

## บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร

### 3.1 ทฤษฎี สมมุติฐาน หลักการ และเหตุผล

#### 3.1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน และฟล็อกคูเลชัน

##### 3.1.1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ เพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มารวมตัวกันเป็นฟล็อก กลไกในการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์จะเกิดขึ้นในขั้นตอนการกวนเร็ว ซึ่งมีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ ได้แก่ ลักษณะและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบ พีเอช ชนิด และปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ ตลอดจนความปั่นป่วนของน้ำในขณะกวนเร็ว

สารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชันสามารถจำแนกได้เป็นเกลือของโลหะและสารโพลีเมอร์ เกลือของโลหะได้แก่ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เพอร์ริกัลเฟต เป็นต้น สารโพลีเมอร์ได้แก่ สารโพลีเมอร์ประจุบวก ประจุลบ ไม่มีประจุ และทั้งประจุบวกและประจุลบ (Schwayer, 1981) ชนิดของสารโคแอกกูแลนต์จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประเภทของกลไกที่เกิดขึ้น กล่าวคือสารโคแอกกูแลนต์ที่เป็นเกลือของโลหะอาจทำให้เกิดกลไกแบบดูดติดผิวและสะเทินทางไฟฟ้า (adsorption and charge neutralization mechanism) หรือกลไกแบบกวาด (sweep mechanism) หรือกลไกแบบรวม ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ ความเข้มข้นของอนุภาคความขุ่น ลักษณะทางเคมีของน้ำคือพีเอชและปริมาณไอออนในน้ำ และระดับความปั่นป่วนในน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์กับเวลาในการผสม ซึ่งกลไกต่างๆสามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 3.1.1.1.1 กลไกลดความหนาของชั้นกระจาย

การเพิ่มจำนวนของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของอนุภาคคอลลอยด์มีผลทำให้ชั้นกระจายมีความหนาลดลง ซึ่ตาโพเทนเชียลลดลง การที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากมีประจุบวกเข้าไปออกันอยู่ใกล้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์เพิ่มขึ้นทำให้อำนาจของประจุลบของอนุภาคไม่สามารถส่งไปได้ไกลเท่าเดิม โดยไอออนต่างๆจะมีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายไม่เท่ากัน ไอออนที่มีวาเลนซ์ 1, 2 และ 3 จะมีอำนาจในการลดความหนาของชั้นกระจายเป็นสัดส่วน 1:10:1000 (มันสัน ดัน จุลเวศม์, 2538)

### 3.1.1.1.2 กลไกดูดติดผิวและสะท้อนทางไฟฟ้า

การเติมสารเคมีบางชนิดสามารถดูดติด (adsorbed) บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้ ถ้าสารเหล่านั้นมีประจุตรงข้ามกับคอลลอยด์ การดูดติดผิวจะมีผลในการลดอำนาจศักย์ไฟฟ้าและทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ กลไกดูดติดผิวนี้ต่างจากกลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจาย 3 ประการคือ

ก. กลไกแบบดูดติดผิวต้องการไอออนต่างชนิดน้อยกว่ากลไกแบบลดความหนาของชั้นกระจาย เนื่องจากไอออนต่างประจุสามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ การทำลายศักย์ไฟฟ้าจึงได้ผลดีกว่าไอออนต่างประจุที่ไม่สามารถเข้าถึงผิวอนุภาคได้

ข. การทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ด้วยกลไกแบบดูดติดผิวเป็นแบบสโตยชิโอเมตริก กล่าวคือปริมาณโคแอกกูแลนต์ที่ใช้เพิ่มหรือลดตามการเพิ่มหรือลดของปริมาณอนุภาคคอลลอยด์ แต่การทำลายเสถียรภาพแบบลดความหนาของชั้นกระจายไม่เป็นแบบสโตยชิโอเมตริก

ค. กลไกแบบดูดติดผิวสามารถเปลี่ยนประจุคอลลอยด์ให้เป็นตรงกันข้ามได้ โดยการใช้โคแอกกูแลนต์มากเกินไป (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2538)

### 3.1.1.1.3 กลไกแบบกวาด

การเติมสารประกอบเกลือของโลหะบางชนิดลงในน้ำในปริมาณที่พอเพียงจะมีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อนุภาคคอลลอยด์อาจเป็นแกนในของผลึกดังกล่าวเพื่อทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่หรืออาจจับตัวรวมกับผลึก ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้อาจถือว่าการเพิ่มขนาดหรือน้ำหนักให้กับอนุภาคคอลลอยด์เป็นผลให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพและสามารถตกตะกอนได้ สารโคแอกกูแลนต์เช่น สารส้ม เพอริคลอไรด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต และปูนขาว สามารถทำให้เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันโดยการสร้างผลึก  $Al(OH)_3$ ,  $Fe(OH)_3$ ,  $Mg(OH)_2$  และ  $CaCO_3$  ซึ่งล้วนเป็นผลึกสารที่ไม่ละลายน้ำ การกำจัดคอลลอยด์โดยใช้กลไกแบบนี้มักเรียกว่า sweep floc coagulation หรือห่อหุ้มคอลลอยด์

ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ที่เหมาะสมของกลไกแบบกวาดจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของคอลลอยด์ กล่าวคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะต้องใช้โคแอกกูแลนต์จำนวนมากจึงจะเกิดโคแอกกูเลชันได้ดี ในทางตรงกันข้ามน้ำที่มีความขุ่นสูงอาจใช้โคแอกกูแลนต์น้อยกว่า เหตุผลคือน้ำที่มีความขุ่นต่ำจะมีโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาคน้อย ดังนั้นแม้ว่าการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์จะเกิดขึ้นแล้วก็ตามแต่โคแอกกูแลนต์อาจเกิดขึ้นได้ไม่เต็มที่ควร การใช้โคแอกกูแลนต์ปริมาณสูงก็เพื่อสร้างผลึกจำนวนมากๆสำหรับเป็นเป้าสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ แต่ในกรณีน้ำความขุ่นสูงโอกาสสัมผัส

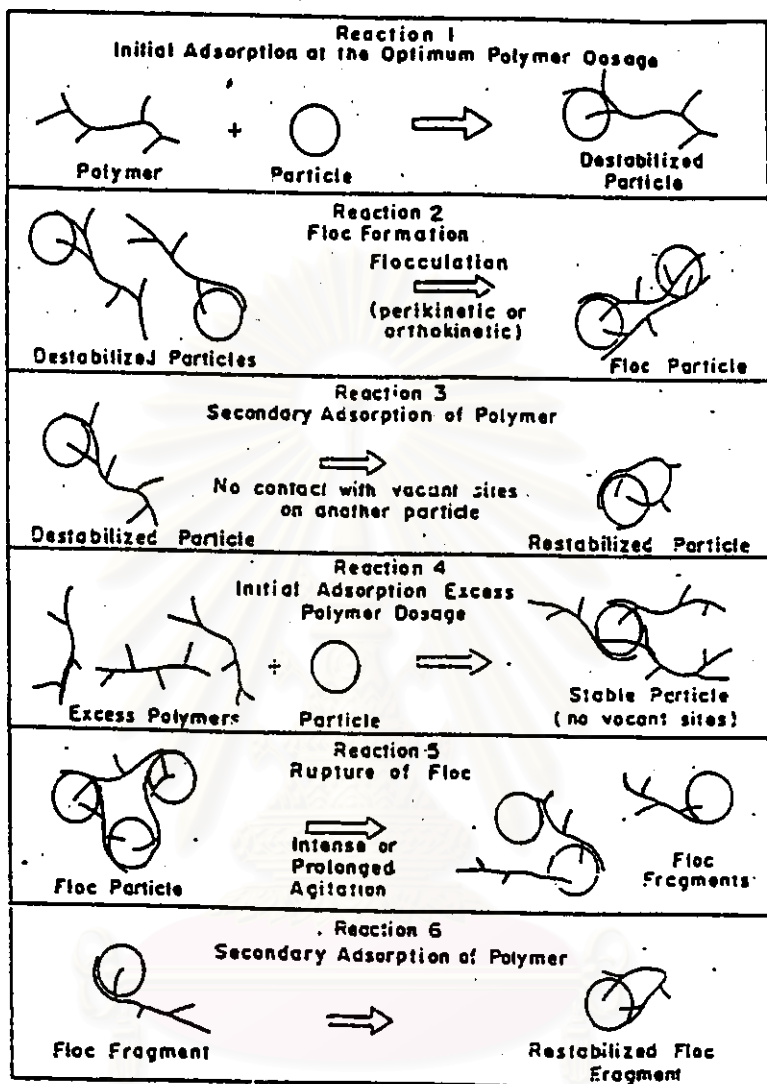
ย่อมมีมากจึงไม่จำเป็นต้องอาศัยเป้าสัมผัสจากภายนอกมากเท่าในกรณีแรก (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2538)

#### 3.1.1.1.4 กลไกแบบร่วม

กลไกแบบร่วมเป็นการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ร่วมกันระหว่างกลไกแบบดูดติดผิวและสะท้อนทางไฟฟ้า กับกลไกแบบกวาด โดยที่ไม่มีกลไกชนิดหนึ่งชนิดใดมีอิทธิพลสูงกว่ากลไกอีกชนิดหนึ่งจนกลไกชนิดหนึ่งไม่มีนัยสำคัญ

#### 3.1.1.1.5 กลไกการใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม

โพลีเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งอาจมีประจุบวก ประจุลบ หรือไม่มีประจุก็ได้ กลไกการทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์โดยการใช้โพลีเมอร์สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า polymer bridging ดังรูปที่ 3.1 ตามทฤษฎีนี้โมเลกุลของโพลีเมอร์สามารถเกาะติดบนอนุภาคได้หลายตำแหน่งดังปฏิกิริยาที่ 1 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องมาจากประจุที่ต่างกันของโพลีเมอร์และอนุภาคคอลลอยด์หรือแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคที่เหมือนกันก็ได้ อนุภาคที่มีโพลีเมอร์เกาะติดอยู่โดยมีปลายอิสระสำหรับเกาะบนอนุภาคอื่น ถือว่าเป็นอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) อนุภาคดังกล่าวสามารถจับตัวกับอนุภาคอื่นๆ โดยมีโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อมดังปฏิกิริยาที่ 2 การต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์จะเกิดขึ้นได้ครบเท่าที่มีโพลีเมอร์และตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของโพลีเมอร์ไม่มีที่เกาะจับบนอนุภาคอื่น (ไม่ว่าด้วยเหตุผลใดก็ตาม) ปลายอิสระก็จะเกาะจับบนอนุภาคอันเดิมดังปฏิกิริยาที่ 3 ทำให้เสียประโยชน์ 2 ประการคือ ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับอนุภาคอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกสารโพลีเมอร์ยึดเกาะหลายตำแหน่งจนไม่มีปลายอิสระและไม่มีที่ว่างเรียกว่าเป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) การใช้โพลีเมอร์มากเกินไปอาจก่อให้เกิดผลเสียเพราะโพลีเมอร์หลายโมเลกุลจะไปเกาะบนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับเป็นที่จับของปลายอิสระของโพลีเมอร์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ดังปฏิกิริยาที่ 4 อนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นแบบที่มีเสถียรภาพ และนอกจากนี้การกวนน้ำแรงหรือนานเกินไปก่อให้เกิดผลเสียได้เนื่องจากฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วจะแตกออกดังปฏิกิริยาที่ 5 และอาจทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับกับอนุภาคอันเดิมเสถียรภาพของคอลลอยด์จึงกลับคืนมาใหม่อีก ดังปฏิกิริยาที่ 6 (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2538)



รูปที่ 3.1 กลไกการใช้โพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Weber, 1972 อ้างถึงโดย มั่นสิน, 2538)

### 3.1.1.2 กระบวนการฟล็อกคูเลชัน

กระบวนการฟล็อกคูเลชันเป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเกิดการชนกัน และรวมตัวเกิดเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจจำแนกกระบวนการได้เป็น 3 ประเภท (O' Melia, 1972) ดังต่อไปนี้

### 3.1.1.2.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

กระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบนี้เรียกว่ากระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบเพอริไคเนติก (perikinetic flocculation) เป็นกระบวนการที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคที่เกิดจากความร้อนภายในน้ำซึ่งเปลี่ยนรูปมาเป็นพลังงานจลน์ ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว อัตราการรวมตัวแบบนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิและจำนวนอนุภาคภายในน้ำ อัตราการรวมตัวประเภทนี้จะมีอัตราสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะมีอัตรารวมตัวต่ำมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O' Melia, 1972)

### 3.1.1.2.2 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

กระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบนี้เรียกว่ากระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic flocculation) กระบวนการประเภทนี้เกิดจากการชนของอนุภาคซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของของเหลว อัตราการรวมตัวประเภทนี้จะมีอัตราสูงกว่าอัตราการรวมตัวแบบเพอริไคเนติกเมื่ออนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O' Melia, 1972)

โดยทั่วไปอนุภาคที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชันแล้วจะมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน ดังนั้นกระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบออร์โธไคเนติกนี้จึงเป็นกลไกหลัก (O' Melia, 1972)

### 3.1.1.2.3 การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน

กระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบนี้จะเกิดเมื่อไม่มีความปั่นป่วน โดยอนุภาคขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วการจมตัวสูงกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้เกิดการชนและรวมตัวกันระหว่างอนุภาคในระหว่างการจมตัว กระบวนการฟล็อกคูเลชันประเภทนี้จะเกิดขึ้นในถังทำใสแบบชั้นสลัดจ์ (sludge blanket clarifier) และในถังตกตะกอนแนวตั้งทั่วไป

## 3.1.2 การกวน

การกวนเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชัน โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) หรือ G หมายถึงความปั่นป่วนของน้ำ การกวนสามารถแบ่งได้เป็น 2 อย่างคือการกวนเร็ว และการกวนช้าโดยมีจุดมุ่งหมายที่ต่างกัน การกวนเร็วมีจุดมุ่งหมายเพื่อกระจายสารเคมีในน้ำดิบให้ทั่วถึงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการกวนเร็วจึงต้องการความปั่นป่วนสูง ทั้งนี้เพื่อให้การกวนผสมระหว่างสารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและทั่วถึง การกวนเร็วสามารถทำได้หลายวิธีเช่น ใช้ถังกวนเร็วที่ใช้ใบพัดแบบใบเรือ แบบใบพาย แบบใบแบน เครื่องกวนในเส้นท่อ

เครื่องกวนสถิตย์ กวนด้วยบีม หรือพาร์แชลฟลูม ส่วนการกวนซ้ำมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคและรวมตัวกันเป็นฟล็อก ดังนั้นการกวนซ้ำจึงต้องการความปั่นป่วนต่ำกว่าการกวนเร็วมากเพื่อป้องกันไม่ให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแตกออกจากกัน โดยทั่วไปดังกวนเร็วมักมีค่า  $G$  ไม่ต่ำกว่า 300 วินาที<sup>1</sup> แต่ในดังกวนซ้ำมักมีค่า  $G$  อยู่ในช่วง 60-100 วินาที<sup>1</sup> (มันสัน ดันฑุลเวศม์, 2538) และปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือเวลาในการกวนผสม ซึ่งหมายถึงเวลาในการสัมผัสระหว่างสารเคมีกับความปั่นป่วนส่วนใหญ่แล้วดังกวนเร็วจะมีเวลาในการกวนเร็วไม่เกิน 1 นาที ในทางปฏิบัติมักถือว่าเวลาสัมผัสเป็นเวลาที่น่าอยู่ในดังหรืออุปกรณ์กวนเร็ว ซึ่งหมายถึงเวลากักน้ำ (detention time) พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำเพื่อสร้างความปั่นป่วน  $G$  อาจคำนวณได้จากสมการของ Camp (อ้างถึงโดย Weber, 1972) ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$P = G^2 \mu V \quad (3.1)$$

$P$  = พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำ, วัตต์

$G$  = ความเร็วเกรเดียนท์หรือระดับความปั่นป่วน, วินาที<sup>-1</sup>

$\mu$  = ความหนืดของน้ำ, นิวตัน-วินาที/ตารางเมตร

$V$  = ปริมาตรน้ำในดังกวนน้ำ, ลูกบาศก์เมตร

สำหรับการกวนน้ำที่ใช้ใบพายในการกวนพลังงานที่ต้องการสามารถคำนวณได้จาก

$$P = 0.5 C_D \rho A v^3 \quad (3.2)$$

$P$  = พลังงานที่ใช้ในการกวนน้ำ, วัตต์

$C_D$  = ค่าคงที่สำหรับใบกวนแต่ละชนิด (สำหรับใบกวนแบบใบทรงกระบอก = 0.9)

$\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำ, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

$A$  = พื้นที่ผิวใบกวน, ตารางเมตร

$v$  = ความเร็วสัมผัสของใบพัดเท่ากับ 0.75 เท่าของความเร็วรอบ, เมตร/วินาที

### 3.1.3 สารส้ม (alum)

สารส้ม หรืออลูมิเนียมซัลเฟตเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากสามารถใช้ได้กับน้ำดิบจากแหล่งต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาถูก มีชื่อทางเคมีว่า อลูมิเนียมซัลเฟต ( $Al_2(SO_4)_3$ ) และเมื่อสารส้มละลายน้ำจะมีการแตกตัวของไอออนบวกและลบเกิดขึ้นดังนี้



เนื่องจากไอออนของโลหะทุกชนิดจะรวมอยู่ร่วมกับน้ำ และไม่สามารถดำรงอยู่ในรูปอิสระได้ ดังนั้นไอออนบวกของอลูมิเนียมในสมการที่ (3.3) จึงควรเป็น  $Al(H_2O)_6^{+3}$  ไอออนที่ประกอบด้วยโลหะและ

น้ำเรียกว่า aqua metal ion โมเลกุลของน้ำเรียกว่า ligand หนึ่งเพื่อความสะดวกในการเขียน บางครั้งมักตัดโมเลกุลของน้ำออกโดยถือว่าเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไป

เนื่องจาก  $Al^{+3}$  มีอำนาจเป็นกรดซึ่งสามารถให้  $H^+$  จึงพร้อมที่จะไฮโดรไลซ์ให้เป็นไอออนต่างๆ ของอลูมิเนียม ซึ่งมี  $OH^-$  เป็น ligand ดังนี้

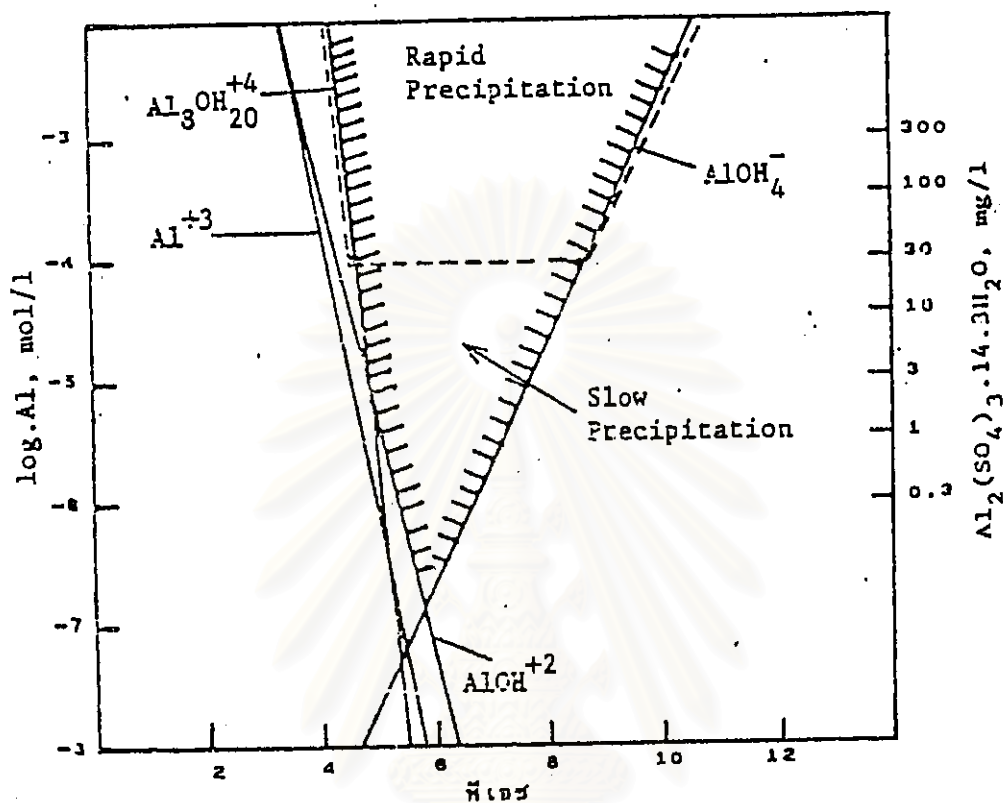


ไอออนคอมเพล็กซ์ที่กล่าวไปทั้งหมดเป็นไอออนที่มีอลูมิเนียมเพียงอะตอมเดียวเรียกว่า monomeric hydroxo complex สารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยารวมกันกลายเป็นสารคอมเพล็กซ์ที่มีอลูมิเนียมมากกว่า 1 อะตอมซึ่งเรียกว่า polymeric hydroxo complex เช่น  $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$ ,  $A_{17}(OH)_{17}^{+4}$ ,  $A_{18}(OH)_{20}^{+4}$  และ  $A_6(OH)_{15}^{+3}$

ในปัจจุบันผลการวิจัย (มันลิน ตันจูลเวศม์, 2538) แสดงให้เห็นว่าสารคอมเพล็กซ์ของอลูมิเนียมในน้ำที่อยู่ภายใต้สภาวะปกติในระบบประปามี 4 ชนิดคือ  $Al^{+3}$ ,  $Al(OH)^{+2}$ ,  $Al_8(OH)_{20}^{+4}$  และ  $Al(OH)_4^-$  โดยมีความสัมพันธ์กันตามสมการดังนี้



สถาบันวิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 stability diagram ของสารส้มในน้ำที่ไม่มีความขุ่น พื้นที่ภายในเส้นประเป็นบริเวณที่มีการตกผลึกของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  เกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนพื้นที่ภายนอกเส้นประแต่ยังแรเงาอยู่ มีการตกผลึกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (Weber, 1972 อ้างถึงโดย มั่นสิน, 2538)

รูปที่ 3.2 แสดงว่าน้ำที่มีพีเอชต่ำจะมี  $\text{Al}^{+3}$  มากที่สุด เมื่อมีพีเอชเพิ่มขึ้นจะได้ไอออนคอมเพล็กซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลง เมื่อพีเอชเข้าใกล้ความเป็นกลางสารประกอบ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นมากกว่าไอออนอื่นๆ พื้นที่ในเขตที่แรเงาให้แสดงถึงบริเวณที่มีการตกผลึกของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ตามทฤษฎี อย่างไรก็ตามนักวิจัยเชื่อว่าการตกผลึกอาจเกิดขึ้นในอัตราช้ามากเมื่อใช้สารส้มน้อย เนื่องจากไม่มีสารชักนำ (seed) ดังนั้นในทางปฏิบัติจะต้องใช้สารส้มไม่น้อยกว่า 30 มก./ก. จึงจะมี  $\text{Al}(\text{OH})_3$  เกิดขึ้นในความเร็วพอสมควร เมื่อพีเอชอยู่ในช่วงความเป็นด่างไอออนคอมเพล็กซ์จะมีประจุลบ ด้วยเหตุนี้การทำโคแอกกูเลชันด้วยสารส้มจึงควรมีพีเอชเป็นกลางหรือกรดเล็กน้อย และน้ำไม่ควรมีพีเอชต่ำเนื่องจาก



$Al^{3+}$  ไม่ดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นแม้ว่าจะมีประจุบวกมากก็ไม่ดีเหมือนไอออนคอมเพล็กซ์อื่นที่มีประจุน้อยกว่าแต่ดูดติดผิวอนุภาคได้ และน้ำก็ไม่ควรมีพีเอชสูงเนื่องจากจะได้ไอออนที่มีประจุลบซึ่งไม่มีประโยชน์ในการทำโคแอกกูเลชันให้กับคอลลอยด์ซึ่งมีประจุลบเหมือนกัน

### 3.1.4 สารโพลีเมอร์

สารโพลีเมอร์หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นกลุ่มอนุพันธ์ที่มีสมบัติเฉพาะ มีโมโนเมอร์ซึ่งสามารถนำพาประจุหรือแตกตัวเป็นไอออนทำให้เกิดสารประกอบที่มีประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆ อาจมีประจุบวก (cationic) ประจุลบ (anionic) หรือไม่มีประจุ (nonionic) โดยทั่วไปแล้วสารโพลีอิเล็กโทรไลต์เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่ขอบน้ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 ถึง 10,000,000 ปัจจุบันมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นตามลำดับ ทั้งเพื่อการปรับสภาพน้ำดีและการบำบัดน้ำเสีย เราสามารถแบ่งสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ตามชนิดของประจุได้ 4 ประเภทดังนี้

#### 1. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวก

Bratby (1980) รายงานเกี่ยวกับสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวกไว้ดังนี้

1.1 โพลีเอมีน เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน  $10^5$  แต่มีความเป็นประจุบวกสูง เช่น โพลีเอทีลีนเอมีน โพลีเอทีลีนไอมิน (PEI) สารกลุ่มนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษและใช้บ้างในการศึกษาปฏิกิริยารวมฟล็อก

1.2 โพลีเอทีลีนควอเทอร์นารี เป็นสารที่ไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชมีความต้านทานต่อการสลายตัวโดยคลอรีนมากกว่าโพลีเมอร์ทั่วไป จึงมักมีความสำคัญในการคลอรีเนตน้ำดิบ

1.3 แคตไอออนิก ไชยานามีน เป็นสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำ ประมาณ  $1 \times 10^3$  ถึง  $5 \times 10^3$  เริ่มแรกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของกระดาษ แต่พบว่าสามารถแสดงปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ด้วยเช่นกัน

1.4 คาโบโอมิล โพลีเมอร์แคตไอออน เป็นกลุ่มสารที่มีความสำคัญในทางการค้า และใช้งานได้เนกประสงค์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า  $10^5$  มีความหนืดสูง และมีสารที่ไวต่อปฏิกิริยาอยู่น้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย

1.5 โพลีแอลฟา-ไวนิลไมดาไรลีน เป็นโพลีเมอร์พวกโพลีไซคลิกอะไมด์มีโครงสร้างพิเศษสำหรับการเป็นสารรวมตะกอน ทั้งนี้เพราะมีความเป็นประจุบวกสูงมาก และมีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางจนถึงสูง

1.6 โพลีไดอัลลิลเมทิล แอมโมเนียมคลอไรด์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้นมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำถึงปานกลาง (ต่ำกว่า  $10^5$ ) มีความต้านทานต่อคลอรีนและไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช

1.7 ไดมัททิล อะมิโนอัลคิล อะครีลิก และเมทาไคริลิกเอสเตอร์ เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีความไวในสภาพตัวกลางที่เป็นกรดหรือเบส ใช้เป็นสารรวมฟล็อก สารกลุ่มนี้ราคาค่อนข้างสูง

1.8 เอ็น-ไดอัลคิลอะมิโนอัลคิล อะครีลาไมน์ โพลีเมอร์กลุ่มนี้ได้รับความสนใจในการใช้เป็นสารรวมฟล็อกเพราะมีเสถียรภาพต่อการไฮโดรไลซิสและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง

## 2. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ

สารโพลีอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ให้ประจุลบโดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงสูงมาก (Schwayer, 1981) มักใช้เป็นสารรวมฟล็อก โพลีเมอร์ที่มีประจุลบและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายฟล็อกในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่มคาร์บอกซิเลทไอออน ได้แก่ พอลิโพลีอะครีลิกแอซิด เช่น โอลิโพลีอะครีลิกแอซิด (homopolyacrylic acid) และพวกที่มีหมู่ซัลโฟนิคแอซิด เช่น เกลือโซเดียมของโพลีสไตรีน ซัลโฟนิค แอซิด (polystyrene sulfonic acid)

## 3. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ

โมโนเมอร์ที่มีประจุต่ำกว่า 1 % ในสารละลายถือว่าเป็นโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ (Schwayer, 1981) โพลีเมอร์เหล่านี้จะทำให้เกิดการรวมฟล็อก โดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงสูงมาก ตัวอย่างสารรวมตะกอนที่สำคัญได้แก่ โพลีเอทิลีนออกไซด์ และโพลีอะครีลาไมด์

## 4. สารโพลีอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ทั้งประจุบวกและลบ

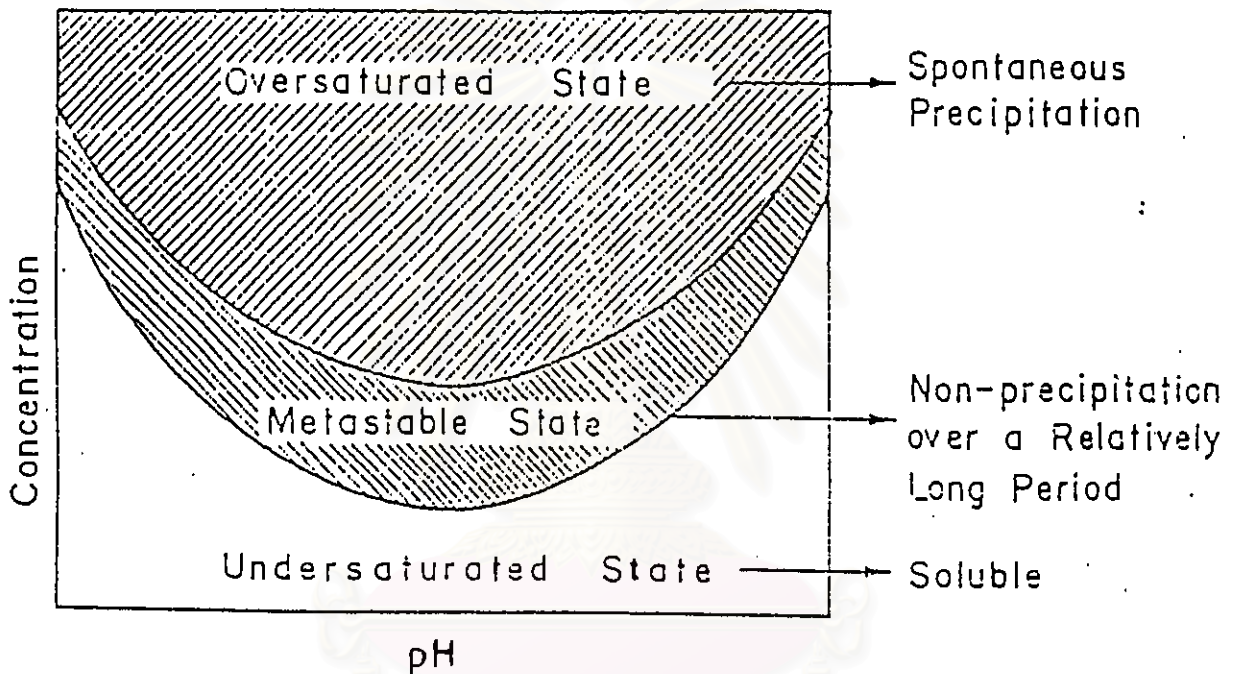
สารกลุ่มนี้เป็นสารโมเลกุลใหญ่ มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรด และเบส มักจะให้ประจุบวกที่มีพีเอชต่ำ ให้ประจุลบที่มีพีเอชสูง และเป็นกลางทางประจุที่ isoelectric pH เช่น สารรวมฟล็อกที่เรียกว่า switterion flocculant ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วยประจุบวกหรือลบอยู่มากมายในโมเลกุล

### 3.1.5 เพลล็ด

#### 3.1.5.1 สมมุติฐานเบื้องต้นในการเกิดเพลล็ด

ในกระบวนการสร้างเพลล็ด เพลล็ดสามารถเกิดขึ้นในขณะที่สารละลายอยู่ในสภาวะที่มีความเข้มข้นของสารมากกว่าอัตราการละลายได้ของสาร แต่ยังไม่มากพอที่จะเกิดสภาวะเกินอิ่มตัว (oversaturated state) จนเกิดเป็นของแข็ง (precipitation) ได้ด้วยตัวเอง เราเรียกสภาวะดังกล่าวว่า สภาวะเสถียรแบบเมตา (metastable state) และเมื่อมีการเติมสารชนิดเดียวกันกับสารละลายนั้นในสถานะของแข็งลงในสารละลายที่อยู่ในสภาวะเสถียรแบบเมตา จะทำให้สารเหล่านั้นจับตัวเป็นของแข็งบนผิวของ

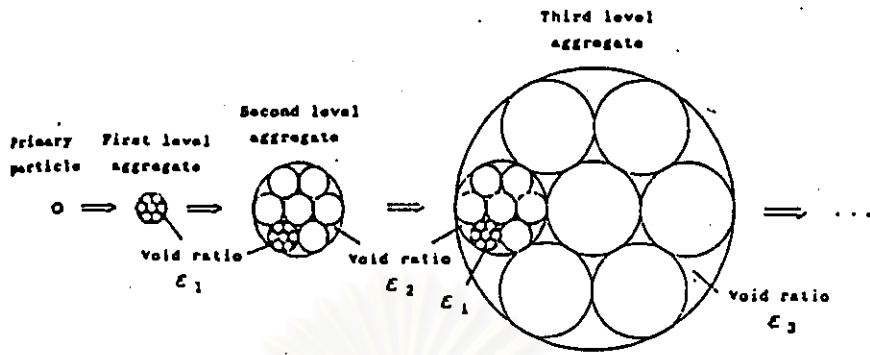
ของแข็งที่เติมลงไปอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจากหลักการนี้เราสามารถนำมาใช้ในกระบวนการกำจัดความขุ่นโดยการสร้างเฟลล็ด โดยการเติมสารโคเอกกูแลนต์ลงในน้ำที่มีความขุ่น เพื่อทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ได้เป็นจุลฟล็อก จากนั้นก็นำน้ำที่ถูกทำลายเสถียรภาพเหล่านี้เข้าไปรวมกับเฟลล็ดที่อยู่ในอุปกรณ์สร้างเฟลล็ด ก็จะทำให้เกิดการจับตัวกันระหว่างจุลฟล็อกกับเฟลล็ดขึ้นได้เป็นเฟลล็ดที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 3.3 สถานะของสารละลายเมื่ออยู่ในสถานะที่มีความเข้มข้นและพีเอชต่างกัน (Tambo and Matsui, 1989)

### 3.1.5.2 โครงสร้างและความหนาแน่นของเฟลล็ด

การรวมตัวกันเป็นฟล็อกของอนุภาคสามารถแสดงเป็นแบบจำลองอย่างง่าย ดังรูปที่ 3.4 (Tambo and Wang, 1993) โดยในขั้นแรกอนุภาคเบื้องต้น (Primary Particle) ก็จะรวมตัวกันได้เป็นกลุ่มอนุภาคอันดับหนึ่ง จากนั้นก็จะรวมตัวเป็นกลุ่มอนุภาคอันดับสอง สาม และสี่ต่อไป ได้เป็น ฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ แต่ความหนาแน่นของฟล็อกจะลดลงเนื่องจากมีช่องว่างภายในฟล็อกเพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นของฟล็อกจะเป็นตามสมการดังนี้ (Tambo and Wang, 1993)



รูปที่ 3.4 การรวมตัวของกลุ่มอนุภาคในหลายขั้นตอน (Tambo and Wang, 1993)

$$\rho_1 = \rho_0(1 - \epsilon_1) \quad (3.12)$$

โดยที่  $\rho_1$  = ความหนาแน่นประสิทธิผลของการรวมตัวขั้นที่ 1

$\rho_0$  = ความหนาแน่นประสิทธิผลของอนุภาคเบื้องต้น

$\epsilon_1$  = อัตราส่วนช่องว่างของการรวมตัวขั้นที่ 1

สำหรับการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคอันดับสองมีความหนาแน่นตามสมการ

$$\begin{aligned} \rho_2 &= \rho_1(1 - \epsilon_2) \\ &= \rho_0(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \end{aligned} \quad (3.13)$$

และถ้ามีการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคต่อไปเรื่อย ๆ จะได้สมการ

$$\begin{aligned} \rho_i &= \rho_{i-1}(1 - \epsilon_i) \\ &= \rho_0(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)\dots(1 - \epsilon_i) \end{aligned} \quad (3.14)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าความหนาแน่นของกลุ่มอนุภาคจะลดลงเมื่อระดับการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีช่องว่างภายในฟล็อกเพิ่มขึ้น

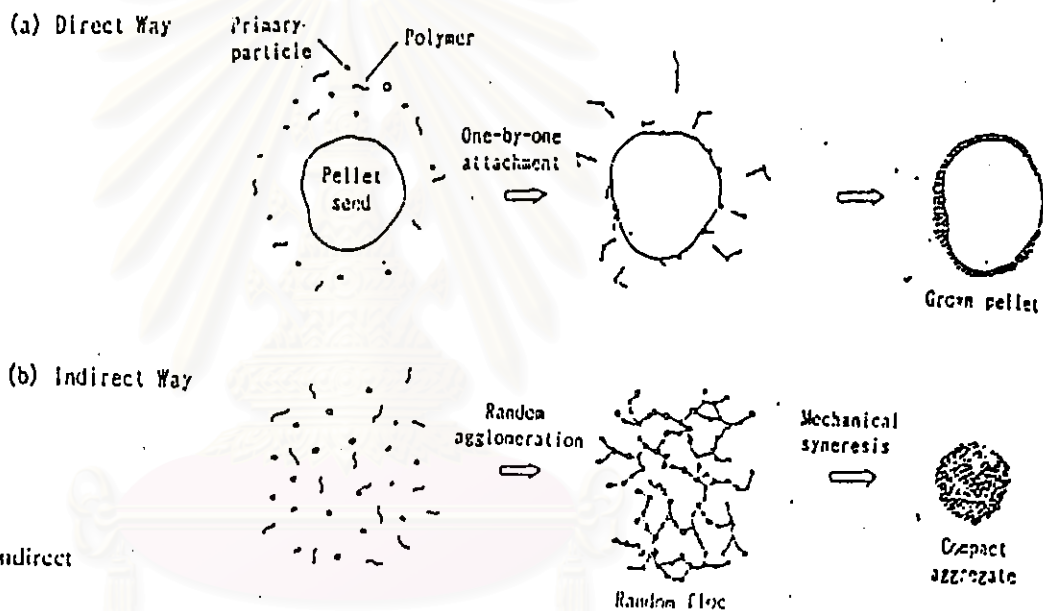
แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถอธิบายได้ด้วยวิธีอุดมคติแบบนี้ อย่างไรก็ตามสมการที่ (3.14) ก็สามารถทำให้เราเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้าง และความหนาแน่นของฟล็อกได้ง่ายที่สุด ซึ่งจากสมการนี้เราสามารถใช้เป็นแนวทางในการสร้างฟล็อกที่อัดแน่นได้ 2 ทางคือ

#### 1. การจำกัดระดับการรวมตัว

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.14) จะพบว่าฟล็อกจะมีความหนาแน่นมากที่สุดเมื่อเป็นการรวมตัวของกลุ่มอนุภาคในระดับแรกซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคเบื้องต้นได้เป็นฟล็อกที่มีอัตราส่วนช่องว่างน้อยที่สุด และมีรูปแบบการรวมตัวของอนุภาคแบบหนึ่งต่อหนึ่ง (one by one attachment) ดังรูปที่ 3.5 a (Tambo and Wang, 1993)

2. การลดอัตราส่วนช่องว่าง

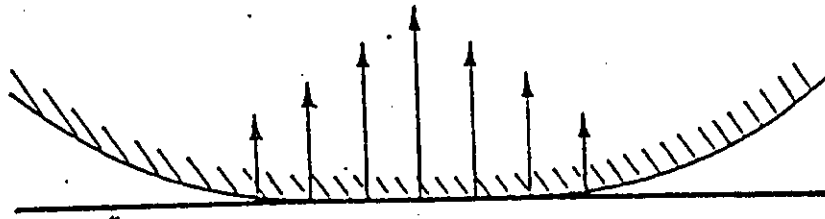
เมื่อมีการรวมตัวกันในหลายระดับ จะทำให้น้ำถูกกักอยู่ในช่องว่างภายในฟล็อก เพื่อที่จะลดปริมาณน้ำที่ถูกกักอยู่ในฟล็อกจึงต้องมีกระบวนการกำจัดน้ำภายในฟล็อก ทำให้ฟล็อกมีความหนาแน่นสูงและมีรูปแบบการรวมตัวแบบสุ่ม ดังรูปที่ 3.5 b (Tambo and Wang, 1993) กลไกที่ทำให้เกิดกระบวนการแปลงรูปของฟล็อกสามารถอธิบายได้ด้วยเทคนิคการกลิ้งและเทคนิคการชน ซึ่งเสนอโดย Yusa, Suzuki and Tanaka (1975)



รูปที่ 3.5 การรวมตัวกันของเฟลลิตแบบหนึ่งต่อหนึ่งและแบบสุ่ม (Tambo and Wang, 1993)

2.1 เทคนิคการกลิ้ง (rolling technique)

เมื่อเม็ดฟล็อกสัมผัสกับพื้นผิวที่จุดหนึ่งๆ ซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ แรงดันภายนอกจะมีค่าสูงสุด ณ บริเวณจุดกึ่งกลางของพื้นผิวสัมผัส ซึ่งเป็นจุดที่ฟล็อกจะเกิดการยุบตัวมากที่สุด และแรงดันภายนอกจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออยู่ห่างออกไปจากจุดสัมผัสตามลำดับ ดังรูปที่ 3.6

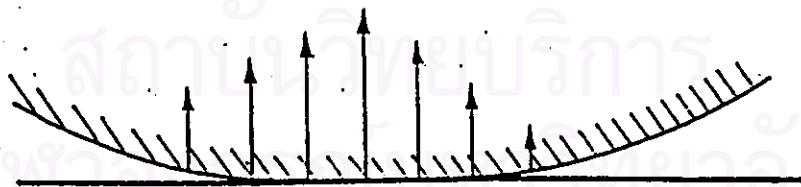


Pressure Distribution Around  
the Contact Area When a  
Floc is at Rest on a Solid Plane

รูปที่ 3.6 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกหยุดนิ่ง (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

หากมีการกลิ้งฟล็อกไปข้างหน้า จุดสัมผัสจะเคลื่อนไปข้างหน้าของตำแหน่งเดิมจะเป็นจุดที่มีแรงดันภายนอกสูงสุด จะเห็นได้ว่าการกลิ้งฟล็อกไปบนผิวเรียบหรือโค้งทำให้แรงกระทำต่อฟล็อกไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 3.7 ฟล็อกจึงเกิดการเปลี่ยนรูปร่างเป็นผลให้น้ำซึ่งแทรกอยู่ในเม็ดฟล็อกถูกรีดออกมา

← Direction of Movement

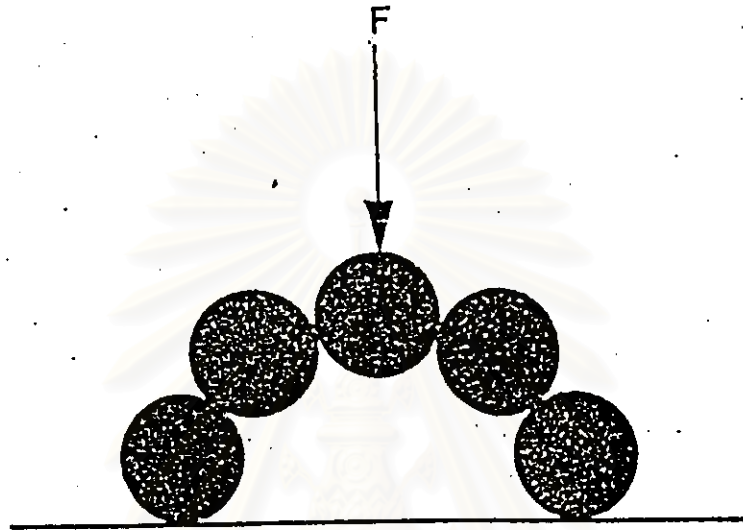


Pressure Distribution Around  
the Contact Area When a  
Floc Rolls Over Along a Solid Plane

รูปที่ 3.7 การกระจายของแรงเมื่อฟล็อกกลิ้ง (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

## 2.2 เทคนิคการชน (collision technique)

การบังคับให้ฟล็อกวิ่งมาชนกัน หรือชนพื้นผิวเรียบหรือโค้ง จะทำให้เกิดแรงเฉือนระหว่างอนุภาคเล็กๆภายในฟล็อก ทำให้เกิดการจัดเรียงอนุภาคเล็กๆขึ้นใหม่ในลักษณะที่ชิดกัน เป็นผลให้น้ำที่แทรกอยู่ภายในเม็ดฟล็อกถูกรีดออกมา ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9



Internal Constitution of a  
Loose Bulky Floc Produced by  
Normal Flocculation

รูปที่ 3.8 การจัดเรียงของอนุภาคภายในฟล็อกก่อนชน (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

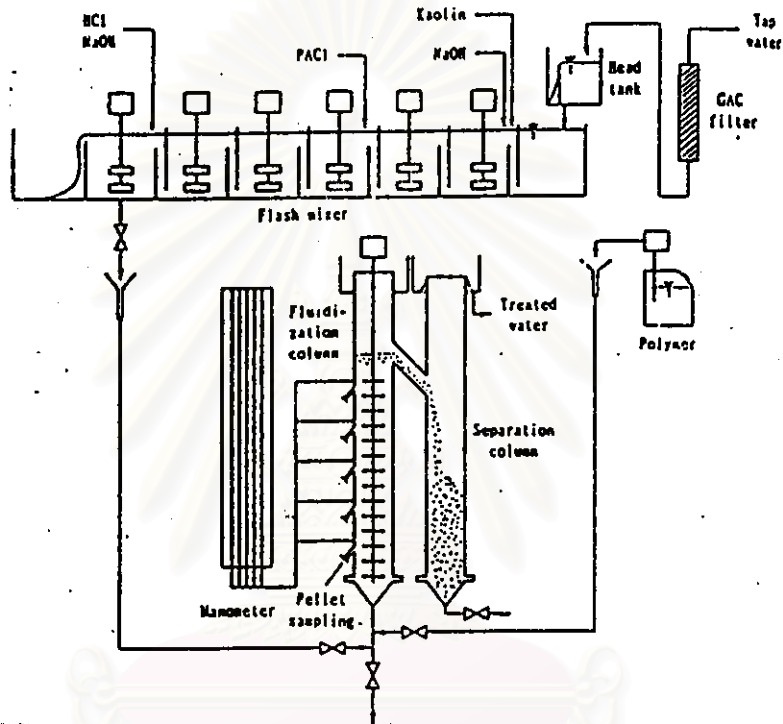


Internal Constitution of a  
Compact Floc Produced as the  
Result of Pellet Flocculation

รูปที่ 3.9 การจัดเรียงตัวของอนุภาคภายในฟล็อกหลังชน (Yusa, Suzuki and Tanaka, 1975)

### 3.1.5.3 กระบวนการสร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้น

กระบวนการสร้างเพลล็ดจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือส่วนที่เกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ซึ่งเกิดขึ้นในถังกวนเร็วและส่วนสร้างเพลล็ดซึ่งเกิดในอุปกรณ์สร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้น (Tambo and Matsui, 1987) ดังรูป 3.10 และสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์สร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้น (Tambo and Matsui, 1989)

1. โคแอกกูเลชันชนิดโลหะจะถูกเติมลงในถังกวนเร็วเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์และทำให้เกิดจุดฟล็อกขึ้น
2. โพลีเมอร์ประจุลบจะถูกเติมลงไปบริเวณด้านล่างของอุปกรณ์สร้างเพลล็ดแบบไหลขึ้นเพื่อเชื่อมประสานจุดฟล็อกกับเม็ดเพลล็ดในอุปกรณ์สร้างเพลล็ด
3. ภายในอุปกรณ์สร้างเพลล็ด จุดฟล็อกจะจับกับเพลล็ดแบบหนึ่งต่อหนึ่งทำให้เกิดเพลล็ดที่มีความหนาแน่นสูง



4. เพื่อป้องกันการรวมตัวแบบสุ่มจึงมีการกวนซ้ำภายในอุปกรณ์สร้างเพลลิต ความปั่นป่วนของน้ำจะทำให้ฟล็อกที่หวมแตกออกจากกัน และเคลื่อนตัวไปสัมผัสกับจุลฟล็อกอื่นเกิดการรวมตัวกันแบบหนึ่งต่อหนึ่งอีกครั้งได้เป็นเพลลิตทรงกลมแกร่งและมีความหนาแน่นสูง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.2 การศึกษาที่ผ่านมา

3.2.1 Yusa, Suzuki และ Tanaka (1975) ได้ทำการศึกษาเรื่อง Separating liquid from pellet flocculation โดยใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนต์ และเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคการกลึงและเทคนิคการชนที่ใช้พลังงานกลเล็กน้อยและไม่สม่ำเสมอกระทำต่อฟล็อก ทำให้เกิดฟล็อกที่อัดแน่นและแข็งแรง ตกตะกอนได้เร็วและสามารถรีดน้ำออกได้ง่าย และพบว่าปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดลองมีช่วงการใช้งานที่แคบ เนื่องจากหากมีการใช้โพลีเมอร์มากเกินไปจะทำให้เกิดฟล็อกที่ไม่แน่นมีน้ำเป็นส่วนประกอบมาก

3.2.2 Tambo และ Matsui (1987) ได้ทำการศึกษาเรื่อง Metastable state operation for separation Fluidized Bed Pellet Separator ทำทดลองโดยใช้อุปกรณ์ดังรูป 3.11 ใช้เกล็ดอลูมิเนียมเป็นสารโคแอกกูแลนต์ที่พีเอชเป็นกลาง และใช้สารโพลีเมอร์ชนิดประจุลบอย่างอ่อน (Acoofloc A-100 PWG) เป็นสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด ทำการทดลองโดยในช่วงแรกให้อัตราน้ำไหลขึ้นต่ำและเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ จักระทั่งถึง 30 ซม./นาที่ภายในเวลา 30 นาที และคงที่ไว้ที่อัตราน้ำไหลขึ้นนี้ต่อไป โดยมีขั้นตอนดังนี้

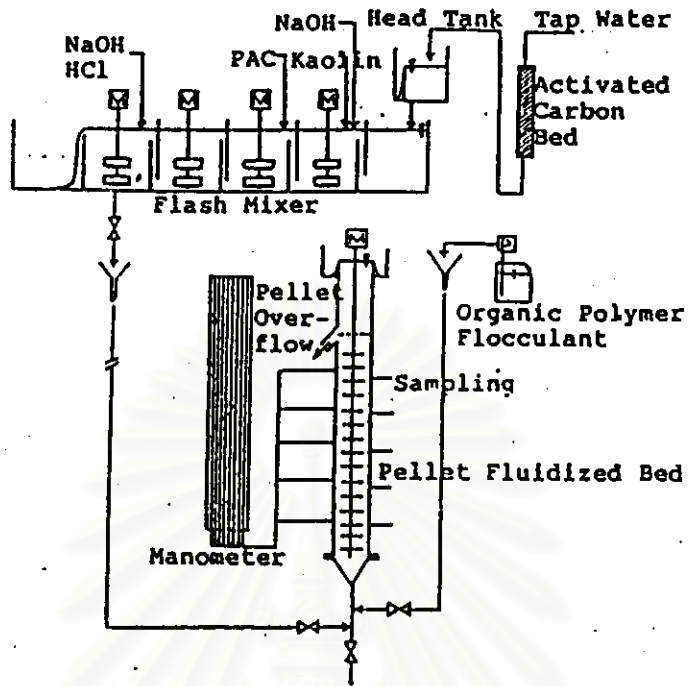
1. เติมเกล็ดอลูมิเนียม (PAC) ที่พีเอชเป็นกลางเพื่อทำลายเสถียรภาพคอลลอยด์ ได้เป็นฟล็อกขนาดเล็กหรืออนุภาคเบื้องต้น
2. เติมโพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อนที่บริเวณส่วนล่างของชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวของฟล็อก
3. อนุภาคเบื้องต้นจะเข้าไปภายในชั้นฟลูอิดไดซ์เบดและสัมผัสกับเพลล็ดแบบหนึ่งต่อหนึ่ง โดยในชั้นแรกซูโดเพลล็ด (pseudo-pellet) จะถูกสร้างขึ้นจากอนุภาคเบื้องต้นโดยใช้โพลีเมอร์เป็นสารรวมฟล็อก โดยเริ่มระบบที่อัตราน้ำไหลขึ้นต่ำและเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่ จักระทั่งถึง 30 ซม./นาที่ภายในเวลา 30 นาที และคงที่ไว้ที่อัตราน้ำไหลขึ้นนี้ต่อไป
4. เพลล็ดทรงกลมจะเพิ่มขนาดขึ้น โดยที่การปั่นกวนที่เหมาะสมของใบกวนในชั้นฟลูอิดไดซ์เบดจะทำลายส่วนที่โตผิดปกติของเพลล็ดได้เป็นเพลล็ดทรงกลมและแน่น
5. ทำการทดลองขั้นต้นซ้ำเพื่อเปรียบเทียบผลโดยแปรค่าปริมาณอลูมิเนียม โพลีเมอร์ ความชุ่มน้ำเข้า อัตราการปั่นกวน รูปร่างและระยะห่างใบกวน
6. ทำการวัดความชุ่มน้ำเข้า น้ำออก ความดันลด คุณสมบัติของเพลล็ดได้แก่ขนาด และความหนาแน่นเพลล็ดที่สร้างขึ้นโดยควบคุมความเร็วน้ำไหลขึ้น

ผลการทดลองพบว่า

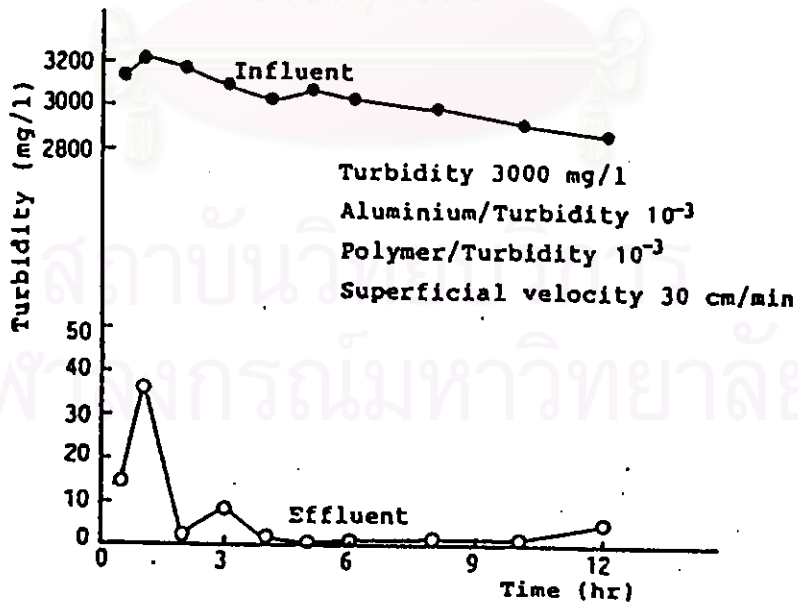
1. ระบบสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูงเช่นในประเทศจีน และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยจากรูปที่ 3.12 พบว่าระบบมีประสิทธิภาพสูงสามารถผลิตน้ำที่ใสมากที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 30 ซม./นาทึ และใช้เวลากักน้ำเพียง 5 นาที
2. ระบบจะเข้าสู่สถานะคงตัวภายในระยะเวลา 6 ชม. โดยดูจากความดันลดภายในชั้นเพลล็ด ดังรูปที่ 3.13
3. หลังจากทำการทดลองได้ 6 ชม.พบว่าการโตของเพลล็ดจะสอดคล้องกับการแตกออกและการระบายทิ้ง โดยดูได้จากการกระจายของขนาดเพลล็ดที่ระดับต่างๆไม่เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 3.14
4. เพลล็ดที่สร้างจากการทดลองนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะมีความหนาแน่นสูงกว่าฟล็อกทั่วไป โดยดูได้จากรูปที่ 3.16
5. ขนาดและความหนาแน่นของเพลล็ดจะขึ้นอยู่กับอัตราการปั่นกวนและระยะห่างใบกวน โดยที่อัตราการปั่นกวนสูงจะได้เพลล็ดขนาดเล็กแต่แน่น สำหรับที่ระยะห่างใบกวนกว้างเมื่อให้พลังงานในการกวนเท่ากันเพลล็ดจะมีขนาดเล็กเพราะมีการกระจายความปั่นป่วนไม่ทั่วถึงภายในชั้นเพลล็ด
6. ที่ความขุ่น 3000 มก./ล. ค่าอัตราส่วนอลูมิเนียมต่อความขุ่น (ALT) และโพลีเมอร์ต่อความขุ่น (PT)ที่เหมาะสม = 0.001 แต่ที่ความขุ่น 200 มก./ล. จำเป็นต้องเพิ่มค่า ALT และ PT เป็น 0.01 เพื่อรักษาเพลล็ดภายในชั้นฟลูอิดไดซ์ให้อยู่ต่อไปได้
7. จุดที่เหมาะสมสำหรับเติมโพลีเมอร์คือที่บริเวณใต้ชั้นฟลูอิดไดซ์เบดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลของจุดใส่โพลีเมอร์แอนไอออน (Tambo and Matsui, 1989)

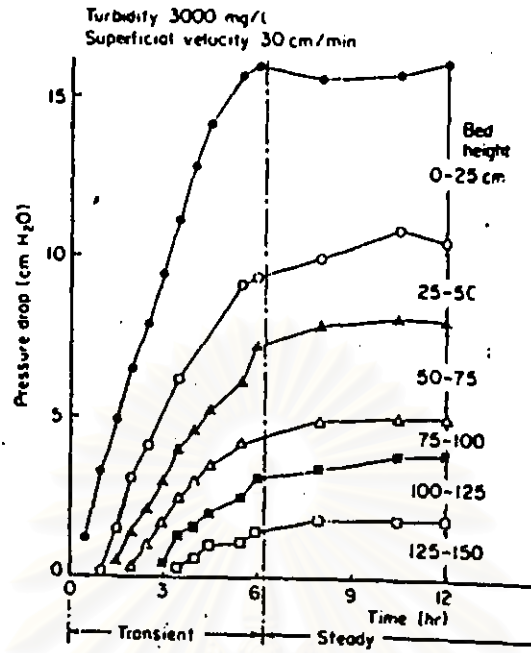
จุดเติมโพลีเมอร์	ความขุ่นน้ำผลิต (เอ็นทียู)	ความหนาแน่นประสิทธิภาพผลของเพลล็ด (ก./ซม. <sup>3</sup> )
- ด้านล่างของฟลูอิดไดซ์เบด	<10	0.15
- ด้านล่างของดั่งกวนเร็ว	25	0.11
- ในดั่งกวนเร็ว	25	0.08
- ในดั่งกวนเร็วพร้อมโคแอกกูแลนต์	ไม่เกิดเพลล็ด	



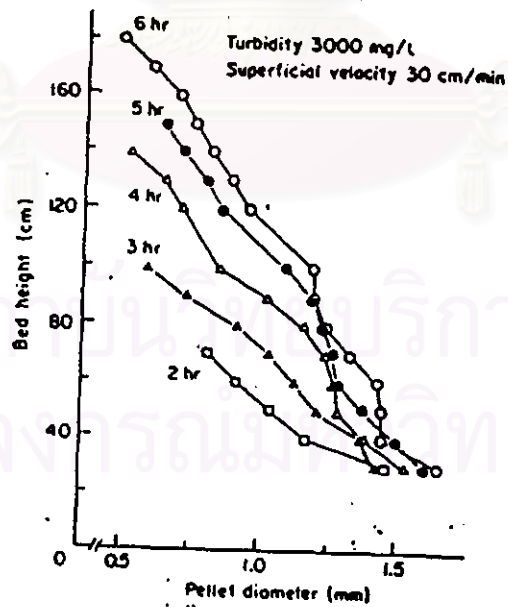
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (Tambo and Matsui, 1987)



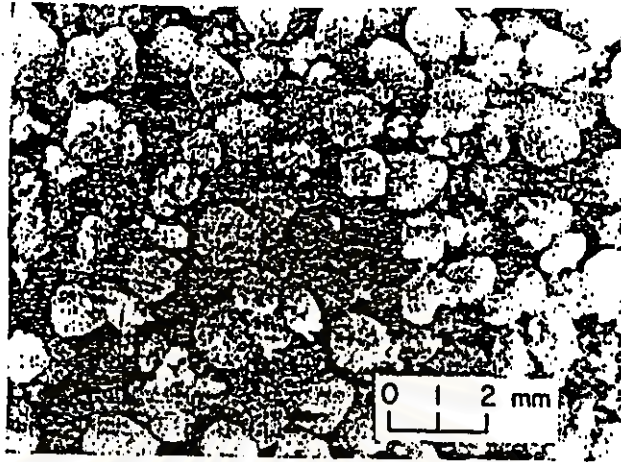
รูปที่ 3.12 ความขุ่นในน้ำก่อนเข้าระบบและหลังผ่านระบบในช่วงเวลาต่างๆ (Tambo and Matsui, 1987)



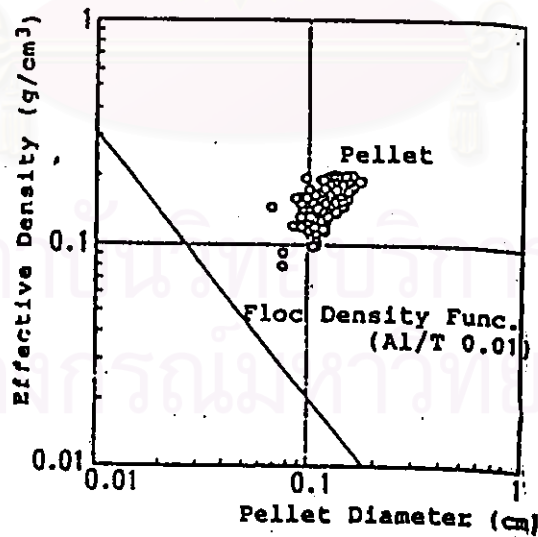
รูปที่ 3.13 การเปลี่ยนแปลงความดันตกในช่วงเวลาต่างๆ (Tambo and Matsui, 1987)



รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงขนาดของเพลเล็ตที่ระดับต่างๆ (Tambo and Matsui, 1987)



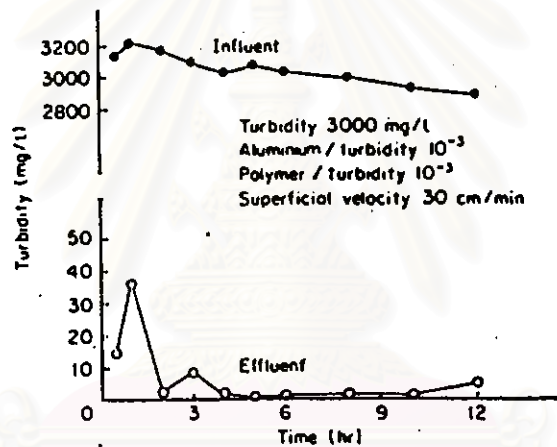
รูปที่ 3.15 ลักษณะของเพลเล็ตที่สร้างได้จากการทดลอง (Tambo and Matsui, 1987)



รูปที่ 3.16 ความหนาแน่นของเพลเล็ต และฟล็อกทั่วไป (Tambo and Matsui, 1987)

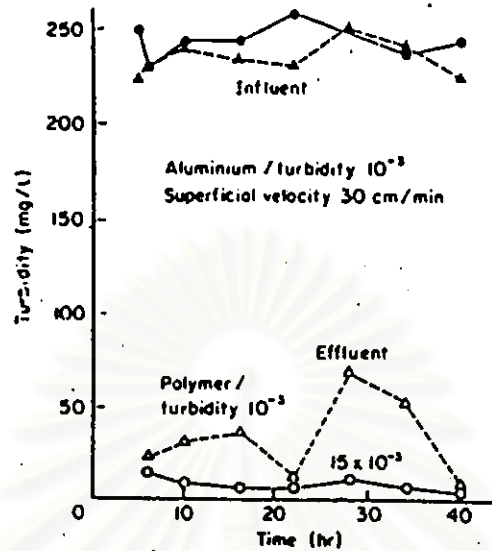
3.2.3 Tambo และ Matsui (1989) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเครื่องแยกฟลูอิดไดซ์เพลด เล็ดเบดในการกำจัดของแข็งแขวนลอยความเข้มข้นสูง โดยใช้เกลืออลูมิเนียม (PAC) เป็นสารโคแอกกูแลนต์ และโพลีเมอร์ชนิดประจุลบอย่างอ่อนเป็นสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด ทำการทดลองเป็น 2 กรณี คือที่ ความขุ่น 3000 มก./ล. และที่ 250 มก./ล. (ความขุ่นจากดินคาโอสิน) พบว่า

กรณีแรกความขุ่น 3000 มก./ล. พบว่าเมื่อใช้  $ALT = 0.001$  และ  $PT = 0.001$  ที่ความเร็วน้ำไหล ขึ้น 30 ซม./นาที น้ำที่ผลิตจะใสมากดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ความขุ่นน้ำดิบและน้ำผลิตที่เวลาต่างๆ สำหรับความขุ่นน้ำดิบประมาณ 3000 มก./ล.  
(Tambo and Matsui, 1989)

กรณีที่สองความขุ่น 250 มก./ล. พบว่าเมื่อใช้  $ALT = 0.001$  และ  $PT = 0.015$  ที่ความเร็วน้ำไหล ขึ้น 30 ซม./นาที น้ำที่ผลิตจะมีความขุ่นต่ำและคงที่ แต่เมื่อใช้  $ALT = 0.001$  และ  $PT = 0.001$  น้ำที่ผลิต จะมีความขุ่นที่ไม่คงที่ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ความขุ่นน้ำดิบและน้ำผลิตที่เวลาต่างๆ สำหรับความขุ่นน้ำดิบประมาณ 250 มก./ล.

(Tambo and Matsui, 1989)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเครื่องแยกของแข็งแขวนลอยแบบใหม่นี้สามารถแยกของแข็งแขวนลอยที่ความเข้มข้นสูง 100-1000 มก./ล. ได้โดยใช้เวลากักน้ำเพียง 3-5 นาที โดยใช้ลูมินัมเป็นสารโคแอกกูแลนต์เพียงเล็กน้อยร่วมกับโพลีเมอร์ประจุลบอย่างอ่อนในการสร้างเฟลล็ดทรงกลม ความหนาแน่นสูงโดยใช้  $ALT = 0.001$  และ  $PT = 0.001$  สำหรับที่ความขุ่น 1000 มก./ล. และ  $ALT = 0.01$  และ  $PT = 0.01$  สำหรับที่ความขุ่น 100 มก./ล. เฟลล็ดที่สร้างได้มีความหนาแน่นสูงกว่าฟลือกจากกระบวนการโคแอกกูแลชั่นโดยทั่วไป อีกทั้งยังสามารถรีดน้ำออกได้ดีกว่าฟลือกธรรมดาอีกด้วย

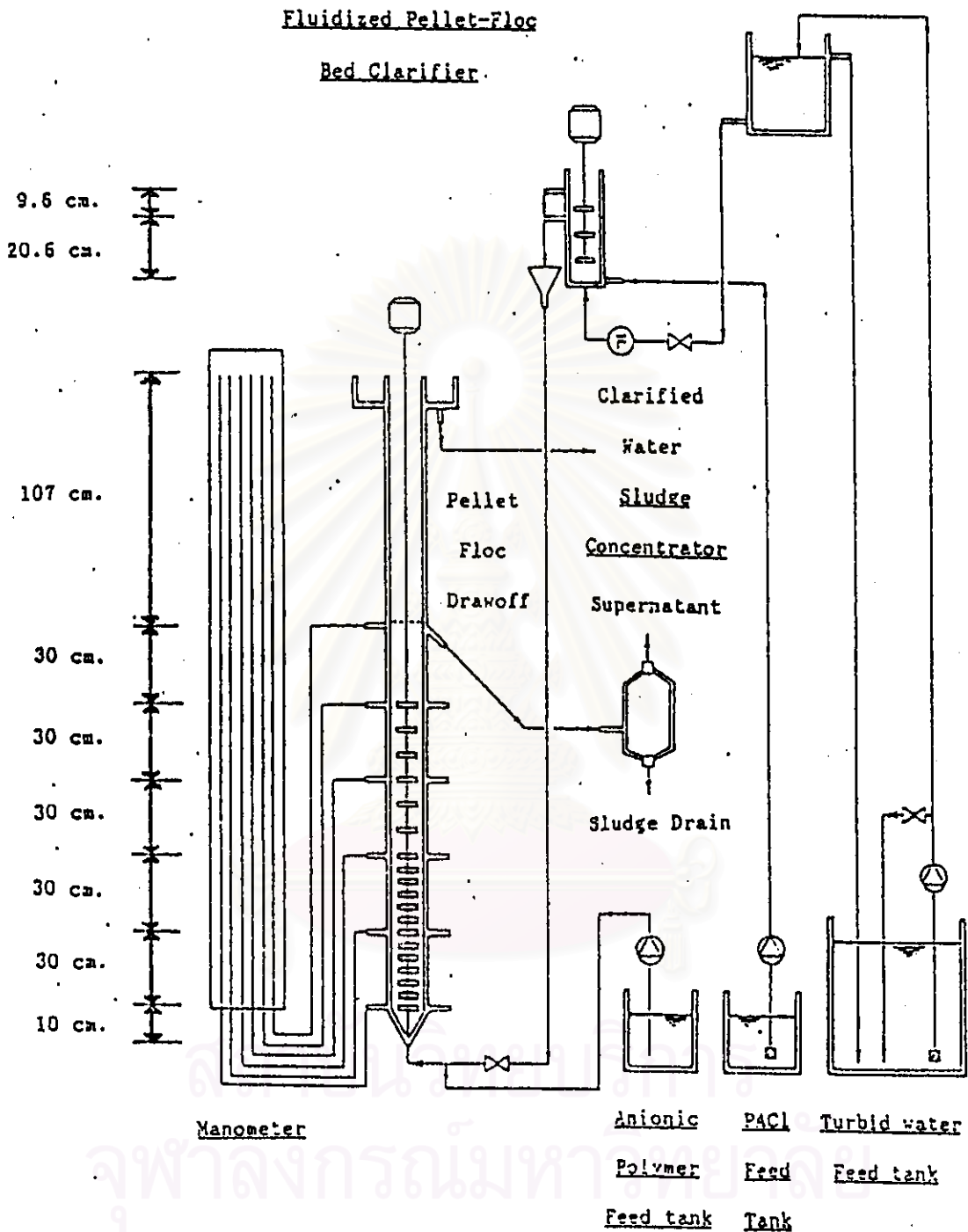
3.2.4 บัณฑิต ชาญณรงค์ (2535) ได้ทำการศึกษาเรื่องการทำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างเฟลล็ดแบบไหลขึ้น โดยมีอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.19 มีอัตราความเร็วไหลขึ้น 18 และ 24 ม./ชม. มีเวลากักน้ำสั้นมากเพียง 5 และ 3.8 นาที ใช้น้ำดิบสังเคราะห์ความขุ่นเท่ากับ 50 เอ็นทียู ใช้โพลีลูมินัมเมคคโลไรด์ (PACl) เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4 และใช้โพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอคที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2 และ 0.3 โดยใช้ความเร็วการกวนใบพัดกวนน้ำที่ 5, 10 และ 15 รอบ/นาที ได้ผลการศึกษาดังนี้



1. การใช้ PACI ปริมาณมากจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้ PACI ในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้ PACI ปริมาณน้อยต้องอาศัยปริมาณโพลีเมอร์ประจุลบเพิ่มมากขึ้น จึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ
2. การใช้โพลีเมอร์ประจุลบในปริมาณมากจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพลีเมอร์ประจุลบในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้โพลีเมอร์ประจุลบในปริมาณน้อยต้องอาศัยปริมาณ PACI มากขึ้น จึงจะได้น้ำผลิตที่มีความขุ่นต่ำ
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลเล็ตอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.3 มม. และความเร็วในการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 24-42 ม./ชม.
4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. ต้องการความเร็วของใบพัดกวนช้าน้อย ในทางตรงข้ามที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม. ต้องการความเร็วของใบพัดกวนช้ามากกว่า
5. การกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างเพลเล็ตแบบไหลขึ้น สามารถกำจัดความขุ่นจาก 50 เอ็นทียู ได้เป็นน้ำที่มีความขุ่นต่ำกว่า 3 เอ็นทียู
6. การกำจัดความขุ่นโดยกระบวนการสร้างเพลเล็ตแบบไหลขึ้น สามารถผลิตน้ำได้มากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบธรรมดาถึง 9 เท่า และมากกว่าการใช้ถังตกตะกอนแบบโซลิดคอนแทคต์ 3 เท่า

Rapid-Mix Tank

Head Tank



รูปที่ 3.19 อุปกรณ์การทดลองสร้างเพลลิต (บัณฑิต, 2535)

3.2.5 นฤชา ฤกษ์พันธ์ (2535) ได้ทำการทดลองการสร้างเพลลิตโดยใช้สารส้มในอุปกรณ์สร้างเพลลิต ซึ่งใช้ความขุ่นสังเคราะห์ด้วยดินคาโอลินให้มีความขุ่น 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มปริมาณ 5, 10, 20 และ 30 มก./ล. โพลีเมอร์ประจุลบปริมาณ 0.05, 0.1, 0.2 และ 0.3 มก./ล. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 และ

24 ม./ชม. อัตราการกวนในอุปกรณ์สร้างเพลลิตเท่ากับ 5, 10 และ 15 รอบ/นาที จากผลการทดลองพบว่า

1. ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายในไม่เกิน 3 ชม. โดยจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโพลีเมอร์เพิ่มขึ้น
2. การเพิ่มความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบมากขึ้น ทำให้ความขุ่นของน้ำผลิตลดลง
3. การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นโพลีเมอร์ประจุลบในระดับที่มีความเข้มข้นต่ำ (0.05-0.1 มก./ล.) มีผลกระทบต่อความขุ่นของน้ำที่ผลิตมากกว่าในระดับที่มีความเข้มข้นสูง (0.2-0.3 มก./ล.) คือมีความขุ่นน้ำผลิตเท่ากับ 0.35 ถึง 8.5 มก./ล. และ 0.18 ถึง 1.8 ตามลำดับ
4. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม. และที่ทุกค่าความเร็วใบพัดหากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู จะต้องใช้ความเข้มข้นของสารส้ม 10 ถึง 30 มก./ล. และความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ 0.05 มก./ล.
5. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. และที่ทุกค่าความเร็วใบพัดหากต้องการให้น้ำผลิตมีความขุ่นต่ำกว่า 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. ที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 และ 24 ม./ชม. ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบสูง คือในระดับ 0.1, 0.2 และ 0.3 มก./ล. ให้ค่าความขุ่นของน้ำที่ผลิตไม่แตกต่างกันนัก แสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบสูง การเปลี่ยนแปลงค่าความขุ่นของน้ำผลิตเนื่องจากการเปลี่ยนความเร็วไหลขึ้นจะลดลง
7. ที่ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบต่ำ หรือ 0.05 มก./ล. เมื่อทำการทดลองที่ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. จะมีค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่า เมื่อทำการทดลองโดยความเร็วที่ไหลขึ้น 18 ม./ชม.
8. ที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำสูง จะทำให้ค่าความขุ่นของน้ำผลิตสูงกว่าที่ความเร็วใบพัดกวนน้ำต่ำ แสดงว่าการกวนน้ำที่เร็วเกินไปจะทำให้เพลลิตแตกกลายเป็นความขุ่นตกค้างไปกับน้ำผลิต
9. อิทธิพลของความเร็วใบพัดที่มีต่อความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบเพิ่มขึ้น แสดงว่าการเพิ่มความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบ สามารถลดการแตกของเพลลิตเป็นความขุ่นตกค้างไปกับน้ำผลิต
10. เพลลิตที่อยู่ด้านล่างของอุปกรณ์สร้างเพลลิต มีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเพลลิตที่อยู่ด้านบน

11. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นเพลลิตเดียวกัน เมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบมาก เพลลิตจะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโพลีเมอร์ประจุลบน้อย

12. เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงของชั้นเพลลิตเดียวกัน การบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. ได้ความเร็วในการตกตะกอนของเพลลิตสูงกว่าเมื่อบำบัดน้ำด้วยความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม.

3.2.6 ปริญา ณ นคร (2535) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของความสูงชั้นเพลลิตที่ระดับต่างๆ (70, 90, 110 และ 130 ซม.) ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น โดยมีการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ (PACI) เป็นโคแอกกูแลนต์ในปริมาณ 1, 2, 3 และ 4 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอดในปริมาณ 0.1 มก./ล. โดยใช้ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ชม. ใช้น้ำดิบความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลิน 50 เอ็นทียู ทดลองที่ช่วงห่างใบพัด 4 ค่าคือ 5, 10, 15 และ 20 ซม. จากการวิจัยพบว่า

1. ปริมาณ PACI ที่ใช้ไม่มีผลมากนักต่อประสิทธิภาพกำจัดความขุ่น ขนาดเม็ดตะกอนและอัตราเร็วในการตกของเม็ดตะกอน
2. ผลจากช่วงห่างใบพัดที่ต่ำกว่าจะให้ผลการบำบัดที่ดีกว่า
3. ความสูงชั้นเพลลิตมากขึ้นจะให้ผลการกำจัดความขุ่นดีขึ้น เนื่องจากระบบมีความยาวในการกำจัดความขุ่นที่มากขึ้น ทำให้น้ำที่ออกจากระบบมีความขุ่นน้อยลง จากการวิจัยพบว่าที่ความสูงชั้นเพลลิต 130 ซม. เป็นความสูงที่ให้ผลการกำจัดความขุ่นดีที่สุด
4. ค่าเอสเอสมีความสัมพันธ์กับค่าความขุ่นที่ออกมาจากระบบอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือระบบที่กำจัดความขุ่นได้ดีจะมีของแข็งแขวนลอยหลุดออกไปกับน้ำที่ผลิตน้อยไปด้วย ซึ่งจากการทดลองจะมีค่าเอสเอสของน้ำผลิตอยู่ในช่วง 6.5-21 มก./ล.
5. การกำจัดความขุ่นโดยใช้ระบบสร้างเพลลิต ในเงื่อนไขของตัวแปรที่ใช้ทดลองสามารถกำจัดความขุ่นของน้ำดิบที่ 50 เอ็นทียูได้ถึง 89 % โดยใช้ปริมาณ PACI สูงสุดเพียง 4 มก./ล. โพลีเมอร์ต่ำ 0.1 มก./ล. โดยระบบยังสามารถใช้อัตราไหลขึ้นได้สูงถึง 24 ม./ชม.

3.2.7 สัตตา ธรรมการันย์ (2536) ทำการศึกษาผลของรูปร่างและการจัดใบกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นด้วยถังน้ำไลแบบหมุนเวียนตะกอน ทำการทดลองโดยใช้แบบทดลองในห้องปฏิบัติการขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ใช้ความขุ่นสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ และโพลีเมอร์ประจุลบเป็นโคแอกกูแลนต์เอด พบว่าใบกวนแบบราบที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 7 ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะขึ้นอยู่กับรูปร่าง ความเร็วรอบหมุน และระยะ

ห่างใบกวน โดยใบกวนที่มีรูเล็กจำนวนมากให้ผลดีกว่าใบกวนที่มีรูใหญ่จำนวนน้อยที่มีพื้นที่เปิดเท่ากัน และใบกวนที่มีผิวขรุขระให้ผลดีกว่าผิวเรียบ

3.2.8 อาชวัน อิมเอิบธรรม (2536) ทำการทดลองผลของโพสิเมอร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นโดยใช้โพสิเมอร์ประจุบวก 2 ชนิดๆละ 0.3 มก./ล. โพสิเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุอย่างละ 2 ชนิดๆละ 0.05, 0.1 และ 0.3 มก./ล. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 และ 36 ม./ชม. ใช้ความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลินที่ 50 เอ็นทียู จากการทดลองพบว่า

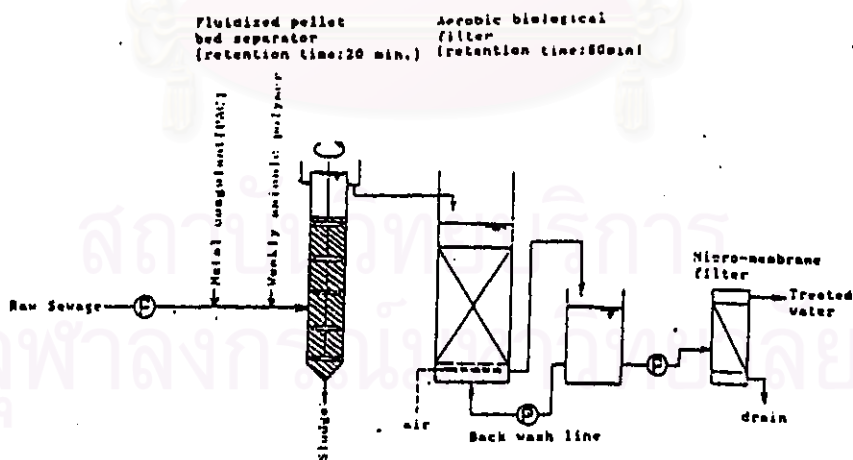
1. โพสิเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุเหมาะที่จะใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ดในกระบวนการสร้างเพลลิตแบบไหลขึ้น ส่วนโพสิเมอร์ประจุบวกยังไม่มีข้อสรุปเนื่องจากระบบยังไม่เข้าสู่ภาวะคงตัว
2. ความขุ่นของน้ำผลิตที่สภาวะคงตัวมีค่าแปรผันตรงกับความเร็วน้ำไหลขึ้น แต่มีค่าแปรผกผันกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของโพสิเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุ
3. การใช้โพสิเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุปริมาณน้อย (0.05 มก./ล.) ระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัวช้าและน้ำที่ผลิตมีความขุ่นสูงกว่า 5 เอ็นทียู
4. การใช้โพสิโสมิเนียมคลอไรด์ปริมาณ 3 มก./ล. มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่ำกว่าการใช้โพสิโสมิเนียมคลอไรด์ปริมาณ 1 มก./ล. เนื่องจากปริมาณอสมิเนียมมากทำให้เพลลิตอัดตัวไม่แน่น เพลลิตจะเบาทำให้มีความขุ่นของน้ำผลิตสูงขึ้นด้วย
5. โพสิเมอร์ไม่มีประจุ (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 8-10 ล้าน) จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าโพสิเมอร์ประจุลบ (น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10-11 ล้าน) แม้จะมีน้ำหนักโมเลกุลที่น้อยกว่า
6. การใช้โพสิเมอร์ประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุล 11 ล้าน จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงกว่าการใช้โพสิเมอร์ประจุลบที่มีน้ำหนักโมเลกุล 10 ล้าน
7. การใช้โพสิเมอร์ประจุลบและไม่มีประจุเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นสูงขึ้น
8. ขนาดและความเร็วในการตกตะกอนของเพลลิตมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของโพสิเมอร์

3.2.9 Suzuki, Tambo และ Ozawa (1993) ทำการทดลองศึกษาระบบบำบัดน้ำเสียแบบใหม่ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องแยกฟลูอิดไดซ์เพลลิตเบด เครื่องกรองชีวะแบบแอโรบิก และเครื่องกรองไมโครเมมเบรน ดังรูปที่ 3.20 ในระบบนี้ ชั้นแรกสารอินทรีย์แขวนลอยจะถูกกำจัดโดยกระบวนการโค

แอกกูเลชันและฟล็อกคูเลชันด้วยสารเคมี ซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องแยกฟลูอิดไดซ์เฟลลิตเบดโดยใช้ความเร็วไหลขึ้น 200-300 ม./วัน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกกำจัดในชั้นตอนนี้ ดังนั้นค่าบีโอดีของน้ำที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีค่าต่ำ ทำให้สามารถใช้กระบวนการทางชีวะอย่างง่าย ๆ เช่นเครื่องกรองชีวะแบบแอโรบิก ซึ่งใช้เวลาก็น้ำสั้นมากเพียง 1 ชม. ในขั้นสุดท้ายน้ำที่ผ่านออกจากเครื่องกรองชีวะจะถูกบำบัดต่อโดยเครื่องกรองไมโครเมมเบรน ทำให้สารแขวนลอยถูกกำจัดอย่างสมบูรณ์ ความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำที่ผ่านการบำบัดจะมีค่าต่ำมาก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการโคแอกกูเลชันในขั้นแรก และการนำสารอาหารไปใช้ในขั้นที่สอง และการแยกของเหลว-ของแข็งโดยสมบูรณ์ในขั้นที่สาม จากการทดลองพบว่า

ใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ประมาณ 10-15 มก.  $Al_2O_3$ /ล. และโพลีเมอร์ประจุลบประมาณ 1-2 มก./ล. ใช้เวลาก็น้ำเพียง 1.5 ชม. สามารถกำจัดฟอสเฟต และบีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1. ในเครื่องแยกฟลูอิดไดซ์เฟลลิตเบด ฟอสเฟตและของแข็งแขวนลอยจะถูกกำจัดภายใน 20 นาที และพบว่าไม่มีฟอสเฟตเหลือจากสลัดจ์จากเครื่องแยกนี้
2. บีโอดีแขวนลอยจะถูกกำจัดในเครื่องแยกฟลูอิดไดซ์เฟลลิตเบด ต่อจากนั้นเครื่องกรองชีวะจะกำจัดบีโอดีที่เหลือในเวลาอันสั้นประมาณ 1 ชม.



รูปที่ 3.20 ผังอุปกรณ์การทดลอง (Suzuki, Tambo and Ozawa, 1993)

3.2.10 Tambo และ Wang (1993) ได้ทำการทดลองการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดน้ำที่มีความขุ่นสูงในกระบวนการสร้างเพลลัด โดยใช้ความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลิน ทำการทดลองหลายการทดลองดังนี้

1. นาอิทธิพลของอัตราส่วน ALT ทำการโดยใช้ความขุ่น 3000 มก./ล. PT = 0.001 แปรค่า ALT 4 ค่าคือ 0.001, 0.002, 0.003 และ 0.004 พบว่าที่ค่า ALT = 0.004 ไม่เกิดเพลลัด ส่วนที่ค่า ALT = 0.001 เกิดเพลลัดแต่เกิดเกาะติดที่ผนังระบอบอกและที่แกนใบ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้งาน สำหรับที่ค่า ALT = 0.002 และ 0.003 พบว่าเพลลัดเกิดขึ้นได้ดี ระบบมีความคงตัว และสามารถกำจัดความขุ่นได้อย่างดีมาก โดยใช้เวลากักน้ำเพียง 5 นาที

2. นาอิทธิพลของอัตราส่วน PT ทำการโดยใช้ความขุ่น 3000 มก./ล. ALT = 0.002 แปรค่า PT 4 ค่าคือ 0.0005, 0.001, 0.0015 และ 0.002 พบว่าที่ค่า PT = 0.0005 ไม่เกิดเพลลัด และสามารถสรุปได้ว่า

- ปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้มีความสำคัญต่อการสร้างเพลลัด และการใช้โพลีเมอร์มากเกินไปทำให้การลอยตัวของชั้นฟลูอิดไดซ์เบดเสียไปและเกิดกลุ่มฟล็อกขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น

- เพลลัดจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงโดยเรียงจากตอนล่างสุดตอนบนของชั้นเพลลัด และการใช้ค่า PT = 0.001 มีความเหมาะสมสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่น 3000 มก./ล.

- ระบบสามารถทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขดังนี้

- เพลลัดต้องมีความหนาแน่นสูง
- ชั้นเพลลัดต้องมีความคงตัว
- น้ำที่ผลิตมีความขุ่นต่ำ

3. นาอิทธิพลของชนิดโพลีเมอร์ ทำการทดลองโดยใช้โพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกันแต่ต่างชนิดกัน ได้แก่ ชนิดไม่มีประจุ N-100 PWG (MW 1600x10<sup>4</sup>Da) ชนิดประจุลบอย่างอ่อน A-100 PWG (MW 1700x10<sup>4</sup>Da) และชนิดประจุลบ A-110 PWG (MW 1600x10<sup>4</sup>Da) น้ำดิบความขุ่น 3000 มก./ล. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 18 ม./ชม. ALT = 0.002 และ PT = 0.001 พบว่าชนิดของโพลีเมอร์ทั้ง 3 ชนิดไม่มีผลอย่างเด่นชัดต่อความคงตัวของระบบ ขนาด และความหนาแน่นของเพลลัด

4. ทำการทดลองจาร์เทสต์ ใช้ความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอลิน โดยชั้นแรกเติมอลูมิเนียม แล้วทำการกวนเร็วเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นเติมโพลีเมอร์ลงไปและกวนช้าต่ออีก 15 นาที ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที พบว่าปริมาณอลูมิเนียม และโพลีเมอร์ที่เหมาะสมในการสร้างเพลลัดสำหรับน้ำดิบที่มีความขุ่นต่างๆ ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า ALT และ PT ที่เหมาะสมในการสร้างเพลล็ด (Tambo and Wang, 1993)

ความขุ่น (มก./ล.)	ALT	PT
10000	0.001	0.0005
3000	0.002	0.001
1000	0.003	0.0015
300	0.006	0.003

3.2.11 วิจารณ์ ดันติธรรม (2537) ทำการศึกษาผลของสารส้มในการกำจัดความขุ่นโดยดั่งน้ำใบบนหมุนเวียนตะกอน โดยให้แบบจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. ใช้ความขุ่นสังเคราะห์ 50 เอ็นทียู ใช้สารส้มปริมาณ 10-30 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์ และโพลีเมอร์ประจุลบปริมาณ 0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์เอตความเร็วรอบหมุน 5-20 รอบ/นาที อัตราน้ำส้มฝิว 30-60 ซม./นาที พบว่าค่าความขุ่นของน้ำผลิตขึ้นอยู่กับอัตราน้ำส้มฝิว และความเข้มข้นของสารส้ม ในช่วงอัตราน้ำส้มฝิว 30-45 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะลดลงเมื่อสารส้มเพิ่มขึ้น แต่ในช่วง 45-60 ซม./นาที ค่าความขุ่นของน้ำผลิตจะเพิ่มขึ้นเมื่อสารส้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มอัตราน้ำส้มฝิวและ/หรือการเพิ่มความเร็วรอบใบกวน นอกจากจะทำให้ค่าความขุ่นน้ำผลิตเพิ่มขึ้น ยังทำให้ความเข้มข้นโดยปริมาตรของตะกอนและความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในดั่งทำน้ำใสลดลงอีกด้วย

3.2.12 คณิศ ม่วงศิริ (2538) ทำการทดลองโดยใช้โพลีอูมิเนียมคลอไรด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 มก./ล. และใช้โพลีเมอร์ประจุลบ, โพลีเมอร์ประจุบวก, โพลีเมอร์ไม่มีประจุเข้มข้น 0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์เอต ความเร็วน้ำไหลขึ้น 24 ม./ช.ม. ตัวแปรอิสระคือพีเอช 7 ค่าที่ 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5 และ 8 สังเคราะห์ความขุ่นที่ 50 เอ็นทียู โดยใช้ดินคาโอลิน จากผลการทดลองพบว่า

1. โพลีอูมิเนียมคลอไรด์อาศัยกลไกการดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าในการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่พีเอชต่ำ และอาศัยโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เกาะยึดอนุภาคคอลลอยด์ที่พีเอชสูง ในขณะที่โพลีเมอร์ประจุลบอาศัยกลไกการต่อเชื่อมด้วยโพลีเมอร์ในการสร้างเพลล็ด โพลีเมอร์ไม่มีประจุอาศัยการต่อเชื่อมร่วมกับการทำลายประจุ ส่วนโพลีเมอร์ประจุบวกอาศัยประจุบวกในการลดศักย์ไฟฟ้าของคอลลอยด์และกลไกการต่อเชื่อมในการสร้างเพลล็ด

2. ที่พีเอชต่ำในช่วงการวิจัย ความขุ่นของน้ำที่ผลิตมีค่าสูงกว่าที่พีเอชสูงเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญ และทุกเงื่อนไขการทดลองความขุ่นของน้ำที่ผลิตมีค่าต่ำกว่า 5 เอ็นทียู

3. พีเอชไม่มีผลต่อความเร็วในการตกตะกอนของเพลล็ดและความสูงของชั้นเพลล็ด แต่มีผลต่อขนาดเพลล็ดอยู่บ้างแต่ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน



4. ทีเอชมีผลต่อปริมาณอลูมิเนียมในน้ำ ซึ่งปริมาณอลูมิเนียมในน้ำมีค่าต่ำเมื่อค่า ทีเอชอยู่ในช่วง 6.5-7.0 และมีค่าไม่เกิน 200 ไมโครกรัม/ลิตร

3.2.13 กานตพันธ์ พิศาลสุขสกุล (2539) ทำการศึกษาการเวียนเพลลัดเพื่อลดปริมาณความต้องการสารเคมีในการกำจัดความขุ่นด้วยกระบวนการสร้างเพลลัด โดยเวียนเพลลัดจากส่วนบนของชั้นเพลลัดกลับมาที่ส่วนล่างของอุปกรณ์สร้างเพลลัด ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนต์ โพลีเมอร์ไม่มีประจุ ปริมาณ 0.1, 0.2 และ 0.3 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์และ/หรือโคแอกกูแลนต์เอด กำหนดอัตราเวียนเพลลัด 0, 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4 ของอัตราน้ำเข้าระบบ น้ำดิบจริงจากแม่น้ำเจ้าพระยาเปลี่ยนแปลงจาก 20-250 เอ็นทียู จากการวิจัยพบว่า

1. ปริมาณความต้องการสารส้มในการผลิตน้ำคุณภาพสูง (ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู) จะต่ำลงเมื่อมีการเวียนเพลลัด โดยไม่ต้องใช้สารส้มเลยในช่วงความขุ่นต่ำ (20-100 เอ็นทียู) และใช้สารส้ม 15.12 มก./ล.ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.1 มก./ล.ในช่วงน้ำดิบความขุ่นสูง (100-250เอ็นทียู)
2. อัตราเวียนเพลลัดสูงขึ้นทำให้เพลลัดมีความเร็วจมตัวและความหนาแน่นสูงขึ้น โดยเพลลัดที่ความสูง 130 ซม. จะมีความหนาแน่นสูงถึง 1.39 ก./ลบ.ซม. และความเร็วจมตัว 36.44 ซม./นาที เมื่อใช้โพลีเมอร์ 0.3 มก./ล. อัตราเวียน 0.4 เมื่อทดลองในช่วงความขุ่นต่ำ
3. เวลาพักของแข็งในช่วงน้ำดิบความขุ่นต่ำมีค่าประมาณ 2.5-3.5 วัน และ 1.5-2.5 วัน ในช่วงความขุ่นสูง โดยเวลาพักของแข็งจะมีค่าต่ำเมื่ออัตราเวียนสูง
4. อัตราเวียน 0.2 ของอัตราไหลเข้า ระบบสามารถผลิตน้ำคุณภาพสูงโดยใช้ระยะเวลาสั้น ทั้งนี้ช่วงน้ำดิบความขุ่นสูงสามารถผลิตน้ำคุณภาพสูงได้ตั้งแต่เริ่มเดินระบบเมื่อใช้สารส้ม 15.12 มก./ล. ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.3 มก./ล.
5. เมื่ออัตราเวียนเพลลัดเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นต่อมวลเพลลัดสูงขึ้นโดยมีค่าถึง 1.06% การกำจัดความขุ่นต่อกรัมเมื่อเวียนเพลลัดด้วยอัตรา 0.4 ของอัตราไหลเข้า ขณะที่ไม่มีการเวียนเพลลัดมีค่าเพียง 0.81% การกำจัดความขุ่นต่อกรัม

3.2.14 พลภัทร อรัณยกานนท์ (2540) ทำการทดลองเรื่องประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นของกระบวนการสร้างเพลลัดแบบไหลขึ้นในระบบขนาดต้นแบบ ทำการทดลองในระบบขนาดใช้งานจริง โดยใช้น้ำดิบจากคลองประปาที่มีความขุ่นในช่วง 90 ถึง 250 เอ็นทียู ถึงปฏิกรณ์ทำด้วยเหล็ก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 ม. โดยใช้สารส้มปริมาณ 20 มก./ล. เป็นโคแอกกูแลนต์ และโพลีเมอร์ไม่มีประจุเป็นโคแอกกูแลนต์เอด ที่อัตราน้ำไหลขึ้นอย่างน้อย 8 ม./ชม. พบว่า

1. ในการทดลองยังไม่สามารถสร้างเพลลิตได้ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมลักษณะทางกายภาพของตั้งปฏิกิริยาให้มีความเหมาะสมได้ แม้จะใช้ ALT 0.015 ถึง 0.005 และ PT 0.0025 ถึง 0.0098

2. การเขียนมวลของแข็งในการทดลองนี้ทำให้ระบบเสถียร อาจเนื่องมาจากเครื่องสูบน้ำที่ใช้เขียนมวลของแข็งไม่เหมาะสมทำให้มวลของแข็งแตกและกลายเป็นการเพิ่มภาระให้กับระบบ

3. อัตราการหมุนใบกวน 2 รอบ/นาที ให้ผลดีกว่าที่อัตราหมุนที่สูงกว่า และมีแนวโน้มว่าถ้าอัตราการหมุนต่ำกว่านี้จะให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

4. การเพิ่มปริมาณโพสิเมอร์จาก 0.1 ถึง 0.9 มก./ล. มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดีขึ้น

3.2.15 T. Panswad (1998) ได้ศึกษาการพัฒนาระบบการสร้างเพลลิตโดยการเขียนเพลลิตโดยใช้อุปกรณ์สร้างเพลลิตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 62.5 มม. สูง 2,500 มม. เริ่มต้นระบบโดยใช้ความขุ่นสังเคราะห์จากดินคาโอสิน 3,000 มก./ล. สารส้ม 30 มก./ล. ร่วมกับโพสิเมอร์ชนิดไม่มีประจุ 0.1-0.3 มก./ล. แล้วแต่การทดลอง ทำการทดลองโดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาในช่วงฤดูฝนความขุ่น 100-250 เอ็นทียู และฤดูร้อนความขุ่น 30-90 เอ็นทียู อัตราเขียนเพลลิต 0.1-0.4 ของอัตราไหลเข้า พบว่า

1. ระบบสามารถผลิตน้ำที่มีความขุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู โดยใช้สารส้ม 15 มก./ล. ร่วมกับโพสิเมอร์ 0.1 มก./ล. อัตราเขียนเพลลิต 0.1 ในช่วงความขุ่น 100-250 เอ็นทียู และโพสิเมอร์ 0.1 มก./ล. ที่อัตราเขียนเพลลิต 0.1 โดยไม่ใช้สารส้มในช่วงความขุ่น 30-90 เอ็นทียู

2. การเพิ่มปริมาณโพสิเมอร์ทำให้สามารถเพิ่มอัตราผลิตน้ำได้เป็น 17 และ 25 ชม./นาที ในช่วงความขุ่น 100-250 และ 30-90 เอ็นทียูตามลำดับ

3. การเขียนเพลลิตทำให้เกิด wash-out effect ซึ่งจะเกิดการกัดพันรูกำจัดเพลลิตที่มีขนาดเล็กและเบาเหลือแต่เพลลิตที่ดีที่มีความหนาแน่นสูง (1.05-1.49 ก./ลบ.ซม.)

4. การเขียนเพลลิตทำให้ความเข้มข้นของอลูมินัมในน้ำผลิตมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ในทุกการทดลอง

3.2.16 T. Panswad and S. Polwanich (1998) ทำการศึกษาการใช้กระบวนการสร้างเพลลิตขนาดนำร่องสำหรับน้ำดิบความขุ่นต่ำ โดยใช้น้ำดิบจริงจากแม่น้ำเจ้าพระยาความขุ่น 20-240 เอ็นทียู อุปกรณ์สร้างเพลลิตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มม. สูง 2,500 มม. อัตราน้ำไหลขึ้น 20 ชม./นาที เวลาพักน้ำ 12.5 นาที ใช้สารส้ม 0-9.2 มก.  $Al_2O_3$ /ล. ร่วมกับโพสิเมอร์ชนิดประจุลบ ไม่มีประจุ และ

ประจุบวก 0.3 มก./ล. ทำการทดลองต่อเนื่อง 6 และ 72 ชม.ต่อทำการทดลองโดยมีการเริ่มต้นระบบโดยใช้ ดินคาโอลิน 3,000 มก./ล. พบว่า

1. ใช้สารส้ม 1.53 มก.  $Al_2O_3$ /ล. ร่วมกับโพลีเมอร์ 0.3 มก./ล. สามารถผลิตน้ำที่มีความ ชุ่นต่ำกว่า 5 เอ็นทียู ในช่วงน้ำดิบมีความขุ่น 20-100 เอ็นทียู และใช้สารส้ม 3.83 มก.  $Al_2O_3$ /ล. ร่วมกับ โพลีเมอร์ 0.3 มก./ล. ในช่วงน้ำดิบมีความขุ่น 100-240 เอ็นทียู

2. โพลีเมอร์ประจุบวกมีประสิทธิภาพสูงกว่าชนิดไม่มีประจุและชนิดประจุลบ

3. เพลล็ดมีขนาด ความเร็วจมตัว และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเรียงจากบนสู่ล่างของ ชั้นเพลล็ดตั้งแต่ 0.25-0.29 มม. 18.7-23 ชม./นาทึ และ 1.06-1.10 ก./ลบ.ชม.ตามลำดับ

3.2.17 T. Panswad and K. Areesawangkit (1999) ทำการศึกษาเรื่องอัตราภาระมวลเพลล็ดและ เวลาพักเพลล็ดสำหรับการกำจัดความขุ่นในกระบวนการสร้างเพลล็ด ทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ สร้างเพลล็ดขนาดน้ำร่อง เริ่มต้นระบบโดยใช้ดินคาโอลิน 3,000 มก./ล. ทำการทดลองต่อเนื่อง 72-84 ชม.ต่อทำการทดลอง โดยใช้น้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา ใช้สารส้ม 3-10 มก./ล.ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.3 มก./ล. ความเร็วไหลขึ้น 9.6 และ 15 ม./ชม.ในช่วงฤดูร้อนความขุ่น 30-60 เอ็นทียู และใช้สารส้ม 19-26 มก./ล.ร่วมกับโพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.3 มก./ล. ความเร็วน้ำไหลขึ้น 6 และ 9.6 ม./ชม.ในช่วงฤดูฝน ความขุ่น 100-200 เอ็นทียู และใช้โพลีเมอร์ไม่มีประจุ 0.1-0.3 มก./ล.เป็นโคแอกกูแลนต์ในทั้งสองกรณี พบว่า

1. มวลเพลล็ดเพิ่มจาก 23,000 เป็น 47,000 มก./ล. ในระยะเวลาที่ทำการทดลอง 84 ชม. และระบบจะเข้าสู่สถานะคงตัวภายใน 50-70 ชม.

2. ในกรณีน้ำดิบมีความขุ่นต่ำ 30-60 เอ็นทียู ระบบสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูง (ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู)ได้โดยใช้อัตราส่วนอลูมินัมต่อความขุ่น (ALT) 0.004-0.015 อัตราส่วนโพลีเมอร์ต่อความ ขุ่น (PT) 0.0054-0.0059 อัตราภาระมวลเพลล็ด (PML) 0.40-0.76 ก. SS/วัน/ก. หรือ 0.90-1.21 NTU $\alpha$ /ก. และเวลาพักเพลล็ด 4.4-11.9 วัน

3. ในกรณีน้ำดิบความขุ่นสูง 100-200 เอ็นทียู ระบบสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูง (ต่ำกว่า 5 เอ็นทียู)ได้โดยใช้อัตราส่วนอลูมินัมต่อความขุ่น (ALT) 0.014-0.022 อัตราส่วนโพลีเมอร์ต่อ ความขุ่น (PT) 0.002-0.003 อัตราภาระมวลเพลล็ด (PML) 0.13-0.21 ก. SS/วัน/ก. หรือ 0.13-0.20 NTU $\alpha$ / ก. และเวลาพักเพลล็ด 1.3-3.7 วัน

4. ในกรณีที่ใช้โพลีเมอร์ไม่มีประจุเป็นโคแอกกูแลนต์ ระบบไม่สามารถผลิตน้ำคุณภาพ สูงได้ (7-18 เอ็นทียู) โดยใช้อัตราส่วนโพลีเมอร์ต่อความขุ่น (PT) 0.0006-0.0053

5. เพดเล็ดมีขนาดและความหนาแน่นไม่แตกต่างกันมากนักในทั้งสองกรณีคือ 0.18-0.22 มม. และ 1.06-1.12 ก./ลบ.ซม.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย