขึ้น กลไกนี้เกิดจากการเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงไป ในปริมาณที่พอเพียงที่จะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจจะทำหน้าที่เป็นแกนของผลึกหรืออาจรวมตัวกับผลึก ทำให้ขนาดและน้ำหนักของคอลลอยด์เพิ่มขึ้น จึงสูญเสียเสถียรภาพและตกตะกอนได้ และเนื่องจากกลไกแบบนี้ไม่จำเป็นต้องทำลายประจุที่ผิวของคอลลอยด์ ดังนั้นโคแอกกูแลนต์จึงไม่จำเป็นต้องเกิดในขณะทีซีตาโพเทนเชียลมีค่าต่ำสุด พีเอชมีบทบาทสำคัญมากต่อกลไกนี้ เพราะจะมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการตกผลึกของสารต่าง ๆ โคแอกกูแลนต์แต่ละชนิดจะมีระดับพีเอชที่เหมาะสมที่สุดแตกต่างกัน รูปที่ 2-1 ค. ด้านขวามือเป็นโคแอกกูแลนต์ที่เกิดโดยกลไกนี้ ส่วนทางซ้ายมือจะเกิดกลไกแบบดูดซับ จะเห็นว่าปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกลไกจับอนุภาคคอลลอยด์ไว้ในผลึก จะมากกว่าในกลไกแบบดูดซับ



รูปที่ 2-1 กลไกต่าง ๆ ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน (อ้างถึงใน มั่นสิน คัดตุลเวศม์, 2526)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 กลไกการใช้สารอินทรีย์โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคคอลลอยด์ รูปที่ 2 - 1 ง. เป็นโคแอกกูเลชันที่เกิดโดยกลไกการใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมและแบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดกลไกนี้จะแสดงในรูปที่ 2 - 2

ปฏิกิริยาที่ 1 เมื่อเติมโพลีเมอร์ลงในน้ำ โพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ การเกาะติดนี้อาจจะเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ หรือเป็นแรงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์ที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ โดยที่โพลีเมอร์ยังมีปลายอิสระที่สามารถไปเกาะติดกับอนุภาคอื่นได้อีกถือว่า เป็นอนุภาคที่เสถียรภาพแล้ว

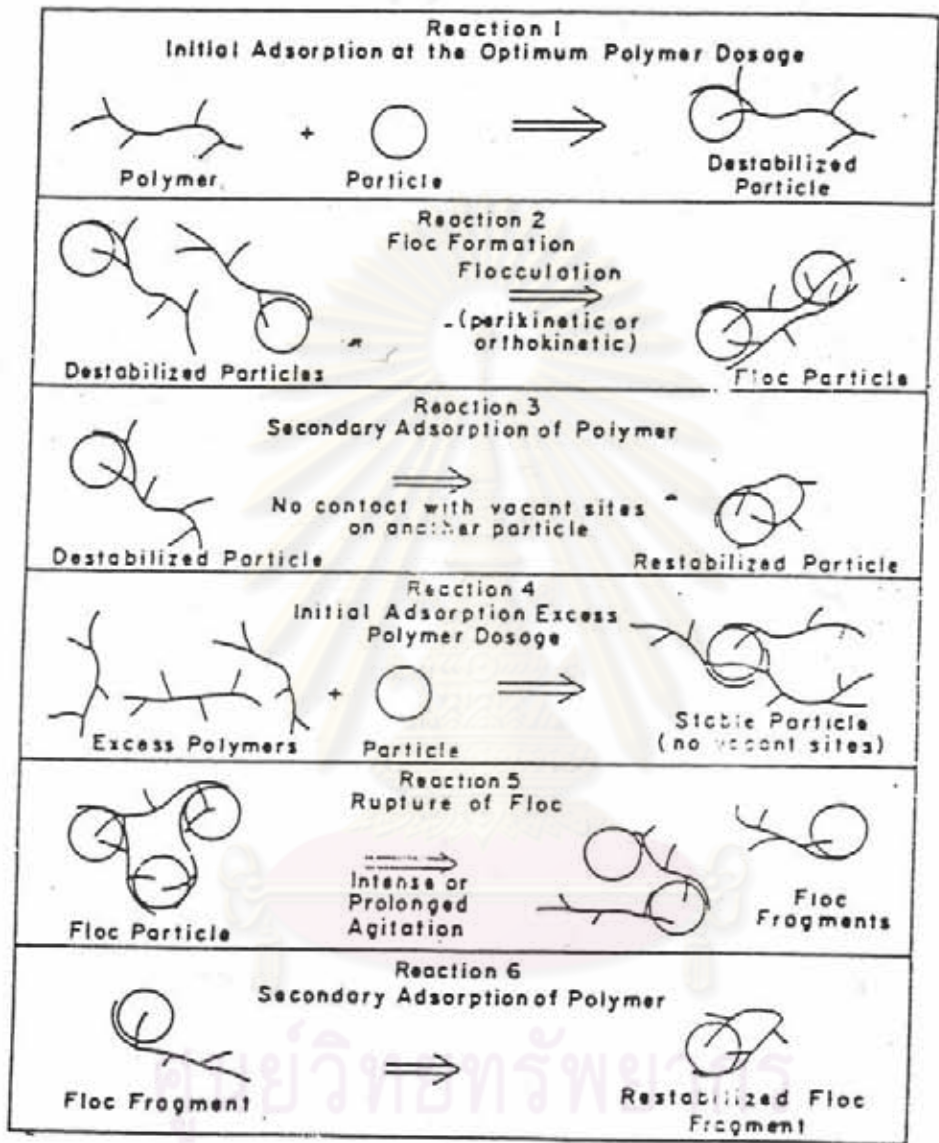
ปฏิกิริยาที่ 2 อนุภาคที่เสถียรภาพแล้วจะใช้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะติดกับอนุภาคอื่นจึงทำให้เกิดเป็นฟลอคได้

ปฏิกิริยาที่ 3 เป็นกรณีที่ปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่สามารถเกาะติดบนอนุภาคอื่นได้ ปลายอิสระนั้นก็จับบนอนุภาคเดิม ทำให้ตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับการยึดเกาะลดลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่าง ถือว่า เป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่

ปฏิกิริยาที่ 4 การเติมโพลีเมอร์ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้มีโพลีเมอร์หลายโมเลกุลไปเกาะอยู่บนอนุภาคคอลลอยด์ จนไม่มีที่ว่างสำหรับการเกาะติดโดยปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่เกาะอยู่บนอนุภาคอื่น ๆ จึงทำให้ไม่สามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้

ปฏิกิริยาที่ 5 เกิดขึ้นเนื่องจากการกวนที่แรงเกินไป ทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วน ๆ

ปฏิกิริยาที่ 6 ผลจากปฏิกิริยาที่ 5 ปลายอิสระของโพลีเมอร์จะกลับมาจับที่อนุภาคเดิม ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืนมาได้



รูปที่ 2-2 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากกลไกสะพานเชื่อม (อ้างอิงใน มั่นสิน คัดตุลเวศม์, 2526)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

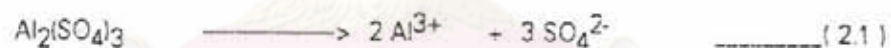
โคแอกกูเลชันด้วยสารเคมีหรือสารสังเคราะห์

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่าโคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรือ อาจเรียกว่า ฟลอคคูแลนต์ (Flocculant) สารเคมีที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดีขึ้น เรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid) หรือ ฟลอคคูแลนต์เอ็ด (Flocculant Aid)

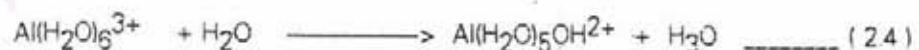
ในปัจจุบันโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของ อะลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีดังนี้ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14.3\text{H}_2\text{O}$ (Aluminium Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาได้แก่สารประกอบของเหล็ก ซึ่งที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันมีอยู่ 4 รูปแบบ คือ เฟอริกซัลเฟต (FeSO_4), เฟอริกคลอไรด์ (FeCl_3), เฟอริกซัลเฟต ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) และ Chlorinated Copperas ส่วนโคแอกกูแลนต์เอ็ดที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือ โพลีอิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) หรือโพลีเมอร์ (Polymer) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

1. โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

เมื่อสารส้มและสารประกอบเหล็กละลายน้ำจะแตกตัวดังสมการ



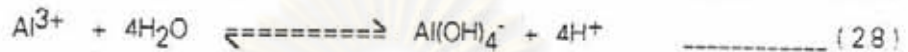
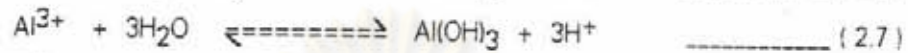
เนื่องจาก Al^{3+} และ Fe^{3+} มีอำนาจเป็นกรดสามารถให้ H^+ จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ได้เป็นไอออนต่าง ๆ ของอะลูมิเนียมและเหล็ก สมการที่ 2.4 แสดงการไฮโดรไลซ์ของสารประกอบอะลูมิเนียม ส่วนสารประกอบเหล็กจะคล้ายคลึงกันจึงไม่ขอกล่าว



จากสมการจะเห็นว่า Al^{3+} ไม่ได้อยู่เป็นอิสระในน้ำ แต่จะอยู่รวมกับน้ำ 6 โมเลกุล สมการที่ 2.4 เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของสารประกอบอะลูมิเนียม จะถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (OH^-) 1 หมู่ สมการที่ 2.4 อาจเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ เป็น



ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นต่อไปได้อีก ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้น ประจุบวกจะลดลงเรื่อย ๆ จนหมด และกลายเป็นประจุลบ ดังแสดงในสมการข้างล่าง

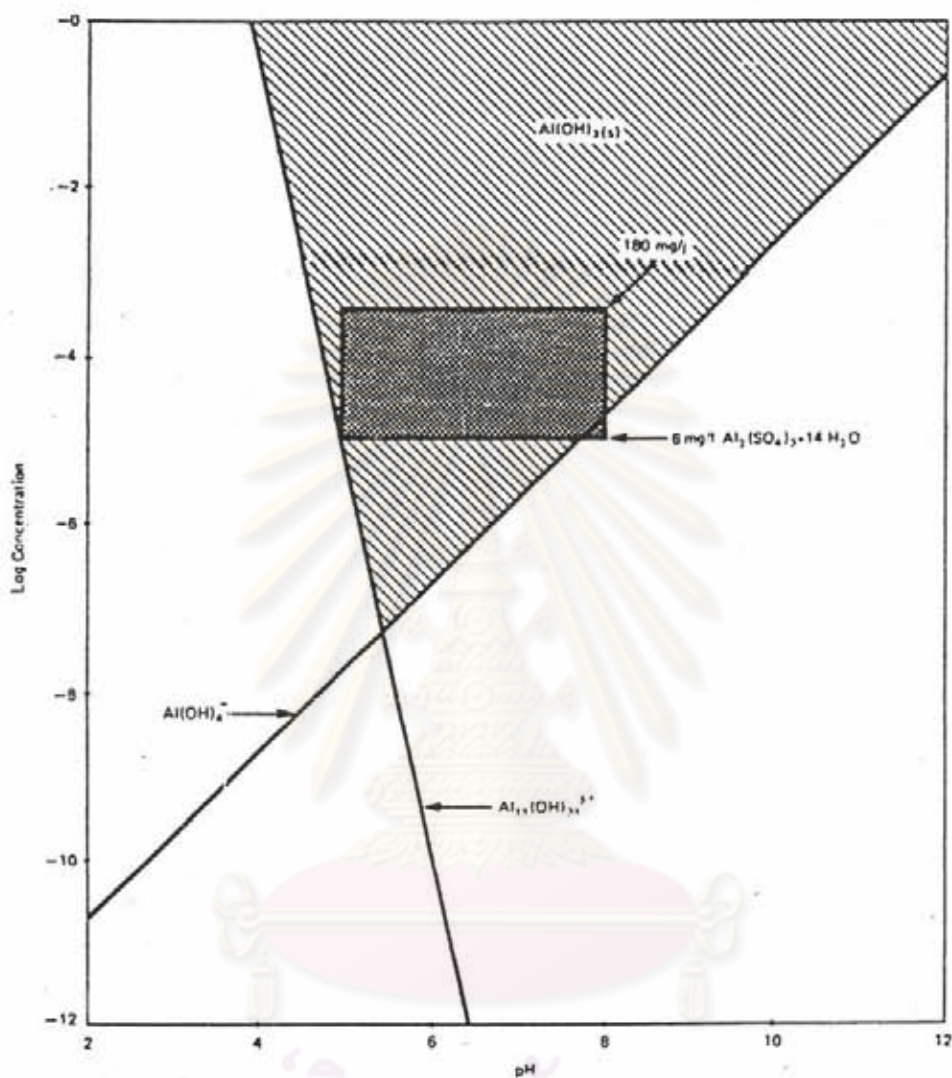


Al(OH)_3 และ Fe(OH)_3 เป็นสารประกอบที่เป็นของแข็ง จึงสามารถตกตะกอนได้ รูปที่ 2-3 และรูปที่ 2-4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น อีออนคอมเพล็กซ์ของอะลูมิเนียมและเหล็กที่มีประจุบวกจะลดลง พื้นที่แรงจูงใหญ่เป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ Al(OH)_3 (รูปที่ 2-3) และ Fe(OH)_3 (รูปที่ 2-4) ส่วนพื้นที่แรงจูงเล็กเป็นช่วงความเข้มข้นและพีเอชที่ใช้กันทั่วไป

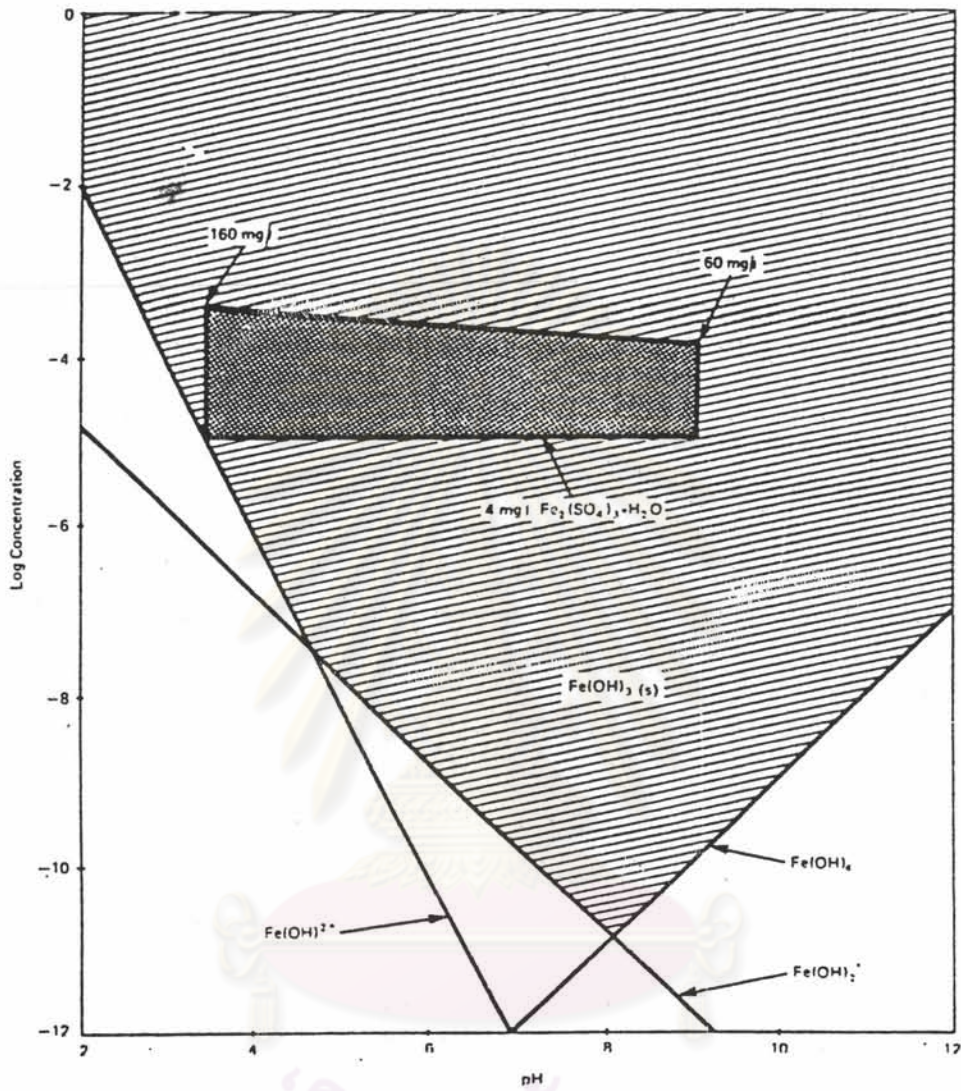
สารส้มและสารประกอบเหล็กสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไก 2 ประการ คือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก การจะเกิดกลไกแบบใดขึ้นอยู่กับปริมาณโคแอกกูแลนต์และพีเอชของน้ำ

กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุจะเกิดจากอีออนคอมเพล็กซ์ต่าง ๆ ของสารส้ม เช่น Al(OH)_2^+ , $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และทำลายอำนาจของประจุลบของคอลลอยด์ได้ ทำให้คอลลอยด์เสียเสถียรภาพและสามารถรวมตัวกันเป็นฟลอคได้ กลไกนี้จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณสารส้มมีน้อย ($[\text{Al}^{3+}][\text{OH}]^3 < K_{sp}$) พีเอชไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป ส่วนกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกนั้น สารส้มจะสร้างผลึก Al(OH)_3 ที่มีลักษณะคล้ายปูยเมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึกก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้น จนได้เป็นฟลอคที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ง่าย การเกิดกลไกนี้ได้ต้องมีปริมาณสารส้มมากพอ ($[\text{Al}^{3+}][\text{OH}]^3 > K_{sp}$) และพีเอชน้ำควรอยู่ในช่วง 6 - 7.5 กลไกแบบนี้จะให้สลัดจ์จำนวนมากและดึงน้ำออก (Dewatering) ได้ยาก

ในการทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มหรือสารประกอบเหล็กกับน้ำธรรมชาติ ส่วนใหญ่จะมีกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก ทั้งนี้เนื่องจากกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุนั้นอีออน



รูปที่ 2-3 Equilibrium Solubility ของ Al(OH)_3
 (Committee on Coagulation, 1971)



รูปที่ 2-4 Equilibrium Solubility ของ Fe(OH)₃
 (Committee on Coagulation, 1971)

คอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกต่าง ๆ ต้องดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ภายในเวลา $10^{-4} - 1$ วินาที มีฉะนั้นอออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งทำให้เกิดกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาค นอกจากนี้ความสามารถในการละลายของ $Al(OH)_3$ อยู่ในระดับต่ำ จึงตกผลึกได้ง่าย (สามารถตกผลึกได้เมื่อความเข้มข้นมากกว่า $7.8 \times 10^{-5.6}$ มก./ล. ที่พีเอช 7) รูปที่ 2-5 เป็นไดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

ถึงแม้ว่าสารส้มและสารประกอบเหล็กจะมีลักษณะการแตกตัว ตลอดจนรูปแบบของกลไกที่เกิดในกระบวนการโคแอกกูเลชันจะคล้ายคลึงกันดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่ความแตกต่างในการเป็นโคแอกกูแลนต์ของสารส้มและสารประกอบเหล็กก็มีซึ่งพอสรุปได้ดังนี้ (Cox, 1964)

1. ช่วงพีเอชที่ทำให้เกิดการตกผลึกของ $Fe(OH)_3$ กว้างกว่าของ $Al(OH)_3$ จึงทำให้โคแอกกูเลชันด้วยสารประกอบเหล็กสามารถเกิดในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าการใช้สารส้ม (รูปที่ 2-6)
2. ฟลอคที่ได้จากการใช้สารประกอบเหล็กเป็นโคแอกกูแลนต์ จะมีน้ำหนักมากกว่าฟลอคที่เกิดจากสารส้ม
3. $Fe(OH)_3$ ที่ได้จะไม่มีการละลายใหม่อีกเมื่อพีเอชสูงขึ้น

2. โคแอกกูเลชันด้วยโพลีเมอร์สังเคราะห์

สารโพลีเมอร์เป็นลูกโซ่ของสารโมโนเมอร์หลาย ๆ ตัวเรียงกันอย่างมีระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เช่น อาจมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ไม่กี่ร้อยไปจนถึงระดับที่สูงกว่า 10 ล้านเป็นต้น ได้มีการจำแนกประเภทของโพลีเมอร์ตามประจุประจำตัวได้ดังนี้

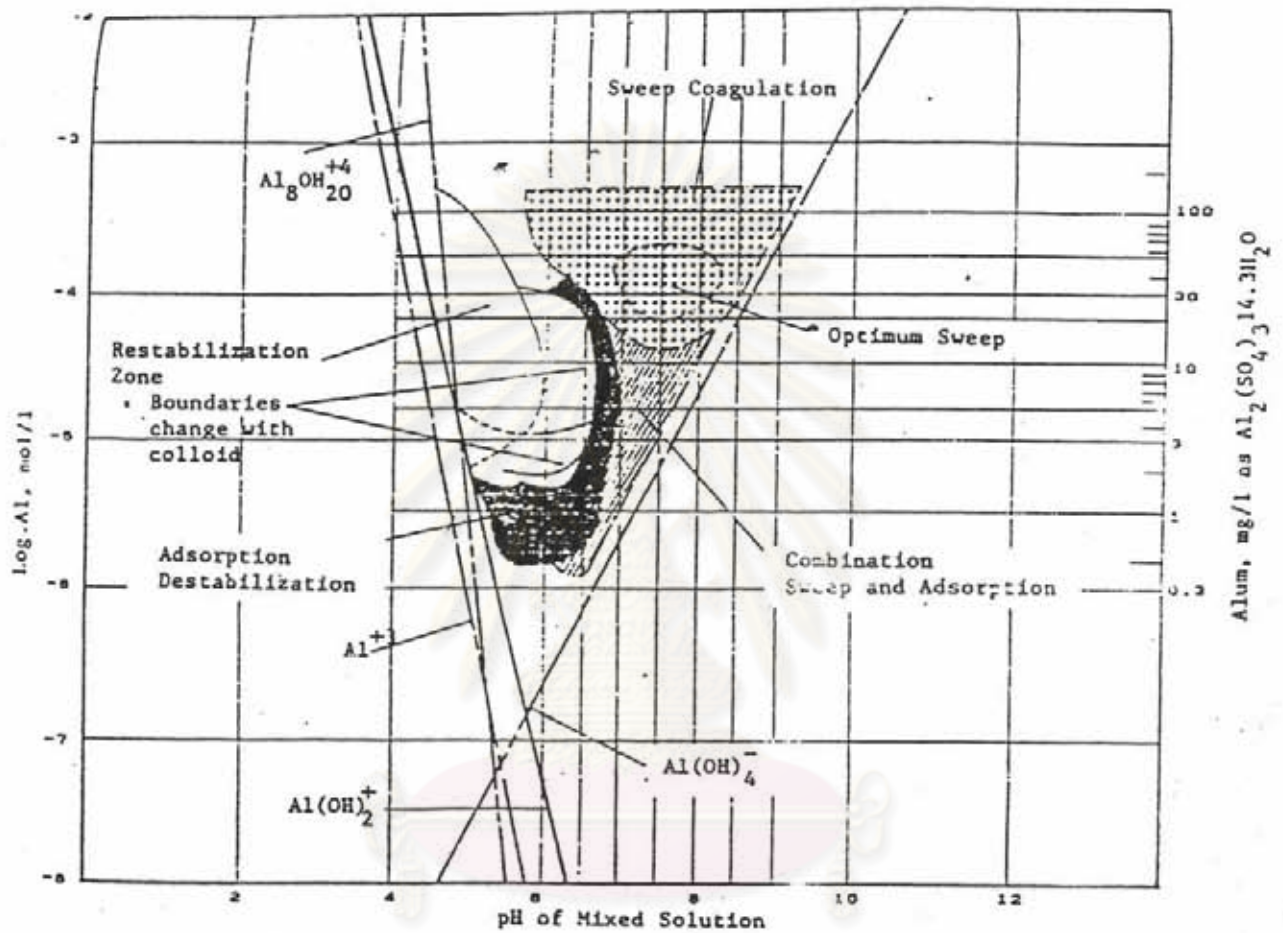
โพลีเมอร์ประจุบวก (Cationic Polymer)

โพลีเมอร์ประจุลบ (Anionic Polymer)

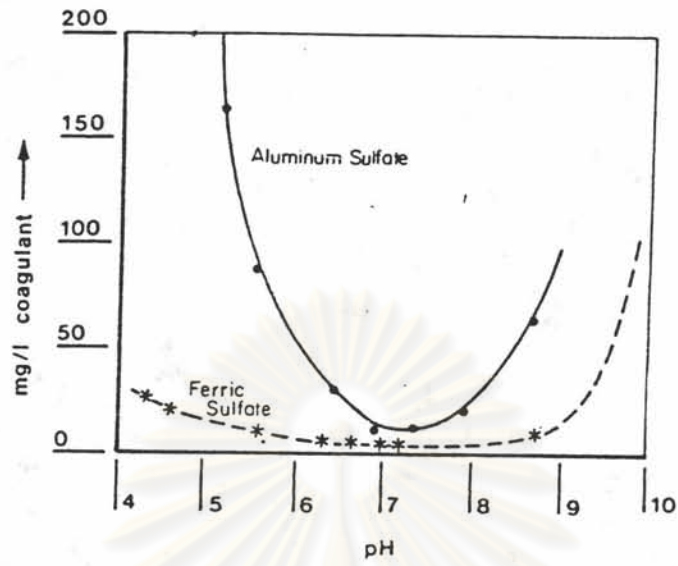
โพลีเมอร์ไม่มีประจุ (Nonionic Polymer)

ประจุของโพลีเมอร์นี้เกิดจาก Functional Group ต่าง ๆ หลายชนิด สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของน้ำ รูปที่ 2-7 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ

กลไกที่เกิดจากการใช้โพลีเมอร์มี 2 แบบ คือ - กลไกการใช้สะพานเชื่อม และกลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์

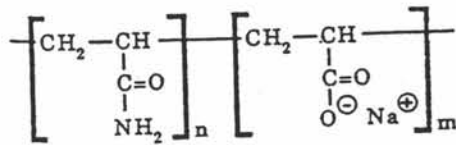


รูปที่ 2-5 โดอะแกรมที่ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม
(อ้างอิงใน มั่นสิน คัตกุลเวศม์, 2526)

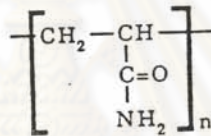


รูปที่ 2 - 6 ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารส้มและสารประกอบเหล็ก (ลดความขุ่นได้ 50 %) ที่พีเอชต่าง ๆ

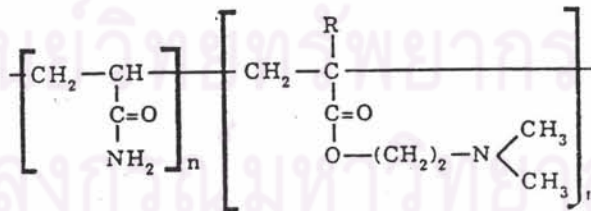
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. โพลีเมอร์ประจุลบ



ข. โพลีเมอร์ไม่มีประจุ



ค. โพลีเมอร์ประจุบวก

รูปที่ 2-7 ตัวอย่างโครงสร้างของโพลีเมอร์ชนิดต่าง ๆ

1. กลไกการใช้สะพานเชื่อมอนุภาค

โพลีเมอร์จะทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อม กลไกนี้เป็นที่ยอมรับเนื่องจากสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ ถึงแม้จะใช้โพลีเมอร์ที่มีประจุชนิดเดียวกับคอลลอยด์ก็ตาม แต่โพลีเมอร์ที่ใช้ต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ปริมาณโพลีเมอร์ที่เติมจะสัมพันธ์กับปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ ในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ ปลายของโพลีเมอร์จะไปสัมผัสกับผิวอนุภาคเพื่อเกาะติดได้ยาก เนื่องจากมีเป้าสัมผัสน้อย ทำให้ต้องใช้โพลีเมอร์ในปริมาณมาก หรือการเติมโพลีเมอร์ที่มากเกินไป จะทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืนมาได้ ความเร็วในการรบกวนจะต้องเหมาะสม ไม่น้อยจนทำให้ก้อนไม่ทั่วถึง หรือมากเกินไปจนทำให้ฟลอคที่ได้แตกออกจากกัน

2. กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Path Mechanism)

กลไกนี้ใช้อธิบายพฤติกรรมการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่มีการใช้โพลีเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคที่ต้องการทำลายเสถียรภาพ หรือในกรณีที่ใช้โพลีเมอร์ประจุลบในการช่วยรวมตะกอนของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วด้วยโคแอกกูแลนต์จากสารประกอบพวกโลหะ และเกิดปรากฏการณ์แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งกลไกการสร้างสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคที่มีการดูดติดบนผิวอนุภาคเพียงไม่กี่ตำแหน่งไม่น่าจะส่งผลเช่นนี้ได้

Cohen , Rourke และ Woodward (1958) ได้ทำการทดลองใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เฮดร่วมกับสารส้ม พบว่าโพลีเมอร์ประจุลบไม่สามารถเป็นโคแอกกูแลนต์ได้ แต่เป็นโคแอกกูแลนต์เฮดที่ดี ฟลอคที่ได้จากการใช้โพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เฮดนี้จะมีขนาดใหญ่และตกตะกอนได้ดี การใช้โพลีเมอร์ประจุลบจะไม่ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำ เช่น พีเอช ความเป็นด่าง ความกระด้าง และความขุ่น เป็นต้น โพลีเมอร์ประจุบวกสามารถเป็นได้ทั้งโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เฮด แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อใช้กับน้ำที่ปราศจากเกลือแร่ หรือมีเกลือแร่ในปริมาณต่ำ ส่วนการใช้โพลีเมอร์ไม่มีประจุนั้นพบว่าประสิทธิภาพต่ำกว่าโพลีเมอร์ประจุลบ และโพลีเมอร์ประจุบวก

Black และ Hannah (1961) ได้ทำการทดลองใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์เฮดร่วมกับสารส้ม พบว่าการใช้โพลีเมอร์ประจุลบจะให้ผลดีที่สุดเมื่อประจุของอนุภาคลดลงจนเกือบเป็นศูนย์

โดยการใช้สารส้ม ส่วนโพสเฟอรัสประจุบวกจะให้ผลดีที่สุดเมื่อเติมสารส้มในปริมาณน้อย การใช้โพสเฟอรัสเป็นโคแอกกูแลนต์เอดจะสามารถเพิ่มหรือยับยั้งการทำลายเสถียรภาพและการสร้างฟลอคได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมสารส้มและโพสเฟอรัส

Pressman (1967) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการใช้โพสเฟอรัสประจุบวกเป็นโคแอกกูแลนต์ พบว่าพีเอชและปริมาณความขุ่นมีผลต่อปริมาณโพสเฟอรัสที่ต้องใช้ ประสิทธิภาพของโพสเฟอรัสจะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น ความเร็วในการกวนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ การกวนด้วยความเร็วที่มากเกินไป จะทำให้ฟลอคที่เกิดขึ้นเกิดการแตกตัว นอกจากนี้ยังพบว่าโพสเฟอรัสประจุบวกสามารถกำจัดสีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Robinson (1974) ทำการทดสอบการใช้โพสเฟอรัสเป็นโคแอกกูแลนต์กับน้ำที่มีความขุ่นสูง(ความขุ่นสูงสุดประมาณ 5000 JTU) โดยใช้โพสเฟอรัสที่มีประจุบวก ประจุลบ และไม่มีประจุ พบว่าการใช้โพสเฟอรัสประจุบวกและไม่มีประจุไม่สามารถให้ผลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารส้ม ส่วนการใช้โพสเฟอรัสประจุลบไม่สามารถลดความขุ่นให้ได้ค่ามาตรฐานของน้ำหลังการตกตะกอนได้ ปริมาณการเติมโพสเฟอรัสประจุบวกจะอยู่ในช่วง 1 - 4 มก./ล.

3. ผลกระทบจากการใช้โคแอกกูแลนต์สังเคราะห์

3.1 ผลกระทบจากสารส้มได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ในประเทศชูดาน(Jahn,1979) พบว่าการใช้สารส้มในปริมาณที่มากเกินไปจะไปรบกวนระบบการย่อยอาหารและลำไส้ ยิ่งไปกว่านั้นสตรีในแถบตะวันออกของเมืองกอร์โดฟาน ยังมีความวิตกในการที่จะบริโภคน้ำดื่มที่ใช้สารส้มในการกำจัดความขุ่นในช่วงที่ตั้งครรภ์ เพราะมีความเชื่อว่าสารส้มจะมีผลทำให้เกิดการแท้งได้

จากการสัมมนาในหัวข้อ " อะลูมิเนียมในน้ำดื่ม " (1992) ที่ประเทศฮ่องกง โดยความร่วมมือระหว่าง The International Water Supply Association และ The Water Supplies Department ของรัฐบาลฮ่องกง ได้มีการเสนอว่า อะลูมิเนียมมีความสัมพันธ์กับการเกิดโรคเกี่ยวกับระบบประสาทในมนุษย์และโรคอื่น ๆ ที่เกิดในปลา และแพลงค์ตอน ปริมาณอะลูมิเนียมที่สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์จะมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากส่วนใหญ่จะถูกขับถ่ายไปกับอุจจาระ อะลูมิเนียมในน้ำดื่มจะมีปริมาณเพียง 2 % ของปริมาณที่ร่างกายได้รับจากอาหารทั้งหมด

แต่เป็นที่น่าแปลกใจว่าในปริมาณเพียงเท่านี้อาจมีความเกี่ยวข้องกับระหว่าง อะลูมิเนียมในน้ำดื่ม และโรค Alzheimer (โรคเกี่ยวกับระบบประสาท) ได้ซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากอะลูมิเนียมในน้ำ สามารถย่อยสลายและดูดซึมได้ดีกว่าในอาหาร แม้จะยังไม่ได้มีการพิจารณาถึงการใส่สารประกอบของอะลูมิเนียมในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากผลกระทบต่อสุขภาพยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ก็ควรจะมีการระมัดระวังในการใช้ให้มากขึ้น เพื่อโอกาสเสี่ยงในการเกิดอันตรายจะได้น้อยลง และควรศึกษาเพื่อที่จะหาโคแอกกูแลนต์อื่นทดแทน

3.2 ผลกระทบจากโพลิเมอร์สังเคราะห์ องค์การอนามัยโลก (1973) ได้รวบรวมผลการศึกษาถึงผลของโพลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีต่อสุขภาพของผู้บริโภค แต่จากผลที่ได้ไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าการใช้โพลิเมอร์นั้นจะไม่อันตรายในระยะยาว ผลกระทบจากโพลิเมอร์ อาจจะไม่ได้อาจมาจากตัวของมันเอง แต่อาจเกิดจากโมโนเมอร์ตกค้างที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่น ๆ ในน้ำได้ นอกจากนี้การเลือกใช้โพลิเมอร์ก็มีความสำคัญ เนื่องจากโพลิเมอร์มีหลายชนิด ซึ่งมีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป การใช้โพลิเมอร์ที่ผลิตเพื่อใช้ในงานประปาจะช่วยลดความเสี่ยงต่ออันตรายจากโพลิเมอร์ได้

จากการศึกษาในช่วงต่อมา พบว่าโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ถึงแม้จะมีข้อดีมากมาย แต่ก็อาจมีข้อเสียได้เนื่องจากการปนเปื้อนจากโมโนเมอร์หรือสารอื่น ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต หรืออาจทำปฏิกิริยากับสารเคมีอื่นที่ใช้ในการผลิตน้ำ ทำให้เกิดสารก่อมะเร็งได้ (Mallevalle , Brucher และ Fiessinger ,1984) จากผลกระทบที่อาจมีต่อสุขภาพในระยะยาวซึ่งยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด ทำให้บางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น มีการห้ามใช้โพลิเมอร์สังเคราะห์ในการผลิตน้ำดื่ม (Kawamura, 1991)

โคแอกกูแลนต์ด้วยดินชนิดต่าง ๆ

ชนพื้นเมืองในทวีปอาฟริการู้จักโคแอกกูแลนต์ธรรมชาติจากดินและหินชนิดต่าง ๆ มานานแล้ว หินบางชนิดถูกเก็บมาจากกลางทะเลทราย ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นพวกปูนขาว หรือไฮเดียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ดินเหนียวตามริมฝั่งแม่น้ำในลุ่มพบว่า มีคุณสมบัติเป็นสารโคแอกกูแลนต์ได้

Cox (1964) พบว่าดินเบนโทไนท์สามารถใช้ร่วมกับสารส้มในการทำให้ น้ำใส โดยสามารถลดปริมาณการใช้สารส้มได้หลายเท่า

Louis (1956) พบว่าสามารถใช้ดินเบนโทไนท์เป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว โดยนำมาใช้ในโรงกรองน้ำริมทะเลสาบมิชิแกน ซึ่งน้ำมีความขุ่นต่ำแต่มีสาหร่ายอยู่มาก และไม่สามารถกำจัดออกได้ด้วยการกรองเร็วธรรมดา การใช้ดินเบนโทไนท์เป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียง 4 มก./ล. ก็สามารถทำให้น้ำใสได้

โคแอกกูแลนต์ด้วยสาหร่ายทะเล

สาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ใน species *Maerocystis pyrifera* และ *Lessonia nigrescens* ซึ่งพบมากในทะเลริมชายฝั่งทวีปอเมริกาใต้และแถบประเทศเอกวาดอร์และชิลี ปลูกใช้เป็นอาหารและทำยา ได้ถูกนำมาสกัดเอากรัตอัลจินิกและไซเดียมอัลจินेट และทดสอบความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์ในห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถเป็นโคแอกกูแลนต์เอดได้ โดยใช้ร่วมกับสารส้มและสามารถประหยัดสารส้มได้ถึง 50 %

ในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้ไซเดียมอัลจินेटในการผลิตน้ำประปามานานกว่า 30 ปี และได้มีการกำหนดมาตรฐานของไซเดียมอัลจินेटที่จะใช้ในงานประปาด้วย โพลีเมอร์จากไซเดียมอัลจินेटนับว่าเป็นที่นิยมมากกว่าโพลีเมอร์สังเคราะห์อื่น ๆ เนื่องจากเป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่มีประสิทธิภาพดี ให้ฟลอคที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก สลัดจ์ที่ได้สามารถดื่งน้ำออกได้ง่าย ราคาถูก และไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ (Kawamura, 1991)

โคแอกกูแลนต์ด้วยผลิตภัณฑ์ของสัตว์น้ำ

Chitosan เป็นสารโพลีเมอร์ประจุบวก ได้มาจาก Chitin ซึ่งอยู่ในเปลือกของสิ่งมีชีวิตพวก crustaceans ได้แก่ เปลือกกุ้ง กระดองปูและเกล็ดปลา บางชนิดมีปริมาณมากถึง 20-40 % ของน้ำหนักตัวของสัตว์น้ำเหล่านั้น

Kawamura (1976) พบว่าการใช้ Chitosan เป็นโคแอกกูแลนต์เอเดนนั้นจะได้ผลดีกว่า เป็นโคแอกกูแลนต์โดยตรง โดยสามารถประหยัดการใช้สารส้มได้มากกว่าการใช้โคแอกกูแลนต์จาก วัสดุธรรมชาติอื่น ๆ และหากใช้ Chitosan เป็นโคแอกกูแลนต์เอเดนร่วมกับสารส้มจะลดสีในน้ำได้ ด้วย

โคแอกกูแลนต์ด้วยพืช

โคแอกกูแลนต์จากพืชได้มาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ราก ลำต้น เมล็ด หรือใบ ซึ่งอาจนำมาใช้ในรูปแบบที่เป็นพืชสดแห้ง หรือนำมาเผาให้กลายเป็นถ่านก่อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช

NEERI ในประเทศอินเดียได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการเป็นโคแอกกูแลนต์เอเดนของพืชโดยใช้เมล็ดของมะรุม มะขาม ถั่วกัวร์ และกระเจียบแดง จากผลการศึกษาการใช้โคแอกกูแลนต์เอเดนจากพืชเหล่านี้ในห้องทดลอง โรงทดลอง และโรงกรองน้ำ โดยใช้น้ำดิบที่มีความขุ่นอยู่ในช่วง 50 ถึง 7500 เอ็นทียู พบว่า

- ปริมาณการเติมจะอยู่ในช่วง 2 - 20 มก/ล ในช่วงพีเอช 4 - 9
- สำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำกว่า 300 เอ็นทียู การใช้โคแอกกูแลนต์เอเดนไม่ได้เป็นการประหยัดสารเคมี
- สำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง การใช้โคแอกกูแลนต์เอเดนจะสามารถประหยัดการใช้สารส้มได้ถึงร้อยละ 40 - 54
- โคแอกกูแลนต์เอเดนจะเสื่อมคุณภาพภายในระยะเวลาประมาณ 3 เดือน แม้จะมีการเติมสารกันบูดก็ตาม

การศึกษากการใช้โพลีเมอร์จากเมล็ดพืชเหล่านี้ในประเทศอินเดียจะใช้วิธีการเตรียมที่เหมือนกันคือ

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

Bulusu และ Pathak (1974) ได้ศึกษาถึงการใช้น้ำคั้นจากใบเสลดกระเจี๊ยบแดง (*Hibiscus sardarifa*) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ โดยบดให้เป็นผงและผสมกับไซเตียมคาร์บอเนตในอัตราส่วน 9:1 โดยน้ำหนัก สรุปได้ว่า หากใช้น้ำคั้นความเข้มข้นปานกลาง (315 unit) จะใช้ปริมาณที่เหมาะสมในช่วง 40 ถึง 48 มก./ล. สามารถลดความขุ่นได้เหลือ 14 unit และถ้าใช้กับน้ำดิบความขุ่นต่ำ (43 unit) จะใช้ปริมาณที่เหมาะสม 1-5 มก./ล. แต่ต้องใช้เวลาการตกตะกอนนานกว่า เพราะฟลอคมีลักษณะเบาซึ่งถ้านำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 พบว่าน้ำที่ผ่านการกรองจะมีความขุ่นเหลือไม่ถึง 1 unit นอกจากนี้พบว่าฟอสเฟตในน้ำดิบไม่มีผลต่อการใช้โคแอกกูแลนต์ธรรมชาตินี้

เบญญา (2536) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์ของเมล็ดมะขาม พบว่าเมล็ดมะขามไม่สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ตามลำพังได้ เนื่องจากสามารถลดความขุ่นของน้ำดิบได้เพียงร้อยละ 30-60 แต่สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอดร่วมกับสารส้มได้ดี และยังพบว่าเมื่อน้ำดิบมีความขุ่นตั้งแต่ 100 เอ็นทียู ขึ้นไป การใช้ผงแป้งเมล็ดมะขามเป็นโคแอกกูแลนต์เอดสามารถลดค่าความขุ่นที่เหลือให้ต่ำกว่าการใช้สารส้มเพียงอย่างเดียวได้

1. องค์ประกอบทางเคมีของโคแอกกูแลนต์จากพืช

โคแอกกูแลนต์จากพืชส่วนใหญ่จะเป็นสารพวกแคตคาไรด์และแทนนิน นอกจากนี้ในบางครั้งอาจเป็นสารพวกโปรตีนและสารประกอบอื่น ๆ ได้

Jahn (1981) กล่าวว่าพืชต่างชนิดกัน หรือชนิดเดียวกันแต่ต่าง species ย่อมมีองค์ประกอบทางเคมีไม่เหมือนกันด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์ของพืชแต่ละชนิดไม่เท่ากันเช่น

- *Moringa oleifera* (มะขาม) เมื่อทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของเมล็ดมะขามพบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นพวกโพลีเปปไทด์ (Polypeptide) มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 6,000-16,000 ดาลตัน

- พืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วกัวร์ (*Cyamopsis tetragonolobus*) เป็นพืชที่ใช้ในการตกตะกอนพวกน้ำโคลนในชุดานและใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ในอาฟริกาใต้ โดยใช้แยก acid pulp ของแร่ยูเรเนียม เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบของเมล็ดพบว่า เป็นพวก galactomannan ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีมวลโมเลกุลถึง 220,000 ดาลตัน

- แป้งมัน (Potato starch) ซึ่งได้จากหัวมันฝรั่ง (*Solanum tuberosum*) เป็นโพลีเมอร์ที่ดีที่สุดในบรรดาพืชพวกแป้งทั้งหลาย เมื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบพบว่า มีโพลีเมอร์ 2 ชนิด คือ ชนิดที่เป็นเส้นเดี่ยว ๆ ของอะไมโลส (Amylose) และชนิดที่เป็นกิ่งก้านของอะไมโลเพคติน (Amylopectin) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการเกิดฟลอคคูเลชั่นของสารแขวนลอยคาโอลินใช้กันแพร่หลายในประเทศอินเดีย โดยเฉพาะในโรงงานทำกระดาษ

2. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโคแอกกูแลนต์ที่ได้จากพืช

2.1 **ธรรมชาติทางเคมีของคอลลอยด์ในน้ำ** Neis (1977) พบว่าการทำลายเสถียรภาพของดินเหนียวกระทำได้ง่ายกว่าการทำลายเสถียรภาพของสารอนินทรีย์อื่น ๆ ในน้ำ Klute และ Hahn (1974) ได้ศึกษาถึงจลนศาสตร์ของการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ระหว่งการเกิดฟลอคคูเลชั่น พบว่าดินเหนียว (kaolinite และ montmorillonite) จะมีโครงสร้างของฟลอคต่างกัน ถึงแม้ว่าโคแอกกูแลนต์ที่ใช้จะเป็นชนิดเดียวกัน (อ้างถึงใน Jahn, 1981)

Klute , Neis และ Bantz (1976) ได้ศึกษาถึงผลของกรดฮิวมิกต่อการดูดติดคอลลอยด์คาโอลินต์ของโพลีเมอร์ประเภท พบว่าถ้าความเข้มข้นของกรดฮิวมิกมากกว่า 0.7 มก./ล. การดูดติดของโพลีเมอร์จะถูกยับยั้งอย่างสมบูรณ์ (อ้างถึงใน Jahn, 1981)

จากการศึกษาดังกล่าวข้างต้นจะพบว่า ประสิทธิภาพของโคแอกกูแลนต์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโคแอกกูแลนต์เพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของน้ำหรือคอลลอยด์ด้วย ดังนั้นโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพเมื่อใช้กับน้ำจากแหล่งหนึ่ง อาจจะพบว่ามีประสิทธิภาพลดลงเมื่อใช้กับน้ำที่มีลักษณะต่างจากแหล่งน้ำอื่น

2.2 ทีเอสและไอออนในน้ำ

Pressman (1967) และ Packham (1973) พบว่าประสิทธิภาพของกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโพลีเมอร์ หรือโคแอกกูแลนต์จากพืช ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำดิบโพลีเมอร์ธรรมชาติจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่พีเอชประมาณ 7 หรือต่ำกว่า ในกรณีที่พีเอชสูงกว่านี้จะทำให้ต้องใช้โพลีเมอร์มากขึ้น

Jahn (1981) ทำการศึกษาพบว่าค่าความนำไฟฟ้าของน้ำจากแม่น้ำในลุ่มจะลดลงในฤดูน้ำหลาก ค่าความนำไฟฟ้าที่วัดได้คือ 100 -125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ที่อุณหภูมิ 24-25 °ซ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในช่วงฤดูแล้งประมาณ 50 % โดยวัดค่าความนำไฟฟ้าในฤดูแล้งได้ 220-225 $\mu\text{S}/\text{cm}$. ที่อุณหภูมิ 26-27 °ซ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเจือจางโดยน้ำฝน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของโคแอกกูแลนต์ธรรมชาติลดลง จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าปริมาณไอออนมีผลต่อประสิทธิภาพของโคแอกกูแลนต์

2.3 ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์

Sen และ Bulusu (1962) พบว่าการหาปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมของโคแอกกูแลนต์เมื่อใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงสามารถทำได้ง่ายกว่าเมื่อใช้กับน้ำที่มีความขุ่นต่ำ การเติมโคแอกกูแลนต์ที่มากเกินไปจะส่งผลให้ความขุ่นที่เหลืออยู่กลับมากขึ้นได้

Bulusu และ Pathak (1974) พบว่าพืชบางชนิดอาจจะเป็นโคแอกกูแลนต์ขึ้นต้นได้ไม่ดี แต่อาจจะเป็นโคแอกกูแลนต์เอดที่มีประสิทธิภาพ เช่น พืชตระกูลถั่วและกระเจี๊ยบแดง เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสมคือ 2 - 20 มก./ล.ที่พีเอชระหว่าง 4 - 9 จะสามารถประหยัดสารส้มได้ถึง 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้กับน้ำที่มีความขุ่นสูง

Egbuniwe (1978) ได้ทำการศึกษาพบว่า การใช้เถ้าของพืชในกระบวนการโคแอกกูเลชันอาจจะต้องใช้ในปริมาณที่มาก ความเข้มข้นของเถ้าของพืชที่เหมาะสมสำหรับน้ำที่มีความขุ่น 420-500 เจทียู คือ 5 - 6 กรัม/ลิตร ซึ่งจะลดความขุ่นให้เหลือ 5 - 100 เจทียู เมื่อตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง และหลังจาก 24 ชั่วโมงแล้วความขุ่นจะเหลือประมาณ 10 เจทียู

3. ผลกระทบจากการใช้โคแอกกูแลนต์ธรรมชาติจากพืช

3.1 **คุณภาพน้ำทางเคมี** Jahn (1981) ได้ทำการศึกษาการใช้เมล็ดมะรุมเป็นโคแอกกูแลนต์ พบว่าไม่ทำให้พี เอช เปลี่ยนแปลง หรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และความนำไฟฟ้าก็ไม่เปลี่ยนแปลงเช่นกัน นอกจากนี้สามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้เช่นเดียวกับการใช้ดินเบนโทไนต์ และถึงแม้จะใช้ในปริมาณที่มากถึง 200 มก./ล. ก็ยังไม่ทำให้รสชาติของน้ำเปลี่ยนแปลงไป

3.2 **ปริมาณแบคทีเรียในน้ำ** การใช้โคแอกกูแลนต์จากพืชสามารถลดจุลินทรีย์ในน้ำได้เช่นเดียวกับการใช้สารส้ม โดยจะติดไปกับฟล็อก ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า "Contact Coagulation" แต่จะมีการเพิ่มปริมาณขึ้นอีกครั้งหลัง 24 ชั่วโมง จะเพิ่มปริมาณจนเท่ากับตอนแรก ซึ่งคาดว่าเป็นผลจากจุลินทรีย์ในน้ำใช้สารอินทรีย์ที่เติมลงไปเป็นอาหาร จึงเพิ่มปริมาณขึ้นเท่าเดิม การใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ ก็จะมีการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในภายหลังเช่นเดียวกัน ดังนั้นปกติการใช้โคแอกกูแลนต์จากพืชจึงต้องมีกระบวนการอื่นตามหลังเสมอ เช่น การกรองซ้ำผ่านทรายกรอง การต้มให้เดือด หรือการเติมสารฆ่าเชื้อโรค เช่น คลอรีน

3.3 **พืชที่อาจมีต่อสุขภาพ** สิ่งที่สำคัญที่สุดในการเลือกใช้พืชเป็นโคแอกกูแลนต์คือต้องมีความมั่นใจได้ว่าพืชนั้นไม่มีสารพิษ พืชบางชนิดอาจจะมีสารพิษ เช่น รากของ *Meaurua pseudopetalosa*, *M.edulis* และ *M.subcordata* ซึ่งใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในประเทศชูดาน ซึ่งจะมีความเป็นพิษจากสารประกอบของ tetramethyl amonium ดังนั้นการเลือกพืชที่ปกติแล้วใช้เป็นอาหารของคนหรือสัตว์มาเป็นโคแอกกูแลนต์จึงมีความเสี่ยงต่อสารพิษน้อยลง

3.4 **สารปฏิชีวนะที่ปรากฏในโคแอกกูแลนต์จากพืช** Wein และคณะ (1961) พบสารฆ่าเชื้อรา (Fungicide) ในพืชตระกูลถั่วชนิดต่าง ๆ เป็นสารประกอบกำมะถัน และได้สกัดสารปฏิชีวนะจากมะรุมด้วย

การใช้เมล็ดมะรุมเป็นโคแอกกูแลนต์

1. ลักษณะของมะรุมและการใช้ประโยชน์

มะรุมมีด้วยกันหลายพันธุ์ แต่ที่พบในประเทศไทยจะมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Moringa oleifera* Lam. อยู่ในวงศ์ MORINGACEAE เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง มีถิ่นกำเนิดในอินเดีย แต่พบทั่ว ๆ ไปในอาหรับ เอเชียไมเนอร์ ออฟริกา และเอเชีย ปลูกทั่วไปในประเทศเขตร้อน สำหรับในประเทศไทยสามารถพบได้เกือบทุกภาคลำต้นจะเป็นพุ่มโปร่ง เปลือกลำต้นเป็นสีเทาอ่อน มีวุ้นคั้นข้างเรียบ ลำต้นมีความสูงประมาณ 15-20 เมตร ผลจะมีลักษณะเป็นฝักกลมยาว ฝักอ่อนจะมีสีแดงเรื่อ ๆ ฝักแก่จะมีสีเขียว เปลือกฝักหนา มีกลิ่นฉุนของเมล็ด มะรุมจะให้ฝักปีละ 2-3 ครั้ง ต้นหนึ่ง ๆ จะให้ฝักมากถึงประมาณต้นละ 1,000-12,000 ฝัก หรืออาจจะมากกว่า ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศและอายุของต้น มะรุมมักจะนำมาใช้ในการประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังใช้เป็นยาสมุนไพรอีกด้วย เช่น ใช้บำบัดโรคปวดตามข้อ แก้กษัย บำรุงหัวใจ เป็นต้น เมล็ดเมื่อนำมาบีบจะให้น้ำมัน ซึ่งมีชื่อเรียกทางการค้าว่า Ben หรือ Behen oil ใช้กินเป็นอาหาร ใช้จุดตะเกียงและใช้ในเครื่องสำอางได้ Ben oil มีคุณสมบัติที่เห็นยาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในการสกัดน้ำมันหอม (Volatile oil) จากกลีบดอกไม้ และใช้หล่อลื่นเครื่องจักร ภาคที่เหลือก็นำมาใช้ทำเป็นปุ๋ย (สมาคมสมุนไพรแห่งประเทศไทย, 2525 ; สนิท, 2523 ; วิทย์, 2531)

2. การศึกษาถึงการใช้มะรุมเป็นโคแอกกูแลนต์

โคแอกกูแลนต์จากเมล็ดมะรุมจะใช้เมล็ดจากฝักแห้ง ซึ่งจะมีสีน้ำตาลเข้ม เมล็ดมีลักษณะเป็นปีก เปลือกแข็ง เมื่อแกะเปลือกและเยื่อหุ้มเมล็ดออก จะเหลือเนื้อเมล็ดซึ่งมีสีขาวหรือขาวอมเหลือง น้ำหนักของเนื้อเมล็ดคิดเป็นประมาณ 65 % ของน้ำหนักเมล็ดทั้งหมด

ในประเทศชูดานจะเรียกมะรุมว่า "Clarifier Tree" ซึ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นของมะรุม การใช้มะรุมเป็นโคแอกกูแลนต์ในประเทศชูดานมักใช้ในระดับหมู่บ้าน โดยโคแอกกูแลนต์ที่เตรียมจะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย ซึ่งมีวิธีการเตรียมดังนี้ คือ

1. แกะเปลือกเมล็ดออก ให้เหลือแต่เนื้อเมล็ด
2. บดเมล็ดให้ละเอียด
3. ผสมผงเมล็ดที่บดได้กับน้ำให้ได้ความเข้มข้น 2 %
4. เขย่าเป็นเวลาประมาณ 5 นาที
5. กรองด้วยผ้าในลอน หรือผ้าฝ้าย

สารแขวนลอยที่ได้จะมีลักษณะขาวขุ่น ถ้าเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 18 - 19 °C จะเก็บได้ประมาณ 3 วัน หรือถ้าแช่เย็นจะเก็บได้นานกว่า 1 สัปดาห์ โดยที่ประสิทธิภาพไม่ลดลง

Wein และคณะ (1961) ได้สกัดสารปฏิชีวนะจากเมล็ดมะรุม พบว่ามีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียและรา ซึ่งเป็นสารพวก 4 - (α -L-rhamnosyloxy) benzyl isothiocyanate

Jahn (1979) ได้ทำการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์จากเมล็ดมะรุมที่เหมาะสม คือ 200 มก./ล. ความเข้มข้นที่สูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการเป็นโคแอกกูแลนต์ลดลง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพ จากการเตรียมโคแอกกูแลนต์จากเมล็ดมะรุมที่ต่างกัน พบว่าไม่ว่าจะใช้เฉพาะเนื้อเมล็ด ใช้ทั้งเนื้อและเยื่อหุ้มเมล็ด ใช้เครื่องบดไฟฟ้า หรือจะใช้เครื่องบดธรรมดา ก็จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์ของ Council of Scientific and Industrial Research ในประเทศอินเดีย พบว่าองค์ประกอบของเมล็ดมะรุมมีดังนี้ คือ ความชื้น 4 % , โปรตีน 38.4 % , น้ำมัน 34.7 % , ไนโตรเจนอิสระ 16.4 % , เส้นใย 3.5 % และเถ้า 3.2 %

Jahn (1980) ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้เมล็ดมะรุมเป็นโคแอกกูแลนต์ต่อปริมาณแบคทีเรียในน้ำ พบว่ามะรุมไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียให้หมดไปได้ และต่อมาในปี 1981 Jahn ได้ทำการทดลองพบว่าการใช้มะรุมจะลด fecal coliform จาก 140,000 ต่อ 100 มล. ให้เหลือ 0-400 ต่อ 100 มล.

Eilert, welters และ Nahrstedt (1980) ได้ศึกษาเกี่ยวกับสารปฏิชีวนะจากเมล็ดมะรุม ที่มีฤทธิ์ฆ่าแบคทีเรียและรา เป็นสารพวก 4 - (α -L-rhamnosyloxy) benzyl isothiocyanate และได้ทำการทดลองกับ *Myeobacterium phlei* และ *Bacillus subtilis* ที่ความเข้มข้นน้อยที่สุดที่ใช้คือ 40 และ 56 mol/l ตามลำดับ พบว่าต้องนำเมล็ดมะรุม 10 ส่วนมาสกัดให้ได้สารนี้หนึ่งส่วน

จึงจะเกิดผลในการฆ่าแบคทีเรีย จะเห็นว่าปริมาณมะรุมที่จะใช้ในการกำจัดแบคทีเรียจะมากกว่าที่ใช้ในการกำจัดความขุ่นมาก ดังนั้นความเข้มข้นของมะรุมที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนต์โดยทั่วไป คือ 50 ถึง 200 มก./ล. จะมีผลในการกำจัดแบคทีเรียน้อยมาก

Jahn (1981) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเมล็ดมะรุมเป็นพวกโพลีเปปไทด์ มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 6,000 - 16,000 ดาลตัน ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่สำคัญหลายชนิด เช่น กลูตามีน โปรลีน เมไธโอนีน ฮาจีซีน โคแอกกูแลนต์ที่สกัดได้มีพฤติกรรมคล้ายประจุบวก

Barth และคณะ (1981) ทำการทดลองเกี่ยวกับแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรค พบว่าหลังจากเติมผงแป้งเมล็ดมะรุมในปริมาณ 200 มก./ล. ลงในน้ำที่มีแบคทีเรียผสมอยู่ที่อุณหภูมิ 18-20 °C เปรียบเทียบกับการปล่อยให้มียืดการตายปกติ พบว่าสามารถลดปริมาณแบคทีเรียได้เพิ่มขึ้นอีกนอกเหนือจากอัตราการตายโดยปกติของแบคทีเรีย แต่ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคนั้น ๆ

Olsen (1985) ได้ทำการทดลองพบว่าในการใช้โคแอกกูแลนต์จากเมล็ดมะรุมสามารถลดปริมาณ *Schistosoma mansoni* ได้ทั้งในน้ำประปา (50 % หลังจากทิ้งไว้ 1 ชม.) และน้ำจากแม่น้ำไนล์ (30-55 %) แสดงว่าค่าความขุ่นที่เปลี่ยนไปไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรีย

Jahn (1988) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์ของสารส้มและมะรุม พบว่าสามารถกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน คือ 15 - 10,000 เอ็นทียู แต่ในกรณีที่ความขุ่นต่ำประสิทธิภาพจะลดลง และความสามารถในการกำจัดความขุ่นของน้ำดิบจากแหล่งที่ต่างกันจะมีค่าต่างกันไปด้วย ทั้งนี้เพราะองค์ประกอบของน้ำที่ไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้มะรุมพันธุ์ที่แตกต่างกันก็จะให้ประสิทธิภาพที่ไม่เท่ากัน ตลอดจนปริมาณการเติมที่เหมาะสมก็จะแตกต่างกันด้วย ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากอัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างส่วนที่เป็นโคแอกกูแลนต์และส่วนประกอบอื่นของเนื้อเมล็ด ธรรมชาติทางเคมีที่ต่างกันของโคแอกกูแลนต์และความยากง่ายของปฏิกิริยาระหว่างสารโคแอกกูแลนต์และสารแขวนลอยด้วย

จิราพร (1989) ได้ทำการศึกษาเพื่อคัดเลือกพืชชนิดต่าง ๆ ได้แก่ มะรุม กระเจี๊ยบแดง ถั่วแดง ถั่วลิสง และมะขาม มาทำการทดสอบความสามารถในการเป็นโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เอดร่วมกับสารส้ม พบว่าการใช้เมล็ดพืชดังกล่าวสามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้ แต่ไม่สามารถผลิตน้ำใสให้ได้คุณภาพเท่าเทียมกับการใช้สารส้มได้ และเหมาะสำหรับใช้กับน้ำดิบ

กับน้ำดิบที่มีความขุ่นมากกว่า 100 เอ็นทียู สำหรับในการใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอคตินั้น จะช่วยประ
หยัดการใช้สารส้มได้มากกว่าร้อยละ 50



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย