

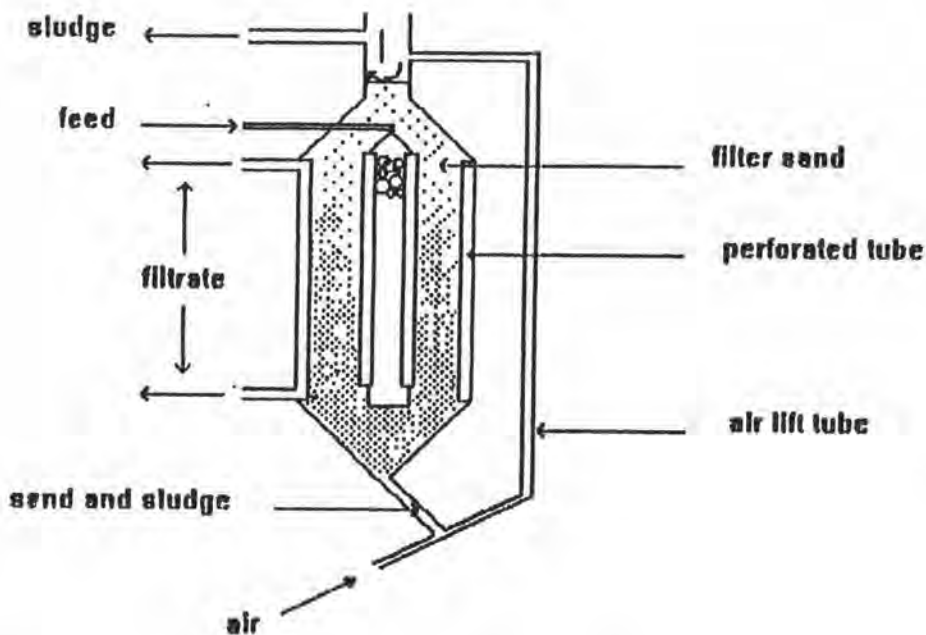


### บทที่ 3

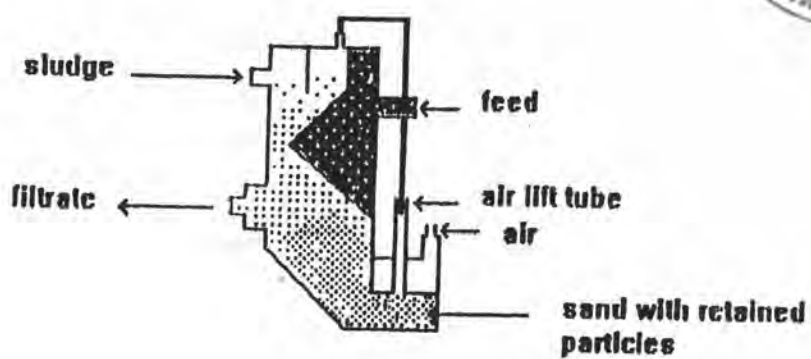
#### ทบทวนเอกสาร

การศึกษาวิจัยระบบเครื่องกรองน้ำแบบสารกรองเคลื่อนที่จำเป็นต้องเข้าใจทฤษฎีการกรอง และ ปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับระบบกรองน้ำ ซึ่งพอที่จะจำแนกออกเป็นหัวข้อใหญ่ๆ คือ ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับ ระบบกรองน้ำและกลไกของการกรองน้ำ

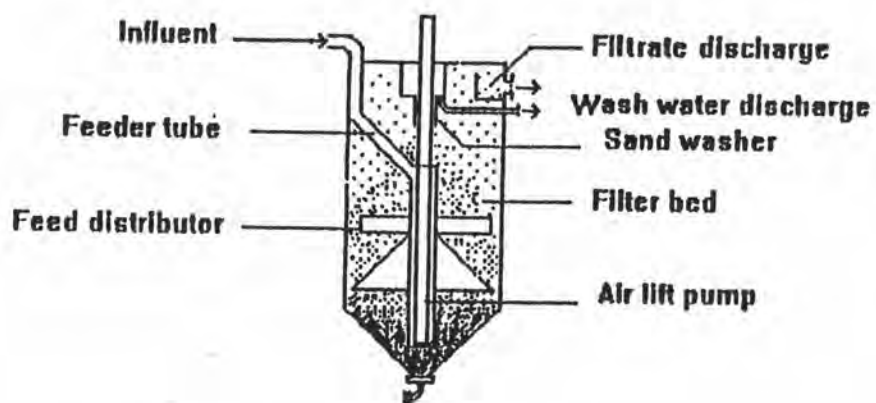
เครื่องกรองน้ำระบบสารกรองเคลื่อนที่ที่เป็นกระบวนการ การกรองเร็วที่สารกรองจะเคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ในกระบวนการกรอง และล้างย้อนอยู่ตลอดเวลา โดยสารกรองจะเคลื่อนที่จากด้านบนสู่ด้านล่าง ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกพร้อมกับดักจับความสกปรกออกไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงด้านล่างสุดของเครื่องกรอง แล้วย้อนสู่ส่วนทำความสะอาดด้านบนด้วยกระบวนการทางกล (Mechanical) อยู่ตลอดเวลา ซึ่งเครื่องกรองชนิดนี้จะใช้ได้ดีสำหรับน้ำที่มีความสกปรกสูง เนื่องจากไม่จำเป็นต้องหยุดล้างเครื่องกรองบ่อยๆเหมือน เครื่องกรองแบบสารกรองอยู่กับที่ ซึ่งเครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่นี้ได้มีการผลิตออกจำหน่ายในเชิง พาณิชย์และเป็นที่ยอมรับของท้องตลาดหลายชนิด เช่น "SIMATOR" (รูปที่ 3.1) ซึ่งใช้ได้ผลดีในการลด ความขุ่น โดยใช้สารเคมีช่วยให้เกิดการรวมอนุภาคแขวนลอยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกรองให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีผู้ผลิตเครื่องกรองน้ำระบบดังกล่าวในชื่อทางการค้าต่างๆ อีกเช่น "TENTEN" (รูปที่ 3.2) และ DYNASAND FILTER (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 เครื่องกรองทรายเคลื่อนที่ของ Simator (Water and Water Engineering, 1968)



รูปที่ 3.2 เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ของ Tenten (อ้างจาก Rahman, 1989)



รูปที่ 3.3 เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ของ DynaSand (Chemitreat, แผ่นพับ)

### 3.1 ประเภทของการกรองโดยตรง (Direct Filtration)

จากความพยายามของนักวิจัยในอดีต ในอันที่จะลดต้นทุนการผลิตลงแต่ยังสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพที่ดีได้ จึงทำให้เกิดแนวความคิดว่าน่าจะเป็นไปได้ที่จะลดขั้นตอนบางขั้นตอนลง จึงทำให้เกิดระบบผลิตน้ำประปาแบบกรองโดยตรง โดยไม่ต้องมีการกำจัดความขุ่นออกก่อนด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และตกตะกอน โดยถังน้ำใส (Clarifier) แต่อาจมีการเติมสารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าเครื่องกรองหรือไม่ก็ได้ (มันลีน ดัตตญเวศม์, 2526) ซึ่งการเติมสารเคมีในระบบการกรองโดยตรงนี้มักมีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ หรือเพื่อให้เกิดฟล็อกที่สามารถติดค้างอยู่ในชั้นกรองมากกว่าที่จะให้เกิดฟล็อกที่สามารถตกตะกอนได้ ดังนั้นการกรองโดยตรงจึงอาจจำแนกได้ดังนี้

3.1.1 การกรองโดยตรงที่ไม่ใช้สารเคมี การกรองแบบนี้จำเป็นต้องแน่ใจว่าคุณภาพของน้ำไม่แปรปรวนและต้องไม่ขุ่นจนเกินไป มิฉะนั้นแล้วจะเกิดปัญหาอุดตันเร็วและได้คุณภาพน้ำที่เลว

3.1.2 การกรองโดยตรงที่ใช้สารเคมี โดยทั่วไปการเติมสารเคมีให้กับน้ำก่อนเข้าเครื่องกรองเพื่อทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particles) ทำให้การติดติดผิวระหว่างความขุ่นกับสารกรอง หรือความขุ่นกับความขุ่นดีขึ้น โดยชั้นกรองจะช่วยเพิ่มอัตราสัมผัส และยังบังคับให้อนุภาคต่างๆเคลื่อนที่เข้ามาชิดติดกันด้วย นั่นคือจะเกิดการชนสัมผัส และเกาะติดกันระหว่างความขุ่นกับสารกรอง และความขุ่นกับความขุ่น แล้วติดค้างอยู่ภายในชั้นสารกรอง ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การกรองสัมผัส (Flocculation - Filtration) แต่เนื่องจากช่องว่างภายในชั้นกรองมีจำกัดดังนั้นหากน้ำดิบมีความขุ่นสูงจะทำให้เครื่องกรองอุดตันเร็ว นอกจากนี้ Breland & Cleasby (อ้างถึงใน ปรีชา แสงพิสิทธิ์, 2531) รายงานว่าสำหรับระบบการกรองตรง โดยทั่วไปพบว่าปริมาณสารสัมผัสที่เหมาะสมที่ใช้จะอยู่ในช่วง 5-10 มล./ลิตร แต่อาจจำเป็นต้องใช้ในปริมาณสูงถ้าใช้กับน้ำที่มีสี และหากใช้โพลีเมอร์เป็นโคแอกกูแลนท์อาจใช้ในช่วงปริมาณ 0.05-1.0 มก./ลิตร หรืออาจใช้น้อยกว่านี้ถ้าใช้ร่วมกับสารสัมผัส

### 3.2 กระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบการกรองโดยตรง

การกรองโดยตรงประกอบไปด้วยกระบวนการที่สำคัญ 2 กระบวนการต่อเนื่องกันคือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน และ กระบวนการกรอง

3.2.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน ประกอบไปด้วยขั้นตอนที่สำคัญ 2 ขั้นตอนคือ การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ และการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกัน (Transport of Colloidal Particles) ซึ่งการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์สามารถทำได้ โดยการเติมสารโคแอกกูแลนท์ ภายใต้สภาพที่น้ำมีความปั่นป่วนอย่างรุนแรง Kawamura(1975) รายงานว่าแฟคเตอร์ที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการโคแอกกูเลชัน คือ ชนิดและปริมาณของสารโคแอกกูแลนท์เอด ที่ใช้สำหรับ

การทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วมีโอกาสสัมผัสและรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งในขณะนี้ยังมีความคิดเห็นขัดแย้งกันอยู่ในกลุ่มนักวิชาการ ว่าระบบการกรองโดยตรงสามารถตัดขั้นตอนการกวนช้าลงได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการอื่นๆ ในระบบแต่อย่างใด นอกจากนี้ Adin & Rebhun ได้ทดสอบให้เห็นว่าระบบการกรอง โดยตรงสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพดีได้แม้จะไม่มีหน่วยการกวนช้า แต่ Nonsvit และ Treweek รายงานว่า หน่วยการกวนช้าเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการกรองโดยตรง เพื่อให้สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพตามต้องการได้ ซึ่งขัดแย้งกันอย่างสิ้นเชิง หรือแม้แต่ระยะเวลาที่เหมาะสมในการกวนช้า สำหรับระบบการกรองโดยตรงที่ทำการวิจัยกันมาก็ยังได้ผลการวิจัยที่แตกต่างกัน Hutchison รายงานว่าระยะเวลาการกวนช้าที่มากกว่า 4.3 นาที จะเพิ่มโอกาสไหลลัดทางของความขุ่น Sweeney & Prendiville รายงานว่าระยะเวลาการกวนช้าในฤดูร้อนควรอยู่ในช่วง 10 นาทีและ 3 นาที ในฤดูหนาว Hutchison & Foley รายงานว่าระยะเวลาการกวนช้าควรมากกว่า 3.5 นาทีเพื่อป้องกันการเกิดฟล็อก (Floc) ภายหลัง แต่น้อยกว่า 10 นาที เพื่อป้องกันระยะเวลาในการกวนช้าระหว่าง 3 ถึง 26 นาที ไม่มีผลต่อคุณภาพน้ำที่ผลิตได้ นอกจากนี้ Treweek พบว่าที่ความเร็วเกรเดียนต์ 100 วินาที<sup>-1</sup> ระยะเวลาการกวนช้าที่น้อยกว่า 7 นาทีจะไม่เพียงพอสำหรับการรวมตัวของอนุภาคความขุ่นภายในชั้นสารกรอง

3.2.2 กระบวนการกรอง กระบวนการกรองเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการทำความสะอาดน้ำ โดยเครื่องกรองจะทำหน้าที่เก็บกักฟล็อก หรือสารแขวนลอยที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วไว้ภายในชั้นกรองด้วยกลไกทางกายภาพ และเคมี ดังนั้นสารแขวนลอยต่างๆ อาทิเช่น ตะกอนเบา ดิน ตะกอน ดินเหนียว ตะกอนของเหล็ก และแมงกานีส อนุภาคคอลลอยด์ สาหร่ายรวมทั้งแบคทีเรียจะถูกกักอยู่ในหน่วยนี้และน้ำที่ผ่านการกรองแล้ว จึงนับว่าเป็นน้ำที่มีความสะอาดทางกายภาพเกือบสมบูรณ์

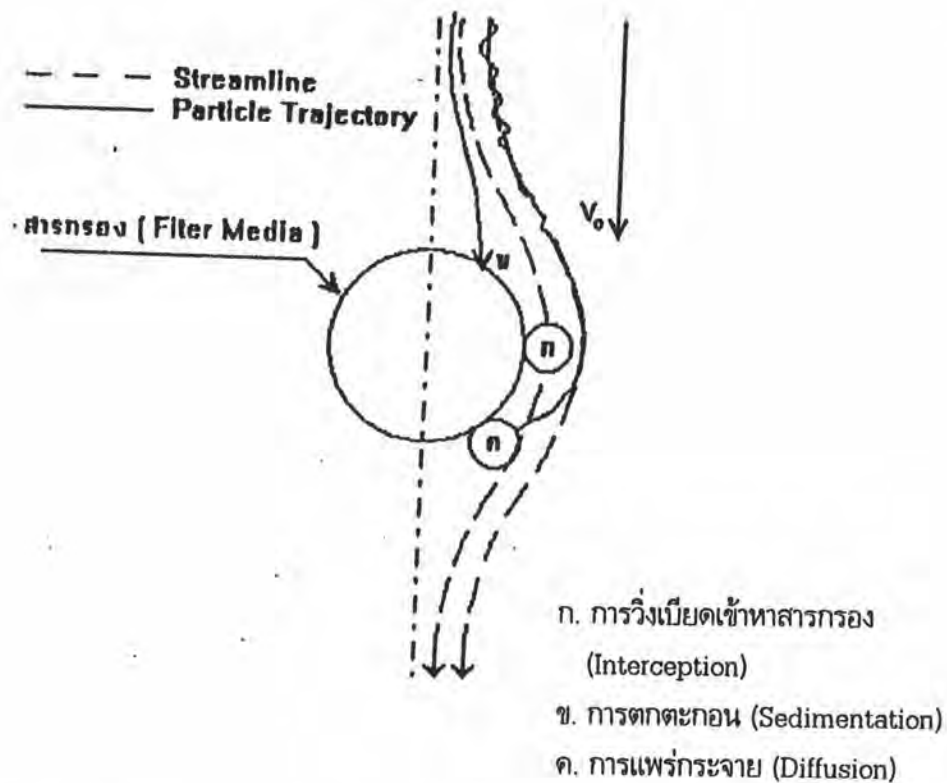
กระบวนการกรองจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการทำงานที่ต่อเนื่องกันสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย และขั้นตอนการจับสารแขวนลอย ซึ่งการทำงานดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ดีเพียงไรขึ้นอยู่กับการเตรียมน้ำดิบก่อนกรอง หรือกระบวนการโคแอกกูเลชัน รวมไปถึงการเลือกใช้ชนิด และรูปแบบของเครื่องกรองขนาดและความหนาของชั้นสารกรอง อัตราการกรอง การล้างย้อน และระยะเวลาการกรองที่ยาวนานพอ

เมื่อเปรียบเทียบระบบการกรองโดยตรงกับระบบผลิตน้ำประปาแบบทั่วไป จะเห็นว่าระบบนี้มีข้อดีในด้านการประหยัดพื้นที่ ค่าก่อสร้าง ค่าควบคุมงาน ค่าบำรุงรักษา ค่าสารเคมี รวมทั้งยังลดปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นด้วย ในขณะที่ยังสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพดีได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบการกรองโดยตรงนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในด้านคุณภาพของน้ำดิบที่จะต้องมีความขุ่นต่ำ และมีสีน้อย นอกจากนี้ยังมีอายุการกรองสั้นทำให้ต้องใช้ความระมัดระวังในการควบคุมงานสูงขึ้น และต้องการน้ำล้างย้อนสูงขึ้นด้วย

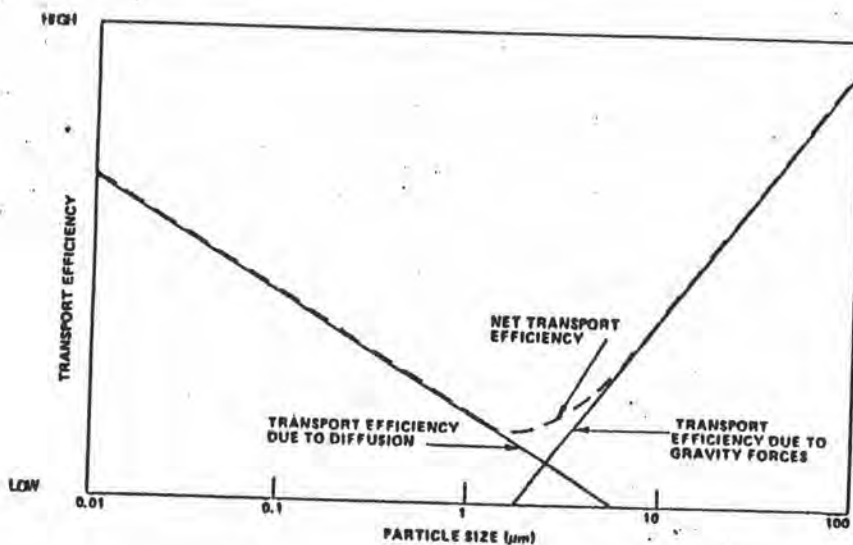
### 3.3 กลไกของการกรองน้ำ

การกรองน้ำเป็นการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำมาไว้บนสารกรองหรือ ช่องว่างระหว่างสารกรอง และวิธีการทำให้สารแขวนลอยเกาะจับกับสารกรองหรือสิ่งที่อยู่ติดกับสารกรองอยู่ก่อนแล้ว

3.3.1 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Transport Mechanism) เป็นกลไกทางฟิสิกส์-ไฮดรอลิกส์ ซึ่งเกิดได้หลายรูปแบบ ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 แต่โดยทั่วไปมักพิจารณาแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือลักษณะแรกเป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian Diffusion) ของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน และลักษณะที่สองเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะวิ่งเบียดเข้าหาสารกรองและติดค้าง (Interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สารแขวนลอยขนาดใหญ่ยังอาจตกตะกอน (Sedimentation) ในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาด (Size Distribution) ของสารแขวนลอยเล็กกว่า 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรผกผันกัน นั่นคือการแพร่กระจายจะทำให้สารแขวนลอยขนาดเล็กมีโอกาสเคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้มากกว่าสารแขวนลอยขนาดใหญ่ แต่เมื่อสารแขวนลอยขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอนการแพร่กระจายในระดับโมเลกุลจะน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ ขนาด และน้ำหนักของสารแขวนลอยจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกแบบตกตะกอนและติดค้าง ซึ่งประสิทธิภาพของการเคลื่อนย้ายจะแปรโดยตรงกับขนาดของสารแขวนลอยดังแสดงในภาพที่ 3.5 ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีน้ำหนักมากและปริมาตรมาก จึงตกตะกอนหรือติดค้างสารกรองได้ง่าย ตามที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่า สารแขวนลอยที่มีขนาดประมาณ 1 ไมครอนกรองออกได้ยากกว่าสารขนาดอื่น



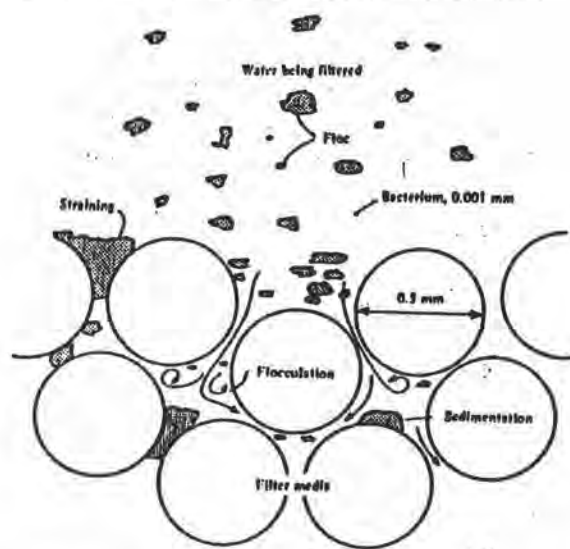
รูปที่ 3.4 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาสารกรอง (ดัดแปลงจาก มั่นสิน, 2526)



รูปที่ 3.5 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นอยู่กับขนาด (Fuller, 1898 อ้างถึง ใน Sanks, 1980)

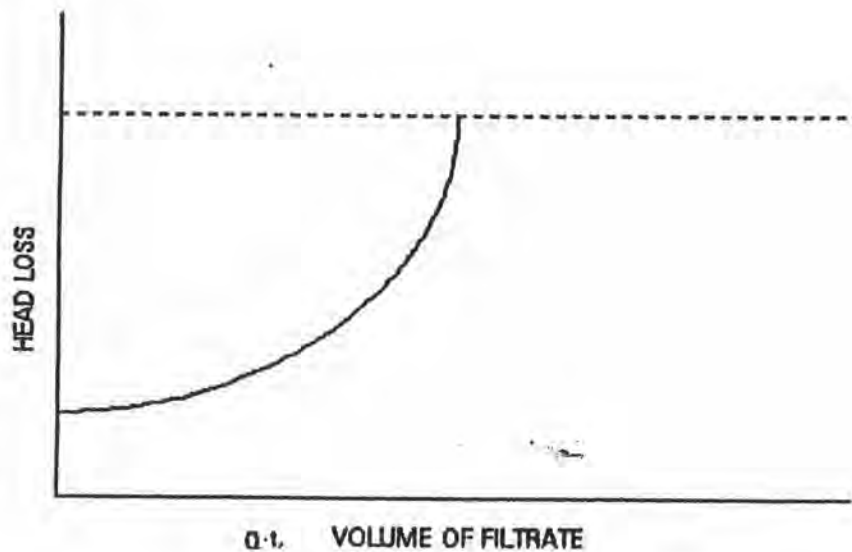
3.3.2 กลไกจับสารแขวนลอย (Attachment Mechanism) สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรืออาจตกค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากน้ำได้ อย่างไรก็ตามปรากฏว่าเครื่องกรองสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากน้ำได้ด้วย ซึ่งกลไกทางกายภาพเพียงลำพังไม่น่าจะทำได้ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่า การกรองน้ำต้องอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในขบวนการโคแอกกูเลชันด้วย กลไกดังกล่าวคือ การดูดติดผิว (Adsorption) และทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ให้เป็นกลาง (Charge Neutralization) การดูดติดผิวเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์สามารถเกาะจับอยู่บนสารกรอง หรือบนสิ่งอื่นที่จับสารกรองอยู่ก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม สารกรองและคอลลอยด์มักมีประจุลบทั้งคู่ จึงต้องมีการทำลายประจุไฟฟ้าของสารตัวใดตัวหนึ่งก่อน หรือของทั้งคู่เพื่อมิให้เกิดแรงผลักระหว่างประจุเดียวกัน ในกรณีของการกรองน้ำพบว่าแตกต่างจากกรณีของโคแอกกูเลชัน เนื่องจากคอลลอยด์อยู่ในน้ำซึ่งเคลื่อนที่ผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่กับที่ ทำให้สามารถทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ก่อนผ่านเข้าชั้นกรองได้ หรือถ้าเปลี่ยนประจุของคอลลอยด์ให้เป็นประจุบวกก่อนผ่านชั้นกรองก็จะได้ผลในการกรองมากยิ่งขึ้น เพราะการที่สารกรองและคอลลอยด์มีประจุต่างกัน เป็นการส่งเสริมการดูดติดผิวให้เกิดขึ้นได้อย่างเหนียวแน่น การเติมสารส้มหรือสารโพลีเมอร์เพื่อช่วยการกรองโดยตรง (Direct Filtration) ก็เป็นการทำลายประจุของคอลลอยด์ และ/หรือเปลี่ยนประจุลบให้เป็นประจุบวก ดังนั้น จึงช่วยทำให้การกรองน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้นในบางครั้งอยู่ในระหว่างคอลลอยด์ต่างๆ อาจรวมตัวเป็นฟล็อก ทำให้มีขนาดใหญ่จนสามารถตกตะกอนบนสารกรองหรือติดค้างอยู่ระหว่างช่องว่าง

กล่าวโดยสรุปได้ว่า การกรองสารแขวนลอยขนาดเล็กและใหญ่ออกจากน้ำจะอาศัยกลไกสองชุด ซึ่งแตกต่างกัน สารแขวนลอยขนาดใหญ่ หรือ ฟล็อกที่แข็งแรงสามารถตกตะกอนบนสารกรองหรือติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง ส่วนสารแขวนลอยขนาดเล็ก ต้องอาศัยแรงที่เกิดจากการแพร่กระจาย และมีกลไกดูดติดผิว ซึ่งมีการทำลายประจุลบให้เป็นกลาง และ/หรือเปลี่ยนประจุลบให้เป็นบวก (รูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 กลไกของการกรองน้ำในเครื่องกรองน้ำแบบทรายกรองเร็ว (มันลิน, 2526)

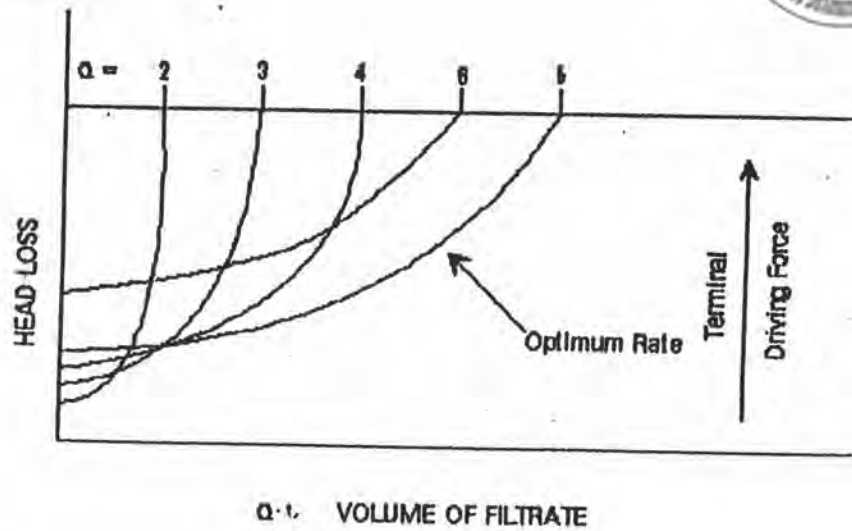
การกำจัดสารแขวนลอยด้วยกลไกทั้งสองแบบ มีผลต่อการกรองน้ำไม่เหมือนกัน การตกตะกอนและการติดค้าง ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพน่าจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของชั้นกรองหรือที่ความลึกไม่เกิน 2-3 นิ้วจากผิวหน้า ทำให้มีชั้นตะกอนปกคลุมบนผิวบนชั้นกรองลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดการหัวน้ำสูญเสียอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 หัวน้ำสูญเสียของเครื่องกรองที่มีการกรองแบบติดผิว (Sanks, 1980)

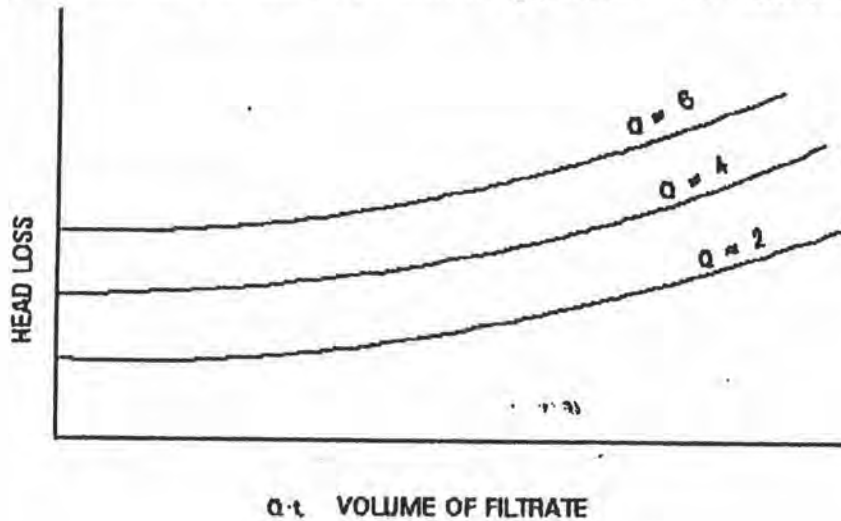
กราฟของการสูญเสียจะเป็นรูปโค้งกะทะหงาย ทำให้เครื่องกรองที่มีการกรองเป็นแบบติดผิวอุดตันเร็ว ซึ่งอาจหลีกเลี่ยงโดยการเพิ่มอัตราการกรองให้สูงขึ้นเพื่อเพิ่มแรงผลักดันให้สารแขวนลอยสามารถแทรกตัวเข้าไปภายในชั้นกรองได้ลึกมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มอัตราการกรองในกรณีนี้จะทำให้ผลิตน้ำได้มากขึ้น และรูปร่างของกราฟแสดงค่าหัวน้ำสูญเสียจะเปลี่ยนแปลงไป (รูปที่ 3.8)





รูปที่ 3.8 การเพิ่มอัตราการกรองทำให้ชลอัตราการเพิ่มของอัตราการสูญเสียหัวน้ำของเครื่องกรองที่มีกลไกแบบติดผิวและสามารถผลิตน้ำได้มากขึ้น (Sanks, 1980)

เครื่องกรองที่ทำงานได้ดีและมีอายุไม่สั้นเกินไปควรกำจัดสารแขวนลอยด้วยกลไกทั้งแบบกายภาพและเคมี (การดูดติดผิวและทำลายประจุไฟฟ้า) เนื่องจากวิธีการนี้ทำให้เกิดการกรองขึ้นได้ลึกทั่วทั้งชั้นกรองคหัวน้ำสูญเสียจึงเกิดขึ้นสม่ำเสมอทำให้กราฟของหัวน้ำสูญเสียเป็นเส้นตรง หรือมีความโค้งน้อย (รูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.9 การสูญเสียหัวน้ำของเครื่องกรองซึ่งการกำจัดความขุ่นเกิดลึกลงไปชั้นกรอง (Sanks, 1980)

สำหรับกรณีที่การกรองไม่ได้ผลเพราะขาดการเตรียมน้ำก่อนกรองหรือด้วยสาเหตุอื่นๆ จนทำให้สารแขวนลอยสามารถทะลุผ่านชั้นกรองไปได้กราฟหัวน้ำเมื่ออัตราการกรองคงที่จะเป็นรูปโค้งกะทะคว่ำลักษณะเช่นนี้ควรจะมีการเตรียมน้ำก่อนกรองให้เหมาะสม

ในระหว่างการกรองน้ำสารแขวนลอยอาจหลุดออกมาจากถังกรองได้ด้วยกลไกการหลุด (Detachment) กลไกนี้อาจเกิดขึ้นจากตะกอนบางส่วนเกาะจับอย่างหลวมๆ บนสารกรอง เมื่อชั้นกรองมีความฝืดเพิ่มขึ้นหรืออุดตันมากขึ้นแรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงมากขึ้นตามไปทำให้ตะกอนหลุดออกจากชั้นกรองได้ การเพิ่มอัตราการกรองอย่างกะทันหันจนน้ำที่กรองได้พุ่งเป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นกลไกการหลุด แต่ในขณะเดียวกันมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งเชื่อว่า กลไกการหลุดเกิดจากพื้นที่ว่างบนสารกรองถูกใช้ไปจนเกือบหมดทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเกาะติดชั้นกรองได้น้อย การวิ่งออกจากชั้นสารกรองจึงมีมาก

### 3.4 ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับระบบกรองน้ำ

3.4.1 การเตรียมน้ำก่อนกรอง (Pretreatment) การกรองน้ำดิบที่มีความขุ่นโดยตรงมักจะได้น้ำใสเท่าที่ควร เนื่องจากทั้งสารกรองและอนุภาคความขุ่นส่วนใหญ่จะมีประจุลบจึงผลักกัน ดังนั้นโอกาสที่จะสัมผัสและเกาะกันจึงมีน้อย การเตรียมน้ำก่อนกรองโดยการทำโคแอกกูเลชัน เพื่อทำลายประจุลบของอนุภาคแขวนลอยและเปลี่ยนให้เป็นประจุบวกจึงมีความสำคัญต่อการกรองน้ำอย่างยิ่งแม้ว่าการทำลายประจุของสารกรองก็อาจให้ผลเช่นเดียวกันกับการทำลายอนุภาคแขวนลอยแต่ในทางปฏิบัติทำได้ยากกว่า

3.4.2 ความแปรปรวนของอัตราการกรอง อัตราการกรองที่เปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันทำให้คุณภาพของน้ำที่ออกจากเครื่องกรองต่ำลงได้ แต่อย่างไรก็ตามหากทำการกรองในอัตราที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอและมีแบบแผน (Declining Rate Filtration) ก็สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูงได้เช่นกัน และอาจผลิตน้ำได้มากกว่าด้วย

3.4.3 ขนาดของสารกรอง สารกรองเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องกรองได้ดี เนื่องจากสารกรองที่มีขนาดเล็กจะให้คุณภาพของน้ำที่กรองได้มีคุณภาพดี แต่จะมีระดับความดันสูญเสียมาก Degremont(1991) แนะนำให้ใช้ทรายขนาด 0.5-2.0 มม. ความลึกชั้นกรอง 1.8-2.0 มม. สำหรับเครื่องกรองทรายเร็วแบบไหลขึ้นที่อัตราการกรอง 5 ลบม./ตรม.-ชม. ส่วน Fair, Geyer และ Okun (1971) แนะนำให้ใช้ทรายกรองขนาด 0.45 มม.หรือใหญ่กว่า ค่า UC ไม่เกิน 1.5 สำหรับเครื่องกรองทรายเร็วแบบไหลลง

3.4.4 อัตราการล้างย้อน (Back wash Rate) อัตราการล้างย้อนเป็นปัจจัยสำคัญในการเลือกขนาดสารกรองและกำหนดสมรรถนะของเครื่องกรองสารขนาดใหญ่ที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ต้องใช้พลังงานในการล้างย้อนมากทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก และหากการล้างสารกรองที่ไม่ดีพอจะทำให้เกิดอนุภาคแขวนลอยสะสมจนเป็น Mud Ball

3.4.5 คุณภาพน้ำดิบ คุณลักษณะของน้ำไหลเข้าสู่เครื่องกรอง เช่นความแข็งแรงของตะกอน, ประจุในน้ำ ฯลฯ จะเป็นตัวกำหนดว่าต้องมีการเตรียมน้ำก่อนเข้าเครื่องกรองหรือไม่ โดยปกติถ้าน้ำเข้าระบบมีความขุ่นไม่เกิน 20-25 หน่วยการกรองอาจเป็นการกรองโดยตรง (Direct Filtration) แต่สำหรับน้ำที่มีความขุ่นมากกว่านั้น ควรมีการลดความขุ่นก่อนเข้าเครื่องกรองด้วยกระบวนการตกตะกอนและโคแอกกูเลชัน

3.4.6 ความหนาของชั้นกรอง เป็นค่าที่กำหนดโอกาสสัมผัสระหวงสารแขวนลอย และสารกรอง ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นเป็นอย่างมากหากสามารถใช้ประโยชน์จากความหนาของทั้งชั้นสารกรอง Kawamura (1971) เสนออัตราส่วนความหนาของชั้นกรองต่อขนาดของสารกรองเท่ากับ 1.00 สำหรับเครื่องกรองทรายเร็ว

3.4.7 อายุของเครื่องกรองน้ำ เมื่อกรองน้ำถึงจุดหนึ่งแล้วเช่นระดับน้ำในถังกรองถึงจุดสูงสุดหรือน้ำที่กรองได้เริ่มขุ่นจำเป็นต้องล้างเครื่องกรองเสมอ โดยปกติอายุการกรองควรมีเวลาประมาณ 8-36 ชม. ถ้าอายุการกรองสั้นเกินไปต้องล้างบ่อยทำให้เสียเวลาและเสียน้ำในการล้างมาก แต่ถ้าอายุนานเกินไปก็ไม่ดีเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีและชีวอาจเกิดขึ้นเช่นการตกผลึกของหินปูนที่อยู่ในน้ำทำให้ชั้นทรายจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่หรือการเกิดสาหร่ายในถังกรอง เป็นต้น

### 3.5 กระบวนการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากของไหล

3.5.1 การดักอนุภาคแขวนลอยโดยตรง (Direct sieving) เกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาคแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรองดังนั้นอนุภาคแขวนลอยจึงถูกดักไว้โดยตรง ซึ่งฮอลล์ (Hall, 1952 : 9 อ้างถึงในภิญโญ ธรรมศิริ , 2523) ได้ให้ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเรื่องนี้ว่า

$$P_s \approx D/d$$

โดยที่  $P_s$  = ค่าความเป็นไปได้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอย

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแขวนลอย (ซม.)

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของสารกรอง (ซม.)

แต่ทั้งนี้ความเร็วของการไหลผ่านชั้นสารกรองจะต้องน้อยมากๆ

3.5.2 การตกตะกอน (Sedimentation) เกิดขึ้นโดยที่อนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่าระหว่างสารกรองจะตกตะกอนบนผิวของสารกรองโดยกระบวนการแบบถังตกตะกอน ซึ่งการตกตะกอนโดยวิธีนี้เกิดขึ้นได้ในทุกชั้นของสารกรองไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะตอนล่างเหมือนถังตกตะกอนทั่วไป ในการคำนวณหาพื้นที่บนผิวสารกรองจะนำไปหาพื้นที่รวมที่ใช้ในการตกตะกอนนั้นสามารถคำนวณได้จากสูตร

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

โดยที่  $p$  = ค่าความพรุนของมวลสารกรองใน 1 ลบ.ม.  
 $d$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสารกรอง (เมตร)

จะได้พื้นที่บนผิวสารกรองเป็นตารางเมตร ต่อ ลูกบาศก์เมตรของสารกรองตัวอย่าง เช่น ทRAYกรอง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร มีค่าความพรุน 0.4 จะมีพื้นที่บนผิวเม็ดทรายรวม 4500 ตารางเมตร ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง และถ้าทรายกรองมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางเมตร มีความหนาของชั้นทรายกรอง 1.2 เมตร จะมีพื้นที่บนผิวเม็ดทรายรวม 5400 ตารางเมตร เป็นต้น

ในการตกตะกอนบนผิวสารกรองนั้นพื้นที่บนผิวกรองจะมีผลต่อการตกตะกอนเฉพาะด้านบนที่หันขึ้น ซึ่งไม่สัมผัสกับเม็ดสารกรองอื่น และไม่ถูกรบกวนด้วยการไหลของน้ำประมาณว่ามีค่าเพียง 300 ตารางเมตร ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรของทรายกรอง

สำหรับประสิทธิภาพของการตกตะกอนบนเม็ดสารกรองนั้นส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอัตราการกรองและความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอย ซึ่งความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยนั้น สโตคส์ (Stokes 1845, 1851) ได้กำหนดสมการไว้คือ

$$V_c = (g (p_s - p) d^2 / \mu) / 18$$

เมื่อ  $V_c$  = ความเร็วปลายของอนุภาค (Terminal velocity of particle)  
 $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity)  
 $p_s$  = ความหนาแน่นของอนุภาค (Density of particle)  
 $p$  = ความหนาแน่นของเหลว (Density of fluid)  
 $d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (Diameter of particle)  
 $\mu$  = ค่าความหนืดของของเหลว (Dynamic viscosity)

3.5.3 การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial impaction) เมื่อของเหลวที่มีอนุภาคแขวนลอย ความหนาแน่นสูงไหลไปกระทบกับผิวของสารกรองเหลวจะเบี่ยงเบนให้พ้นจากสารกรองที่ขวางอยู่ แต่เนื่องจากอิทธิพลของความเฉื่อยจะทำให้สารที่มีความหนาแน่นต่ำเปลี่ยนทิศทางได้เร็วกว่าสารที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นของเหลวจะเปลี่ยนทิศทางได้เร็วกว่าอนุภาคแขวนลอย ทำให้อนุภาคแขวนลอยจะเปลี่ยนทิศทางไม่ทันและติดอยู่บนสารกรองในที่สุด แต่ทั้งนี้มียิ่งปัจจัยประกอบที่สำคัญหลายประการด้วยกัน เช่น ตำแหน่งของอนุภาคแขวนลอย ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของของเหลวกับความหนาแน่นของอนุภาคแขวนลอย มุมของการตกกระทบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วในการไหลเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอนุภาคแขวนลอย เนื่องจากความเฉื่อยนี้จะเพิ่มขึ้นตามภาระบรรทุกของของเหลว (Hydraulic loadings) สำหรับการกำจัดอนุภาคแขวนลอยโดยกระบวนการกระทบ เนื่องจากความเฉื่อยนี้ได้

ผลไม่ดีเท่าที่ควรเพราะหากความหนืดของของเหลวสูงจะทำให้ผลจากการกระทบกันลดลงมากดังนั้นประสิทธิภาพของการกรองจึงลดลงด้วย

3.5.4 การเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) การไหลอย่างไม่คงตัวของของเหลวจะทำให้อนุภาคเล็กๆแยกตัวจากอนุภาคแขวนลอย และทำให้อนุภาคแขวนลอยนี้เบี่ยงเบนไปจากแนวของกระแส น้ำจันเข้าไปสัมผัสกับผิวสารกรองสำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีลักษณะกลมสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นได้ จากสมการของ ไอน์สไตน์ (Einstein) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบบราวเนียนนี้จะมีผลเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนลงไปและเป็นกระบวนการที่ไม่มีความสำคัญนักสำหรับการกรองแบบเร็ว

3.5.5 โอกาสที่เกิดการสัมผัสกัน (Chance of contact) เกิดจากอนุภาคแขวนลอยมีโอกาสที่จะสัมผัสกันเองหรือสัมผัสกับตัวกลางอื่นเนื่องจากการไหลผ่านส่วนที่คับแคบโดยสโตินและเกรซได้ค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการนี้และพบว่าความน่าจะเป็นในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกจากของไหลนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ากำลังสองของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและเป็นสัดส่วนผกผันกับค่ากำลังที่สามของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของตัวกลาง

$$P_s \propto D$$

$$P_s \propto 1/d^3$$

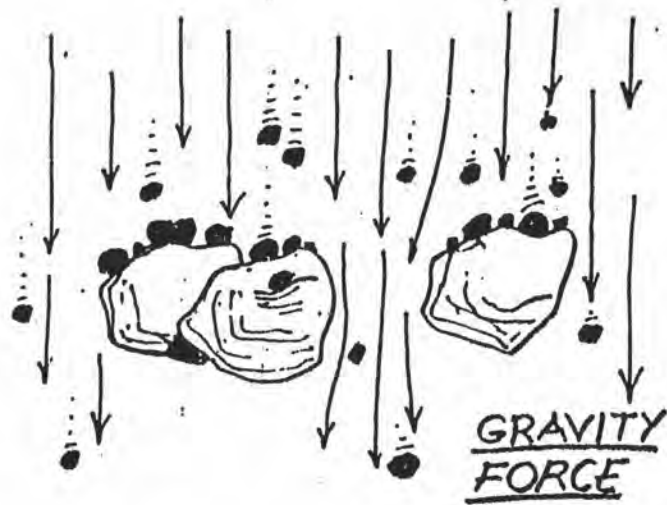
เมื่อ  $P_s$  = ค่าความเป็นไปได้ในการกำจัดอนุภาคแขวนลอย

$D$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคแขวนลอย (ซม.)

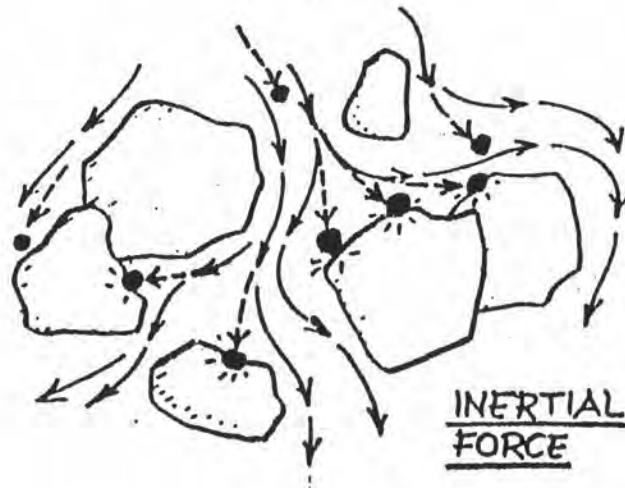
$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางของสารกรอง (ซม.)

3.5.6 การแพร่กระจาย (Diffusion) เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคแขวนลอยเล็กๆในของเหลวพยายามแพร่กระจายไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งจากการทดลอง ฮันเตอร์ (Hunter, R.J.) และ อเล็กซานเดอร์ (Alexander, A.E.) พบว่าอนุภาคของดินจะกระจายตัวไปตามทิศทางการไหลของน้ำจึงเป็นไปได้ที่อนุภาคเหล่านี้จะไปเพิ่มความเข้มข้นในน้ำที่มันผ่านไป (อ้างจากภิญโญ ธรรมศิริ , 2523)

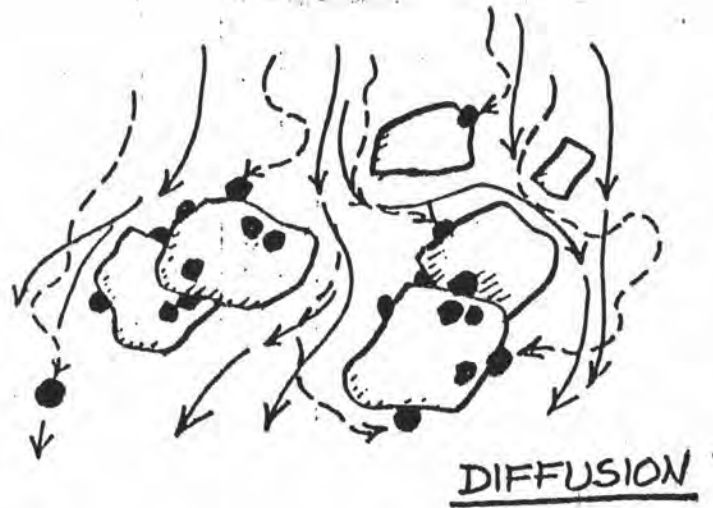
3.5.7 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces) มีแรงหลายชนิดที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดหรือผลักรันของโมเลกุลแต่ที่มีกำลังมากที่สุดคือแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งแรงนี้แปรผกผันกับกำลังที่เจ็ดของระยะห่างระหว่างโมเลกุล ซึ่งอยู่ในสภาวะของเหลว นอกจากนี้ระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกันจะมีแรงดึงดูด (COHESIVE FORCES) ซึ่งกันและกันเป็นอีกแรงหนึ่งที่ช่วยเสริม ดังนั้นเมื่อรวมแรงทั้งหมดแล้วก็จะได้ค่าแรงแปรผกผันกับกำลังสามของระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงไม่ใช่กระบวนการสำคัญในการขจัดความขุ่นหรืออนุภาคแขวนลอยแต่จะเป็นแรงสำคัญในการควบคุมอนุภาคแขวนลอยไว้ไม่ให้แยกตัวออกจากรันได้ง่าย



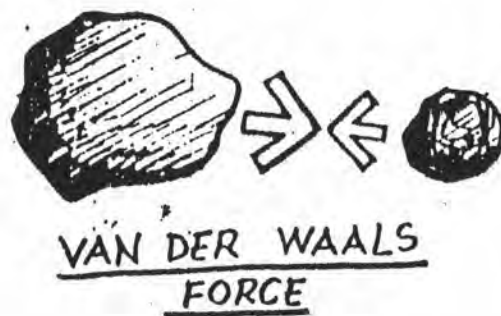
รูปที่ 3.10 กลไกการเกิดการตกตะกอน (Sedimentation)



รูปที่ 3.11 กลไกการกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Impaction)



รูปที่ 3.12 กลไกการแพร่กระจาย (Diffusion)



รูปที่ 3.13 แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals forces)



### 3.6 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน

สารเคมีหลักที่ใช้ในกระบวนการโคแอกกูเลชัน เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) หรืออาจเรียกว่า ฟล็อกคูแลนต์ (Flocculant) และสารเคมีซึ่งช่วยทำให้โคแอกกูแลนต์มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเรียกว่า โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant aid) หรือฟล็อกคูแลนต์เอ็ด (Flocculant aid)

#### 3.6.1 โคแอกกูแลนต์ (Coagulant)

โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ สารส้ม ซึ่งเป็นสารประกอบของอลูมิเนียมที่มีสูตรเคมีดังนี้  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14.3H_2O$  (Aluminium Sulfate) สารเคมีที่ได้รับความนิยมรองลงมาได้แก่ สารประกอบของเหล็กเช่น  $FeCl_3$  เป็นต้น โคแอกกูแลนต์เอ็ดที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งเรียกว่า Polyelectrolyte หรือบางครั้งเรียกสั้นๆว่า โพลีเมอร์ (Polymer) สารชนิดนี้มีราคาต่อหน่วยน้ำหนักแพงกว่าสารส้มหรือ โคแอกกูแลนต์อื่นเป็นอันมาก แต่เนื่องจากน้ำดิบส่วนใหญ่ไม่ต้องการโพลีเมอร์จำนวนมาก การใช้สารชนิดนี้จึงยังอยู่ในวิสัยที่เป็นไปได้ในการผลิตน้ำประปา เมื่อเติมสารโคแอกกูแลนต์ลงไปในน้ำ มักจะแตกตัวกลายเป็นไอออนบวกและลบที่มีวาเลนซ์ (Valence) สูง ไอออนบวกสามารถทำปฏิกิริยากับ  $OH^-$  ทำให้เกิดคอลลอยด์ของสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งมีประจุบวก สารไฮดรอกไซด์นี้สามารถจับตัวกับอนุภาคความขุ่นซึ่งมีประจุลบ ทำให้ความขุ่นกลายเป็นกลางซึ่งเท่ากับเป็นการทำลายเสถียรภาพให้กับความขุ่นนั่นเอง

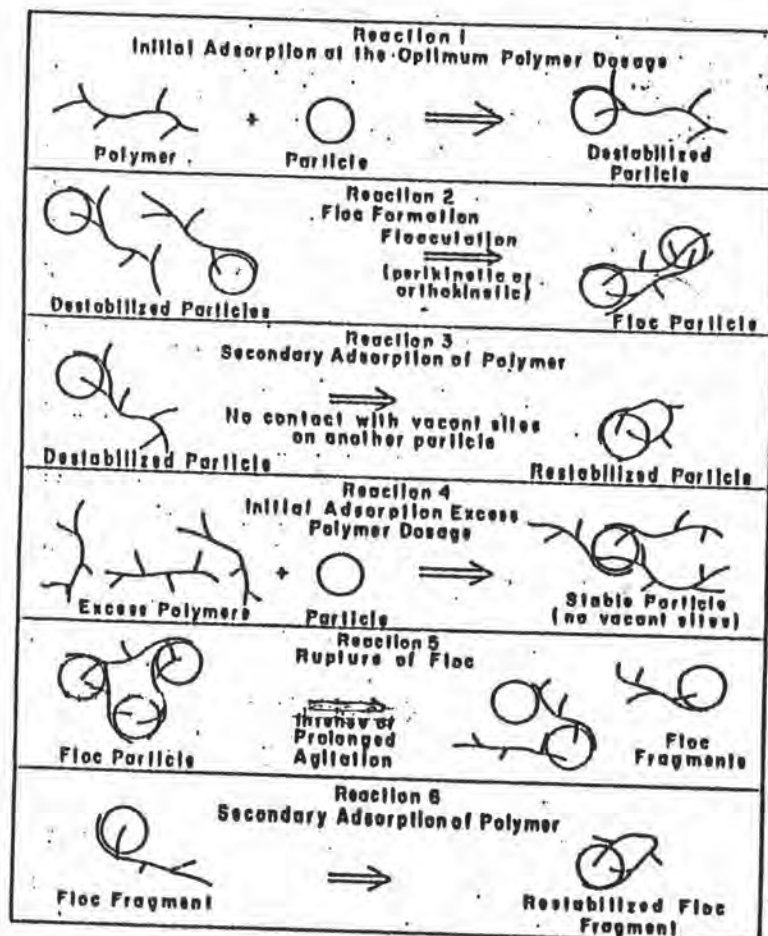
#### 3.6.2 โคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid)

เป็นสารเคมีที่เติมร่วมกับโคแอกกูแลนต์เพื่อช่วยให้เกิดโคแอกกูเลชันได้ดียิ่งขึ้น สารเคมีที่สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์เอ็ดมีหลายชนิด แต่สารที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ แอคติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) สารอินทรีย์โพลีเมอร์ต่างๆ

ในจำนวนสารโคแอกกูแลนต์เอ็ดทั้งหมด สารโพลีเมอร์นับว่าเป็นสารที่นิยมใช้กันในปัจจุบันมากที่สุด สารโพลีเมอร์เป็นลูกโซ่ของสารโมโนเมอร์หลายๆตัวเรียงกันอย่างมีระเบียบ โพลีเมอร์อาจมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ได้ เช่น อาจมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่เพียงไม่กี่ร้อย ไปจนถึงระดับที่สูงกว่า 10 ล้านเป็นต้น โพลีเมอร์อาจมีประจุบวกหรือลบหรือไม่มีประจุก็ได้ ทำให้มีการจำแนกประเภทของโพลีเมอร์ตามประจุประจำตัว ประจุของโพลีเมอร์เกิดขึ้นจาก Functional Group ต่างๆ หลายชนิด (เช่น คาร์บอกซิลซิลโฟเนต) สามารถเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของน้ำ เนื่องจากโพลีเมอร์เป็นสารอินทรีย์ จึงสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่าโคแอกกูแลนต์อื่นๆ ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ (มันลิน, 2526)



กลไกการทำงานของโพลีเมอร์ สามารถอธิบายได้ด้วยโมเดลที่เรียกว่า Polymer Bridging จากรูปที่ 3.14 ในรูปปฏิกิริยาที่ 1 แสดงถึงวิธีการเกาะจับของโมเลกุลโพลีเมอร์กับอนุภาค ซึ่งในกรณีของอนุภาคเบื้องต้นที่ถูกทำลายเสียสภาพแล้ว การเกาะของโมเลกุลโพลีเมอร์ จะทำให้เกิดฟล็อกที่มีน้ำหนักมากขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อมีปลายอิสระที่เหลือของโมเลกุลโพลีเมอร์ไปเกาะจับกับอนุภาคอื่นๆดังในรูปปฏิกิริยาที่ 2 ปฏิกิริยาที่เราต้องการคือในรูปที่ 1 และ 2 นี้ สามารถทำให้เกิดได้สมบูรณ์ จะต้องประกอบด้วยความพอดีของปัจจัย 3 ประการคือ ปริมาณของโพลีเมอร์ที่ใช้ ค่าความเร็วกระตือรือร้น และเวลากักน้ำในถังปฏิกิริยา ความไม่พอดีของปัจจัยทั้ง 3 นี้ เช่นถ้าใช้โพลีเมอร์ปริมาณมากเกินไป จะทำให้อนุภาคกลับมีเสถียรภาพคืนมาได้ นอกจากนี้การกวนผสมที่มีความปั่นป่วนสูง หรือใช้เวลานานมากเกินไปอาจทำให้ฟล็อกที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็นส่วนๆ และทำให้ปลายอิสระของโพลีเมอร์เกาะจับกับอนุภาคเดิมเสถียรภาพของอนุภาคจึงกลับคืนมาได้ง่ายๆ



รูปที่ 3.14 Polymer Bridging Model

### 3.7 การศึกษาที่ผ่านมา

ปี ค.ศ. 1856 Darcy (อ้างถึงใน Rahman,1989) ทำการทดลองเกี่ยวกับอัตราการไหลของเหลวผ่านตัวกลางพรุน (Porous media) และสรุปผลการทดลองเป็นสูตรการไหลผ่านของดาร์ซี (Darcy seepage formula) ได้ดังนี้

	$q$	=	$KJ = KH/L$
โดยที่	$q$	=	อัตราการไหลของของเหลว
	$K$	=	ตัวนำชลศาสตร์ (Hydraulic conductivity) ของตัวกลางพรุนกับของเหลวที่ไหลผ่าน
	$J$	=	ความลาดชันชลศาสตร์ (Hydraulic gradient)
	$H$	=	ค่าหัวน้ำสูญเสีย (Headloss)
	$L$	=	ความสูงของชั้นสารกรอง

ปี ค.ศ. 1940 Stein (อ้างถึงใน Rahman,1989) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับการกำจัดสารแขวนลอยขนาดเล็กดังนี้

ก. การกรองเป็นกระบวนการไหล (Dynamic process) ซึ่งความสามารถในการกรองขึ้นอยู่กับความลึกและเวลาที่ใช้ในการไหลผ่านสารกรอง

ข. ความสามารถในการกำจัดอนุภาคแขวนลอยที่ไหลผ่านแต่ละชั้นของสารกรองจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยทั้งหมดที่ผ่านเข้าไป

ค. ปริมาณอนุภาคแขวนลอยที่ถูกกำจัดออกในช่วงแรกของการกรองจะมีปริมาณรวมของอนุภาคแขวนลอยที่ถูกกำจัดเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง เมื่อเทียบกับเวลา และต่อไปสัดส่วนดังกล่าวจะลดลงเรื่อยๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณของการอุดตันของสารกรอง

ง. สิ่งสกปรกที่เกิดจากอนุภาคแขวนลอยที่ถูกเครื่องกรองดักไว้ั้นต่อไปจะเป็นเหตุ ทำให้เครื่องกรองอุดตัน

ปี ค.ศ. 1962 ไอวีส (Ives) พบว่าการตกตะกอนของอนุภาคแขวนลอยทำให้ช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ดังนั้นความเร็วของน้ำไหลผ่านช่องว่างจะสูงขึ้นและทำให้อนุภาคแขวนลอยที่ตกตะกอนอยู่ก่อนนั้นเกิดการปั่นป่วนขึ้นได้และก็จะหลุดติดไปกับน้ำอีก

ปี ค.ศ. 1964 Irmay (อ้างถึงใน Su Yong,1983) ได้สรุปว่าสูตรการไหลผ่านของ ดาร์ซีจะใช้ได้เมื่อสารกรองต้องเป็นสารที่มีคุณสมบัติอย่างเดียวกันทุกสภาวะ (Isotropic) มีขนาด, รูปลักษณะเท่ากันโดยคงตัวทั้งทางฟิลิกส์และเคมี, รอยต่อของสารกรองและช่องว่างต่างๆต้องมีของเหลวบรรจุอยู่เต็ม, ของเหลวต้องมีคุณสมบัติอย่างเดียวกันทุกสภาวะและเป็นเนื้อเดียวกัน โดยตลอดอีกทั้งไม่สามารถถูกอัดให้ปริมาตรน้อยลงได้ (Incompressible) เกิดปฏิกิริยาทางฟิลิกส์หรือ ทางเคมีได้ยาก, ผิวเครื่องกรองและผิวสารกรองของเหลวจะซึมผ่านเข้าไปไม่ได้

ปี ค.ศ. 1970 เจสลี (Jesse) ได้รายงานผลการศึกษาคัดลอกระบบสารกรองเคลื่อนที่กับเครื่องกรองชนิด Trickling Filter โดยใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic System) ช่วยในการหมุนเวียนทราย มีการใช้สารส้มและสารโคแอกกูแลนต์เอ็ด (Coagulant Aid) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการกรองในการกำจัดน้ำเสีย (รูปที่ 3.15) ซึ่งผลปรากฏว่าระบบดังกล่าวสามารถใช้งานได้ดี โดยน้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะมีค่าบีโอดีต่ำกว่า 20 มก./ล.

ปี ค.ศ. 1979 Vigneswaran (อ้างถึงใน Bandulahewa,1990) ทำการทดลองเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของอัตราการเวียนกลับของสารกรอง และอัตราการกรองของเครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ โดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์จากดินขาว พบว่าระดับการเวียนกลับสารกรองที่เหมาะสมจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการกรองที่เพิ่มขึ้น

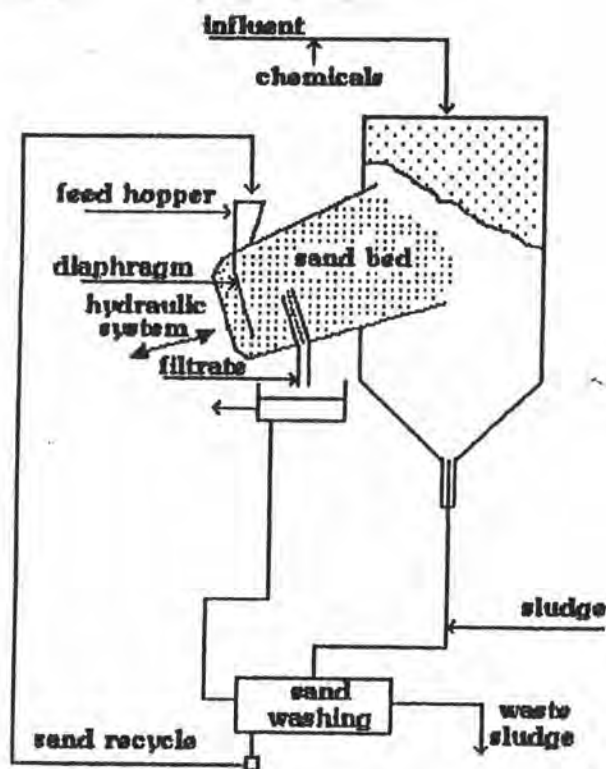
ปี ค.ศ. 1983 Vigneswaran et. al.(อ้างถึงใน Bandulahewa,1990) ได้รายงานผลการทดลองศึกษาการกรองน้ำแบบสารกรองเคลื่อนที่ในระดับห้องทดลอง โดยใช้น้ำดิบสังเคราะห์จากดินขาวซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าอัตราการเวียนกลับของสารกรอง, อัตราการกรอง, อัตราการล้างย้อน และความลึกของสารกรองมีผลต่อคุณภาพและอัตราการกรอง

ปี ค.ศ. 1983 ปาร์ค ซู ยอง (Park Su Yong) ได้ทดลองใช้เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ชนิดกรองลง (รูปที่ 3.16) ในการกรองน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากบ่อฝิ่ง (Oxidation pond) สรุปผลได้ดังนี้

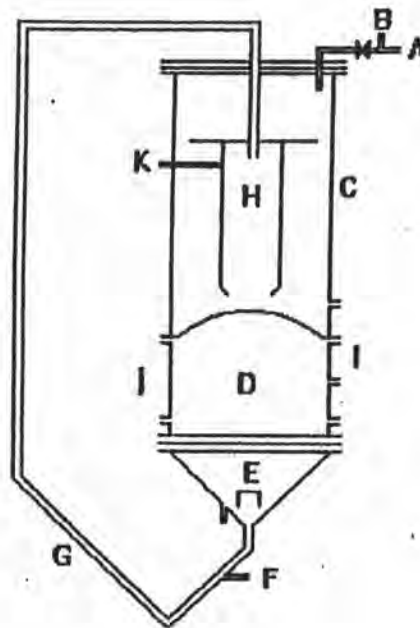
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการเวียนกลับของทรายกรอง
2. อัตราการเวียนทรายกรองต่างๆ จะมีลักษณะการทำงานเหมือนกับเครื่องกรองแบบทรายกรองอยู่กับที่
3. ผลของการเวียนทราย ช่วยยับยั้งอัตราการเพิ่มขึ้นของหัวน้ำสูญเสีย และอัตราการเวียนทรายที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1.2 - 3.0 %/นาที่
4. อัตราการทิ้งน้ำล้างทรายที่เหมาะสมเท่ากับ 10% เทียบกับอัตราการกรอง

5. ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นจะเห็นได้ชัดในชั้นทรายกรองที่อัตราการเวียนทรายต่ำ ในขณะที่จะไม่เห็นผลอย่างมีนัยสำคัญในอัตราการเวียนทรายสูง

6. เครื่องกรองแบบทรายกรองอยู่กับที่ จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี และความขุ่นสูงกว่า เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ แต่จะมีอัตราการเกิดหัวน้ำสูญเสียสูงกว่า 8 เท่า



รูปที่ 3.15 การกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ที่ใช้ระบบไฮดรอลิก (Jesse, 1970 อ้างถึงใน Bandulahewa, 1990)



#### LEGEND

- A : wastewater influent
- B : flocculant
- C : filter column
- D : sand bed
- E : effluent
- F : air injection tube
- G : sand recycling tube
- H : inner compartment for sand collection and distribution
- I : sample ports
- J : manometer tap
- K : sludge out flow

รูปที่ 3.16 แผนภาพการทดลองของเครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ (Park Su-Yong, 1983)

ปี ค.ศ. 1984 Visvanathan ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่พบว่า

1. แบบจำลองของ O'Melia และ Ali'S สามารถนำมาใช้กับประสิทธิภาพในการกำจัดของเครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่
2. ค่าหัวน้ำสูญเสียจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และจะคงที่หลังจากระบบเริ่มคงตัว
3. เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องกรองชนิดชั้นกรองอยู่กับที่ พบว่า เครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่จะใช้กับน้ำดิบที่มีความขุ่นสูง

ปี ค.ศ. 1984 Visvanathan, Vigneswaran และ Aim ได้ศึกษาอัตราการเวียนทรายที่เหมาะสมกับเครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่ ซึ่งในแต่ละอัตราการกรอง จะมีค่าอัตราการเวียนทรายที่เหมาะสมที่ให้ค่าประสิทธิภาพในการทำงานสูง โดยอัตราการเวียนทรายจะแปรผันตรงกับอัตราการกรอง และพบว่าอัตราการเวียนทรายที่เหมาะสมสำหรับอัตราการกรอง 5 และ 10 ลบม./ตรม.-ชม. มีค่าเท่ากับ 25 และ 75 มล./นาที ตามลำดับ

ปี ค.ศ. 1989 Rahman ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการกรองแบบสารกรองเคลื่อนชนิดกรองลง โดยใช้อุปกรณ์ (รูปที่ 3.17) สรุปได้ดังนี้

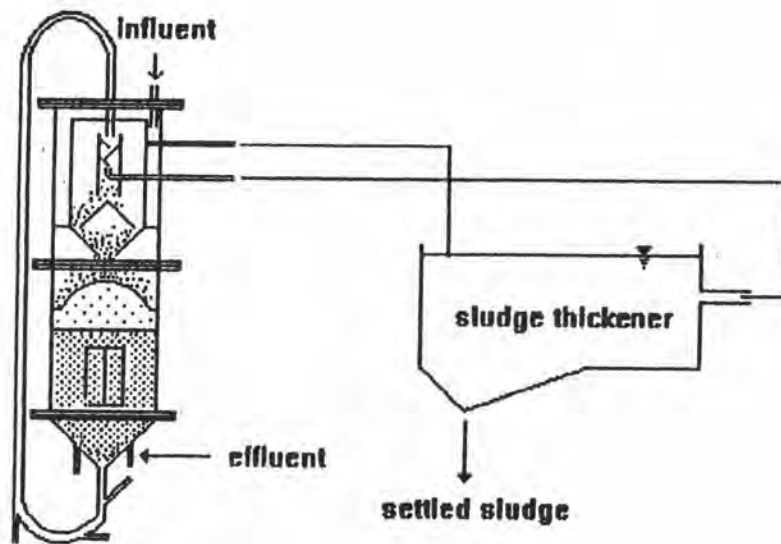
1. ประสิทธิภาพการลดความขุ่นจะลดลง เมื่อใช้เครื่องกรองเป็นเวลานาน และหากระบบการทิ้งน้ำล้างทรายกรองกับการหมุนเวียนทรายไม่สัมพันธ์กันก็จะเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพต่ำลง
2. จากการทดลองเปรียบเทียบการใช้สารโคแอกกูแลนระหว่างสารส้ม ปูนขาว และเพอร์ริคโลไรด์ พบว่าสารส้มมีความเหมาะสมที่จะใช้กับเครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่
3. อัตราการเวียนทรายที่เหมาะสมสำหรับทรายขนาด 1.19-2.00 มม. คือ 1.11 % / นาที
4. ทรายขนาด 0.833 - 1.19 มม. จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยสูงกว่า ทรายขนาด 1.19 - 2.00 มม.
5. อัตราการทิ้งน้ำล้างทรายมีผลต่อคุณภาพน้ำหลังกรอง

ปี ค.ศ. 1990 Bandulahewa ได้ศึกษาทดลองใช้เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่ชนิดกรองชั้นที่มี ความสามารถในการกรองในอัตรา 200 ลิตรต่อวัน (รูปที่ 3.18) ในการกรองน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากบ่อเติมอากาศผสมกับน้ำเสียพบว่าสามารถลดความขุ่น และ COD ได้ดีโดยที่มีหัวน้ำสูญเสียเฉลี่ยไม่เกิน 10 ซม.

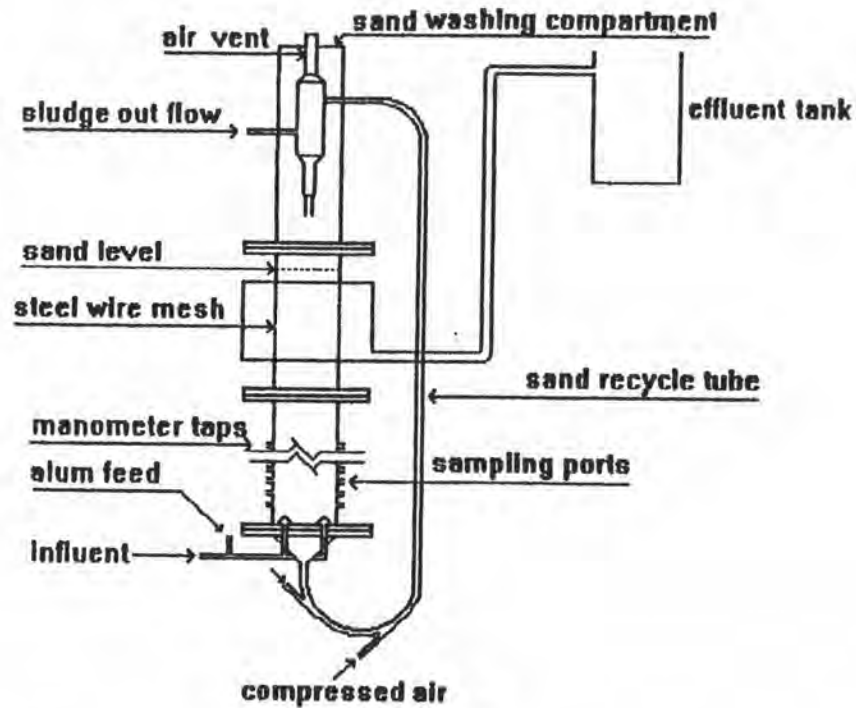
ปี ค.ศ. 1994 England, S.K., Darby, J.L., Tchobanoglous, G. ได้ศึกษาเครื่องกรองชนิดชั้นกรองเคลื่อนที่แบบไหลขึ้นกับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นต้น พบว่าอัตราการเวียนทรายต่ำจะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดี แต่ถ้าต่ำเกินไปจะทำให้เกิดการสะสมตัวของของแข็งภายในชั้นกรองจนทำให้ค่าหัวน้ำสูญเสียเพิ่มสูงขึ้นได้ และอัตราการเกิดหัวน้ำสูญเสียจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการกรองสูงขึ้น

ปี พ.ศ. 2523 ภิญญ ธรรมศิริ ได้ศึกษาเครื่องกรองเร็วแบบไหลขึ้น โดยใช้เครื่องกรองขนาดพื้นที่หน้าตัด  $0.15 \times 0.15$  ตารางเมตร ชั้นทรายกรองสูง 0.80 เมตร โดยใช้ น้ำก่อนกรองซึ่งผ่านการกรองตกตะกอนด้วยสารส้มที่อัตราการกรองระหว่าง 100-500 เมตร/วัน จากการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพในการลดค่าความขุ่นมีค่าประมาณ 70% สำหรับอัตราการกรองต่ำกว่า 250 เมตร/วัน และประมาณ 60% สำหรับอัตราการกรองสูงขึ้นแต่ไม่เกิน 500 เมตร/วัน
2. ค่าของหัวน้ำสูญเสียสูงสุดของเครื่องกรองชนิดนี้ จะไม่เกิน 0.96 เท่าของความสูงชั้นทราย
3. อัตราการกรองที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 200-400 เมตร/วัน
4. เวลาในการใช้งานของเครื่องกรองมีค่า 12 ชม. สำหรับอัตราการกรอง 400 เมตร/วัน และ 24 ชม ใช้สำหรับอัตราการกรอง 200 เมตร/วัน
5. ปริมาณการกรอง (FILTRATE VOLUME) มีค่าประมาณ  $200 \text{ m}^3/\text{m}^2$  สำหรับอัตราการกรอง 200-400 เมตร/วัน



รูปที่ 3.17 รูปแบบการทดลองใช้เครื่องกรองแบบสารกรองเคลื่อนที่สำหรับน้ำเสีย (Rahman , 1989)



รูปที่ 3.18 รูปแบบจำลองเครื่องกรองของ Bundulahewa (Bandulahewa, 1990)

6. การกักเก็บสารแขวนลอย (SUSPENDED SOLIDS LOADING) มีค่าประมาณ 1500 กรัม/ม<sup>2</sup> สำหรับอัตราการกรอง 200-400 เมตร/วัน
7. ปริมาณน้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องกรอง มีค่าประมาณ 2.5% ของปริมาณน้ำที่ได้จากการกรองที่อัตราการกรอง 200-410 เมตร/วัน

ปี พ.ศ. 2531 ปรีชา แสงพิสิทธิ์ ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้ระบบการกรองโดยตรงแบบกรองสัมผัสน้ำที่ใช้สารส้มเป็นสารโคแอกกูแลนต์ พบว่าระบบนี้สามารถใช้กับน้ำดิบที่มีระดับความขุ่น 10 NTU. ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่อัตราการกรอง 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. และใช้ปริมาณสารส้ม 5.0-7.5 มก./ล. โดยทำการล้างย้อนเพียงวันละ 1 ครั้ง

จากการทดลองสามารถสรุปผลและแนวโน้มได้ดังนี้

1. ระดับความขุ่นของน้ำที่ผ่านการกรองมีความสัมพันธ์แปรตามระดับความขุ่นของน้ำดิบและอัตราการกรอง แต่แปรผกผันกับปริมาณสารส้ม
2. อัตราการสูญเสียเส็ด มีความสัมพันธ์แปรตามระดับความขุ่นของน้ำดิบ อัตราการกรองและปริมาณสารส้มที่ใช้
3. ปริมาณสารส้มที่ต้องการมีความสัมพันธ์แปรตาม ระดับความขุ่นของน้ำดิบ
4. น้ำดิบที่มีระดับความขุ่นสูงและ ใช้ปริมาณสารส้มสูง มีโอกาสเกิดเบรคทรูได้ง่ายและรวดเร็วกว่าน้ำดิบที่มีระดับความขุ่นต่ำและใช้ปริมาณสารส้มต่ำ
5. ประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่นมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับระดับความขุ่นของน้ำดิบ
6. การใช้ค่าดัชนีการกรองในการควบคุมกระบวนการโคแอกกูแลชั่นซึ่งกระทำได้ง่ายสะดวกประหยัดและรวดเร็วกว่าสามารถนำมาใช้ในการทดสอบเบื้องต้น เพื่อบอกถึงปริมาณสารส้มที่ให้ผลของการกรองที่ดีที่สุด

ปี พ.ศ. 2532 อำนวย เรืองธุรกิจ ได้ศึกษาการกรองตรงโดยใช้เครื่องกรองทรายเร็วแบบไหลขึ้นใช้น้ำขุ่นสังเคราะห์จากคาโอลินในช่วงความขุ่น 10 ถึง 50 NTU. ทรายขนาดสัมฤทธิ์ 0.3 ถึง 1.2 มม. อัตราการกรองอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 ม./ชม. ใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนสรุปได้ดังนี้

1. ทรายขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ เครื่องกรองแบบไหลขึ้นให้ความขุ่นน้ำกรองสูงกว่า และมีประสิทธิภาพกว่าแบบไหลลง
2. อัตราการกรองสูงให้ความขุ่นน้ำกรองต่ำและมีประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าอัตราการต่ำ
3. ความขุ่นน้ำดิบสูงให้ความขุ่นน้ำกรองไม่แตกต่างจากความขุ่นน้ำดิบต่ำ แต่มีประสิทธิภาพการกรองสูงกว่าความขุ่นน้ำดิบต่ำ



4. ทราบขนาดใหญ่ให้หัวน้ำสูญเสียเริ่มต้นสูงกว่า และมีอัตราการเกิดหัวน้ำสูญเสียต่ำกว่าทราบขนาดเล็ก
5. อัตราการกรองสูงให้หัวน้ำสูญเสียเริ่มต้นสูงกว่า และมีอัตราการเกิดหัวน้ำสูญเสียสูงกว่าอัตราการกรองต่ำ
6. ความขุ่นน้ำดิบสูงให้หัวน้ำสูญเสียเริ่มต้นไม่แตกต่างจากความขุ่นน้ำดิบต่ำแต่มีอัตราการเกิดหัวน้ำสูญเสียสูงกว่าความขุ่นน้ำดิบต่ำ
7. ขนาดทรายที่เหมาะสมเท่ากับ 0.9 มม. ซึ่งให้อายุการกรองนาน 2 ถึง 17 ชม. และเครื่องกรองแบบไหลขึ้นกรองได้นานกว่าแบบไหลลงสูงสุดถึง 6.6 เท่า
8. อัตราการกรองต่ำให้อายุการกรองนานกว่าอัตราการกรองสูง และอัตราการกรองที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 15 ม./ชม.
9. เครื่องกรองแบบไหลขึ้นใช้งานได้ดีที่ทุกค่าความขุ่นน้ำดิบ 10 ถึง 50 NTU.