

บทที่ 3

บททวนเอกสาร

3.1 ทฤษฎีของการตกตะกอน

ทฤษฎีของการตกตะกอนประกอบด้วยทฤษฎีของกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) หรือกระบวนการสร้างตะกอน และทฤษฎีของกระบวนการฟล็อกคูเลชัน (flocculation) หรือกระบวนการรวมตะกอน

3.1.1 ทฤษฎีกระบวนการโคแอกกูเลชัน

การกระจายสารโคแอกกูแลนต์ในน้ำให้ทั่วถึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ กลไกทางเคมีที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นตอนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพีเอช ชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนต์ ตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ (มันลีน ตัณฑุลเวศม์, 2526) ปัจจัยดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันอย่างแนบแน่นในกลไกทำลายสภาวะเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้น

การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ อาศัยกลไกต่าง ๆ ดังนี้ คือ

3.1.1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย

กลไกนี้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มจำนวนไอออนที่มีประจุตรงข้าม (ในที่นี้คือ ไอออนของอลูมิเนียม ซึ่งมีประจุบวก) กับประจุไฟฟ้าของอนุภาค (มักมีประจุลบ) ทำให้ไอออนประจุบวกที่กระจายอยู่รอบๆ อนุภาคไปออกอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคมากขึ้น ชั้นไอออนที่กระจาย

อยู่รอบอนุภาคจึงมีความหนาลดลง อำนาจประจุลบของอนุภาคซึ่งเป็นต้นเหตุของแรงผลักระหว่างอนุภาคจึงลดลงด้วย

กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย มักเกิดได้ดีกับไอออนที่มีประจุมาก เช่น $Al(H_2O)_6^{3+}$ และ polymeric hydroxo complex ต่าง ๆ เนื่องจากไอออนที่มีประจุมากเหล่านี้มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบอยู่มาก จึงไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้ แต่ก็มีผลลดความหนาชั้นกระจายได้มากกว่าไอออนที่มีประจุน้อย (มันลีน ตัณฑุลเวศม์, 2526 ; O'melia, 1972)

ในกรณีที่มีเศษสูงๆ ไอออนของอลูมิเนียมส่วนใหญ่จะเป็นประจุลบซึ่งเหมือนประจุของอนุภาคแขวนลอย การลดอิทธิพลของประจุอนุภาคหรือลดความหนาของชั้นกระจายจึงไม่เกิดขึ้น นอกจากนี้ในกรณีที่มีความเข้มข้นของอนุภาคสูงมาก ๆ อนุภาคจะถูกทำลายเสถียรภาพโดยกลไกลดความหนาของชั้นกระจายได้ง่ายขึ้น (Bratby, 1980) ทั้งนี้เนื่องจากไอออนที่มีประจุมากซึ่งเหมาะกับกลไกนี้เกิดในช่วงต้นของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการทำลายเสถียรภาพ อนุภาคเบื้องต้นที่ได้จากการทำลายเสถียรภาพนี้อยู่ใกล้กันมากพอที่จะชนกันเกิดเป็นอนุภาคตะกอนขนาดใหญ่ขึ้นได้โดยง่ายก่อนที่ไอออน และผลจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสช่วงต่อมาจะทำให้เกิดกลไกแบบอื่น

3.1.1.2 กลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า

สารโคแอกกูแลนต์ที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ สร้างกลไกแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้าโดยการแตกตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประจุชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้สารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ สามารถดูดติดไปบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยพันธะโควาเลนต์ (มันลีน ตัณฑุลเวศม์, 2526 ; Bratby, 1980 ; Sanks, 1978) เมื่อสารประกอบเชิงซ้อนเป็นชนิดประจุบวกก็จะลดประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ ซึ่งก็จะเป็นการลดเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ลงด้วย เมื่อแรงผลักระหว่างอนุภาคลดลงจนน้อยกว่าแรงวันเดอร์วาล ก็จะทำให้เกิดการรวมตัวกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งจะกลายเป็นจุลฟล็อกเล็ก ๆ

ตะกอนที่เกิดจากกลไกโคแอกกูเลชันลักษณะนี้ สามารถอัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากตะกอนได้ง่าย (มันลีน คัมทูลเวศม์, 2526) ซึ่งจะประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนต่อไป แต่การควบคุมระบบให้ทำงานได้ดีนั้นยากมาก เพราะกลไกชนิดนี้จะให้ผลดีในช่วงพีเอชแคบ ๆ (O'melia, 1972) รวมทั้งมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนที่พอเหมาะเท่านั้น ถ้าหากมีปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนค่าไปโคแอกกูเลชันจะไม่เกิด แต่ถ้ามีปริมาณสูงเกินไป สารประกอบเชิงซ้อนจะดูดติดไปที่ผิวของอนุภาคมากจนทำให้อนุภาคเป็นประจุบวก ซึ่งก็จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพใหม่ (restabilization) เนื่องจากประจุบวกนั้นกลับขึ้นมาอีก

อย่างไรก็ตามกลไกแบบนี้จะต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที สารประกอบเชิงซ้อนต้องดูดติดผิวอนุภาคตลอดระยะเวลาดังกล่าว มิฉะนั้นสารประกอบเชิงซ้อนจะไฮโดรไลซ์ต่อไป ทำให้เกิดการขจัดความขุ่นด้วยกลไกแบบกวาด (มันลีน คัมทูลเวศม์, 2526) มากกว่าที่จะเป็นแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า ดังนั้นการกระจายสารโคแอกกูแลนต์ในน้ำให้ทั่วถึงจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก

3.1.1.3 กลไกแบบกวาด

กลไกนี้เกิดจากการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบจนความเข้มข้นของอลูมิเนียมสูงกว่าจุดอิ่มตัว ทำให้เกิดฟล็อกอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (มันลีน คัมทูลเวศม์, 2526 ; Camp, 1985 ; Steven and James, 1988) ซึ่งฟล็อกนี้สามารถจับตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ไม่แสดงอิทธิพลของประจุไฟฟ้า และเมื่อกวาดให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ตกทำลายเสถียรภาพด้วยกลไกนี้แล้วเกิดการสัมผัสกัน ก็จะจับตัวกันเป็นจุลฟล็อก (microfloc) สำหรับน้ำที่มีอนุภาคคอลลอยด์น้อย ๆ โอกาสที่อนุภาคจะสัมผัสกันก็น้อยด้วย ดังนั้นการเติมสารโคแอกกูแลนต์ที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบเพื่อให้เกิดตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มากขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์และจุลฟล็อก ทำให้เกิดฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

กระบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา ส่วนใหญ่จะใช้กลไกแบบกวาดนี้เพราะเกิดผลดีได้ในช่วงพีเอชกว้าง (Amirtharajar, 1982) จึงควบคุมง่าย แต่ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีข้อเสียคืออัดตัวไม่แน่นและคั่งน้ำออกยาก (มันลิน คัททลเวศม์, 2526)

3.1.1.4 กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม

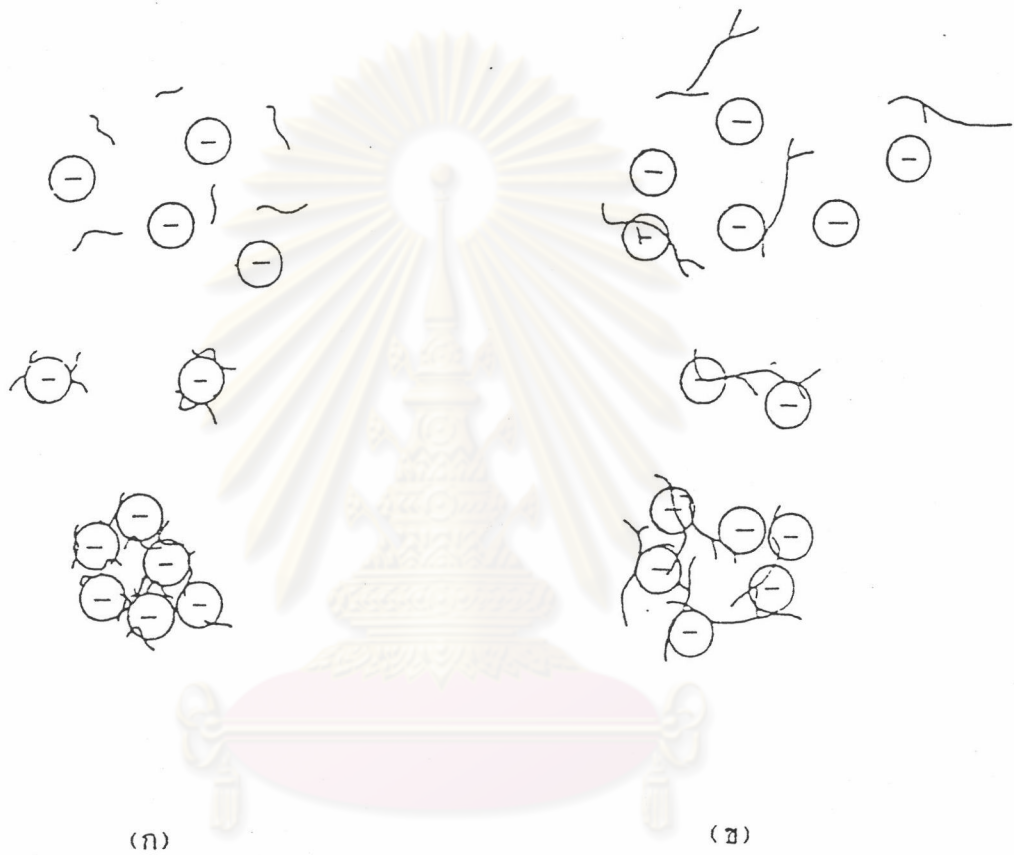
กลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม เป็นการทำลายเสถียรภาพอนุภาค-คอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบคอลลิดผิวและสะเทินทางไฟฟ้ากับกลไกแบบกวาด โดยที่ความแตกต่างระหว่างอิทธิพลของกลไกทั้งสองมีไม่เด่นชัด กล่าวคือในขณะที่เกิดกลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาดซึ่งเป็นการทำงานของฟล็อกกูลุมิเนชันไฮดรอกไซด์นั้น ไม่ได้หมายความว่าในน้ำที่เกิดโคแอกกูเลชันจะไม่มีสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ หรือสารประกอบเชิงซ้อนต่าง ๆ ไม่ได้ทำงาน เพียงแต่ว่าในสภาวะนั้นสารประกอบเชิงซ้อนสร้างกลไกแบบคอลลิดและสะเทินทางไฟฟ้าได้น้อยมาก เมื่อเทียบกับการทำงานของฟล็อกกูลุมิเนชันไฮดรอกไซด์

ดังนั้นในบางภาวะ เมื่อโคแอกกูเลชันมีกลไกทั้งสองชนิดประกอปกันโดยที่ไม่มีกลไกชนิดหนึ่งชนิดใดมีอิทธิพลสูงกว่ากลไกอีกชนิดหนึ่ง จนกลไกชนิดหนึ่งไม่มีนัยสำคัญแล้ว จึงจัดว่าเป็นกลไกโคแอกกูเลชันแบบร่วม

3.1.1.5 โดยใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (polymer-bridging)

สารประกอบตามธรรมชาติหลายชนิด เช่น แป้ง เซลลูโลส น้ำตาลบางชนิด และโปรตีนบางชนิด รวมทั้งสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้น สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดคอลลอยด์ได้ สารเหล่านี้มักมีขนาดโมเลกุลใหญ่มากประจุไฟฟ้าประจําตัวอาจเป็นบวก ลบ หรือไม่มีประจุเลขก็ได้ (ดูรูปที่ 3.1)

สารโคแอกกูแลนต์ที่ได้จากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 ลักษณะการเกิดโคอากูเลชัน โดยกลไกการเชื่อมต่อของโพลีเมอร์

- (ก) โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาค
- (ข) โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

โพลีเมอร์ ซึ่งอาศัยกลไกการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ โดยวิธีนี้สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging กล่าวคือในขั้นตอนแรก โมเลกุลของสารโพลีเมอร์จะเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) ขั้นตอนต่อมา คือ อนุภาคดังกล่าวจะไปจับตัวกันอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม ซึ่งผลที่ได้ก็คือ ฟล็อกที่มีขนาดใหญ่และสามารถแยกตัวออกจากน้ำใสโดยง่าย ในทางตรงข้ามการใช้โพลีเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียได้เพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น ๆ อนุภาคของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเรียกว่า อนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) และนอกจากนี้การกวนน้ำแรงเกินไปหรือนานเกินไปก็ก่อผลเสียได้ เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วน ๆ และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับอนุภาคอื่นเดิม เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่ เช่นกัน (ดูรูปที่ 3.2)

3.1.2 ทฤษฎีกระบวนการฟล็อกคูเลชัน

กระบวนการฟล็อกคูเลชันหรือกระบวนการรวมตะกอน เป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายสภาวะเสถียรแล้วเกิดขึ้นกัน และรวมตัวกันเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการฟล็อกคูเลชันอาจจำแนกออกเป็นสามประเภท (O'melia, 1972) ได้แก่ การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion), การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

3.1.2.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ สามารถทำให้

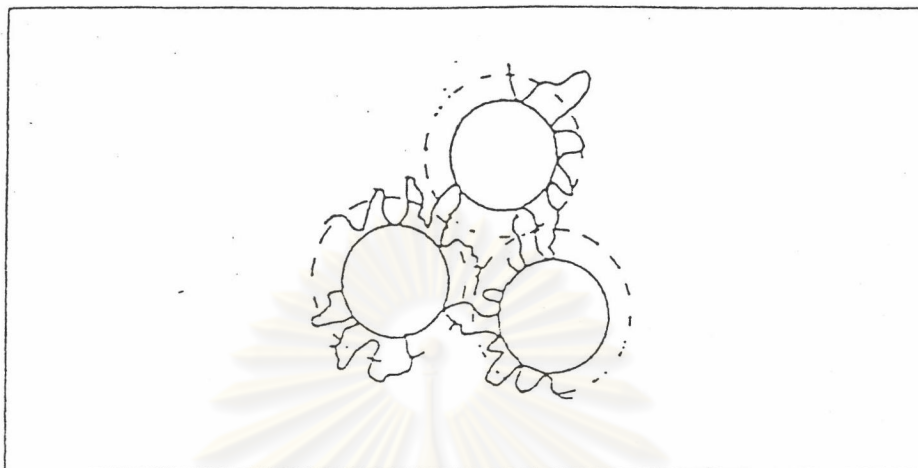


Fig. 12 a

Flocculation by bridging of particles
due to adsorption of polymer segments

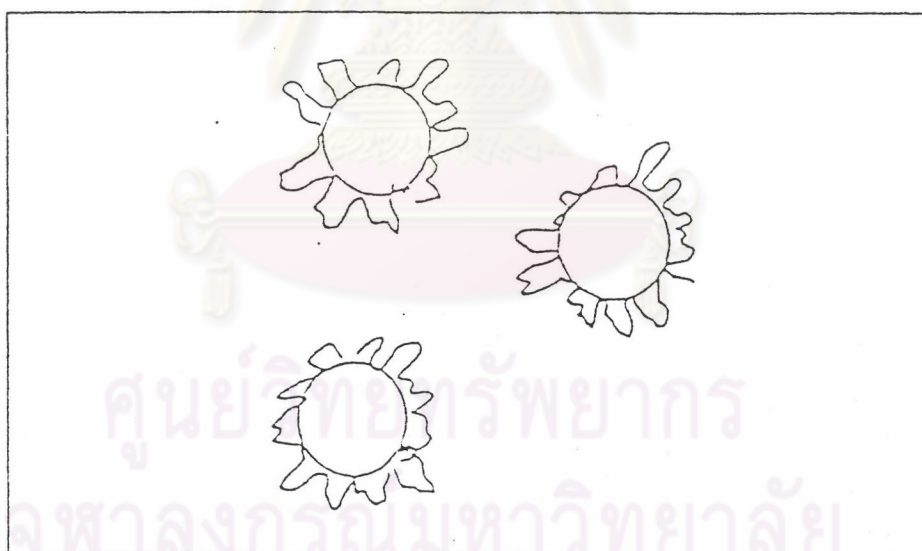


Fig. 12 b

Restabilization of particles
due to adsorption of excess polymer

รูปที่ 3.2 กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์แบบต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์และการกลับคืนเสถียรภาพของคอลลอยด์

โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) และเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคขึ้น การสลายกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคภายหลังการสัมผัสทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น

การสลายตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้เรียกว่า การสลายตะกอนแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) อัตราการสลายตะกอนแบบเพอริไคเนติกขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิและขึ้นกับจำนวนของอนุภาค การสลายตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะลดลงเหลือน้อยมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'melia, 1972)

3.1.2.2 การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

การสลายตะกอนโดยปรากฏการณ์นี้ เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่ในสภาวะสถิตหรือปราศจากความปั่นป่วน (Static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดความเร็วมัธยัสถ์และการชนรวมทั้งสลายกันขึ้นในระหว่างการจมตัว การสลายตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังทำน้ำใสแบบชั้นสลัดจ์ (sludge blanket clarifier) และในถังตกตะกอนแนวตั้งทั่วไป

3.1.2.3 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อมีการกวนเกิดขึ้นในเนื้อของเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำมวลหนึ่ง ๆ จะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคจึงเคลื่อนที่ไปกับมวลน้ำนั้น ๆ ก็จะมีความเร็วแตกต่างกันไปด้วย ทำให้เกิดโอกาสการชนและสลายตัวกันมากที่สุด การสลายตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การสลายตะกอนแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic

flocculation) เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราสมานตะกอนโดยพิจารณาจากขนาดอนุภาค ปรากฏว่า การสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริโคเนติกมากเมื่ออนุภาคมีขนาด ใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'melia, 1972)

โดยทั่วไปอนุภาคที่ไม่เสถียร และถูกนำส่งมาอยู่ในขั้นตอนการ สมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน ดังนั้นกลไกหลักในขั้นสมานตะกอนของ กระบวนการโคแอกกูเลชันจึงได้แก่ กลไกแบบออร์โทโคเนติก (O'melia, 1972)

ภายหลังจากขบวนการฟล็อกกูเลชันสิ้นสุดลงแล้ว จะมีการกำจัดสลัดจ์ขั้นต่อไป โดยการทำให้สลัดจ์เข้มข้นและแน่นขึ้น (thickening) โดยการรีดน้ำออกจากสลัดจ์ (dewatering) เพื่อลดปริมาตรลงแล้วส่งไปฝังหรือเผาต่อไป

ในปัจจุบันกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ได้พัฒนา ขึ้นในอุปกรณ์สมานตะกอนหลายรูปแบบ เพื่อให้ผลผลิตในระบบประปาได้สูงขึ้น และประหยัด การลงทุนหลาย ๆ ด้าน เช่น พื้นที่ที่ใช้ในการตั้งระบบ การกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเม็ด- ตะกอนแบบไหลขึ้นจะสามารถลดเวลาในการผลิตในระบบประปา และจะได้ลักษณะของตะกอน (sludge) ที่มีขนาดสม่ำเสมอและความหนาแน่นสูง อีกทั้งไม่ต้องใช้พื้นที่ในการสร้างถังตกตะกอน ที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการทำให้ตะกอนมีความเข้มข้นสูงด้วย

3.2 ตัวแปรที่สำคัญในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ตัวแปรที่สำคัญในการกวนน้ำ คือ ความเร็วเกรเดียนต์ (velocity gradient) ซึ่งนิยามใช้ G เป็นสัญลักษณ์ หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนเร็ว จะต้องมีค่าความปั่นป่วนสูง ทั้งนี้เพื่อให้การผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และพร้อม ๆ กันทุกจุด ในทาง ตรงกันข้าม น้ำในถังกวนช้าจะมีระดับความปั่นป่วนต่ำกว่ามาก เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนฟล็อกที่ เกิดขึ้นแล้วเกิดการแตกออกจากกัน การเคลื่อนไหวในถังกวนช้ามีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดการสัมผัส ระหว่างอนุภาคและจับติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ ถังกวนเร็วมีค่า G ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที^{-1}



แต่ถึงกวนเข้ามักมีค่า G อยู่ในช่วง 60 - 100 วินาที⁻¹ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2533) ตัวแปรอีกตัวที่สำคัญ ได้แก่ เวลาผสม (t) ซึ่งหมายถึงเวลาสัมผัสระหว่างสารเคมีและความขุ่น เนื่องจากปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์เกิดขึ้นรวดเร็วมาก ถึงกวนเร็วจึงต้องการเวลาสัมผัสเพียง 1 นาทีหรือน้อยกว่า ในทางปฏิบัติมักถือว่า เวลาสัมผัสเป็นเวลาที่น้ำอาศัยอยู่ในถังหรืออุปกรณ์กวนเร็ว ซึ่งหมายถึงเวลากักน้ำ (detention time)

พารามิเตอร์ G และ t มีบทบาทโดยตรงในการกำหนดประสิทธิภาพของการผสม ตะกอน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อขนาดและลักษณะทางกายภาพของตะกอน กล่าวคือ ตะกอนจะมีขนาดจำกัดที่ค่า G หนึ่ง ๆ (Gregory, 1977 ; Kawamura, 1973 ; Kawamura, 1976) ขนาดตะกอนจะแปรตาม t ในขณะที่แปรกลับกับค่า G (Andrew-Villegas and Letterman, 1974 ; Camp, 1955 ; Kawamura, 1976 ; Mhaisalkar et al., 1991) อย่างไรก็ตาม แม้ว่า G สูง ๆ จะทำให้ขนาดตะกอนเล็ก แต่ตะกอนที่ได้จะมีความหนาแน่นมากกว่าตะกอนใหญ่ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่า G ที่ต่ำกว่า (วิเชษฐ มงคลศรี, 2526 ; Kawamura, 1976 ; Lin, 1982 ; Tambo and Watanabe, 1978)

พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วนในระดับ G อาจคำนวณได้จากสมการของ แคมป์ และ สไตน์ ดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2533)

$$G = (P/\mu V)^{0.5} \text{-----} (1)$$

G = ความเร็วเกรเดียนต์หรือระดับความปั่นป่วน (วินาที⁻¹)

P = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน (นิวตัน - เมตร/วินาที)

μ = ความหนืดของน้ำ (viscosity), (นิวตัน - วินาที ต่อ ตร.เมตร)

V = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว (ลบ.เมตร)

สำหรับการกวนน้ำที่ใช้ใบพาสในการกวนน้ำพลังงานที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก

$$P = 0.5 C_D A \rho V^3 \quad \text{-----} \quad (2)$$

C_D = ค่าคงที่สำหรับใบพัดแต่ละชนิด มีค่าเท่ากับ 1.8 สำหรับใบพัดแบบใบพาย

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม / ลูกบาศก์เมตร)

A = พื้นที่ผิวของใบพัด (ตารางเมตร)

V = ความเร็วสัมพัทธ์ของใบพัดเท่ากับ $0.75 \times$ ความเร็วรอบใบพัด

P = พลังงานที่ต้องการ (watt)

3.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นในระบบประปามีหลายชนิด ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ได้แก่ สารส้ม เป็นสารประกอบของอลูมิเนียมซัลเฟตเคมี ดังนี้ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (aluminium sulfate) สารเคมีที่นิยมรองลงมาได้แก่ สารประกอบเหล็ก เช่น เพอร์ริค-คลอไรด์ ($FeCl_3$) แต่ไม่นานมานี้ในระบบประปามีการใช้โพลีเมอร์ของอลูมิเนียมแทนสารส้มมากขึ้น ที่ใช้กันมากได้แก่ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (polyaluminum chloride) (PACl) (ชงชัย พรหมสวัสดิ์, 2535) จากการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารส้มและ PACl ของ Benschoten และ Edzwald (1989) ได้ข้อสรุปว่าในการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่าง PACl และสารส้ม เมื่อค่าการดูดซับแสงผ่านเครื่องสเปกโตรโฟโตเมตริก (spectrophotometric) ตลอดระยะเวลา 326 วัน จะพบว่า PACl เมื่อนำไปใช้งานจะปรากฏมีความคงตัวอยู่ในรูปอลูมิเนียมโพลีเมอร์ (Al polymer) ส่วนในสารส้มจะพบเพียงอลูมิเนียมโมโนเมอร์ (Al monomer) ในการศึกษาตะกอนของ PACl และสารส้ม พบว่าตะกอน PACl จะเป็นตะกอนกลมเล็ก (ขนาดเล็กกว่า 25 ไมครอน) และรวมตัวกันเป็นกลุ่มคล้ายลูกโซ่ ส่วนฟล็อกสารส้มจะมีโครงสร้างเป็นแบบปุยและมีความขุ่น มีขนาดอยู่ในช่วง 25-100 ไมครอน ในช่วงพีเอชประมาณ 7 อลูมิเนียมโพลีเมอร์จะตกตะกอนอยู่ในรูปสารที่ไม่ละลายในน้ำด้วย และการศึกษาสภาพการละลายกลับอีกครั้งของตะกอน ความสามารถในการละลายและความขุ่น พบว่า ตะกอนของ PACl และสารส้มจะมีรูปร่างในสภาวะของของแข็ง (solid phase) ที่ต่างกัน การคงรูปของตะกอนและอนุภาคของ PACl จะสูงกว่า และผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจะมีความขุ่นที่ต่ำกว่าสารส้ม ในเรื่อง

ผลกระทบจากอุณหภูมิพบว่า PACl มีผลกระทบน้อยกว่าสารส้ม โดยสรุปตามคุณสมบัติทางกายภาพที่ผ่านมาการใช้ PACl จะเหมาะในการใช้เป็นตัวโคแอกกูแลนท์ในระบบประปา และจากการส่งตัวอย่างวิเคราะห์พบว่า PACl ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีปริมาณอลูมิเนียมในรูปของ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบประมาณ 28% (ปริญา ๗ นคร, 2535) ซึ่งมีค่ามากกว่าอลูมิเนียมที่มีอยู่ในสารส้มประมาณ 2 เท่า

3.4 การใช้โพลีเมอร์เป็นสารฟล็อกคูแลนท์

3.4.1 ชนิดของสารโพลีเล็กโทรไลต์

สารโพลีเล็กโทรไลต์เป็นกลุ่มของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ มีโมโนเมอร์ซึ่งสามารถนำพาประจุหรือแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่มีประจุไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ อาจมีประจุบวก (cationic polyelectrolytes) ประจุลบ (anionic polyelectrolytes) โดยทั่วไปสารโพลีเล็กโทรไลต์เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่ชอบน้ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 - 10,000,000 ปัจจุบันมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นเป็นลำดับ ทั้งเพื่อการปรับสภาพน้ำดีและการบำบัดน้ำเสีย

สารโพลีเล็กโทรไลต์มีทั้งที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง ยางไม้ สำหรับยททะเลสกัดและสารที่ได้จากการสังเคราะห์ แต่จากกระบวนการสังเคราะห์ทำให้สามารถควบคุมคุณสมบัติต่าง ๆ ได้ ทั้งปริมาณ ชนิดประจุและน้ำหนักโมเลกุล ฯลฯ สารดังกล่าวจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการใช้งาน สารโพลีเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้สำหรับการปรับแต่งสภาพน้ำดิบเพื่อการอุปโภค-บริโภค จำเป็นต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยด้วยเนื่องจากมักมีสารเจือปนตกค้างอยู่เสมอ ตารางที่ 3.1 เป็นตัวอย่างของสารโพลีเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน

การจัดหมวดหมู่สารโพลีเล็กโทรไลต์ สามารถกระทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติและประโยชน์ในการใช้งาน กล่าวคืออาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิด โครงสร้างหรือขนาด

ตารางที่ 3.1 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอน (Bratby, 1980)

Name	Structure	Charge type	Molecular weight	Manufacturer and location
Magnifloc 835A	Polyacrylamide $\left\{ \text{CH}_2 - \underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}} \right\}_x$ (with some -COO-groups)	Anionic, high charge	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 820A	As above	Anionic intermediate charge	6×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 837A	As above	Anionic, low charge	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc A-21	Polystyrene sulfonic acid, $\left\{ \text{CH}_2 - \underset{\text{SO}_3(-)}{\text{CH}} \right\}_x$	Anionic very high charge		Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Wisprofloc 20	Causticized potato starch, crosslinked with borate	Anionic	Very high	Gamlen Chemical Co. South San Francisco, California
Magnifloc 905N	Polyacrylamide, very few -COO- groups	Nonionic	15×10^6	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc N-17	As above	Nonionic	Very high, approx. $5-10 \times 10^6$	Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Betz 1260	Polyacrylamide copolymer	Cationic	Very high 10×10^6 ?	Betz Laboratories, Inc. Trevose, Pennsylvania
Catfloc T	Poly (diallyldimethyl ammonium chloride) (quarternary amine)	Cationic, very high charge	0.5×10^6 ?	Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Catfloc B	Amine?	Cationic, moderate charge		Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Magnifloc 507C	Tertiary amine	Cationic, moderate charge	10^6-10^7	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 573C	Quarternary amine	Cationic, very high charge	$5 \times 10^6-10^7$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 2535	Tertiary amine/polyacrylamide copolymer	Cationic, moderate charge	$1-3 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Primafloc C-7	Polyamine-HSO ₄	Cationic, fairly high charge	$1-2 \times 10^6$	Rohm and Haas Co. Philadelphia, Pennsylvania
Alcolac DV530	Polyethylene imine $\left[(\text{CH}_2 - \text{NH} - \text{CH}_2)_n \right]$	Cationic	Approx. 5×10^6	Alcolac Inc. Baltimore, Maryland
Jydex 12	As above	Cationic	Approx. 6×10^6	Dow Chemical Co. Midland, Michigan

Note: While other equally effective polymers could have been substituted for those selected for this table, the availability of further information, such as molecular weight and structure, in many cases determined the polymers chosen here.

ของโพลีเมอร์ หรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโพลีเมอร์ ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงประเภทของ สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นตามคุณสมบัติประการสุดท้ายที่กล่าวมานี้

3.4.1.1 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวก (cationic polyelectrolytes) มีหลายรูปแบบ ได้แก่

3.4.1.1.1 โพลีอามีน เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 10^5 แต่มีความเป็นประจุบวกสูง เช่น โพลีเอทิลีน อามีน และ โพลีเอทิลีน ไอมีน (PEI) สารกลุ่มนี้ ใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ และใช้บ้างในการศึกษาปฏิกิริยาการรวมตะกอน

3.4.1.1.2 โพลีเอทิลีน ควอเทอเรียรี เป็นสารที่ไม่ตอบสนอง ต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช มีความต้านทานต่อการสลายตัวโดยคลอรีนมากกว่าโพลีเมอร์ทั่วไป จึง มักมีความสำคัญในการเติมคลอรีนลงน้ำดิบ

3.4.1.1.3 แคทไอออนนิค ไชยานามีน เป็นสารโพลีอิเล็ก- โทรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำประมาณ $1 \times 10^3 - 5 \times 10^3$ เริ่มแรกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษ แต่ก็พบว่าสามารถแสดงปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยเช่นกัน

3.4.1.1.4 คาโบโมอิล โพลีเมอร์แคทไอออน เป็นกลุ่มสาร ที่มีความสำคัญในทางการค้า และใช้งานได้เอนกประสงค์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 10^6 มีความหนืดสูงและมีสารที่ไวต่อปฏิกิริยาอยู่น้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย

3.4.1.1.5 โพลี อัลฟา-ไวนิลไมคาโชลิน เป็นโพลีเมอร์พวก โพลีไซคลิก อามีน มีโครงสร้างพิเศษสำหรับการเป็นสารรวมตะกอน ทั้งนี้เพราะมีความเป็น ประจุบวกสูงมาก และมีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางจนถึงสูง

3.4.1.1.6 โพลีไคอัลลีเมทิล แอมโมเนียม คลอไรด์ เป็น โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้น มีน้ำหนักโมเลกุลช่วงต่ำถึงปานกลาง (น้อยกว่า 10^6) มีความต้านทานต่อคลอรีนและไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช

3.4.1.1.7 ไคเมทิล อะมิโนอัลคิล อะคลิลิค และ เมททา-ไซคลิก เอสเทอ โพลีเมอร์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีความไวในสภาพตัวกลางที่เป็น กรดหรือเบส ใช้เป็นสารรวมตะกอน สารกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างสูง

3.4.1.1.8 เอ็น-ไคอัลคิลอะมิโนอัลคิล อะคลิลาไมด์ โพลี-เมอร์ ซึ่งโพลีเมอร์กลุ่มนี้ได้รับความสนใจในการใช้เป็นสารรวมตะกอน เพราะมีเสถียรภาพต่อการไฮโดรไลซิส มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

3.4.1.2 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ (anionic polyelectrolytes)

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ โดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูงถึงสูงมาก มักใช้เป็นสารรวมตะกอน โพลีเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาบอักษิเลท ไอออน ได้แก่ พวกโพลีเมอร์ที่มีหมู่คาบอักษิเลท เช่น โสโมโพลีอะคลิลิค แอซิด และพวกที่มีหมู่ซัลฟอนิก แอซิด เช่น เกลือโซเดียมของโพลีสไตรีน ซัลฟอนิก แอซิด

3.4.1.3 สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ (nonionic polyelectrolytes)

โพลีเมอร์ที่มีประจุต่ำกว่า 1% ในสารละลายโพลีเมอร์เหล่านี้ จะทำให้เกิดการรวมตะกอนโดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือสูงมาก ตัวอย่างสารรวมตะกอนที่สำคัญ ได้แก่ โพลีเอททิลีน ออกไซด์

และ โพลีอะคลีลาไมด์ ส่วน โพลีไวนิล ไพลอลิไดนอน มักถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

3.4.1.4 สารโพลีอเล็กโทรไลต์ที่ทั้งประจุบวกและลบ

(polyampholytes)

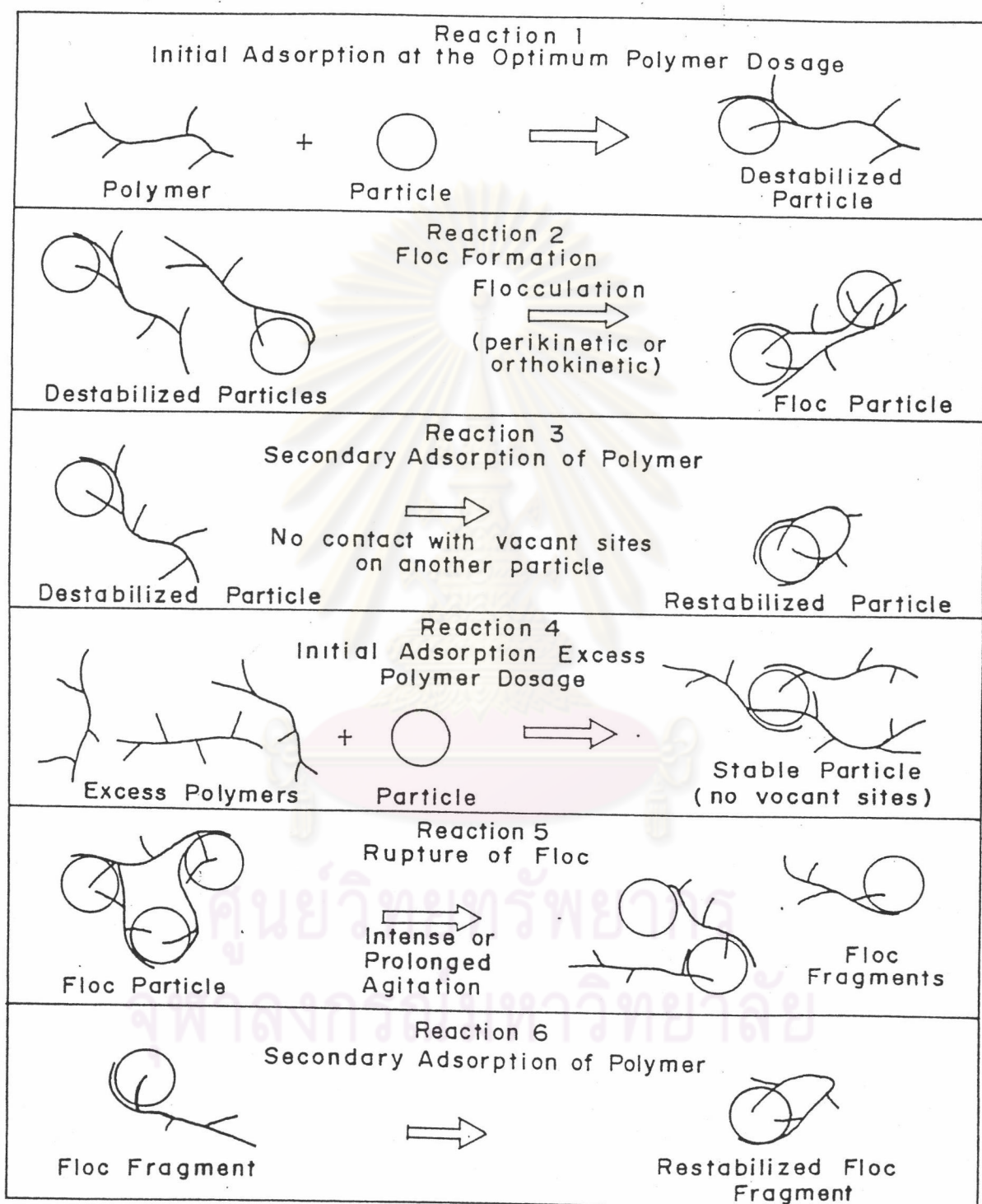
สารกลุ่มนี้เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรดและเบส มักจะให้ประจุบวกที่มีพีเอชต่ำ ให้ประจุลบที่มีพีเอชสูง และเป็นกลางทางประจุที่ Isoelectric pH ตัวอย่างเช่น สารรวมตะกอนที่เรียกว่า Switterion flocculant ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วยประจุบวกหรือลบอยู่มากมายในโมเลกุล

3.4.2 กลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารโพลีอเล็กโทรไลต์

การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารโพลีอเล็กโทรไลต์เป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อนและไม่สามารถครอบคลุมโดยกลไกหนึ่งโดยเฉพาะ แต่จะเกิดขึ้นจากอิทธิพลอันเป็นผลเนื่องจากประจุ การเกาะติด หรือปฏิกิริยาเคมีในโมเลกุล ลักษณะเฉพาะของแต่ละระบบ และสารโพลีอเล็กโทรไลต์ที่เติมลงไป แต่อาจกล่าวได้ว่ามีกลไกหลัก 2 กลไกคือ กลไกการสร้างสะพาน (bridging mechanism) โดยที่ส่วนของสารโพลีอเล็กโทรไลต์ติดอยู่บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำตัวเป็นสะพานต่อเชื่อมอนุภาคเหล่านั้นเข้าด้วยกัน และกลไกการเกิดห่อหุ้มประจุไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic patch mechanism) ซึ่งเป็นผลที่เกี่ยวเนื่องกับประจุ โดยสารโพลีอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคเกาะติดบนอนุภาค จึงลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเข้าใกล้ชิดกัน

3.4.2.1 กลไกการสร้างสะพาน (bridging mechanism)

กลไกการสร้างสะพานอธิบายได้ดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้โมเลกุลของโพลีอเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จะต้องมียอดัประจุบวกหรือกลุ่มสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาจับตำแหน่งต่าง ๆ บนพื้นผิวอนุภาค ทำให้โมเลกุลของ



รูปที่ 3.3 การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกการสร้างสะพาน
โดยสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ (Bratby, 1980)

โพลีอิเล็กโทรไลต์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ดังปฏิกิริยาที่ 1 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกัน หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของโพลีอิเล็กโทรไลต์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีโพลีอิเล็กโทรไลต์เกาะติดอยู่ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) ปลายโมเลกุลส่วนที่เหลือของโพลีอิเล็กโทรไลต์จะแผ่ขยายเข้าสู่เนื้อสารละลาย สามารถจับอนุภาคอื่น ๆ โดยมีโพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นสะพานเชื่อม ดังปฏิกิริยาที่ 2 การต่อเชื่อมด้วยโพลีอิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีโพลีอิเล็กโทรไลต์ และมีตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลีอิเล็กโทรไลต์ไม่มีที่จับเกาะบนอนุภาคตัวอื่น ในที่สุดปลายอิสระนั้นก็จับเกาะอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 3 ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับบนอนุภาคตัวอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง เป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) การใช้โพลีอิเล็กโทรไลต์มากเกินไป ทำให้โพลีอิเล็กโทรไลต์หลายโมเลกุลจับบนอนุภาคคอลลอยด์จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่บนอนุภาคอื่น ๆ ทำให้อนุภาคนั้นกลับมีเสถียรภาพคืนมาใหม่ดังปฏิกิริยาที่ 4 และหากมีการกวนผสมที่รุนแรงหรือนานเกินไป จะเกิดการทำลายฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วน ๆ ดังปฏิกิริยาที่ 5 และอาจทำให้ปลายอิสระของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เกาะจับบนอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 6 ทำให้เสถียรภาพคอลลอยด์กลับคืนมาใหม่

3.4.2.2 กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic patch mechanism)

Bratby (1980) ได้อธิบายถึง พฤติกรรมการเกาะติดหรือทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่ใช้สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาคคอลลอยด์ หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบในการเป็นสารช่วยรวมตะกอนหลังจากที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพด้วยสารรวมตะกอนจำพวกโพลีเมอร์มาก่อนแล้ว และเกิดปรากฏการณ์แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ค่อนข้างรุนแรง

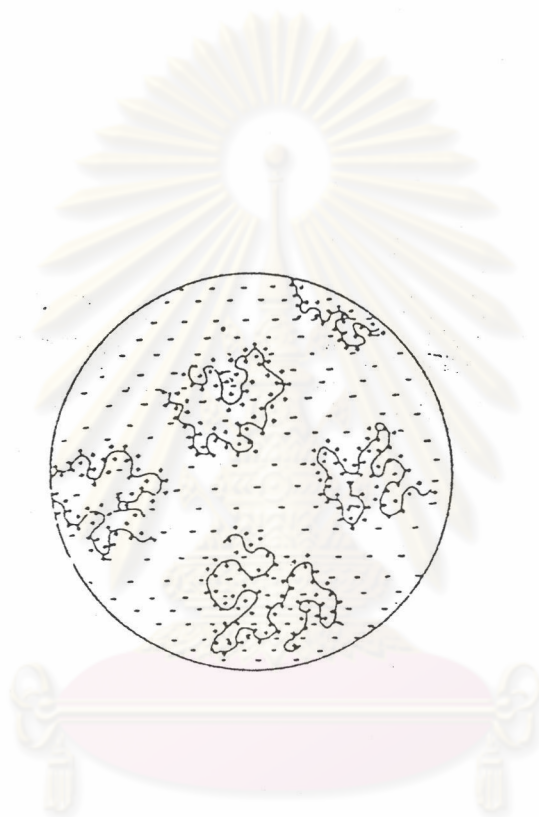
โดยที่ตามปกติอนุภาคต่าง ๆ ในสับสเตรต (substrate) มักมีตำแหน่งที่มีประจุลบบนพื้นที่ผิวที่ค่อนข้างจะคงตัว เมื่อโมเลกุลของโพลีเอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกถูกเติมลงไปบนสับสเตรตนั้น จะเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวอนุภาคผ่านพันธะทางไฟฟ้าสถิตย์ โพลีเอเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและมีความหนาแน่นของประจุสูงมาก และมากกว่าประจุลบบนพื้นผิวอนุภาค การเกาะติดของโพลีเอเล็กโทรไลต์ที่พื้นผิวอนุภาค และจะทำลายประจุลบไม่เพียงแต่บริเวณที่เกาะติดเท่านั้น แต่จะรวมถึงส่วนอื่นหรือทั้งหมดบนผิวอนุภาคได้ แล้วก่อตัวเป็นประจุบวกห้อมล้อมขอบเขตของตำแหน่งประจุลบ ดังรูปที่ 3.4 ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างอนุภาคโดยตรง และลดแรงผลักระหว่างอนุภาคเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นได้ โดยที่อนุภาคที่อยู่ใกล้ชิดกัน และอยู่ในแนวเดียวกันสามารถให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่รุนแรง

3.5 สมมติฐานเบื้องต้นของการกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น

สมมติฐานเบื้องต้นของการเกิดเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้น (pellet-floc) มีผู้อธิบายถึงกลไกต่าง ๆ ไว้หลายคน (Graveland et al., 1983 ; Tambo and Matsui, 1987 ; Yusa and Gaudin, 1963 ; Yusa et al., 1975) โดย Tambo and Matsui (1987) ได้อธิบายว่า เม็ดตะกอนจะสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะที่สารละลายอยู่ในสภาวะเสถียรแบบเมตะ (metastable state) กล่าวคือ ในสภาวะดังกล่าวความเข้มข้นของสารจะมากกว่าอัตราการละลายได้ของสาร แต่ก็ไม่มากพอที่จะเกิดสภาวะเกินอิ่มตัว (supersaturation) และก่อรูปเป็นของแข็ง (solid state) ดังนั้น สารละลายจึงไม่เกิดการก่อรูปเป็นของแข็ง (precipitation) หรือถ้าเกิดก็น้อยมาก แม้ว่าจะปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๆ (ดูรูปที่ 3.5) แต่เมื่อมีการเติมสารชนิดเดียวกับสารละลายนั้นและอยู่ในสภาวะของแข็ง (solid phase) ให้เพิ่มเข้าอยู่ในสารละลายที่อยู่ในสภาวะเสถียรแบบเมตะ จะทำให้สารละลายเหล่านั้นเกิดการจับตัวกันเป็นของแข็งบนพื้นที่ผิวของของแข็งที่เติมลงไปอย่างรวดเร็ว และมีการรวมตัวกันเป็นของแข็งใหญ่ขึ้นทันที

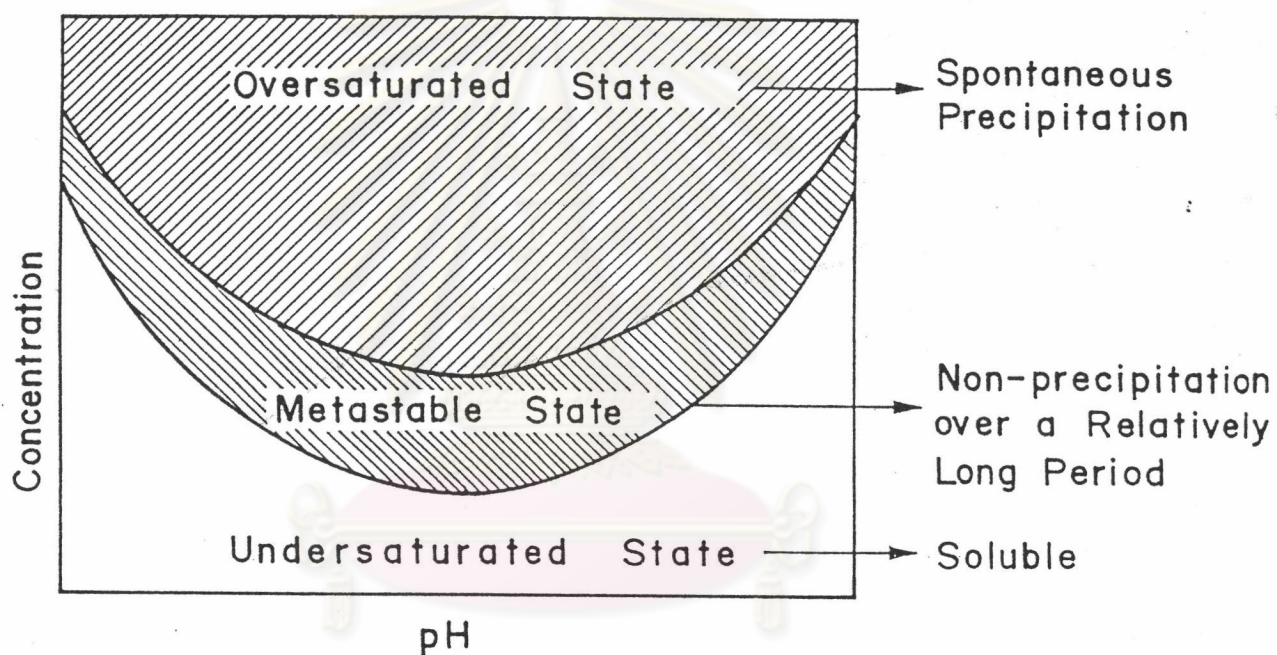
ด้วยหลักการนี้เอง เราสามารถนำไปดัดแปลงเป็นกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเม็ดตะกอน ทั้งนี้โดยสร้างสภาวะเสถียรแบบเมตะให้เกิดขึ้นในระบบ กล่าวคือ เมื่อเติม





ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 ความเป็นไปได้ในการจัดเรียงตัวของสารโพลีอิเล็กโทรไลต์บนอนุภาคที่มี
ความหนาแน่นของประจุลบต่ำ (Bratby, 1980)



Solubility and Saturation

(Tambo and Matsui, 1987)

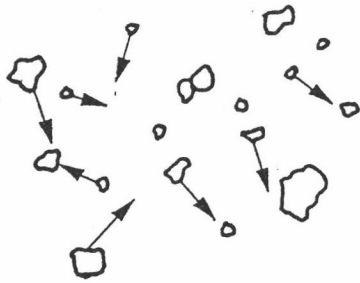
รูปที่ 3.5 สถานะของสารละลายเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่างกัน
(Tambo and Matsui, 1987)

สารโคแอกกูแลนต์ลงไปในน้ำขุ่นจะทำให้อนุภาคที่อยู่ในน้ำถูกทำลายเสถียรภาพเกิดเป็นจุลฟล็อก แต่เนื่องจากจุลฟล็อกเหล่านี้ยังมีขนาดและ/หรือความเข้มข้นไม่มากพอ ที่จะเกิดการจับตัวกันได้เอง แต่เมื่อทำให้จุลฟล็อกเหล่านี้เข้าไปรวมอยู่กับเม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และแข็งแรงภายในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน ก็เกิดการจับตัวกันระหว่างจุลฟล็อกกับเม็ดตะกอนเหล่านั้นโดยเป็นการจับกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one by one attachment) ทำให้ไม่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายในหรือมีน้อยมาก จึงเกิดเป็นเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูง (pellet flocs) ดังแสดงในรูป 3.6

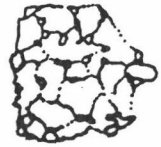
Yusa, Suzuki และ Tanaka (1975) ได้อธิบายไว้ถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการจับตัวกันของอนุภาคซึ่งทำให้ได้เป็นเม็ดตะกอนที่กลมและแน่นนั้นว่า โดยปกติแรงดันภายนอกเม็ดฟล็อก (หมายถึง เม็ดฟล็อกปกติที่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ภายใน) กระทำต่อเม็ดฟล็อกอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง แรงดันภายนอกเหล่านี้มีความสมดุลกับแรงดันเนื่องจากของเหลวหรือน้ำภายในฟล็อก ฟล็อกจึงอยู่ในสภาพคงตัว ในทางตรงกันข้าม หากมีแรงดันภายนอกเม็ดฟล็อกกระทำต่อเม็ดฟล็อกอย่างไม่สม่ำเสมอ และแรงยึดเกาะกันภายในอนุภาคตะกอนหรือจุลฟล็อก (microfloc) แข็งแรงกว่าแรงกระทำภายนอก ของเหลวภายในเม็ดฟล็อกจะถูกขับออกมาตรงจุดที่แรงกระทำภายนอกมีค่าน้อยที่สุด โมเลกุลของน้ำที่แทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกจะลดจำนวนหรือปริมาณลง อนุภาคตะกอนที่อยู่ในเม็ดฟล็อก จึงเคลื่อนตัวเข้ามาชิดและอัดตัวกันได้มากยิ่งขึ้น ดังนั้น ฟล็อกที่เกิดขึ้นจึงมีความหนาแน่นสูง ตกตะกอนได้เร็วกว่าฟล็อกธรรมดาทั่วไป

สรุปได้ว่า ในการสร้างเม็ดตะกอนจะต้องมีการให้พลังงานกลจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ซึ่งก็คือ การทำให้เกิดสภาวะไม่สมดุลบนเม็ดฟล็อก ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นได้โดยอาศัยเทคนิค 2 อย่าง คือ เทคนิคการกลิ้งฟล็อกไปบนพื้นผิวเรียบหรือโค้ง และเทคนิคการพลิกเม็ดฟล็อกให้ชนกันเองหรือพลิกเม็ดฟล็อกให้ชนกับพื้นผิวเรียบหรือผิวโค้ง ซึ่งอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

Oversaturated State



Random collision of elementary particles

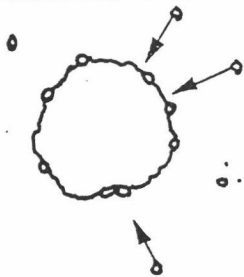


aggregate random structure large void volume (FLOC)

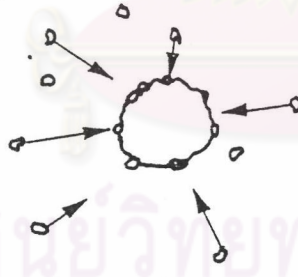
causes

(Tambo and Matsui, 1987)

Metastable State



One by one attachment



aggregate regular structure high density (PELLET)

causes

Agglomeration under Oversaturated and Metastable States

(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบการจับตัวเป็นของแข็งในสภาวะปรกติกับสภาวะเมตะ

(Tambo and Matsui, 1987)

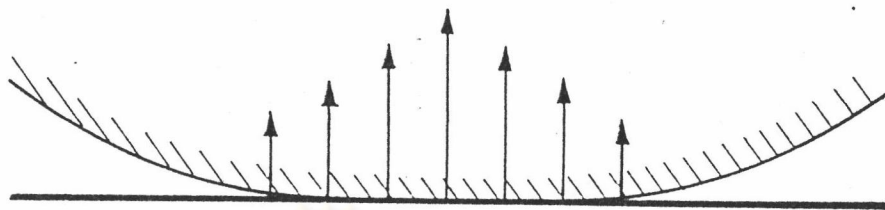
3.5.1 เทคนิคการกลิ้ง (rolling technique)

สมมติว่าเม็ดฟล็อกอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (elastic) คือมีความหยุ่นตัวและให้เม็ดฟล็อกสัมผัสกับพื้นผิวที่จุด ๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นพื้นที่เล็ก ๆ แรงกระทำที่จุดนั้นมีค่าน้อยมากจนไม่ทำให้ฟล็อกเปลี่ยนรูปร่าง หรือเกิดการยุบตัว ณ จุดสัมผัส ถ้าเม็ดฟล็อกอยู่หนึ่ง ๆ เราจะสามารถเขียนรูปแสดงการกระจายแรงดันที่เกิดรอบผิวฟล็อกได้ดังแสดงในรูปที่ 3.7 กล่าวคือ แรงดันภายนอกมีค่าสูงสุด ณ บริเวณจุดกึ่งกลางของพื้นผิวสัมผัสซึ่งเป็นจุดที่ฟล็อกจะเกิดการยุบตัวมากที่สุด และแรงดันภายนอกจะค่อย ๆ ลดลง เมื่ออยู่ห่างออกไปจากจุดสัมผัสตามลำดับ

หากมีการกลิ้งเม็ดฟล็อกไปข้างหน้า จุดที่มีแรงดันภายนอกสูงสุดก็จะกลายเป็นจุดสัมผัสถัดไปทางข้างหน้าของตำแหน่งเดิม ถ้ากลิ้งเม็ดฟล็อกไปข้างหน้าเรื่อย ๆ จุดที่มีค่าแรงดันสูงสุดก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปข้างหน้าเรื่อย ๆ จนครบรอบ ซึ่งสามารถเขียนรูปแสดงการกระจายแรงกระทำภายนอกที่มีต่อเม็ดฟล็อกได้ดังรูปที่ 3.8 อันแสดงให้เห็นว่าการกลิ้งฟล็อกไปบนพื้นผิวเรียบ หรือโค้งทำให้แรงซึ่งกระทำต่อฟล็อกไม่สม่ำเสมอ ฟล็อกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) เป็นผลให้นำซึ่งแทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกถูกรีดออกมามากกว่าข้างต้น

3.5.2 เทคนิคการชน (collision technique)

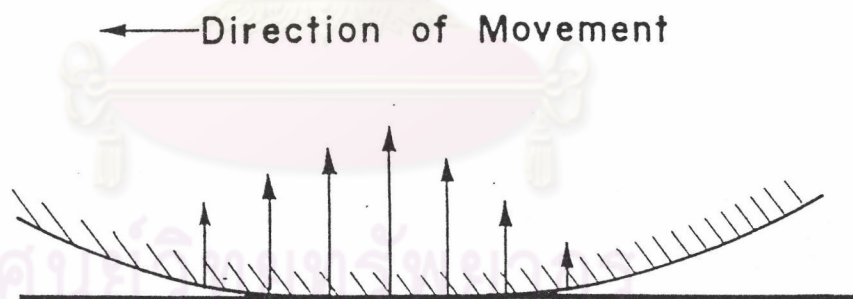
หากสามารถบังคับให้ฟล็อกขนาดเล็กวิ่งเข้ามาชนกันหรือวิ่งเข้าชนพื้นผิวเรียบหรือโค้ง ผลที่เกิดขึ้นก็คือช่องว่างภายในฟล็อกลดน้อยลง และฟล็อกจะยึดเกาะกันอย่างแข็งแรงขึ้น เนื่องจากการชนกันนั้นทำให้เกิดมีแรงกระทำที่ภายนอกเม็ดฟล็อก เป็นผลให้เกิดแรงเฉือนระหว่างอนุภาคเล็ก ๆ ภายในฟล็อกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของอนุภาคเล็ก ๆ ขึ้นใหม่ ในลักษณะที่ชิดกัน เป็นผลให้ช่องว่างภายในฟล็อกลดลง น้ำที่แทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกจึงถูกรีดออกมา (ดูรูปที่ 3.9, 3.10)



Pressure Distribution Around
the Contact Area When a
Floc is at Rest on a Solid Plane

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

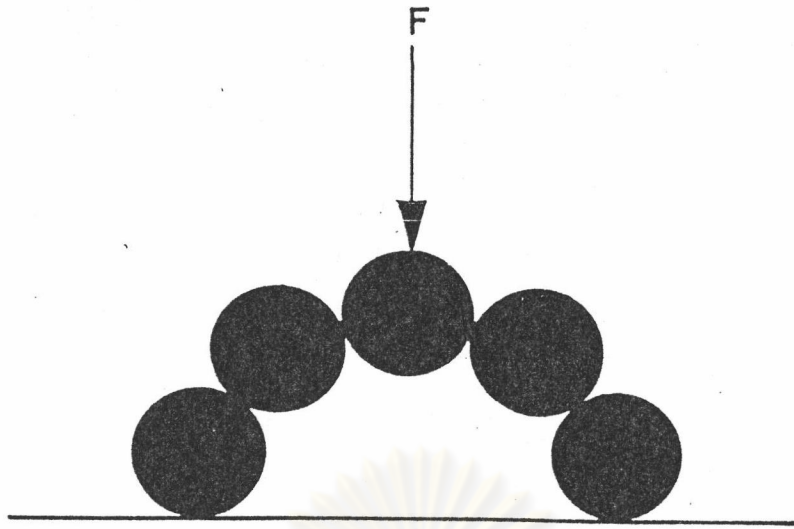
รูปที่ 3.7 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกหยุดนิ่ง (Yusa et al., 1975)



Pressure Distribution Around
the Contact Area When a
Floc Rolls Over Along a Solid Plane

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

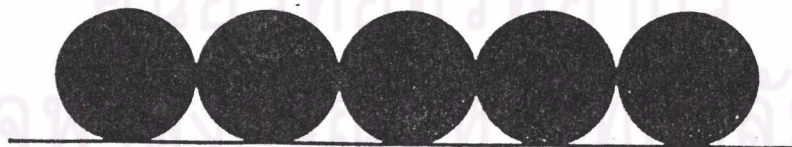
รูปที่ 3.8 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกกลิ้ง (Yusa et al., 1975)



Internal Constitution of a
Loose Bulky Floc Produced by
Normal Flocculation

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975.)

รูปที่ 3.9 การจัดเรียงของอนุภาคภายในฟล็อกก่อนชน (Yusa et al., 1975)



Internal Constitution of a
Compact Floc Produced as the
Result of Pellet Flocculation

(Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

รูปที่ 3.10 การจัดเรียงของอนุภาคภายในฟล็อกหลังชน (Yusa et al., 1975)

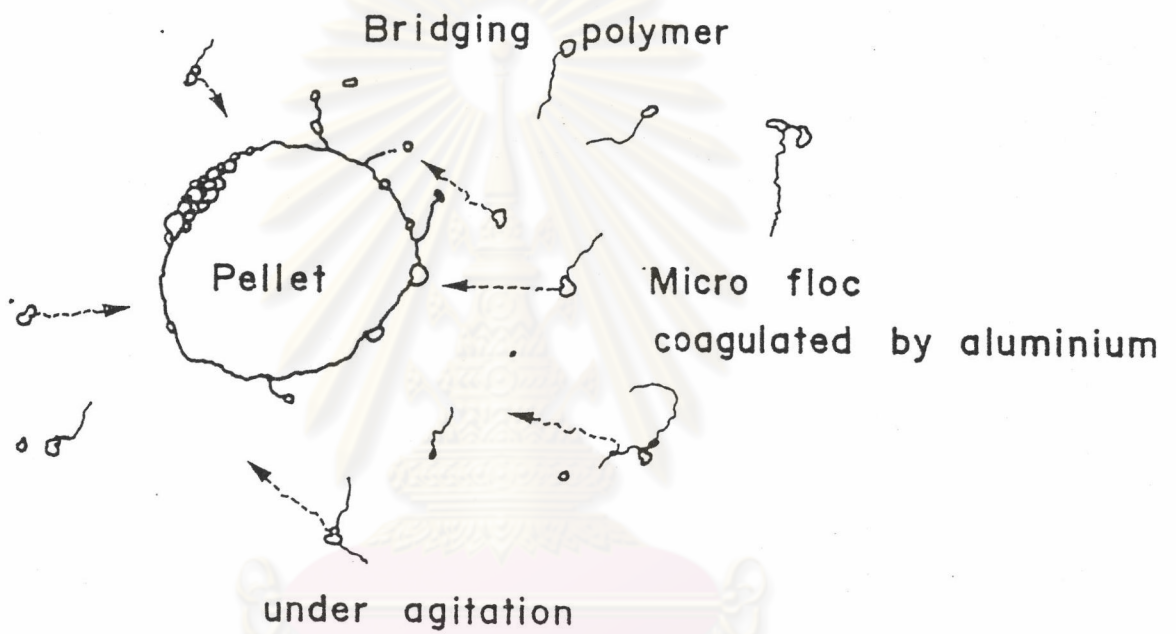
3.6 หลักการของการสร้างเม็ดตะกอน

การสร้างเม็ดตะกอนให้เกิดขึ้นในกระบวนการกำจัดความขุ่น จำเป็นจะต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนที่เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ซึ่งเกิดขึ้นในอุปกรณ์กวนเร็ว และส่วนสร้างเม็ดตะกอนจากคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว ซึ่งเกิดขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน (pelletizer) ซึ่งมีการไหลของน้ำแบบไหลขึ้น

กระบวนการสร้างเม็ดตะกอนนั้น เริ่มโดยการเติมโคแอกกูแลนต์ชนิดโลหะ (metal coagulant) เช่น เกลืออลูมิเนียม (aluminum salts) บัณฑิต ช่างรงค์ (2535) และ ปริญา ๗ นคร (2535) เริ่มการสร้างเม็ดตะกอนโดยใช้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (poly-aluminum chloride, PACl) ที่พีเอช ในช่วง 6.8 - 7.5 เพื่อให้โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ในรูปที่สามารถจับตัวเป็นของแข็ง (Benschoten และ Edzwald, 1989) ในการทดลองนี้เลือกใช้ PACl เติมลงไปในการกวนเร็ว เพื่อทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในขั้นตอนนี้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว จะเกิดการรวมตัวกันจนกลายเป็นจุลฟล็อก (microflocs) หนึ่ง ที่บริเวณล่างสุดของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้นจะมีการเติมโพลีเมอร์เข้าผสมกับน้ำซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากอุปกรณ์กวนเร็ว เพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงในการเกาะติดกันให้กับจุลฟล็อก ซึ่งจะได้เม็ดตะกอนที่แข็งแรงและมีความหนาแน่นสูง (Tambo and Matsui, 1987) เนื่องจากไม่มีโมเลกุลน้ำแทรกภายในฟล็อกหรือมีน้อยมาก

ดังรูป 3.11

หลังจากนั้นการกวนช้าด้วยความเร็วปานกลาง (moderate agitation) จะช่วยป้องกันมิให้เกิดการโตแบบสุ่มของฟล็อก (random growth) กล่าวคือ ความปั่นป่วนของน้ำจะทำให้ฟล็อกหลวม (loose flocs) ที่รวมตัวกันอย่างไม่แน่น แดกออกจากกัน แล้วเคลื่อนตัวไปสัมผัสกับจุลฟล็อกเกิดการรวมตัวกันแบบหนึ่งต่อหนึ่งอีกครั้ง ได้เป็นเม็ดตะกอนทรงกลมแข็งแรง มีความหนาแน่นสูงสามารถทนต่อความปั่นป่วนของน้ำได้ดี นอกจากนี้พบว่าเม็ดตะกอนขนาดเล็กจะอยู่ส่วนบน และขนาดใหญ่จะอยู่ส่วนล่างของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนแบบไหลขึ้นนี้ (tambo and Matsui, 1987) ทั้งนี้เพราะเม็ดตะกอนขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากกว่า ดังรูป 3.12

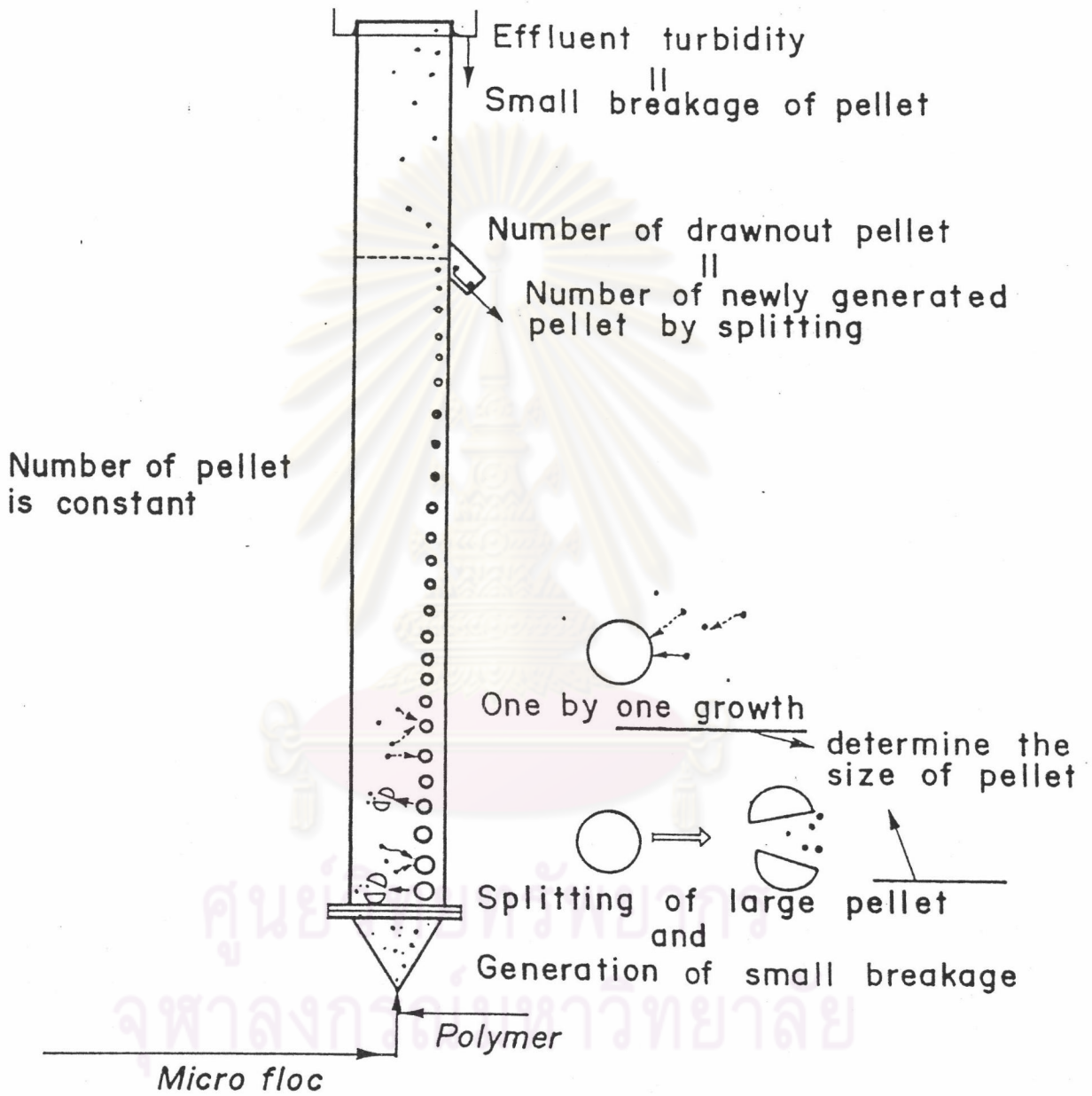


Application of Metastable State
Operation for Clay Suspension

(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.11 การจับตัวกันแบบหนึ่งค่อหนึ่งภายใต้สภาวะเสถียรแบบเมตะ

(Tambo and Matsui, 1987)



Steady State Mass Balance

(Tambo and Matsui, 1987)

รูปที่ 3.12 ลักษณะการเกิดเม็ดตะกอนที่สภาวะคงที่ (Tambo and Matsui, 1987)



3.7 การใช้โพลีเมอร์ในกระบวนการเม็ดตะกอนแบบไหลชั้น

ในกระบวนการเม็ดตะกอนแบบไหลชั้น หลังจากการเติมโคแอกกูแลนต์ เช่น PAC1 ลงในน้ำดิบแล้ว จะมีการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคจนได้อนุภาคเบื้องต้นที่พร้อมจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ การเติมสารโพลีเมอร์หลังจากเกิดอนุภาคเบื้องต้นจะช่วยให้การสมานตะกอนเกิดได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่ของโพลีเมอร์จะเป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้นเหล่านี้ให้รวมตัวกันได้เร็วและเกิดเป็นอนุภาคตะกอนที่มีความแข็งแรงมากขึ้น (Gregory, 1979 ; Mayhew and Raman, 1984 ; Schwayer, 1981) และเนื่องจากมิได้มุ่งหวังที่จะใช้โพลีเมอร์เพื่อทำหน้าที่เป็นสารโคแอกกูแลนต์โดยตรงจึงไม่นิยมใช้โพลีเมอร์ประจุบวก ดังนั้นโคแอกกูแลนต์เอคที่ใช้หลังจากการเติม PAC1 จึงมักเป็นพวกโพลีเมอร์ไม่มีประจุหรือโพลีเมอร์ประจุลบ เพราะโพลีเมอร์เหล่านี้มีโมเลกุลใหญ่เหมาะที่จะใช้เป็นสะพานเชื่อมอนุภาคเบื้องต้น เพื่อให้ได้ฟล็อกที่แข็งแรงมีน้ำหนักมากแยกออกจากน้ำได้ดี อย่างไรก็ตามพบว่าโพลีเมอร์ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของฟล็อก (Tambo and Watanabe, 1978 ; Lagavanker and Gemmell, 1968)

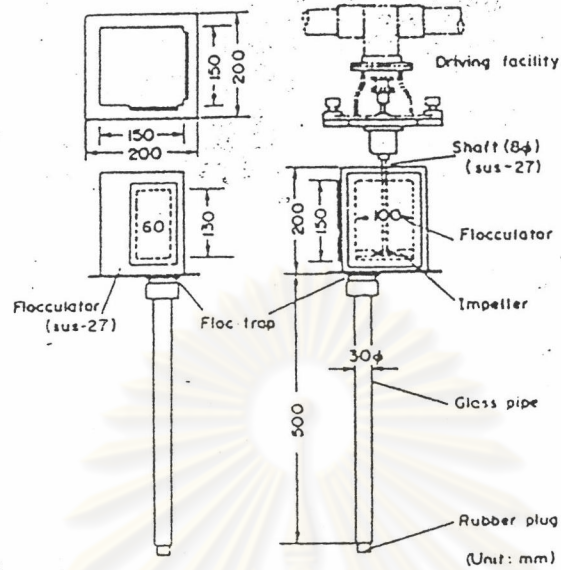
3.8 การศึกษาที่ผ่านมา

- Yusa และ Gaudin (1964) ได้ทำการทดลองโดยใช้ hydrolyzed polyacrylamide (HAPM) เป็นโคแอกกูแลนต์เติมลงไปในน้ำสังเคราะห์จากคินคาโอลิน ให้สารโคแอกกูแลนต์ที่มีความเข้มข้น 0.1 % กวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนผสม จากนั้นจึงนำน้ำดังกล่าวไปใส่ในหลอดแก้วปลาสติกขนาด 100 มล. จำนวน 2 หลอด โดยหลอดแรกเรียกว่า shaking mixer ซึ่งจะนำไปเขย่าอย่างรุนแรง (violent shaking) ในทิศทางตามแนวแกนยาวของหลอดด้วยอัตรา 5 ครั้งต่อนาที แต่ละครึ่งมีระยะแอมพลิจูด 9 ซม. ในระยะเวลาที่กำหนด ส่วนหลอดที่สอง เรียกว่า rotating mixer จะนำไปทำให้เกิดการผสมอย่างเบา ๆ (gentle mixing) โดยการหมุนหลอดดังกล่าวให้แกนนวนท่อม 90 องศา กับแกนของหลอดแก้ว ผลการทดลองพบว่า ในทั้งสองกรณีจะเกิดฟล็อกที่มีลักษณะคล้ายเม็ดตะกอน (pellet-like flocs) ทั้งนี้คาดว่า การกวนผสมโดยวิธีเขย่าจะทำให้โมเลกุลน้ำที่อยู่ในเม็ดฟล็อกถูกขับออกมา

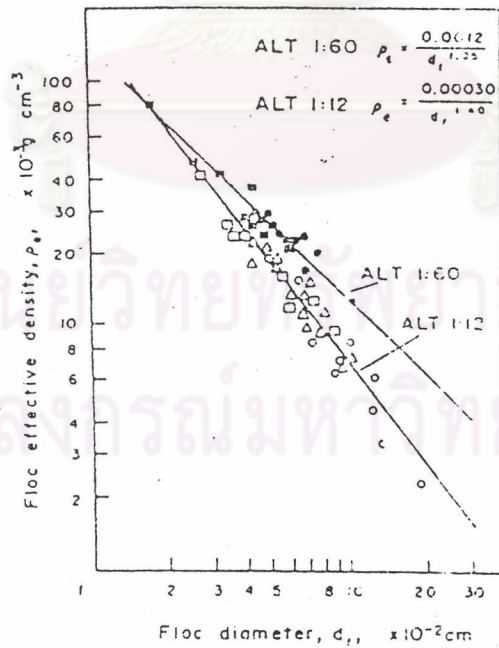
ฟล็อกที่ได้จึงมีลักษณะกลมแกร่ง และมีความหนาแน่นสูงจนสามารถใช้ตะแกรงแยกฟล็อกออกมาจากน้ำได้

- Yusa , Suzuki และ Tanaka (1975) ทำการศึกษาเรื่อง separating liquid form by pellet flocculation ซึ่งเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการก่อกองและการชนที่ใช้พลังงานกลเล็กน้อย และไม่สม่ำเสมอกระทำที่ฟล็อกและทำให้เกิดฟล็อกที่อัดแน่นแข็งแรง

- Tambo และ Watanabe (1978) ได้ศึกษาเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพของฟล็อกเกี่ยวกับความหนาแน่นของฟล็อก ได้พูดถึงคุณลักษณะของความหนาแน่นของฟล็อกที่ได้รับจากผลการทดลอง โดยใช้ฟล็อกที่เกิดจากอนุภาคดินเหนียวและอลูมิเนียมเป็นตัวแทนในการทดลอง โดยการวัดความเร็วของการตกตะกอนของฟล็อกในน้ำที่บรรจุในทรงกระบอกทรงสูง ความหนาแน่นได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าความเร็วของการตกตะกอน และเส้นผ่าศูนย์กลางของฟล็อก ค่าคงที่บางตัว เช่น ค่าความหนาแน่นของน้ำและความหนืด แทนในสมการความเร็วในการตกตะกอนของ Stoke ได้ทำการทดลองโดยใช้เครื่องมือตามรูปที่ 3.13 ในอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองประกอบด้วยห้องสำหรับกระบวนการฟล็อกคูล์เลชัน และฟล็อกจะถูกนำไปสู่กระบอกสำหรับการตกตะกอน ซึ่งจะติดอยู่ที่ห้องสำหรับกระบวนการฟล็อกคูล์เลชัน โดยการเลื่อนแผ่นกั้นระหว่างห้องกับกระบอกทรงสูง ความเร็วในการตกตะกอนและขนาดของฟล็อกจะถูกวัดโดยเครื่องถ่ายภาพที่วางอยู่ข้างอุปกรณ์ โดยในการทดลองใช้สารโคแอกกูแลนต์ อลูมิเนียมซัลเฟตและโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ (PAC1) ใช้ 0.025 N. NaOH เป็นตัวปรับพีเอชในขณะที่ทำโคแอกกูแลชัน กวนเร็วที่ 100 รอบต่อนาที กวนช้าที่ 40 รอบต่อนาทีเป็นเวลาานาน 30 นาที ทำการวัดอัตราเร็วในการตกตะกอนและขนาดของฟล็อกที่ 20 นาทีแรกของการกวนช้าและวัดต่อเนื่องทุก ๆ 10 นาที จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ความหนาแน่นของฟล็อกประสิทธิผล (ผลต่างของความหนาแน่นของฟล็อก-ความหนาแน่นของน้ำ) มีความสัมพันธ์ในลักษณะเป็นเส้นตรงในสเกลของกราฟล็อกการิทึม และพบว่าอัตราส่วนแอลที (ALT Ratio) (ปริมาณความเข้มข้นของไอออนอลูมิเนียมต่อความเข้มข้นอนุภาคแขวนลอย) จะมีผลต่อความหนาแน่นของฟล็อกที่เกิดจากอนุภาคดินเหนียวและอลูมิเนียม เมื่ออัตราส่วน ALT ลดลง วัดที่ขนาดฟล็อกคงที่จะทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นตามรูปที่ 3.14 ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า สารอลูมิเนียมทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกในฟล็อกเป็นผลให้ความหนาแน่นรวมของมวลฟล็อกลดลง ถ้าทำให้เกิดการ



รูปที่ 3.13 อุปกรณ์ในการทดลองของ Tambo และ Watanabe (Tambo and Watanabe, 1978)

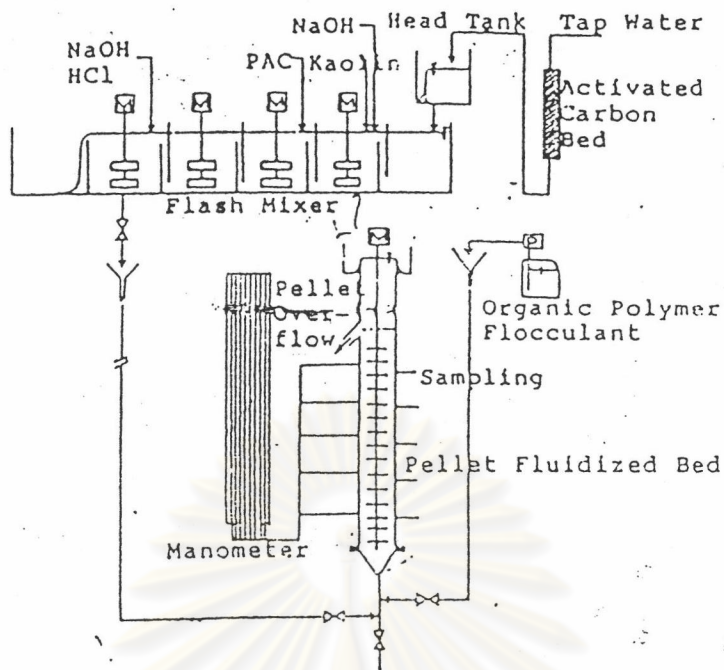


รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประสิทธิผล และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดฟล็อกที่อัตราส่วน ALT ต่าง ๆ (Tambo and Watanabe, 1978)

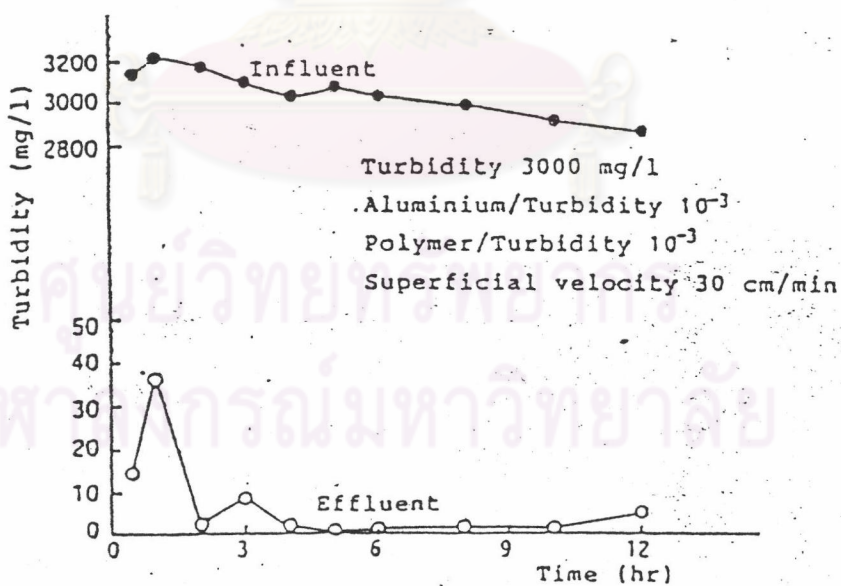
รวมตัวโดยไม่มีโมเลกุลของน้ำเข้าแทรก ทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นสูงได้

- Tambo และ Matsui (1987) ได้ทำการทดลองดังรูป 3.15 โดยเติมโลหะโคแอกกูแลนต์ เช่น เกลืออลูมิเนียม ที่พีเอชเป็นกลาง เพื่อทำให้ผิวของอนุภาคดินเหนียว (clay) เป็นกลางมีโอกาที่จะชนอนุภาคอื่น ๆ ได้ ในขั้นตอนนี้เป็น การเตรียมอนุภาคเบื้องต้นในชุดอุปกรณ์กวนเร็ว (flash mixer) และจะเติมสารอินทรีย์โพลีเมอร์ที่มีประจุลบอย่างอ่อน (Accofloc A-100 PWG) เพื่อให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวแก่จุลฟล็อก โดยจุลฟล็อกที่สัมผัสกับสารอินทรีย์โพลีเมอร์จะแสดงคุณสมบัติเป็นอนุภาคเบื้องต้นด้วย จากนั้นอนุภาคเบื้องต้นจะไหลผ่านชั้นเม็ดตะกอนและทำการสัมผัสแบบหนึ่งต่อหนึ่งต่อไป ในขั้นแรกของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนจะทำการสร้างเม็ดตะกอนเทียมให้เป็นตัวนำก่อน โดยการทำให้อนุภาคเบื้องต้นเกิดการสัมผัสในกระบวนการรวมตะกอนที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป คือ อนุภาคแขวนลอยจะสัมผัสโดยมีโพลีเมอร์เป็นตัวเชื่อม เมื่อเริ่มเดินเครื่องจะใช้อัตราการไหลของน้ำดิบในอัตราที่ต่ำให้ไหลผ่านชั้นเม็ดตะกอนและเพิ่มอัตราการไหลเร็วขึ้นถึง 30 ซม. ต่อนาทีภายในเวลา 30 นาที และรักษาให้อยู่ในอัตราคงที่ต่อไป ในการที่จะรักษาฟล็อกให้มีลักษณะเป็นเม็ดฟล็อกป้องกันไม่ให้เกิดการจับตัวแบบสุ่มโดยทั่วไปการสัมผัสของอนุภาคเบื้องต้นจำเป็นต้องใช้การกวนด้วยแรงและขนาดของใบพัดที่เหมาะสมเพื่อหยุดยั้งการโตของกลุ่มฟล็อกที่ผุดแปลกไปจากเม็ดฟล็อก เป็นการทำให้เม็ดฟล็อกแข็งแรงมีลักษณะเป็นรูปกลม ซึ่งสามารถจะรีดน้ำออกจากสลัดจ์โดยง่ายและรวดเร็ว วิธีการทดลองข้างต้นจะทำการทดลองหลายครั้ง โดยใช้อลูมิเนียมและโพลีเมอร์ในปริมาณต่างๆ รวมทั้งความเข้มข้นของน้ำดิบ อัตราการกวน รูปร่างและระยะห่างของใบกวน โดยมีการวัดตัวแปรของผลการทดลองคือ ความเข้มข้นความขุ่นของน้ำเข้าระบบและออกจากระบบ การแปรเปลี่ยนของผลต่างความดันตลอดความยาวอุปกรณ์สร้างชั้นเม็ดตะกอน ลักษณะภาพของเม็ดฟล็อก เช่น เส้นผ่าศูนย์กลางเม็ดฟล็อกและความหนาแน่นของเม็ดฟล็อก โดยค่าทั้งสองจะเป็นตัวควบคุมความเร็วในการตกตะกอน

จากผลการทดลองตามรูปที่ 3.16 สามารถพัฒนากระบวนการกำจัดความขุ่นที่ความขุ่นสูง โดยใช้เวลาเร็วของน้ำไหลขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนได้ถึง 30 ซม. ต่อนาที ใช้เวลาพักน้ำ (detention time) 5 นาที



รูปที่ 3.15 แบบจำลองที่ใช้ในการทดลองของ Tambo และ Matsui
(Tambo and Matsui, 1987)



รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบความขุ่นในน้ำก่อนเข้าระบบ และหลังผ่านระบบในช่วงเวลาต่าง ๆ (Tambo and Matsui, 1987)

ในรูปที่ 3.17 การศึกษาความดันลดตลอดความสูงของชั้นเมฆตะกอนตลอดระยะเวลา 12 ชั่วโมง พบว่า ในการสร้างเมฆฝัลดให้อยู่ในสภาวะสมดุลใช้เวลาเดินเครื่องประมาณ 6 ชั่วโมง โดยความดันลดสูงสุดวัดได้ 15 ซม.-น้ำ ในสภาวะที่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะไม่คงตัว (transition) สู่สภาวะสมดุล

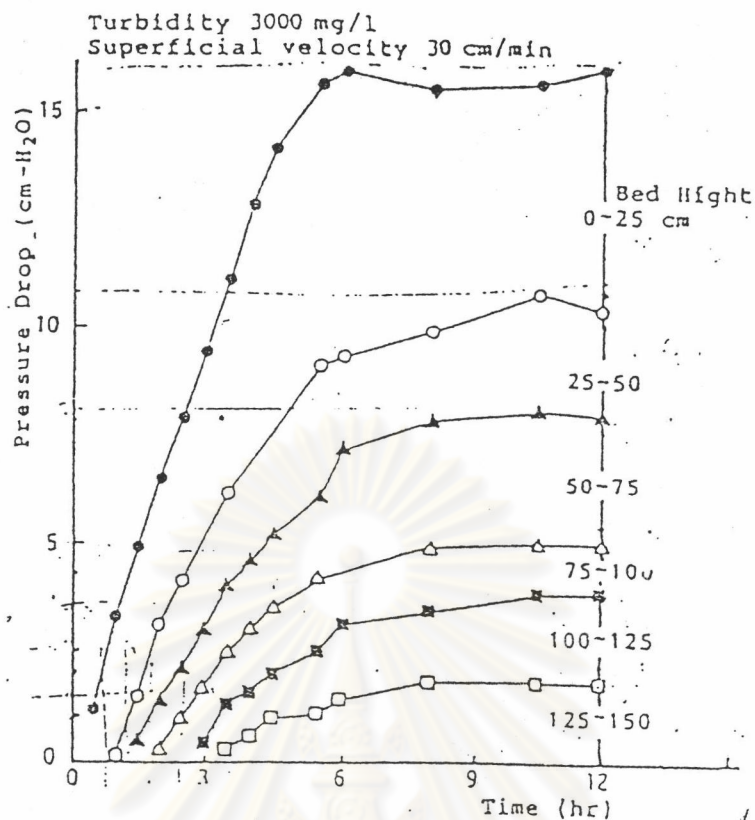
ในการวัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมฆฝัลดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตามรูปที่ 3.18 ในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยวัดตามความสูงของชั้นเมฆตะกอน พบว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของเมฆตะกอนที่เวลา 6 ชั่วโมง แสดงว่าเกิดสมดุลระหว่างการเกิดเมฆฝัลดและการแยกตัว

ในรูปที่ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาแน่นของเมฆฝัลดประสิทธิผล พบว่าความหนาแน่นของเมฆฝัลดเกือบจะคงที่ในช่วงการกระจายของเส้นผ่าศูนย์กลางต่าง ๆ เมื่อเทียบกับฝัลดที่เกิดแบบสุ่มชี้ให้เห็นว่า ความหนาแน่นที่เกิดจากกลุ่มฝัลดมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของเมฆฝัลด

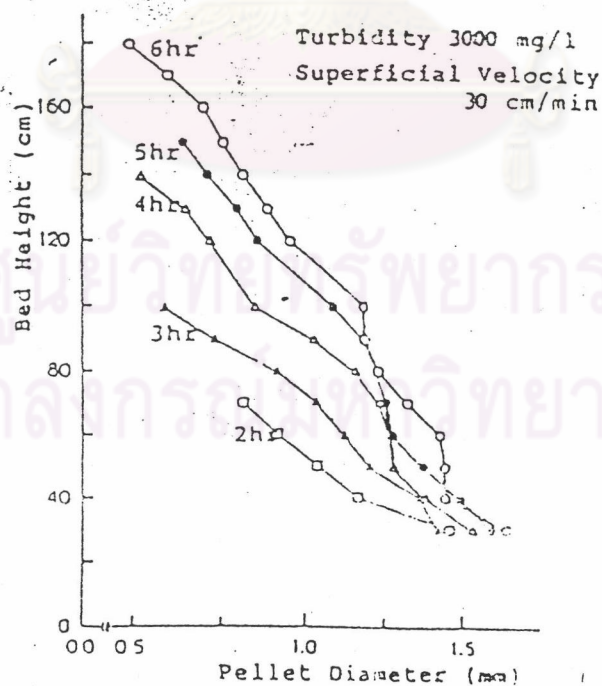
ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมา สามารถนำผลไปใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาได้ ดังนี้

1. ความหนาแน่นของเมฆตะกอนจะขึ้นอยู่กับอัตราการกว และระยะห่าง (pitch) ของใบกว ถ้าอัตราการกวสูงจะสร้างเมฆตะกอนขนาดเล็กกว่า ทำให้ความหนาแน่นเมฆตะกอนสูงตาม และถ้าใช้ใบพัดที่มีขนาดใหญ่ในการกวด้วยพลังงานที่เท่ากันจะสร้างเมฆตะกอนที่มีขนาดเล็กกว่า เพราะมีการกระจายของแรงที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการแตกแยกของเมฆตะกอน

2. ในการบำบัดน้ำดิบที่มีความขุ่นต่ำ เช่นที่ 200 มก./ล. จะต้องเติมโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความเข้มข้นน้ำดิบที่น้อยลง โดยสรุปที่ความเข้มข้น 3,000 มก./ล. จะใช้อัตราส่วนโพลีเมอร์ต่อความเข้มข้นความขุ่นประมาณ 10^{-3} แต่ถ้าความขุ่นมีความเข้มข้น 200 มก./ล. อัตราส่วนจะเพิ่มขึ้น 10^{-2} ซึ่งอัตราส่วนนี้ใช้ร่วมอัตราส่วนเดียวกับอัตราส่วนความขุ่นกับปริมาณอลูมิเนียม



รูปที่ 3.17 การเปลี่ยนแปลงความดันตกในช่วงเวลาต่าง ๆ
(Tambo and Matsui , 1987)



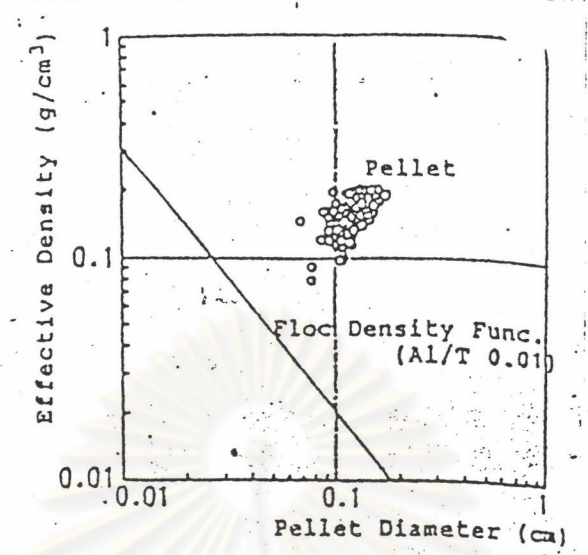
รูปที่ 3.18 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดตะกอน ที่ความสูงของชั้น
ตะกอนต่าง ๆ (Tambo and Matsui , 1987)

และการทดลองโดยไม่มีอิทธิพลจากความขุ่นน้ำดิบ ตามรูปที่ 3.20 พบว่าการแยกตัวของเม็ดตะกอนเกิดการแยกตัวเป็น 2 ส่วน โดยเม็ดตะกอนใหญ่จะจับอนุภาคเบี่ยงต้นต่อไปและเกิดการแตกตัวในส่วนเกินของอนุภาค ซึ่งมีผลทำให้เกิดความขุ่นด้านน้ำออก

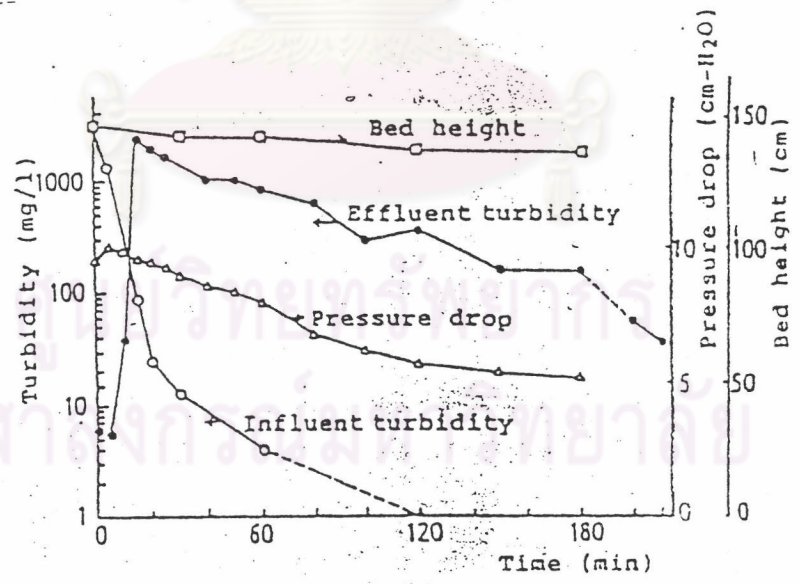
สรุปการศึกษาพบว่า การแยกอนุภาคความขุ่นออกจากน้ำโดยใช้ชั้นเม็ดตะกอนต้องอาศัยความคิดเกี่ยวกับการสร้างสภาวะเสถียรแบบเมตะ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพต้องอาศัยข้อมูลจากการศึกษาข้างต้น สามารถใช้เวลาก็น้ำเพียงไม่กี่นาทีและกำจัดสลัดจ์ที่ออกมาได้ง่ายกว่าระบบแบบเดิม

- Benschoten และ Edzwald (1990) ได้ทำการศึกษากระบวนการโคแอกกูเลชันโดยใช้สารส้มและโพอลิอะลูมินัมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของโคแอกกูแลนต์ทั้งสอง การทดลองทั้งหมดใช้วิธีจาร์เทสต์ (jar test) ซึ่งมีวิธีการทำโดยใส่น้ำตัวอย่าง ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส และปรับให้มีค่าพีเอชประมาณ 4 โดยใช้ 0.1 N HCl ลงไป ในบีกเกอร์ขนาด 250 มล. จากนั้นจึงเติมโคแอกกูแลนต์ให้มีค่าความเข้มข้นของอลูมิเนียม เท่ากับ 13.5 มก./ล. แล้วจึงปรับค่าพีเอชของน้ำด้วย 0.1 N NaHCO₃ และ/หรือ NaOH จนได้ค่าพีเอชที่ต้องการ แล้วนำไปเข้าเครื่องกวนด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที ทำเช่นนี้ที่ละบีกเกอร์จนครบทั้ง 6 บีกเกอร์ โดยแต่ละบีกเกอร์จะมีพีเอชต่างกัน เมื่อครบแล้วจึงปรับความเร็วรอบให้เหลือ 20 รอบต่อนาที แล้วทำการกวนช้าพร้อมกันทั้ง 6 บีกเกอร์ เป็นเวลา 30 นาที แล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนอีก 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำน้ำใส่ที่ได้มาวิเคราะห์ค่าพีเอช, อุณหภูมิ, ปริมาณ-อลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (dissolved aluminum) ความขุ่นตกค้าง และ Electrophoretic Mobility (EPM) จากนั้นจึงทำการทดลองเหมือนข้างต้นทั้งหมดอีก แต่คราวนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิของน้ำเท่ากับ 4 องศาเซลเซียสโดยใช้อ่างปรับอุณหภูมิ (thermostatically controlled water bath)

ผลการทดลองสรุปได้ว่าจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียมในน้ำเนื่องจากสารส้มพบว่า อลูมิเนียมจะแสดงรูปแบบของโมโนเมอร์ (monomer) เกือบทั้งหมด ส่วนอลูมิเนียมจาก



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นประสิทธิผลและขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดฟล็อก (Tambo and Matsui, 1987)



รูปที่ 3.20 ลักษณะของชั้นเม็ดตะกอนเมื่อไม่มีอิทธิพลจากความขุ่นของน้ำดิบเทียบกับเวลา (Tambo and Matsui, 1987)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ จะแสดงในรูปแบบของโพลิเมอร์ (polymer) ถึง 90%

ต่อมาเขาได้ทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของสารส้ม และพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสภาวะของแข็ง (solids phase) โดยทำให้เกิดการตกตะกอนด้วยการไตเตรทสารละลายโคแอกกูแลนต์ทั้งสองตัวด้วย NaOH จนมีพีเอช 7.5 จากนั้นจึงละลายตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยการลดจนมีพีเอชเท่ากับ 4 แล้วทำการตรวจสอบผลทันที พบว่ารูปแบบของอลูมิเนียมที่เกิดจากการละลายตะกอนของสารส้มยังคงเป็นโมโนเมอร์ แสดงว่าตะกอนที่เกิดจากสารส้มคืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ส่วนพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์แสดงรูปแบบของโพลิเมอร์ประมาณ 90% เหมือนก่อนทำให้เกิดตะกอนนี้ให้เห็นว่า ขณะตกตะกอนพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ยังคงรักษาสภาพโพลิเมอร์ของอลูมิเนียมไว้ได้ และยังสังเกตได้ว่าตะกอนของสารส้มมีขนาด (25-100 ไมโครเมตร) ใหญ่กว่าตะกอนของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ มีลักษณะเป็นปุยเกาะกันไม่แน่น ส่วนตะกอนของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็ก (<25 ไมโครเมตร) มีลักษณะกลมเกาะติดกันเป็นกลุ่ม ที่พีเอชมากกว่า 9 ขึ้นไป ตะกอนของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ที่ได้จึงจะเหมือนกับตะกอนที่เกิดจากสารส้ม นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของสารส้มมาก เพราะทำให้ไฮดรอกซิลไอออนในน้ำเปลี่ยนแปลง แต่จะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์น้อยมาก

ต่อมาทำการทดลองเพื่อแยก FA (fulvic acid) ซึ่งอยู่ในรูปสารละลายออกจากน้ำโดยวิธีการตกตะกอน และใช้สารส้มกับพอลิอลูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ ดำเนินการทดลองเป็น 3 แบบด้วยกัน คือ

1. การทดลองจาร์เจสต์ขนาดเล็ก โดยใช้ น้ำซึ่งมี FA อยู่ 2 , 5 และ 10 มก. ดีไอซี/ล. ปริมาณ 200 มล. ที่อุณหภูมิห้อง (22.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส) ดำเนินการทดลองโดยวิธีจาร์เจสต์เหมือนกับตอนแรกทุกประการ แล้วนำน้ำใส่ที่ได้มาวัดค่าพีเอช , อุณหภูมิ , การดูดกลืนแสงยูวี (254 นาโนเมตร) , ปริมาณอลูมิเนียมที่ละลายน้ำ (dissolved aluminum), ความขุ่นตกค้าง และ Electrophoretic Mobility (EPM) ผลการทดลอง



พบว่า สารส้มสามารถกำจัด FA ออกจากน้ำได้ดีกว่าโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์เล็กน้อย และที่พีเอช 7 ทั้งสองตัวจะสามารถแยก FA ออกจากน้ำได้ดีกว่าที่พีเอช 5 ประมาณ 8 - 11 % แต่จะใช้ปริมาณมากกว่าถึง 2 เท่า และเพื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม หากต้องการประสิทธิภาพในการกำจัด FA ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป จะต้องปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 5.5 - 7 เหมือนกัน

2. การทำจาร์เทสต์ขนาดใหญ่ ทำการทดลองจาร์เทสต์โดยใช้ถังรวมตะกอนชนิด 21. Wagner แทนโดยกำหนดตัวแปรอิสระสำหรับการทดลองนี้ คือ ชนิดของโคแอกกูแลนต์ (สารส้ม และโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์), พีเอช (5.5 และ 7), ดีไอซี (2 และ 10 มก./ล.) และอุณหภูมิ (4 และ 22 ± 1 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่า ทั้งสารส้มและโพลี-อลูมิเนียมคลอไรด์กำจัด FA ในน้ำ (โดยการวัดค่าดีไอซี) ที่พีเอช 7 ได้ดีกว่าที่พีเอช 5.5 และพบว่าโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์กำจัดความขุ่นได้ดีกว่าสารส้มทั้งที่พีเอช 7 และที่พีเอช 5 ส่วนที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จะพบว่าความขุ่นตกค้างมีค่าสูงแต่ฟล็อกยังคงตกตะกอนได้ดี ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเกิดการหมุนเวียนของมวลน้ำเนื่องจากอุณหภูมิ

3. การศึกษาแบบซ้ำซ้อน ทำการทดลองโดยใช้ 200 มล. ของ FA ที่ความเข้มข้น 2 มก./ล. ปรับค่าพีเอชให้ได้ 5 หรือ 7 แล้วเติมสารส้มหรือโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ให้มีความเข้มข้น 0.2, 0.5 หรือ 1.0 มก. อลูมิเนียม/มก. ของ FA หลังจากเติมโคแอกกูแลนต์แล้วจึงปรับค่าพีเอชให้ได้ตามต้องการ จากนั้นจึงทำการกรองสารละลายทันทีด้วยตะแกรงขนาด 0.22 ไมโครเมตร แล้วทำการวิเคราะห์ Al speciation, พีเอช, การดูดกลืนแสงยูวี ผลการทดลองพบว่า แนวโน้มของการเกิด Al complexation เนื่องจากโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และสารส้มเหมือนกันที่พีเอชเดียวกัน ที่พีเอช 5 พบว่าเกิด Al complexation เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น ส่วนที่พีเอช 7 พบว่าจะเกิด Al complexation น้อยลงเมื่อความเข้มข้นของโคแอกกูแลนต์เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่าโพลีอลูมิเนียมคลอไรด์มีความแตกต่างจากสารส้ม กล่าวคือ เมื่อมีการตกตัวในน้ำ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์แสดงรูปแบบส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโพลีเมอร์ ส่วนสารส้มจะแสดงรูปแบบของโมโนเมอร์ และยังคงอยู่ในสถานะของแข็งที่แตกต่างกัน จึงน่าจะ

ให้ผลการเกิดโคแอกกูเลชันที่แตกต่างกันด้วย

- Tambo and Wang (1992) ได้ทำการศึกษาเรื่อง treatment of highly turbid and colored water by fluidised pellet bed separation โดยใช้ โพลีเมอร์ไรโซลูมินิมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนท์และใช้โพลีเมอร์นอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนท์เอค

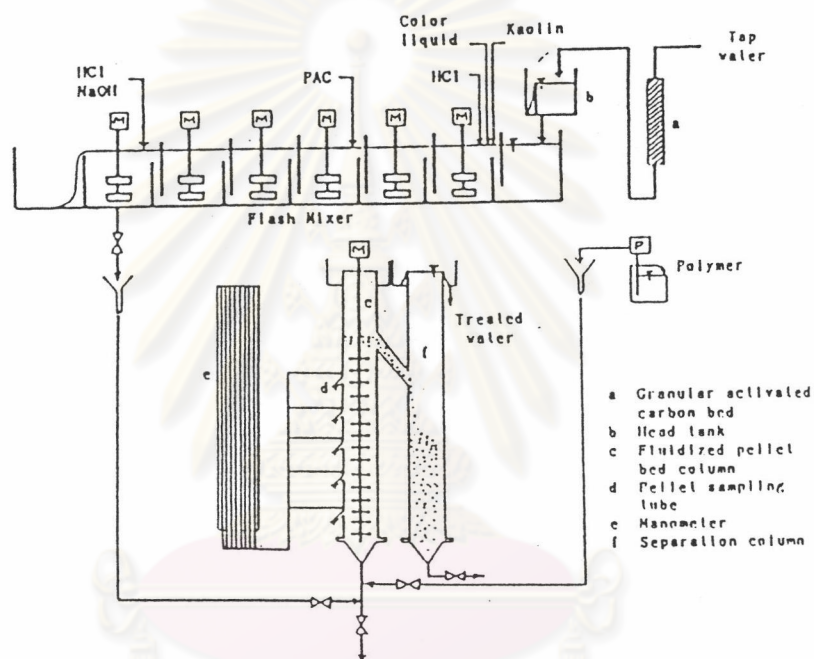
วิธีการทดลอง

1. ใช้น้ำสังเคราะห์ด้วยสีที่ได้จากน้ำในกระบวนการผลิตกระดาษซึ่งมีสีค่า ปริมาณสีหลายความเข้มข้น (100, 200, 500, 1000, 1500 และ 2000 หน่วยสี) และความขุ่นสังเคราะห์ 1000 300 , 100 มก./ล.
2. ทำจาร์เทสต์เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่เหมาะสมของการทำโคแอกกูเลชันที่ได้ผล
3. เมื่อมีการสังเคราะห์น้ำให้ได้ความขุ่นและสีที่ต้องการแล้ว ทำการปรับพีเอชให้ได้ตามต้องการโดยใช้กรดไฮดรอกลอริก จากนั้นน้ำจะถูกผ่านเข้าสู่อุปกรณ์เร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพด้วยโพลีลูมินิมคลอไรด์ จากนั้นจึงผ่านน้ำเข้าสู่อุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอนทางด้านล่าง โดยเติมโพลีเมอร์นอนไอออนเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นโคแอกกูแลนท์เอค ความเร็วของน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที ภายในอุปกรณ์ให้พลังงานกลด้วยการกวนใบพัดที่ความเร็ว 36 รอบต่อนาที และที่ระดับ 145 ซม. มีท่อน้ำล้นเพื่อให้ น้ำและเม็ดตะกอนที่ไหลขึ้นมาถึงระดับนี้ไหลล้นลงสู่อุปกรณ์สำหรับแยกน้ำและเม็ดตะกอน โดยเม็ดตะกอนจะตกลงสู่ด้านล่างและน้ำผลิตจะไหลล้นออกทางด้านบน (รูปที่ 3.21)

ผลการทดลอง

1. การกำจัดสีและความขุ่นได้ผลดีเมื่ออัตราส่วนระหว่างสีและความขุ่นมีค่าน้อย-

content measurement.



Flow Chart of the Fluidized Pellet Bed Separation System

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.21 อุปกรณ์ในการทดลองของ Tambo และ Wang
(Tambo and Wang, 1992)

กว่า 1 หรือเท่ากับ 1 ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที

2. อนุภาคสีที่ละลายได้ถูกกำจัดได้ดีมากกว่า 90% และกำจัดความขุ่นได้ 100% (กรณีที่กำจัดได้ 100% ความขุ่นต้องมีค่าสูงกว่าสีมาก ๆ)

3. ช่วงของเม็ดตะกอนที่ทำงานได้ดีคือ 0.02-0.1 ก./ลบ.ซม. มีความชื้นน้อยกว่า 90% ในการกำจัดตะกอนที่ใช้วิธีการกรองแยกโดยไม่ต้องใช้วิธีทำให้เข้มข้นเลย

4. ที่พีเอช 5 (กรดอ่อน) พบว่าสามารถกำจัดสีและความขุ่นได้ดีที่สุด

- บัณฑิต (2535) ได้ศึกษาการผลิตน้ำใสแบบฟลูอิดไดซ์เบดของเม็ดตะกอน ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 และ 40 ซม./นาที โดยมีเวลากักน้ำในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน 8.33 และ 6.25 นาที ตามลำดับ และมีเวลาในการกำจัดความขุ่นในชั้นเม็ดตะกอน 5.0 และ 3.8 นาที ตามลำดับ โดยน้ำดิบที่มีความขุ่นสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ถูกบำบัดด้วยการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ เป็นโคแอกกูแลนต์ในปริมาณ 1, 2, 3, และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์แอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ดในปริมาณ 0.1, 0.2 และ 0.3 มก./ล. รวมทั้งใช้ความเร็วในการกวนของใบพัดกวนน้ำที่ 5, 10, และ 15 รอบต่อนาที ได้ผลการศึกษา ดังนี้

1. การใช้ PACl ปริมาณมากจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้ PACl ปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้ PACl ปริมาณน้อยต้องอาศัยปริมาณโพลีเมอร์แอนไอออนเพิ่มมากขึ้น จึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ

2. การใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณมากจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้โพลีเมอร์แอนไอออนในปริมาณน้อย ต้องอาศัยปริมาณ PACl มากขึ้นจึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ

3. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดตะกอนอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 มิลลิเมตร

และความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอน อยู่ระหว่าง 40 - 70 ซม./นาที

4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ต้องการความเร็วของใบพัดกวาน้ำน้อย ในทางตรงกันข้ามที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที ต้องการความเร็วของใบพัดกวาน้ำมากกว่า

5. วิธี fluidized pellet-floc bed clarifier สามารถลดความขุ่นจาก 50 เอ็นทียู เหลือน้อยกว่า 3 เอ็นทียู

6. ผลของการบำบัดน้ำด้วยวิธี fluidized pellet-floc bed clarifier สามารถบำบัดน้ำได้มากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบธรรมดา (conventional sedimentation tank) 9 เท่า และมากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทค (solids contact clarifier) 3 เท่า รวมทั้งใช้พื้นที่ และขนาดของถังตกตะกอนน้อยกว่าทั้ง 2 วิธีข้างต้นด้วย

- นฤชา (2535) ได้ศึกษาถึงการก่อเม็ดตะกอนโดยสารส้ม เป็นกระบวนการกำจัดความขุ่น โดยการสร้างเม็ดตะกอนให้เกิดขึ้นในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน เพื่อทำหน้าที่ดักจับอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจากถังกวนเร็วด้วยวิธีการไหลแบบไหลขึ้น ทำการวิจัยโดยใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลินให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู และใช้ความเร็วใบพัดในอุปกรณ์กวนเร็วเท่ากับ 100 รอบ/นาที ตัวแปรควบคุมที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของสารส้มเท่ากับ 5, 10, 20, 30 มก./ล. ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบเท่ากับ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 มก./ล. ความเร็วของน้ำไหลขึ้นเท่ากับ 30, 40 ซม./นาที ความเร็วของใบพัดกวาน้ำในอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน 5, 10, 15 รอบ/นาที จากการวิจัยพบว่า

1. ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในไม่เกิน 3 ชั่วโมง โดยเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมากขึ้น

2. การเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมากขึ้น ทำให้ความขุ่นของน้ำ-

ผลทดลอง

3. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (0.05 ถึง 0.1 มก./ล.) มีผลกระทบต่อความขุ่นของน้ำผลิตมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นสูง (0.2 ถึง 0.3 มก./ล.) คือ มีความขุ่นน้ำผลิตเท่ากับ 0.35 ถึง 8.5 เทียบกับ 0.18 ถึง 1.8 ตามลำดับ

4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที ทุกค่าความเร็วใบพัด หากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู จะต้องใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 5 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.1 ถึง 0.3 มก./ล. หรือความเข้มข้นของสารส้ม 10 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.05 มก./ล.

5. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ทุกค่าความเร็วใบพัด หากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู จะต้องใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 5 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.1 ถึง 0.3 มก./ล. หรือความเข้มข้นของสารส้ม 20 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.05 มก./ล.

6. ด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 และ 40 ซม./นาที และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบสูง คือ ในระดับ 0.1, 0.2, 0.3 มก./ล. ให้ค่าความขุ่นของน้ำที่ผลิตไม่แตกต่างกันนัก

7. ที่ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบต่ำหรือ 0.05 มก./ล. เมื่อทำการทดลองโดยความเร็วที่ไหลขึ้น 40 ซม./นาที จะมีค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่าเมื่อทำการทดลองโดยใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที

8. ที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำสูง จะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่าที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำต่ำ

9. อธิพลของความเร็วใบพัดที่มีต่อความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบเพิ่มขึ้น

10. เม็ดตะกอนที่อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์สร้างเม็ดตะกอน มีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเม็ดตะกอนที่อยู่ด้านบน

11. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นตะกอนเดียวกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมาก เม็ดตะกอนจะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบน้อย

12. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นตะกอนเดียวกัน การบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ได้ความเร็วในการตกตะกอนของเม็ดตะกอนสูงกว่าเมื่อบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาที

- ปริญญ (2535) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงชั้นเม็ดตะกอนที่ระดับต่าง ๆ (70 , 90 , 110 และ 130 ซม.) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น โดยมีการใช้โพลี-อลูมิเนียมคลอไรด์ (PACl) เป็นโคแอกกูแลนต์ในปริมาณ 1 , 2 , 3 และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์แอนไอออนเป็นโคแอกกูแลนต์เอดในปริมาณ 0.1 มก./ล. โดยมีการใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 40 ซม./นาที ทดลองที่ช่วงห่างใบพัด 4 ค่า คือ 5, 10, 15 และ 20 ซม. จากการวิจัยพบว่า

1. ปริมาณ PACl ที่ใช้ไม่มีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น แต่ปริมาณ PACl สูงมีแนวโน้มในการกำจัดความขุ่นดีขึ้น

2. รูปแบบของช่วงห่างใบพัดที่ใช้สำหรับระบบเมล็ดตะกอน ควรมีรูปแบบที่มีความถี่ของใบพัดเรียงจากตอนล่างสู่ตอนบนมีค่ามากไปหาน้อย (เมื่อเปรียบเทียบกับ บัณฑิต, 2535) เนื่องจากรูปแบบใบพัดดังกล่าว ให้ค่าความปั่นป่วนที่เหมาะสมต่อระบบของเมล็ดตะกอนที่มีวัฏจักรการก่อตัวและแตกออกที่เกิดอยู่ภายในตลอดเวลา ที่บริเวณตอนล่างของอุปกรณ์ผสมตะกอนจะมีการแตกตัวของเมล็ดตะกอน และได้ส่วนที่แตกออกที่มีขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ส่วนบน ดังนั้นทางส่วนล่างจึงต้องการแรงปั่นป่วน (ค่า G) ที่มากกว่าส่วนบน

3. ความสูงขึ้นเมล็ดตะกอนมากขึ้นจะให้ผลการกำจัดความขุ่นดีขึ้น เนื่องจากระบบมีช่วงความยาวในการกำจัดความขุ่นที่มากขึ้นทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีความขุ่นน้อยลง จากการวิจัยพบว่าที่ความสูงขึ้นเมล็ดตะกอน 130 ซม. เป็นความสูงที่ให้ผลการกำจัดความขุ่นที่ดีที่สุด

4. เวลาการเดินระบบเพิ่มขึ้นเมล็ดตะกอน ทำให้มีการสะสมของการจับตัวเป็นของแข็งบนผิวของเมล็ดตะกอนมีมากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเมล็ดตะกอนมีขนาดใหญ่และหนักกว่าเมล็ดตะกอนที่เวลาการเดินระบบน้อย ๆ เม็ดตะกอนที่มีขนาดใหญ่เมื่อถูกแรงเฉือนของใบพัดกวนน้ำและความปั่นป่วนอย่างต่อเนื่องตลอดความยาวของอุปกรณ์สร้างเมล็ดตะกอน จะทำให้เมล็ดตะกอนเหล่านั้นแตกออก ได้เมล็ดตะกอนที่มีขนาดเล็กลอยขึ้นสู่ผิวบนของอุปกรณ์สร้างเมล็ดตะกอน ดังนั้นจึงพบว่าเมล็ดตะกอนจะมีขนาดจัดเรียงจากใหญ่ไปเล็ก จากตอนล่างสู่ตอนบนของอุปกรณ์สร้างเมล็ดตะกอน และเมื่อทำการวัดอัตราเร็วในการตกจมตัวและขนาดของเมล็ดตะกอนจากตอนบนสู่ตอนล่างของชั้นเมล็ดตะกอนจะได้ค่าที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

5. การวัดขนาดและความเร็วในการจมตัวของเมล็ดตะกอนของผู้ทำการทดลอง แต่ละคนอาจมีผลที่ไม่เหมือนกัน (บัณฑิต, 2535 ; นฤชา, 2535) อาจเกิดจากการเลือกสูตรตัวอย่างของเมล็ดตะกอนที่มีความหลากหลาย แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของผลที่ได้ของคน ๆ เดียวกัน ย่อมให้ผลที่สอดคล้องกันตลอดการทดลอง

6. ค่าเอสเอสมีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นที่ออกมาจากระบบอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือที่เงื่อนไขใด ๆ ที่มีผลต่อความขุ่น ก็จะมีผลต่อเอสเอสที่ออกมาจากระบบด้วยเช่นกัน หรือ

กล่าวง่าย ๆ ได้คือ ระบบที่กำจัดความขุ่นได้ดีจะมีของแข็งอนุภาคเล็ก ๆ หลุดออกจากชั้นเม็ดตะกอนได้น้อยไปด้วย ซึ่งจากการทดลองจะได้ เอสเอส อยู่ในช่วง 6.5-21 มก./ล.

7. ระบบกำจัดความขุ่นโดยใช้ระบบเม็ดตะกอน ในเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง สามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบที่ 50 เอ็นทียูได้ถึง 89% โดยใช้ปริมาณสาร PACl สูงสุดเพียง 4 มก./ล. โพลีเมอร์ต่ำถึง 0.1 มก./ล. โดยระบบยังสามารถใช้อัตราการไหลขึ้นได้ถึง 40 ซม./นาที



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย