บทที่ 2

ทฤษฎีการกรอง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 ทฤษฎีการกรองของเครื่องกรองน้ำแบบใช้ทราย

การกรองโดยใช้เครื่องกรองน้ำแบบใช้ทรายได้เริ่มต้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1856 เรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ได้มีนักวิทยาศาสตร์จำนวนหลายท่านศึกษาเกี่ยวกับเครื่องกรองน้ำแบบใช้ทราย ตามที่แคมป์ (Camp, 1964) ได้รวบรวมไว้คือ

1. ในปี ค.ศ. 1856 ดาร์ซี (Darcy) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของเหลวผ่านวัสดุพรุน (Porous Media)

2. ในปี ค.ศ. 1863 ดูพูอิท (Dupuit) ได้เสนอแนะให้ข้อคิดเห็นเกี่ยวกับความเร็วของของเหลวในขณะที่ผ่านวัสดุพรุน

3. ในปี ค.ศ. 1935 ปรัทตราเชน (Pratrashev) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการอุดตันในชั้นของทราย (Clogging)

4. ในปี ค.ศ. 1937 อิวาซากิ (Iwasaki) ซึ่งเป็นผู้อำนวยการประปาของกรุงโตเกียวได้สรุปผลการทดลองของเขาเกี่ยวกับจำนวนของสารละเอียดที่กรองได้จากชั้นทราย

5. ในปี ค.ศ. 1940 สไตน์ (Stein) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการทำจัดสารลอยแขวนขนาดละเอียดซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าสูญเสียของระดับน้ำ (Head Loss) แรงเฉือนเนื่องจากความหนืด (Viscous Shearing Force) และเวลาที่ใช้ในการยึดตัว (Straining) การดัก (Seiving) และการตกตะกอน (Sedimentation) ตลอดจนการแตกของตะกอนที่เกาะกันอยู่ การสร้างเกราะ (Sheath) การสร้างสมการของความชันระดับน้ำ (Hydraulic Gradient) และสังเกตลักษณะของตะกอนที่จับตัวกันว่ามีความสัมพันธ์กับเวลาอย่างไร

6. ในปี ค.ศ. 1941 อีแลสเสน (Eliassen) ได้ทดลองเกี่ยวกับการอุดตันของเครื่องกรองน้ำแบบใช้ทรายชนิดไหลลงอย่างเร็ว และพบว่าค่าสูญเสียของระดับน้ำ (Head Loss) เป็นฟังก์ชั่นแบบเส้นตรงกับเวลา

7. ในปี ค.ศ. 1951 และ 1960 มินท์ส (Mintz) ได้ทดลองเกี่ยวกับสารลอยแขวนที่เป็นของเหลว และอนุภาคแขวนลอย และได้หาผลลัพธ์เกี่ยวกับน้ำหนักรวมของสารละเอียดที่ผ่านไปในพื้นที่หน้าตัดในช่วงเวลาหนึ่ง (t)

8. ในปี ค.ศ. 1952 ฮอลล์ (Hall) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหล (Kinematic of Flow) และสรุปผลถึงคุณลักษณะของสารละเอียดกับการจับตัวของตะกอน

9. ในปี ค.ศ. 1956 โคเจนนีและคาร์มานน์ (Kojeny and Carmann) กำหนดสมการเกี่ยวกับค่าของตัวนำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับสมการของดาร์ซี ในเรื่องเกี่ยวกับการไหลของของเหลวผ่านวัสดุพรุน

10. ในปี ค.ศ. 1960 และ 1965 ไอวีส (Ives) ได้พิจารณาเกี่ยวกับสารละเอียดที่หนักและมีรูปร่างแบบเดียวกัน (Uniform Heavy Small Fines) ในสารแขวนลอยโดยตั้งสมมติฐานจากผลการทดลองของอิวาซากิ (Iwasaki) และจากสูตรของฮอลล์ (Hall)

11. ในปี ค.ศ. 1961 เชคแมน (Shekhtman) ได้พัฒนาทฤษฎีเกี่ยวกับการกรองสารแขวนลอย

จากผลงานของนักวิทยาศาสตร์หลายท่านที่กล่าวมานี้ และผลงานของนักวิทยาศาสตร์อื่น ๆ พอจะสรุปเป็นเนื้อหาและหัวข้อทางทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องกรองน้ำแบบใช้ทรายได้ดังนี้

2.1.1 การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการไหล

ในปี ค.ศ. 1856 ดาร์ซี (Darcy) ได้สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับของเหลวที่ไหลผ่านวัสดุพรุน (Porous media) ออกมาเป็นสูตร การไหลผ่านของดาร์ซี (Darcy Seepage Formula) ได้ดังนี้

$$q = KJ = KH/L$$

โดยที่ q = อัตราการไหลของของเหลว (ซม.^{3}/วินาที/ซม.^{2})

K = ตัวนำชลศาสตร์ (Hydraulic Conductivity) ของวัสดุพรุนกับของเหลวที่ไหลผ่าน (ซม./วินาที)

J = ความลาดชันระดับน้ำ (Hydraulic Gradient) (ซม./ซม.)

H = ค่าสูญเสียของระดับน้ำ (Head loss) (ซม.)

L = ความสูงของชั้นกรอง (Filter Length) (ซม.)

แสดงว่าอัตราการไหลของของเหลวเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสูญเสียของระดับน้ำต่อหนึ่งหน่วยความสูงของชั้นกรอง ค่าตัวนำชลศาสตร์ (K, Hydraulic Conductivity) ของวัสดุพรุนกับของเหลวที่ไหลผ่าน ซึ่งต่อมา เออร์เม (Irmay, 1964) ได้สรุปผลรวมไว้ว่า สูตรการไหลผ่านของดาร์ซี (Darcy Seepage Formula) จะสามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อประกอบด้วยเงื่อนไขรวม 5 ข้อดังต่อไปนี้

ก) ตัวกรองต้องเป็นสารเนื้อเดียวกันตลอด มีคุณสมบัติอย่างเดียวกันในทุกสภาวะ (Isotropic) มีขนาดและรูปลักษณะเท่ากันตลอด โดยคงตัวในรูปร่างทั้งทางฟิสิคส์และทางเคมี

ข) รอยต่อของเม็ดทรายและช่องว่างต่าง ๆ จะต้องมีของเหลวอยู่เต็มไม่ให้มีอากาศติดค้างอยู่ และจะต้องไม่มีขบวนการทางชีววิทยาเกิดขึ้นในช่องว่างระหว่างตัวกรอง

ค) ของเหลวต้องเป็นสารที่มีคุณสมบัติอย่างเดียวกันในทุกสภาวะ (Isotropic) เป็นสารเนื้อเดียวกันโดยตลอด (Homogeneous) ไม่สามารถถูกอัดให้มีปริมาตรเล็กลงได้ (Incompressible) มีอุณหภูมิคงที่ทุกจุด มีความหนืดคงที่ และไม่เกิดปฏิกริยาทางฟิสิคส์หรือทางเคมีได้ง่าย เมื่ออยู่ในภาวะปกติเช่น น้ำมันดิบ หรือ น้ำ เป็นต้น

ฆ) อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเข้าไปในตัวกรองจะต้องมีค่าต่ำมาก เพื่อให้ได้ค่าตัวเลขของเรย์โนลด์ (Reynolds' Number) มีค่าน้อย จากสูตรค่าตัวเลขของเรย์โนลด์

$$Re = \frac{g\, d_m}{v\,(1-n)} < 1 \text{ to } 10$$

โดยที่ Re = ค่าตัวเลขของเรยโนลด์ (Reynolds' Number)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (Gravitational acceleration) (981 ซม./วินาที^{2})

d_m = ค่าเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)

v = ค่าความหนืดขณะเคลื่อนที่ของของเหลว (Kinematic Viscosity) (ซม./วินาที)

n = ค่าความพรุนประสิทธิผล (Effective Poresity) (ซม.^{3} /ซม.^{3})

ง) ผิวของเครื่องกรองและผิวของตัวกรองจะต้องไม่ให้ของเหลวซึมผ่านเข้าไปได้ ถ้าหากไม่กำหนดเงื่อนไขรวม 5 ข้อ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถในการซึม (K) นั้นก็จะขึ้นอยู่กับค่าอื่น ๆ ด้วย เช่น ค่าความหนืดของของเหลว ในขณะที่ไม่คำนึงถึงผลของแรงที่มากระทำ (Kinematic Viscosity, v) ค่าพื้นผิวจำเพาะ (Specific Surface) หรือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางประสิทธิผล (Effective Diameter, d_m) ค่าความพรุนประสิทธิผล (Effective Porosity) เป็นต้น ซึ่งคาร์มานน์ (Carmann, 1956) ได้กำหนดเป็นสูตรสำเร็จเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปคือ

$$K = \frac{a\, g\, d_m^2\, n^3}{v\,(1-n)^2}$$

โดยที่ a = สัมประสิทธิตามตัวเลข (Numerical Coefficients) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับรูปร่างของเม็ดกรอง และการจัดเรียงตัวของเม็ดกรอง สำหรับเม็ดกรองที่เป็นทรงกลมทั้งหมด จะมีค่าสัมประสิทธิตามตัวเลขประมาณ 1/180

2.2 องค์ประกอบต่าง ๆ ในทางฟิสิกส์ที่มีผลต่อการกรอง

ในการขจัดสิ่งสกปรกที่ปะปนอยู่ในน้ำโดยกรรมวิธีการกรองนั้น องค์ประกอบทั่ว ๆ ไปที่แสดงถึงความสามารถในการกรอง แยกได้เป็น 3 องค์ประกอบหลัก คือ องค์

ประกอบในทางฟิสิกส์, ทางเคมีและทางชีววิทยา แต่สำหรับกรรมวิธีการกรองแบบไหลเร็วนั้น ความสามารถในการกรองจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในทางฟิสิกส์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอิวาซากิ (Iwasaki) 1937 ได้เคยแสดงถึงองค์ประกอบในทางฟิสิกสที่มีผลกระทบต่อกรรมวิธีการกรองไว้หลายประการ ต่อมา ภายหลังได้รับการดัดแปลงและแก้ไขให้เหมาะสม โดยสไตน์ (Stein, 1940) ดังนี้

1. การกรองเป็นขบวนการของการไหล (Dynamic Process) ดังนั้น ความสามารถในการกรองนั้นจะขึ้นอยู่กับความสึกของเครื่องกรองและเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านเครื่องกรอง

2. ความสามารถในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่ไหลผ่านชั้นกรองหนึ่ง ๆ ของเครื่องกรองนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดที่ผ่านเข้าไปในชั้นตอนนั้น

3. ปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่ถูกกำจัดออกในขณะกรองช่วงแรก ๆ จะมีปริมาณที่เป็นสัดส่วนคงที่ นั่นคือปริมาณรวมของอนุภาคแขวนลอยที่ถูกกำจัดออกนั้นจะเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรงเมื่อเทียบกับเวลาและต่อไปสัดส่วนดังกล่าวก็จะลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งทำให้ปริมาณของอนุภาคแขวนลอยที่ถูกกำจัดออกนั้นไม่คงลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างเดิมเมื่อเทียบกับเวลา และในที่สุดก็จะลดลง นั่นคือ เครื่องกรองไม่สามารถที่จะทำการกรองได้อีกต่อไป ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของการอุดตัน

4. สิ่งสกปรกที่เกิดจากอนุภาคแขวนลอยที่ถูกเครื่องกรองดักไว้นั้น ต่อไปก็จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เครื่องกรองอุดตัน

แครปส์ (Crapps, 1966) ได้รวบรวมและอธิบายถึงขบวนการทางฟิสิกสที่แสดงถึงการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากของไหลในการกรองโดยใช้เครื่องกรองทรายแบบไหลเร็ว รวม 8 ขบวนการคือ

ก. การดักอนุภาคแขวนลอยโดยตรง (DIRECT SIEVING)

ข. การตกตะกอน (SEDIMENTATION)

ค. การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (INERTIAL IMPACTION)

ฆ. การเคลื่อนที่แบบบราวเนี่ยน (BROWNIAN MOVEMENT)

ง. โอกาสที่เกิดการสัมผัสกัน (CHANCE OF CONTACT)

จ. การแพร่กระจาย (DIFFUSION)

ฉ. อิทธิพลจากแรง แวน เดอ วาลส์ (VAN DER WAALS FORCES)

ช. อิทธิพลจากประจุไฟฟ้า (ELECTRODINETIC EFFECTS)

ซึ่งในแต่ละขบวนการมีหลักการและทฤษฎีสรุปโดยย่อได้ดังนี้

2.2.1 การคัดกอนุภาคแขวนลอยโดยตรง (DIRECT SIEVING)

เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างตัวกรองในเครื่องกรอง ในกรณีนี้อนุภาคแขวนลอยจะถูกดักไว้โดยตรง ฮอลล์ (HALL, 1952) ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการดักอนุภาคแขวนลอยโดยตรงว่า

$$P_S \simeq \frac{D}{d}$$

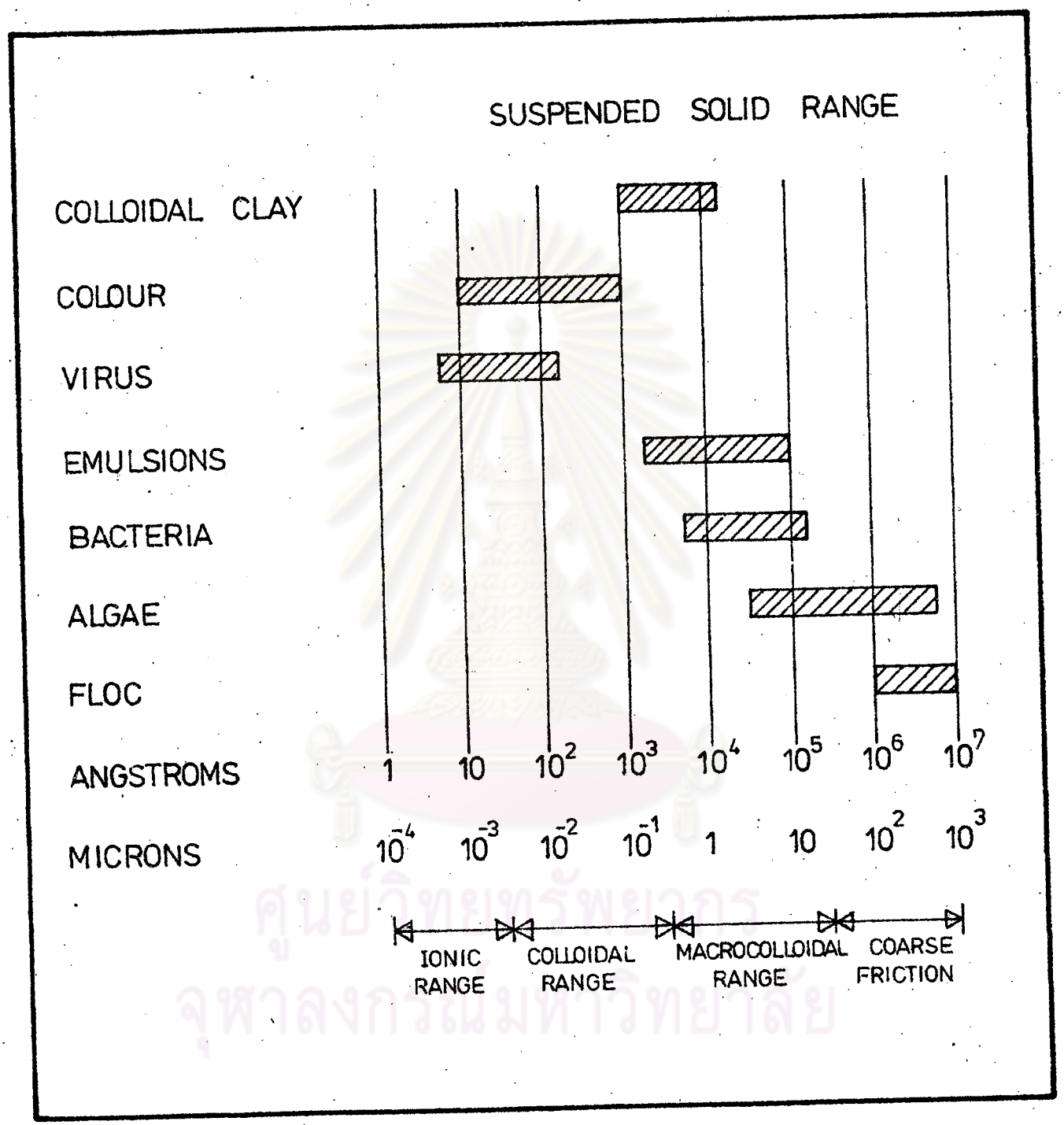
โดยที่ P_S = ค่าความเป็นไปได้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอย

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแขวนลอย (ซม.)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรายหรือตัวกรอง (ซม.)

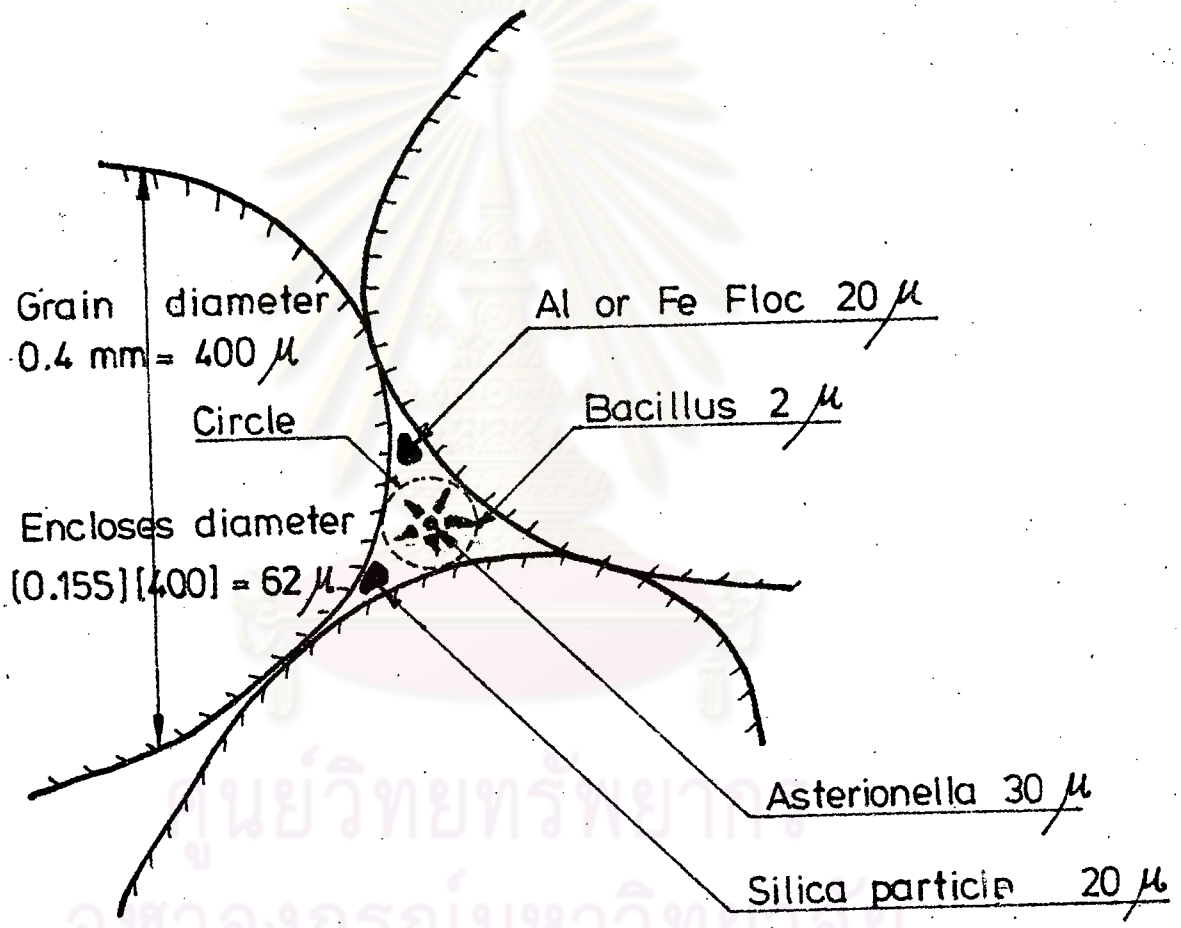
แต่ทั้งนี้ความเร็วของการไหลผ่านชั้นทรายนั้นจะต้องน้อยมาก ๆ แบคทีเรียซึ่งมีขนาดทั่วไปอยู่ระหว่าง 1 - 10 ไมครอน และตะกอนย่อย ๆ ของสารจำพวกเหล็กและอลูมิเนียม ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 20 - 50 ไมครอน ดังแสดงขนาดของอนุภาคต่าง ๆ ในรูปที่ 2.1 ก็ไม่สามารถถูกดักโดยเม็ดทรายหรือตัวกรอง สมมุติว่าขนาดของเม็ดทรายมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร จะทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีขนาดโต 62 ไมครอน ดังนั้น ตัวกรองดังกล่าวจะไม่สามารถดักอนุภาคลอยแขวน (COLLOIDAL MATTER) ที่โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.001 - 0.1 ไมครอนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

แต่อนุภาคแขวนลอย (SUSPENDED PARTICLE) นั้นจะถูกดักอยู่ระหว่างลอยต่อของสารกรอง (INTERSTITUAL STRAINING) ในขณะที่น้ำไหลผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดทราย น้ำจะมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น และทำให้อนุภาคแขวนลอยกระทบกันจนเกิด



รูปที่ 2.1 แสดงช่วงขนาดของสารแขวนลอยชนิดต่าง ๆ
(CHEREMISIOFF AND YOUNG, 1975)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แสดงขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดทรายและสารแขวนลอย (HUISMAN)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเกาะรวมตัวกันในที่สุด อนุภาคที่เกาะตัวรวมกันนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้นและถูกดักไว้ที่ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายนั้น เมื่อเวลานานเข้าอนุภาคที่ถูกดักไว้นี้ก็จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นจนเกิดการอุดตันได้ ในทางปฏิบัติสำหรับเครื่องกรองเร็วนั้น เมื่ออนุภาคถูกดักไว้ในขณะไหลผ่านชั้นทรายกอง จะทำให้เกิดการอุดตันได้ง่าย และทำให้ค่าของระดับน้ำสูญเสียเพิ่มขึ้นตามเวลาอย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องแก้ไขโดยใช้ขนาดของทรายกรองขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อไม่ให้ต้องล้างเครื่องกรองบ่อย ๆ

2.2.2 การตกตะกอน (SEDIMENTATION)

เกิดขึ้นโดยที่อนุภาคแขวนลอยซึ่งมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างระหว่างเม็ดทรายที่ไม่ถูกดักโดยตรง จะตกตะกอนบนผิวของเม็ดทรายโดยขบวนการแบบถังตกตะกอน การตกตะกอนโดยวิธีนี้เกิดขึ้นได้ในทุกชั้นทราย ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะตอนล่าง เหมือนถังตะกอนทั่ว ๆ ไป ในการคำนวณหาพื้นที่บนผิวเม็ดทรายซึ่งจะนำไปหาพื้นที่รวมที่ใช้ในการตกตะกอนนั้นสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{พื้นที่บนผิวเม็ดทราย} = \frac{6}{d} (1 - p) \text{ เมตร}^2 / \text{เมตร}^3$$

โดยที่ p = ค่าความพรุนของมวลทรายกรองใน 1 ลูกบาศก์เมตร

d = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทราย (เมตร)

จะได้พื้นที่บนผิวเม็ดทรายเป็นตารางเมตร ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง สมมติว่าทรายกรองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร มีค่าความพรุน 0.4 จะมีพื้นที่บนผิวเม็ดทราย รวม 4,500 ตารางเมตร ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง และถ้าทรายกรองมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเมตร มีความหนาของชั้นทรายกรอง 1.2 เมตร จะมีพื้นที่บนผิวเม็ดทรายรวม 5,400 ตารางเมตร เป็นต้น

ในการตกตะกอนบนผิวเม็ดทรายนั้น พื้นที่บนผิวเม็ดทรายที่มีผลต่อการตกตะกอนมีเฉพาะผิวด้านบนที่หันขึ้น ซึ่งไม่สัมผัสกับเม็ดทรายอื่น และไม่ถูกรบกวนด้วยการไหลของน้ำ ประมาณว่ามีค่าเพียง 300 ตารางเมตร ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง

สำหรับประสิทธิภาพของการตกตะกอนบนเม็ดทรายนั้น ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการกรองและความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอย สำหรับความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยนั้น สโตคส์ (STOKES, 1845, 1851) ได้กำหนดสมการไว้คือ

$$s = \frac{1}{18} \frac{g}{\nu} \frac{\Delta\rho}{\rho} d^2$$

โดยที่ s = ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอย (ซม./วินาที) (setting velocity of suspended particle) ($< 5\,(10)^{-6}$)

g = ค่าความคงที่ของความโน้มถ่วง 9.81 ซม./วินาที^{2} (GRAVITY CONSTANT)

ν = ความหนืดของไหลที่ต้องการกรอง (ซม./วินาที) (KINEMATIC VISCOSITY OF THE FLUID)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (กรัม/ซม.^{3}) (MASS DENSITY OF WATER)

$\rho + \Delta\rho$ = ความหนาแน่นของน้ำที่มีอนุภาคแขวนลอย (กรัม/ซม.^{3}) (MASS DENSITY OF SUSPENDED MATTER)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแขวนลอย (ซม.) (DIAMETER OF THE SPHERICAL PARTICLE)

สมมติให้ $\frac{\Delta\rho}{\rho} \simeq 0.1$ สำหรับอนุภาคแขวนลอยซึ่งประกอบด้วยน้ำ 95% จะทำให้

$$s = (0.0416)10^6 d^2$$

$$(0.0416)10^6 d^2 > (5)10^{-6}$$

$$d > (11)10^{-6} \text{ m}$$

$$> 11 \text{ ไมครอน}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำหรับอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กและเบากว่านี้จะถูกกำจัดด้วยวิธีนี้เพียงบางส่วน โดยการตกตะกอนในชั้นทรายที่ลึกลงไป แต่สำหรับสารลอยแขวนนั้นไม่สามารถจะแยกออกได้โดยวิธีนี้

ต่อมา ไอวีส (IVES,1962) ได้พบว่าการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ ซึ่งจะมีผลทำให้ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้น และทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ตกตะกอนอยู่ก่อนนั้นเกิดการปั่นป่วนขึ้นได้ ต่อมาก็จะหลุดติดไปกับน้ำอีก และถูกพาไปยังชั้นทรายชั้นถัดไป ทำนองเดียวกัน มินท์ซ (MINTZ, 1951) ก็ได้พบขบวนการนี้เช่นกัน และผลสุดท้ายก็พบว่า อนุภาคแขวนลอยที่ตกตะกอนไปแล้วนั้นหลุดออกมาปนกับน้ำตรงทางออก เมื่อถึงระยะนี้ก็จำเป็นจะต้องล้างเครื่องกรองใหม่ก่อนจะเริ่มทำการกรองต่อไป

2.2.3 การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (INERTIAL IMPACTION)

เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวที่มีอนุภาคต่าง ๆ ที่มีความหนาแน่นสูงประกอบอยู่ เมื่อไหลไปกระทบโดยตรงกับผิวของทรายกรอง ของเหลวก็จะเบี่ยงเบนตัวเองให้พ้นจากเม็ดทรายที่ขวางอยู่นั้น จากหลักความเฉื่อยสารที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าจะเปลี่ยนทิศทางได้เร็วกว่าสารที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้น น้ำที่อยู่ในของเหลวจะเปลี่ยนทิศทางได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงกว่าก็จะทำให้อนุภาคดังกล่าวเกิดความเฉลี่ยเปลี่ยนทิศทางไม่ทัน และจะติดอยู่กับผิวของทรายชั้นกรองในที่สุด ทั้งนี้ มีองค์ประกอบที่สำคัญหลายอย่างด้วยกัน เช่น ตำแหน่งของอนุภาคความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลวกับอนุภาค มุมของการตกกระทบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วในการไหลเป็นตัวกลางที่สำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาค เนื่องจากความเฉื่อยนี้ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามหลักของแรงไฮโดรลิค (HYDRAULIC LOADINGS) แต่หลักดังกล่าวนี้สังเกตเห็นได้ยาก

สำหรับปรากฏการณ์ที่กำจัดอนุภาคที่เกิดจากความเฉื่อยเนื่องจากการกระทบกันนี้ได้ผลไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้ เนื่องจากความหนืดของน้ำทำให้อิทธิพลต่อการกระทบมาก หากความหนืดของน้ำหรือของเหลวที่ต้องการกรองมีค่าสูง จะทำให้ผลจากความเฉื่อย

เนื่องจากการกระทบกันลดลงมาก ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการกรองลดลงด้วย

2.2.4 การเคลื่อนที่แบบราวเนี่ยน (BROWNIAN MOVEMENT)

เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลอย่างไม่คงตัวของของเหลว ซึ่งจะทำให้อนุภาคเล็ก ๆ แยกตัวจากสารแขวนลอย (COLLOIDAL PARTICLE)และจะทำให้สารแขวนลอยนี้เบี่ยงเบนไปจากแนวของกระแสน้ำจนเข้าไปสัมผัสกับผิวทรายกรอง ในการคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้น จากสมการของ ไอน์สไตน์ (EINSTEIN)สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีลักษณะกลม ได้กำหนดสมการดังนี้

$$\bar{X} = \frac{2\ kTt}{3\ fD}^{1/2}$$

โดยที่ $\bar{X}$ = ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของอนุภาค (ซม.)
(MEAN TRANSLATION OF A PARTICLE)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ซม.)
(DIAMETER OF PARTICLE)

t = เวลา (วินาที) (TIME)

k = ค่าคงที่โบลซมานน์ (BOLTZMANN CONSTANT)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน (KELVIN))
(ABSOLUTE TEMPERATURE)

f = ค่าความหนืดของของไหล (ซม./วินาที) (FLUID VISCOSITY)

จากสมการดังกล่าว สามารถสรุปผลได้ว่า การเคลื่อนที่แบบราวเนี่ยน (BROWNIAN MOVEMENT)นี้จะมีผลเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอนลงไป และเป็นขบวนการที่ไม่มีความสำคัญนักสำหรับการกรองแบบเร็ว

2.2.5 โอกาสที่เกิดการสัมผัสกัน (CHANCE OF CONTACT)

เกิดจากอนุภาคแขวนลอยมีโอกาสที่จะสัมผัสกันเองหรือสัมผัสกับตัวกลางอันเนื่องมาจากการไหลผ่านส่วนที่คับแคบ โดยสไตน์ (STEIN,1964)และเกรซ (GRACE,

1956) ได้ศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับขบวนการนี้และพบว่าค่าความน่าจะเป็นไปได้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกมาจากของไหลนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังที่สองของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารแขวนลอย และเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ากำลังที่สามของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกลาง

$$Ps \propto D^2 , \quad Ps \propto \frac{1}{d^3}$$

ในเมื่อ Ps= ค่าความเป็นไปได้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอย

D = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแขวนลอย (ซม.)

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทราย (ซม.)

2.2.6 การแพร่กระจาย (DIFFUSION)

เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ที่ว่าสารละลายจะพยายามแพร่กระจายไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า และสำหรับอนุภาคแขวนลอยเล็ก ๆ ในของเหลวนั้นจะมีลักษณะการแพร่กระจายเช่นเดียวกัน จากการทดลองของฮันเตอร์ (HUNTER, R.J.) และอเลกซานเดอร์ (ALEXANDER, A.E.) พบว่าอนุภาคของดินจะกระจายตัวไปตามทิศทางการไหลของน้ำ จึงเป็นไปได้ที่อนุภาคเหล่านี้จะไปเพิ่มความเข้มข้นในน้ำที่ผ่านไป ซึ่งจำเป็นต้องสังเกตดูสำหรับเครื่องกรองเร็ว และเกรซ (GRACE,1956) ได้สนับสนุนปรากฏการณ์นี้ด้วย

2.2.7 แรงแวน เดอ วาลส์ (VAN DER WAALS FORCES)

มีแรงหลายชนิดที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดหรือผลักกันของโมเลกุล แต่ที่มีกำลังมากที่สุดคือแรง (VAN DER WAALS) ซึ่งแรงนี้แปรผันกลับกับกำลังที่เจ็ดของระยะห่างระหว่างโมเลกุลซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลว สำหรับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน (COHESIVE FORCES) เป็นอีกแรงหนึ่งที่ช่วยเสริม ดังนั้น เมื่อรวมแรงทั้งหมดแล้วก็จะได้ค่าของแรงแปรผกผันกลับกับกำลังสามของระยะทางระหว่างโมเลกุล แต่เนื่องจากอิทธิพลของแรงเหล่านี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงไม่ใช่เป็นขบวนการสำคัญในการขจัดความขุ่นหรืออนุภาคแขวนลอย แต่จะเป็นแรงสำคัญในการควบคุมสารแขวนลอยไว้ไม่ให้แยกตัวออกจากกันได้ง่าย

2.2.8 อิทธิพลจากประจุไฟฟ้า (ELECTROKINETIC EFFECTS)

เป็นผลเนื่องมาจากการแตกตัวของประจุไฟฟ้า (IONIZATION) และการดูดกลืนของประจุไฟฟ้า (ABSORPTION) ของอนุภาคลอยแขวนที่แพร่กระจายตัวในน้ำแล้วเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่ผิวของมัน ต่อมาก็จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ กันจะอยู่รอบ ๆ ชั้นแรก การกระทบกันของประจุไฟฟ้าที่หยุดนิ่งระหว่างอนุภาคชนิดเดียวกันที่อยู่ชั้นนอก จะทำให้อนุภาคแผ่กระจายได้ แรงกระทบกันจะมีผลอย่างมากสำหรับประจุไฟฟ้าที่อยู่ในของเหลว ประจุไฟฟ้าที่ผิวของตัวกรอง อาจจะเป็นตัวชี้บ่งถึงความคงตัวของอนุภาคลอยแขวน ซึ่งจากการทดลองพบว่า การขจัดอนุภาคแขวนลอยจะดีขึ้นถ้าประจุต่างกัน ซึ่งอาวแมนและบาวน์แมน (ONLMAN & BAUMANN, 1963) ได้ทดลองโดยเขาทำงานเกี่ยวกับ DIATOMITE FILTERS และพบว่าประจุบน DIATOMITE อาจเปลี่ยนกลับได้โดยการใช้วัตถุที่มีประจุบางชนิด

คลิสบี้และบาวน์แมน (CLEASBY & BAUMANN, 1961) พบว่าอนุภาคเล็ก ๆ ของ FERRIC FLOC จะถูกกำจัดได้ดีกว่าพวกอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นการสนับสนุนทฤษฎีของอิทธิพลจากประจุไฟฟ้า (ELECTROKINETIC EFFECT)

2.3 เครื่องกรองน้ำไหลลงแบบใช้ทราย

เครื่องกรองน้ำไหลลงแบบใช้ทรายเป็นเครื่องกรองที่ให้น้ำไหลผ่านจากข้างบนลงสู่ข้างล่าง ซึ่งสามารถแยกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะการไหลของน้ำได้สองประเภท คือ

1. เครื่องกรองช้า (Slow sand filter)
2. เครื่องกรองเร็ว (Rapid sand filter)

2.3.1 เครื่องกรองช้า (Slow sand filter)

เป็นเครื่องกรองน้ำแบบเก่าที่สุดซึ่งใช้ในขบวนการผลิตน้ำเพื่อสาธารณูปโภค สร้างขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1829 โดยเจมส์ ซิมสัน (James Simpson) ชาวอังกฤษ ซึ่งขณะนั้นทำงานอยู่ในบริษัทเชลซี วอเตอร์ (Chelsea Water Company) ในเมืองลอนดอน ประเทศอังกฤษ วิธีการคือ นำน้ำไหลเข้าทางตอนบนของเครื่องกรอง

Works	Surface area of filter (m^2)	Number of filters	Depth of media (m)	Type and grade of media	Loading (m^3/m^2 d)	BOD (mg/l)	Suspended solids (mg/l)	Ammoniacal nitrogen (mg/l)	Oxidized nitrogen (mg/l)	Dissolved oxygen (mg/l)	Comments
						In Out	In Out	In Out	In Out	In Out	
Works D ..	5	4	0·73	0·23 m sand 0·5 m graded gravel 20–80 mm	1·8	18→11	38→15	11·4→9·9	21·5→21·0	—	62 per cent reduction in *Coli-aerogenes*
Works E	102	2	0·46	0·23 m sand 0·23 m graded gravel 20–50 mm	3·1	15→7	39→12	5·7→4·2	22·2→23·1	—	38 per cent reduction in *Coli-aerogenes*
Works A ..	—	—	—	—	1·8	20→12	40→16	13→11·7	19·2→18·7	—	
Works B	—	—	—	—	2·9	16→9	37→14	6·3→5·0	19·7→20·4	—	
Basildon ..	240	4	0·60	0·15 m water filtration sand 0·15 m gravel 0·30 m pea shingle	Up to 10	21→14	42→28	5·3→4·4		—	
	134	4	0·59	0·39 m sand 0·2 m pea gravel	1·7–3·3	12→7	23→11	4·5→3·9	34·1→32·8	4·7→3·9	73 per cent reduction in *Esch.coli*, sand replenished yearly

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการทำงานของเครื่องกรองช้า (Manuals of British Practice in Water Pollution Control)

และปล่อยให้ไหลผ่านชั้นทรายด้วยความเร็วต่ำคือประมาณ0.03 x 10^{-3} เมตร/วินาที (2.59 เมตร/วัน) หรือถ้าคิดเป็นปริมาตรของน้ำที่ได้จากการกรองจะมีค่าประมาณ 2.59 m^3/m^2 - day สำหรับทรายกรองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.15 - 0.35 มม. ซึ่งจะทำให้สารแขวนลอย(Suspended Solids) และสารลอยแขวน (Colloidal matters) ที่อยู่ในน้ำถูกขังไว้ที่ชั้นทรายตอนบน ซึ่งชั้นทรายนี้มีความหนาประมาณ 3.0 - 4.0 ฟุต และถัดจากชั้นทรายลงมาเป็นชั้นหินหนาประมาณ 1 ฟุตรองรับอยู่ สารแขวนลอยขนาดใหญ่จะถูกขังไว้ตอนบนของชั้นทรายซึ่งปกคลุมด้วยเมือก (Zoogloeal Slime) เป็นส่วนใหญ่ และต่อไปจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการอุดตันซึ่งการอุดตันนี้สามารถสังเกตจากค่าระดับน้ำสูญเสีย(Head loss) ถ้ามีค่าสูงอยู่ระหว่าง 0.2-4.0ฟุต แสดงว่าเกิดการอุดตันในชั้นทราย แล้วต้องทำความสะอาดเครื่องกรองโดยการขูดลอกผิวทรายชั้นบนซึ่งมีความสกปรกปะปนอยู่ออกเสียก่อน ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลานานคือประมาณ 29 -90 วัน (BABBITT , 1962)

จากการใช้งานของเครื่องช้าตามตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าเครื่องกรองช้าสามารถทำการขจัดสารแขวนลอยได้ประมาณ 60 % และสามารถกำจัดอีโคไล (E. Coli) ได้ประมาณ 40 - 50 %

2.3.2 <u>เครื่องกรองเร็ว</u> (Rapid sand filter)

เครื่องกรองเร็วนี้ถูกสร้างครั้งแรกในปี ค.ศ. 1885 ที่ซอมเมอร์วิลล์ มลรัฐนิวเจอร์ซี่ (Somerville,New Jersey) สหรัฐอเมริกา สำหรับทวีปยุโรปเริ่มใช้ที่เมืองซูริค ประเทศสวิสเซอร์แลนด์ (Zurich, Switzerland) เมื่อปี ค.ศ.1895

เครื่องกรองเร็วประกอบด้วยชั้นทรายและชั้นหิน เช่นเดียวกับเครื่องกรองช้า แต่อัตราการกรองของเครื่องกรองชนิดนี้สูงกว่าเครื่องกรองช้า 40 - 50 เท่า คือมีอัตราการกรองประมาณ 2.3 x 10^{-3} เมตร/วินาที (198 เมตร/วัน) หรือถ้าคิดเป็นปริมาตรของน้ำที่ได้จากการกรองจะมีค่าประมาณ 200 m^3 / m^2 - day โดยทรายที่ใช้ในการกรองควรมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.5 -2.0มม. เนื่องจากอัตราการกรองของเครื่องกรองชนิดนี้สูงกว่าเครื่องกรองช้า จึงทำให้เวลาในการใช้เครื่องกรองชนิดนี้สั้นคือประมาณ 1-7 วัน (HARDENBERGH, 1970)

Works	Surface area of filter (m^2)	Number of filters	Depth of media (m)	Type and grade of media	Loading (m^3/m^2 d)	BOD (mg/l)		Suspended solids (mg/l)		Ammoniacal nitrogen (mg/l)		Oxidized nitrogen (mg/l)		Dissolved oxygen (mg/l)	
						In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
Coventry	101	6	0·61	0·6–1·0 mm sand	120	18	→7	21	→8	8	→7	27	→26	7·6	→3·6
Middle Lee Regional Drainage Scheme	30	4	1·07	Coarse sand and pebbles	175	5	→3	10	→5	0·2	→0·1	33	→33	—	
Luton	19·5	9	1·08	0·20 m graded gravel 3–13mm 0·88 m sand 0·9–1·7 mm	86	18	→6	30	→4	2·6	→2·2	20	→20	—	
	19·5	6	1·08	As above	Up to 240	13	→7	15	→4	~6·5	→0·9	—		—	
	—	—	—	—	100	→230	~50% removal	~72% removal		—		—		—	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงผลการทำงานของเครื่องกรองเร็วแบบไหลลง (Manuals of British Practice in Water Pollution Control)

ในการล้างเครื่องกรองเร็วไม่สามารถใช้วิธีการขูดลอกเอาผิวของทรายชั้นบนออกดังเช่นกระทำในเครื่องกรองช้า เพราะสิ่งสกปรกฝังลึกลงไปในชั้นทรายจึงต้องใช้วิธีการล้างเครื่องกรอง โดยการกลับทิศทางการไหลของน้ำ (Back wash) ซึ่งจะทำให้สิ่งสกปรกที่ฝังตัวอยู่ในชั้นทรายขยับตัวและลอยขึ้นไปตามทิศทางการไหลของน้ำที่ใช้ล้างไหลล้นออกทางตอนบนของเครื่องกรอง

จากการใช้งานของเครื่องกรองเร็วตามตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าเครื่องกรองเร็วสามารถดักสารแขวนลอยได้สูงถึง 80 % และลดค่า บี โอ ดี (B.O.D) ได้ถึง 70 % แต่ความสามารถในการกำจัดพวกแบคทีเรียทำได้เพียงบางส่วนเท่านั้น

2.4 เครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้น (Rapid sand upflow filter)

ในการใช้เครื่องกรองเร็วแบบไหลลง เวลาทำความสะอาดเครื่องกรอง จะทำการกลับทิศทางการไหลของน้ำ โดยให้มีการลอยตัวของทรายกรองประมาณ50 % จึงทำให้หลังการล้างเครื่องกรองชั้นทรายจะเรียงตัวโดยทรายขนาดละเอียดอยู่ตอนบนของชั้นกรอง และทรายขนาดใหญ่จะอยู่บริเวณตอนล่างของชั้นกรอง เมื่อนำมาใช้กรองใหม่จะทำให้สารแขวนลอยเกือบทั้งหมดถูกดักไว้ทางตอนบนของชั้นกรอง ซึ่งเป็นชั้นของทรายขนาดละเอียด ส่วนสารแขวนลอยที่มีขนาดละเอียดซึ่งไม่สามารถดักได้ในตอนบนของชั้นกรอง จะไหลลงมาทางตอนล่างของชั้นทรายหลุดออกไป เนื่องจากชั้นทรายตอนล่างมีขนาดใหญ่กว่าทางตอนบน เมื่อสารแขวนลอยส่วนใหญ่ถูกดักไว้ทางตอนบนของชั้นทรายทำให้เครื่องกรองแบบนี้ไม่สามารถใช้ชั้นกรองในส่วนล่างได้ ทำให้เวลาในการใช้เครื่องกรองสั้น เนื่องจากเกิดการอุดตันในชั้นกรองตอนบน

เพื่อแก้ไขปัญหานี้ จึงได้คิดวิธีกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นมาใช้ โดยส่งน้ำที่ต้องการกรองเข้าทางด้านล่างโดยใช้ความดันช่วย เพื่อให้น้ำไหลผ่านตัวกรองขึ้นมา และนำออกมาใช้ทางด้านบนของเครื่องกรอง ลักษณะเช่นนี้ ก็จะทำให้น้ำไหลผ่านชั้นทรายขนาดใหญ่ที่อยู่ด้านล่างก่อน แล้วจึงมาผ่านชั้นทรายขนาดเล็กที่อยู่ด้านบน ซึ่งจะทำให้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ถูกดักไว้ที่ทรายชั้นล่าง และสารแขวนลอยขนาดเล็กถูกดักไว้ที่ทรายชั้นบนขึ้นมา ซึ่งเป็นทรายขนาดเล็ก ในกรณีเช่นนี้ สารแขวนลอยก็จะถูกดักกระจายอยู่ทั่วไป

ในชั้นทราย การอุดตันของเครื่องกรองก็เกิดขึ้นได้ช้าลง ทำให้อายุการใช้งานในช่วงการล้างครั้งหนึ่ง ยาวนานขึ้นกว่าการใช้เครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลลง ที่ใช้การล้างวิธีเดียวกันนี้

ในการล้างเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้ก็กระทำโดยเพิ่มอัตราการไหลของน้ำให้สูงขึ้นกว่าอัตราการไหลของน้ำแบบธรรมดา เพื่อให้เม็ดทรายถูกยกตัวขึ้นและเกิดการปั่นป่วน ทำให้สิ่งสกปรกที่ถูกดักไว้นั้นหลุดไปตามน้ำแล้วปล่อยทิ้งไป (MINTZ, 1951)

เครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้ ปรากฏว่านิยมใช้กันมากในประเทศรัสเซียและประเทศเนเธอร์แลนด์ สำหรับในประเทศสหรัฐอเมริกาไม่ค่อยนิยมใช้ ในประเทศรัสเซียนั้นมักจะใช้เครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นเพื่อกรองน้ำที่มีสี โดยก่อนส่งเข้าเครื่องกรองก็จะเติมสารเคมีเพื่อทำให้ตกตะกอน (Chemical Coagulation)ก่อนชั้นหนึ่ง สำหรับชั้นทรายที่ใช้นั้นจะมีความสูงประมาณ70 นิ้ว ถึง 80 นิ้ว และขนาดของเม็ดทรายที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 0.5 มิลลิเมตร ถึง 2.0 มิลลิเมตร(MINTZ, 1960)

มีกรณีที่น่าสนใจเกี่ยวกับเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้น คือ กรณีที่ชั้นทรายเกิดมีการแตกและแยกออก ทำให้เกิดช่องทางไหลของน้ำขนาดเล็กขึ้นชั่วขณะหนึ่ง ซึ่งจะทำให้สิ่งสกปรกที่เก็บอยู่ในชั้นทรายเคลื่อนหลุดออกมาและปนไปกับน้ำในทางไหลนั้นจึงทำให้น้ำขุ่น และประสิทธิภาพการกรองก็จะลดลง ปรากฏการณ์นี้จะสังเกตเห็นได้จากความขุ่นของน้ำที่ผิวบนของเครื่องกรอง และค่าระดับน้ำสูญเสียของเครื่องกรอง (Filter head logs) ซึ่งจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นสักครู่ ปรากฏการณ์นี้จะหายไปเอง และค่าระดับน้ำสูญเสียของเครื่องกรองก็จะเพิ่มขึ้นอีกจากการทดลอง (MINTZ, 1960) พอจะสรุปเป็นสาเหตุหลักได้ 2 ประการคือ

1. เกิดจากการล้างเครื่องกรองไม่พอเพียง ทำให้เครื่องกรองยังมีสิ่งสกปรกอยู่ และเมื่อนำไปใช้งานใหม่ความดันน้ำในตอนเริ่มเดินเครื่องสูบน้ำดิบเข้าสู่เครื่องกรองจะมีค่าสูง ทำให้อนุภาคเล็ก ๆ ที่จับตัวกัน (Floc) แตกออกเป็นเม็ดเล็ก ๆ หรืออาจจะทำให้เกิดแรงเฉือนมากพอที่จะทำให้ผิวทรายตอนล่างแตกออกเป็นช่องน้ำเล็ก ๆ ชั่วขณะหนึ่ง อนุภาคเล็ก ๆ ที่จับตัวกัน (Floc) จึงแทรกผ่านออกมาได้

2. เกิดจากการล้างเครื่องกรองน้ำใช้ทรายโดยวิธีให้น้ำไหลย้อนขึ้น (Backwash) ซึ่งบางครั้งไม่ได้ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนของวิธีล้างเครื่องกรองทราย โดยปกติการล้างเครื่องกรองทรายโดยวิธีให้น้ำไหลย้อนขึ้นนี้จะเป่าอากาศเข้าไปช่วยด้วย แต่ในขณะที่หยุดล้างถ้าหยุดเป่าอากาศภายหลังจากหยุดสูบน้ำ หรือหยุดเป่าอากาศพร้อม ๆ กับหยุดสูบน้ำ อากาศที่เป่าเข้าไปในช่วงหลังนี้ อาจจะทำให้เกิดช่องว่าง (Pore) ขึ้นในชั้นทรายเป็นช่องใหญ่ ซึ่งสิ่งสกปรกก็จะแทรกออกมาตามช่องดังกล่าวได้

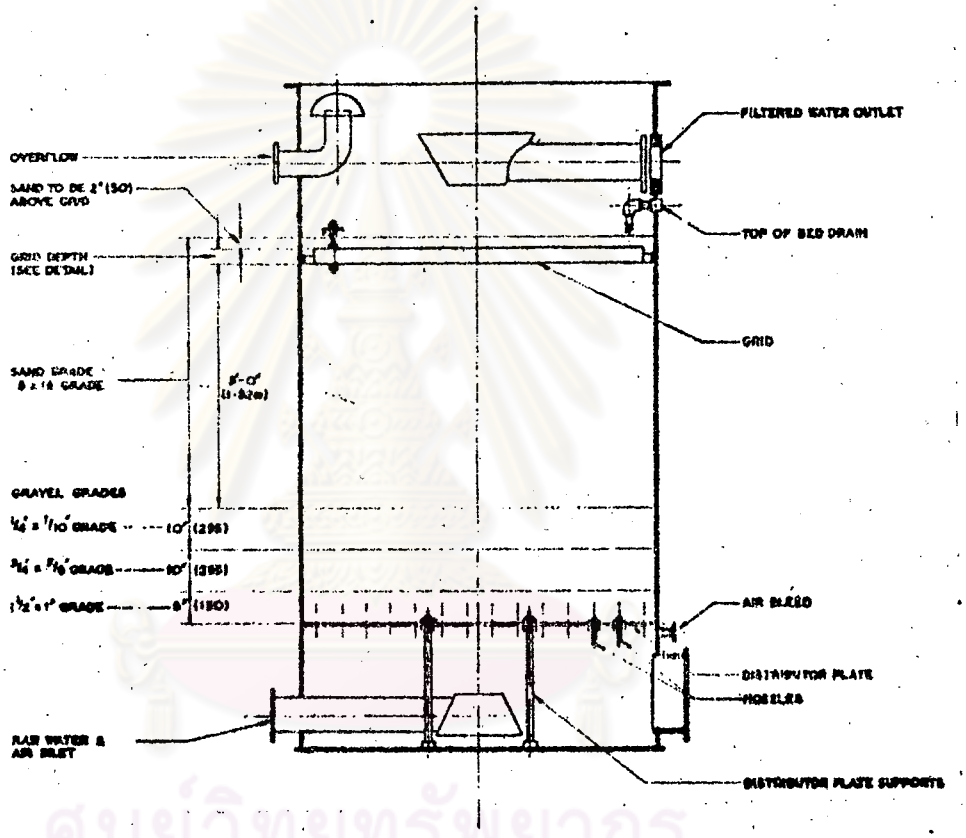
ในการล้างเครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้นนี้ นิยมใช้อากาศ (Air scour) เป่าเข้าไปด้วย เพื่อทำให้ตัวกรองเกิดปั่นป่วน และสิ่งสกปรกที่ตัวกรองดักไว้จะหลุดออกมาได้ง่าย วิธีการดังกล่าวนี้ปรากฏว่ามีใช้กันมากในประเทศฝรั่งเศส และประเทศในแถบอเมริกาตอนเหนือ ในการเป่าอากาศเข้าช่วยในการล้างเครื่องกรองนั้น จะต้องใช้ความเร็วในการล้างที่พอเหมาะ เพื่อไม่ให้ทรายซึ่งเป็นตัวกรองขยายตัวมากจนเกินไป ซึ่งประมาณว่าขณะที่ใช้อากาศเข้าช่วยในการล้างเครื่องกรองนั้น อัตราการไหลของน้ำล้างเครื่องกรองจะต้องไม่น้อยกว่า 2.045 แกลลอนต่อนาทีต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวกรองหนึ่งตารางฟุต (MINTZ, 1960) การล้างเครื่องกรองโดยใช้อากาศเข้าไปทำให้เกิดการปั่นป่วนก่อนแล้วสูบน้ำเข้าภายหลังนั้น ไม่ควรกระทำเพราะในขณะที่เป่าอากาศเข้าไปจะทำให้เกิดกระแสน้ำบางส่วนหมุนวนย้อนกลับ โดยมีทิศทางการไหลลงสู่เบื้องล่าง ซึ่งจะทำให้สิ่งสกปรกกลับถูกดักไว้ในชั้นทรายอีก ดังนั้น การล้างเครื่องกรองโดยวิธีนี้ ควรจะเป่าอากาศ(Air scour) และสูบน้ำล้างเข้าไปพร้อม ๆ กัน เพื่อทำให้กระแสน้ำไหลขึ้นไปเป็นทิศทางเดียว และนำสิ่งสกปรกทิ้งไปเลยไม่ย้อนกลับเข้ามาอีก ก่อนหยุดล้างเครื่องกรอง เราจะต้องหยุดเป่าอากาศก่อน ในขณะเดียวกันก็ต้องเพิ่มอัตราการใช้น้ำล้างมีปริมาณไม่น้อยกว่า 4.9 แกลลอนต่อนาทีต่อพื้นที่หน้าตัดของตัวกรองหนึ่งตารางฟุต หรืออัตราความเร็วของน้ำประมาณ 12 เมตรต่อชั่วโมง แล้วภายหลังจึงลดปริมาณน้ำลงตามลำดับเพื่อให้เม็ดทรายจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ เมื่อทรายได้เรียงตัวใหม่และหยุดน้ำล้างเครื่องกรองแล้ว เครื่องกรองก็พร้อมที่จะนำกลับไปใช้งานได้ใหม่

ในบางประเทศ เช่น ประเทศเนเธอร์แลนด์ นิยมติดแผ่นตะแกรง (Grid) ไว้ในเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้ ทั้งนี้ เพื่อป้องกันการขยับตัวของเม็ดทราย

การติดตั้งแผ่นตะแกรงจะติดไว้ที่ระยะต่ำกว่าผิวทรายตอนบนประมาณ 10 เซนติเมตร ซึ่งจะไปทำหน้าที่ยังคับให้ทรายในช่วงนั้นขยับตัวได้ยากขึ้น และก็จะทำให้ทรายในระดับที่ต่ำลงมาเคลื่อนที่ไม่ได้เลย จึงมีประโยชน์ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองเพิ่มขึ้น โดยสามารถดักสารแขวนลอยได้มากขึ้น พร้อมกันนั้นยังช่วยป้องกันการแยกตัวของชั้นทรายเนื่องจากแรงดันของน้ำ นั่นหมายถึงว่า เครื่องกรองสามารถรับภาวะการอุดตันได้มากกว่าปกติ และอายุการใช้งานในแต่ละช่วงของการล้างนั้นจะยาวนานขึ้น แผ่นตะแกรง (Grid) มีลักษณะเป็นตะแกรงเหล็กที่มีความหนาโดยมีช่องตะแกรง (Spacing of bars) กว้างประมาณ 100 ถึง 150 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรายขนาดเล็ก สำหรับการล้างเครื่องกรองทรายนั้น ก็จะล้างเมื่อระดับน้ำสูญเสียมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 เมตรถึง 2.0 เมตร และปกติจะใช้อัตราน้ำล้างเครื่องกรองประมาณ 3 ถึง 5 เปอร์เซนต์ของน้ำที่กรองได้ 1960)

เนื่องจากเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้สามารถรับปริมาณของสิ่งสกปรก (Loading) ได้มาก จึงได้ถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สาม(Tertiary waste treatment) (CARMAN, 1956) เช่น ที่เมืองลูตัน (Luton) และที่เดอะแบล็คเบิ๊ดส์-เวิกด์ (The Blackbirds Works) ในเฮิร์ทฟอร์ดเชียร์(Hertfordshire) ได้ติดตั้งเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้ ซึ่งสามารถจ่ายน้ำให้กับประชาชนได้ถึง 200,000 คน

ในการออกแบบเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้นนี้ โดยทั่วไปจะออกแบบเพื่อให้รับอัตราการกรองน้ำได้สูงสุดประมาณ 400 ลูกบาศก์เมตรต่อวันต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งตารางเมตรของตัวกรอง รูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญของเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้น ซึ่งโดยปกติตัวกรองจะเป็นทรายและหิน มีความลึกรวมกันอยู่ระหว่าง 1.50 เมตร ถึง 2.00 เมตร โดยชั้นล่างสุดจะเป็นหินขนาดใหญ่ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์-กลางอยู่ระหว่าง 40 - 50 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นประมาณ 15 เซนติเมตร ชั้นถัดขึ้นมาจะเป็นหินขนาดเล็ก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 8 - 12 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นประมาณ 25 เซนติเมตร ถัดขึ้นไปอีกจะเป็นชั้นทรายหยาบ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 2 ถึง 3 มิลลิเมตร มีความหนาของชั้นประมาณ 25 เซนติเมตร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของเครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้น (HUISMAN)

Works	Surface area of filter (m^2)	Number of filters	Depth of media (m)	Type and grade of media	Head loss when dirty (m)	Loading (m^3/m^2 d)	BOD (mg/l) In	BOD (mg/l) Out	Suspended solids (mg/l) In	Suspended solids (mg/l) Out	Ammoniacal nitrogen (mg/l) In	Ammoniacal nitrogen (mg/l) Out	Oxidized nitrogen (mg/l) In	Oxidized nitrogen (mg/l) Out	Comments
Easthampstead*	116·8	4	2·35	Sand 1–2 mm Gravel 2–3 mm Gravel 8–12 mm Gravel 40–50 mm	1·7	62·3	30	9	32	30	—	—	—	—	
Luton	19·2	12	2·1	1·5 m fine sand (0·9–1·7 mm) 0·6 m graded gravel (6–50 mm)	1·2	135	18	6	30	4	2·6	1·2	20	21	Washed automatically every 9 hours.
						106			28	3					Feed from activated-sludge plant.
						124			30	2					
						124			20	3					
						150			22	6					Feed from biological filters.
						197			27	8					
						230			30	4					Feed from activated-sludge plant.
						230			20	4					
						286			30	5					
						286			20	5					
						300			31	8					Feed from biological filters.

*Four bays, each 7·9 m × 3·95 m. Backwashing at DWF carried out every 24 h (automatic backwashing still to be commissioned). Air scour 5 min at 4·8 to 5·5 l using 48–51 m^3/min. Backwash 15 min at 16 m^3/min.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 แสดงผลการทำงานของเครื่องกรองเร็ว-แบบไหลขึ้น (Manuals of British Practice in Water Pollution Control)

และชั้นสุดท้ายบนสุดจะเป็นชั้นทรายละเอียด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 มิลลิเมตร และมีความหนาของชั้นประมาณ 1.50 เมตร

ในตารางที่ 2.3 แสดงถึงคุณลักษณะทั่วไปของการกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลขึ้น โดยสามารถกำจัดตะกอน และลดค่า บี.โอ.ดี. (Biochemical Oxygen Demand) ได้คล้ายคลึงกับเครื่องกรองน้ำใช้ทรายแบบไหลลงอย่างเร็ว

2.4.1 <u>ค่าระดับน้ำสูญเสียสูงสุดที่ยอมรับของเครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้น</u>

รูปที่ 2.4 แสดงความดันที่ระดับต่าง ๆ ในเครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้น เนื่องมาจากการใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เหมือนกันโดยตลอดในชั้นทราย จึงทำให้เส้นกราฟ $t = 0$ ไม่เป็นเส้นตรง แต่จะเป็นเส้นโค้งเว้าเข้ามา และขณะที่ชั้นทรายอุดตันเมื่อเวลา $t = t$ เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นโค้งมีรูปร่างเหมือนตัวอักษร S ซึ่งความดันในชั้นทรายที่ระยะ y จากผิวของชั้นทราย จะแสดงโดยเส้นประมีค่าเท่ากับผลรวมของน้ำหนักของทรายกรอง, น้ำหนักของน้ำระหว่างทรายกรองและน้ำหนักน้ำที่อยู่เหนือทรายกรอง ดังสมการ (ฮูซแมน (HUISMAN))

$$\sigma_S = \rho_f g (1-p) y + \rho_w g p y + \rho_w g h$$

โดยที่ σ_S = ความดันของทราย

ρ_f = ความหนาแน่นของทรายกรอง

g = อัตราเร่งของแรงดึงดูดของโลก

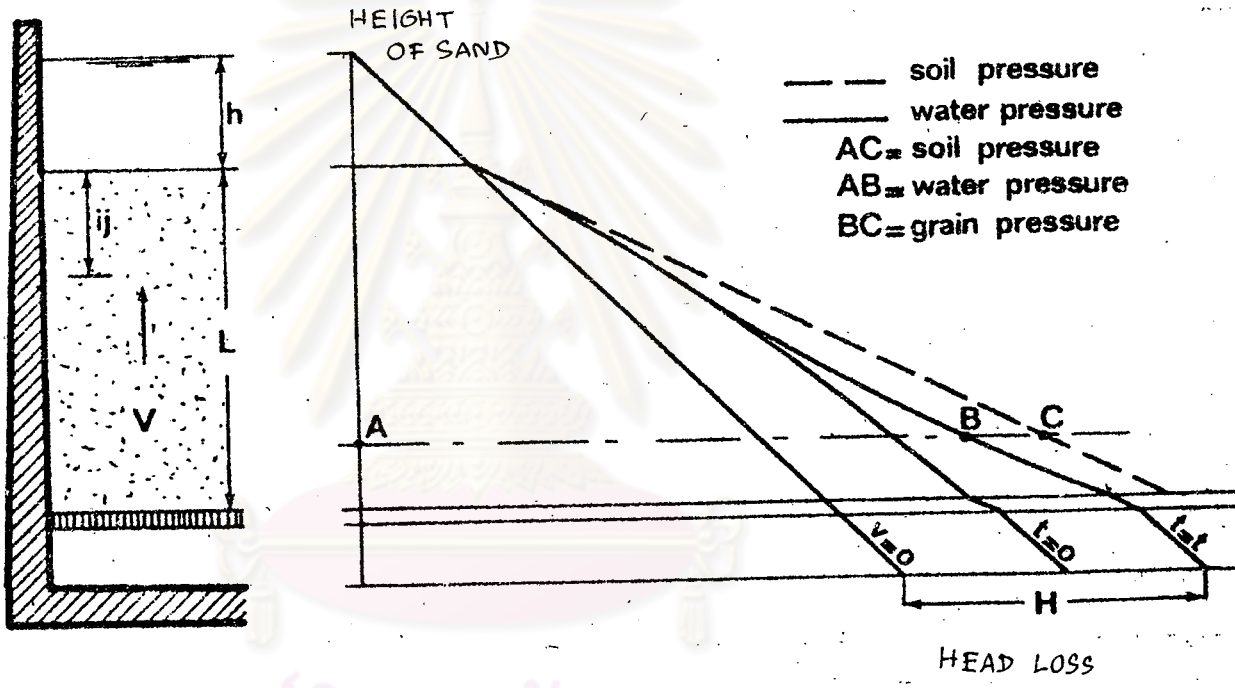
p = ช่องว่างในชั้นทราย

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

h = ระดับน้ำเหนือชั้นทราย

เกี่ยวกับหลักปฐพีกลศาสตร์ จะพบว่า ความดันรวมจะมีค่าเท่ากับผลต่างของความดันในชั้นทรายกับความดันของน้ำดังสมการ

$$\sigma_g = \sigma_S - \sigma_w$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายของความดัน
ในชั้นทรายของเครื่องกรอง-
เร็วแบบไหลขึ้น (HUISMAN)

โดยที่ σ_g = ความดันรวม

σ_s = ความดันในชั้นทราย

σ_w = ความดันของน้ำ

นอกจากนี้ยังพบว่า ความดันรวมที่เวลา t = o จะเพิ่มขึ้นตามความลึกวัดลงไปจากส่วนบนของชั้นทราย ระหว่างการกรองความดันของเครื่องกรองจะคงที่ แต่ความดันของน้ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเริ่มมีการอุดตันในชั้นทราย และเมื่อเวลา t=t ผลรวมของความดันที่ส่วนล่างสุดของชั้นทรายจะมีค่าดังสมการ

$$\sigma_g = \left\{ \rho_f g(1-p) L + \rho_w gpL + \rho_w gh \right\} - \left\{ \rho_w g(L+h) + \rho_w gH \right\}$$

โดยที่ σ_g = ความดันรวม

ρ_f = ความหนาแน่นของทรายกรอง

g = อัตราเร่งของแรงดึงดูดของโลก

p = ช่องว่างในชั้นทราย

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

L = ความสูงของชั้นทราย

h = ระดับน้ำเหนือชั้นทราย

จากสมการข้างต้น ทำให้เป็นสมการอย่างง่ายได้ว่า

$$\sigma_g = (\rho_f - \rho_w) g (1-p) L - \rho_w gH$$

โดยที่ H = ระดับน้ำสูญเสียของเครื่องกรอง

เมื่อระดับน้ำสูญเสียมีค่าสูงสุดจะทำให้ความดันรวมมีค่าเท่ากับศูนย์ ได้สมการ

$$H_m = \frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_w} (1-p) L$$

โดยที่ H_m = ค่าระดับน้ำสูญเสียสูงสุดที่ยอมรับ

ρ_f = ความหนาแน่นของทรายกรอง

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

p = ช่องว่างในชั้นทราย

L = ความสูงของชั้นทราย

หลังจากนั้น พวกตะกอนเริ่มจะหลุดลอยออกไปจากชั้นทราย ซึ่งจะทำให้น้ำที่ผ่านการกรองมีความขุ่นมากขึ้นจึงต้องทำการล้างเครื่องกรองก่อนจะใช้งานต่อไป

ถ้าทรายที่ใช้เป็นตัวกรองมีความหนาแน่น 2600 กก/ม^3 และมีความพรุน 40% เพื่อป้องกันการยกตัวขึ้นของชั้นทราย ดังนั้น ค่าของระดับน้ำสูญเสียมากที่สุดที่ยอมรับ เมื่อแทนในสมการข้างต้นจะได้ว่า

$$H_m = \frac{2600 - 1000}{1000} (1 - 0.4) L$$

$$\therefore H_m = 0.96 L$$

ดังนั้น ในการใช้เครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้นนี้ต้องควบคุมไม่ให้ค่าระดับน้ำสูญเสียสูงสุดเกินกว่า 0.96 เท่าของความสูงของชั้นทรายกรอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย