

2.1 ทฤษฎีกระบวนการโคแอกกูเลชัน

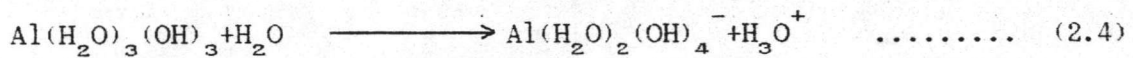
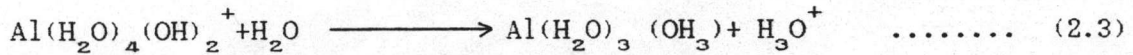
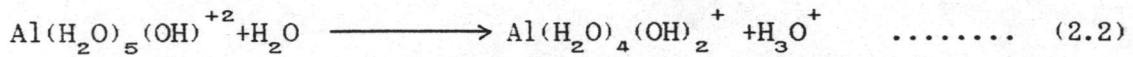
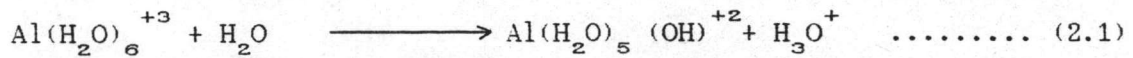
กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการย่อยที่สำคัญมาก ในการจัดความขุ่นที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยในน้ำ โดยที่ไม่สามารถตกตะกอนเพียงลำพัง (O'Melia, 1972) กระบวนการโคแอกกูเลชันประกอบด้วยขั้นตอนหรือส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการไฟฟ้า-เคมี ในการลดหรือทำลายเสถียรภาพที่ผิวอนุภาคคอลลอยด์ และขั้นตอนทางกายภาพในการสร้างสภาวะที่เหมาะสมแก่อนุภาคคอลลอยด์ ที่สูญเสียเสถียรภาพให้เคลื่อนที่เข้าใกล้กัน เพื่อสร้างโอกาสสัมผัสและรวมตัวของอนุภาคจนมีขนาดใหญ่ขึ้น

การกระจายสารโคแอกกูแลนต์ในน้ำให้ทั่วถึงเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ กลไกทางเคมีที่ใช้ทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ธรรมชาติและความเข้มข้นของคอลลอยด์ ลักษณะทางเคมีของน้ำดิบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือ พีเอช ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนต์ ตลอดจนระดับความปั่นป่วนของน้ำ (มันสิน ตัดทุลเวศม์, 2526)

เนื่องจากโคแอกกูแลนต์ที่ใช้ในการวิจัยคือสารส้ม ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงกลไกที่เกิดขึ้นในกระบวนการโคแอกกูเลชัน โดยใช้สารส้มเท่านั้น

2.2 เคมีของสารส้มในน้ำ

สารส้มเมื่ออยู่ในน้ำสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีแตกตัวได้ออออนประจุบวกและลบ ไอออนบวกจะทำปฏิกิริยากับน้ำได้สารประกอบ $Al(H_2O)_6^{+3}$ ซึ่งเรียกสารประกอบนี้ว่า aquometal ion สารประกอบดังกล่าวนี้จะมีคุณสมบัติเป็นกรดที่ไร้เสถียรภาพพร้อมที่จะให้ไอออนบวกของไฮโดรเจน (H^+) แก่น้ำ ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า monomeric hydroxo complex ต่าง ๆ ดังสมการ 2.1 - 2.4 (Stum and Morgan, 1962)



2.3 กลไกโคแอกกูเลชันของสารส้ม

สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จนเกิดโคแอกกูเลชันได้ด้วยกลไกหลัก 2 ประการคือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ (adsorption/charge neutralisation) และกลไกแบบกวาด (sweep coagulation)

2.3.1 กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

สารส้มสร้างกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุโดยการแตกตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนประจุชนิดต่าง ๆ เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$ ซึ่งสามารถดูดติดผิวของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และพร้อมที่จะรวมตัวกันหลาย ๆ อนุภาคจนกลายเป็นฟล็อก (มันลิน ดัณฑุลเวศม์, 2526)

ตะกอนที่เกิดจากกลไกโคแอกกูเลชันลักษณะนี้สามารถอัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากตะกอนได้ง่าย แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบและควบคุมให้เกิดกลไกแบบนี้มักไม่สามารถกระทำได้ ดังนั้นจึงปรากฏว่าโคแอกกูเลชันส่วนใหญ่มีกลไกแบบกวาด ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่ามาก ซึ่งอาจเนื่องมาจากกลไกแบบนี้ต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที สารประกอบเชิงซ้อนต้องดูดติดผิวอนุภาคคอลลอยด์ ภายในเวลาดังกล่าวมีเวลานั้นแล้วสารประกอบเชิงซ้อน จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $\text{Al}(\text{OH})_3$ ทำให้เกิดกลไกโคแอกกูเลชันแบบกวาด ซึ่งจะมีการจับตัวกันระหว่างตะกอนฟล็อก $\text{Al}(\text{OH})_3$ และอนุภาคคอลลอยด์มากกว่าที่จะเป็นแบบดูดติดและสะเทินทางไฟฟ้า (มันลิน ดัณฑุลเวศม์, 2526)

2.3.2 กลไกแบบกวาด

กลไกแบบนี้เกิดจากการเติมสารส้มลงไปใต้น้ำจนมีความเข้มข้นสูงกว่าจุดอิ่มตัว

ทำให้เกิดผลึกของ $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุ๋ย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ ก็จะทำให้เกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้น เมื่อเกิดขึ้นมาก ๆ จะได้ผลึกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2526)

กระบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาส่วนใหญ่จะใช้กลไกแบบกวาดนี้ เพราะเกิดผลึกได้ในช่วงพีเอชกว้าง (Amirtharajar and Mills, 1982) จึงควบคุมง่าย แต่ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีข้อเสียคืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกยาก (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2526)

2.4 ทฤษฎีของการสมานตะกอน

การสมานตะกอนเป็นการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ซึ่งถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเกิดชนกัน และรวมตัวกันเป็นผลึก ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ปรากฏการณ์ซึ่งทำให้เกิดการสมานตะกอนอาจจำแนก ออกเป็นสามประเภท (O'Melia, 1972) ได้แก่ การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน (thermal motion), การจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน (differential settling) และการเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว (bulk fluid motion) ปรากฏการณ์แต่ละประเภทยังมีพฤติกรรมที่ แตกต่างกันไปดังต่อไปนี้

2.4.1 การเคลื่อนที่เนื่องจากความร้อน

ความร้อนภายในน้ำซึ่งแปรรูปเป็นพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วและชนอนุภาคที่กระจายอยู่ในน้ำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random motion) จนเกิดการชนหรือสัมผัสระหว่างอนุภาคขึ้น การสมานกันระหว่างกลุ่มของอนุภาคหลัง การสัมผัสทำให้ตะกอนมีขนาดใหญ่ขึ้น

การสมานตะกอนในลักษณะดังกล่าวมานี้เรียกว่าการสมานตะกอนแบบเพอริโคเนติก (perikinetic flocculation) อัตราการสมานตะกอนแบบเพอริโคเนติกขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคืออุณหภูมิและขึ้นอยู่กับจำนวนของอนุภาค การสมานตะกอนประเภทนี้จะมีอัตราสูงเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 1 ไมครอน และจะลดลงจนเหลือน้อยมากเมื่ออนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นจนใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O'Melia, 1972)

2.4.2 การจมตัวด้วยอัตราเร็วแตกต่างกัน

การสมานตะกอนโดยปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นในน้ำที่อยู่ในสภาวะสถิตย์หรือปราศจากความปั่นป่วน (static or non-turbulent fluid) โดยอนุภาคตะกอนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีความเร็วในการจมตัวสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ทำให้เกิดการชนและสมานกันขึ้นในระหว่างการจมตัว การสมานตะกอนโดยการจมตัวด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกันดังกล่าวนี้โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นในถังไซลิंड์คอนแทกต์ และในถังตกตะกอนในแนวตั้งทั่วไป

2.4.3 การเคลื่อนที่ของเนื้อของเหลว

เมื่อมีการกวนเกิดขึ้นในเนื้อของเหลว ความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำจะแปรไปตามตำแหน่งและเวลา อนุภาคซึ่งเคลื่อนที่ไปกับน้ำจะมีความเร็วแตกต่างกันไปทำให้เกิดการชนและการสมานตัวกันในที่สุด การสมานตะกอนที่เกิดจากปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การสมานตะกอนแบบออร์โธไคเนติก (orthokinetic flocculation) เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสมานตะกอน โดยพิจารณาจากขนาดอนุภาค ปรากฏว่าการสมานตะกอนประเภทนี้มีอัตราสูงกว่าการสมานตะกอนแบบเพอร์ไคเนติกมากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน (O' Melia, 1972)

โดยที่อนุภาคตะกอนและตะกอนในชั้นสมานตะกอนมีขนาดตั้งแต่ 100 ถึง 2000 ไมครอน ดังนั้นกลไกหลักในชั้นสมานตะกอนของกระบวนการรวมตะกอนจึงได้แก่กลไกแบบออร์โธไคเนติก (O' Melia, 1972)

2.5 ทฤษฎีของการตกตะกอน

การตกตะกอนเป็นวิธีการที่ใช้แยกอนุภาคแขวนลอยออกจากน้ำ โดยการทำให้น้ำมีความเร็วต่ำลง และไหลราบเรียบขึ้นกว่าเดิม จนเกิดการแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยกับน้ำ อนุภาคแขวนลอยก็จะตกตะกอนลงสู่ส่วนล่างโดยแรงดึงดูดของโลก ซึ่งอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ใช้น้ำหนักของอนุภาคเป็นตัวแยกตัวมันเองจากน้ำ เป็นผลให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ น้ำใส และตะกอนของอนุภาคแขวนลอยที่จมมารวมตัวกัน

การตกตะกอนอาจจำแนกได้ 4 ประเภทตามระดับความเข้มข้นและคุณสมบัติของของแข็งที่อยู่ในน้ำ (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2526)

2.5.1 การตกตะกอนแบบโดด (discrete settling) การตกตะกอน แบบนี้ แต่ละอนุภาคจะตกตามลำพังด้วยน้ำหนักตัวเอง เช่น การตกตะกอนของเม็ดทราย อนุภาคของแข็งที่มีลักษณะคงที่ เมื่อปล่อยให้ตกผ่านของเหลวซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่าภายใต้อิทธิพลของแรงดึงดูดของโลก อนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 1.0 จะตกตะกอนในน้ำด้วยความเร่ง จนกระทั่งเมื่อแรงเสียดทานของของเหลวมีค่าเท่ากับแรงขับที่กระทำบนอนุภาคของของแข็งนั้น หลังจากนั้นอนุภาคจะตกตะกอนด้วยความเร็วคงที่ และจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาค ตลอดจนความหนาแน่นและความหนืดของน้ำ ในการพิจารณาทั่วไป เรามักถือว่าอนุภาคเป็นแบบทรงกลม แต่ถ้าอนุภาคมีรูปร่างอย่างอื่นความเร็วของการตกตะกอนก็สามารถเปรียบเทียบในเทอมของความเร็วของอนุภาคทรงกลมได้เช่นกัน

สมการทั่วไปที่ใช้แทนการตกตะกอนของอนุภาคทรงกลม คือ

$$V_o = [4g(\rho_s - \rho)d/3C_D]^{1/2} \dots\dots\dots (2.5)$$

โดยที่

- V_o = ความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคแบบโดด
- g = ค่าคงที่ของแรงดึงดูดของโลก
- ρ_s = ความหนาแน่นของอนุภาค
- ρ = ความหนาแน่นของน้ำ
- d = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
- C_D = ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง (drag coefficient)
- C_D มีค่าไม่คงที่ แต่จะขึ้นกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (R)

$$C_D = 24/R + 3/R^{1/2} + 0.34 \dots\dots\dots (2.6)$$

$$R = V_o \rho d / \mu \dots\dots\dots (2.7)$$

โดยที่

- μ = ความหนืดสัมบูรณ์ของน้ำ (absolute viscosity)

เมื่อ $R < 0.5$, $C_D = 24/R$ ทำให้สมการ 2.5 กลายเป็น

$$V_o = g(\rho_s - \rho) d^2 / 18 \dots\dots\dots (2.8)$$

สมการที่ 2.8 นี้เรียกว่า กฎของสโตกส์ (Stoke's law) สมการนี้สามารถใช้ได้ดีกับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.1 ซม. และเรย์โนลด์์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง 0.0001 ถึง 1.0 แต่ถ้าเรย์โนลด์์นัมเบอร์อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2000 (อยู่ในช่วงกำลังเปลี่ยนสภาวะ หรือ transition region) จะต้องใช้สมการที่ 2.5 และ 2.6 แทน ทราบและฟลักซ์ที่มีน้ำหนักมักตกตะกอนอยู่ในช่วงกำลังเปลี่ยนสภาวะนี้

Hazen (1904) และ Camp (1946) ได้วิเคราะห์การตกตะกอนของอนุภาคโคตภายในถังตกตะกอนแบบอุดมคติ โดยมีข้อสมมติฐานดังนี้

1. อนุภาคแขวนลอยและความเร็วของน้ำกระจายสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดถังตกตะกอน
2. มวลของน้ำเคลื่อนที่สม่ำเสมอทั้งหมด
3. อนุภาคแขวนลอยที่ตกตะกอนลงสู่ก้นถังจะถูกกำจัดออกหมด ไม่ทวนกลับขึ้นไปอีก

ทั้งสองคนได้แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยกับอัตราน้ำไหลเข้าถัง และพื้นที่ผิวถังตกตะกอน ดังนี้

$$V_o = Q/A \dots\dots\dots (2.9)$$

- V_o = ความเร็วในการตกตะกอน
- Q = อัตราน้ำไหลผ่านถังตกตะกอน
- A = พื้นที่ผิวหน้าของถังตกตะกอน

เมื่อพิจารณาการตกตะกอนของอนุภาคโคตในถังตกตะกอนแบบอุดมคติ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีความเร็วในการตกตะกอนมากกว่า V_o ตะกอนของอนุภาคเหล่านั้นจะถูกกำจัดออกหมด 100% หากความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอย V_s น้อย V_o ตะกอนส่วนนี้จะถูกกำจัดออกในอัตราส่วน V_s/V_o จะได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกอนของถังตกตะกอนมีค่า R ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

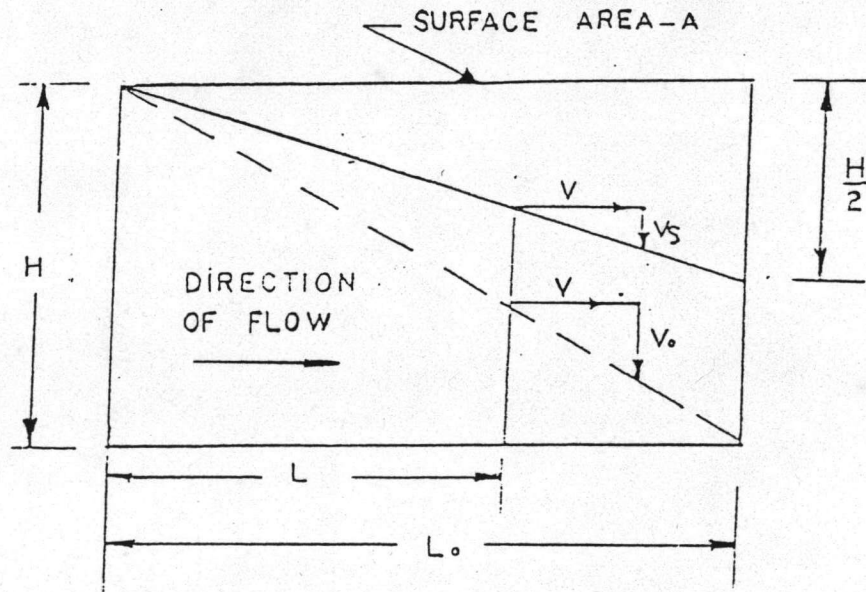
$$R = (1 - C_{r,0}) + 1/V_o \int_0^{C_{r,0}} V_s dC_r \dots\dots\dots (2.10)$$

$C_{r,0}$ = อัตราส่วนของจำนวนอนุภาคของแข็งที่มีความเร็วเท่ากับหรือน้อยกว่า V_0

จากรูปที่ 2.2 ได้ว่า $1/V_0 \int_0^{C_{r,0}} V_u dC_r$ เป็นค่าเฉลี่ยกราฟเส้นโค้งระหว่างระยะแนวตั้งกับแนวราบ

2.5.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (flocculent settling)

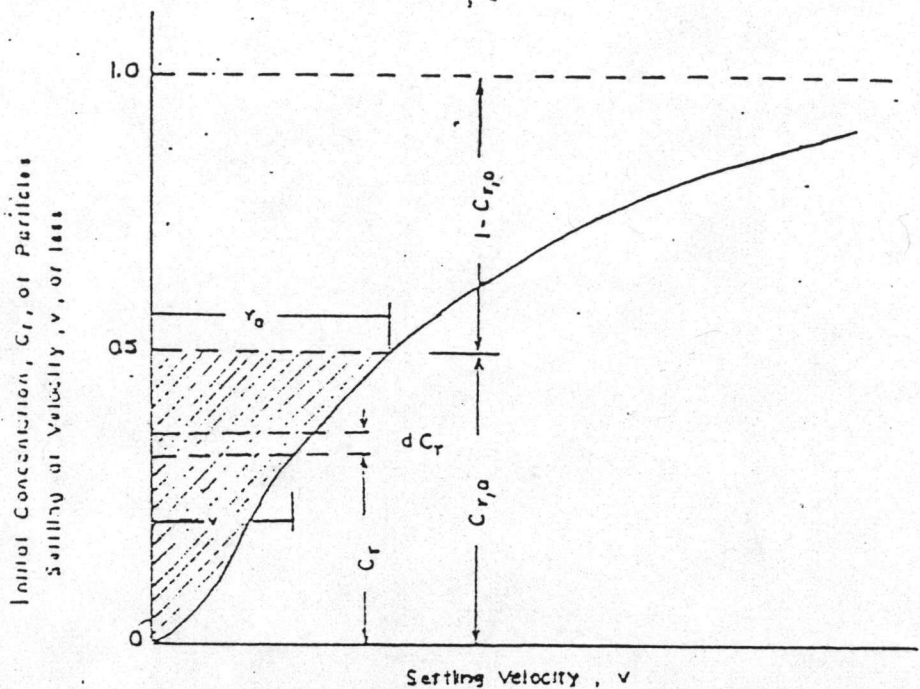
ในกรณีที่มีการตกตะกอนของอนุภาคต่าง ๆ มีโอกาสสามารถรวมกันเป็นกลุ่มก้อนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากขึ้น ความเร็วในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้น ทำให้วิถีของการตกตะกอนเป็นเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.3 การตกตะกอนของสารลิ่ม หรือตะกอนที่เกิดจากกระบวนการโคแอกกูเลชัน จัดว่าเป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม อนึ่งแม้ว่าประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบโดดจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิวเพียงอย่างเดียว แต่ประสิทธิภาพในการตกตะกอนแบบรวมกลุ่มจะขึ้นอยู่กับอัตราน้ำล้นผิว และเวลากักน้ำ



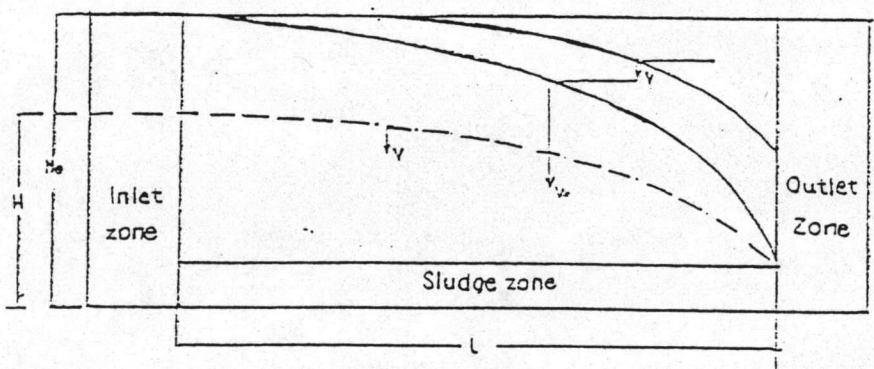
OVER FLOW = Q

$$V_0 = \frac{Q}{A}$$

รูปที่ 2.1 Idealized settling basin paths of discrete particles in horizontal flow tank (Camp 1946)



รูปที่ 2.2 Typical settling velocity analysis curve of suspension for discrete particles (Camp 1946)



รูปที่ 2.3 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม

2.5.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (zone settling) เกิดขึ้นเมื่อของเหลวมีอนุภาคแขวนลอยค่อนข้างสูง อนุภาคเหล่านั้นจะจับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ จะเสมือนเป็นวัตถุก้อนเดี่ยวที่ตกตะกอนด้วยอัตราเดียวกัน ทำให้เห็นการแยกตัวกันระหว่างส่วนของตะกอนและส่วนของน้ำใสอย่างเด่นชัด ดังรูปที่ 2.4 ตัวอย่างของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น ได้แก่ การตกตะกอนของผลึก

แคลเซียม และแมกนีเซียม (CaCO_3 และ $\text{Mg}(\text{OH})_2$)

การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น มักไม่เกิดขึ้นในถังตกตะกอนแบบธรรมดาของโรงประปา-ชุมชนทั่วไป เนื่องจากน้ำมีตะกอนแขวนลอยต่ำเกินไป แต่ถ้าถังตกตะกอนเป็นแบบโซลิดส์แพกต์-แคลรีไฟเออร์แล้ว การตกตะกอนอาจเป็นแบบแบ่งชั้นได้ เนื่องจากมีการสะสมสลัดจ์ไว้ในถัง ถังอัดตะกอน (thickener) ที่ใช้กับสลัดจ์ซึ่งระบายออกจากถังตกตะกอน จะมีการตกตะกอนแบบแบ่งชั้นเกิดขึ้นเสมอ

ถ้าให้ V_0 เป็นอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบโดด ซึ่งคำนวณได้จากสูตรของสโตค และให้ V เป็นอัตราเร็วของการตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (V และ V_0 เป็นอัตราเร็วของอนุภาคเดียวกัน) เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง V และ V_0 ดังนี้

$$V = V_0 f(\phi) \dots\dots\dots (2.11)$$

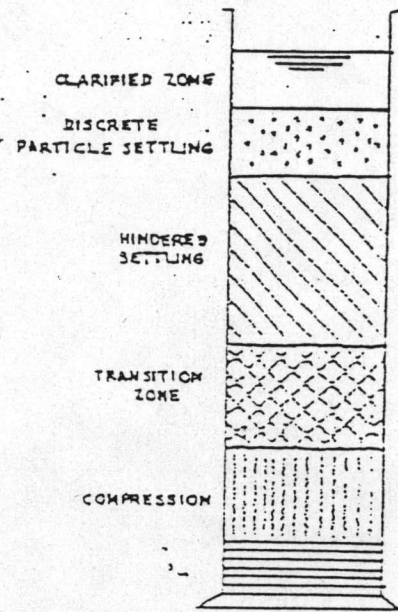
$$\text{โดยที่ } f(\phi) = < 1$$

ในเมื่อ $f(\phi)$ เป็นอุปสรรคในการตกตะกอน ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือความหนาแน่นของความขุ่นในน้ำ เมื่อความเข้มข้นต่ำการตกตะกอนจะเป็นแบบโดด นั่นคือเมื่อ $f(\phi) = 1$ จะได้ $V = V_0$ แต่เมื่อความเข้มข้นสูง $f(\phi)$ จะน้อยกว่า 1 ทำให้ V น้อยกว่า V_0 กล่าวได้ว่า V จะแปรผกผันกับความเข้มข้นของความขุ่น

2.5.4 การตกตะกอนแบบอัดตัว (compression settling) เป็นการตกตะกอนของน้ำที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูงมาก การอัดตัวของตะกอนเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักของตะกอนเหล่านั้น การตกตะกอนแบบนี้มักเกิดขึ้นที่ก้นถังตกตะกอน การตกตะกอนแบบอัดตัว อาจถือได้ว่าเกิดขึ้นหลังจากที่การตกตะกอนแบบอื่นได้เกิดขึ้นแล้ว

2.6 หลักไฮโดรไดนามิกของถังโซลิดส์คอนแทกต์แคลรีไฟเออร์ (Hydrodynamic Principle of Sludge Blanket Clarifier)

สภาพของเหลวในชั้นตะกอนจะประกอบด้วย อนุภาคแขวนลอยจำนวนมากและมีความเข้มข้นสูง อนุภาคแขวนลอยเหล่านี้จะลอยตัวเคลื่อนที่ไปมาด้วยความเร็วของน้ำที่ไหลขึ้นตามแนวตั้ง



รูปที่ 2.4 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น

หรืออยู่ในสภาวะฟลูอิดไดส์ ลักษณะของชั้นตะกอนจะประกอบไปด้วยฟล็อกขนาดต่าง ๆ กัน มาจับตัวรวมกันมีขนาดโตขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจะมีฟล็อกบางส่วนแตกออก และมีขนาดเล็กลงทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ ฟล็อกที่เกิดการสมานตะกอนจนมีขนาดโตขึ้น ก็จะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น ตะกอนนี้จะตกลงมาจนถึงตำแหน่งที่ความเร็วของการไหลของน้ำในแนวตั้งกับความเร็วในการตกตะกอนสมดุลกัน เมื่อตะกอนสะสมมากพอ ก็จะเกิดขึ้นตะกอนแยกออกจากน้ำใสอย่างชัดเจน

การรักษาสภาวะฟลูอิดไดส์ให้อยู่ในสภาพคงที่ทำได้โดยจะต้องทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลขึ้นผ่านชั้นตะกอนให้สมดุลกับคุณสมบัติของชั้นตะกอน ได้แก่ ความหนาและความเข้มข้นของชั้นตะกอน และต้องให้น้ำที่ไหลผ่านชั้นตะกอนกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยที่ชั้นตะกอนที่มีความเข้มข้นสูง จะมีความเร็วในการตกตะกอนลดลง ทำให้อัตราน้ำล้นที่ถังตกตะกอนรับได้ก็จะลดลงด้วย แต่ในขณะเดียวกันชั้นตะกอนที่มีความเข้มข้นมากก็จะทำให้การสัมผัสระหว่างอนุภาคในการสร้างฟล็อกมีผลดีขึ้น ทำให้การแยกตัวของอนุภาคแขวนลอยดีขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมระบบให้มีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยเกินไป และรักษาความเข้มข้นนั้นไว้ได้ โดยการทิ้งตะกอนส่วนเกินออกอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ต้องควบคุมการกระจายน้ำผ่านชั้นตะกอนให้มีความสม่ำเสมอ

เพราะถ้าจุดใดที่มีความเร็วของการไหลขึ้นสูงเกินไป ตะกอนด้านล่างของชั้นตะกอนจะไหลปนขึ้นมา และอาจทำให้ชั้นตะกอนยกตัวลอยขึ้นไปในกระแสออก ในทางตรงกันข้าม ถ้าความเร็วการไหลต่ำไปก็จะทำให้ตะกอนตกลงสู่พื้นถัง ทำให้ความเข้มข้นของชั้นตะกอนไม่สม่ำเสมอ เกิด density current ภายในชั้นตะกอน

2.7 ทฤษฎีของการกรอง

การกรองน้ำเป็นการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำโดยให้น้ำไหลผ่านชั้นกรอง จากลักษณะการเกาะติดของสารแขวนลอยบนชั้นกรอง เราสามารถแบ่งการกรองได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.7.1 การกรองติดผิวชั้นกรอง (surface filtration) เป็นการกรองที่สารแขวนลอยถูกดักจับ และติดค้างอยู่บนผิวของสารกรอง เนื่องจากสารกรองมีรูขนาดเล็กมาก สารกรองเหล่านี้ได้แก่ ผ้า แผ่นใยสังเคราะห์ และแท่งกรอง เป็นต้น

2.7.2 การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (in-depth filtration) เป็นการกรองที่ใช้ชั้นกรองที่มีขนาดใหญ่ เช่น ทราย ทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเข้าไปติดค้างในชั้นกรองได้ การกรองประเภทนี้เป็นวิธีที่ใช้ในระบบผลิตน้ำประปาทั่วไป

2.8 กลไกการกรองน้ำ

การกรองน้ำเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำมาไว้บนสารกรอง หรือมาไว้ที่ช่องว่างระหว่างสารกรอง O'Melia (1972) รายงานว่าขบวนการกำจัดความขุ่นโดยสารกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง สามารถอธิบายได้จากกลไกการเคลื่อนย้าย (transport mechanism) และกลไกแบบตูดติด (attachment mechanism) ซึ่งเป็นขบวนการทางฟิสิกส์-เคมี Ives มีความเห็นสนับสนุนว่า กลไกการเคลื่อนย้ายเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคแขวนลอยถูกทำให้หลุดออกจากเส้นทางน้ำเข้าหาเม็ดสารกรอง และหลังจากนั้นจึงเกิดกลไกตูดติดเมื่ออนุภาคเข้าไปใกล้เม็ดสารกรองนั้น

2.8.1 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (transport mechanism)
กลไกการเคลื่อนย้ายสามารถอธิบายได้ 3 รูปแบบหลัก (Ives, 1969) ได้แก่

การแพร่กระจาย (diffusion) เป็นการเคลื่อนย้ายเนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (random Brownian) จะเกิดมากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอน การตกตะกอน (sedimentation) ซึ่งเป็นผลมาจาก แรงดึงดูดของโลก ทำให้อนุภาคมีความเร็วในการตกตะกอนมาก จนสามารถแยกตัวออกจากเส้นทางน้ำ (stream line) การตกตะกอนจะเกิดมากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 1 ไมครอน Yao, 1971 รายงานว่า เมื่อพิจารณาทั้ง 2 กลไกนี้พบว่าอนุภาคขนาด 1 ไมครอน มีประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายต่ำที่สุด

กลไกการเคลื่อนย้ายรูปแบบที่ 3 คือ กลไกการแยง (interception) เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่มากับเส้นทางน้ำเข้าใกล้เม็ดสารกรอง จนมีระยะที่จะถูกดูดติดได้ นอกจากนี้แล้วยังอาจมีกลไกที่มีอิทธิพลต่อการกรองเพียงเล็กน้อย ได้แก่ กลไกไฮดรอสแตติก (hydrodynamic) และกลไกความเฉื่อย (inertia)

2.8.2 กลไกจับสารแขวนลอย (attachment mechanism)

การดักจับอนุภาคโดยสารกรองต้องอาศัยกลไกการเคลื่อนย้ายนำพาเอาอนุภาคเล็ก ๆ จากเส้นทางน้ำพาเข้าใกล้ผิวหน้าของสารกรอง เมื่ออนุภาคเข้าใกล้ผิวหน้าสารกรองมากขึ้น แรงระหว่างผิวหน้าจะทำให้เกิดการดูดติดระหว่างผิวสารกรองกับสารแขวนลอย ซึ่งเกี่ยวเนื่องมาจากแรงต่าง ๆ คือ แรงประจุไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic interaction), แรงแวนเดอร์วาลส์ (Landon Vander Waals) หรือแรงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี (surface chemical interaction) เนื่องจากแรงลาก (drag force) เกิดขึ้นตลอดเวลา ดังนั้นการดูดติดสารแขวนลอยจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าปราศจากแรงแวนเดอร์วาลส์ดึงดูดสารแขวนลอยเข้าหาเม็ดสารกรอง (Amirtharaj, 1988)

นอกจากกลไกการเคลื่อนที่ และกลไกการดูดติดสารแขวนลอยแล้วยังมีกลไกที่สำคัญอีก นั่นคือ กลไกการหลุด (detachment mechanism) การหลุดของอนุภาคออกจากสารกรองขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของอนุภาคที่สะสมระหว่างช่องว่างของสารกรองนั้น การเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้นเป็นผลทำให้อนุภาคหลุดออกได้มากขึ้น ดังนั้นการกำจัดอนุภาคจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง เมื่อความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น การเพิ่มความเร็วยิ่งขึ้นในระบบอัตรากรองคงที่ Ives (1982) อธิบายว่าเมื่ออนุภาคสะสมมากขึ้นในช่องว่าง ทำให้ช่องว่างแคบลง ความเร็วในการไหลจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อแรงลากเพิ่มถึงจุดที่เท่ากับแรงดึงดูด (adhesive force) อนุภาคจะเริ่มหลุดออกจากสารกรอง

Dhabadgaonkar และ Bhole (1975) ได้พัฒนารวมเอา 3 ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ การรวมตะกอน การตกตะกอนและการกรองนำมารวมอยู่ในถังเดียวกัน โดยเรียกระบบนี้ว่า Upflow Clari-Floc-Filter และนอกจากนี้ Dhabadgaonkar ก็ยังได้พัฒนาถึงในรูปแบบที่คล้ายคลึงกันอีก โดยเรียกว่า Sequential Solid Contact Clarifier

เชาวยุทธ พรนิมลเทพ (2514) ได้ศึกษาถึง โซลิดส์คอนแทกต์แคลริไฟเออร์ของ โรงกรองน้ำ ธนบุรี กรุงเทพมหานคร ผลการทดลองสรุปได้ว่า

1. ปริมาณความเข้มข้นของตะกอน (sludge) ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 15-25 % ซึ่งจะทำให้ความขุ่นในกระแสออกเหลืออยู่ 1.7-3.5 JTU แต่ถ้าปริมาณความเข้มข้นของตะกอนมากกว่า 30% ขึ้นไป ความขุ่นจะเหลืออยู่มากกว่านี้
2. อัตราการไหลระหว่าง 1.125 ถึง 1.730 แกลลอน/ตร.ฟุต-นาที จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นดี แต่ถ้าให้เกินจาก 1.730 แกลลอน/ตร.ฟุต-นาที จะทำให้ตะกอนปนไปในน้ำใสมาก ถ้าอัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะทำให้ชั้นตะกอนแตกและตะกอนจะฟุ้งกระจายไปกับน้ำใส

วีระ อินทรกุล (2522) ได้ศึกษาการทำงานของถัง โซลิดส์คอนแทกต์แคลริไฟเออร์ที่ใช้แผ่นขนานเอียง ได้สรุปผลการทดลองดังนี้

1. การกำหนดค่าระยะห่างระหว่างแผ่นขนานจะต้องคำนึงถึงส่วนประกอบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าประสิทธิภาพการทำงานของถังทำน้ำใสที่ต้องการ ราคาค่าก่อสร้างถังทำน้ำใสและความสะดวกในการทำความสะอาดถังทำน้ำใส
2. ขนาดมุมเอียง 60° ของแผ่นขนานเอียงเป็นขนาดมุมเอียงที่ให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับการติดตั้งแผ่นขนานภายในถัง โซลิดส์คอนแทกต์แคลริไฟเออร์
3. การติดตั้งดีเฟลคเตอร์ขนาด 9 ซม. ระยะห่าง 40 ซม. บนแผ่นขนานเอียงขนาดมุม 60° ระยะห่างระหว่างแผ่นขนาน 20 ซม. จะเป็นลักษณะการติดตั้งที่ทำให้ถังโซลิดส์คอนแทกต์แคลริไฟเออร์มีประสิทธิภาพสูงสุด และอัตราการน้ำล้นที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดเท่ากับ 0.0814 ลบ.ม./ตร.ม.-นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นเท่ากับ 89.33% และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 91.25%

พิศาล ชัยนสำราจ (2524) ได้ทำการศึกษาการทำงานของถัง โซลิดส์คอนแทกต์-แคลรีไฟเออร์ที่ใช้กระเบื้องลอนคู่กับทราย โดยใช้อุปกรณ์ทดลองขนาดกว้าง 0.5 ม. ยาว 0.6-1.90 ม. สูง 1.70 ม. จากการทดลองสรุปดังนี้

1. การใช้ทรายในถัง โซลิดส์คอนแทกต์แคลรีไฟเออร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและของแข็งแขวนลอยในช่วงอัตราน้ำล้น 1.7 ถึง 6.8 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและของแข็งแขวนลอยจะดีที่สุดเมื่อใช้ทรายขนาด 5-10 มม. ความลึก 20 ซม. โดยประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นแปรจาก 86.52% ถึง 96.66% และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยแปรจาก 79.46% ถึง 98.61%
2. ที่อัตราน้ำล้นตั้งแต่ 6.8 ถึง 12.6 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและของแข็งแขวนลอยเมื่อไม่ใช้ทรายจะสูงกว่าใช้ทรายที่ขนาดและความลึกต่าง ๆ กัน
3. มุมเอียงของแผ่นกระเบื้องขนานที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดความชื้นและของแข็งแขวนลอยสูงสุดจะขึ้นกับอัตราน้ำล้น, ขนาดและความลึกของชั้นทราย และลักษณะการวางลอนกระเบื้อง
4. ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยในชั้นตะกอนจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราน้ำล้นสูงขึ้น และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะมีค่าสม่ำเสมอทุกระดับชั้นตะกอน ที่มุมเอียงแผ่นกระเบื้องขนาน 60° และ 75° แต่ที่มุมเอียงแผ่นกระเบื้องขนาน 45° ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะมากที่สุดในช่วงระดับชั้นตะกอน 0.20-0.50 ม. ต่อจากนั้น ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยจะลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นไป จนถึงระดับ 1.00 ม.