



## ทฤษฎีและแนวความคิด

### 3.1 ทฤษฎีของคอลลอยด์

Colloidal state หรือ Colloidal system นั้น หมายความว่าถึงสภาพหรือระบบที่มีอยู่สองภาค (phase) ด้วยกันคือ disperse phase ซึ่งเป็นส่วนที่ประกอบด้วยอนุภาคที่เล็กมากและแขวนลอย (disperse) อย่างดาวอยู่ในอีกภาคหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า dispersion medium ซึ่งแต่ละภาคนี้จะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ทั้งนั้น ยกเว้นแก๊สเท่านั้นที่ไม่แขวนลอย นอกนั้นจะเป็นของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลว หรือของเหลวแขวนลอยอยู่ในของเหลวก็ได้ทั้งสิ้น ยกตัวอย่างเช่น นม เมฆ แป้ง เจลลาติน โลหิต ไขมัน และดิน อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ทั้งสิ้น จะว่าไปแล้วสิ่งที่อยู่ในธรรมชาติต่าง ๆ ส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของคอลลอยด์แทบทั้งสิ้น

อนุภาคของของแข็งในดินจะแขวนลอยอยู่ในน้ำอย่างดาวนั้น ต้องมีขนาดเล็กมาก ส่วนใหญ่ถือกันว่าจะต้องเล็กกว่า 0.001 มม. หรือ 1 ไมครอน ( $\mu$ )<sup>(3,4)</sup> แต่ที่ถูกต้องจริง ๆ แล้วควรที่จะเล็กกว่านี้ คือ ในราว 0.5 จนถึง 0.2 ไมครอน จากการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของแร่ธาตุต่าง ๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุภาคของดินที่มีขนาดต่าง ๆ กันนั้น ปรากฏว่า ส่วนของดินที่เป็น secondary minerals โดยเฉพาะพวก clay minerals นั้น ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอนลงมาแทบทั้งสิ้น และส่วนของดินที่เป็น primary minerals ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน นั้น ก็มีเหมือนกันแต่เป็นส่วนที่น้อยมาก ดังนั้นจึงได้ชี้ให้เห็นการแบ่งขนาดของอนุภาคของดิน (soil separate) ที่เห็น clay ให้เป็นพวกที่มีขนาดตั้งแต่ 2 ไมครอนลงมา และอนุภาคของดินที่มีขนาดโตกว่า 2 ไมครอนขึ้นไป ก็ให้ถือว่าเป็นพวก ดินตะกอน (silt) และทราย (sand) ตามลำดับ อนุภาคของดินเหนียวนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน ดังเช่นที่เล็กมาก ๆ เช่น เล็กกว่า 1 ไมครอน ก็มักจะเรียกกันว่า colloidal clay สารคอลลอยด์ในดินนี้มีอยู่สองพวกด้วยกัน เป็นสารอนินทรีย์ (inorganic colloids) พวกหนึ่ง และสารอินทรีย์ (organic colloids)

อีกพวกหนึ่ง สำหรับพวกหลังได้แก่ ฮิวมัส (humus) และพวกแรกนั้นที่สำคัญได้แก่ คิน-  
เหนียวซิลิเกต (silicate clay) หรือ แร่ลูมิโนซิลิเกต (alumino silicate  
minerals) พวกหนึ่ง และไฮดรอกไซด์ (hydrous oxides) ของเหล็กและอลูมิเนียมอีก  
พวกหนึ่ง แต่องค์ประกอบส่วนใหญ่ของสารคอลลอยด์ในดินได้แก่พวกคินเหนียวซิลิเกต (sili-  
cate clay)

รูปร่างของอนุภาคของคินเหนียวซิลิเกตมักมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ (flake-like)  
ซึ่งประกอบด้วย ผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างในลักษณะแบบบาง เช่น เคียวกันกับแร่ไมกา (Micas)  
ประกอบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินทุกชนิดส่วนใหญ่จะทรงไว้ในลักษณะของ  
ผลึก บางชนิดจะมีรูปร่างเป็นแผ่นหกเหลี่ยม (hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นเหลี่ยมและ  
มุมของแผ่นหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจน เมื่อมองด้วยกล้องอิเล็กตรอนไมโครสโคป (electron  
microscope)

ขนาดของอนุภาคของคินเหนียวซิลิเกตนั้นก็แตกต่างกันออกไป แล้วแต่ชนิดและองค์-  
ประกอบทางแร่ (mineralogical organization) และสภาพที่ซิลิเกต (silicate)  
นั้นเกิดขึ้น ขนาดของคินเหนียวซิลิเกตพวกนี้จะมีตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.5 ไมครอน (4)

ชนิดของคินเหนียวซิลิเกตที่สำคัญมีอยู่ 3 ประเภท ประเภทแรกได้แก่ คินคาโอลิน  
(kaolinite) พวกนี้ที่สำคัญได้แก่ คินคาโอลิน, คินซอลลอยไซด์ (halloysite) และ  
คินดิกไคท์ (dickite) คินเหนียวซิลิเกตพวกนี้จะมีปริมาณอยู่มากกว่าพวกอื่น ๆ โครง-  
สร้างเขียนเป็นสูตรได้ว่า  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  ประเภทที่ต่างกันของคินคาโอลินเกิดเนื่อง  
มาจากการเรียงซ้อนกันของหน่วยผลึกไม่เหมือนกัน จะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.2 -  
2 ไมครอน

พวกที่สองได้แก่ คินมอนทมอร์ริลโลไนท์ (montmorillonite) ที่สำคัญได้แก่  
มอนทมอร์ริลโลไนท์, ไบเดลไลต์ (beidellite), นอนโทรไนท์ (nontronite) และ  
แซฟไฟไนท์ (saponite) คินมอนทมอร์ริลโลไนท์ประเภทต่าง ๆ จะมีสูตรโครงสร้างที่ไม่  
เหมือนกัน ซึ่งจะเขียนได้ดังนี้

คินมอนทมอร์ริลโลไนท์จะมีสูตรโครงสร้าง  $\text{Si}_8(\text{Al}_{3.34}\text{Mg}_{9.66})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

ดินไบเคลไลต์ที่มีสูตรโครงสร้าง  $(\text{Si}_{7.33}\text{Al}_{.67})\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

ดินนอนโทรไนท์ที่มีสูตรโครงสร้าง  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

ดินแซฟโฟไนท์ที่มีสูตรโครงสร้าง  $(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{.66})\text{Mg}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

ดินในตระกูลมอนท์มอริลโลไนท์จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 - 1 ไมครอน ซึ่ง มีขนาดเล็กกว่าดินในตระกูลคาโอลิน

พวกที่สามได้แก่ ดินในตระกูลอิลไลต์ (illite) มีสูตรโครงสร้างดังนี้คือ  $\text{K}_{1.33}(\text{Si}_{6.66}\text{Al}_{1.33})\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1 - 5 ไมครอน

สารคอลลอยด์ที่เป็นอินทรีย์วัตถุ ได้แก่ พวกฮิวมัส (humus) มีสีดำ เกิดจากซากพืช และสัตว์ที่เน่าเปื่อยลงจนถึงที่สุด อยู่ในสภาพของ อมอร์ฟัส (amorphous) ความสามารถในการดูดซับน้ำสูง มีประจุลบมาก ประจุลบส่วนใหญ่เกิดจากกลุ่มคาร์บอกซิล ( $\text{COOH}$ ) โดยที่  $\text{H}^+$  จะไอออไนซ์ (ionize) ออกมาเมื่อมี pH ระหว่าง 3 - 8 ถ้า pH สูงกว่านั้น (pH 7 - 11) ก็จะมีประจุสูงขึ้นไปอีก เพราะได้มาจากการไอออไนเซชัน (ionization) ของ  $\text{H}^+$  จากกลุ่มฟีนอลิก (phenolic group) ดังนั้น จะเห็นว่าปริมาณประจุลบของ อินทรีย์คอลลอยด์ (organic colloid) นั้นจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อ pH สูงขึ้น โดยทั่วไป แล้ว อินทรีย์คอลลอยด์ (organic colloid) จะมีปริมาณประจุลบสูงพอ ๆ หรือมากกว่าดิน ในตระกูลมอนท์มอริลโลไนท์เสียอีก

ส่วนใหญ่แล้วคอลลอยด์ในน้ำจะมีประจุลบ ที่มาแห่งประจุลบของดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) เนื่องจากสาเหตุสองประการ ประการแรก คือ เกิดจากบริเวณขอบ ของผลึก (exposed crystal edges) ประจุประเพณีเป็นประจุที่เกิดขึ้นได้สองประการคือ จากบริเวณขอบของผลึกที่แตกหักออกไปทำให้  $\text{O}$  ซึ่งแต่เดิมเคยเกาะยึดอยู่กับ Si และ Al ในซิลิกา (silica) และแผ่นอลูมินัม (alumina sheet) ตามลำดับนั้น เมื่อไม่มี Si และ Al จับแล้วเนื่องจากการที่ขอบของผลึกแตกออกไปนี้ จึงทำให้  $\text{O}$  ยังมีประจุลบ (electronegative charge) ตกค้างอยู่ ส่วนอีกด้านหนึ่งของ  $\text{O}$  ยังคงจับอยู่กับ Si และ Al อยู่ เมื่อ  $\text{O}$  ตามบริเวณขอบผลึกอยู่ในสภาพนี้มาก ๆ เข้า ประจุไฟฟ้าลบ (electronegative charge) ก็จะมีมากพอที่จะดึงดูดประจุบวกได้

ประการที่สอง เกิดขึ้นมาจากขบวนการแทนที่ไอโซมอร์ฟัส (Isomorphous substitution) ขบวนการนี้เกิดขึ้นในธรรมชาติ โดยที่อะตอมของธาตุหนึ่งเข้าไปแทนที่อะตอมที่มีอยู่เดิมในโครงสร้างของแร่ ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทนที่นั้นจะมีขนาดใกล้เคียงกัน หรือเท่ากัน แต่ประจุหรือวาเลนซ์ (valence) ไม่เท่ากันก็ได้ ถ้าประจุบวก (cation) ที่มีวาเลนซ์ (valence) ต่ำเข้าไปแทนที่ในประจุบวก (cation) อีกประจุหนึ่งที่มีอยู่เดิมภายในโครงสร้างของแร่ชนิดหนึ่งที่มีวาเลนซ์สูงกว่า ก็จะทำให้มีประจุลบตกค้างอยู่ในโครงสร้างนั้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าประจุบวกที่มีวาเลนซ์สูงเข้าไปแทนที่ประจุบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำกว่า ก็จะมีประจุบวกตกค้างอยู่ในโครงสร้างนั้น

ขบวนการแทนที่ทางประจุ (ionic substitution) นี้จะเกิดขึ้นแพร่หลายในดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) ในตระกูลมอนทอร์ลิลโลไนท์ (montmorillonite) เป็นส่วนใหญ่

สภาพะคงตัวของคอลลอยด์ที่กระจายในน้ำมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประจุไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค ประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวของอนุภาคกับน้ำที่อนุภาคกระจายอยู่ มีศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงสุดบริเวณผิว และมีค่าลดลงตามระยะทางที่ห่างจากผิว เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันเคลื่อนที่เข้าใกล้กัน แรงผลักระหว่างประจุไฟฟ้าจะเกิดขึ้น และมีค่ามากขึ้นตามระยะระหว่างอนุภาคที่ลดน้อยลง แรงผลักระหว่างอนุภาคที่มีค่ามากขึ้น เมื่อระยะระหว่างอนุภาคลดลง ด้วยเหตุนี้สภาพะคงตัวของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค ถ้าแรงผลักระหว่างอนุภาคมีค่ามาก ในขณะที่แรงดึงดูดมีค่าน้อย เนื่องจากอนุภาคยังไม่มีโอกาสเข้าใกล้กันเพียงพอ อนุภาคคอลลอยด์จะไม่สามารถสัมผัสและรวมตัวกันได้ แต่ยังคงกระจายในน้ำหรืออยู่ในสภาพะคงตัวนั่นเอง

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ในน้ำเปลี่ยนจากสภาพะคงตัวมาเป็นสภาพะไม่คงตัว ที่มีการรวมระหว่างอนุภาคเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ การอัดตัวของชั้นกระจาย (compression of diffuse layer) การดูดติด และการสะเทินประจุไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization) การดูดติด และเชื่อมตอระหว่างอนุภาค (adsorption and interparticle bridging) และการ

ห่อหุ้มในผลึก (enmeshment in a precipitate) (6)

การอัดของชั้นกระจายเกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้ามในน้ำ มีปริมาณมากขึ้น ประจุไฟฟ้าตรงข้ามในชั้นกระจายจะมีปริมาณมากขึ้นด้วย ยิ่งผลให้ปริมาณอัดหรือความหนาของชั้นกระจายที่ทำหน้าที่สะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ลดลง การอัดตัวของชั้นกระจายเช่นนี้ทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีโอกาสเข้าใกล้กันมากยิ่งขึ้น จนแรงแวนเดอวาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาค และเกิดการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นในที่สุด

การคูดคืดและการสะเทินประจุไฟฟ้า เกิดขึ้นเมื่อประจุไฟฟ้าตรงข้าม นอกจากที่มีอยู่ในชั้นตรงและชั้นกระจายถูกคูดคืดที่ผิวของคอลลอยด์ ประจุไฟฟ้าตรงข้ามเหล่านี้จะสะเทินประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิว ตลอดจนชั้นกระจายลดลง ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงแวนเดอวาลส์สามารถเอาชนะแรงผลักระหว่างอนุภาคที่อ่อนตัวลงได้ จนเกิดการรวมตัวของอนุภาคคอลลอยด์ขึ้น

การคูดคืดและเชื่อมต่องระหว่างอนุภาค เริ่มจากการคูดคืดด้วยบอนด์ทางเคมี (chemical bond) ระหว่างผิวของคอลลอยด์กับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ อนุภาคคอลลอยด์เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกับโมเลกุลของสารโพลีเมอร์ และแยกออกจากน้ำในลักษณะที่เป็นตะกอนร่วมกับสารโพลีเมอร์ในที่สุด

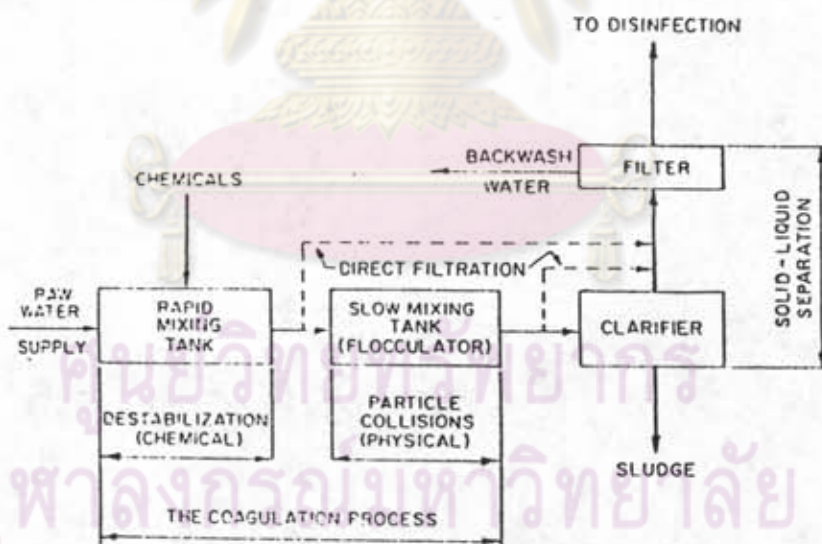
การห่อหุ้มด้วยผลึกเกิดขึ้นเมื่อมีการตกผลึกของไฮดรอสโพลีเมอร์ (hydrous polymer) ในน้ำ อนุภาคคอลลอยด์จะทำหน้าที่เป็นแกน (nuclei) ของการตกผลึก ถูกห่อหุ้มอยู่ในกลุ่มผลึกและแยกตัวออกจากน้ำพร้อมกับผลึกที่ตกตะกอน

สภาวะไม่คงตัวของคอลลอยด์อาจเกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ประเภทใดประเภทหนึ่ง หรือหลายประเภทร่วมกัน ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะทางเคมีกายภาพของน้ำ และชนิดของสารเคมีที่ใช้ การสร้างสภาวะไม่คงตัวหรือการทำลายสภาวะคงตัวของคอลลอยด์ โดยสร้างปรากฏการณ์ดังกล่าวมานี้เป็นลำดับการทำงานแรกเริ่มของกระบวนการรวมตะกอน

### 3.2 กลไกของขบวนการโคแอกกูเลชัน

ขบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่าง (ดูรูปที่ 3.1) คือ ดังกวนเร็ว (Rapid Mixing Tank) และดังกวนช้า (Flocculation Tank) ดังกวนเร็วซึ่งมีการเติมโคแอกกูแลนต์จะทำหน้าที่กระจายสารเคมีไปให้ส่วนต่าง ๆ ของน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้มีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้น ดังกวนช้าซึ่งได้รับน้ำต่อดังกวนเร็วมีหน้าที่สร้างสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ (ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว) เพื่อให้รวมตัวกันเป็นฟลอค

รูปที่ 3.1 แสดงเส้นทางไหลของน้ำและส่วนประกอบต่าง ๆ ของขบวนการโคแอกกูเลชัน น้ำดิบถูกส่งไปยังดังกวนช้าจะเกิดอย่างรุนแรง แต่กินเวลาน้อยมาก (เช่นประมาณ 1 นาทีหรือน้อยกว่า) โดยปกติมักใช้ดังกวนเร็วเพียงใบเดียว แต่บางครั้งอาจใช้ดังกวนเร็ว 2 ใบต่อกันอย่างอนุกรม เนื่องจากต้องเติมสารเคมีหลายชนิดซึ่งไม่สามารถเติมพร้อมกันได้ การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) จะเกิดขึ้นรวดเร็วมาก และต้องให้เกิดได้อย่างสมบูรณ์ภายในดังกวนเร็ว



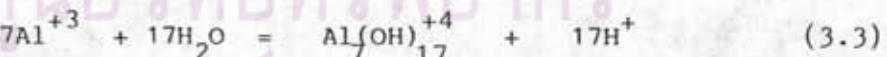
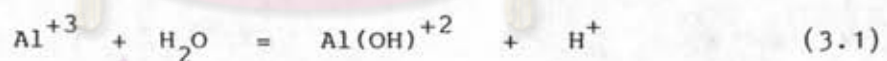
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

น้ำที่มีอนุภาคซึ่งปราศจากเสถียรภาพแล้วจะถูกส่งไปยังถังกวนช้า เพื่อสร้างโอกาสสัมผัสให้กับอนุภาคเหล่านั้น ภายในถังกวนช้าการกวนน้ำกระทำโดยใช้ใบพัดที่หมุนด้วยความเร็วต่ำ ทำให้ความปั่นป่วนเกิดขึ้นน้อย สารเคมีเช่น สารส้มซึ่งเติมลงไปในถังกวนเร็วจะช่วยทำให้คอลลอยด์ซึ่งสัมผัสกัน เกิดการเกาะจับกันจนกลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และตกตะกอนลงมาในที่สุด

สารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด<sup>(5)</sup> ได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีดังนี้  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$  (Aluminum Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาได้แก่  $FeCl_3$

### 3.2.1 กลไกที่เกิดจากการใช้เกลือของอลูมิเนียม

พิจารณาเกลือสารส้ม  $(Al_2(SO_4)_3)$  เป็นตัวอย่างเมื่อสารส้มถูกเติมให้กับน้ำ มันสามารถละลายน้ำได้หมดกลายเป็นไอออนของซัลเฟต และไอออนของอลูมิเนียม ซัลเฟตจะกระจายไปทั่วในน้ำ และอยู่ในรูปของ  $SO_4^{-2}$  ส่วนอลูมิเนียม  $(Al^{+3})$  จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (ไฮโดรไลซิส) ทำให้โมเลกุลของน้ำ 6 ตัว เกาะอยู่โดยรอบของอลูมิเนียมซึ่งมีประจุ +3 สูตรไอออนของอลูมิเนียม อาจเขียนได้เป็น  $Al(H_2O)_6^{+3}$  หรืออย่างสั้นเป็น  $Al^{+3}$  ใดๆก็ตาม ภายใต้สภาวะของที่เอชพีคิของโรงงานผลิตน้ำประปา  $Al^{+3}$  จะไม่คงตัว เนื่องจากมันสามารถไฮโดรไลซ์ต่อไปทันที ใ้กลายเป็นไอออนต่าง ๆ ของอลูมิเนียม ดังนี้



$Al(OH)^{+2}$  และ  $Al(OH)^+$  ที่อยู่ในสมการ (3.1) และ (3.2) เป็นสารโมโนเมอร์ (monomers) กล่าวคือ มันมีลูมินัมอะตอมเดียว แม้ว่าประจุของมันจะน้อยกว่า แต่ก็ยังเป็นโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพดี สำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุลบ ทั้งนี้เพราะทั้ง  $Al(OH)^{+2}$  และ  $Al(OH)^+$  สามารถเกาะอยู่บนผิวของโลหะโคหลายชนิดได้เป็นอย่างดี ไอออนดังเช่น  $Al_7(OH)^{+4}_{17}$  คล้ายกับสารโพลีเมอร์ (Polymer) ทั้งนี้เพราะมันมีลูมินัมหลายอะตอม สารโพลีเมอร์ตัวนี้เกาะติดอยู่บนคอลลอยด์ที่มีประจุลบได้เป็นส่วนมาก และนับเป็นโคแอกกูแลนต์ที่ดี  $Al(OH)_3$  เป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นปุย ซึ่งมักพบในกระบวนการโคแอกกูแลชั่นเสมอและสามารถใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่ดี

ขอให้สังเกตว่า สารส้มเป็นกรด เพราะมันให้โปรตรอนแก่ น้ำ ดังแสดงในสมการที่ 3.1 ถึง 3.4 พีเอชของน้ำและปริมาณสารส้มที่เติมให้กับน้ำจะเป็นเครื่องกำหนดชนิดหรือประเภทของไอออน (ที่มีลูมินัมเป็นส่วนประกอบสำคัญ) ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างสารส้มกับน้ำ

สารส้มสร้างโคแอกกูแลชั่นด้วยกลไกหรือวิธีที่แตกต่างกัน 2 อย่าง คือ Sweep Coagulation และ Charge Neutralization

3.2.1.1 Sweep Coagulation การเติมสารส้มในจำนวนที่มากพอจะทำให้ผลคูณระหว่าง  $(Al^{+3})$  และ  $(OH^-)$  มีค่าเกินกว่าค่า Solubility product ของ  $Al(OH)_3$  การตกผลึกของ  $Al(OH)_3$  จึงเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเติมสารส้มจำนวนมากให้กับน้ำ ผลึกที่เกิดขึ้นเป็นปุยสีขาวและเบา ซึ่งสามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า ปุย  $Al(OH)_3$  นี้มีประสิทธิภาพในการสร้างโคแอกกูแลชั่น ทั้งนี้ เพราะมันอาจไปทำให้อนุภาคคอลลอยด์มีความเหนียว หรืออาจทำหน้าที่เป็นเป้าหรือดงจับอนุภาคคอลลอยด์ที่วิ่งมาปะทะในดงกวนช้า การจับตัวเป็นฟล็อก หรือก้อนของอนุภาคคอลลอยด์จึงเกิดขึ้นได้ กลไกโคแอกกูแลชั่นเช่นนี้เรียกว่า Sweep Coagulation และมีโลหะไฮดรอกไซด์ดังเช่น  $Al(OH)_3$  หรือ  $Fe(OH)_3$  เป็นเป้า ซึ่งมีความสำคัญมาก

กลไกนี้มีบทบาทสำคัญที่สุดในการสร้างโคแอกกูแลชั่นของน้ำที่มีความขุ่น หรือปริมาณคอลลอยด์ การเพิ่มเป้าด้วยการเติมสารส้มให้มากพอจนเกิด Sweep Coagulation จะสามารถทำให้เกิดฟล็อกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ดี อย่างไรก็ตาม สลัดจ์ (Sludge) หรือตะกอนเข้มข้นที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติไม่ดี เนื่องจากทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกได้ยาก



### 3.2.1.2 Charge Neutralization

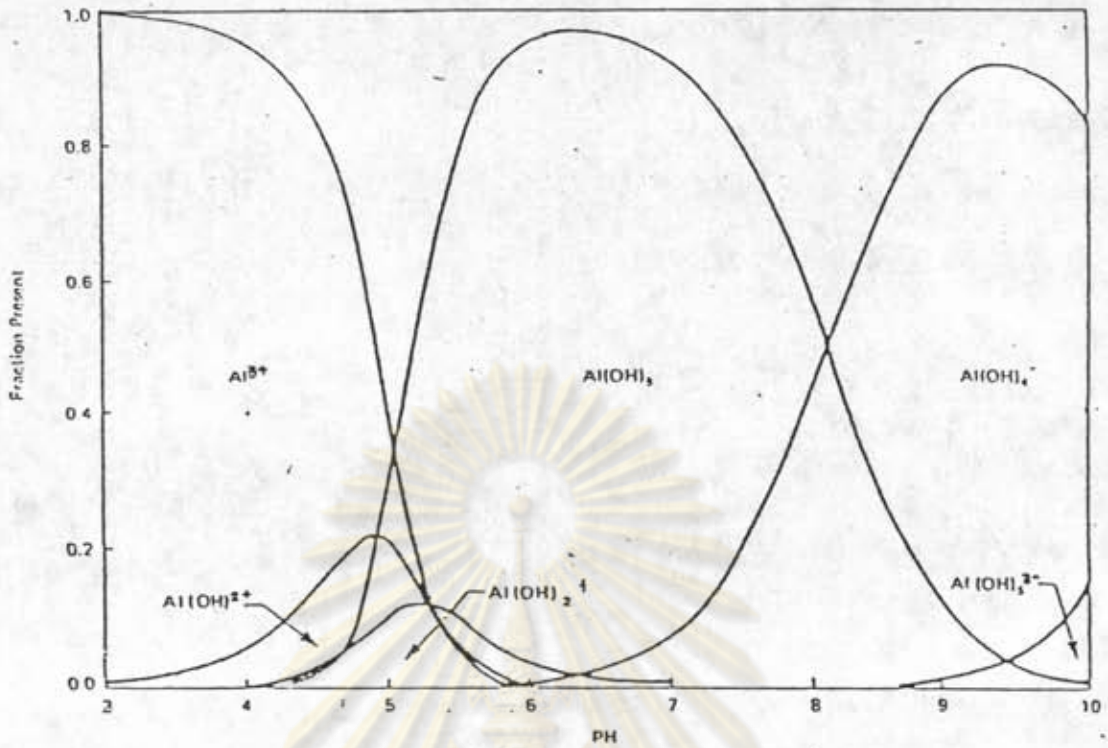
กลไกที่สารส้มทำให้เกิดโคแอกกูเลชันได้อีกแบบหนึ่ง คือ ทำให้ประจุของอนุภาคคอลลอยด์ (ซึ่งมักมีประจุลบ) เป็นกลาง หรือที่เรียกว่า ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ (Colloid Destabilization) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) เกิดขึ้นได้เนื่องจากไอออน (ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารส้ม) มีประจุเป็นลบตรงกันข้ามกับประจุของคอลลอยด์ ประจุบวกของไอออนต่าง ๆ (ดูสมการที่ 3.1 ถึง 3.3) ทำให้อำนาจประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์หมดสิ้นหรือลดลง การผลักรันของคอลลอยด์จึงไม่เกิดขึ้น ทำให้โอกาสจับกันเป็นฟลอคในระหว่างสัมผัสมีมากขึ้น

โคแอกกูเลชันแบบนี้สามารถเกิดขึ้นได้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง และสลัดจ์ที่เกิดขึ้น มักมีคุณสมบัติคือ สามารถอัดตัวไคแน่น และทำให้แห้งหรือคั่งเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่ายกว่าแบบแรก

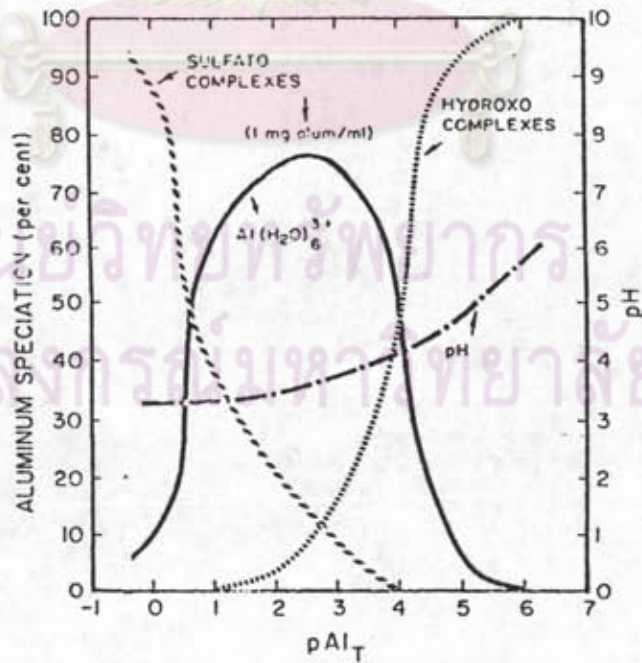
### 3.2.2 อีออนต่าง ๆ

พีเอชและความเข้มข้นของสารละลายโคแอกกูเลชัน (เช่น สารส้ม) มีส่วนสำคัญในการกำหนดชนิดหรือประเภทของอีออน ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโคแอกกูเลชัน กับ น้ำ รูปที่ 3.2 และ 3.3 เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญดังกล่าวของความเข้มข้นของพีเอช และโคแอกกูเลชันดังกล่าวตามลำดับ

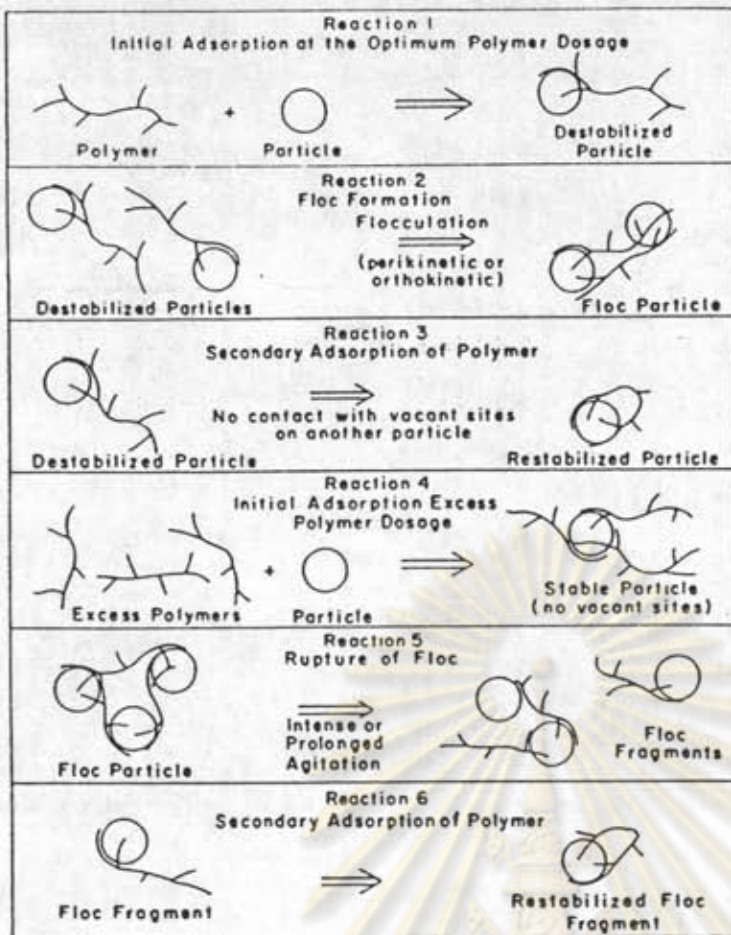
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า เมื่อสารละลายสารส้มมีความเข้มข้นน้อยกว่า 33 มก./ล. อีออนส่วนใหญ่จะมี  $\text{OH}^-$  อยู่ด้วย (เรียกว่า Hydroxo Complex) ตัวอย่างคือ  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  เป็นต้น สารละลายที่มีสารส้ม 1 กรัม/ลิตร จะมีส่วนประกอบหลักคือ  $\text{Al}^{+3}$  แต่ถาสารส้มละลายมีสารส้มละลายอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น มากกว่า 105 กรัม/ลิตร ส่วนประกอบหลักจะเป็นอีออนที่มี  $\text{SO}_4^{-2}$  หรือที่เรียกว่า Sulfato Complex เช่น  $\text{AlSO}_4^+$  สารส้มเหลวบางชนิดอาจมีกรดกำมะถันเป็นส่วนผสมอยู่ในปริมาณสูง ทำให้พีเอชต่ำ และมี Sulfato Complex สูงกว่าที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 บทบาทของพีเอชในการกำหนดชนิดของไอออนที่เกิดจากการเติมสารส้มลงไปในน้ำ



รูปที่ 3.3 บทบาทของความเข้มข้นของสารละลายในการกำหนดชนิดของไอออนที่เกิดขึ้นจากการเติมสารส้มลงไปในน้ำ



รูปที่ 3.4

(6)  
กลไกในการสร้างโคแอกกูเลชันแบบตอสะพานของสารโพลีเมอร์

3.2.3 กลไกที่เกิดจากการใช้โคแอกกูเลชันเอค

โคแอกกูเลชันเอค (Coagulation Aid) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับโคแอกกูแลนท์โคหลายทาง ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเติมแอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) ซึ่งเป็นโพลีเมอร์ที่มีประจุลบก่อนการเติมสารส้ม จะทำให้โคแอกกูเลชันของน้ำที่มีความขุ่นน้อยเกิดขึ้นได้ ทั้งนี้ เพราะแอ็คติเวตเต็ดซิลิกาจะเป็นเป่าสัมผัสเพิ่มเติมให้กับน้ำซึ่งมีเป่าสัมผัสไม่เพียงพอ การใช้ซิลิกาในกรณีนี้มักช่วยลดปริมาณสารส้มที่ต้องใช้ด้วย นอกจากนี้ ยังทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นมีน้ำหนักและตกตะกอนได้ง่าย ถ้าเติมแอ็คติเวตเต็ดซิลิกาหลังจากการเกิดโคแอกกูเลชันของสารส้ม จะช่วยให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่มากขึ้น และตกตะกอนได้ง่าย ฟล็อกสารส้มที่มีประจุบวกเล็กน้อยที่ระดับพีเอชต่ำกว่า 7 ทำให้สามารถใช้ซิลิกา (ซึ่งมีประจุลบ) เพื่อประโยชน์ดังกล่าวได้อันึ่ง ต้องตระหนักไว้ด้วยว่าการเติมแอ็คติเวตเต็ดซิลิกาพร้อม ๆ กับสารส้มจะไม่ได้รับประโยชน์ เนื่องจากสารทั้งสองชนิดสามารถทำปฏิกิริยากันจนเป็นกลาง และสูญเสียคุณสมบัติในด้านโคแอกกูเลชัน

สารประกอบชนิดอื่นที่ใช้เป็นโคแอกกูเลชันได้ด้วยจุดประสงค์เดียวกับการเติมดินเหนียว เพื่อเป็นเป่า จะทำให้ได้ฟล็อกที่มีน้ำหนักมากขึ้น สารอินทรีย์โพลีเมอร์-

สังเคราะห์ อาจใช้ในการทำลายเสถียรภาพของฟลอคสารส้ม ลำดับของการเติมสารเคมี มีความสำคัญมาก ต้องไม่เติมโคแอกกูเลชันเอคพร้อม ๆ กับสารส้มลงในถังกวนเร็วใบเดียวกัน กรณีเช่นนี้มักต้องการถังกวนเร็วอย่างน้อย 2 ใบ ต่อถังอย่างอนุกรม สารที่เป็นเป้าควรเติมก่อนการเติมสารส้ม ส่วนโพลีเมอร์ที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของฟลอคสารส้มควรจะต้องเติมภายหลังการเติมสารส้ม

อันที่จริงแล้วสารโพลีเมอร์อาจนำมาใช้เป็นตัวโคแอกกูแลนท์เลยก็ได้ แต่เนื่องจากมันมีราคาแพงกว่าสารส้ม หรือโคแอกกูแลนท์สามัญอื่น ๆ เป็นอันมาก ในทางปฏิบัติ จึงใช้โพลีเมอร์เป็นตัวช่วยเหลือ หรือสนับสนุนสารส้มหรือสารอื่นในการสร้างโคแอกกูเลชันอีกประการหนึ่ง แม้ว่าโพลีเมอร์สามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ได้ แต่มันก็ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ตามลำพังกับน้ำที่มีความขุ่น เนื่องจากโพลีเมอร์ไม่สร้างเป่าสัมผัสเพิ่มขึ้น น้ำที่มีความขุ่นต่ำ จึงมีโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาคน้อย และไม่อาจสร้างฟลอคขนาดใหญ่ได้

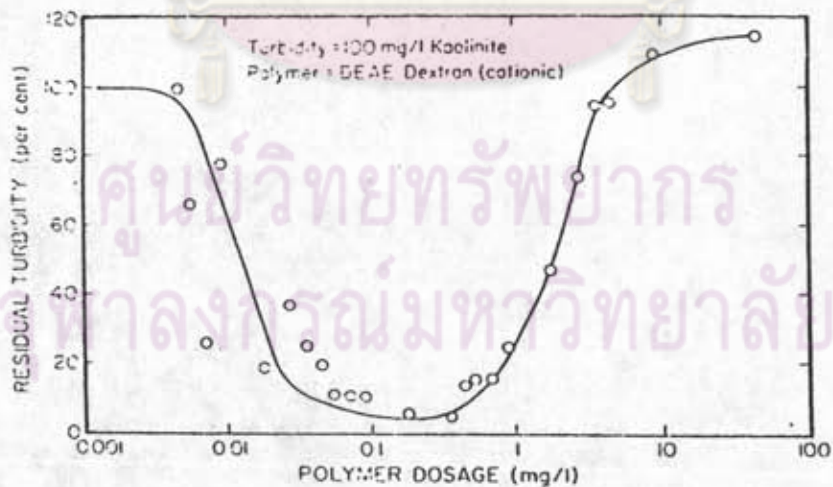
โพลีเมอร์ที่ใช้เป็นโคแอกกูแลนท์ต้องสามารถเกาะติดผิวของอนุภาคความขุ่น ดังนั้น จึงปรากฏว่าความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างความเข้มข้นของความขุ่น กับ ปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการสร้างโคแอกกูเลชัน กล่าวคือ ถ้าความขุ่นสูงก็ต้องการโพลีเมอร์มาก แต่ถ้าความขุ่นต่ำ ก็ต้องการโพลีเมอร์น้อย เป็นต้น

โพลีเมอร์สร้างโคแอกกูเลชันให้กับน้ำขุ่นได้ 2 วิธี ซึ่งล้วนอาศัยคุณสมบัติในการเกาะจับอนุภาคคอลลอยด์ วิธีแรกเป็นการทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยโพลีเมอร์ที่มีประจุบวก ทำให้เสถียรภาพของคอลลอยด์หมดสิ้นไป กรณีเช่นนี้อาจใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำก็ได้ เนื่องจากน้ำหนักโมเลกุลไม่ไคเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างโคแอกกูเลชัน วิธีที่สอง เป็นการสร้างโคแอกกูเลชันโดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคคอลลอยด์หลาย ๆ ตัว (ดูรูปที่ 3.4) ประจุของโพลีเมอร์ในกรณีนี้ไม่ใช่เรื่องสำคัญ เพราะไม่จำเป็นต้องทำให้คอลลอยด์เป็นกลาง แต่สิ่งที่สำคัญคือ โพลีเมอร์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคความขุ่นต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง สะพานดังกล่าวต้องแข็งแรง และสามารถต้านทานแรงผลักระหว่างอนุภาคและความปั่นป่วนที่เกิดจากการกวนน้ำ ด้วยเหตุนี้โคแอกกูเลชันที่เกิดจากวิธีสร้างสะพานนี้จึงต้องการโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนัก



โมเลกุลสูง ๆ

รูปที่ 3.5 ได้มาจากการทำ Jar Test เพื่อหาความสำคัญของปริมาณ โพลีเมอร์ที่มีต่อการสร้างโคแอกกูเลชัน หรือการกำจัดความขุ่น จะเห็นได้ว่า ภายใต้อาจะของการทดลองนี้ กราฟอาจแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของโพลีเมอร์ เมื่อใช้สารโพลีเมอร์น้อยกว่า 0.01 มก./ล. ปริมาณโพลีเมอร์มีไม่มากพอที่จะทำให้ประจุลบของคอลลอยด์เป็นกลาง การทำลายเสถียรภาพของความขุ่นเกิดขึ้นได้บ้าง แต่ยังไม่ทำให้โคแอกกูเลชันถึงระดับสมบูรณ์ การเพิ่มสารโพลีเมอร์ช่วยทำให้โคแอกกูเลชันเกิดได้ผลดีขึ้น จึงทำให้มีความขุ่นลดน้อยลงตามความต้องการเพิ่มของโพลีเมอร์จำนวนพอเหมาะ (อยู่ในช่วง 0.04 ถึง 1 มก./ล.) ปรากฏว่า โคแอกกูเลชันเกิดขึ้นได้มากที่สุด ทำให้มีความขุ่นเหลือน้อยที่สุด สุกท้ายเมื่อเติมสารโพลีเมอร์มากกว่า 1 มก./ล. น้ำจะขุ่น เนื่องจากเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์จะกลับคืนมาอีก แต่คราวนี้ประจุของคอลลอยด์กลายเป็นประจุบวก (เดิมมีประจุลบ) เนื่องจากถูกโพลีเมอร์ที่มีประจุบวก ห่อหุ้มจนไม่สามารถวัดประจุเดิมของคอลลอยด์ กราฟส่วนสุดท้ายเรียกว่า Restabilization



รูปที่ 3.5 บทบาทของสารโพลีเมอร์ในการสร้างโคแอกกูเลชัน (9)

### 3.3 การเลือกสารโคแอกกูแลนต์

การเลือกสารเคมีมาเป็นโคแอกกูแลนต์มักขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำดิบเป็นสำคัญ สารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ สารส้มและสารประกอบเหล็ก เช่น  $FeCl_3$  โดยทั่วไปแล้ว สารส้มมักเป็นที่นิยมมากกว่าสารอื่น เนื่องจากสามารถใช้ได้กับน้ำธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ ประกอบกับราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย อย่างไรก็ตามในบางครั้งสารส้มอาจใช้ได้ไม่ดีเท่าสารประกอบเหล็ก ในบางโอกาสการปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดหรือด่าง ก็อาจเป็นเรื่องจำเป็น มิฉะนั้นแล้วโคแอกกูแลนต์จะเกิดไม่สมบูรณ์ ยิ่งกว่านั้นอาจจำเป็นต้องเติมโคแอกกูแลนต์เเค่บางอย่าง เพื่อช่วยทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ และตกตะกอนได้ง่าย

การเลือกชนิดและปริมาณของสารเคมี ซึ่งเป็นโคแอกกูแลนต์และโคแอกกูแลนต์เเค่ สามารถกระทำได้โดยการทดลองแบบ Jar Test

#### 3.3.1 สารเคมีสำหรับกำจัดความขุ่น

ความขุ่นในน้ำมักเกิดจากสิ่งแขวนลอยต่าง ๆ เช่น เศษดิน ซากอินทรีย์ วัตถุที่ไม่มีชีวิต แผลงคอน และจุลินทรีย์ขนาดเล็กอื่น ๆ เป็นต้น สารเคมีสำหรับสร้างโคแอกกูแลนต์ให้กับน้ำดิบ อาจจำแนกตามประเภทของน้ำดิบได้ดังนี้

##### 3.3.1.1 สารเคมีสำหรับน้ำที่ขุ่นมาก และมีความเป็นด่างสูง

น้ำดิบที่มีความขุ่นและความเป็นด่างอยู่ในระดับสูง จัดเป็นน้ำที่สามารถสร้างโคแอกกูแลนต์ได้ง่าย สารเคมีหลายชนิด เช่น สารส้มหรือเฟริกคลอไรด์ สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ดีได้ โดยปกติสารส้มให้ผลดีเมื่อน้ำมีพีเอชอยู่ในช่วง 6 - 7 ส่วน เกลือเฟริกคลอไรด์สามารถใช้ได้ผลดีสำหรับน้ำที่มีพีเอชอยู่ในช่วง 5 - 7 ถ้าใช้สารส้มหรือเกลือเฟริกคลอไรด์ก็มักไม่ต้องการโคแอกกูแลนต์เเค่ บุนขาวหรือสารด่างอื่น ๆ ก็ไม่ใช้สิ่งจำเป็นสำหรับน้ำดิบชนิดนี้ โพลีเมอร์ที่มีประจุบวก (Cationic Polyelectrolyte) สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้เช่นกัน พีเอชมีผลกระทบต่อโคแอกกูแลนต์ที่เกิดจากการใช้โพลีเมอร์ การที่น้ำมีความขุ่นสูงช่วยทำให้ฟล็อกมีขนาดใหญ่ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเติมเป่าจากภายนอก โพลีเมอร์ที่มีประจุลบหรือไม่ประจุเลยก็อาจใช้ได้ผลดีด้วย และบางครั้ง

อาจประหยัดกว่าสารเคมีอื่น กรณีเช่นนี้ควรพิจารณาเลือกใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ

### 3.3.1.2 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นสูง แต่มีความเป็นด่างต่ำ

โพลีเมอร์อาจใช้เป็นโคแอกกูแลนต์โคดี ในกรณีนี้สารส้มและเกลือเฟริกก็สามารถใช้ได้เช่นกัน แต่ต้องระวังในเรื่องที่เอชลดลง เนื่องจากมีพีเพอร์ไม่เพียงพอ ช่วงพีเอชที่เหมาะสมเป็นเช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.3.1.1 การปรับพีเอชด้วยสารละลายด่างมักเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้ เพื่อป้องกันมิให้พีเอชของน้ำลดต่ำลงจนโคแอกกูแลนต์เกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

### 3.3.1.3 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่นน้อย แต่มีความเป็นด่างสูง

น้ำดิบเช่นนี้ไม่อาจสร้างโคแอกกูแลนต์ให้เกิดได้ด้วยโพลีเมอร์เพียงลำพัง ควรต้องมีการเติม " เป้าส้มฝัด " จากภายนอกด้วย โดยปกติมักเติมเป้าส้มฝัดก่อนเติมโพลีเมอร์หรือโคแอกกูแลนต์อื่น ผงดินเหนียวปนละเอียดชนิดต่าง ๆ เช่น Kaolinite หรือ Bentonite สามารถใช้เป็นเป้าส้มฝัดโคดี หรืออาจใช้แอ็กติเวตเต็ดซิลิกาโคดี สารส้มและเกลือเฟริก ก็ให้ผลดีในการสร้างโคแอกกูแลนต์ แต่ต้องใช้ในปริมาณค่อนข้างสูง เช่นใช้สารส้มมากกว่า 5 - 100 มก./ล. เป็นต้น เพื่อสร้างปุ๋ย  $Al(OH)_3$  หรือ  $Fe(OH)_3$  ให้เป็น " เป้าส้มฝัด " นั้นเอง การเติมผงดินเหนียวหรือแอ็กติเวตเต็ดซิลิกา ก่อนเติมสารส้มหรือเฟริกคลอไรด์ จะช่วยลดปริมาณโคแอกกูแลนต์โคดี ทำให้ได้ฟล็อกที่มีขนาดตกตะกอนและอัดตัวโคดี

### 3.3.1.4 สารเคมีสำหรับน้ำที่มีความขุ่น และมีความเป็นด่างน้อย

น้ำเช่นนี้เป็นแบบที่สร้างโคแอกกูแลนต์ได้มากที่สุด การใช้โคแอกกูแลนต์อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงลำพังจะไม่ให้ผลดีเลย เนื่องจากน้ำมีเป้าส้มฝัดน้อยเกินไป จึงควรต้องมีการเติมเป้าส้มฝัดเพิ่มเติมให้กับน้ำด้วย การใช้สารส้มหรือเหล็กเฟริก จะทำให้พีเอชของน้ำลดต่ำไปเป็นอย่างมาก จนอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับสร้างโคแอกกูแลนต์ ขอแนะนำสำหรับน้ำประเภทนี้ดังนี้ คือ

1. เติมน้ำหรือค้ำอย่างอื่น เพื่อเพิ่มกำลังบัพเพอร์ให้  
กับน้ำ และ/หรือ
2. เพิ่มเป่าสัมผัสให้กับน้ำ โดยการเติมดินเหนียว (เช่น  
Kaolinite ฯลฯ) หรือสารเจือยอย่างอื่น

### 3.3.2 โคนอกกุเลชั่นสำหรับกำจัดสี

สีในน้ำเกิดจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น จึง  
อาจกล่าวได้ว่า สีส่วนใหญ่เกิดขึ้นมาจากกรดฮิวมิก (humic acid) และกรดฟัลวิก (fulvic  
acid) กรดฮิวมิกสามารถละลายน้ำได้ในสารละลายค้ำแก่ แต่ไม่ละลายในกรดแก่ ส่วน  
กรดฟัลวิกสามารถละลายได้ทั้งในกรดและค้ำแก่ กรดฮิวมิกต่าง ๆ นั้นมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่  
ไม่กี่ร้อยไปจนถึงสองถึงสามพัน มันสามารถจับตัวกันได้ตามธรรมชาติ กลายเป็นอนุภาค  
คอลลอยด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นไป กรดฮิวมิกประกอบขึ้นด้วยสารประกอบโรมาติก (aro-  
matic compound) ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl) ฟีนอลิก (phenolic) และ  
ควินอยด์ (quinoid group) โดยเหตุที่มันมีหมู่คาร์บอกซิลิกและฟีนอลิก สารประกอบ  
ฮิวมิกจึงมีความสามารถสูงในการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก และสามารถดึงไอออนโลหะ  
เข้ามารวมด้วยได้ และเนื่องจากมันมีคุณสมบัติของสารอินทรีย์มันจึงสามารถสะสมสารประ-  
กอบอินทรีย์ประเภทไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) รวมทั้งสารฆ่าแมลง บทบาทของกรด  
ฮิวมิกในฐานะเป็นต้นกำเนิดของสารแฮโลมีเทน (halomethane)

สารส้มและเหล็กเฟริกในฐานะเป็นสารโคแอกกูแลนท์ สามารถกำจัดสี  
ในน้ำได้ดี แต่ก็ไม่สามารถกำจัดกรดฮิวมิกและฟัลวิกออกจนหมดสิ้นได้ นักวิจัยบางคน คิดว่า  
การที่กรดฟัลวิกไม่สามารถเกิดโคแอกกูเลชั่นได้ดี เป็นเพราะว่ากรดประเภทนี้ไม่มีหมู่คาร์บอกซิล  
เพียงพอที่จะสร้างคอมเพล็กซ์กับไอออนของโคแอกกูแลนท์ ในการกำจัดสีปรากฏว่าสารส้มจะ  
สามารถให้ผลได้ดีเมื่อพีเอชอยู่ประมาณ 5 ส่วนเฟริกซัลเฟตจะใช้ได้ดีควรมีพีเอชประมาณ 4  
การหาปริมาณและชนิดของโคแอกกูแลนท์ที่เหมาะสมกระทำได้โดยวิธี Jar Test (5)



### 3.4 แนวความคิดของการประเมินผลการรวมตะกอน

การประเมินผลสำหรับการวิจัยนี้เป็นการนำเอาอุปกรณ์จาร์เทสต์มาใช้ในการเลียนแบบพฤติกรรมการกวนของถังกวนช้าจากโรงกรองน้ำที่ศึกษา ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบดูว่าสามารถนำจาร์เทสต์มาใช้ในการประเมินผลการรวมตะกอนได้จริงหรือไม่

แนวความคิดในการนำเอาจาร์เทสต์มาใช้ในการประเมินผลนั้น สืบเนื่องจากวิธีการที่ใช้ในการหาค่าตัวแปรที่เกิดจากคุณสมบัติของการรวมตัวกันของอนุภาคคอลลอยด์มีด้วยกันหลายวิธี อาทิ การวัดค่าประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์, ค่าซีตา โฟเทนเชียล (Zeta Potential) หรือค่าโมบิลิตี (Mobility) <sup>(10,11)</sup>, ค่า Filterability Index <sup>(12)</sup>, จำนวนอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ (Particle Counting) <sup>(12)</sup> และอื่น ๆ แต่ละกรณีที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีในการนำข้อมูลซึ่งจะมาช่วยในการหาค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมของการวัดและเสริมสร้างความเข้าใจถึงความเกี่ยวข้องกันระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ของคอลลอยด์ แต่เป็นที่น่าเสียดายที่ว่าในทางปฏิบัตินั้นวิธีการเหล่านี้มีข้อจำกัด ในการนำมาใช้สำหรับการประเมินผลของโรงกรองน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการเหล่านี้ใช้ให้ผลดีสำหรับโรงกรองน้ำบางแห่ง และใช้ไม่ได้ผลสำหรับบางแห่ง <sup>(10)</sup>

จาร์เทสต์จึงยังเป็นเครื่องมือในการปฏิบัติที่เป็นที่นิยมและถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดสำหรับการประเมินผลสำหรับการรวมตะกอน <sup>(14,15)</sup>

แนวทฤษฎีที่ใช้ในการประเมินผลการรวมตะกอนสำหรับการวิจัยนี้แสดงไว้ในหัวข้อ

3.4.1, 3.4.2 ส่วนอุปกรณ์จาร์เทสต์ที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในบทที่ 4

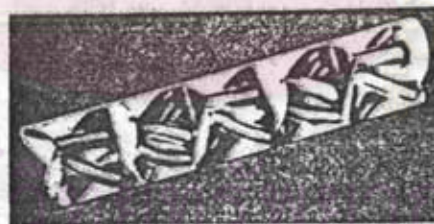
#### 3.4.1 ทฤษฎีของเครื่องกวนเร็วในเส้นท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ (Inline static mixer)

เครื่องกวนเร็วในเส้นท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ จัดเป็นอุปกรณ์กวนเร็วที่มีลักษณะการไหลแบบปลั๊กโฟล (plug flow) <sup>(16,17)</sup> ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ มีตัวกลางในท่อที่ทำเป็นใบพัดเกลียวติดอยู่กับท้ายในท่อ ทำให้หน้าตัดที่ไหลผ่านมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรงโดยอาศัยค่าพลังงานในระบบท่อนำดิบซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องสูบน้ำแรงต่ำ เครื่องกวนเร็วในเส้นท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ เพิ่งมีการค้นคว้าพัฒนาอย่างจริงจังเมื่อประมาณ 27 ปีที่ผ่านมา <sup>(18)</sup> โดยบริษัท ไทวเคมีคัล และบริษัท เคนนิส จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตและวิจัยขบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันเพื่อทำพลาสติกและเส้นใยสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ ที่มีชื่อเสียงมากของอเมริกา

เครื่องกววเร็วในเส้นท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ที่พัฒนาโดย บริษัท โคเวแกมิกส์ ได้พัฒนา มาสองชนิด คือ ชนิดความดันลดต่ำ และชนิดเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (ดูรูปที่ 3.6) ส่วนของบริษัท เคนิกส์ ตัวกลางคงที่ในท่อซึ่งเป็นใบเกลียวนั้น จะมีลักษณะเป็นริบบิ้นสั้น ๆ ความยาวประมาณ 1.5 ถึง 2.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อกววเร็ว (ดูรูปที่ 3.7) เครื่องกววเร็วในเส้น ท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ที่พัฒนาล่าสุดเป็นแบบของบริษัท โลทีนิน ภายใต้ชื่อทางการค้าว่า อินไลเนอร์ (Inliner) โดยออกแบบเป็นใบพัดขนาดเล็ก สามารถประกอบกันเป็นริบบิ้นที่บิดซ้าย - ซวาได้ (ดูรูปที่ 3.8) โดยใช้ใบพัด 6 ใบ หรือจะสลับใบอีก 4 ใบขวางทางการไหลเพื่อสร้าง ความปั่นป่วนเพิ่มก็ได้ ทำให้แบบโลทีนินมีประสิทธิภาพในเรื่องการกวนมากกว่าแบบอื่น ๆ การที่ ใบพัดย่อยแบ่งลำของเหลวออกเป็น 3 ส่วน ทำให้ของเหลวถูกซอยให้ละเอียดในแนวยาวมากกว่า แบบ เคนิกส์

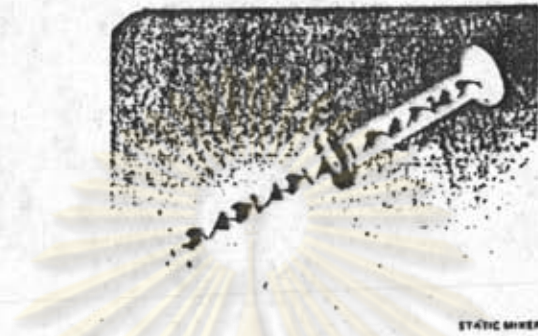


ก. เป็นชนิดความดันลดต่ำ



ข. เป็นชนิดเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะของเครื่องกววเร็วในเส้นท่อแบบสเตติกมิกเซอร์ ที่พัฒนาโดยบริษัท โคเวแกมิกส์ จำกัด ก. เป็นชนิดความดันลดต่ำ ข. เป็นชนิดเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของเครื่องกวาดเร็วใน ส้นท่อแบบสแตติกมิทเซอร์  
ที่พัฒนาโดยบริษัท เคนิกส์ จำกัด



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของเครื่องกวาดเร็วใน ส้นท่อแบบสแตติกมิทเซอร์  
ที่พัฒนาโดยบริษัท ไสท์นิน

รูปที่ 3.6 - 3.8 แสดงลักษณะของเครื่องทวนเร็วในเส้นทอแบบสเตติกมิกเซอร์แบบต่าง ๆ

จะเห็นว่าการทำงานของสเตติกมิกเซอร์แบบเคมิกส์ เริ่มจากของเหลวไหลมาเข้าริบบิ้นตัวแรกแล้วถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.9 คือ ที่แสดงด้วยลูกศรสีดำด้านล่างกับลูกศรสีขาวด้านบน ในขณะที่กำลังไหลต่อไปนั้นลำของเหลวส่วนบนจะถูกบังคับให้กลับตัวมาอยู่ด้านล่าง เพื่อเตรียมตัวเข้าสู่ริบบิ้นอันถัดไป ซึ่งสำหรับของเหลวที่อยู่ทางด้านล่างก็จะถูกบังคับมาอยู่ทางด้านบนเช่นเดียวกัน ของเหลวที่อยู่ห่างส่วนบนและส่วนล่างนั้น เมื่อเข้ามาสู่ริบบิ้นอันที่ 2 จะถูกแบ่งออกเป็นอีกอย่างละ 2 ส่วน เนื่องจากริบบิ้นส่วนที่ 2 นั้น ถูกวางตั้งฉากกับริบบิ้น ฉะนั้น จะพบว่า ถ้าของเหลวผ่านริบบิ้น  $N$  ตัวของเหลวจะถูกแยกเป็นลำออกได้  $2^N$  ชั้น ความหนาของของเหลวที่ถูกซอยจะประมาณได้ด้วย  $D2^N$  เมื่อ  $D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ



## ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.9 แสดงการแบ่งของตัวกลางตามแนวยาวเมื่อผ่านริบบิ้นต่าง ๆ

ตามการคำนวณถ้าใช้ทวนเร็วแบบสเตติกมิกเซอร์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว เมื่อผ่านริบบิ้นตัวที่ 18 ความหนาของชั้นของเหลวจะถูกซอยให้เหลือเพียง 1 ไมครอนเท่านั้นเอง (18)

การคำนวณความเร็วเกรเดียนท์ของน้ำที่ผ่านทอกรวนเร็วแบบสเตติกมิกเซอร์ กระทำ  
โดยสมการของ Camp & Stein<sup>(19)</sup> ดังนี้

$$G = \left( \frac{P}{\mu v} \right)^{0.5} \quad (3.5)$$

- โดยที่
- G = ความเร็วเกรเดียนท์
  - P = พลังงาน,  $\rho Q g H$ , (วัตต์, กก.ม.<sup>2</sup>/วินาที<sup>3</sup>)
  - $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ (กก./ลบ.ม.)
  - Q = อัตราไหลของน้ำ (ลบ.ม./วินาที)
  - g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (9.81 ม./วินาที<sup>2</sup>)
  - H = ก่าหัวน้ำสูญเสีย (ม.)
  - $\mu$  = ความหนืดสมบูรณ์ (กก./ม.-วินาที)
  - v = ปริมาตรของทอกรวนเร็ว (ลบ.ม.)

จากสมการที่ 3.5 ทำให้สามารถคำนวณค่าความเร็วเกรเดียนท์ของทอสเตติกมิกเซอร์ โดยก่าหัวน้ำสูญเสียสามารถหาได้โดยการติดตั้งเกยวัดความดันไว้ที่หัวและปลายของทอสเตติกมิกเซอร์ ความแตกต่างของความดันที่จุดหัวและปลายของทอจะเป็นก่าหัวน้ำสูญเสีย (ดูตัวอย่างการคำนวณจากภาคผนวก ก)

งานวิจัยซึ่งศึกษาโดย Kawamura<sup>(20)</sup> ได้แนะนำให้ใช้ค่า G ในกรณีที่ใช้คิฟ-ฟิวเซอร์ของ ชั้นทวนเร็วในช่วง 750 ถึง 1,000 วินาที และ  $t \geq 1$  วินาที ในกรณีที่ใช้เครื่องปั่นคักในเส้นทอ Hudson & Wolfner<sup>(21)</sup> แนะนำให้ใช้  $t$  น้อยกว่า 30 วินาที โดย G มีค่าระหว่าง 3,000 ถึง 5,000 วินาที

### 3.4.2 ทฤษฎีของการกวนซ้ำแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel

#### Flocculator

การกวนซ้ำแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel Flocculator ปรับปรุงมาจากการกวนซ้ำแบบ Around the End Baffled-Flocculator ซึ่งจะใช้การหมุนวนของมวลน้ำมาเป็นตัวเพิ่มค่าของความเร็วเกรเดียนท์ในระบบ โดยยึดหลักที่จะเสริมสร้างให้อนุภาคตะกอนมีความแข็งแรงและให้ได้ขนาดใหญ่ (22,23)

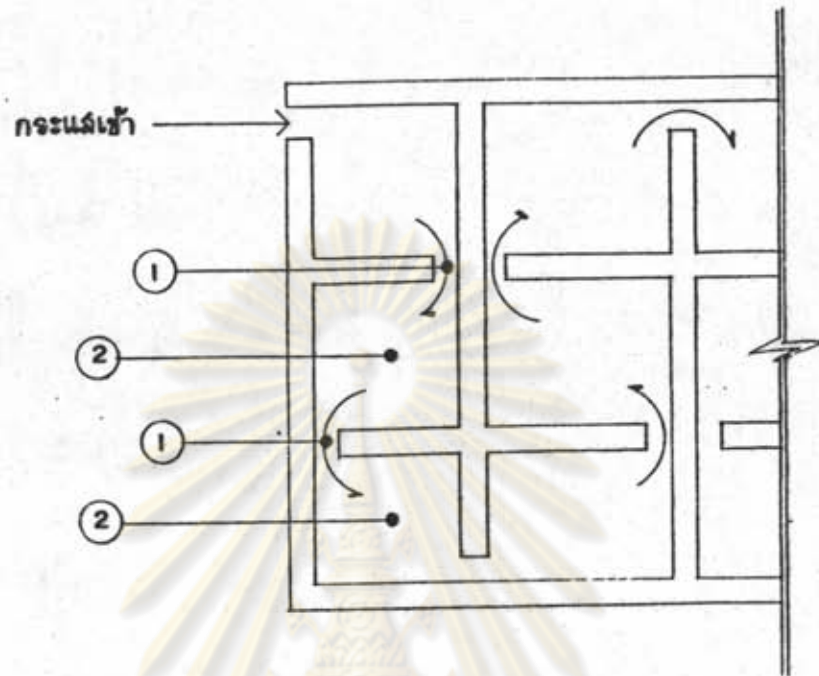
การประเมินค่าความเร็วเกรเดียนท์ของการกวนซ้ำแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel Flocculator ประเมินได้โดยอาศัยหลักการทางชลศาสตร์ของระบบ ซึ่งใช้หลักการเดียวกับทฤษฎีพื้นฐานของ Camp & Stein<sup>(19)</sup> ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.5

Okun<sup>(24)</sup> ได้แนะนำค่า  $G$  สำหรับถังกวนซ้ำแบบ Helicoidal ควรมีค่าประมาณ 75 วินาที<sup>-1</sup> ที่จุดเข้าและ 10-15 วินาที<sup>-1</sup> ที่จุดออก ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถังกวนซ้ำ มีค่าแปรเปลี่ยนตั้งแต่ 0.3-0.1 ม/วินาที เวลาในการเก็บกักมีค่าระหว่าง 15 ถึง 30 นาที

ในการออกแบบถังกวนซ้ำ จำนวนของอนุภาคคอลลอยด์ที่จับตัวกัน และการรวมตัวกันเพื่อให้เกิดฟล็อก สามารถแสดงด้วยค่าผลคูณของ  $G$  และ  $t$  Smethurst<sup>(25)</sup> ได้แนะนำให้ใช้ค่าผลคูณของ  $Gt$  สำหรับถังกวนซ้ำควรมีค่าระหว่าง 20,000 ถึง 150,000

จากสมการที่ 3.5 จะพบว่า เทอม  $\rho$ ,  $g$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ในระบบเมื่อทราบค่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องมือกวนซ้ำ หรืออุปกรณ์กวนซ้ำดังกล่าวซึ่งมีปริมาตรควบคุมที่แน่นอนแล้ว จะกล่าวได้ว่า ถ้าสามารถหาค่าของค่าหัวน้ำสูญเสีย ( $H$ ) ได้ ก็จะหาค่า  $G$  ได้

รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างของถังกวนซ้ำแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel Flocculator



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะของถังกวนน้ำแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel Flocculator

จากรูปที่ 3.10 พิจารณาถึงสภาวะทางชลศาสตร์ในการไหล โดยใช้สมการของเบอร์นูลลี (26, 27) ซึ่งกล่าวไว้ว่า

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} + Y_1 = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + Y_2 + H \quad 3.6$$

เมื่อ  $z_1, z_2$  = ระดับความสูงจากแกนอ้างอิงถึงท้องคลอง (ม.)

$V_1, V_2$  = ความเร็ว ณ จุดใด ๆ (ม./วินาที)

$Y_1, Y_2$  = ความสูงของน้ำที่จุดใด ๆ (ม.)

$H$  = พลังงานน้ำที่สูญเสียทั้งหมด (ม.)

$P_1, P_2$  = ความดันของน้ำที่จุด 1 และ 2

$\gamma$  =  $\rho g$  (นิวตัน/ลบ.ม.)

$$\alpha = \text{ประสิทธิภาพการกระจายของความเร็ว (Energy Coefficient or Coriolis Coefficient)} \\ (1.0 - 1.20) \quad (26)$$

เนื่องจากการไหลสัมผัสกับอากาศซึ่งเป็นการไหลแบบทางน้ำเปิด และระดับของก้นถังกวนขาคู่อยู่ในระนาบเดียวกัน ทำให้  $\frac{p}{\gamma} = 0$  และ  $z_1 - z_2 = 0$  สมการที่ 3.6 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$H = (Y_1 - Y_2) + \alpha \left( \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \right) \quad 3.7$$

กำหนดให้เทอม  $V_1^2 - V_2^2$  เขียนแทนด้วย  $\Delta V^2$  และ  $Y_1 - Y_2$  เขียนแทนด้วย  $\Delta Y$  สมการที่ 3.7 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$H = (\Delta Y) + \alpha \frac{\Delta V^2}{2g} \quad 3.8$$

เมื่อทำการวัดระดับน้ำเพื่อหาค่าของความเร็วที่จุด 1 และจุด 2 ได้ แล้วก็จะสามารถหาค่าหัวน้ำสูญเสียได้ เมื่อนำค่าหัวน้ำสูญเสียที่ได้ไปแทนในสมการที่ 3.5 ทำให้สามารถประเมินค่า  $G$  ของการกวนขาได้

และเมื่อทราบค่าระดับน้ำและเวลาในการกวนขาที่ส่วนต่าง ๆ ของถังกวนขาจะทำให้สามารถคำนวณปริมาตรน้ำในถังกวนขาได้ เมื่อทำการหารด้วยค่าของอัตราการใช้พลังงาน จะได้อัตราของเวลาในการกวนขา ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$T = \frac{V}{Q}, \quad \text{โดยที่ } T = \text{เวลาในการกวนขา} \\ V = \text{ปริมาตรของถังกวนขา} \\ Q = \text{อัตราไหลของน้ำ} \quad 3.9$$

จากสมการที่ 3.8 จะเห็นว่า ไม่มีความเหมาะสมในการที่จะใช้ในการคำนวณออกแบบการกวนขาโดยใช้ถังกวนขาแบบ Helicoidal-Flow Baffled-Channel Flocculator แม้ว่าสมการนี้จะใช้ได้ในการประเมินค่า  $G$  ของถังกวนขาที่สร้างขึ้นแล้ว หรือขณะดำเนินการระบบ แต่ไม่สามารถประมาณได้เลยว่าค่าระดับน้ำแตกต่าง ( $Y$ ) จะเป็นเท่าใด ในการที่จะประยุกต์



สมการที่ 3.8 มาใช้ในการออกแบบ วิธีที่เป็นไปได้และนิยมใช้ประการหนึ่ง คือ การหาค่าการลดของระดับน้ำเมื่อผ่านแผ่นกันแต่ละแผ่น โดยประเมินจากหลักความเท่ากันของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ ซึ่งอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$y = K \frac{v_1^2}{2g} \quad 3.11$$

เมื่อ  $K = \text{Empirical Constant}$

( 1.5 สำหรับการไหลแบบ Helicoidal Flow ) (28)

ถ้าทำการวัดค่าระดับน้ำแตกต่างกัน และหาค่าของความเร็วที่ไหลผ่านแต่ละแผ่นกันได้แล้ว จะทำให้สามารถประเมินค่า  $K$  ได้ ซึ่งค่า  $K$  นี้จะมีประโยชน์ในการประมาณค่า  $y$  ในขณะที่ทำการออกแบบดังกล่าว เนื่องจากเทอม  $v_1$  สามารถหาได้จากลักษณะทางกายภาพของถังกวนช้า และปริมาณของอัตราการไหลของน้ำเข้าถังกวนช้า

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย