บทที่ 3

ทฤษฎีการกรอง

3.1 การทำงานของตัวกรอง

การกรอง เป็นวิธีการกำจัดแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำ โดยการให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง ตัวกรองอาจจะเป็น ทราย, แอนทราไซท์ หรือ ผงไดอะตอม กลไกการทำงานของตัวกรองในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำ สามารถกระทำได้หลายวิธี[32] พอที่จะสรุปได้ดังนี้ คือ

(1) การดักสารแขวนลอยโดยตรง (Direct Sieving หรือ Straining) ในกรณีที่สารแขวนลอยมีขนาดโตกว่าช่องว่างระหว่างตัวกรอง สารแขวนลอยนั้นไม่สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างตัวกรองไปได้ จึงถูกดักเอาไว้โดยตรง Hall (1957) ได้แสดงสมการของความเป็นไปได้ในการกำจัดสารแขวนลอยโดยการดักโดยตรง ดังสมการที่ 3.1

$$P_s = \frac{D}{d} \qquad \text{.....(3.1)}$$

เมื่อ P_s = ค่าของความเป็นไปได้ในการกำจัดสารแขวนลอย

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของสารแขวนลอย

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกรอง

โดยที่ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านตัวกรองนั้น จะต้องน้อยมาก ๆ

(2) การสัมผัสกับผิวของตัวกรอง (Chance Contact) ในระหว่างที่น้ำไหลผ่านตัวกรอง สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างตัวกรอง และ มีโอกาสที่จะสัมผัสกับผิวของตัวกรอง แล้วถูกแยกออก Einstein (1964) กับ Grace (1956) ได้กล่าวว่า ค่าของความเป็นไปได้ในการกำจัดสารแขวนลอยนั้น เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังที่สองของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารแขวนลอย และเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ากำลังที่สามของขนาดเส้น

ผ่าศูนย์กลางของตัวกรอง ดังสมการที่ 3.2

$$P_s \simeq \frac{D^2}{d^3} \quad \text{.....(3.2)}$$

เมื่อ P_s = ค่าของความเป็นไปได้ในการกำจัดสารแขวนลอย

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารแขวนลอย

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกรอง

(3) การตกตะกอน (Sedimentation) สารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างตัวกรองและสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างตัวกรองได้ อาจตกตะกอนบนผิวของตัวกรอง การตกตะกอนของสารแขวนลอยบนผิวของตัวกรอง เกิดขึ้นตลอดช่วงความสูงของตัวกรอง ประสิทธิภาพของการตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับ อัตราการกรองและความเร็วของการตกตะกอนของสารแขวนลอย พื้นที่ผิวทรายกรองซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับการตกตะกอน อาจคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$\text{พื้นที่ผิวทรายกรอง} = \frac{6}{d}(1-p) \quad \text{ม.}^2/\text{ม.}^3 \text{ ..... (3.3)}$$

โดยที่ p = ความพรุนของทรายกรอง

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรายกรอง, ม.

สมการที่ 3.3 สามารถใช้คำนวณหาพื้นที่ผิวทรายกรองเป็นตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง ตัวอย่างเช่น ทรายกรองมีความพรุน 35 %, มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 0.6 ม.ม. ดังนั้น พื้นที่ผิวทรายกรองจะเท่ากับ 6/0.0006 (1-0.35) หรือเท่ากับ 6,500 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง

(4) การกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อย (Inertial Impaction) เมื่อน้ำไหลผ่านไปตามผิวตัวกรอง และไหลเปลี่ยนทิศทาง สารแขวนลอยซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ จะเบี่ยงเบนตามทิศทางการไหลไม่ทัน คงพยายามวิ่งไปตามทิศทางเดิมเนื่องจากแรงเฉื่อย ทำให้กระทบและอาจจะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวกรอง ประสิทธิภาพของการกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยนี้จะขึ้นอยู่กับ ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของสารแขวนลอยกับของน้ำ, ความเร็ว

ของน้ำที่ไหลผ่านตัวกรอง, มุมตกกระทบ และตำแหน่งของสารแขวนลอย

(5) อิทธิพลจากประจุไฟฟ้า เนื่องจากอนุภาคแขวนลอยที่กระจายอยู่ในน้ำ สามารถรับเอาประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าไว้ที่บนผิวของมัน การรับมาของประจุไฟฟ้าที่บนผิวของอนุภาคแขวนลอยอาจเกิดจาก การดูดซับ (Adsorption) หรือการแตกตัวเป็น อิออน (Ionization) จากหลักที่ว่า ประจุไฟฟ้าที่ต่างกันจะดึงดูดกัน ประจุไฟฟ้าที่เหมือนกันจะผลักกัน การที่อนุภาคแขวนลอยในน้ำ สามารถมีความมั่นคงตัว (Stable Sol) หรือฟุ้งกระจายอยู่ในน้ำได้ เป็นการชี้ให้เห็นว่าเกิดจากแรงผลักกันของประจุไฟฟ้า ระหว่างอนุภาคแขวนลอยที่เหมือนกัน แต่ถ้าจะให้การกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำได้ดีนั้น Oulman กับ Baumann (1963) ได้กล่าวว่า ประจุไฟฟ้าที่บนผิวอนุภาคแขวนลอยกับประจุไฟฟ้าที่บนผิวตัวกรองจะต้องต่างกัน ดังนั้น ประจุไฟฟ้าจึงเป็นกลไกส่วนหนึ่งที่สำคัญในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยในน้ำ

(6) แรง แวน เดอ วาลส์ (Van der Waals Forces) ในจำนวนแรงทั้งหมดที่ปรากฏของแรงดึงดูด และแรงผลักกันของโมเลกุลจะมีแรงอยู่พวกหนึ่งที่มีกำลังมากที่สุด เรียกแรงนั้นว่า แรง แวน เดอ วาลส์ แรง แวน เดอ วาลส์ เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของอนุภาคแขวนลอยชนิดเดียวกัน ซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อสารแขวนลอยต่างเคลื่อนเข้ามาใกล้กัน หรืออยู่ใกล้กันมากขึ้น แต่แรงเหล่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์เมื่อสารแขวนลอยต่างเคลื่อนออกจากกัน หรืออยู่ห่างกันออกไป ดังนั้น แรง แวน เดอ วาลส์ จึงไม่เป็นกลไกส่วนสำคัญในการกำจัดสารแขวนลอย แต่จะเป็นแรงที่สำคัญในการทำลายความคงตัว (destabilize a sol) และอีกทั้งยังคอยควบคุมสารแขวนลอยต่าง ๆ ไม่ให้แตกแยกตัวออกจากกันได้ง่าย

(7) การเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน (Brownian Movement) การเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางของอนุภาคแขวนลอย เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน การเคลื่อนที่แบบนี้ อาจทำให้อนุภาคแขวนลอยเกิดการเบี่ยงเบนออกไปจากแนวการไหลของน้ำ และทำให้มีโอกาสที่จะสัมผัสกับผิวของตัวกรอง แล้วถูกแยกออกไป ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยที่มีลักษณะกลม อาจคำนวณได้จากสมการของ Einstein ดังสมการที่ 3.4

$$\bar{X} = \left[\frac{2KTt}{3fD}\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(3.4)}$$

โดยที่ $\bar{x}$ เป็นค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D ในเวลา t, K เป็นค่าคงที่ โบลทซ์มานน์, T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ และ f เป็นความหนืดของของไหล

(8) การสมานอนุภาคแขวนลอย (Flocculation) เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่สัมผัสกับอนุภาคขนาดเล็ก แล้วรวมกันเป็นอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิม และอาจจะถูกกำจัดต่อไป โดยการดักโดยตรง, การตกตะกอน, การสัมผัสกับผิวของตัวกรอง, และจากการกระทบด้วยแรงเฉื่อย

3.2 สัมประสิทธิ์การไหลซึมของตัวกรอง

ส.ป.ส. การไหลซึมของตัวกรอง เป็นคุณสมบัติของตัวกรองซึ่งยอมให้น้ำไหลผ่านไป Darcy (1856) ได้กล่าวว่า ความเร็วของการไหลซึม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลาดชันการไหล (Hydraulic gradient) ซึ่งต่อมาเรียกว่า กฎของ Darcy ดังสมการที่ 3.5

$$v_p = K_p S \quad \text{..... 3.5}$$

เมื่อ v_p = ความเร็วจริงของการไหลซึม

K_p = ส.ป.ส. ของการไหลซึม

S = ความลาดชันการไหล

= h/L

h = ความต่างระดับของน้ำระหว่างจุดที่น้ำไหลเข้ากับจุดที่น้ำไหลออก

L = ความสูงหรือความหนาของชั้นตัวกรองวัดในทิศทางการไหล

Carmann (1956) ได้กล่าวว่า ค่า K_p ขึ้นอยู่กับความหนืดของของเหลว (Kinematic viscosity, ν), เส้นผ่าศูนย์กลางประสิทธิผลของตัวกรอง (Effective diameter, dm), ความพรุนประสิทธิผลของตัวกรอง (Effective porosity, n), ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g), และค่า ส.ป.ส. ตัวเลข (Numerical coefficient, a) ดังแสดงในสมการที่ 3.6

$$K_p = \frac{a.g.d^2m.n^3}{\sqrt{(1-n)^2}} \quad \text{.....3.6}$$

สมการค่า K_p ของ Carmann เป็นที่ยอมรับและใช้กันโดยทั่วไปในเวลาต่อมา

3.3 <u>ความฝืดของตัวกรอง</u> (Head loss)

การไหลของน้ำผ่านตัวกรอง มีผลทำให้น้ำสูญเสียความดันไปบางส่วน ความดันของน้ำที่สูญเสียไป เรียกว่า ความฝืดของตัวกรอง ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของความพรุนของตัวกรอง (e), ความหนาของตัวกรอง (L), เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกรอง (d), ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านตัวกรอง (v), ความหนืดของน้ำ (μ), ความหนาแน่นของน้ำ (ρ), และความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g)[11] ดังสมการที่ 3.7

$$H_f = F(e, L, d, v, \mu, \rho, g) \quad \text{.....3.7}$$

เมื่อ H_f = ความฝืดของตัวกรอง

สมการที่ 3.7 เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ขั้นพื้นฐานขององค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับความฝืดของตัวกรอง สำหรับในการหาความฝืดของตัวกรอง มีสมการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาความฝืดของตัวกรอง[23] พอที่จะสรุปได้ดังนี้คือ (1) สมการของ Carmen - Kozeny (2) สมการของ Fair - Hatch (3) สมการของ Rose, และ (4) สมการของ Hazen ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมการสำหรับคำนวณหาความฝืดของตัวกรอง

สมการ	โดยที่
Carmen-Kozeny: $h = \frac{f}{\phi}\frac{1-e}{e^3}\frac{L}{d}\frac{v^2}{g}$ $f = 150\frac{1-e}{N_r} + 1.75$ $N_R = \frac{dv\rho}{\mu}$ **Fair-Hatch:** $h = kvS^2\frac{(1-e)^2}{e^3}\frac{L}{d^2}\frac{v}{g}$ **Rose:** $h = \frac{1.067}{\phi}C_d\frac{1}{e^4}\frac{L}{d}\frac{v^2}{g}$ $C_d = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34$ **Hazen:** $h = \frac{1}{C}\frac{60}{T+10}\frac{L}{d_{10}^2}v$	C = coefficient of compactness (600 to 1200) C_d = coefficient of drag d = grain diameter, m d_{10} = effective size grain diameter, mm f = friction factor g = gravity constant, 9.8 m/s² h = head loss, m k = filtration constant, 5 based on sieve openings, 6 based on size of separation L = depth, m N_R = Reynolds number S = shape factor (varies between 6.0 and 7.7) T = temperature, °F v = filtration velocity, m/s e = porosity μ = viscosity, N · s/m² ν = kinematic velocity, m²/s ρ = density, kg/m³ ϕ = shape factor (usually 1)