

ทฤษฎีและแนวความคิด

2.1 ทฤษฎี

การตกตะกอนจัดเป็นกระบวนการทางกายภาพที่ใช้แยกของแข็งที่จมตัวได้ (settleable solids) ออกจากน้ำโดยอาศัยแรงดึงดูดของโลก ถึงตกตะกอนที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบ่งออกเป็นหลายชนิดตามลักษณะหน้าที่ ได้แก่ ถึงตกตะกอนขั้นแรก (primary sedimentation tank) ถึงตกตะกอนขั้นที่สอง (secondary sedimentation tank) และ ถึงตกตะกอนเคมี (chemical sedimentation tank) นอกจากนี้ยังมีระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งได้นำหลักการตกตะกอนมาประยุกต์ใช้ได้แก่ บ่อแยกทราย (grit chamber) และถึงทำสลัดจ์ข้น (sludge thickener) เป็นต้น การตกตะกอนจึงเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสีย

การตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ และระดับความเข้มข้นของตะกอน การตกตะกอนนี้อาจจำแนกได้เป็น 4 ประเภท โดยปรากฏการณ์ในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยนี้ อาจเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันมากกว่าหนึ่งประเภท ก็ได้

1) การตกตะกอนแบบโดด (discrete settling) คือ ลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคอิสระ แต่ละอนุภาคจะตกตามลำพังด้วยน้ำหนักตัวเอง และอิสระ โดยจะไม่จับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เช่น การตกตะกอนของทราย

2) การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (flocculent settling) การตกตะกอนในลักษณะนี้เกิดจากการที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ มีโอกาสที่จะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนไป ซึ่งมวลที่มากขึ้นนี้เป็นผลให้ความเร็วในการตกตะกอนสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการจมตัวขึ้น เช่น การตกตะกอนของพวกอินทรีย์สารต่าง ๆ เป็นต้น

3) การตกตะกอนแบบแบ่งเขต (zone settling) เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (suspended solids) มากกว่า 500 มก/ล. ทำให้มีแรงเกาะกันระหว่างอนุภาคจนรวมเป็นเนื้อเดียวกันและเกิดเป็นชั้นต่อเห็นชัดระหว่างของแข็งของเหลว (solids -

liquids interface) ที่ส่วนบนของชั้นตะกอน ส่วนของตะกอนและส่วนของน้ำใสจะแยกกัน  
 อย่างเห็นได้ชัดเจน

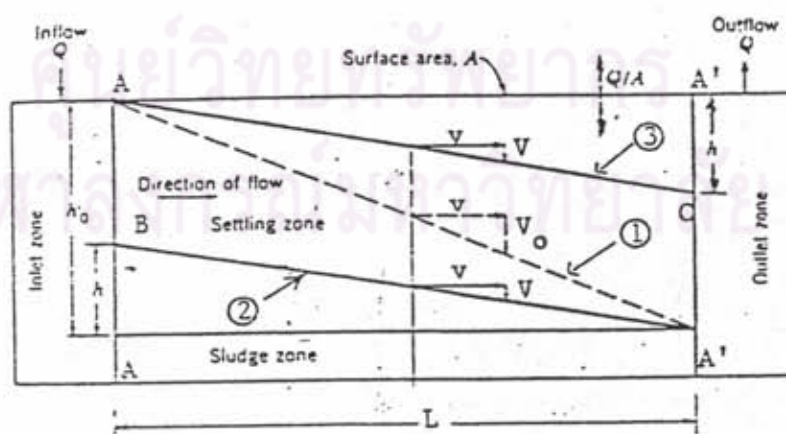
4) การตกตะกอนแบบอัด (compression settling) เกิดขึ้นเมื่อของแข็งแขวน  
 ลอยมีความเข้มข้นสูงมาก ทำให้การตกตะกอนจะเกิดได้ก็ต่อเมื่อมีแรงกดอัดโดยน้ำหนักของอนุ  
 ภาคที่อยู่ ส่วนมากจะเกิดขึ้นบริเวณชั้นล่างของชั้นตะกอนที่หนา

## 2.2 ทฤษฎีการตกตะกอนแบบอุดมคติ



การทำงานของถังตกตะกอนในอุดมคติจะตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) ถังตกตะกอนในอุดมคติแบ่งส่วนประกอบของถังออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ บริเวณ  
 ทางเข้า (inlet zone)  
 บริเวณส่วนที่ใช้ตกตะกอน (settling zone)  
 บริเวณทางออก (outlet zone)  
 และบริเวณส่วนกักเก็บตะกอน (sludge zone)
- 2) การไหลของกระแสเข้าจะเป็นการไหลอย่างต่อเนื่อง และสม่ำเสมอ  
 (uniform flow)
- 3) อนุภาคทั้งหมด ตกตะกอนอย่างโดดหรืออิสระ (discrete settling)
- 4) อนุภาคที่จมถึง เขตเก็บกักตะกอนจะไม่ลอยตัวกลับขึ้นมาอีก
- 5) อนุภาคมีความเข้มข้นสม่ำเสมอขณะไหลเข้าเขตตกตะกอน



รูปที่ 2.1 การวิเคราะห์ถังตกตะกอนแบบอุดมคติ (มันสัน, 2526)

ระนาบเอียงในแนว 1 แสดงให้เห็น ถึงวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่สามารถกำจัดออกได้ทั้งหมด (100%) โดยให้อนุภาคที่เล็กที่สุดตามหลักเกณฑ์นี้และมีความเร็วในการตกตะกอนเท่ากับ  $V_0$  จะถูกกำจัดออกหมดด้วยถังตกตะกอนในอุดมคติ

อนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนเท่ากับ  $V$  หรือน้อยกว่า  $V_0$  จะมีวิธีการเคลื่อนที่อยู่ในแนว 2 หรือ 3 จะพบว่า อนุภาคจะถูกกำจัดออกจากกระแสน้ำหากอนุภาค เข้าสู่ถึงในตำแหน่ง B หรือต่ำกว่า มิฉะนั้นจะไม่ถูกกำจัดออก จากการวิเคราะห์พบว่าอนุภาคที่มีอัตราการตกตะกอนเท่ากับ  $V$  (น้อยกว่า  $V_0$ ) ที่สามารถถูกกำจัดได้จะมีปริมาตรเท่ากับ  $h/h_0$  หรือ  $V/V_0$

โดยที่  $h$  = ความลึกของถังจนถึงจุด B  
 $h_0$  = ความลึกของถังทั้งหมดของระดับน้ำ  
 $w$  = ความกว้างของถัง

สมมติ  
 จะ ได้  $t$  = เวลาที่ใช้ในการตกตะกอน  
 $t = L/V$  หรือ  $h_0/V_0$   
 $V_0 = h_0/t$  หรือ  $h_0 V/L$

แต่เพราะว่า  $V = Q/h_0 w$   
 $V_0 = h_0 Q/h_0 w L = Q/wL$   
 $wL =$  พื้นที่ผิวของถัง (A)

ดังนั้น  $V_0 = Q/A$   
 = อัตราน้ำล้นผิว (surface loading rate)

เมื่อ  $Q$  = อัตราการไหลของน้ำเข้าถัง  
 $A$  = พื้นที่ผิวหน้าของถังตกตะกอนในอุดมคติ

ในสภาพจริง อนุภาคที่ตกตะกอนจะมีขนาดแตกต่างกันมากมาย ความเร็วในการตกตะกอนมีทั้งสูงกว่าเท่ากับหรือต่ำกว่า  $Q/A$  ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ( $P$ ) สามารถแทนได้ดังสมการ

$$P = (1 - P_0) + \int_{P_0}^1 (v_1/v_0) dP_1$$

$$= (1 - P_0) + (1/v_0) \int_{P_0}^1 v_1 dP_1$$

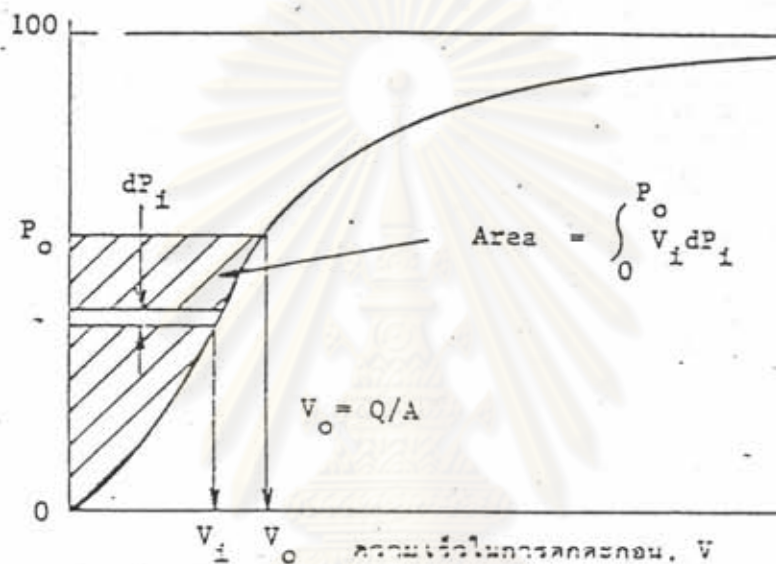
โดยที่  $P_0$  = เปอร์เซนต์ของอนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนน้อยกว่า  $V_0$  หรือ  $Q/A$

$P_1$  = เปอร์เซนต์ของอนุภาคที่มีความเร็วในการตกตะกอนน้อยกว่า  $v_1$  (ซึ่งน้อยกว่า  $V_0$ )

$(1 - P_0)$  = เปอร์เซนต์ของอนุภาคที่ตกตะกอนได้เร็วกว่าหรือเท่ากับ  $V_0$  หรือ  $Q/A$



- $\int_0^{P_0} (V_1 - V_0) dP_1 =$  อนุภาคส่วนที่สามารถกำจัดออกโดยถังตกตะกอนได้ทั้งหมด  
 $=$  ส่วนของอนุภาคที่ถูกกำจัดออกจากถังตกตะกอนได้ทั้ง ๆ ที่ความเร็วในการตกตะกอนช้ากว่า  $V_0$



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของการตกตะกอน (มันสัน, 2526)

การหาค่า  $P$  ซึ่งเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นด้วยถังตกตะกอน สามารถทำได้ โดยการจัดพื้นที่บนกราฟที่ได้ จากการพล็อตระหว่างความเร็วของการตกตะกอน และเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคต่าง ๆ ที่มีความเร็วของการตกตะกอนต่างกัน

จากแนวความคิดเกี่ยวกับการตกตะกอนในอุดมคติ ได้แสดงให้เห็นว่า การตกตะกอนน่า จะขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ค่าอัตราการไหล ( $Q$ ) และพื้นที่จมตัว ( $A$ ) หากทำการเพิ่มพื้นที่จมตัวให้สูงขึ้นการตกตะกอนก็จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น จากแนวความคิดนี้จึงได้มีผู้คิดส้อดใส่แผ่นแบบ เป็นลอนเข้าในถังตกตะกอนเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการตกตะกอน เรียกถังตกตะกอนแบบแผ่นว่า "plate settler" ส่วนถังตกตะกอนที่ใช้หลอดแทนแผ่นต่าง ๆ ว่า "tube settler" เห็น ได้ว่าถังตกตะกอนแบบแผ่นและแบบหลอดก็คือถังตกตะกอนแบบธรรมดาที่มีการใส่แผ่นหรือหลอดเพื่อ ช่วยเพิ่มพื้นที่จมตัวและประสิทธิภาพในการตกตะกอนนั่นเอง นอกจากนี้การบังคับให้น้ำไหลผ่าน

ช่องว่างขนาดเล็กที่อยู่ระหว่างพื้นต่าง ๆ ยังมีผลต่อการตกตะกอนอีกประการหนึ่งคือทำให้น้ำไหลด้วยความหนืดเพิ่มขึ้น (Reynold's No ลดลง) เป็นผลให้ความสงบเกิดขึ้นกับน้ำ ทำให้อนุภาคตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้นกว่าเมื่อน้ำไหลผ่านถังตะกอนที่ไม่มีการสอดตัวกลางใด ๆ เลย

### 2.3 ระบบถังตกตะกอนแบบหลอด แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้ (culp 1968)

#### 1) แบบหลอดเอียงน้อย (essentially horizontal tube settler)

โดยปกติจะเอียงประมาณ 5 องศา การที่หลอดเอียงน้อยทำให้เกิดการสะสมตัวของสลัดจ์ภายในหลอดจึงจำเป็นต้องมีการล้างตะกอนเป็นประจำ โดยปกติแล้วถังตะกอนแบบหลอดเอียงน้อยมักจะพบในระบบน้ำประปาขนาดเล็กและขนาดกลาง การกำจัดตะกอนที่สะสมตัวโดยการล้างพร้อมกับการล้างย้อนเครื่องกรอง ทุกครั้งก่อนล้างเครื่องกรองจะทำการปล่อยน้ำออกจากถังตกตะกอนให้หมดก่อน หลังจากล้างย้อนเครื่องกรองแล้วน้ำที่ใช้ล้างเครื่องกรองแล้วนั้นจะไหลเข้าบริเวณส่วนบนของหลอดเอียง เพื่อชะล้างสลัดจ์ที่ตกค้างภายในหลอด น้ำที่ผ่านหลอดเอียงจะพัดพาสิ่งสกปรกหลุดออกมาด้วยและจะถูกระบายทิ้งไป น้ำปริมาตรส่วนสุดท้ายที่ล้างเครื่องกรองซึ่งจะมีความสกปรกน้อยจะถูกใช้เติมน้ำในถังตะกอนให้เต็ม เพื่อให้ถังตะกอนพร้อมที่จะทำงานต่อไป สำหรับในการบำบัดน้ำเสียจะไม่นิยมใช้ถังตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อย เนื่องจากจะเกิดการสะสมของสลัดจ์อย่างรวดเร็วและยากในการที่จะทำการกำจัดสลัดจ์เหล่านั้นออกจากหลอดตกตะกอนแบบนี้ เนื่องจากปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำสูงมาก

ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้การใช้งานไม่สะดวกและขาดความต่อเนื่อง เป็นสาเหตุสืบเนื่องให้ถังตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อยไม่เหมาะสมสำหรับระบบบำบัดน้ำเสียรวมทั้งในระบบประปาขนาดกลางและขนาดใหญ่

#### 2) แบบหลอดเอียงมาก (inclined tube settlers)

ระบบหลอดเอียงมากจะทำมุม ประมาณ 45-60 องศา การเอียงด้วยมุมสูงจะช่วยให้ตะกอนสลัดจ์ (Sludge) ไม่เกาะตัวอยู่กับที่ น้ำหนักของสลัดจ์จะช่วยให้สลัดจ์สามารถไหลลงสู่บริเวณส่วนก้นเก็บตะกอนด้านล่างได้ง่ายและเร็วขึ้น เป็นผลให้การสะสมตัวของสลัดจ์ที่ผนังหลอดเกิดขึ้นได้ช้ากว่าที่เกิดขึ้นในการตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อย จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้โดยทั่วไปแพร่หลายกว่าแบบหลอดเอียงน้อย

### 2.4 ทฤษฎีการตกตะกอนด้วยความเร็วสูง (high rate sedimentation)

จากแนวความคิดเกี่ยวกับการตกตะกอนในอุดมคติชี้ให้เห็นเกี่ยวกับประสิทธิภาพในการจมตัวของอนุภาคกับอัตราการไหล และพื้นที่การจมตัว ระยะเวลาเก็บกัก ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการจมตัวของอนุภาค การตกตะกอนด้วยอัตราเร็วสูงจึงเป็นการพัฒนาเพื่อแยกอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในน้ำให้ถูกกำจัดออกด้วยอัตราการเร็วสูงโดยลดระยะเวลาของการตกตะกอนให้น้อยลง ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที

Yao (1970) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการตกตะกอนด้วยอัตราเร็วสูง โดยแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการล้นผิว (overflow rate) ทำให้ถึงตกตะกอนด้วยอัตราเร็วสูงถูกนำมาใช้แพร่หลายทั้งในการผลิตน้ำเมื่อการบริโภคและการบำบัดน้ำเสีย

สมมติฐานของทฤษฎีที่ Yao เสนอมันดังนี้

- 1) การไหลที่ผ่านไปกับตะกอนเป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow)
- 2) ลักษณะการไหลอยู่ในทิศทางเดียว
- 3) อนุภาคแขวนลอยถูกกำจัดออกโดยการตกตะกอนแบบโคต และจะไม่รวมตัวกันเป็นกลุ่ม
- 4) การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะอยู่ในแนวแกน X และ Y

จากรูปที่ 2.3.1

$$\frac{dx}{dt} = V_{Px} = U - V_s \sin \theta \quad \text{-----1}$$

$$\frac{dy}{dt} = V_{Py} = V_s \cos \theta \quad \text{-----2}$$

จากสมการ 1 / 2

$$\frac{dy}{dx} = \frac{V_s \cos \theta}{U - V_s \sin \theta} \quad \text{-----3}$$

$$\int U dy + V_s \sin \theta dy = - V_s \cos \theta dx$$

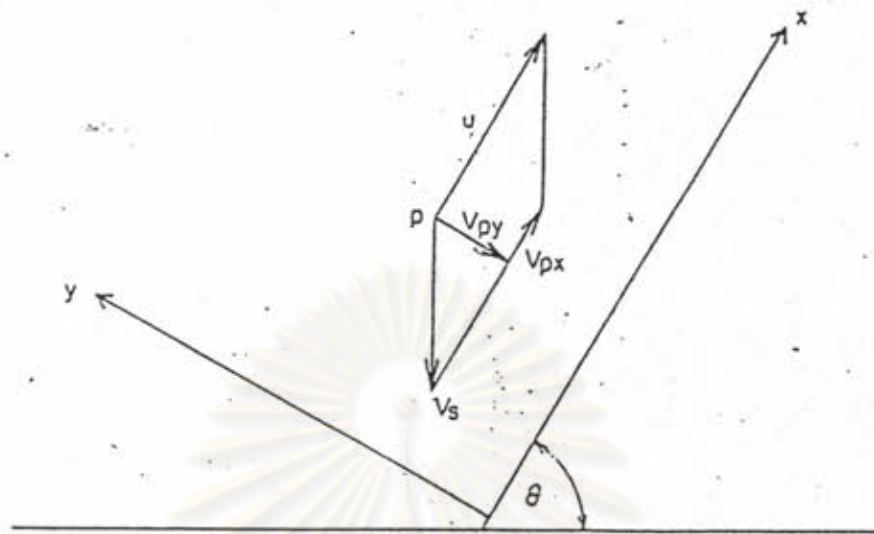
$$\int U dy + V_s \sin \theta y + V_s \cos \theta X = C_1 \quad \text{-----4}$$

โดยที่  $C_1$  = ค่าคงที่ของการอินทิเกรต

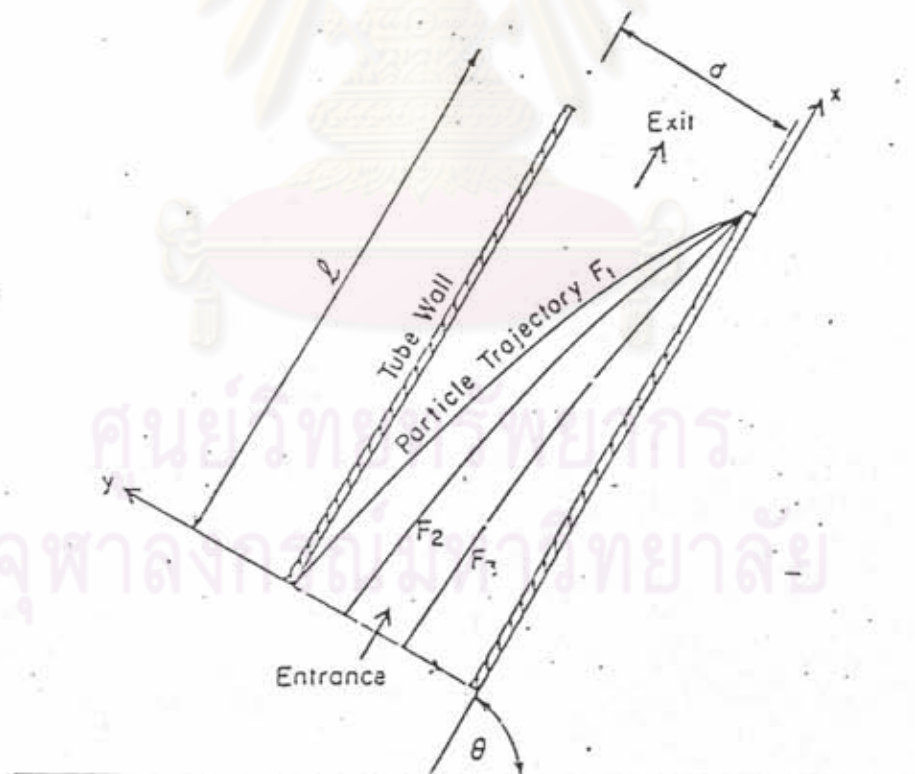
นำความเร็วในการไหลเฉลี่ย ( $V_0$ ) และความลึกของการไหลซึ่งพิจารณาจากแถบปกติของทิศทางการไหล (d)หารตลอด

$$\int \frac{U dy}{V_0} + \frac{V_s}{V_0} Y \sin \theta + \frac{V_s}{V_0} X \cos \theta = C_1 \quad \text{-----5}$$





รูปที่ 2.3.1 แนวแกนการเคลื่อนที่ของอนุภาคจมตัว (Yao 1970)



รูปที่ 2.3.2 แนวการเคลื่อนที่เป็นวงโค้งของอนุภาคไหลตลอดคกตะกอน (Yao 1970)

โดยที่  $C_1 =$  ค่าคงที่ของการอินทิเกรตที่ถูกปรับแก้แล้ว  $Y = y/d$  และ  $x = x/d$   
สมการที่ 5 เป็นสมการโดยทั่วไปสำหรับการเคลื่อนที่แบบวิถีโค้งในการตกตะกอนแบบอัตราเร็วสูง

การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ตกลงในหลอดตกตะกอนจะมีการเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งดังรูปที่  
2.3.2  $F_1$ ,  $F_2$  และ  $F_3$  แสดงแนวทางเคลื่อนที่ตามแนว  $F_1$  จะเป็นกรณีในการควบคุมระบบโดย  
ถือว่าอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามแนว  $F_1$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน  $V_s$  ซึ่งหากอนุภาคเคลื่อนที่  
ด้วยความเร็ว  $V_s$  อนุภาคก็จะถูกกำจัดออกจากน้ำหากกำหนดให้การไหลของอนุภาคด้วยความเร็ว  
 $V_s = V_{sc}$  โดยที่  $V_{sc}$  คือ ความเร็ววิกฤตของการตกตะกอน (critical velocity)

$$\text{กรณี} \quad X = L \quad ; \quad Y = 0 \quad \text{-----}6$$

$$X = 0 \quad ; \quad Y = L \quad \text{-----}7$$

$$\text{โดยที่} \quad L = l/d \quad ; \quad \text{ความยาวสัมพัทธ์}$$

$l =$  ความยาวของหลอดตกตะกอน

$d =$  เส้นผ่าศูนย์กลางหลอดตกตะกอน

แทนค่าจากสมการที่ 6 ในสมการที่ 5

$$C_1 = \frac{V_{sc}}{V_0} L \cos \theta \quad \text{-----}8$$

$$\text{เนื่องจาก} \quad Y = 0 \quad ; \quad \left[ \int (U/V_0) dy \right]_{y=0}$$

แทนค่าสมการที่ 7 และ 8 ในสมการ 5

$$\frac{V_{sc}}{V_0} (\sin \theta + L \cos \theta) = Sc \quad \text{-----}9$$

$$\text{โดยที่} \quad Sc = \left[ \int (U/V_0) dy \right]_{y=1} \quad (\text{Yao 1970})$$

$Sc =$  สัมประสิทธิ์เนื่องจากรูปร่างของหลอดตกตะกอน โดยที่  $Sc$   
เปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของหลอดดังนี้

$$Sc = 1 \quad \text{สำหรับแผ่นขนานเอียง}$$

$$Sc = 4/3 \quad \text{สำหรับหลอดตกตะกอนรูปร่างกลม}$$

$$Sc = 11/8 \quad \text{สำหรับหลอดตกตะกอนรูปสี่เหลี่ยม}$$

$$Sc = 1 \quad \text{สำหรับการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอ}$$



ในทางปฏิบัติ เรามักจะคำนึงถึงอัตราน้ำล้นผิวมากกว่าความเร็ววิกฤตของการตกตะกอน จากสมการที่ 9 จะเปลี่ยนความเร็ววิกฤตให้อยู่ในรูปอัตราน้ำล้นผิว ( $V_u$ ) โดย

$$V_u = \frac{C Sc V_o}{\sin \theta + L \cos \theta} \quad \text{-----10}$$

และ  $V_u = Q/A$   
 โดยที่  $V_u$  = อัตราน้ำล้นผิว  
 $A$  = พื้นที่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหล  
 $\theta$  = มุมของหลอดหรือแผ่นขนานที่เอียงจากแนวราบ  
 $L$  = ความยาวสัมพัทธ์  
 = ความยาวจริง (l) / เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง (d)  
 $Sc$  = สัมประสิทธิ์เนื่องจากรูปร่างของท่อตกตะกอน  
 $Q$  = อัตราการไหล  
 $C$  = ค่าคงที่  
 =  $6.54 \times 10^5$  เมื่อ  $V_o$  ใช้หน่วย ฟุต/วินาที และ  $V_u$  ใช้หน่วย ฟุต<sup>3</sup>/ฟุต<sup>2</sup>.วัน  
 =  $8.64 \times 10^2$  เมื่อ  $V_o$  ใช้หน่วย ซม./วินาที และ  $V_u$  ใช้หน่วย ม.<sup>3</sup>/ม<sup>2</sup>.วัน

## 2.5 เขตกักเก็บตะกอน (plenum)

เขตกักเก็บตะกอนเป็นส่วนสำคัญ ที่จะส่งผลให้ระบบการตกตะกอนแบบหลอดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงควรคำนึงในการออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสม เพื่อป้องกันมิให้เกิดการปั่นป่วนอันเป็นผลให้ตะกอนที่จมตัวแล้วฟุ้งขึ้นกลับสู่น้ำอีกครั้ง

โดยที่ ความเร็วในการพัดพา (scouring velocity) เป็นไปตามความสัมพันธ์ (Fair, Geyer and Okun 1966) ดังนี้

$$V_d = [8(k/f)g (S_u - 1)]^{1/2} d^{1/2} \quad \text{-----11}$$

เมื่อ  $V_d$  = ความเร็วของการเคลื่อนที่  
 $f$  = ส.ป.ส.แรงเสียดทาน  
 $k$  = ค่าคงที่  
 $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

$$S_u = \text{ค่าความต้งจำเพาะของกลุ่มอนุภาค}$$

$$d = \text{ขนาดของกลุ่มอนุภาค}$$

จากสมการที่กล่าวมาสามารถจะพบว่าค่า  $k, f, g$ , และ  $S_u$  เป็นค่าคงที่ที่สามารถจัดรูปใหม่ของสมการเป็น

$$V_d = c \cdot d^{1/2} \quad \text{-----12}$$

$$\text{โดยที่ } C = [8(k/f)g(S_u - 1)]^{1/2}$$

$$\text{จาก } \frac{Q_x}{Q_o} = \frac{(L-x)}{L}$$

$$\frac{A_x}{A_o} = \left\{ \frac{(L-x)}{L} \right\} (d_o/dx)^{1/2} \quad \text{-----13}$$

เมื่อ  $Q_o$  = อัตราการไหลของน้ำที่จะบำบัดที่ผ่านทางเข้า

$Q_x$  = อัตราการไหลของน้ำที่จะบำบัดที่ผ่านหน้าตัดที่ระยะทาง  $x$

$L$  = ความยาวของเขตตะกอน

$V_{dx}$  = ความเร็วในการเคลื่อนที่ระยะทาง  $x$

$V_{do}$  = ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ทางเข้า

$A_o$  = หน้าตัดของทางเข้า

$A_x$  = หน้าตัดที่ระยะทาง  $x$

ขนาดของกลุ่มตะกอนจะเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละหน้าตัดเนื่องจากมีกลุ่มตะกอนบางส่วนถูกกำจัดออกในขณะที่ไหลผ่านตามความยาวของเขตตะกอน (plenum) ถ้า  $d_o$  เป็นขนาดเฉลี่ยของกลุ่มตะกอนที่ทางเข้า และ  $dx$  เป็นขนาดเฉลี่ยของกลุ่มตะกอนที่ระยะทาง  $x$  จะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดตะกอนตามความยาวของเขตตะกอนได้ดังสมการ

$$dx = d_o [1 - (x/y)]^n \quad \text{----- 14}$$

โดยที่  $n$  = ค่าคงที่

แทนค่าสมการ 14 ในสมการ 13

$$\frac{A_x}{A_o} = [1 - (x/L)]^{1 - (n/2)} \quad \text{----- 15}$$

หากเขตกักเก็บตะกอนเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (รูป 2.4)

$$A_o = B_o H_1$$

และ  $B_x = B_o$

แทนค่าในสมการ 15 จะได้เป็น

$$H_x/H_1 = 1 - (X/L)^{1-(n/2)}$$

โดยที่  $H_x$  = ความลึกของเซตกักเก็บที่ระยะทาง  $x$   
 $H_1$  = ความลึกของเซตกักเก็บที่ทางเข้า  
 $B_o = B_x$  = ความกว้างของเซตกักเก็บตะกอน

ค่าของ  $H_1$  สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการไหลคือ  $H_1 = C_o Q_o$   
 โดยที่  $C_o = 3.1$  วินาที/ม<sup>2</sup> เมื่อ  $Q_o$  อยู่ในหน่วยของ ม<sup>3</sup>/วินาที

ซึ่งจะสามารถคำนวณหาความลึกของเซตกักเก็บตะกอนได้จาก

$$D_1 = H_1 + h_1$$

$$D_x = H_x + h_x$$

โดยที่  $D_1$  = ความลึกน้อยที่สุดเซตกักเก็บบริเวณทางเข้า  
 $D_x$  = ความลึกน้อยที่สุดเซตกักเก็บตะกอนที่ระยะทาง  $x$   
 $h_1$  = ความลึกของตะกอนที่บริเวณทางเข้า  
 $h_x$  = ความลึกของตะกอนที่ระยะทาง  $x$

## 2.6 ผลเนื่องจากการยาวหลอด

Hansen and Culp (1967) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวหลอดกับประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.5.1 และ 2.5.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า หากความยาวหลอดมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการรวมตัวสูงขึ้น

ในทางปฏิบัติ ความยาวหลอดจะถูกนิยามอยู่ในรูปความสัมพันธ์ คือ เป็นความยาวที่เทียบต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง

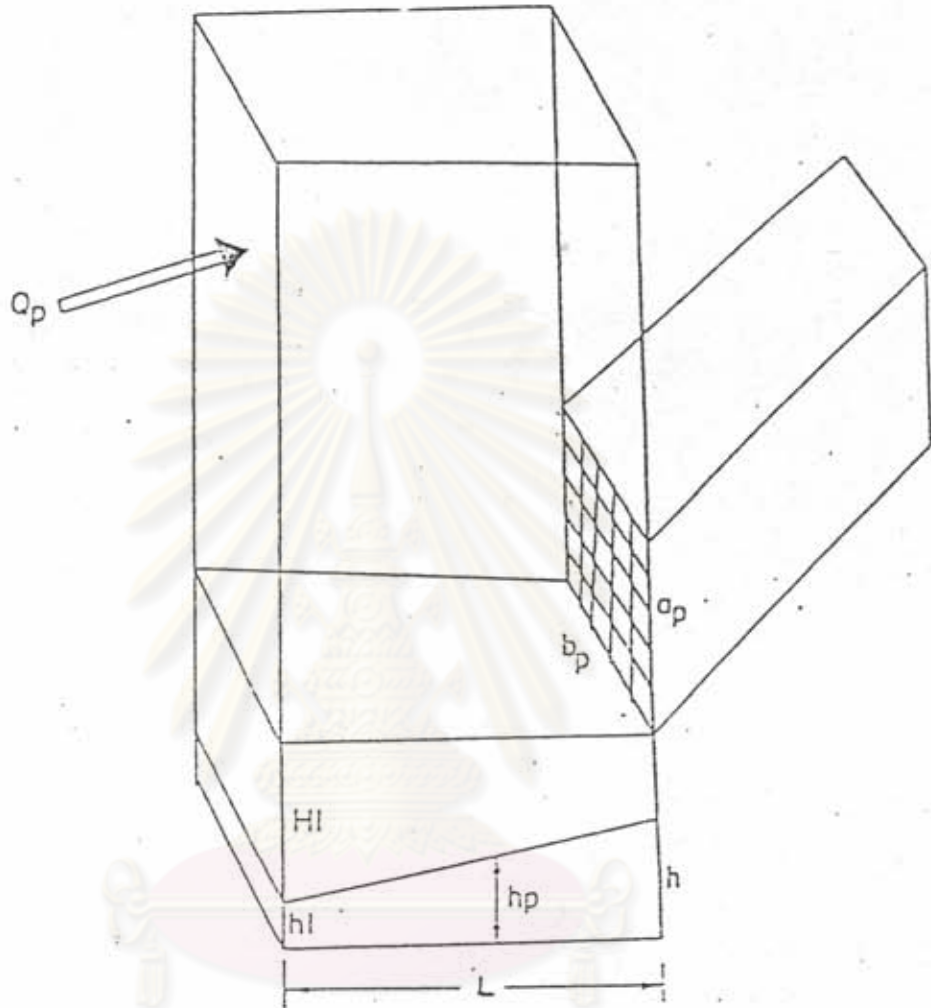
$$L = l/d$$

โดยที่  $L$  = ความยาวสัมพันธ์

$l$  = ความยาวที่แท้จริงของหลอดหรือแผ่นตกตะกอน

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดตกตะกอนหรือระยะระหว่างแผ่นขนาน





รูปที่ 2.4 กลุ่มของหลอดตกตะกอน และ เซตกักเก็บตะกอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yao (1970) ได้เสนอว่าค่าความยาวสัมพันธ์ที่จะส่งผลให้การตกตะกอนดีที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 20 ( $L = 20$ )

จากสมการที่ 10

$$L = \frac{C V_o Sc - V_u \sin \theta}{V_u \cos \theta}$$

หากพิจารณาสมมติฐานของที่มาของการวิเคราะห์สมการที่ 10 จะพบว่าการไหลตามทฤษฎีที่ใช้เป็นการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) ซึ่งในทางปฏิบัติจริงจะพบการไหลมิได้เป็นตามทฤษฎี หากแต่การไหลจะอยู่ในรูปของการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) Yao (1970) จึงได้เสนอให้ปรับแก้ความยาวโดยใช้สูตรความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$L^1 = 0.058 V_u d / \nu$$

$L^1$  = ค่าพิจารณาปรับแก้ความยาวเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน

$\nu$  = ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของเหลว

แล้วนำมาหาค่าความจริงได้เท่ากับ

$$= (L + L^1) d \quad \text{เมื่อ } L^1 \text{ น้อยกว่า } L$$

$$= 2 L d \quad \text{เมื่อ } L^1 \text{ น้อยกว่า } L$$

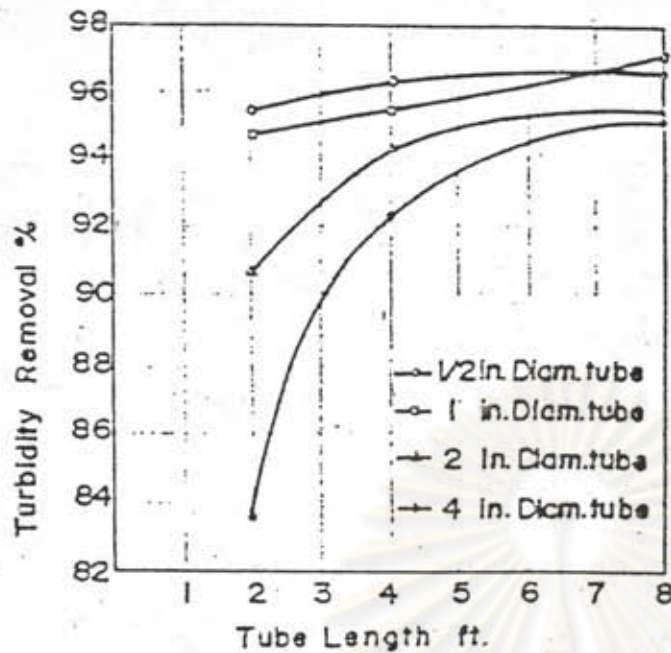
## 2.7 ผลเนื่องจากอัตราการไหล

Hansen and Culp (1967) ได้ทำการวิจัยโดยการเปลี่ยนค่าอัตราการไหล 3 ค่า คือ 2, 5, และ 8 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต พบว่าประสิทธิภาพในการจมตัวของตะกอนจะลดลงหากอัตราการไหลสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วสูงขึ้นทำให้คั้นสลัดจ้อออกไปได้มากขึ้น

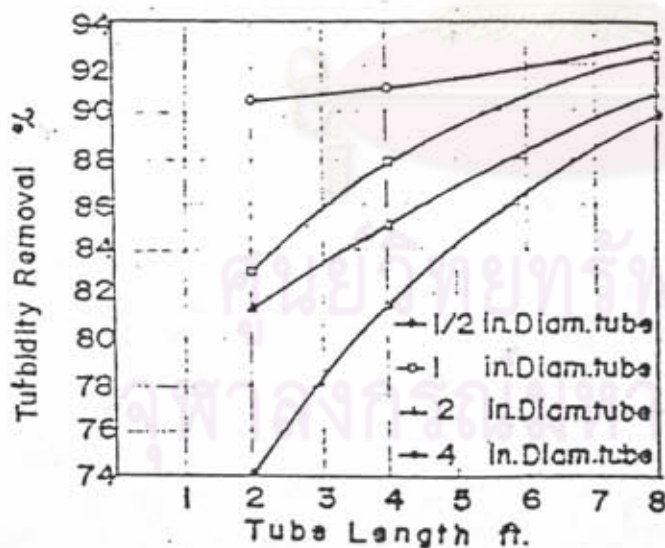
## 2.8 ผลอันเนื่องมาจากขนาดของหลอด และรูปร่างของหลอด

Hansen and Culp (1967) ได้แสดงผลเนื่องมาจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดไว้ดังรูปที่ 2.5.1 และ 2.5.2 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราไหลเดียวกัน หากความยาวของหลอดหรือขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการจมตัวลดลง

Yao (1970) ได้เสนอทฤษฎีการตกตะกอนด้วยอัตราเร็วสูงซึ่งเราจะชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของรูปร่างของหลอด หรืออุปกรณ์ของการตกตะกอน ดังสมการ

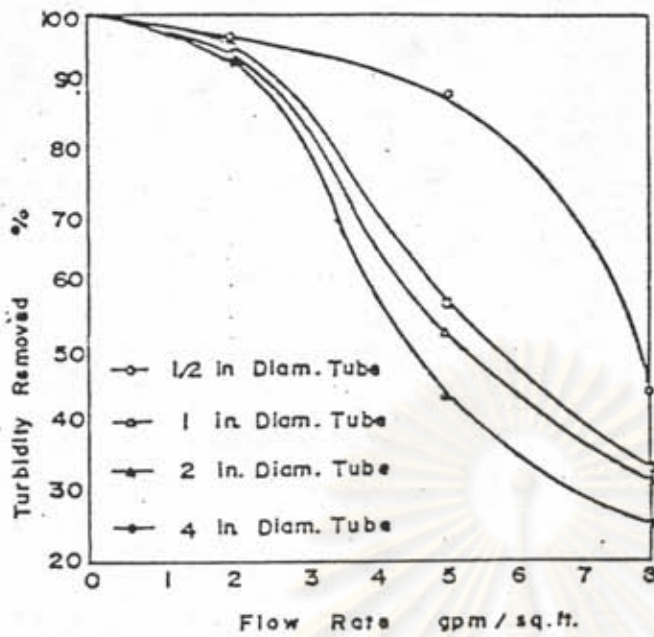


รูปที่ 2.5.1 ผลเนื่องจากความยาวของหลอดตกตะกอน  
ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น  
(Hansen and Culp 1967)



รูปที่ 2.5.2 ผลเนื่องจากความยาวของหลอดตกตะกอน  
ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น  
(Hansen and Culp 1967)





Tube length 4 ft.

Alum dosage 100 mg/l

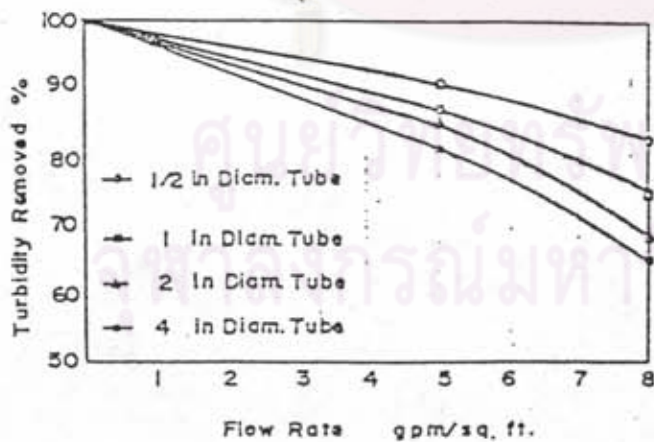
no Polyelectrolyte

Flocculation time 20 min.

Influent turbidity 450 JTU

Average influent turbidity

รูปที่ 2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกับอัตราไหลล้นผิว (Hansen and Culp 1967)



Tube length 4 ft.

Alum dosage 100 mg/l

Polyelectrolyte dosage 0.5 mg/l

Flocculation time 20 min.

Influent turbidity 450 JTU

Average influent turbidity

รูปที่ 2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นกับอัตราไหลล้นผิว (Hansen and Culp 1967)

$$V_u = \frac{C Sc V_o}{\sin \theta + L \cos \theta}$$

โดยที่

Sc = สัมประสิทธิ์เนื่องจากรูปร่างของหลอดตกตะกอน

ตัวอย่างเช่น

Sc = 1 สำหรับแผ่นขนานเอียง

Sc = 4/3 สำหรับหลอดตกตะกอนรูปวงกลม

## 2.9 ผลเนื่องจากมุม

มุมของหลอดหรือแผ่นขนานนับว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการตกตะกอนอย่างมาก พบว่ามุมที่ทำกับแนวราบของหลอดหรือแผ่นขนานน้อย เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันขึ้นภายใน ได้ง่ายจะต้องทำการล้างย้อน และในกรณีที่มุมของหลอดหรือแผ่นขนานสูงเกินไปจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยลดลง

Yao (1970) ได้เสนอว่ามุมของหลอดตกตะกอนที่จะส่งผลให้ความเร็วในการจมตัวต่ำสุด ( $V_{uc}$ ) จะมีค่าดังสมการ

$$\theta_{min} = \tan^{-1} 1/L$$

เมื่อความยาวสัมพัทธ์ (L) เท่ากับ 20 มุมที่น้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $2^{\circ}54'$  ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการจมตัวดีที่สุด ถ้าควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ให้คงที่

## 2.10 การไหลภายในท่อของของไหลที่อัดตัวไม่ได้

### 2.10.1 การไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน (laminar and turbulent flow)

การแบ่งการไหล โดยพิจารณาจากลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) เป็นการไหลที่แต่ละอนุภาคของของไหลในแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปในเส้นทางที่แน่นอน และของไหลแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่โดยการเลื่อนตัวไปบนชั้นที่อยู่ถัดไป ในการไหลแบบราบเรียบนี้ค่า ตัวเลขเรย์โนลด์ จะมีค่าต่ำกว่า 2000

การไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) เป็นการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาคของไหลจำนวนมากในช่วงเวลาสั้น ๆ เส้นทางที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของไหลที่มีการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะไม่มีโอกาสเหมือนกันเลย ในการไหลแบบปั่นป่วนนี้ โดยทั่วไปแล้วค่าตัวเลขเรย์โนลด์ จะสูงกว่า 2000

### 2.10.2 ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, $N_R$ )

ตัวเลขเรย์โนลด์ เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย ( $F_i$ ) กับแรงเนื่องจากความเสียดทาน ( $F_v$ ) ซึ่งดังกล่าวตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ Osborne Reynolds ซึ่งเป็นผู้เสนอผลงานจากการทดลองในสิ่งตีพิมพ์ ในปี ค.ศ. 1882 อัตราส่วนของแรงทั้งสองนี้คือ

$$\text{แรงเสียดทาน } F_v = \mu A \frac{U}{t}$$

$$= \mu L^2 \frac{V}{L}$$

$$= \mu LV$$

$$\text{แรงเฉื่อย } F_i = Ma$$

$$\text{มวล (M)} = \frac{\text{น้ำหนัก}}{g}$$

$$= \frac{rL^3}{g}$$

$$\text{อัตราเร่ง (a)} = \frac{\text{ระยะทาง}}{(\text{เวลา})^2}$$

$$= \frac{L}{t^2}$$

$$F_i = Ma = \frac{rL^3}{g} \cdot \frac{L}{t^2}$$

$$= \frac{rL^4}{gt^2}$$

$$\text{เพราะว่า } \rho = r \quad \text{และ } V = \frac{L}{t} ; t^2 = \frac{L^2}{V^2}$$



$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{\rho g L^4 V^2}{gL^2} \\
 F_1 &= \rho L^2 V^2 \\
 N_R &= \frac{F_1}{F_v} \\
 &= \frac{\rho L^2 V^2}{\mu LV} \\
 &= \frac{LV}{\gamma} \quad (\gamma = \frac{\mu}{\rho})
 \end{aligned}$$

L คือมิติเชิงเส้น สำหรับในการพิจารณาไหลของของไหลเต็มท่อกลม ตัวแปร L นี้ก็จะคือเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ V คือความเร็วที่ไหลผ่าน และ  $\gamma$  คือความหนืดของของไหลซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

### 2.10.3 ตัวเลขฟรูด (Froude number, $N_F$ )

ตัวเลขฟรูดเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย ( $F_1$ ) กับแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก ( $F_G$ ) ชื่อดังกล่าวนี้ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ William Froude ซึ่งเป็นผู้หาแรงต้านของเรือที่ เนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของคลื่นที่เกิดจากเรือ

$$\begin{aligned}
 N_F &= \frac{F_1}{F_G} \\
 F_1 &= \rho L^2 V^2 \\
 F_G &= W = rL^3 \\
 N_F &= \frac{\rho L^2 V^2}{rL^3} \quad (\rho = \frac{r}{g}) \\
 &= \frac{V^2}{gL}
 \end{aligned}$$

ถึงแม้ว่า  $V^2/gL$  จะเป็นตัวเลขฟรูด ตามค่านิยม แต่รูปที่นิยมใช้กันก็คือ รากที่สองของ  $V^2/gL$  ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ความเร็ว (V) มีกำลังหนึ่ง ดังนั้นรูปของตัวเลขฟรูด ก็จะเป็น

$$N_F = \sqrt{V^2/gL} = V/\sqrt{gL}$$

ค่าตัวเลขฟรูดเป็นค่าที่ช่วยในการคำนวณ พิจารณาการไหลในร่องน้ำเปิดเมื่อ การไหล

เป็นแบบราบเรียบตัวเลขพรีดจะมีค่าน้อยกว่า 1 และเมื่อนำมีลักษณะที่เปลี่ยนค่าตัวเลขพรีดจะมีค่ามากกว่า 1

### 2.11 การไหลของของไหลภายในท่อที่ไม่ใช้ท่อกลม

ในกรณีที่ไม่ใช้ท่อกลมจะไม่สามารถแทนค่ามิติเชิงเส้น  $L$  ในสมการ เรย์โนลด์ เส้นผ่านศูนย์กลาง ในกรณีนี้จะต้องแทนค่ามิติเชิงเส้นนี้ด้วยรัศมีไฮดรอลิก,  $R_h$  ซึ่งมีนิยามว่า

$$R_h = \frac{A}{P}$$

ในที่นี้  $A =$  พื้นที่หน้าตัดของของไหลในท่อ  
 $P =$  เส้นขอบเปียก

เส้นขอบเปียกคือ เส้นขอบนอกของพื้นที่หน้าตัดของของเหลว ส่วนที่สัมผัสกับท่อ ในกรณีของท่อกลมที่มีน้ำไหลเต็มท่อ ค่า  $R_h = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2} = \frac{D}{4}$

สมการเรย์โนลด์ จะเป็นดังนี้

$$N_R = \frac{VD}{\gamma}$$

$$= \frac{V(4R_h)}{\gamma}$$

### 2.12 การศึกษาที่ผ่านมา

จากแนวความคิดเกี่ยวกับการตกตะกอนในอดีตซึ่งชี้ให้เห็นว่า การตกตะกอนขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ค่าอัตราการไหล และพื้นที่จมตัว จึงได้มีผู้คิดพัฒนาระบบโดยการสอดใส่ตัวกลางต่าง ๆ เช่น แผ่นขนาน หลอดตกตะกอน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว และประสิทธิภาพในการจมตัว โดยการพัฒนาในช่วงแรกๆ พบปัญหาที่เป็นอุปสรรคต่อการพัฒนา 2 ประการหลัก คือ

- 1) ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของปริมาตรน้ำภายในของแต่ละชั้นให้สม่ำเสมอทั่วทุกชั้นได้
- 2) ปัญหาเกี่ยวกับการนำตะกอนออกจากถัง เนื่องจากระยะทางระหว่างแผ่นขนานแต่ละชั้นน้อยไป

ต่อมาใน ค.ศ. 1967 Hansen และ Culp (1967) ได้ค้นพบวิธีการที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้ง 2 ประการ โดยออกแบบถังตกตะกอนแบบใช้หลอดเล็ก ๆ ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5, 1.0, 2.0 และ 4.0 นิ้ว ความยาว 2.0, 4.0 และ 8.0 ฟุต วางท่ามุมกับแนวราบ 5 องศา โดยให้อัตราน้ำไหลผ่าน 2.0, 5.0 และ 8.0 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต ผลปรากฏว่าหากเพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหรืออัตราการไหล ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นจะลดลง และในทางตรงกันข้าม หากเพิ่มความยาวของหลอดตกตะกอนจะส่งผลให้ประสิทธิภาพจะสูงขึ้น นอกจากนี้การใช้หลอดตกตะกอนขนาดเล็กที่มีความยาวหลอด 2-4 ฟุต สามารถลดระยะเวลาการกักเก็บได้เหลือไม่เกิน 6 นาที

ในปี ค.ศ. 1968 Culp (1968) ได้แบ่งการตกตะกอนแบบหลอดออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อย (the essentially horizontal tube settler) และการตกตะกอนแบบหลอดเอียงมาก (the steeply inclined tube settler) Culp ได้เสนอว่าการตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อยเหมาะสำหรับใช้กับระบบที่มีอัตราการไหลต่ำ การวางหลอดท่ามุม 5 องศาจะช่วยให้ตะกอนไหลออกจากหลอดได้ดีขึ้น ในขณะที่ทำการล้างย้อน การตกตะกอนแบบหลอดเอียงมากการเอียงท่ามุม 60 องศากับแนวราบจะส่งผลให้ตะกอนสามารถเคลื่อนที่ออกจากหลอดได้อย่างต่อเนื่อง

ในปี ค.ศ. 1970 Yao (1970) ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ของการตกตะกอนแบบหลอด โดยตั้งสมมติฐานว่า การไหลเป็นแบบราบเรียบและไหลในทิศทางเดียว ซึ่งอนุภาคแขวนลอยที่อยู่ในน้ำจะถูกแยกโดยตกตะกอนแบบโดด (Discrete Settling) แบบจำลองของ Yao จะกล่าวถึงปัจจัยที่ผลต่อการจมตัวดังนี้

$$\int (U/V_0) dY + (V_u/V_0) Y \sin \theta + (V_u/V_0) X \cos \theta = C_1$$

ซึ่งได้กล่าวโดยละเอียดในทฤษฎีการตกตะกอนด้วยความเร็วสูง

ในปี ค.ศ. 1974 Amin (1974) ได้สำรวจเกี่ยวกับปัจจัยพื้นฐานของการตกตะกอนแบบหลอด การสำรวจของเขาพบว่าถังตกตะกอนแบบหลอดเอียงมากมีประสิทธิภาพดีกว่าถังตกตะกอนแบบหลอดเอียงน้อย ซึ่งพิจารณาเปรียบเทียบจากอัตราเร็วการไหลที่สูงกว่า ในเวลาการกักเก็บสั้นกว่า และประสิทธิภาพดีกว่า

ในปี ค.ศ. 1975 สุขุม โกศัยเสวี (1975) ได้ทดลองใช้แผ่นล้างกะลือผูก และแผ่นกระเบื้องลูกฟูก ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้มุงหลังคา มาทำเป็นหลอดตกตะกอน ผลจากการทดลองแสดง



ให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองอย่างนี้ ใช้เป็นหลอดตกตะกอนได้ดี โดยแสดงให้เห็นว่าสิ่งกะสิ่ลูกฟูกขนาดกลางยาว 2 ฟุตและอัตราการไหล (overflow rate) 2-3 แกลลอนต่ออนาทีต่อตารางฟุต จะต้องใช้กระเบื้องลูกฟูกขนาดความยาว 3 ฟุต ที่อัตราการไหลเท่ากัน จึงจะได้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน แต่จากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าถังตกตะกอนแบบหลอดโดยใช้สิ่งกะสิ่มีปัญหาเรื่องการฝัง

ในปี ค.ศ. 1977 Chen (1977) ได้แสดงแนวทางในการพัฒนาการออกแบบถังตกตะกอนแบบหลอด เขาเสนอว่า ความยาวสัมพันธ์เท่ากับ 14.9 จะให้ผลคุ้มค่าทางเศรษฐกิจมากที่สุดสำหรับหลอดตกตะกอนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในปี ค.ศ. 1982 Panneerselvam (1982) ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลที่ไหลผ่านหลอดตกตะกอน โดยใช้น้ำสังเคราะห์ในความขุ่นต่างกัน พบว่าอัตราการไหลที่ 4 ม<sup>3</sup> ต่อ ม<sup>2</sup> ต่อ ชม. ได้ผลดีที่สุด และได้ศึกษาเกี่ยวกับเซตกักเก็บตะกอน โดยเปลี่ยนแปลงความลึกของเซตกักเก็บตะกอนได้กลุ่มหลอดตกตะกอน โดยใช้ค่าความปลอดภัย (safety factor) เท่ากับ 2 เพื่อพัฒนาการออกแบบความลึกน้อยสุดของเซตกักเก็บตะกอน ให้อนุภาคที่จมตัวแล้วไม่ฝังลอยตัวคืนกลับ

พบว่าความลึกอย่างน้อย

$$H_x = H_1 [1 - (x/L)]^{0.1}$$

โดยที่  $H_x$  = ความลึกของเซตกักเก็บตะกอนที่ระยะทาง x

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย