

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 การเกิดเสถียรภาพของอนุภาค

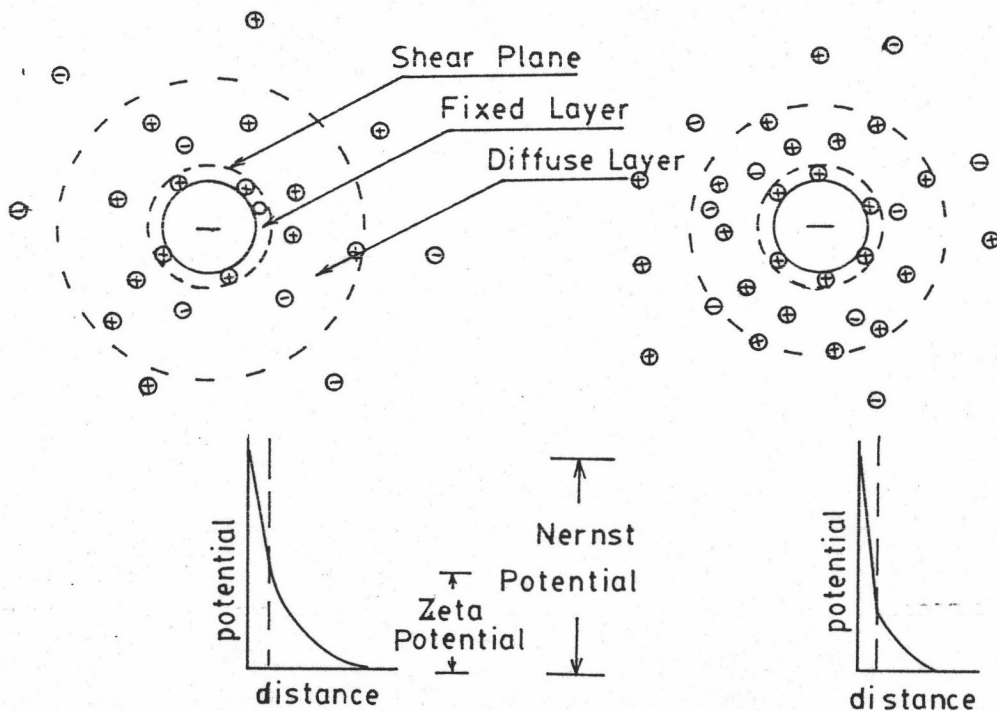
อนุภาคต่าง ๆ ซึ่งมีขนาดตั้งแต่เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) จนถึงขนาดที่เป็นคอลลอยด์ (colloidal particle) และสารแขวนลอย (suspended solid) คงสภาพแขวนลอยซึ่งเรียกว่ามีเสถียรภาพในน้ำ ทำให้เกิดความขุ่น, สี และมีปัญหาอื่น ๆ ใต้นั้น นอกจากจะเป็นเพราะอนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมากจึงจมตัวช้า ยังมีสาเหตุเนื่องจากปรากฏการณ์ 2 ชนิด

ปรากฏการณ์แรกเป็นการยึดเกาะกันระหว่างอนุภาคกับโมเลกุลของน้ำ (hydration) ทำให้อนุภาคซึ่งมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบนี้ ไม่สามารถสัมผัสกันและเกาะกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ (6,7)

ปรากฏการณ์ที่สอง คือการที่อนุภาคเหล่านี้มีประจุไฟฟ้าที่ผิว ซึ่งอาจเกิดจากการแตกตัวของอนุภาคต่าง ๆ , จากการดูดซับไอออนต่าง ๆ จากน้ำ หรือเกิดจากการแทนที่ไอออนที่ผิวของอนุภาค โดยไอออนจากภายนอกซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันแต่มีจำนวนประจุต่างกัน ประจุบนผิวอนุภาคเหล่านี้ จะดึงดูดไอออนต่างประจุ (counter-ion) ทำให้เกิดชั้นของไอออนต่างประจุล้อมรอบอนุภาค แต่เนื่องจากชั้นของไอออนต่างประจุนี้ ถูกควบคุมโดยการเคลื่อนไหวของโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้มีลักษณะเป็นชั้นกระจาย (diffuse layer) ที่มีความหนาแน่นของไอออนสูงในบริเวณใกล้ ๆ ผิวอนุภาค และลดลงที่ระยะห่างออกไป ภายในชั้นกระจายนี้จะมีชั้นของไอออนต่างประจุที่สามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาค เรียกว่า ชั้นถาวร (fixed layer หรือ Stern layer) และพื้นที่ผิวของชั้นถาวรนี้ เรียกว่า shear plane (ดูภาพ 3.1)

ชั้นของไอออนต่างประจุดังกล่าว ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคลดลงเมื่อวัดที่ระยะห่างจากผิว จนถึงบริเวณนอกสุดของชั้นกระจายจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ ทั้งนี้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของอนุภาค มีชื่อเรียกว่า Nernst potential และที่พื้นผิวของชั้นถาวรเรียกว่า Zeta potential หรือ Stern potential ซึ่งศักย์ไฟฟ้า Zeta potential นี้เองที่เป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งอนุภาคแสดงออกในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ในน้ำ

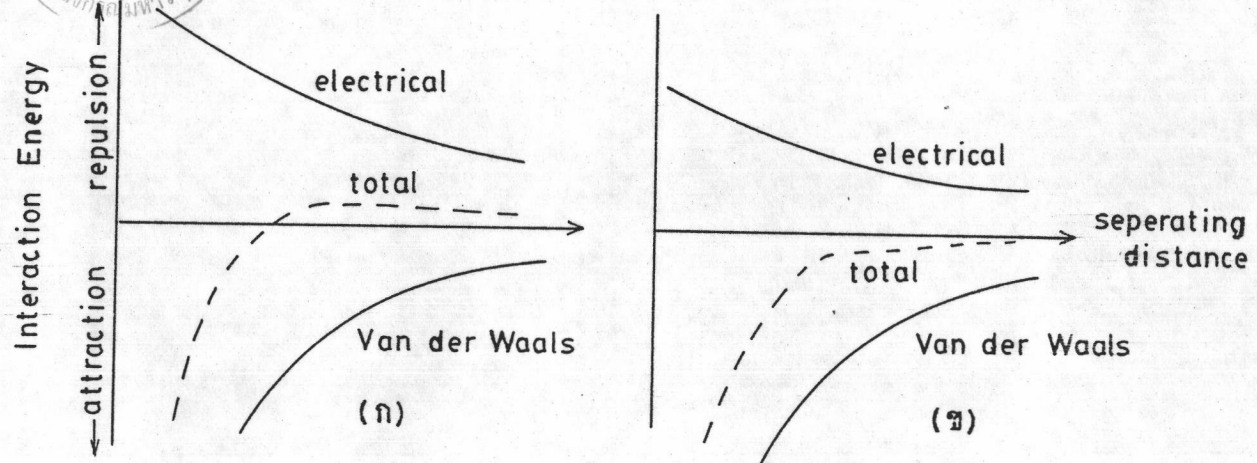
โดยทั่วไปอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำมักจะมีประจุชนิดเดียวกัน (ส่วนมากมักจะเป็นอนุภาคของดินซึ่งเป็นประจุลบ) ดังนั้นแรงกระทำซึ่งกันและกันระหว่างอนุภาค จึงมีทั้งแรงดึงดูด Van der Waals และแรงผลักรันกันของประจุชนิดเดียวกัน แต่เนื่องจากแรงดึงดูด Van der Waals จะมีอิทธิพลก็ต่อเมื่ออนุภาคเข้าใกล้กันมาก ๆ เพราะฉะนั้นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าสูง หรืออยู่ในน้ำซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนต่ำ ซึ่งมีชั้นกระจายหนานั้น จึงมีแรงผลักรันกันสูงพอที่จะป้องกันไม่ให้อนุภาคเข้าใกล้กันจน



(ก)

(ข)

ภาพ 3.1 ลักษณะการเกิดขึ้นของไอออนต่างประจุ และการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของอนุภาคเมื่อ (ก) ความเข้มข้นของไอออนในน้ำต่ำ (ข) ความเข้มข้นของไอออนในน้ำสูง



(ก)

(ข)

ภาพ 3.2 พลังงานที่อนุภาคกระทำต่อกัน ที่ระยะห่างกันต่างๆ เมื่อ (ก) อนุภาคมีประจุไฟฟ้าสูง (ข) อนุภาคมีประจุไฟฟ้าต่ำ

แรงดึงดูดที่มีอิทธิพล อนุภาคเหล่านี้จึงไม่เกาะกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นจนจมตัวได้ (6) (ภาพ 3.2)

ปรากฏการณ์ที่ทำให้อนุภาคเกิดเสถียรภาพที่กล่าวมา ในน้ำส่วนใหญ่ปรากฏการณ์หลังมีอิทธิพลสูงกว่า ดังนั้นการลดเสถียรภาพของอนุภาคด้วยกลไกโคแอกกูเลชัน จึงเน้นการลดอิทธิพลของปรากฏการณ์นี้เป็นสำคัญ

3.2 การลดเสถียรภาพของอนุภาค (6)

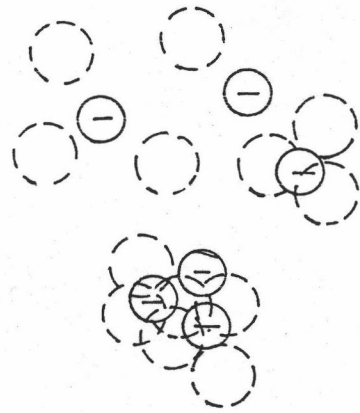
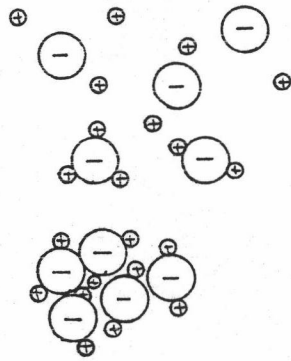
กลไกการลดเสถียรภาพของอนุภาคแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย โดยเพิ่มความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ ในน้ำ ซึ่งความหนาแน่นของไอออนต่างประจุในชั้นกระจายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ความหนาของชั้นกระจายลดลง อนุภาคจะสามารถเข้าใกล้กันได้มากขึ้น จนแรงดึงดูดสามารถทำให้อนุภาคเกาะกันได้ (ภาพ 3.1 ข)

2. การดูดซับและลดเสถียรภาพ (adsorption-destabilization) โดยการเติมสารเคมีบางชนิดที่สามารถแตกตัว หรือทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วได้ไอออนต่างประจุ ซึ่งสามารถดูดซับไปที่ผิวของอนุภาค ทำให้แรงผลักดันกันของอนุภาคลดลง จนอนุภาคสามารถสัมผัสกันและเกาะกันเป็นตะกอนได้ (ภาพ 3.3)

3. โคแอกกูเลชันแบบกวาด (sweep coagulation) เป็นการเติมสารเคมีให้เกิดตะกอน (precipitate) ที่มีลักษณะเหนียวเหนอะ (sticky) ซึ่งสามารถห่อหุ้มอนุภาค ทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวเหนอะและไม่สามารถแสดงอิทธิพลของประจุไฟฟ้า เมื่ออนุภาคสัมผัสกันจึงสามารถเกาะกันเป็นตะกอนใหญ่ นอกจากนี้ในกรณีของน้ำซึ่งมีจำนวนอนุภาคน้อย ๆ ตะกอนจากสารเคมีเหล่านี้ ยังสามารถทำหน้าที่เป็นเป้าสัมผัสกับอนุภาค ทำให้เกิดการเกาะกันเป็นตะกอนใหญ่ได้ (ภาพ 3.3)

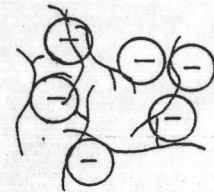
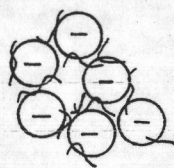
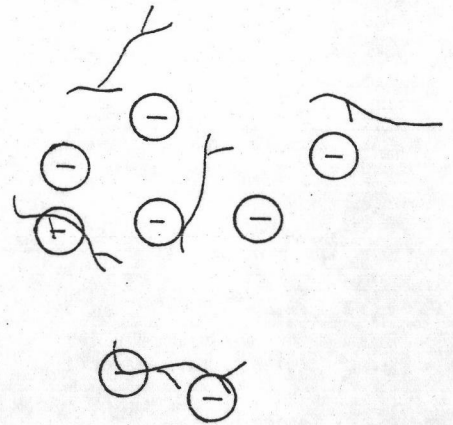
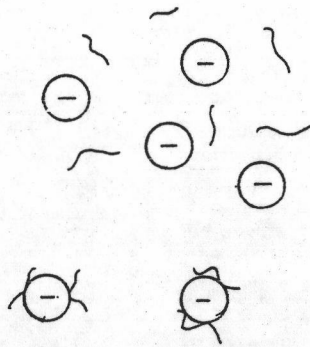
4. การเชื่อมต้อ (bridging) เป็นโคแอกกูเลชันโดยใช้โพลีเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีอนุภาคเชื่อมกันเป็นเส้นยาว อนุภาคที่ต่อกันอยู่นี้จะมีบางหมู่ที่แตกตัวได้ บนเส้นของโพลีเมอร์จะมีตำแหน่งที่สามารถยึดเกาะกับอนุภาคโดยกลไกต่าง ๆ กัน เช่น การดูดซับ (adsorption), การเชื่อมต้อแบบ hydrophobic bonding, hydrogen bonding เป็นต้น (8) จึงสามารถทำหน้าที่เชื่อมอนุภาคหรือตะกอนเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดตะกอนใหญ่ขึ้น (ภาพ 3.4)



กลไกการคุกคึกและลคเสถียรภาพ

กลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาค

ภาพ 3.3 ลักษณะการ เกิดโคแอกกูเลชัน โดยกลไกการคุกคึกและลคเสถียรภาพ และกลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาค



(ก)

(ข)

ภาพ 3.4 ลักษณะการ เกิดโคแอกกูเลชัน โดยกลไกการ เชื่อมค้อของโพลีเมอร์

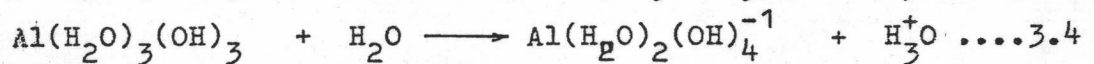
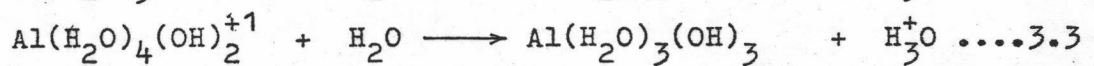
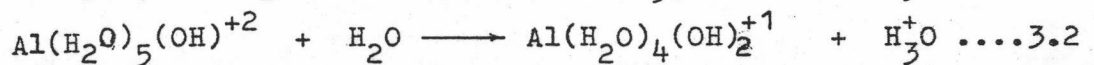
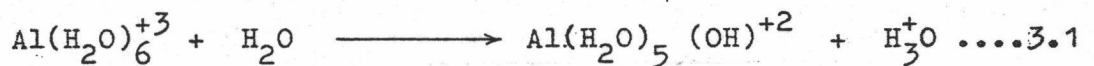
(ก) โพลีเมอร์มีน้ำหนักรโมเลกุลต่ำ แต่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค

(ข) โพลีเมอร์มีน้ำหนักรโมเลกุลสูง

3.3 การโคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

3.3.1 บทบาทของสารส้มในน้ำ

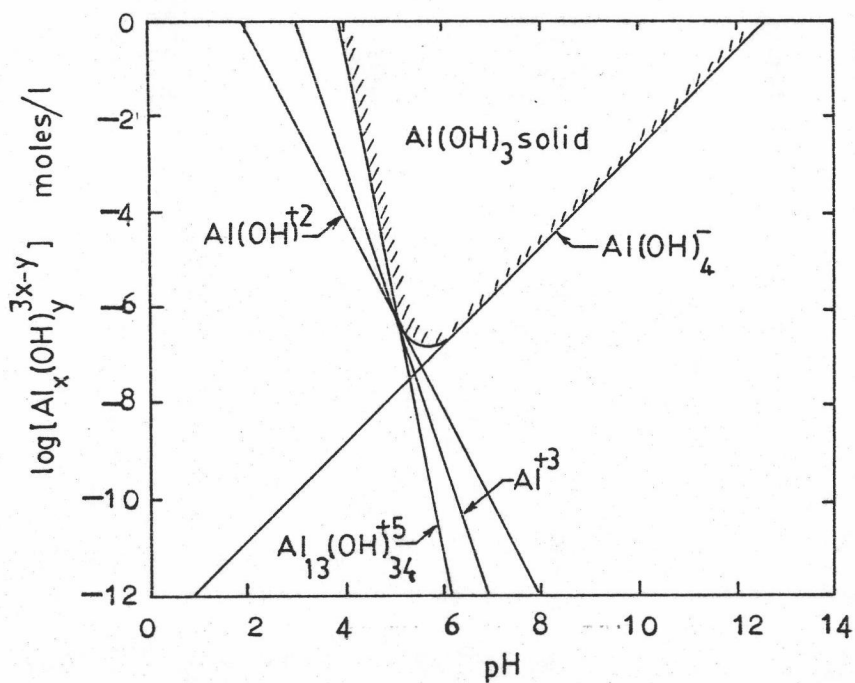
เมื่อเติมสารส้มลงในน้ำ สารส้มจะแตกตัวเป็นไอออนชนิดประจุบวกและลบ ไอออนลบจะอยู่เป็นอิสระ ส่วนไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้มีโมเลกุลของน้ำ 6 ตัว เกาะอยู่โดยรอบไอออนบวก ซึ่งเขียนสูตรเคมีได้เป็น $Al(H_2O)_6^{+3}$ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า aquometal ion ไอออนนี้มีคุณสมบัติเป็นกรด ถึงแม้มันจึงไม่คงรูป แต่จะจ่ายโปรตอน (H^+) ให้กับน้ำในทันที ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิด monomeric hydroxo complex ต่าง ๆ (9) ดังสมการ 3.1 - 3.4



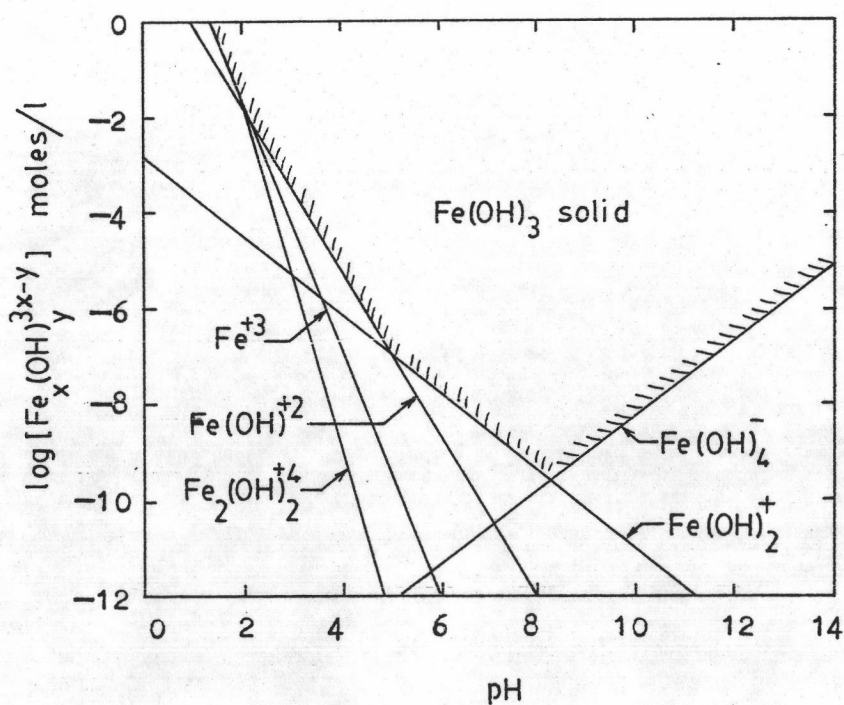
ตามความหมายของสมการ 3.1 - 3.4 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอลูมิเนียม $[Al]$ และพีเอช และสามารถคำนวณได้จากสมมูลของปฏิกิริยา (เมื่อรู้ค่าคงที่ของสมมูล รายละเอียดการคำนวณดูตัวอย่างได้ในเอกสารอ้างอิงหมายเลข 6) ซึ่งก็มีนักวิจัยหลายท่านได้แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ ดังตัวอย่างในภาพ 3.5 (6)

ในภาพที่ 3.5 ขอบเขตของพื้นที่ที่เป็นตะกอน $Al(OH)_3$ จะแสดงความเข้มข้นสูงสุดของอลูมิเนียมที่จะละลายได้ที่พีเอชต่าง ๆ อลูมิเนียมส่วนที่เกินกว่าขอบเขตนี้จะตกตะกอนเป็น $Al(OH)_3$ กราฟเส้นตรงของสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ แสดงความเข้มข้นสูงสุดที่จะมีได้ของสารประกอบเชิงซ้อนนั้น ๆ ที่พีเอชต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าหรือเท่ากับจุดอิ่มตัวที่พีเอชนั้น ๆ ถ้าความเข้มข้นของอลูมิเนียมต่ำกว่าจุดอิ่มตัว สารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ จะเกิดขึ้นน้อยกว่าค่าที่กราฟแสดง

อย่างไรก็ตาม สารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งนิยมเขียนสูตรเคมีโดยย่อเป็น $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{+1}$, $Al(OH)_3$, $Al(OH)_4^{-1}$ ยังมีรูปอื่น ๆ ซึ่งมีอัตราส่วนของอลูมิเนียมต่อไฮดรอกไซด์แตกต่างกันออกไปอีกและสามารถทำปฏิกิริยา polymerization กัน เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีอลูมิเนียมมากกว่าหนึ่งได้ เช่น $Al_6(OH)_{15}^{+3}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$, $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ ซึ่งเรียกว่า polymeric hydroxo complex นอกจากนี้ ไอออนลบต่าง ๆ ในน้ำ เช่น SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , Cl^{-1} ก็สามารถแทนที่โมเลกุลของน้ำในสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ทำให้สารประกอบเชิงซ้อนเปลี่ยนรูปและ



ภาพ 3.5 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียม ในภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ



ภาพ 3.6 ความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ในภาวะสมดุล ที่พีเอชต่างๆ

คุณสมบัติโมยิกควาย (9) ดังนั้นการใช้สมการสมมูลย์คำนวณหาความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนรูปต่าง ๆ ที่พีเอชและความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์ต่าง ๆ ในน้ำทามธรรมชาติ ให้อุณหภูมิแน่นอนจึงเป็นเรื่องยาก ผลการคำนวณและวิจัยที่แสดงผลดังกล่าว จึงเพียงแค่อ้างอิงให้เห็นถึงแนวโน้มของความเข้มข้นที่จะมากหรือน้อย ของสารประกอบเชิงซ้อนบางรูป เช่น $Al(OH)_2^+$, $Al_6(OH)^{+3}_{15}$, $Al_8(OH)^{+4}_{20}$ ฯลฯ ซึ่งเชื่อว่ามีอิทธิพลมากที่สุด ในกลไกโคแอกกูแลชั่น เท่านั้น

3.3.2 กลไกโคแอกกูแลชั่นของสารส้ม

สารส้มทำให้เกิดโคแอกกูแลชั่น โดยกลไก 3 ชนิด คือ

1. กลไกการคูกคิกและลดเสถียรภาพ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารส้ม ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ (ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 3.3.1) ซึ่งสามารถคูกคิกไปบนผิวของอนุภาค เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนเป็นชนิดประจุบวก ก็จะลดประจุลบของอนุภาคลง ซึ่งก็จะลดเสถียรภาพของอนุภาคลงด้วย จนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคที่สัมผัสกันจะสามารถเกาะกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นจนจมตัวหรือกรองออกได้ (รูปภาพ 3.3)

ในกลไกโคแอกกูแลชั่นชนิดนี้ มักจะพบว่าโคแอกกูแลชั่นเกิดได้ดี โดยไม่จำเป็นต้องลดประจุลบของอนุภาคลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งเชื่อกันว่าสาเหตุเพราะสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมต่าง ๆ มีลักษณะเหนียวเหนอะ (10) เมื่อคูกคิกไปบนผิวอนุภาค จึงทำหน้าที่เพิ่มอัตราส่วนในการเกาะกัน (sticking ratio) (11) ของอนุภาคด้วย อนุภาคที่ยังมีประจุลบอยู่บ้าง จึงสามารถเกาะกันได้ดีที่ตะกอนที่เกิดจากกลไกโคแอกกูแลชั่นชนิดนี้ จะมีความหนาแน่นสูง และแยกน้ำ (dewatering) ออกได้ง่าย ซึ่งจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน แต่การควบคุมระบบให้ทำงานได้คืบหน้ายากมาก เพราะกลไกชนิดนี้จะให้ผลในช่วงแคบ ๆ (6) ซึ่งมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่พอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนต่ำเกินไป โคแอกกูแลชั่นจะไม่เกิด แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไป สารประกอบเชิงซ้อนจะคูกคิกไปที่ผิวของอนุภาคมาก จนทำให้อนุภาคเป็นประจุบวก ซึ่งก็จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพ (restabilization) เนื่องจากประจุบวกนั้น ขึ้นมาอีก

2. กลไกโคแอกกูแลชั่นแบบกวาด ตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเกิดจากการเติมสารส้มจนความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าจุดอิ่มตัว สามารถห่อหุ้มอนุภาคทำให้ผิวของอนุภาคมีความเหนียวเหนอะ และไม่แสดงอิทธิพลของประจุไฟฟ้า เมื่อกวาดให้อนุภาคสัมผัสกัน ก็จะเกาะติดกันเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น สำหรับน้ำที่มีอนุภาคน้อย ๆ ซึ่งโอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสกันก็น้อยด้วยนั้น การเติมสารส้มให้เกิด

ตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น จะได้ตะกอนที่ยังอยู่เป็นอิสระ ทำหน้าที่เป็นเป้าสัมผัสกับอนุภาค และกับตะกอนด้วยกัน ทำให้เกิดตะกอนใหญ่ได้เร็วขึ้น และสามารถกำจัดอนุภาคส่วนใหญ่ออกได้เช่นเดียวกัน (รูปภาพ 3.4)

ขบวนการโคแอกกูเลชัน ที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ส่วนใหญ่ใช้กลไกแบบกวาดนี้ เพราะเกิดผลดีได้ในช่วงกว้าง (รูปภาพ 3.7) จึงควบคุมง่าย แต่ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นต่ำ และแยกน้ำออกยากกว่ากลไกแรกมาก

3. กลไกโคแอกกูเลชันแบบรวม (combination) ในกลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาด ซึ่งเป็นการทำงานของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นั้น ไม่ได้หมายความว่า ในน้ำที่เกิดโคแอกกูเลชันจะไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ หรือสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ไม่ได้ทำงาน เพียงแต่ในภาวะนั้น ๆ สารประกอบเชิงซ้อนสร้างกลไกการกูดิกและลดเสถียรภาพได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับการทำงานของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ทั้งนี้ในบางภาวะเมื่อโคแอกกูเลชันมีกลไกทั้ง 2 ชนิดประกอบกันโดยที่ไม่มีกลไกชนิดหนึ่งชนิดใดมีอิทธิพลสูงกว่ากลไกอีกชนิดหนึ่งจนกลไกชนิดหนึ่งไม่มีนัยสำคัญแล้ว จึงจัดว่าเป็นกลไกโคแอกกูเลชันแบบรวม

3.3.3 อิทธิพลที่มีต่อกลไกโคแอกกูเลชันของสารส้ม

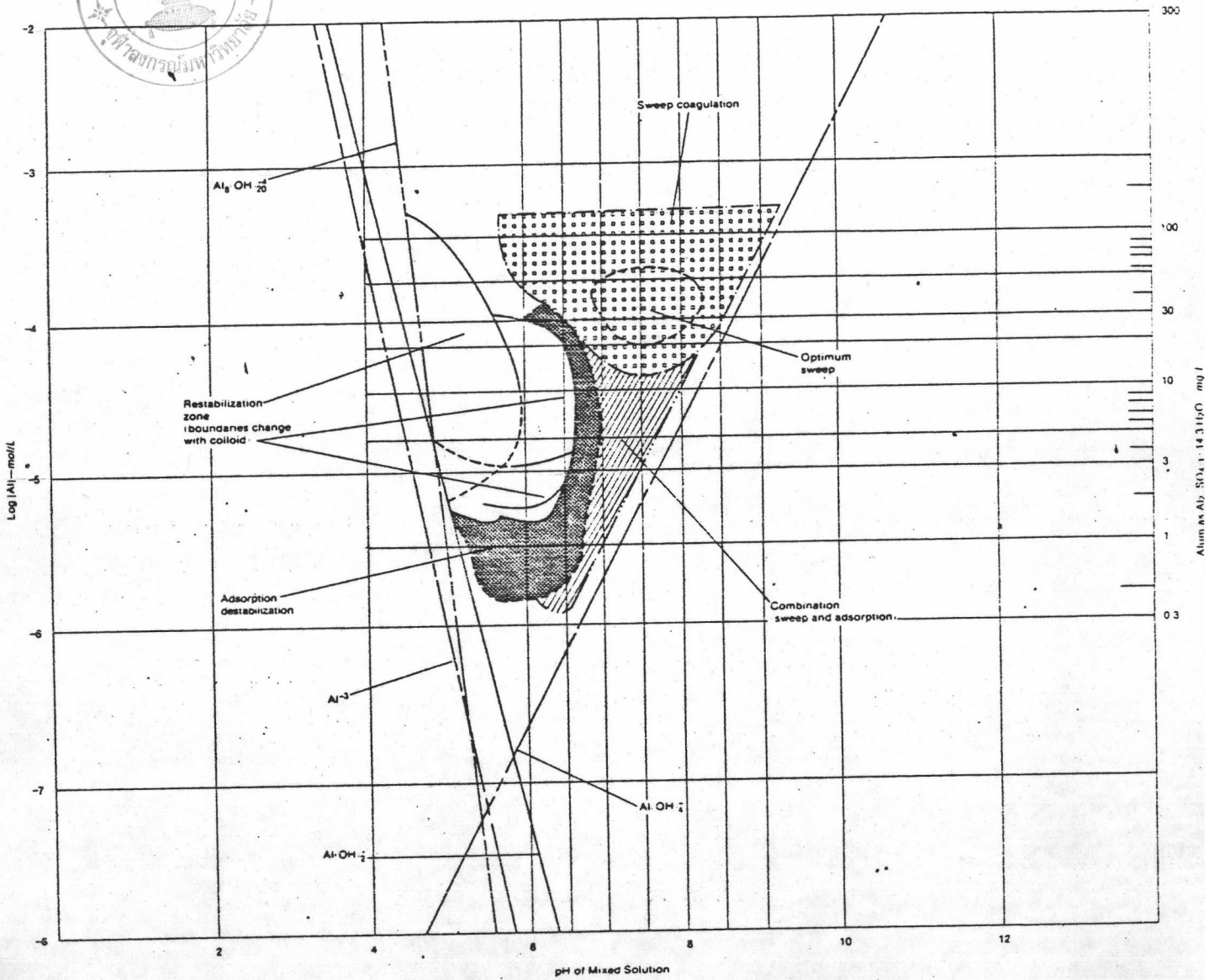
1. อิทธิพลของความเข้มข้นและพีเอช

ความเข้มข้นของสารส้มและพีเอช มีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนรูปต่าง ๆ (ดังกล่าวมาในหัวข้อ 3.3) จึงมีอิทธิพลโดยตรงต่อกลไกโคแอกกูเลชัน ซึ่งสามารถพิจารณาเป็นช่วง ๆ ได้ดังนี้ (12) (รูปภาพ 3.7)

ก. ในช่วงพีเอชค่า ๆ เช่น ค่ากว่า 5 อลูมิเนียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไอออนประจุบวก Al^{+3} ซึ่งไม่สามารถลดเสถียรภาพของอนุภาคได้ (เมื่อใช้สารส้มในปริมาณปกติ) เพราะ Al^{+3} ไม่สามารถกูดิกไบโวมินของอนุภาค (6) ซึ่งอาจเนื่องจากการกีดกันของโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบอยู่ โคแอกกูเลชันจึงไม่เกิดในช่วงนี้

ข. ในช่วงพีเอชที่สูงขึ้น เช่น 5 - 7 จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดประจุบวกขึ้นมาก ทำให้เกิดโคแอกกูเลชันด้วยกลไกการกูดิกและลดเสถียรภาพได้ดี แต่ถ้าหากเติมสารส้มมากเกินไป สารประกอบเชิงซ้อนจะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพขึ้นมาอีก

ค. ในช่วงพีเอช ซึ่งเกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดประจุบวกลดลง เช่น 7 - 8 การสร้างกลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาดของตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จะมีนัยสำคัญ จึงเป็นช่วงที่จัดว่าเกิดกลไกโคแอกกูเลชันแบบรวม



ภาพ 3.7 แสดงกลไกต่างๆของโคแอกกูเลชัน

007861

i 17913150

ง. ในช่วง ข. และ ค. ถ้าหากเพิ่มปริมาณสารส้มให้สูงขึ้น กลไกโคแอกกูเลชันจะเป็นแบบกวาด เพราะเกิดตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากจนกลไกการกุกคิกและลดเสถียรภาพ ไม่มีนัยสำคัญ

จ. ในช่วงพีเอชที่เป็นค่ามาก ๆ เช่นสูงกว่า 9 อลูมิเนียมส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดประจุลบ จึงไม่มีโคแอกกูเลชันเกิดขึ้น

2. อิทธิพลของไอออนต่าง ๆ

ความเข้มข้นและชนิดของไอออนต่าง ๆ ที่ปะปนอยู่ในน้ำมีอิทธิพลต่อกลไกและผลของโคแอกกูเลชันของน้ำนั้น ๆ โดยแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

ก. อิทธิพลต่ออนุภาค ในน้ำซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนต่าง ๆ สูง จะมีไอออนกุกคิกไปที่ผิวของอนุภาคและอยู่ในชั้นกระจายมากด้วย ทำให้ชั้นกระจายที่ล้อมรอบอนุภาคมีรัศมีแคบ (ดูภาพ 3.1, 3.2) ซึ่งมีผลทำให้ลดเสถียรภาพของอนุภาคได้ง่าย

ข. อิทธิพลต่อกลไกโคแอกกูเลชัน ไอออนประจุลบบางชนิด สามารถแทนที่โมเลกุลของน้ำหรือหมู่ไฮดรอกไซด์ในสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมได้ (9) ทำให้คุณสมบัติของสารประกอบเชิงซ้อนเปลี่ยนไป จึงมีผลกระทบต่อกลไกโคแอกกูเลชันโดยตรง เช่น อนุบลซิลเฟต อาจทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่เรียกว่า sulfato complex ซึ่งมีผลให้ประจุบวกของสารประกอบเชิงซ้อนลดลง โอกาสที่อนุภาคจะกลับมีเสถียรภาพเนื่องจากมีสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกมากเกินไป ก็ลดลงด้วย (13)

ค. อิทธิพลต่อพีเอชของโคแอกกูเลชัน ไอออนประจุลบที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอลูมิเนียม มีผลแก่นักพีเอชของการเกิดตะกอนของอลูมิเนียม จึงมีอิทธิพลต่อโคแอกกูเลชัน กล่าวคือ เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นเป็นชนิดละลายน้ำไม่ได้ พีเอชที่เหมาะสมของโคแอกกูเลชันจะสูงขึ้น เพราะจะใช้หมู่ไฮดรอกไซด์ในน้ำไปสร้างตะกอนน้อยลง แต่ในกรณีที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนชนิดที่ละลายน้ำได้ จะต้องใช้หมู่ไฮดรอกไซด์ไปทำให้เกิดตะกอนมากขึ้น พีเอชที่เหมาะสมของโคแอกกูเลชันจึงต่ำลง (7,9)

3. อิทธิพลของการกวนผสม ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารส้ม ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกต่าง ๆ เกิดขึ้นในระยะเวลาที่สั้นมาก คือประมาณ 10^{-4} - 1 วินาที เมื่อพ้นระยะเวลานี้ไปแล้ว อลูมิเนียมส่วนที่เกินกว่าค่าอิ่มตัวที่พีเอชนั้น ๆ จะตกตะกอนเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ คั่งนั้น

ในขบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้กลไกการคุกคิกและลคเสถียรภาพ ซึ่งอาศัยสารประกอบเชิงซ้อนประจุบวกต่าง ๆ นั้น จำเป็นจะค้ยงกวนผสมให้สารส้มกระจายไปในน้ำอย่างทั่วถึงในทันทีที่เติม (14) มิฉะนั้นแล้ว อนุภาคส่วนใหญ่จะไม่ถูกลคเสถียรภาพ เพราะสารประกอบเชิงซ้อนส่วนที่ไม่ได้พบกับอนุภาคในทันทีจะเปลี่ยนรูปเป็นตะกอน ผลของโคแอกกูเลชันจะไม่ค้เท่าที่ควร (12) สำหรับในโคแอกกูเลชันแบบเวาค ซึ่งถึงแม้ว่าอิทธิพลของการกวนผสมจะไม่วิกฤตเหมือนกลไกการคุกคิกและลคเสถียรภาพ ก็ยังมีงานวิจัยที่แสดงว่า ตะกอนฟล็อกของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์จะจับอนุภาคได้ค้ นั้น อนุภาคจะต้องมีสารประกอบของอลูมิเนียมห่อหุ้มอยู่บ้างแล้ว (15) ค้งนั้นหากไม่มีการกวนผสมที่ค้ ทำให้ตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เริ่มจับตัวเป็นฟล็อก โดยที่ยังมีอนุภาคที่เป็นอิสระอยู่มาก ๆ โคแอกกูเลชันจะไม่ค้ผลค้เท่าที่ควร

ตัวแปรที่ใช้บอกระค้บการกวนผสมในขบวนการโคแอกกูเลชัน ค้ ค้ค่าความบ้บ่วนที่เรียกว่า velocity gradient ซึ่งค้คำนวณได้จากกำลังงานที่ใช้กวนค้หน่วยปริมาตรของน้ำ โดยสมการของแคมท์และสโตน ค้ดังนี้

$$G = \left(\frac{P}{uV} \right)^{1/2} \dots\dots\dots 3.5$$

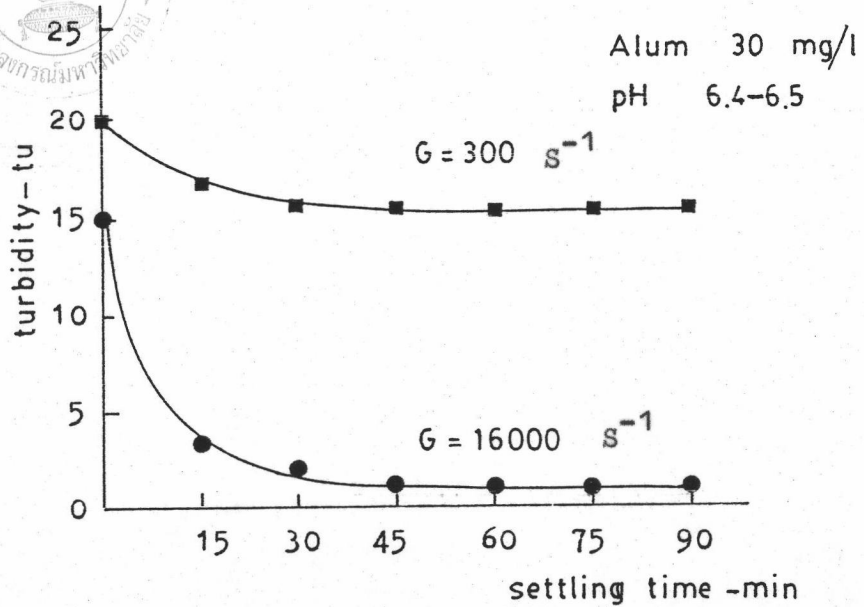
- เมื่อ G ค้ velocity gradient , วินาที⁻¹
- P ค้ กำลังงานที่ใช้สำหรับกวนผสม , นิวตัน - เมตร/วินาที
- u ค้ ความหนืดของน้ำ , นิวตัน - วินาที/เมตร²
- V ค้ ปริมาตรของน้ำในถังกวนผสม , ลบ. เมตร

การเปลี่ยนแปลงค่าความบ้บ่วนในขบวนการโคแอกกูเลชัน จะเห็นความแตกต่างของผลโคแอกกูเลชันค้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อกลไกเป็นแบบคุกคิกและลคเสถียรภาพ (รูปภาพ 3.8)

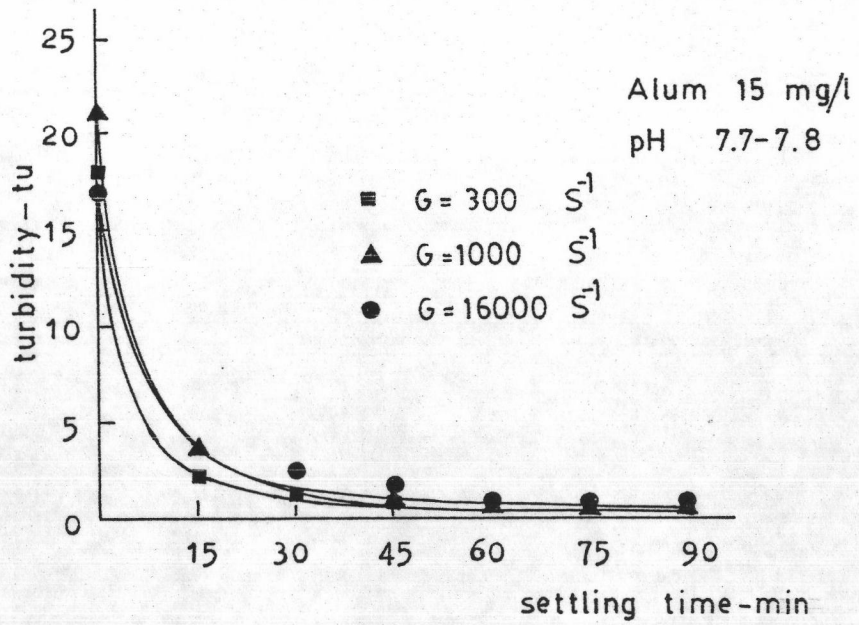
3.4 การโคแอกกูเลชันด้วยสารประกอบเหล็ก

บทบาทของสารประกอบเหล็กคล้ายค้กับของสารส้ม แต่ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเหล็กเกิดค้ได้น้อยกว่าอลูมิเนียม ทั้ง ๆ ที่ ไอออนประจุบวกของเหล็ก Fe(H₂O)⁺³ มีคุณสมบัติเป็นกรด (มีแนวโน้มที่จะจ่ายโปรตอนให้แก่โมเลกุลของน้ำ) มากกว่าไอออนประจุบวกของอลูมิเนียม (9) ทั้งนี้อาจเนื่องจากไฮดรอกไซด์ของเหล็กละลายน้ำค้ได้น้อยกว่าไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียม (รูปภาพ 3.5, 3.6)

ปฏิกิริยาการเกิดโคแอกกูเลชันของสารประกอบเหล็กต่าง ๆ ที่จะแสดงในที่นี้จะเป็นปฏิกิริยาการเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์อย่างย่อ ๆ เพื่อแสดงให้เห็นถึงการใช้ความเป็นค้่าง (alkalinity) และสารช่วยอื่น ๆ เท่านั้น



(ก)



(ข)

ภาพ 3.8 อิทธิพลของค่าความปั่นป่วน Velocity gradient ที่มีต่อผลของโคแอกกูเลชันที่ใช้ (ก) กลไกการกู่คึกและลดเสถียรภาพ (ข) กลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาก (คัดจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 12)

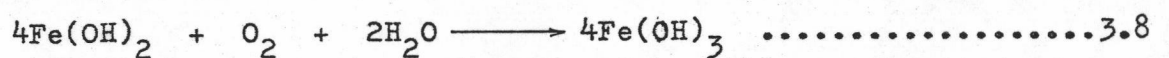
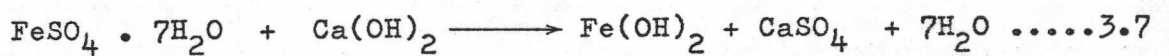
ก. การใช้เพอร์ริทคลอไรด์

เพอร์ริทคลอไรด์จะทำปฏิกิริยากับความเป็นค่างในน้ำ ทำให้เกิดตะกอนเพอร์ริทไฮดรอกไซด์
 ดังนี้
$$2 \text{FeCl}_3 + 3 \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \longrightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{CaCl}_2 + 6\text{CO}_2 \dots\dots 3.6$$

 การใช้เพอร์ริทคลอไรด์ 1 มก./ล. จะทำลายความเป็นค่าง (เทียบกับหินปูน) ไป 0.92
 มก./ล. ซึ่งมากกว่าเมื่อใช้สารส้ม แต่ผลลัพท์ที่เกิดขึ้นจะมีความหนาแน่นสูง และจมตัวได้เร็วกว่าผลลัพท์
 จากสารส้ม

ข. การใช้เพอร์ริทซัลเฟต

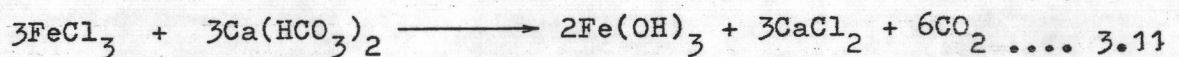
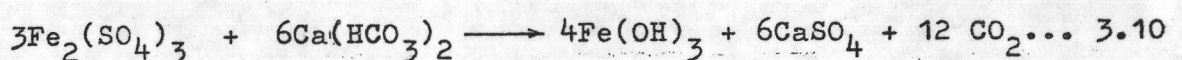
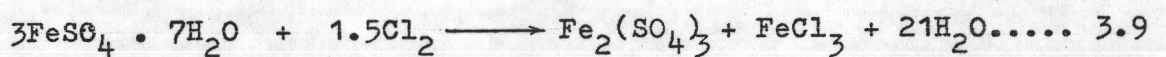
เนื่องจากเพอร์ริทคลอไรด์มีราคาแพง จึงอาจหลีกเลี่ยงโดยใช้เพอร์ริทซัลเฟต (หรือเรียกว่า
 copperas) แทนได้ แต่ในน้ำต้องมีออกซิเจนละลายอยู่อย่างเพียงพอ และถ้าความเป็นค่างตามธรรมชาติ
 ค่าเกินไค้จำเป็นต้องเติมปูนขาวด้วย ดังแสดงในสมการ 3.7, 3.8



ในกรณีที่ต้องเติมปูนขาว จะต้องควบคุมปริมาณปูนขาวอย่างถูกต้อง เพราะถ้าเติมปูนขาวมาก
 เกินไปปูนขาวส่วนที่เหลืออาจทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตในน้ำ ทำให้เกิดตะกอนของหินปูนในระบบ
 ให้น้ำได้

ค. การใช้เพอร์ริทซัลเฟตร่วมกับคลอรีน

ปฏิกิริยาระหว่างเพอร์ริทซัลเฟตกับคลอรีน ทำให้เกิดเพอร์ริทคลอไรด์ และเพอร์ริทซัลเฟต
 ซึ่งทำปฏิกิริยากับค่างเกิดตะกอนเพอร์ริทไฮดรอกไซด์ ดังนี้



การใช้เพอร์ริทซัลเฟตร่วมกับคลอรีน ทำให้โคแอกกูเลชันสามารถเกิดในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า
 การใช้สารประภคยเหล็กตัวใดตัวหนึ่งโดยลำพัง

3.5 การโคแอกกูเลชันด้วยสารโพลิเมอร์ (8, 16)

โพลิเมอร์เป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประภคยด้วยอนุภาค (ซึ่งเรียก

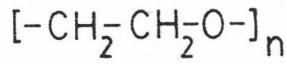
ว่า monomer) ต่อกันเป็นเส้นยาว โดยอาจเป็นเส้นตรง ๆ หรือมีการแตกแขนงก็ได้ อนุมูลของโพลิเมอร์บางชนิดจะมีหมู่ที่แตกตัวได้ (ionizable group) ซึ่งจะทำให้โพลิเมอร์มีประจุ เราเรียกโพลิเมอร์ชนิดนี้ว่า โพลีอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) ซึ่งจะมีทั้งชนิดที่เป็นประจุบวก, ประจุลบ และเป็นกลาง (รูปภาพ 3.9)

โพลิเมอร์สร้างโคแอกกูเลชัน ด้วยกลไกหลัก 2 อัน กลไกแรกเป็นการคุกคิกและลดเสถียรภาพ แบบเกี่ยวกับการทำงานของสารประอบเชิงซ้อนจากสารส้ม โพลิเมอร์ที่ใช้สำหรับกลไกชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ต้องมีประจุตรงข้ามกับอนุภาค กลไกที่สองเป็นกลไกการเชื่อมต้อ (รูปภาพ 3.4) ซึ่งประจุของโพลิเมอร์ไม่ใช่สิ่งสำคัญ แต่โพลิเมอร์ที่ใช้ควรจะมีโครงสร้างเป็นเส้นยาว และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ เพื่อให้โพลิเมอร์สามารถเชื่อมต้ออนุภาคหรือตะกอนได้ในรัศมีกว้าง และทำให้การเชื่อมต้อแข็งแรงพอที่จะต้านทานความปั่นป่วนของน้ำซึ่งเกิดจากการกวนได้

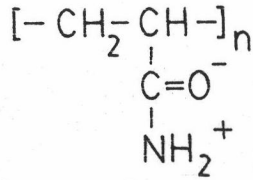
การสร้างกลไกโคแอกกูเลชันของโพลิเมอร์ ไม่ได้ทำให้เข้าสัมผัสในน้ำเพิ่มขึ้น เช่น โคแอกกูแลนต์สามัญอื่น ๆ ประกอบกับโพลิเมอร์มีราคาแพงกว่า ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักจะไม่ใช้โพลิเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์โดยลำพัง แต่จะใช้เป็นเพียงสารช่วยหรือสนับสนุนการสร้างโคแอกกูเลชัน ของโคแอกกูแลนต์สามัญ (เช่น สารส้ม) เท่านั้น

3.6 ทฤษฎีของการโคเตรคคอลลอยด์

เนื่องจากคอลลอยด์ที่มีประจุต่างกัน สามารถทำปฏิกิริยากันในลักษณะที่เป็นสคอยซิโอเมตริก (9) ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาระหว่าง แทนเนต (tannate) กับเจลาติน (gelatin) และ ลิกนิน (lignin) กับอะโรเมติก อะมีน (aromatic amine) เป็นต้น จึงมีนักวิจัยนำสารสังเคราะห์ ซึ่งมีคุณสมบัติกึ่งกล่าว มาใช้หาประจุของอนุภาคต่าง ๆ ในน้ำด้วยวิธีโคเตรค (4, 5, 17, 18, 19) สารสังเคราะห์กลุ่มแรกคือ เอ็มจี ซี (methyl glycol chitosan-MGC) และ กิติพีเอ็ม (1, 5 - dimethyl - 1,5 - diazaundecamethylenepoly methobromide-DDPM) ซึ่งละลายน้ำแล้วเกิดอนุภาคประจุบวก กลุ่มที่สองคือ พีวีแอลเค (potassium polyviny alcohol sulfate-PVSK) และ พีวีเอสเอเค Poly(vinylsulfuric acid) potassium ซึ่งละลายน้ำแล้วเกิดอนุภาคประจุลบ ในการโคเตรคหาประจุของอนุภาคจะใช้ ทึบ (toluidine blue-TB) เป็นดัชนี (indicator) ทึบเป็นสารสังเคราะห์ซึ่งมีสีน้ำเงิน เมื่ออยู่ในน้ำที่มีอนุภาคชนิดประจุบวก . จะไม่เกิดปฏิกิริยากับอนุภาคจึงยังคงมีสีน้ำเงินอยู่ (5) แต่เมื่ออยู่ในน้ำที่มีอนุภาคชนิดประจุลบ ทึบจะคุกคิกไปที่ผิวอนุภาค แล้วเปลี่ยนเป็นสีม่วง (5)

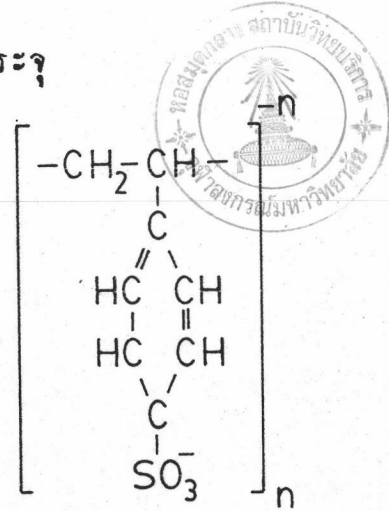
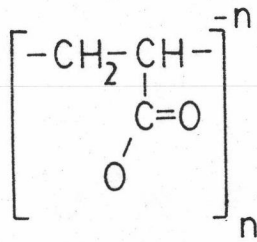


Polyethylene oxide



Polyacrylamide (PAM)

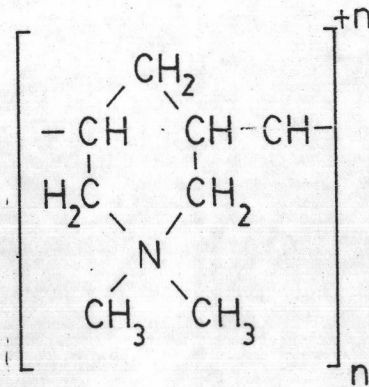
(ก) โพลีเมอร์ชนิดไม่มีประจุ



Polyacrylic acid (PAA)

Polystyrene sulfonate (PSS)

(ข) โพลีเมอร์ชนิดประจุลบ



Polydiallyldimethylammonium (PDADMA)

(ค) โพลีเมอร์ชนิดประจุบวก

ภาพ 3.9 ตัวอย่างสูตรโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่มีประจุต่างกัน

การไทเทรตแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือการไทเทรตย้อนกลับ (back titration) (4, 5) และการไทเทรตโดยตรง (direct titration) (17, 18) การไทเทรตย้อนกลับจะใช้วิธีเคมสารสังเคราะห์ชนิดบรจุบวกลงในตัวอย่างน้ำ แล้วหาบรจุที่เหลือ (ในกรณีที่มีอนุภาคในตัวอย่างน้ำมีบรจุลบ) หรือบรจุทั้งหมด (ในกรณีที่มีอนุภาคในตัวอย่างน้ำมีบรจุบวก) โดยไทเทรตด้วยสารสังเคราะห์ชนิดบรจุลบ ในกรณีนี้จุดสิ้นสุด (end point) คือจุดที่ ฟีมี เปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงเสมอ สำหรับวิธีไทเทรตโดยตรงนั้น จะหยด ฟีมี ลงในตัวอย่างน้ำก่อนเพื่อรู้ว่าเป็นบรจุชนิดใด แล้วจึงไทเทรตด้วยสารสังเคราะห์ที่มีบรจุตรงข้าม ในกรณีนี้ จุดสิ้นสุดจะตรงข้ามกันเมื่ออนุภาคมีบรจุตรงข้ามกัน

3.7 การวิจัยของเทคนิคการไทเทรตคอลลอยก์ในอภิก

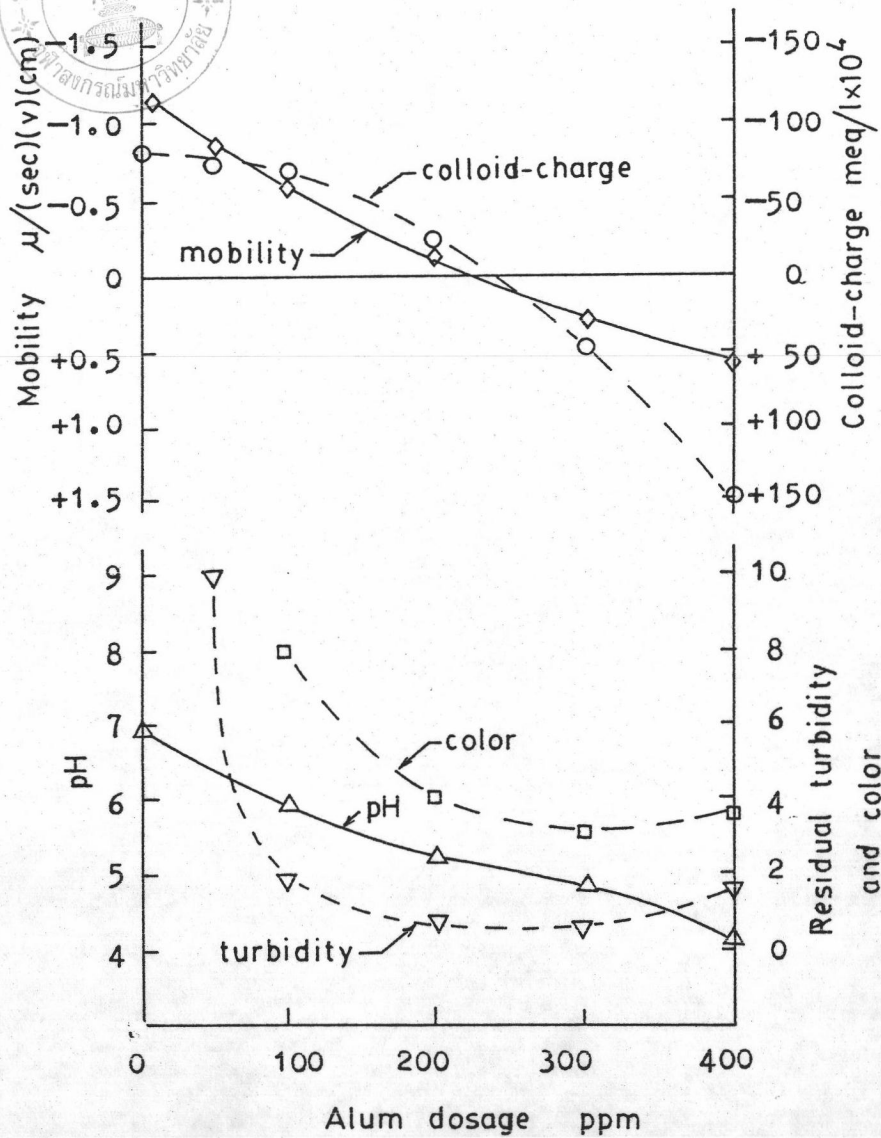
KAWAMURA และผู้ร่วมวิจัย (4,5) เป็นนักวิจัยกลุ่มแรกที่นำเทคนิคการไทเทรตคอลลอยก์มาใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชัน โดยทดลองกับน้ำธรรมชาติและน้ำสังเคราะห์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับการวัดศักย์ไฟฟ้า Zeta potential แล้วสรุปว่าเทคนิคการไทเทรตคอลลอยก์สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอนุภาคในขบวนการโคแอกกูเลชัน ได้ดีเช่นเดียวกับการวัดศักย์ไฟฟ้า (ดูภาพ 3.10) และยังมีข้อดีกว่าคือ การไทเทรตคอลลอยก์สามารถครอบคลุมอนุภาคได้ทุก ๆ ขนาดแม้แตขนาดซึ่งเครื่อง Zeta meter วัดศักย์ไฟฟ้าไม่ได้ และยังสามารถนำบรจุที่วัดได้ไปใช้คำนวณหาปริมาณสารลัมที่เหมาะสมได้ โดยมีความสัมพันธ์กับความเป็นค่าง ดังสมการ 3.12

$$P = K_1 (A) + K_2 (C)^n \dots\dots\dots 3.12$$

- เมื่อ P คือ ปริมาณสารลัมที่เหมาะสม
- A คือ ความเป็นค่าง (alkalinity)
- C คือ บรจุคอลลอยก์ของอนุภาค
- K_1, K_2, n คือ ค่าคงที่

WANG และผู้ร่วมวิจัย (17,18) ได้ใช้เทคนิคการไทเทรตคอลลอยก์วัดหาความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ แล้วสรุปว่าบรจุไฟฟ้าและความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันแบบสโตยชิโอเมตริก การไทเทรตคอลลอยก์จึงสามารถใช้ตรวจสอบความเข้มข้นของโพลีเมอร์ต่าง ๆ ได้อย่างดี

VERMA และ CHAUDHURI (19) ทำการวิจัยตามแบบของ KAWAMURA แล้วได้ผลวิจัยแบบเดียวกัน แต่ให้ความเห็นว่า ค่าคงที่ K_2 และ n ในสมการ 3.12 ขึ้นอยู่กับความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange capacity) ของอนุภาค



ภาพ 3.10 การตรวจสอบขบวนการโคแอกกูเลชัน ด้วยการใช้ศักย์ไฟฟ้าและการไตเตรต
 คอลลอยด์
 (คัดจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 5)