

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกกูเลชัน

ในการกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากน้ำทำได้ง่ายกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่เรียกว่าอนุภาคคอลลอยด์ (colloidal particle) อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด $10^0$  มม.ถึง $10^3$  มม.และไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด จึงต้องทำให้เกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคจนเป็นก้อนขนาดใหญ่ เรียกว่าฟล็อก(floc) โดยการใช้สารเคมีบางอย่างทำลายเสถียรภาพ (destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์เพื่อทำการแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากน้ำ กระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยใช้สารเคมี เรียกว่า กระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) และสารเคมีที่ใช้เดิมเรียกว่าสารโคแอกกูแลนต์(coagulant) เมื่ออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มาสัมผัสกันและรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการฟล็อกกูเลชัน(flocculation) ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะสามารถทำให้ตกตะกอนได้ง่าย การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ รวมตัวเป็นฟล็อกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (Montgomery, 1985) คือ การทำลายเสถียรภาพ(destabilization) และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มากกระทบกันหรือสัมผัสกันมากที่สุด รายละเอียดของขั้นตอนทั้งสองคือ

##### 2.1.1 ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (destabilization) สามารถทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบคือ

ก. โดยการลดความหนาของชั้นกระจาย(diffuse layer) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการลดค่าซีตาโพเทนเชียล(zetapotential) ทำโดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุของอนุภาค ผลที่ได้คือชั้นกระจายที่มีความหนาลดลงและทำให้ค่าซีตาโพเทนเชียลลดลงด้วย โดยไม่มีการเปลี่ยนประจุของอนุภาคเป็นตรงกันข้าม

ข. โดยการดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์( adsorption and charge

neutralization) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยการเติมสารเคมีที่มีประจุไฟฟ้าตรงกันข้ามกับประจุอนุภาคคอลลอยด์และสามารถดูดติดผิวบนอนุภาคคอลลอยด์ได้ สารเคมีดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับประจุอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ประจุอนุภาคคอลลอยด์เปลี่ยนเป็นประจุตรงกันข้ามได้

ค. โดยการใช้กลไกการกวาด (sweep coagulation) เป็นการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์โดยการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป ทำให้เกิดผลึกของสารประกอบซึ่งมีลักษณะเหนียวสามารถห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้ได้ผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้นทำให้ตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

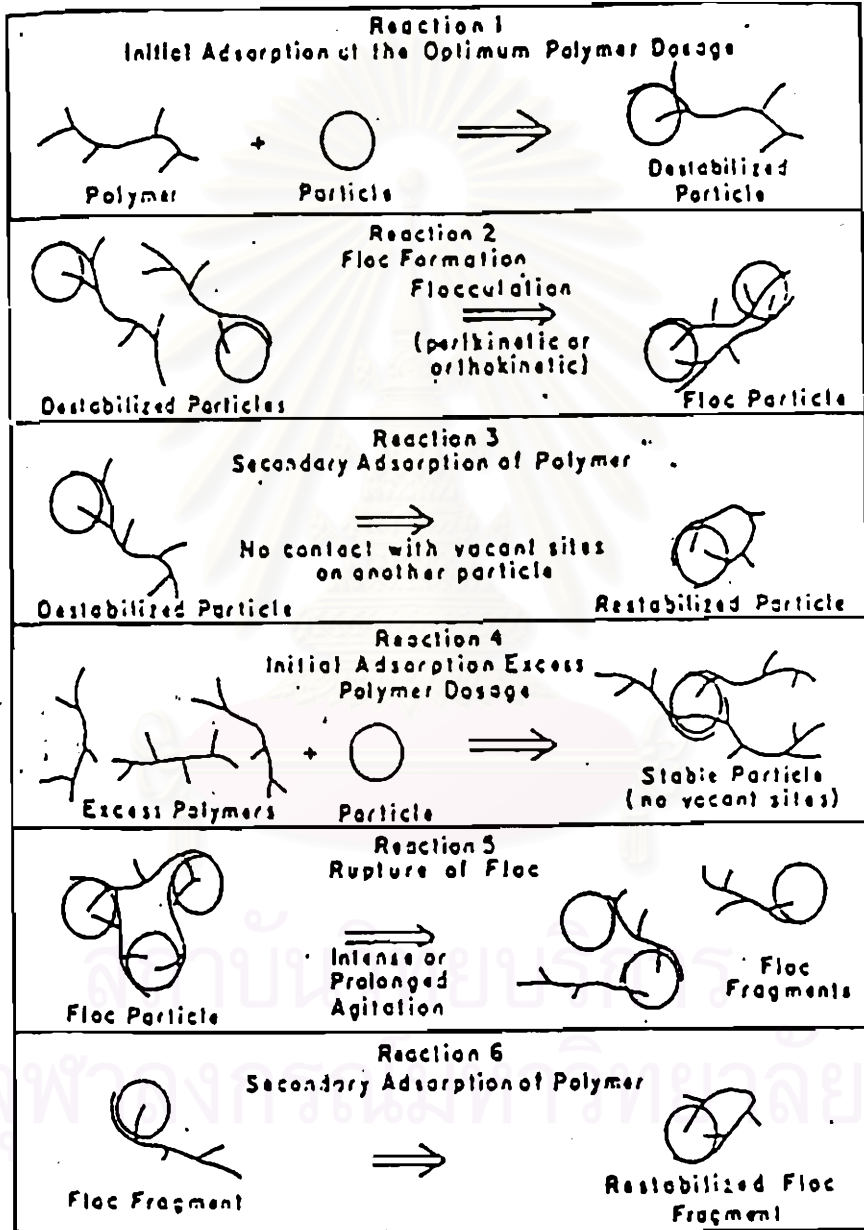
ง. โดยการใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (polymer bridging) อธิบายโดยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging model ในขั้นแรกอนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่ โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว ขั้นตอนต่อมาคืออนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมซึ่งทำให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่และสามารถแยกตัวจากน้ำได้ง่าย ถ้าใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสีย เนื่องจากโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์จนไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particles) การกวนน้ำแรงเกินไปก็จะทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์กลับคืนมาเช่นกัน เนื่องจากฟล็อกที่เกิดแตกเป็นส่วนๆและทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาคอันเดิม ดังรูป 2.1

### 2.1.2 ขั้นตอนการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มากกระทบกัน

ขั้นตอนการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มากกระทบกัน หรือสัมผัสให้มากที่สุด (transport of colloidal particle) อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะเกิดกระบวนการฟล็อกकुเลชันอย่างสมบูรณ์เพียงใด ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำให้เกิดการสัมผัส ซึ่งมีหลายวิธีดังเช่น (มันสิน ตันจูลเวศม์, 2537)

ก. การสร้างสัมผัสของอนุภาคคอลลอยด์ ด้วยการกวนน้ำให้เคลื่อนที่โดยในส่วนต่างๆของน้ำมีอัตราเร็วแตกต่างกัน ทำให้อนุภาคต่างๆมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดการสัมผัสและรวมตัวกันขึ้นเป็นฟล็อกในที่สุด แต่การเคลื่อนที่ต้องไม่เร็วเกินไปจนทำให้ฟล็อกแตกออก ซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่า ออร์โธไคเนติกฟล็อกकुเลชัน (orthokinetic flocculation) อนุภาคคอลลอยด์ที่มีฟล็อกकुเลชันแบบ ออร์โธไคเนติก ควรมีความเร็วขนาด 0.1-1 ไมครอน และ มีความเข้มข้นไม่

น้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.1 กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันแบบเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ (Weber, 1972)

ข. การสร้างสัมพัทธ์ของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นเองได้ โดยอาศัยการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน ซึ่งเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์กับโมเลกุลของน้ำ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ การรวมอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ถูกชนโดยโมเลกุลของน้ำ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำด้วยความร้อน ซึ่งแปรรูปเป็นพลังงาน ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายอยู่ในน้ำ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีการเคลื่อนที่และเกิดการสัมพัทธ์กันจนเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งมีชื่อเรียกทางเทคนิคว่าเพอริไคเนติกฟล็อกคูเลชัน (perikinetic flocculation) จัดเป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุล ทำให้สามารถสร้างสัมพัทธ์ให้กับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมครอน

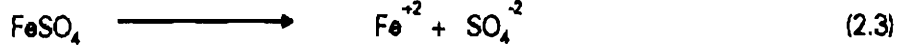
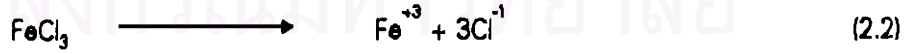
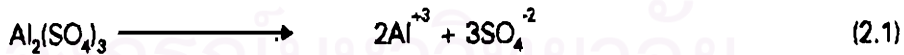
ค. การสร้างสัมพัทธ์ของอนุภาคคอลลอยด์ โดยการใช้ออนุภาคคอลลอยด์ที่จับตัวกันเป็นฟล็อกแล้วเป็นเป้าสัมพัทธ์ให้อนุภาคคอลลอยด์ใหม่ เช่น ทำให้ฟล็อกจับตัวกันเป็นชั้นสลัดจ์ (sludge blanket) และบังคับให้อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนผ่านชั้นสลัดจ์ กรณีนี้เหมาะสำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน แต่น้อยกว่า 5 ไมครอน

2.2 โคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ สารส้ม โดยมีสูตรโมเลกุลคือ  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  และ สารประกอบเหล็กบางตัวคือ  $FeCl_3$  และ  $FeSO_4$

2.2.1 เคมีของสารส้มและสารประกอบเหล็กในน้ำ

เมื่อสารส้ม เพอริคคลอไรด์ และเพอริริซัลเฟตละลายน้ำจะมีการแตกตัวของไอออนบวกและไอออนลบเกิดขึ้นดังนี้



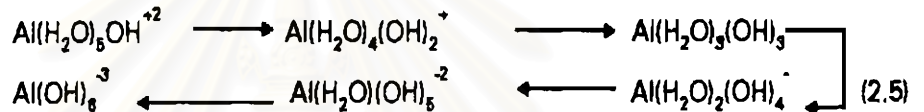
สมการที่ 2.1 ถึง 2.3 อาจทำให้เข้าใจผิดถึงสถานะของไอออนบวกซึ่งเป็นของโลหะอะลูมิเนียมและเหล็ก ทั้งนี้เพราะไอออนของโลหะทุกชนิดจะอยู่รวมกับน้ำและไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปอิสระได้ ยกตัวอย่างเช่นไอออนของอะลูมิเนียมและเหล็กจะอยู่รวมกับน้ำ 6 โมเลกุล ดังนั้นการเขียนสูตรที่ถูกต้องจึงควรเป็นดังนี้  $Al(H_2O)_6^{+3}$  และ  $Fe(H_2O)_6^{+3}$  ตามลำดับ ไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและน้ำเรียกว่า Aqua metal ion โมเลกุลของน้ำเรียกว่า Ligand อนึ่งเพื่อความสะดวกในการเขียนบางครั้ง

มักตัดโมเลกุลของน้ำออก โดยถือว่าเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปอยู่แล้ว ดังนั้น  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  และ  $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  จึงเหลือเพียง  $\text{Al}^{+3}$  และ  $\text{Fe}^{+3}$  ตามลำดับ

เนื่องจาก  $\text{Al}^{+3}$  และ  $\text{Fe}^{+3}$  มีอำนาจเป็นกรด ซึ่งสามารถให้  $\text{H}^+$  และพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed) ให้เป็นไอออนต่างๆของอะลูมิเนียมและเหล็กซึ่งมี  $\text{OH}^-$  เป็น Ligand ตัวอย่างเช่นการแตกตัวของสารส้ม ดังสมการ 2.4



สมการ 2.4 นี้เป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขั้นแรกสุด ซึ่งน้ำ 1 โมเลกุลของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}^-$ ) 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นได้ต่อไปอีก ทำให้โมเลกุลของน้ำถูกแทนที่เพิ่มขึ้นประจุบวกจะลดลงเรื่อยๆจนหมดและกลายเป็นประจุลบ การเปลี่ยนแปลงข้างต้นจะมีลำดับ ดังสมการ 2.5

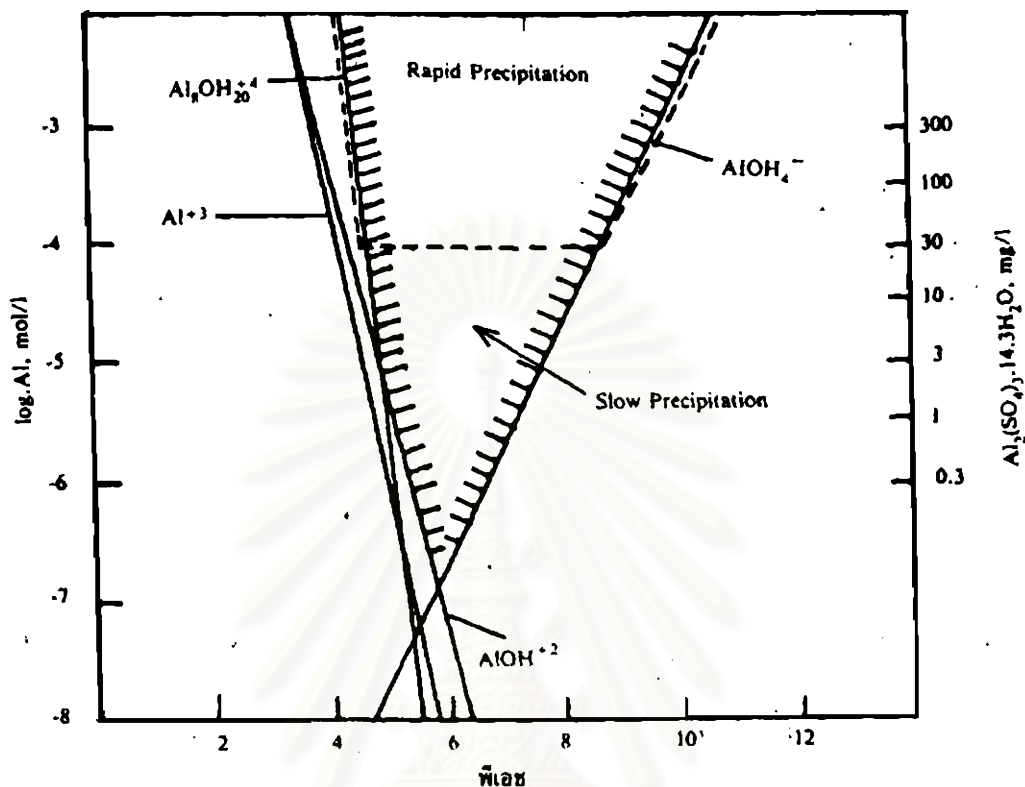


ในกรณีของสารประกอบเหล็ก รูปแบบของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ก็เช่นเดียวกับสารส้ม จึงไม่จำเป็นต้องกล่าวซ้ำ จากสมการที่ 2.5 ไอออนคอมเพล็กซ์ซึ่งเป็นไอออนที่มีอะลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียว เรียกว่า Monomeric hydroxo complex ส่วนไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีอะลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอม เรียกว่า Polymeric hydroxo complex งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเคมีของสารส้มในน้ำ ทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญ 3 ประการ คือ

ก. ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล พร้อมที่จะดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ และหักล้างประจุคอลลอยด์ได้ ถ้าไอออนมีประจุตรงกันข้ามและมากกว่าของคอลลอยด์ คอลลอยด์จะแสดงประจุเป็นตรงกันข้ามกับของเดิม (charge reversal)

ข. พีเอชของน้ำ เป็นปัจจัยกำหนดความเข้มข้น และ ชนิดของไอออนคอมเพล็กซ์ต่างๆ โดยเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดังรูป 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและความเข้มข้นของไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ สามารถแสดงได้ด้วยไดอะแกรมที่เรียกว่า Stability diagram บนรูปเดียวกันนี้ ยังแสดงถึงขอบเขตของการตกผลึก  $\text{Al}(\text{OH})_3$  อีกด้วย

ค. ฟล็อกสารส้มที่มีพีเอชเป็นกลางจะมีประจุบวก แต่จะกลายเป็นประจุลบเมื่อมีพีเอชเป็นต่าง



รูปที่ 2.2 Stability diagram ที่ใช้ควบคุมกลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม (Weber, 1972)

### 2.2.2 กลไกโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มและสารประกอบเหล็ก

สารส้มและสารประกอบเหล็กสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไก 2 ประการคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และ กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก. กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิว และทำลายประจุ สารส้มและสารประกอบเหล็กสามารถสร้างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็นไอออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และ ทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายอนุภาคจนกลายเป็นฟล็อก กลไกนี้สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของสารส้มมีน้อยกว่าหรือเท่ากับผลคูณของ  $(Al^{3+})$  และ  $(OH)^{-}$  ต่ำกว่า  $K_{sp}$  และพีเอชต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไปแต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมให้ได้โคแอกกูเลชัน

มีกลไกแบบนี้มักไม่สามารถกระทำได้ เหตุผลคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ ต้องเกิดขึ้น และเสร็จสิ้นภายใน  $10^{-1}$  ถึง 1 วินาที มิฉะนั้นแล้วไอออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลิตภัณฑ์  $Al(OH)_3$  ทำให้เกิดกลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มแทน ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายกว่า

ข. กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก สารส้ม และสารประกอบเหล็กสามารถสร้างกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยผลึก หรือ Sweep coagulation โดยการสร้างผลึกซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึกก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมากๆจะได้ฟล็อกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย ในทางปฏิบัติสารส้มที่ใช้ต้องมีปริมาณสูงพอ จนทำให้ผลคูณของ  $[Al^{3+}]$  และ  $[OH]^{-3}$  มีค่าเกินกว่า  $K_{sp}$  และค่าพีเอชควรอยู่ในช่วง 6-7.5 (Sawyer, Macarty and Parkin, 1994)

## 2.3 กลไกโคแอกกูเลชันที่เกิดจากการใช้สารโพลีเมอร์และโคแอกกูเลชันเอดอื่นๆ

โคแอกกูเลชันเอด(coagulation aid)หรือโคแอกกูแลนท์เอด(coagulant aid)หมายถึงสารที่ช่วยทำให้โคแอกกูแลนท์สร้างโคแอกกูเลชันได้ดีขึ้น (Montgomery, 1985) ตัวอย่างโคแอกกูแลนท์เอดได้แก่ สารอินทรีย์ธรรมชาติและสังเคราะห์ แอ็คติเวตเต็ดซีลิกา ดินเหนียวชนิดต่างๆ ปูนขาว เป็นต้น ในปัจจุบันโคแอกกูแลนท์เอดที่นิยมใช้กันมากจะเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์แบบต่างๆซึ่งเรียกว่าโพลีเมอร์(polymer)หรือโพลีอิเล็กโทรไลต์(polyelectrolyte) โพลีเมอร์ที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนท์เอดต้องสามารถเกาะติดผิวของอนุภาคความขุ่นได้ ดังนั้นจึงมักปรากฏว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่นกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชันกล่าวคือถ้าความขุ่นสูงก็ต้องการโพลีเมอร์มากแต่ถ้าความขุ่นต่ำก็ต้องการโพลีเมอร์น้อย เป็นต้น

โพลีเมอร์สร้างโคแอกกูเลชันให้กับความขุ่นได้ 2 วิธี (Montgomery, 1985)ซึ่งส่วนต้องอาศัยสมบัติในการเกาะจับอนุภาคคอลลอยด์ วิธีแรกเป็นการทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์ที่มีประจุบวกทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดสิ้นไป กรณีเช่นนี้อาจใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก็ได้ วิธีที่สองเป็นการสร้างโคแอกกูเลชันโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลายๆตัว ประจุของโพลีเมอร์ในกรณีนี้ไม่ใช่เรื่องสำคัญเพราะไม่จำเป็นต้องใช้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือโพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถใช้เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่างๆได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรง และสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำ ด้วยเหตุนี้โคแอกกูเลชันที่เกิดจากวิธีการสร้างสะพานนี้จึงต้องการโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆซึ่งมักเป็นชนิดประจุลบหรือไม่มีประจุ

## 2.4 การเลือกสารโคเอกกุลแลนท์และสารโคเอกกุลแลนท์เอ็ด

การเลือกสารเคมีมาเป็นโคเอกกุลแลนท์ มักขึ้นอยู่กับสมบัติของน้ำเป็นสำคัญ สารโคเอกกุลแลนท์ที่นิยมใช้คือ สารส้มและสารประกอบเหล็ก เช่น เพอร์ริคคลอไรด์ โดยทั่วไปสารส้มมักเป็นที่นิยมมากกว่าสารเคมีอื่นๆ เนื่องจากราคาถูกและหาซื้อง่าย อย่างไรก็ตาม บางครั้งสารส้มอาจใช้ไม่ได้เท่าสารประกอบเหล็ก จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบจารีทดสอบ เพื่อหาปริมาณการใช้สารโคเอกกุลแลนท์ที่เหมาะสม(optimum dose) ในบางโอกาสการปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดหรือด่างก็อาจเป็นเรื่องจำเป็น มิฉะนั้นแล้วโคเอกกุลแลนท์จะเกิดได้ไม่สมบูรณ์ และอาจจำเป็นต้องเติมสารโคเอกกุลแลนท์เอ็ดบางอย่างเพื่อช่วยทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่และจมตัวลงได้ง่าย

สารเคมีที่สามารถใช้เป็นสารโคเอกกุลแลนท์เอ็ดมีหลายชนิดซึ่งแตกต่างกัน แต่สารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ สารโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นลูกโซ่ของสารโมโนเมอร์หลายๆตัวเรียงกันอย่างเป็นระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เช่นอาจมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่เพียงไม่กี่ร้อยไปจนถึงระดับที่สูงกว่าสิบล้าน เป็นต้น การจำแนกประเภทของโพลีเมอร์ตามประจุมีดังนี้คือโพลีเมอร์ประจุบวก(cationic polymer) โพลีเมอร์ประจุลบ ( anionic polymer) และโพลีเมอร์ไม่มีประจุ(nonionic polymer) ประจุของโพลีเมอร์เหล่านี้เกิดขึ้นจาก Functional group ต่างๆหลายชนิดเช่น คาร์บอกซิล ซัลโฟเนต เป็นต้น

### 2.4.1 ชนิดของโพลีเมอร์

การจัดหมวดหมู่สารโพลีเมอร์สามารถทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติและประโยชน์ใช้งาน กล่าวคือ อาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดโครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุลหรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโมเลกุล เป็นต้น

#### 2.4.1.1 แบ่งตามประจุที่อยู่บนสายโพลีเมอร์(polymer chain)ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ

ก. สารโพลีเมอร์ที่ให้ประจุบวก (cationic polymer) คือสารโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่มีประจุบวก ซึ่งมีหลายรูปแบบได้แก่

- โพลีอามีน
- โพลีเอทิลีนควอเทอนารี
- แคทไอออนนิคไทรยานามีน



- คาโบไมอิลโพลีเมอร์แคทไอออน
- โพลีแอลฟาไวนิลไมตาไคลน
- โพลีไดอัลลิลเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์
- ไดเมทิลอะมีโนอัลคิลอะครีลิก
- เมทาไซคลิกเอสเทอร์โพลีเมอร์
- เอ็นไดอัลคิลอิมิโนอัลคิลอะครีลาไมนโพลีเมอร์

ข. สารโพลีเมอร์ที่ให้ประจุลบ(anionic polymer)คือสารโพลีเมอร์สังเคราะห์ที่มีประจุลบโดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูง มักใช้เป็นสารรวมตะกอน โพลีเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลทไอออน ได้แก่ พวกลโพลีเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิเลทและพวกลโพลีเมอร์ที่มีหมู่วัลฟีนิกแอซิด

ค. สารโพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุ(nonionic polymer) คือ สารโพลีเมอร์ที่ไม่มีประจุทำให้เกิดการรวมตะกอนโดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ตัวอย่าง สารโพลีเมอร์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอนได้แก่ โพลีเอทิลีนออกไซด์ โพลีอะครีลาไมด์ และโพลีไวนิลโพลีไลโดนอนมักใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

ง. สารโพลีเมอร์ที่มีทั้งประจุบวกและลบ (polyampholytes) คือสารโพลีเมอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรดและเบส มักจะให้ประจุบวกที่พีเอชต่ำ ให้ประจุลบที่พีเอชสูงและเป็นกลางทางประจุที่บางค่าพีเอช

#### 2.4.1.2 แบ่งตามแหล่งกำเนิด ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

ก. สารโพลีเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น เซลลูโลส (cellulose) , เจลาติน (gelatin) และ แป้ง (starch) เป็นต้น ส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุโดยมีลักษณะโครงสร้าง และ น้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน ในทางปฏิบัตินิยมใช้ในปรับปรุงคุณภาพน้ำ

ข. สารโพลีเมอร์ที่ได้จากสังเคราะห์ เป็นการนำเอาโมโนเมอร์หนึ่งหรือสองชนิดมารวมกัน และสามารถจัดการสังเคราะห์ขึ้นให้ได้ตรงตามที่ต้องการ โดยสามารถทำให้ได้ขนาดที่แตกต่างกัน เป็นผลทำให้มีน้ำหนักโมเลกุล(molecular weight)ที่แตกต่างกันและ สามารถกำหนดกลุ่มประจุรวมทั้งจำนวนประจุ(charge density)ที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถจัดการเกี่ยวกับโครงสร้างของโพลีเมอร์ให้เป็นแบบเส้นตรง หรือกิ่งก้านสาขาก็ได้ (Montgomery, 1985)

## 2.5 การทำให้ตะกอนลอย

การทำให้ตะกอนลอย (flotation) เป็นวิธีการแยกตะกอนออกจากระบบโดยการทำให้ตะกอนต่างๆ ในน้ำเสียลอยขึ้นสู่บริเวณชั้นบนของผิวน้ำ เพื่อทำการกวาดทิ้งออกไป วิธีนี้นิยมใช้กับตะกอนที่ยากแก่การตกตะกอน หลักการคือต้องทำให้ความตึงจำเพาะของตะกอนมีค่าน้อยกว่าน้ำเสียซึ่งโดยธรรมชาติแล้วตะกอนจะมีน้ำหนักมากกว่าน้ำเสีย ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ฟองอากาศรวมเกาะกับตะกอน เพื่อให้ความตึงจำเพาะของทั้งฟองอากาศรวมกับตะกอนมีค่าน้อยกว่าความตึงจำเพาะของน้ำเสีย ในทางปฏิบัติระบบการทำให้ตะกอนลอย นิยมใช้เพื่อแยกตะกอนที่มีน้ำหนักเบา หรือตะกอนที่มีแนวโน้มจะลอยขึ้นมา ซึ่งถ้าใช้วิธีการตกตะกอนจะไม่สามารถทำได้ดีเท่าที่ต้องการ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานฆ่าสัตว์ โรงงานผลิตปลาทูน่ากระป๋อง โรงงานผลิตน้ำมันพืช โรงงานกลั่นน้ำมัน เป็นต้น โรงงานเหล่านี้จะมีตะกอนประเภทดังกล่าวมาก ดังนั้นวิศวกรอาจเลือกใช้ระบบการทำให้ตะกอนลอยสำหรับการแยกตะกอนเหล่านี้ ออกจากน้ำเสีย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าการใช้ถังตกตะกอนธรรมดา นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดพื้นที่ในการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย การนำเอากระบวนการทำให้ตะกอนลอย (flotation) ไปใช้ในทางปฏิบัติมีดังนี้

- ก. ใช้ทำหน้าที่เป็นระบบบำบัดก่อนขั้นต้น คือติดตั้งก่อนถังตกตะกอนแรก
  - ข. ใช้ทำหน้าที่เป็นระบบบำบัดขั้นต้น คือติดตั้งก่อนระบบบำบัดขั้นที่สอง
  - ค. ใช้ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นของตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง
  - ง. ใช้ทำหน้าที่แยกตะกอนบางประเภท ซึ่งไม่สามารถแยกออกโดยวิธีการตกตะกอน
- (เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์ ,2535)

## 2.6 วิธีการทำให้ตะกอนลอย

การทำให้ตะกอนลอยที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย มีอยู่ 3 วิธี คือ

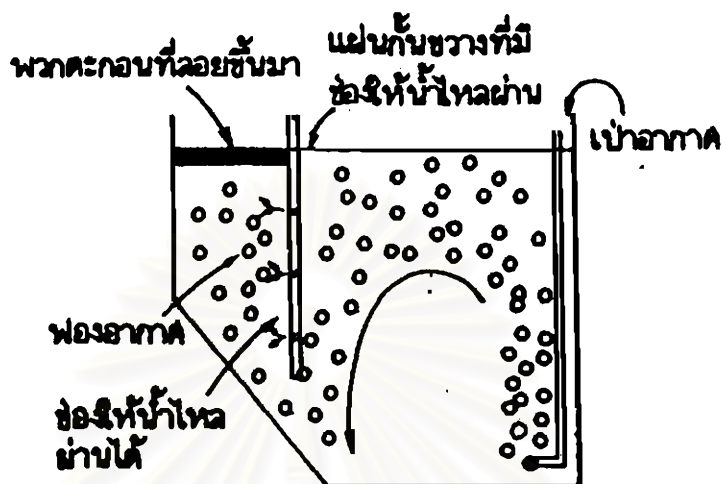
### 2.6.1 การทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศ (air flotation)

การทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศ (air flotation) มีหลักการคือ การเติมอากาศหรือเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง ณ ความดันบรรยากาศ ในการเป่าอากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฟองอากาศประมาณ 2-3 มิลลิเมตร ซึ่งจะนำพาตะกอนต่างๆ ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ

จากนั้นพวกตะกอนที่ลอยขึ้นมาจะถูกกวาดทิ้งออกไปโดยใช้เครื่องจักรกลหรือใช้คนตักออกไปก็ได้ รายละเอียดโครงสร้างของถัง air flotation ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 สำหรับฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ความเร็วของฟองอากาศที่ลอยขึ้นมามีมากขึ้นด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศกับความเร็วยลอยขึ้นของฟองอากาศได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของฟองอากาศกับความเร็วยลอยขึ้นของฟองอากาศ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2535)

ขนาดของฟองอากาศ (มม.)	ความเร็วยลอยขึ้นของฟองอากาศ (มม/วินาที)
0.2	1.9
0.3	3.3
0.4	4.9
0.5	6.7
1.0	13.0
2.0	18.0
3.0	19.5
4.0	20.0
5.0	20.1
10.0	22.0
20.0	30.0
30.0	38.0
40.0	46.0
50.0	55.0



รูปที่ 2.3 รายละเอียดโครงสร้างของถัง air flotation ( เกียรติศักดิ์ อุตมสินโรจน์ ,2535)

การทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะประสิทธิภาพในการแยกตะกอนต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

#### 2.6.2 การทำให้ตะกอนลอยด้วยภาวะสุญญากาศ (vacuum flotation)

การทำให้ตะกอนลอยด้วยภาวะสุญญากาศ(vacuum flotation) วิธีนี้มีหลักการคือ การเป่าอากาศลงในน้ำเสียจนถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งมีอยู่ 2 วิธีคือ การเป่าอากาศลงในน้ำเสียโดยตรง หรืออีกวิธีคือปล่อยให้อากาศเข้าในเครื่องสูบน้ำเอง ระบบนี้จะใช้ถังปิดซึ่งจะเก็บน้ำที่ถูกเป่าอากาศลงไปจนถึงจุดอิ่มตัว พร้อมกันนั้นจะมีการดูดอากาศออกจากถัง โดยขณะนั้นภายในถังจะมีสภาพเป็นสุญญากาศ กล่าวคือ ความดันภายในถังจะต่ำกว่าความดันบรรยากาศประมาณ 4-5 บาร์ เมื่อถึงนี้ได้ถูกเปิดออกโดยใช้วาล์วควบคุมความดัน อากาศที่อยู่ภายนอกจะเข้าไปแทนที่ มีผลทำให้อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำเสียแยกออกมาจากน้ำเสียในลักษณะของฟองอากาศเล็กๆ พองอากาศเล็กๆ เหล่านี้จะพาตะกอนต่างๆในน้ำเสียลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการกวาดทิ้งหรือสูบออก

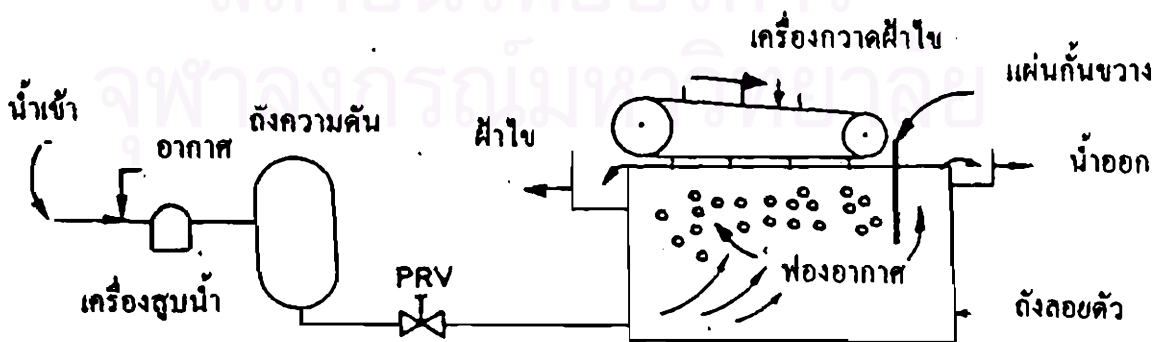
2.6.3 การทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศละลาย (dissolved air flotation)

การทำให้ตะกอนลอยด้วยอากาศละลายหรือเรียกว่าระบบดีเอเอฟ เป็นระบบที่วิศวกรรมนิยมใช้กันมากเนื่องจากประสิทธิภาพการแยกตะกอนสูงกว่าระบบอื่นๆ ส่วนใหญ่ใช้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นที่ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวหรือแยกของเหลวชนิดหนึ่งออกจากชั้นของเหลวอีกชนิดหนึ่งโดยการทำให้อนุภาคดังกล่าวลอยขึ้นสู่บริเวณผิวน้ำของระบบโดยใช้ฟองอากาศเป็นตัวนำพาตะกอน (Tchobanoglous, 1991)

หลักการของระบบดีเอเอฟ คือ การอัดอากาศลงในน้ำเสีย ภายใต้ความดันประมาณ 345-483 Kpa (50-70lb/in<sup>2</sup>) โดยให้เก็บกักในถังอัดความดันประมาณ 2-4 นาที เพื่อให้อากาศละลายในน้ำได้ปริมาณสูง จากนั้นจึงปล่อยน้ำออกจากถังความดันไปยังถังลอยตัวโดยไหลผ่านวาล์วลดความดัน เมื่อน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศถูกปล่อยให้เข้าสู่ภาวะความดันบรรยากาศจะทำให้เกิดฟองอากาศจำนวนมากเป็นตัวพาตะกอน ตัวแปรที่สำคัญในระบบดีเอเอฟ คือความดันอากาศ อัตราส่วนของอากาศกับตะกอน(A/S ratio) ความเข้มข้นของตะกอนในน้ำ และช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บกัก ซึ่งคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบแล้วจะมีความเข้มข้นของตะกอนลดลง ส่วนตะกอนที่ถูกทำให้ลอยจะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยทั่วไประบบดีเอเอฟจะมีเวลาเก็บกักประมาณ 20-30 นาที

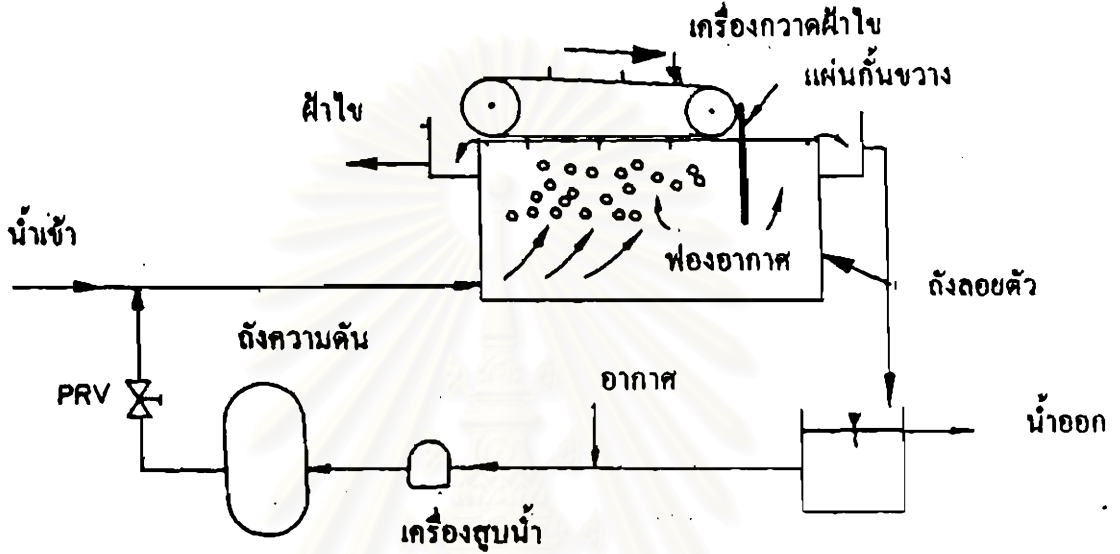
ระบบดีเอเอฟที่ใช้มีอยู่ 2 ระบบ (Eckenfelder, 1989) คือ

ก. ระบบดีเอเอฟแบบไม่มีการหมุนเวียน ระบบนี้นิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดไม่เปราะ โดยการอัดอากาศภายใต้ความดันเพื่อให้อากาศละลายอยู่ในน้ำภายในถังความดัน จากนั้นจึงปล่อยน้ำไปยังถังลอยตัวในภาวะความดันบรรยากาศ อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะหนีออกจากน้ำในรูปของฟองอากาศลอยอยู่ทั่วถึง รายละเอียดของระบบไม่มีการหมุนเวียน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบดีเอเอฟแบบไม่มีการหมุนเวียน (Tchobanoglous, 1991)

ข. ระบบดีเอเอฟแบบที่มีการหมุนเวียน ระบบนี้นิยมใช้กับน้ำที่มีตะกอนชนิดเปราะแตกง่าย ซึ่งการรบกวนอากาศให้กับน้ำเสียโดยตรง อาจทำให้ตะกอนแตกกระจายได้ (Kemmer และ Mocalion, 1979) ดังนั้นจึงนำเอาน้ำใสจากถังลอยตัวไปยังถังความดันเพื่ออัดอากาศจากนั้นจึงปล่อยออกไปรวมกับน้ำเสียที่จะเข้าสู่ระบบแล้วปล่อยเข้าสู่ถังลอยตัวเพื่อแยกตะกอนออกจากน้ำเสียต่อไป รายละเอียดของระบบแบบที่มีการหมุนเวียน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบดีเอเอฟแบบที่มีการหมุนเวียน (Tchobanoglous, 1991)

จากหลักการของระบบดีเอเอฟ โดยให้อากาศละลายในน้ำภายใต้ความดันแล้วจึงลดความดันของน้ำลงสู่ภาวะความดันบรรยากาศนั้น ปริมาณของอากาศที่ละลายในน้ำจะแปรผันโดยตรงกับความดันตามกฎของเฮนรี และอุณหภูมิที่สภาวะนั้นโดยปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศปกติมีความสัมพันธ์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความดันบรรยากาศปกติ (Eckenfelder, 1989)

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณอากาศละลาย(มล./ล)
0	28.8
10	23.5
20	20.1
30	17.9
40	16.4

การวิเคราะห์ระบบดีเอเอฟแบบไม่มีการเวียนกลับ :

$$\text{ปริมาณอากาศที่พ่นเข้าไปในถัง Flotation (A)} = Qs_i$$

$$\text{ปริมาณอากาศในน้ำที่ออกจากถัง Flotation (A}_0\text{)} = Qs_0$$

$$\text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการนำตะกอนลอยขึ้นมา (A)} = Q(s_i - s_0) \quad (2.6)$$

โดย  $Q$  = อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย , ลบ.ม/วัน

$s_i$  = ปริมาณของอากาศที่ละลายในน้ำที่ไหลเข้าสู่ถัง Flotation , มก/ลิตร

$s_0$  = ปริมาณของอากาศที่ละลายในน้ำที่ไหลออกจากถัง Flotation , มก/ลิตร

ในทางปฏิบัติจริง อากาศที่ละลายอยู่ในน้ำจะไม่สามารถละลายถึงจุดอิ่มตัว ซึ่งจำเป็นต้องพิจารณาเลือกใช้ตัวคูณเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพจริง ดังนั้น

$$s_i = f(P/P_0)s_0 \quad (2.7)$$

$$s_0 = (1)s_0 \quad (2.8)$$

โดย  $f$  = ค่าตัวคูณซึ่งหมายถึงเศษส่วนของปริมาตรอากาศที่ละลายในน้ำเสียต่อน้ำสะอาด

$P$  = ความดันในถังอัดความดัน , บาร์ ;  $P_0$  = ความดันบรรยากาศปกติ 1 บาร์

$s_0$  = ปริมาณอากาศที่ละลายในน้ำ , มก/ลิตร

และ 1 ใน สมการ(2.8) คือสภาพที่น้ำไหลออกจากถัง แทนค่าสมการ(2.7) , (2.8) ลงในสมการ(2.6)

$$A = Qs_0(fP-1) \quad (2.9)$$

และปริมาณของแข็งในน้ำเสีย,  $S = QS_0$  (2.10)

ดังนั้น จากสมการ (2.9) และ(2.10) จะได้  $A/S = s_0(fP-1)/S_0$  (2.11)

และเมื่อ  $s_0$  มีหน่วยเป็น มล/ลิตร สมการ(2.11) จะเปลี่ยนเป็น สมการ(2.12)

$$A/S = 1.3s_0(fP-1)/S_0 \quad (2.12)$$

โดย ตัวคูณ 1.3 คือ น้ำหนักของอากาศเป็น มก. ของอากาศ 1 มล.

การวิเคราะห์ระบบดีเอเอฟแบบมีการเวียนกลับ :

จากสมการ(2.12) สามารถวิเคราะห์ต่อสำหรับระบบดีเอเอฟแบบมีการเวียนกลับ โดยมี อัตราการไหลกลับสู่ระบบเท่ากับ  $R$  ซึ่งจะได้

$$A/S = 1.3 s_0(fP-1)R/S_0Q \quad (2.13)$$

โดย  $A/S$  คือ อัตราส่วนของปริมาณอากาศกับปริมาณของแข็ง , มก.อากาศ/มก.ของแข็ง

$s_0$  คือ ปริมาณอากาศที่ละลายอยู่ในน้ำ , มล/ล

$S_0$  คือ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในน้ำเสีย , มล/ล

$f$  คือ เศษส่วนของปริมาตรอากาศที่ละลายในน้ำเสีย ต่อบริมาตรอากาศที่ละลายในน้ำสะอาด โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 85-90 เปอร์เซ็นต์

P คือ ความดันที่ใช้อัดอากาศ , บาร์

R คือ อัตราการไหลกลับสู่ระบบ ,ลบ.ม/วิน (หรือลบ.ม ในกรณีตั้งปฏิกรณ์แบบแบตช์)

Q คือ อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย ,ลบ.ม/วิน ( หรือ ลบ.ม ในกรณีตั้งปฏิกรณ์แบบแบตช์)

การเติมอากาศที่มากเกินไปและฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบดีเอเอฟ ซึ่งขนาดที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 30-80 ไมครอน และเวลากักเก็บของระบบดีเอเอฟควรประมาณ 20-30 นาที นอกจากนี้อาจเติมสารเคมีบางชนิดลงไป เช่น สารส้ม สารประกอบเหล็ก และแอสติเวตเตดซิลิกา เป็นต้น เพื่อให้อนุภาคจับตัวกันรอบฟองอากาศได้ดียิ่งขึ้น (Vrablik, 1959)

## 2.7 กระบวนการผลิตนมถั่วเหลือง

กระบวนการผลิตนมถั่วเหลือง มีกรรมวิธีซึ่งเรียกว่าการใช้น้ำสกัด (water extract process) โดยมีขั้นตอนการผลิตดังนี้ (สถาบันพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ , 2527)

1. การคัดเลือกเมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเหลืองจะถูกนำมาผ่านการคัดเลือกเอาเมล็ดเสีย สืบ เน่า และดำออกไป รวมทั้งการคัดแยกเอาสิ่งอื่นๆออกไป เช่น ดิน หิน โลหะและฝุ่น เป็นต้น

2. การทำความสะอาดเมล็ดถั่วเหลืองขั้นแรก ภายหลังจากการคัดเลือกเมล็ดถั่วเหลืองแล้วจะมีการล้างน้ำให้สะอาดเพื่อเอาฝุ่นละอองออกไป

3. การแช่เมล็ดถั่วเหลืองให้นิ่มตัว เมล็ดถั่วเหลืองที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะนำไปแช่น้ำ เพื่อให้เมล็ดถั่วเหลืองนิ่มตัว อุณหภูมิในการแช่ถั่วขึ้นอยู่กับความต้องการในการกำจัดกลิ่นถั่ว กล่าวคือ การแช่ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้กลิ่นถั่วลดลงและถ้าแช่ที่อุณหภูมิต่ำ กลิ่นถั่วจะมีมากกว่า หรือในช่วงนี้อาจเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต หรือโซเดียมคาร์บอเนต ในอัตราส่วนไม่เกิน 0.5% ของน้ำแช่ร่วมด้วย เพื่อกำจัดสีของถั่วเหลืองให้มีความขาวขึ้นรวมทั้งมีผลในการลดกลิ่นของถั่ว ขณะเดียวกันก็จะช่วยกำจัดธรรมชาติที่อาจมีในถั่วให้ลดลง

4. การทำความสะอาดเมล็ดถั่วเหลืองขั้นที่สอง ภายหลังจากแช่ถั่วแล้ว จะนำถั่วมาล้างให้สะอาด และเป็นการกำจัดเอาเปลือกถั่วที่หลุดออกมาจากใบเลี้ยง ทั้งนี้เพราะส่วนนี้ถือเป็นส่วนที่ไม่ต้องการและไม่มีสารอาหารที่มีคุณค่าต่อร่างกาย

5. การบดเมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเหลืองที่นิ่มตัวแล้วจะถูกนำมาบดให้ละเอียดโดยใช้เครื่องบดซึ่งมีประสิทธิภาพในการบดให้ละเอียดสูง การบดจะเติมน้ำบางส่วนร่วมด้วยเพื่อให้การบดเป็นไปได้อย่างสะดวกและต่อเนื่อง อัตราส่วนของน้ำต่อเมล็ดถั่วเหลืองหลังจากบดแล้วโดยประมาณคือ 1 ต่อ 10



6. การแยกกากตัวเหลือง ภายหลังจากบดตัวเหลืองแล้ว จะต้องนำมารองเอาส่วนที่ไม่ละลายน้ำหรือเรียกว่ากากออกไป โดยใช้เครื่องกรอง filter press ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้น้ำนมตัวเหลืองดิบออกมา

7. การต้ม น้ำนมตัวเหลืองดิบ น้ำนมตัวเหลืองดิบที่ได้จะต้องนำมาต้มให้สุก เพื่อทำลายและยับยั้งปฏิกิริยาทางเคมีที่จะมีขึ้นตามมา เช่นอาจทำให้กลิ่นรสเปลี่ยนแปลงไป

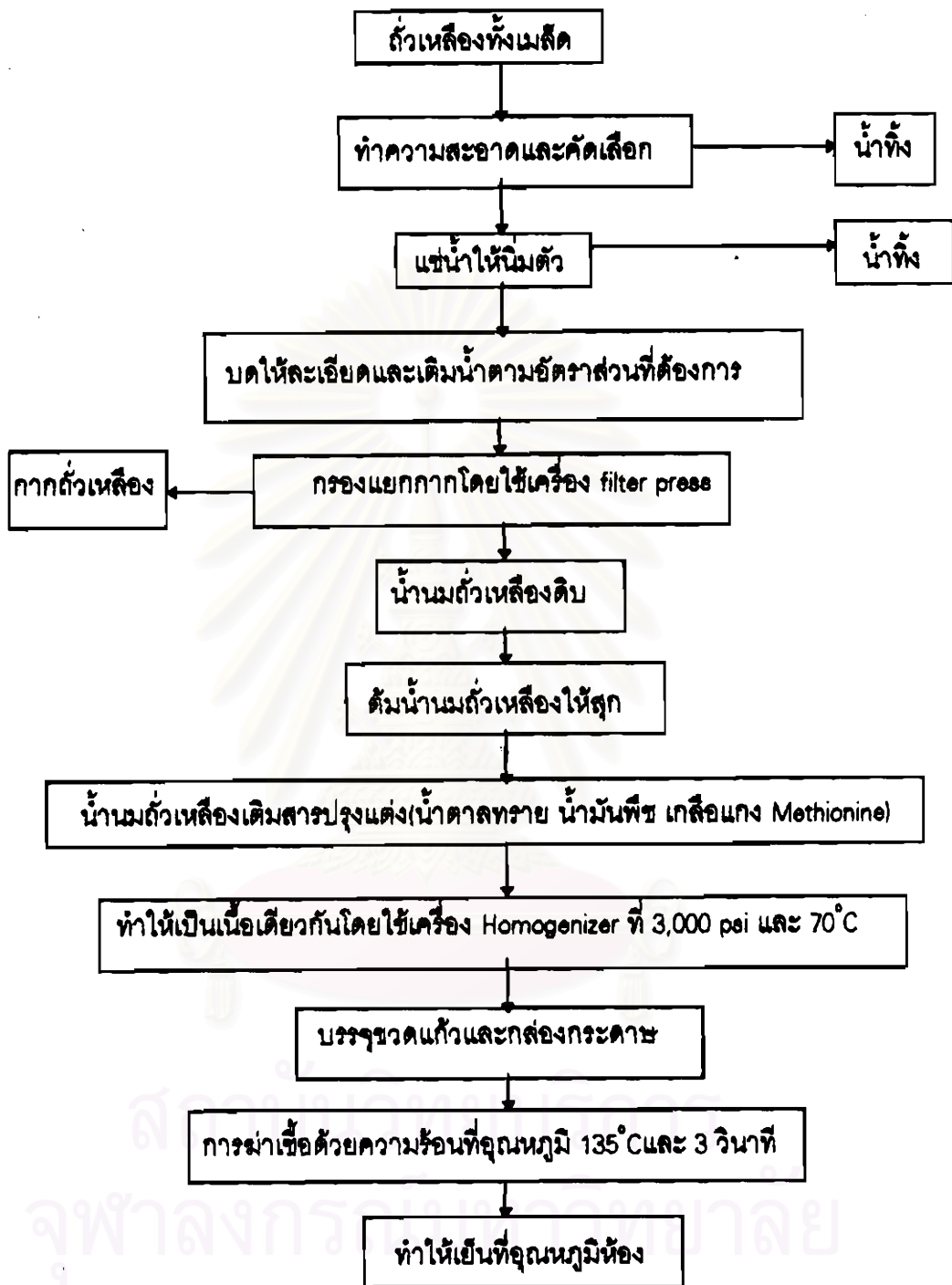
8. การปรุงแต่งน้ำนมเนื่องจากน้ำนมที่ได้ยังมีรสชาติและกลิ่นรวมทั้งคุณค่าทางโภชนาการยังไม่เป็นที่ยอมรับและดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำมาปรุงแต่งให้มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำนมวัวให้มากที่สุด การปรุงแต่งนี้จะเติมน้ำตาลทรายเพื่อทำให้น้ำนมตัวเหลืองมีรสหวานขึ้น การเติมน้ำมันพืชเพื่อทำให้น้ำนมตัวเหลืองมีคุณค่าทางโภชนาการด้านไขมันมากขึ้น การเติม Methionine เพื่อทำให้น้ำนมตัวเหลืองมีคุณค่าทางโภชนาการด้านโปรตีนมากขึ้น และการปรุงแต่งกลิ่นรสด้วยเกลือแกง นอกจากนี้ยังมีการเติมสารบางอย่างซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์

9. การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน นมตัวเหลืองที่ผ่านการปรุงแต่งแล้ว จะยังไม่รวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจำเป็นต้องผ่านเครื่อง Homogenizer เพื่อทำให้เกิดลักษณะเนื้อเดียวกัน และชวนดื่ม นมที่ผ่านการ Homogenized แล้วจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น และมีรสชาติสม่ำเสมอโดยตลอด การทำ Homogenization จะใช้เครื่อง Homogenizer ที่ความดันรวมประมาณ 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิไม่ควรต่ำกว่า 70 องศาเซลเซียส

10. การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน นมตัวเหลืองที่ผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้ว จะถูกนำไปบรรจุในภาชนะบรรจุซึ่งมีหลายรูปแบบเช่นขวดแก้ว กล่องกระดาษทำให้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อแตกต่างกัน ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 135-140 องศาเซลเซียสและเวลาที่ใช้ประมาณ 3-6 วินาที ซึ่งนมที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้วจะสามารถเก็บในสภาวะปกติได้ระยะเวลาานาน

น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตนมตัวเหลืองมาจากแหล่งใหญ่ๆ 4 แหล่งคือน้ำทิ้งจากการล้างทำความสะอาดภาชนะบรรจุ น้ำทิ้งจากการล้างทำความสะอาดเครื่องจักร น้ำทิ้งจากการล้างทำความสะอาดตัวเหลืองและน้ำทิ้งจากการแช่ตัวเหลืองให้นิ่มตัว

กระบวนการผลิตนมตัวเหลืองแบบ water extract process สรุปได้ดังรูป 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตนมถั่วเหลืองแบบ water extract process ของโรงงานตัวอย่าง

## 2.8 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานตัวอย่าง

ลักษณะน้ำเสียรวมของโรงงานตัวอย่าง (wastewater characteristics) ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย มีลักษณะโดยสรุปดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะน้ำเสียรวมของโรงงานตัวอย่าง

wastewater characteristics	influent
flow rate (m <sup>3</sup> /d)	3,000
BOD (mg/l)	800-1,300
COD (mg/l)	1,300-2,000
TKN(mg/l)	160-200
suspended solid (mg/l)	800-1,200
pH	10-12
temperature (c <sup>0</sup> )	38-41

ที่มา : เอกสารจากห้องปฏิบัติการของโรงงานตัวอย่าง( พ.ศ. 2537-2538)

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wymore และ White (1968) ได้ศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฆ่าสัตว์ประเภทหมู โดยน้ำเสียมาจากขั้นตอนการฆ่าและการทำความสะอาด น้ำเสียเหล่านี้ถูกรวบรวมและเก็บกักที่บ่อพัก ก่อนถูกสูบไปยังระบบดีเอเอฟ เพื่อกำจัดไขมันและBOD<sub>5</sub> ผลการทดสอบพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดไขมันและBOD<sub>5</sub> ของระบบบำบัดมีค่าสูงถึง 89 และ 58 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไขมันและBOD<sub>5</sub>สูง แต่น้ำเสียที่มีความเข้มข้นของไขมันและBOD<sub>5</sub> ต่ำ ประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเหลือเพียง 47 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Hopwood และ Rosen (1972) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์โดยวิธีการตกตะกอนโปรตีนด้วยการปรับพีเอชเป็น 3.0 ด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อให้โปรตีนที่ละลายน้ำเปลี่ยนรูปเป็นตะกอนขึ้น โดยใส่สารละลายโซเดียมลิกโนซัลโฟเนต( sodium lignosulphonate)เป็นสารสร้างตะกอนทำให้มีผลต่อการแยกชั้นตะกอนในระบบดีเอเอฟ จากนั้นมีการรีดน้ำออกจากสลัดจ์ที่ได้จากระบบดีเอเอฟโดยการใช้ความร้อนและทำให้เป็นกลาง แล้วนำไปผ่านเครื่องอัดกรอง(filter

press) และนำกากสลัดจ์ที่ได้ไปอบแห้งให้มีความชื้นไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ก่อนนำไปใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์

Cooper และ Denmead (1979) ได้ทดสอบการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์โดยการปรับพีเอชให้อยู่สภาพเป็นกรดเท่ากับ 3.5 เพื่อทำให้โปรตีนที่อยู่ในรูปละลายน้ำก่อตัวเป็นตะกอนและทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ โดยใส่สารโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (sodium hexametaphosphate, HMP) เป็นสารสร้างตะกอน สลัดจ์โปรตีนน้ำกลับนี้จะถูกกำจัดน้ำออกโดยการเติมสารเคมีและให้ความร้อน จากนั้นนำกากสลัดจ์ให้แห้งเพื่อนำไปทำอาหารสัตว์ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารประกอบเหล็กเป็นสารสร้างตะกอน จะช่วยเพิ่มธาตุเหล็กให้กับกากสลัดจ์ที่นำกลับมา

Tookos (1982) ได้ทดสอบเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเนื้อ (meat process effluent) ด้วยวิธีการทำให้ลอยตัวและการตกตะกอน โดยมีรายละเอียดดังนี้

การใช้สารเคมีทำลายเสถียรภาพของสารละลายไลโอฟิลิคคอลลอยด์ของโปรตีน (lyophilic colloidal protein solution) โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ

ก. การรวมตะกอนที่จุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) ของโปรตีน โดยการเติมกรดลิกนินซัลโฟนิก เพื่อให้ได้พีเอชที่เหมาะสม ทำให้โปรตีนอยู่ในรูปไม่ละลายและเกิดเป็นตะกอน

ข. การรวมตะกอนโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ซึ่งเติมสารโคแอกกูแลนต์คือ  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{+3}$  ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม ทำให้โปรตีนอยู่ในรูปไม่ละลาย และเกิดเป็นตะกอน

ค. การรวมตะกอนด้วยปูนขาว (lime) ที่พีเอชสูงกว่า 10 โดยการเติมสารประกอบเหล็กเป็นสารโคแอกกูแลนต์ เพื่อช่วยในการสร้างตะกอน

จากการทดลองสรุปได้ว่า

ก. กระบวนการทำให้ตะกอนลอยตัวพบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่ากระบวนการตกตะกอนในช่วงพีเอช 4.0-4.5 ในกรณีที่มีการเติมกรดลิกนินซัลโฟนิกเพียงอย่างเดียว

ข. กระบวนการทำให้ตะกอนลอย ที่ใช้สารเคมี เช่น  $Al^{3+}$  และ  $Fe^{+3}$  จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีกว่ากระบวนการตกตะกอนในช่วงพีเอช 5.4-5.6 ทั้งนี้พบว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปรับพีเอชสูงขึ้น

ค. กระบวนการทำให้ตะกอนลอยตัว ที่ใช้สารโคแอกกูแลนต์ชนิดต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีประมาณร้อยละ 70-90 ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และถ้าไม่ใช้สารเคมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีประมาณร้อยละ 50-60

ง. ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการทำให้ตะกอนลอยตัว คือ ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์ ช่วงพีเอชที่เหมาะสม และ ค่า A/S ratio ซึ่งสรุปดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารเคมี และประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี  
(Tookos , 1982)

สารเคมี	พีเอช	ความเข้มข้น ที่เหมาะสม (mg/l)	ประสิทธิภาพ การกำจัดซีไอดี %	หมายเหตุ
Sulph.liquor	3.2-3.4	200-300	80-83	**
Praestol 444K	4.8-5.2	8-10	71-74	*
FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	5.3-5.5	150-300	85-86	***
	10.0-11.0	10-150	85-90	*
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .18H <sub>2</sub> O	5.2-5.6	200-300	78-82	***
	10.0-11.0	100-150	75-78	*
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	9.5-11.0	250-300	75-82	**
Ca(OH) <sub>2</sub>	10.2-11.0	-	82-85	*

หมายเหตุ : ความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาพมลพิษ

\* เล็กน้อย \*\* ปานกลาง \*\*\* มาก

ตารางที่ 2.5 พารามิเตอร์ของกระบวนการทำให้ตะกอนลอยตัว (Tookos , 1982)

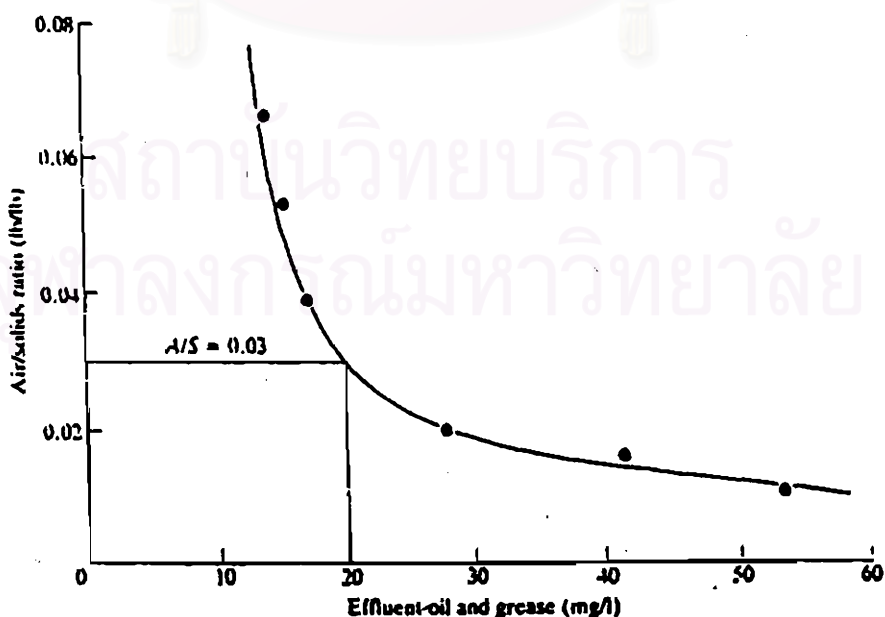
สารโคแอกูแลนต์	pH	A/S (mg air/mg solid)	Loading rate (kg/m <sup>2</sup> -hr)	Wastewater
FeCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	5.2-5.4	0.014	1.21	Slaughterhouse
		0.0175	1.03	Poultry proc.
	10.0-10.5	0.010	1.14	Slaughterhouse
		0.021	0.88	Poultry proc.
LNP	3.2-3.5	0.023-0.03	0.6-0.7	Slaughterhouse
		0.022	0.8	Poultry proc.
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .18H <sub>2</sub> O	5.2-5.5	0.032	0.528	Slaughterhouse
		0.015	1.137	Poultry proc.
	10.0-10.2	0.014	1.28	Slaughterhouse
		0.016	1.1	Poultry proc.

\* The suspended matter content of the effluent is substantially higher than 30 mg/l

Ng, Goh และTay (1988) ได้ศึกษาระบบตีเอเอฟระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้แยกของแข็ง-ของเหลวในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์ม (palm oil mill effluent) พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการดำเนินการของระบบนี้ คือ ประสิทธิภาพของถังความดัน อัตราการรับภาระความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย อัตราส่วนปริมาณอากาศต่อปริมาณของแข็งแขวนลอย และความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดความสกปรกของระบบขึ้นอยู่กับส่วนประกอบในน้ำเสียและ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของแข็งแขวนลอยมากกว่า 1,650 ก.ก./ตร.ม-ชม. และ อัตราการรับภาระบรรทุกที่ผิวหน้าของระบบมีค่า 2 ลบ.ม/ตร.ม-ชม. พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดความสกปรกจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจน อัตราส่วนการนำกลับ (recycle ratio) ถูกใช้ในการกำหนดอัตราส่วนของอากาศต่อตะกอน โดยต้องกำหนดรอบเขตในการนำไปใช้ประโยชน์ของระบบตีเอเอฟทั้งทางด้านดำเนินการและด้านเศรษฐศาสตร์

Ho และ Tan (1989) ได้ศึกษาระบบการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารละลายเกลืออลูมิเนียมและสารรวมตะกอนโพสเฟอไรต์ และระบบตีเอเอฟ โดยประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบหมักให้ย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจนของน้ำทิ้งโรงงานน้ำมันปาล์ม (palm oil mill effluent) พบว่าระบบตีเอเอฟมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่าระบบการตกตะกอนทางเคมี และถ้าใช้ทั้งสองระบบ ประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้น

Eckenfelder (1989) ได้ทำการทดสอบระบบตีเอเอฟเพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันและไขมันจากน้ำเสียบางประเภท ผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อตะกอน(A/S ratio) และคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบตีเอเอฟ แสดงได้ดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของ A/S ratio ที่มีต่อคุณภาพน้ำที่ผ่านระบบตีเอเอฟ (Eckenfelder , 1989)

Rusten, Eikebrokk และ Thorvaldeen (1990) ได้ทำการทดสอบน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารโดยวิธีจาร์เทสต์ ระดับโรงงานนำร่อง(pilot plant)และระดับโรงงาน(full scale) พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำเสีย สภาพที่เหมาะสมของสารโคแอกกูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์ โดยมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมขึ้นกับชนิด และปริมาณสารเคมีที่ใช้ จากการทดสอบ ถ้าเติมสารละลายเฟอริกคลอไรด์ 0.10-0.15 มก./มก.ซีไอดี หรือสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต 0.20 มก./มก.ซีไอดี ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 67-90 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของน้ำเสีย

Jamil (1991) ได้ทำการทดสอบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบดีเอเอฟในระดับห้องปฏิบัติการ และระดับโรงงานของโรงฆ่าสัตว์ โดยเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการเติมสารฟล็อกคูแลนต์ เพื่อช่วยในการกำจัดของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมัน กับระบบที่ไม่เติมสารฟล็อกคูแลนต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากับร้อยละ 85และ70 ตามลำดับ และพบว่าระบบดีเอเอฟสามารถกำจัดสาหร่ายออกจากน้ำเสียได้อีกด้วย ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการปรับพีเอชให้เหมาะสมเมื่อมีการเติมสารฟล็อกคูแลนต์

Chen และ Rohani (1991) ได้ศึกษาการนำกลับโปรตีนจากคาโนลามील(canola meal) โดยการตกตะกอนด้วยสารช่วยตกตะกอนคือ โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต (HMP) คาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส(CMC)และแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulphate) และปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่จุดไอโซอิเล็กทริกเพื่อรวมตะกอน โดยประเมินประสิทธิภาพจากปริมาณและขนาดของตะกอนโปรตีนที่เกิดขึ้น ผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ปริมาณการผลิตโปรตีน และขนาดของอนุภาคที่เกิดจากสารสร้างตะกอน

( Chen และ Rohani , 1991)

Precipitant	Concentration (g precipitant/g nitrogen)	pH	Yield %	Mean size $\mu$
HCl	2M	3.62	60.10	17.94
HMP+HCl	1.88	3.30	78.92	31.98
CMC+HCl	0.63	3.96	61.03	16.72
Ammonium sulphate	2.7M	3.62	93.54	18.85

กระทรวงอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม องค์การความร่วมมือไทย-เยอรมัน และ สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบ ศูนย์การศึกษาต่อเนื่องสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (1994) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมปลาทุ่นำกรองด้วยระบบดีเอเอฟระดับห้องปฏิบัติการ สำหรับน้ำเสียรวมและน้ำเน่าปลาจากโรงงาน โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 กระบวนการ คือ กระบวนการไม่ใช้สารเคมี กระบวนการใช้สารเคมีน้อย และ กระบวนการใช้สารเคมีมาก พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยอยู่ในช่วง 70-80%, 60-80% และ 85-95% ตามลำดับ โดยกระบวนการไม่ใช้สารเคมีให้ผลการบำบัดไม่แตกต่างจาก กระบวนการใช้สารเคมีน้อย ขณะที่กระบวนการใช้สารเคมีมากมีประสิทธิภาพการกำจัดสารแขวนลอยเพิ่มขึ้น 6-26% ปริมาณการใช้สารซีเอ็มซีในกระบวนการใช้สารเคมีน้อยและกระบวนการใช้สารเคมีมาก อยู่ในช่วง 2-10 มก./ล และ 4-8 มก./ล ตามลำดับ ส่วนแคลเซียมฟอสเฟตที่ใช้ในกระบวนการใช้สารเคมีมากจะใช้ในช่วง 20-60 มก./ล ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตะกอนแขวนเบื้องต้น ภาคสกัดที่ได้จากการนำกลับมีปริมาณที่เคเอ็นอยู่ในช่วง 2-5% เมื่อคำนวณเป็นปริมาณโปรตีนได้ 12-30%

Schneider และ Soares (1995) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดขั้นต้นสำหรับน้ำทิ้งโรงงานสกัดโปรตีนถั่วเหลืองในระดับนำร่อง (pilot plant) โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการดีเอเอฟ (DAF) และ กระบวนการตกตะกอน โดยมีจุดประสงค์ในการทดลองคือ

- ก. เพื่อทดลองหาระดับพีเอชที่เหมาะสม ชนิดและปริมาณการใช้สารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสม และ ชนิดและปริมาณการใช้สารโพลีเมอร์ที่เหมาะสม
- ข. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดขั้นต้น และการนำกลับโปรตีนระหว่าง กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) และ กระบวนการตกตะกอน

จากการทดลองสรุปได้ว่า

- ก. ระดับพีเอชที่เหมาะสมในการก่อรูปตะกอนโปรตีน คือ 4.5 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริก เป็นสารละลายปรับพีเอช
- ข. สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการทดลอง คือ สารละลายอลูมิเนียมซัลเฟตและสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์จากการทดลองพบว่าสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์มีประสิทธิภาพในการก่อรูปตะกอน ดีกว่าสารละลายอลูมิเนียมซัลเฟต ณ ระดับพีเอชที่ 4.5 โดยปริมาณการใช้สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ที่เหมาะสม คือ 200-300 มก./ล
- ค. สารโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง คือ สารละลาย cationic polyacrylamide และ สารละลาย anionic polyacrylamide จากการทดลอง พบว่า สารละลาย anionic polyacrylamide มีประสิทธิภาพในการรวมตะกอนดีกว่าสารละลาย cationic polyacrylamide ณ ระดับพีเอชที่ 4.5 โดยเติม



สารละลายเฟอริกคลอไรด์ 300 มก/ล เป็นสารโคแอกกูแลนต์และ ปริมาณการใช้สารละลาย anionic polyacrylamide ที่เหมาะสม คือ 2-3 มก/ล

ง. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด ระหว่างกระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) และ กระบวนการตกตะกอน สรุปได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด ระหว่าง กระบวนการลอยตัวด้วยอากาศละลาย (DAF) และ กระบวนการตกตะกอน (Schneider และ Soares ,1995)

Process	Efficiency Of Reduction (%)			
	Settleable solid	Suspended solid	COD	Protein in supernatant
DAF	100	85	44	29
Settling	100	93	53	38

จ. ผลการเปรียบเทียบความเร็วในการแยกชั้นของตะกอนและชั้นน้ำจากการทดลองพบว่า กระบวนการดีเอเอฟมีความเร็วในการลอยตัวของตะกอน เท่ากับ 32 ชม/วินาที และกระบวนการตกตะกอนมีความเร็วในการตกตะกอน เท่ากับ 5 ชม/วินาที จากการเปรียบเทียบสรุปได้ว่า ระบบดีเอเอฟต้องการเวลาเก็บกักต่ำกว่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย