



บทที่ 2

ทฤษฎี

## 2.1 ชนิดของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นกลุ่มของโพลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะ มีโมโนเมอร์ซึ่งสามารถนำพาประจุหรือแตกตัวเป็นไอออน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่มีประจุไฟฟ้าชนิดต่างๆอาจมีประจุบวก (cationic polyelectrolytes) ประจุลบ (anionic polyelectrolytes) มีประจุบวกและลบ (polyampholytes) และอาจไม่มีประจุหรือมีประจุน้อยมาก (nonionic polyelectrolytes) โดยทั่วไปสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่ขบอบน้ำ มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 10,000 - 10,000,000 ปัจจุบันมีบทบาทในการใช้งานมากขึ้นเป็นลำดับทั้งเพื่อการปรับสภาพน้ำดี และการบำบัดน้ำเสีย

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์มีทั้งที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง ยางไม้ สารละลายเกลือกรด และสารที่ได้จากการสังเคราะห์ แต่จากกระบวนการสังเคราะห์ทำให้สามารถควบคุม คุณสมบัติต่างๆได้ ทั้งปริมาณ ชนิดประจุ และน้ำหนักโมเลกุล ฯลฯ สารดังกล่าวจึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการใช้งาน สารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้สำหรับการปรับแต่งสภาพน้ำดิบเพื่อการอุปโภค-บริโภค จำเป็นต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยด้วยเนื่องจากมักมีสารเจือปนตกค้างอยู่เสมอ ตารางที่ 2.1 เป็นตัวอย่างของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ใช้เป็นสารรวมตะกอนโดยทั่วไปในกระบวนการกรอง

การจัดหมวดหมู่สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ สามารถกระทำได้หลายรูปแบบตามคุณสมบัติและประโยชน์การใช้งาน กล่าวคืออาจแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิด โครงสร้างหรือขนาดของโมเลกุล หรือแบ่งตามชนิดของประจุที่เกิดขึ้นในโมเลกุล ฯลฯ ในที่นี้จะกล่าวถึงประเภทของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นตามคุณสมบัติประการสุดท้ายที่กล่าวมานี้

ตารางที่ 2.1 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ทั่วไปในกระบวนการกรอง (2)

Name	Structure	Charge type	Molecular weight	Manufacturer and location
Magnifloc 835A	Polyacrylamide $\left( \text{CH}_2 - \underset{\text{CONH}_2}{\text{CH}} \right)_x$ (with some -COO-groups)	Anionic, high charge	$15 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 820A	As above	Anionic intermediate charge	$6 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 837A	As above	Anionic, low charge	$15 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc A-21	Polystyrene sulfonic acid, $\left( \text{CH}_2 - \underset{\text{SO}_3(-)}{\text{CH}} \right)_x$	Anionic very high charge		Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Wisprofloc 20	Causticized potato starch, crosslinked with borate	Anionic	Very high	Gamlen Chemical Co. South San Francisco, California
Magnifloc 905N	Polyacrylamide, very few -COO- groups	Nonionic	$15 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Purifloc N-17	As above	Nonionic	Very high, approx. $5-10 \times 10^6$	Dow Chemical Co. Midland, Michigan
Betz 1260	Polyacrylamide copolymer	Cationic	Very high $10 \times 10^6?$	Betz Laboratories, Inc. Trevose, Pennsylvania
Catfloc T	Poly (diallyldimethyl ammonium chloride) (quarternary amine)	Cationic, very high charge	$0.5 \times 10^6?$	Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Catfloc B	Amine?	Cationic, moderate charge		Calgon Corp. Pittsburgh, Pennsylvania
Magnifloc 507C	Tertiary amine	Cationic, moderate charge	$10^4-10^5$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 573C	Quarternary amine	Cationic, very high charge	$5 \times 10^4-10^5$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Magnifloc 2535	Tertiary amine/ polyacrylamide copolymer	Cationic, moderate charge	$1-3 \times 10^6$	American Cyanamid Co. Wayne, New Jersey
Primafloc C-7	Polyamine-HSO <sub>4</sub>	Cationic, fairly high charge	$1-2 \times 10^6$	Rohm and Haas Co. Philadelphia, Pennsylvania
Alcolac DV530	Polyethylene imine [(CH <sub>2</sub> -NH-CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> ]	Cationic	Approx. $5 \times 10^4$	Alcolac Inc. Baltimore, Maryland
Tydex 12	As above	Cationic	Approx. $6 \times 10^4$	Dow Chemical Co. Midland, Michigan

Note: While other equally effective polymers could have been substituted for those selected for this table, the availability of further information, such as molecular weight and structure, in many cases determined the polymers chosen here.

### 2.1.1 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุบวก

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่มีประจุบวกมีหลายรูปแบบ ได้แก่

2.1.1.1 Polyamines เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน  $10^5$  แต่มีความเป็นประจุบวกสูงเช่น Polyethylene Amine และ Polyethylene Imine (PEI) สารกลุ่มนี้ใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ และใช้บ้างในการศึกษาปฏิกิริยารวมตะกอน

2.1.1.2 Polyamine Quaternaries เป็นสารที่ไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช มีความต้านทานต่อการสลายตัวโดยคลอรีนมากกว่าโพลีเมอร์ทั่วไป จึงมักมีความสำคัญในการคลอรีนชั้นน้ำดิบ

2.1.1.3 Cationic Cyanamide Derivative เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างต่ำประมาณ  $1 \times 10^3 - 5 \times 10^3$  เริ่มแรกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษ แต่ก็พบว่าสามารถแสดงปฏิกิริยาทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ด้วยเช่นกัน

2.1.1.4 Cationic Cabamoyl Polymer เป็นกลุ่มสารที่มีความสำคัญในทางการค้า และใช้งานได้เอนกประสงค์ มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า  $10^6$  มีความหนืดสูงและมีสารที่ไวต่อปฏิกิริยาอยู่น้อยเมื่ออยู่ในสารละลาย

2.1.1.5 Poly  $\alpha$ -Vinylimidazoline เป็นโพลีเมอร์พวง POLYCYCLIC AMIDE มีโครงสร้างพิเศษสำหรับการเป็นสารรวมตะกอน ทั้งนี้เพราะมีความเป็นประจุบวกสูงมาก และมีน้ำหนักโมเลกุลปานกลางจนถึงสูง

2.1.1.6 Polydiallyldimethyl Ammonium Chloride เป็นโพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างเชิงเส้น มีน้ำหนักโมเลกุลช่วงต่ำถึงปานกลาง (น้อยกว่า  $10^6$ ) มีความต้านทานต่อคลอรีนและไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช

2.1.1.7 Dimethyl Aminoalkyl Acrylic และ Methacrylic Ester Polymer เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีความไวในสภาพตัวกลางที่เป็นกรดหรือเบส ใช้เป็นสารรวมตะกอน สารกลุ่มนี้มีราคาค่อนข้างสูง

2.1.1.8 N-Dialkylaminoalkyl Acrylamide Polymer โพลีเมอร์กลุ่มนี้ได้รับความสนใจในการใช้เป็นสารรวมตะกอน เพราะมีเสถียรภาพต่อการไฮโดรไลซิส มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

### 2.1.2 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์สังเคราะห์ที่ให้ประจุลบ (Anionic Polyelectrolytes)

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ประจุลบ โดยทั่วไปเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงสูงถึงสูงมากมักใช้เป็นสารรวมตะกอน โพลีเมอร์ที่มีประจุลบมากและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีพฤติกรรมเป็นสารที่ช่วยกระจายตะกอนในสารละลาย (dispersants) รูปแบบส่วนใหญ่มักเป็นกลุ่ม carboxylate ion ได้แก่พวกโพลีเมอร์ที่มี carboxylate group เช่น Homopoly Acrylic Acid และพวกที่มี Sulfonic Acid Group เช่นเกลือโซเดียมของ Polystyrene

## Sulfonic Acid

### 2.1.3 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุ (Nonionic Polyelectrolytes)

ในการจัดแบ่งสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ สารที่นับว่าไม่มีประจุก็ต่อเมื่อมีหน่วยโมโนเมอร์ที่มีประจุต่ำกว่า 1 % ในสารละลาย โพลีเมอร์เหล่านี้จะทำให้เกิดการรวมตะกอนโดยใช้กลไกการสร้างสะพานเชื่อมเป็นหลัก ในการใช้งานจึงต้องมีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือสูงมาก ตัวอย่างสารรวมตะกอนที่สำคัญได้แก่ Polyethylene Oxide และ Polyacrylamide ส่วน Polyvinyl Pyrrolidone มักถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร

### 2.1.4 สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ทั้งประจุบวกและลบ (Polyampholytes)

สารกลุ่มนี้เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่มีทั้งกลุ่มที่มีสภาพเป็นกรดและเบส มักจะให้ประจุบวกที่พีเอชต่ำ ให้ประจุลบที่พีเอชสูง และเป็นกลางทางประจุที่ Isoelectric pH ตัวอย่างเช่น สารรวมตะกอนที่เรียกว่า Switterion Flocculant ซึ่งประกอบด้วยโมโนเมอร์ที่ประกอบด้วยประจุบวกหรือลบอยู่มากมายในโมเลกุล

## 2.2 กลไกการทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์

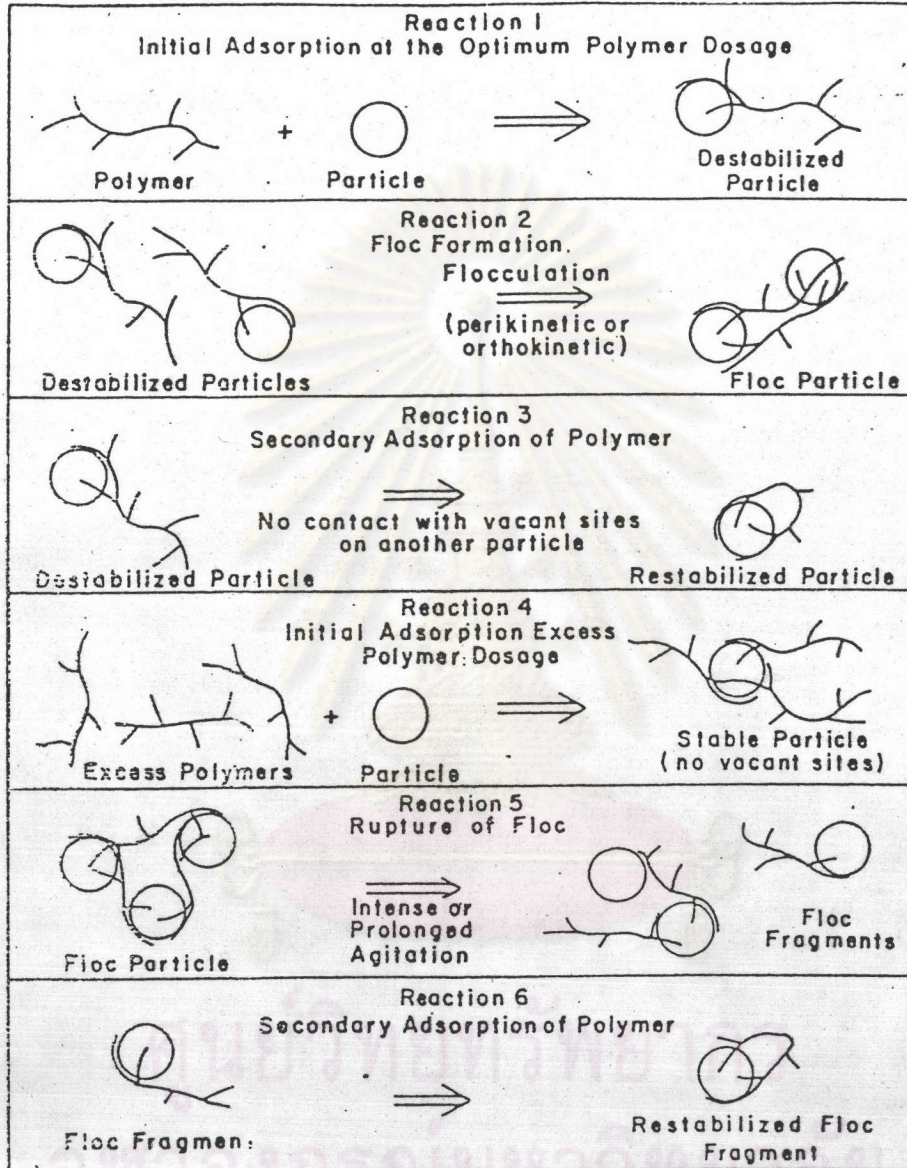
การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ เป็นกลไกที่ค่อนข้างซับซ้อนและไม่สามารถครอบคลุมโดยกลไกหนึ่งโดยเฉพาะ แต่จะเกิดขึ้นจากอิทธิพลอันเป็นผลเนื่องจากประจุ การเกาะติด หรือปฏิกิริยาเคมีในโมเลกุล ลักษณะเฉพาะของแต่ละระบบและสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เติมลงไป แต่อาจกล่าวได้ว่ามีกลไกหลัก 2 กลไกคือ กลไกการสร้างสะพาน (Bridging Mechanism) โดยที่ส่วนของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ติดอยู่บนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทำตัวเป็นสะพานต่อเชื่อมอนุภาคเหล่านั้นเข้าด้วยกัน และ กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Patch Mechanism) ซึ่งเป็นผลที่เกี่ยวเนื่องกับประจุ โดยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับอนุภาค เกาะติดบนอนุภาค จึงลดแรงผลักระหว่างอนุภาค ทำให้อนุภาคเข้าใกล้ชิดกัน

### 2.2.1 กลไกการสร้างสะพาน (Bridging Mechanism)

กลไกการสร้างสะพานอธิบายได้ดังรูปที่ 2.1 เพื่อให้โมเลกุลของพอลิอิเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพในการทำละลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ จะต้องมียึดประกอบหรือกลุ่มสารเคมีที่สามารถเกิดปฏิกิริยาจับตำแหน่งต่างๆบนพื้นผิวอนุภาค ทำให้โมเลกุลของพอลิอิเล็กโทรไลต์สามารถเกาะติดบนอนุภาคคอลลอยด์ได้หลายตำแหน่ง ดังปฏิกิริยาที่ 1 การเกาะติดอาจเป็นผลเนื่องจากประจุที่ต่างกัน หรือเป็นแรงของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างประจุที่เหมือนกันของพอลิอิเล็กโทรไลต์และคอลลอยด์ อนุภาคที่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์เกาะติดอยู่ถือได้ว่าเป็นอนุภาคที่สูญเสียเสถียรภาพแล้ว (destabilized particle) ปลายโมเลกุลส่วนที่เหลือของพอลิอิเล็กโทรไลต์จะแผ่ขยายเข้าสู่เนื้อสารละลาย สามารถจับอนุภาคอื่นๆโดยมีพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นสะพานเชื่อม ดังปฏิกิริยาที่ 2 การต่อเชื่อมด้วยพอลิอิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อพอลิอิเล็กโทรไลต์และมีตำแหน่งว่างบนผิวอนุภาค ถ้าปลายอิสระของพอลิอิเล็กโทรไลต์ไม่มีที่จับเกาะบนอนุภาคตัวอื่น ในที่สุดปลายอิสระนั้นก็จับเกาะอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 3 ทำให้ไม่มีปลายอิสระไว้จับบนอนุภาคตัวอื่น และทำให้มีตำแหน่งว่างบนอนุภาคสำหรับยึดเกาะน้อยลง เป็นอนุภาคที่มีเสถียรภาพกลับคืนมาใหม่ (restabilized particle) การใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์มากเกินไป ทำให้พอลิอิเล็กโทรไลต์หลายโมเลกุลจับบนอนุภาคคอลลอยด์ จนกระทั่งไม่มีที่ว่างบนอนุภาคสำหรับพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่อยู่บนอนุภาคอื่นๆ ทำให้อนุภาคนั้นกลับมีเสถียรภาพคืนมาใหม่ ดังปฏิกิริยาที่ 4 และหากมีการกวนผสมที่รุนแรงหรือนานเกินไป จะเกิดการทำลายฟลอคที่เกิดขึ้นแล้วแตกออกเป็น ส่วนๆดังปฏิกิริยาที่ 5 และอาจทำให้ปลายอิสระของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์เกาะจับบนอนุภาคเดิม ดังปฏิกิริยาที่ 6 ทำให้เสถียรภาพคอลลอยด์กลับคืนมาใหม่

ศูนย์วิทยพัชยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

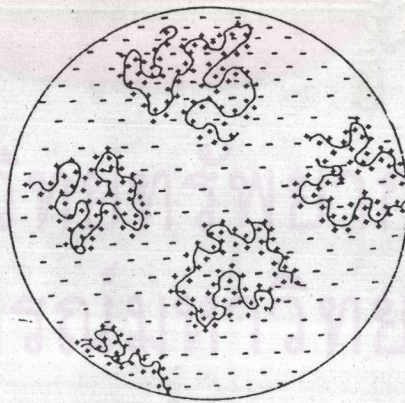
รูปที่ 2.1 การทำลายเสถียรภาพอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกการสร้างสะพานโดยสารพอลิอิเล็กโทรไลต์



### 2.2.2 กลไกการเกิดหย่อมประจุไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Patch Mechanism)

กลไกนี้มีนักวิจัยหลายท่าน (2) ใช้อธิบายพฤติกรรมการเกาะติดหรือทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ในกรณีที่ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุตรงข้ามกับ อนุภาคคอลลอยด์ หรือสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุลบในการเป็นสารช่วยรวมตะกอนหลังจากที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพด้วยสารรวมตะกอนจำพวกโลหะมาก่อนแล้ว และเกิดปรากฏการณ์แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ค่อนข้างรุนแรง ซึ่งการเกิดสะพานเชื่อมบนอนุภาคเพียงไม่กี่ตำแหน่ง ไม่น่าที่จะส่งผลเช่นนั้น

โดยที่ตามปกติอนุภาคต่างๆ ในสับสเตรต (substrate) มักมีตำแหน่งที่มีประจุบนพื้นผิวที่ค่อนข้างจะคงตัว เมื่อโมเลกุลของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกถูกเติมลงไป ในสับสเตรตนั้น จะเกิดการเกาะติดบนพื้นผิวอนุภาคผ่านพันธะทางไฟฟ้าสถิตย์ พอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกและมีความหนาแน่นของประจุสูงมาก และมากกว่าประจุบนพื้นผิวอนุภาค การเกาะติดของพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่พื้นผิวอนุภาค และจะทำลายประจุลบ ไม่เพียงแต่บริเวณที่เกาะติดเท่านั้น แต่จะรวมถึงส่วนอื่นหรือทั้งหมดบนผิวอนุภาคได้ แล้วก่อตัวเป็นประจุบวกห่อล้อมขอบเขตของตำแหน่งประจุลบ ดังรูปที่ 2.2 ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างอนุภาคโดยตรงและลดแรงผลักระหว่างอนุภาคเกิดการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ขึ้นได้ โดยที่อนุภาคที่อยู่ใกล้ชิดกัน และอยู่ในแนวเดียวกันสามารถให้แรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์ที่รุนแรง



รูปที่ 2.2 ความเป็นไปได้ในการจัดเรียงตัวของสารพอลิอิเล็กโทรไลต์บนอนุภาคที่มีความหนาแน่นของประจุลบต่ำ

## 2.3 เครื่องกวนสถิติ

เครื่องกวนสถิติเป็นอุปกรณ์การผสมของของไหลในเส้นท่อรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาศัยการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในท่อเป็นตัวทำให้เกิดการแบ่งแยกกระแสของไหล ทำให้เกิดการแพร่กระจาย (distribution) และการกระจายตัว (dispersion) โครงสร้างประกอบด้วยชิ้นส่วนมากมายต่อเรียงกัน และยึดติดอยู่ภายในท่อ หากชิ้นส่วนดังกล่าวก่อให้เกิดการแบ่งแยกกระแสของของไหลมากขึ้น ก็จะทำให้ของไหลสามารถเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอได้ดีขึ้น แต่จะทำให้มีช่องว่างทางผ่านของของไหลเล็กลง และเกิดความเสียดทานของผนังท่อในระบบมากขึ้น ค่าความดันลดในระบบมีสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าคุณสมบัติความเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอของของไหลในการผสมจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการ รวมทั้งค่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของเครื่องกวนสถิติด้วย

รูปแบบของเครื่องกวนสถิติโดยทั่วไปมี 3 ประเภทหลักดังนี้คือ

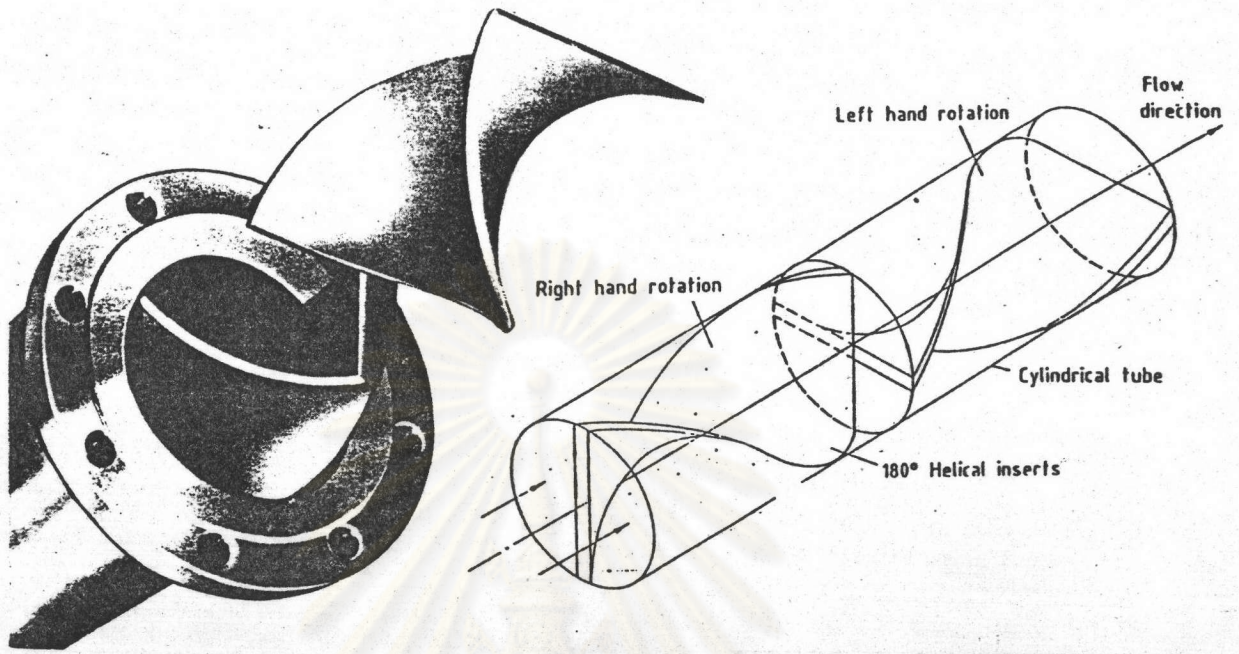
2.3.1 Kenics Mixer ประกอบด้วยชิ้นส่วนที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางตัดเป็นเกลียวจำนวนมากต่อเรียงกันภายในท่อ โดยชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะบิดหมุนไปในทิศตรงกันข้ามสลับกันไปตามรูปที่ 2.3 การไหลของของไหลเมื่อผ่านชิ้นส่วนแรกจะมีการแบ่งกระแสของไหลออกเป็นสองสายเมื่อเคลื่อนตัวรอบหนึ่งชิ้นส่วนหรือครบ  $180^\circ$  เกิดการรวมตัวกันหนึ่งครั้ง และเมื่อไหลผ่าน  $N$  ชิ้นส่วน กระแสของของไหลจะมีการแบ่งและปะทะกันรวม  $2^N$  ครั้ง นั่นคือเกิดการผสมผสานกัน  $2^N$  ครั้ง เช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2.4

2.3.2 Ross ISG Mixer รูปแบบนี้จะมีส่วนของผนังชิ้นส่วนที่ถูกเจาะรู และเชื่อมต่อกันเป็นโพรงไปยังชิ้นส่วนถัดไปตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดเป็นเส้นทางไหลวน ทั้งตามแนวรัศมีและตามแนวเส้นรอบวง

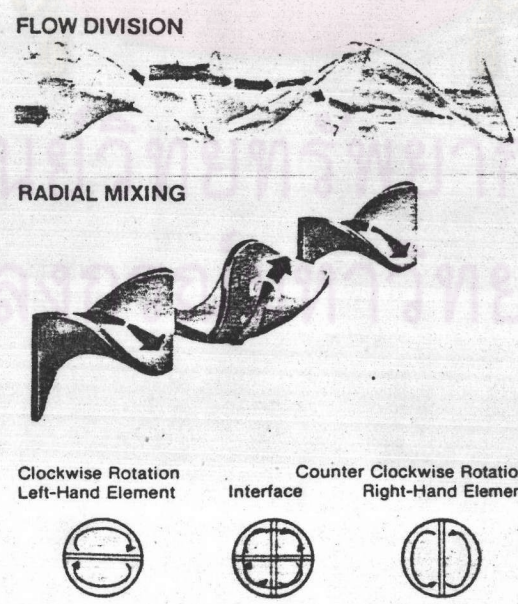
2.3.3 Sulzer SMV Mixer เป็นรูปแบบที่ใช้แผ่นโลหะบางตัดเป็นคลื่นและวางซ้อนกันจนมีลักษณะคล้ายลูกฟุตบอลอยู่ภายในท่อ ดังรูปที่ 2.6 แบบนี้มีข้อดีที่การผสมจะเกิดชิ้นรอบๆ หลอดลูกคลื่นที่เกิดจากรูปร่างและการวางซ้อนกันไปมาด้วย

เครื่องกวนสถิติแบบอื่นๆ จะมีการเปลี่ยนรูปร่างลักษณะการจัดเรียง โดยใช้รูปแบบทั้งสามประเภทที่กล่าวมานี้เป็นหลัก โดยพยายามให้มีข้อเด่นทั้งในเชิงการออกแบบจัดสร้าง และการติดตั้งให้ดียิ่งขึ้น

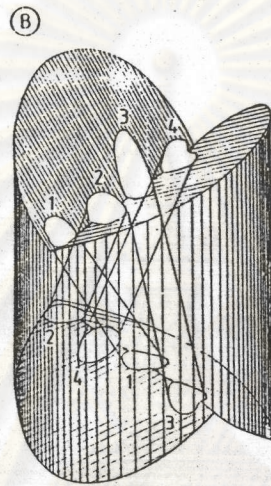




รูปที่ 2.3 เครื่องกวนสัณฐานแบบ Kenics Mixer (5), (6)



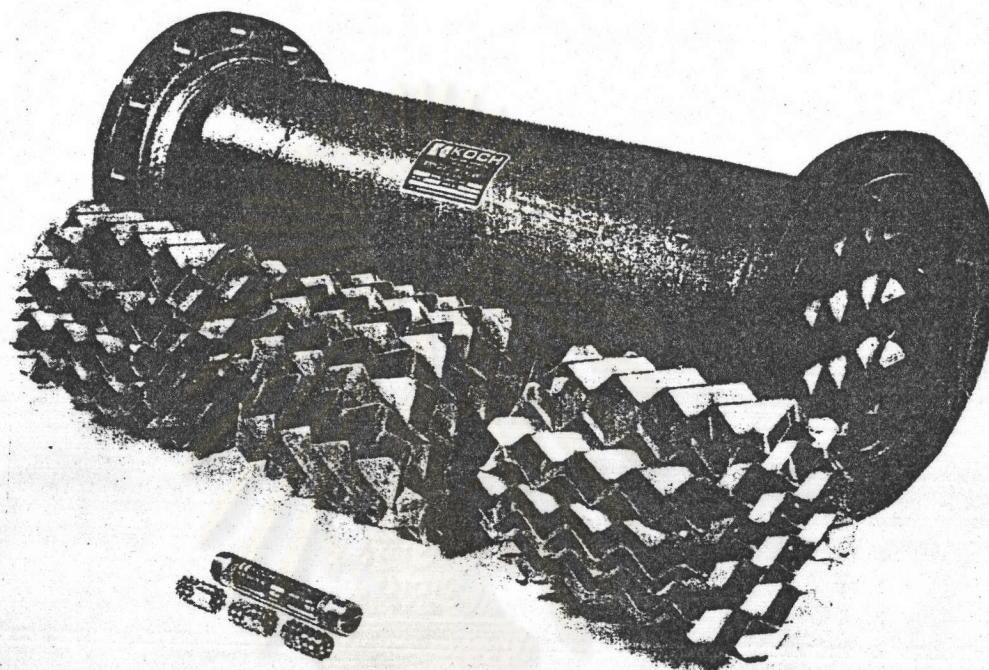
รูปที่ 2.4 การไหลและการผสมของของไหลเมื่อผ่านเครื่องกวนสัณฐานแบบ Kenics Mixer (7)



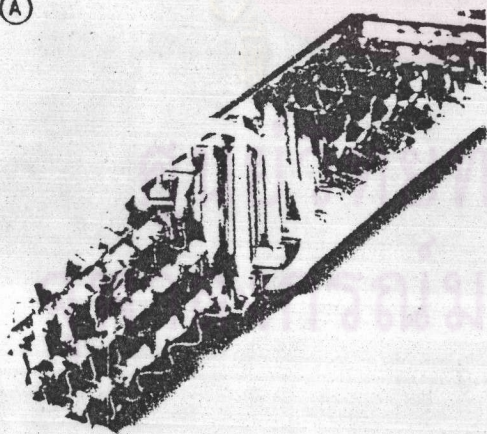
A) Assembly; B) Individual element

รูปที่ 2.5 เครื่องกวนสลิคซ์แบบ Ross ISG Mixer (6)

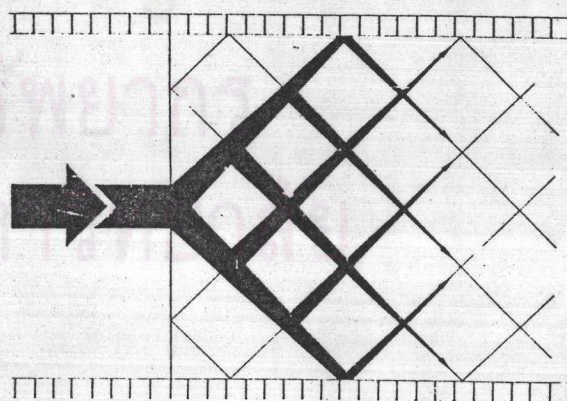
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



A)



B)



A) Sulzer mixing elements  
B) Operating principle of the Sulzer mixing element

รูปที่ 2.6 เครื่องกวนสตีตย์แบบ Sulzer Mixer (2),(6)

## 2.4 การกรองโดยตรง

เนื่องจากการกรองโดยตรงเป็นระบบซึ่งตัดขั้นตอนการตกตะกอน และหรือการกวนช้า ดังได้กล่าวมาแล้ว การกรองโดยตรงจึงต่างจากระบบกรองน้ำโดยทั่วไป โดยที่อนุภาคต่างๆ จะเข้าสู่ชั้นกรองโดยตรง อาศัยช่องว่างในชั้นกรองเป็นส่วนสร้างโอกาสสัมผัสของอนุภาค หรือที่เรียกว่า การกรองสัมผัส (Contact Flocculation Filtration) จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ประสิทธิภาพของการกรองน้ำขึ้นกับชั้นกรองเป็นปัจจัยหลัก หากชั้นกรองมีขนาดของเม็ดสารกรองเล็กจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสำหรับการสัมผัสและเกาะจับสูงสามารถกำจัดอนุภาคได้ดี แต่ขณะเดียวกันก็มีช่องว่างในชั้นกรองน้อยทำให้มีการอุดตันสูงและอายุการกรองต่ำ ดังนั้นชั้นกรองแบบชั้นเดียวจึงไม่เหมาะสมสำหรับการกรองโดยตรง (8) ในการดำเนินการเพื่อการผลิตน้ำที่มีคุณภาพโดยไม่เกิดการอุดตันเร็วเกินไป จึงมีทางเลือกคือ การใช้ชั้นกรองแบบหลายชั้น เพื่อให้ลักษณะการกระจายของสารกรองเป็นแบบหยาบ-ละเอียด หรือโดยการเปลี่ยนทิศทางการไหลของน้ำเป็นแบบไหลขึ้น (Upflow Filtration)

### 2.4.1 กลไกของระบบการกรองโดยตรง

กระบวนการกรองโดยตรงประกอบด้วย 2 กระบวนการต่อเนื่องกันคือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน และกระบวนการกรอง

#### 2.4.1.1 กระบวนการโคแอกกูเลชัน

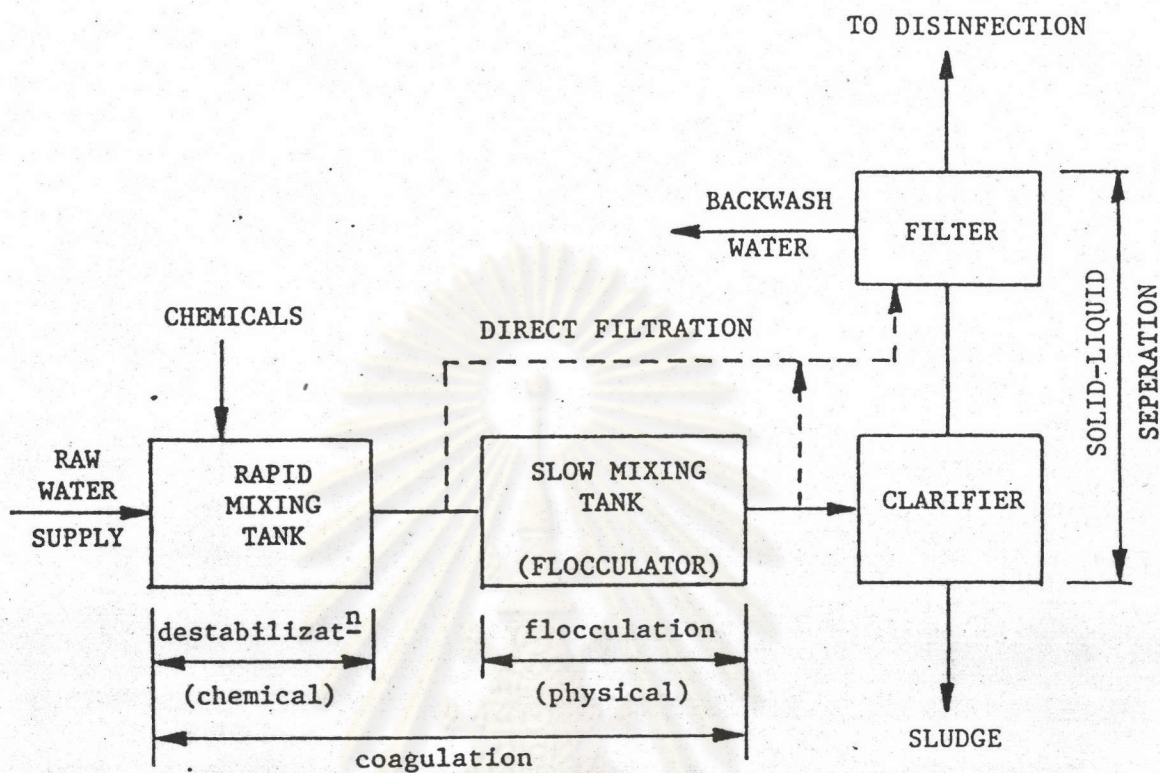
กระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ขั้นตอนได้แก่ การกวนเร็วและการกวนช้า การกวนเร็วมีการเติมสารเคมี เพื่อทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ ส่วนการกวนช้ามีเพื่อทำหน้าที่สร้างสัมผัสของอนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพ แล้วรวมตัวกันเป็นฟล็อก รูปที่ 2.7 แสดงส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชันซึ่งอาจมีหรือไม่มี การกวนช้าก่อนการกรองโดยตรงก็ได้

โคแอกกูเลชันในเส้นท่อ เป็นระบบหนึ่งที่ใช้คู่กับการกรองโดยตรง มักเป็นส่วนสำคัญในการกวนผสมสารเคมีก่อนการกรอง อาจใช้อุปกรณ์เช่น เครื่องกวนในเส้นท่อ (Inline Blender) หรือเครื่องกวนสถิตย์ (Static Mixer) ซึ่งการผสมสารเคมีและน้ำจะเกิดขึ้นรวดเร็วในระดับวินาที มีค่า  $G$  สูงประมาณ  $3,000-5,000$  วินาที<sup>-1</sup> (9)

การใช้สารเคมีในกระบวนการโคแอกกูเลชันมีวิธีการ 3 วิธีคือ

- ก. ใช้สารรวมตะกอนจำพวกโลหะ (metal coagulant) เช่นสารส้มเพียงอย่างเดียวที่การกวนเร็ว การกวนช้า หรือโดยตรงก่อนการกรอง
- ข. ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีประจุหรือแอกทิเวตเตดซิลิกา ร่วมกับสารรวมตะกอนจำพวกโลหะก่อนการกรอง
- ค. ใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก เป็นสารรวมตะกอน

เพียงลำพัง



รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบต่างๆของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นักวิจัยพบว่า การใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์มีประสิทธิภาพมากกว่าในแง่ความสามารถในการกำจัดอนุภาคคอลลอยด์ และมีโอกาสการเกิดความขุ่นรั้นน้อยกว่าการใช้สารส้ม (2) แต่ต้องใช้ชั้นกรองที่หยาบกว่าเพื่อป้องกันปัญหาการอุดตัน

ฟล็อกที่ต้องการสำหรับการกรองโดยตรง ต้องเป็นฟล็อกที่แข็งแรง มีขนาดเล็กและเป็นแบบที่เรียกว่า pin point floc (3) เพื่อที่จะทะลุทะลวงเข้าไปในชั้นกรองโดยมีความคงทนต่อแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำ และใช้ช่องว่างในชั้นกรองน้อยเพื่อยืดอายุการกรอง และลดการเกิดความขุ่นรั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้เอง ขั้นตอนการกวนช้าจึงแทบไม่มีความจำเป็นสำหรับการกรองโดยตรง (2)

2.4.1.2 กระบวนการกรอง

กระบวนการกรองจะทำหน้าที่เก็บกักฟล็อก หรือสารแขวนลอยที่ไร้เสถียรภาพไว้ภายในชั้นกรองด้วยกลไกทางกายภาพและทางเคมี ประกอบด้วยกลไกหลัก 2 กลไกคือ กลไกการเคลื่อนย้าย และกลไกการจับสารแขวนลอย

ก. กลไกการเคลื่อนย้าย (Transport Mechanism)

กลไกการเคลื่อนย้าย เป็นการกำจัดสารแขวนลอยจากเส้นทางการไหลของของไหล โดยการทำให้อนุภาคเหล่านั้น เข้าใกล้ชิดกันหรือเข้าใกล้กับเม็ดสารกรอง ขึ้นกับปัจจัยทางกายภาพ-ชลศาสตร์ (phisco hydraulic facter)(2) กล่าวคือขึ้นกับขนาดและความหนาแน่นของสารกรอง อัตราการกรอง และความหนืดของของเหลว สำหรับการกรองโดยตรงที่ไม่มีฟล็อกเคลือบชั้นก่อนการกรอง การรวมตะกอนจะเกิดขึ้นในระหว่างกลไกการเคลื่อนย้าย โดยต้องการให้ฟล็อกขนาดใหญ่ปรากฏขึ้นในชั้นกรอง ซึ่งเป็นวิธีการสร้างสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ที่ผ่านการทำลายเสถียรภาพแล้ววิธีหนึ่ง

รูปที่ 2.8 เป็นกลไกการเคลื่อนย้ายอนุภาคสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง เมื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคในชั้นกรองตามขนาดของอนุภาคแขวนลอย สามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบคือ แบบแรกเป็นการเคลื่อนที่ตามธรรมชาติของสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (brownian diffusion) ส่วนอีกรูปแบบหนึ่งเป็นการเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ โดยสารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะเบียดเข้าหาสารกรอง (interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างของสารกรอง หรือเกิดจากแรงกระทำทางชลศาสตร์เข้าปะทะกับเม็ดสารกรอง (hydrodynamic) แต่สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรอง (sedimentation) หรือเข้าหาสารกรองด้วยแรงเฉื่อยในอนุภาค (inertia) ดังนั้นขนาดและการกระจายขนาดของสารแขวนลอย (size distribution) จึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกลไกการเคลื่อนย้าย ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอย ทั้งนี้จะพบว่าอนุภาคขนาดประมาณ 1 ไมครอนจะมีประสิทธิภาพการเคลื่อนย้ายต่ำสุด นั่นคือเป็นอนุภาคที่กำจัดออกยากที่สุดนั่นเอง

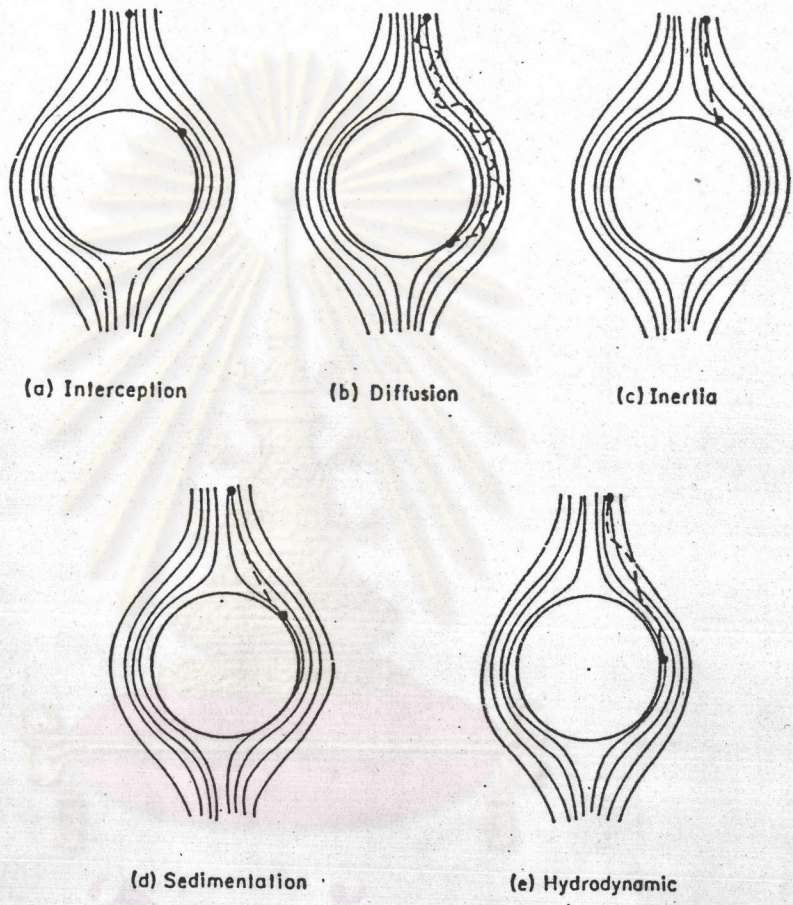
ข. กลไกการจับสารแขวนลอย (Attachment Mechanism)

การเกาะติดของอนุภาคแขวนลอยบนพื้นผิวเม็ดสารกรอง หรือสิ่งอื่นที่ติดอยู่บนสารกรองอยู่แล้ว เป็นกลไกทางกายภาพ-เคมี ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นผิวและอนุภาค อาศัยกลไกแบบที่ใช้ในกระบวนการโคแอกูเลชันด้วยคือ การดูดติดผิว และการทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคเพื่อทำให้เกิดการทำลายประจุและหรือเปลี่ยนประจุลบให้เป็นประจุบวกจะช่วยทำให้การกรองน้ำมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากการที่สารกรองและคอลลอยด์มีประจุต่างกัน จะช่วยส่งเสริมการดูดติดผิวให้เกิดขึ้นอย่างเห็นวามแน่นอน

รูปที่ 2.10 เป็นการสรุปกลไกแบบต่างๆของการกรองน้ำที่สามารถกำจัดสารแขวนลอยได้ โดยที่สารแขวนลอยขนาดใหญ่หรือฟล็อกที่แข็งแรงจะสามารถตกตะกอนบนสารกรอง หรือติดค้างอยู่ในช่องว่างระหว่างสารกรอง แต่สารแขวนลอยขนาดเล็กต้องอาศัยแรงที่เกิดจากการแพร่กระจาย (diffusion force) และกลไกแบบดูดติดผิวที่มีการทำลายประจุและหรือการเปลี่ยนประจุเป็นสำคัญ

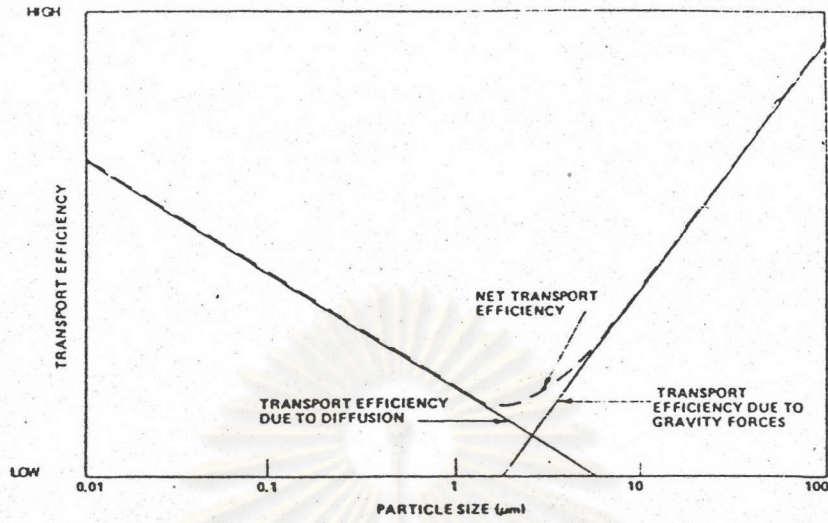
ในระหว่างการกรองน้ำ เมื่อชั้นกรองมีความเป็ดหรืออุดตันมากขึ้น แรงที่เกิดจากการไหลของน้ำจะมีค่าสูงขึ้นตาม ทำให้ตะกอนบางส่วนหลุดออกจากชั้นกรองได้ด้วยกลไกที่เรียกว่า Detachment Mechanism หรืออาจเกิดจากการเพิ่มอัตราการกรองอย่างกระทันหันทำให้น้ำที่กรองได้มีตะกอนขุ่นติดออกมาและอาจเกิดเนื่องจากพื้นที่ว่างบนสารกรองถูกใช้ไปมากจนเกือบหมด ทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเกาะติดบนผิวชั้นกรองได้น้อย จึงมีการรื้อของสารแขวนลอยออกจากชั้นกรองเพิ่มขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

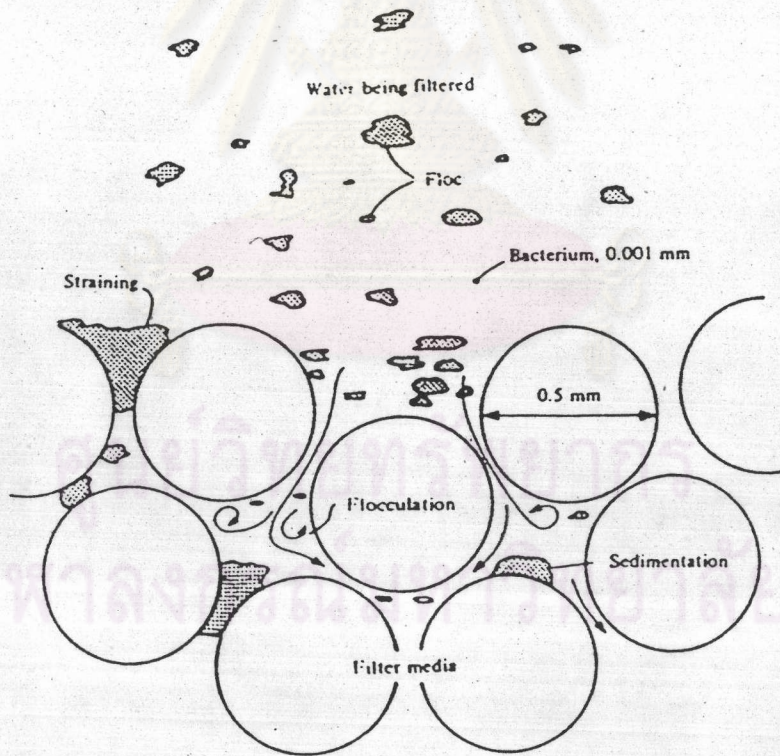


รูปที่ 2.8 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง





รูปที่ 2.9 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยแปรผันกับขนาดอนุภาค (12)



รูปที่ 2.10 กลไกการกรองน้ำในเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (12)

## 2.4.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกรองโดยตรง

2.4.2.1 คุณภาพน้ำดิบ ในเชิงการทำงานแล้ว น้ำดิบที่มีอนุภาคแขวนลอยมากเกินไป จะก่อให้เกิดการอุดตันในชั้นทรายก่อนการเกิดความขุ่นเร็ว (2) โดยทั่วไปแล้วน้ำดิบที่เหมาะสมกับการกรองโดยตรง ควรมีลักษณะดังนี้คือ ความขุ่นและสีแต่ละอย่างไม่เกิน 25 หน่วย (JTU, FTU) หากสีมีค่าต่ำค่าความขุ่นสูงสุดไม่ควรเกิน 200 หน่วย และหากค่าความขุ่นต่ำค่าสูงสุดของสีก็ไม่ควรเกิน 100 หน่วย ส่วน Kawamura (13) จำกัดความขุ่นไว้ที่ระดับ 5-10 หน่วย แต่หากมีพวกเส้นใยกระดาษหรือไดอะตอมในน้ำระดับที่เกินกว่า 1,000 ASU/ml (areal standard unit per millilitre) จะส่งผลอย่างมากต่ออายุการกรอง และจำเป็นต้องมีการตกตะกอนก่อนการกรอง (2, 14) นอกจากนี้หากไดอะตอมมากกว่า 200 ASU/ml จำเป็นต้องใช้สารกรองที่หยาบขึ้นในชั้นบน ส่วนปริมาณโคลิฟอร์ม 90 MPN/100 ml เป็นน้ำที่ไม่เหมาะสมสำหรับการกรองโดยตรง

2.4.2.2 สารกรอง การใช้ชั้นกรองแบบชั้นเดียวไม่เหมาะสำหรับการกรองโดยตรง (2) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการกรองโดยตรงทั่วไปในอัตรา 10-18 ม/ชม การใช้ชั้นกรองแบบสองชั้นหรือหลายชั้นกรองจะใช้งานได้ดีกว่า (2, 15, 16, 17, 18) การวิจัยของ Culp (2) ได้เปรียบเทียบการใช้ชั้นกรองแบบ 4 และ 2 ชั้นกรอง พบว่าแบบหลังสามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพเท่ากับแบบแรก แต่ใช้สารเคมีมากกว่า และมีอายุการกรองสั้นกว่า Shea (16) วิจัยลักษณะเดียวกันพบว่า การใช้ชั้นกรองแบบสองชั้นที่หยาบและมีขนาดสม่ำเสมอจะให้ผลดีกว่าสารกรองที่ละเอียดและมีการกระจายขนาดดี นักวิจัยผู้นี้แนะนำว่าชั้นกรองที่เหมาะสมควรประกอบด้วย ถ่านแอนทราไซท์ขนาด 2.5 มม สปส.ความสม่ำเสมอ 1.32 ทน 0.40 ม และทรายขนาด 1.1 มม สปส.ความสม่ำเสมอ 1.23 ทน 0.15 ม Hutchison & Foley (14) พบว่าการใช้การกรองโดยตรงกับน้ำที่มีไดอะตอมโดยใช้ชั้นกรองแบบ 2 ชั้น ประกอบด้วย ถ่านแอนทราไซท์ทน 0.45 ม ทรายทน 0.30 ม สามารถกำจัดน้ำที่มีไดอะตอมได้ถึง 2,500 ASU/ml ที่อัตราการกรอง 12 ม/ชม และอายุการกรอง 12 ชม

2.4.2.3 โคแอกูเลชัน เป็นการเตรียมน้ำก่อนการกรอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองน้ำ Kawamura (13) รายงานว่าชนิดและปริมาณของสารรวมตะกอนที่ใช้จะแตกต่างกันสำหรับน้ำดิบแต่ละประเภท และขึ้นกับชนิดของสารที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำเกลืออลูมิเนียมเป็นสารรวมตะกอนที่นำมาใช้สำหรับการกรองโดยตรง เช่นสารส้มในปริมาณ 5-10 มก/ล (17) สามารถใช้ได้ผลในการกำจัดความขุ่น แต่หากใช้สารพอลิอิเล็กโทรไลต์อาจใช้ในปริมาณเพียง 0.1-5.0 มก/ล (2) หรือน้อยกว่านี้ถ้าใช้ร่วมกับสารส้มในการกรองน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์

สารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับการกรองโดยตรง เป็นสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงต่ำถึงกลาง (10,000-100,000) (18) แต่มีความหนาแน่นของประจุสูง การใช้งานสามารถกำจัดความขุ่นต่ำถึงสูงเมื่อค่า

$G > 400$  วินาที<sup>-1</sup> ที่เวลา  $< 2$  วินาที ค่า  $G$  ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง  $300-800$  วินาที<sup>-1</sup> ที่เวลา  $< 2$  ถึง 8 วินาที ค่า  $GT = 9.6 \times 10^4$  (19) ขณะที่ Yeh (18) รายงานไว้เท่ากับ  $1.2 \times 10^5$  และ Treeweek (20) รายงานไว้เท่ากับ  $4.2 \times 10^4$  ส่วนการกวนซ้ำ Yeh (18) , Culp (8) , Adin & Rebnun (10) ได้รายงานว่าเป็นส่วนที่เกินจำเป็นสำหรับการกรองโดยตรงแต่ก็มีนักวิจัยหลายท่านให้ความเห็นขัดแย้งกัน (14, 20, 21, 22)

2.4.2.4 อัตราการกรอง แม้ว่าอัตราการกรองสามารถกระทำได้ถึง 20 ม/ชม แต่โดยทั่วไปแล้วอัตราการกรองที่เหมาะสมคือ 10 ม/ชม (8, 13, 15, 21) ทั้งนี้เพื่อให้ระบบสามารถรับการเปลี่ยนแปลงความขุ่น และมีความยืดหยุ่นในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามปัจจัยสำคัญในการกำหนดอัตราการกรองได้แก่ คุณภาพของน้ำดิบและคุณภาพน้ำที่ต้องการ ถ้าอัตราการกรองต่ำ ประสิทธิภาพของเครื่องกรองจะสูง แต่ก็อาจกรองน้ำดิบในอัตราที่สูง โดยที่น้ำออกมีคุณภาพดีได้เช่นกัน หากมีการเตรียมน้ำก่อนการกรองที่ดี

2.4.2.5 การล้างย้อน การล้างย้อนเป็นปัจจัยกำหนดสมรรถนะของเครื่องกรองหากการล้างย้อนไม่พอเพียง มีการสะสมของสารแขวนลอยและสิ่งสกปรกอื่นๆ ในชั้นกรอง จะทำให้ไม่สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพได้ ในการล้างย้อน ปัจจัยที่จะทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกมามี 2 ส่วนคือ แรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของน้ำและการขัดสีระหว่างเม็ดสารกรอง Amirtharajah (23) วิเคราะห์ว่าในกรณีที่ใช้ทรายเป็นสารกรอง การล้างย้อนจะได้ผลดีที่สุดเมื่อระดับการขยายตัวเท่ากับ 30-40 %

#### 2.4.3 ข้อดีและข้อเสียของระบบเมื่อเทียบกับระบบอื่น

ข้อดี และ ข้อเสียของระบบการกรองโดยตรง กับ ระบบกรองน้ำแบบธรรมดา เปรียบเทียบกัน ได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อเปรียบเทียบระบบการกรองโดยตรงกับระบบกรองน้ำแบบธรรมดา

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>ไม่จำเป็นต้องมีถังตกตะกอนและหรือถังกวนซ้ำ ทำให้ประหยัดกว่าถึง 30-40 % หากน้ำดิบมีคุณภาพเหมาะสม (2)</li> <li>ประหยัดสารเคมีได้มากถึง 10-30 % เพื่อการเตรียมน้ำก่อนการกรอง (8)</li> <li>ลดค่าดูแลรักษาระบบ เนื่องจากใช้อุปกรณ์น้อยลง และลดปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัด เพราะจะมีจากการล้างย้อนเท่านั้น</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>อายุการกรองสั้นกว่าระบบธรรมดา</li> <li>ต้องการปริมาณน้ำล้างย้อนมากกว่า (8)</li> <li>ผู้ดูแลจำเป็นต้องควบคุมปริมาณสารเคมีที่ใช้ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม</li> </ol>

## 2.5 มาตรฐานความขุ่นของน้ำดื่ม

องค์กรที่รับผิดชอบในการดูแลคุณภาพน้ำหลายแห่งจากนานาประเทศ ได้กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำดื่มในส่วนของความขุ่นไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานความขุ่นของน้ำดื่มจากนานาประเทศ (24)

หน่วยงาน/ประเทศ	ระดับมาตรฐาน	ค่าความขุ่น (TU)
การประปานครหลวง/ไทย	Maximum Contaminant	5
U.S. EPA (1980)	Maximum Contaminant	1
WHO (International)	Recommended	5
	Maximum Permissible	25
European Community	Guide	0.4
Netherlands (1981)	Recommended	0.5
Norways	Recommended	< 0.5
AWWA/ U.S.A	Recommended	1

## 2.6 การศึกษาที่ผ่านมา

นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาการใช้สารพอลิเล็กโทรไลต์ ในระบบการกรองโดยตรง กล่าวโดยสรุปได้ว่าระบบการกรองโดยตรงสามารถกรองน้ำที่มีความขุ่นสูงได้ โดยใช้สารพอลิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวก และชั้นกรองแบบสองชั้นหรือหลายชั้นกรอง สามารถผลิตน้ำที่มีคุณภาพได้ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การศึกษาเกี่ยวกับสารพอลิอิเล็กโทรไลต์กับระบบการกรองโดยตรงที่ผ่านมา

เอกสารอ้างอิง	ความขุ่น น้ำดิบ  NTU	สารพอลิอิเล็กโทรไลต์		G  วินาที <sup>-1</sup>	สารกรอง				อัตรากรอง ม/ชม	อายุกรอง ชม	จุดสิ้นสุด	หมายเหตุ
		ชนิด	ปริมาณ มก/ล		ประเภท	สูง ชม.	ES. มม.	UC มม.				
Adin A. (10)	-	cat-PE	0.05-0.06	-	แอนทราไซท์ ทราย	-	1.21	1.17	>20	-	-	-
Letterman, R.D. (25)	32 FTU	cat-PE	-	700 & 25	แอนทราไซท์ ทราย	46	1.71	1.16	6.1-19.3	-	0.3 FTU	G=700 เกิดความขุ่นเร็ว G=25 เกิดการอุดตัน
Stump V.L. (19)	80 FTU	cat-PE	1.5-5.0	400 <2 นาที	กรวด การ์เน็ต แอนทราไซท์ และทราย	6.25 5.00 38.75	-	-	12.2	-	1 NTU	-
McCormic R.F. (26)	<10	cat-PE	-	3 นาที กวนเร็ว	แอนทราไซท์ ทราย	50.8 25.4	1.3	-	12.2	-	-	-
Westerhoff G.W. (27)	1-100	-	-	-	-	-	-	-	-	18	0.1-0.3 NTU	-

ตารางที่ 2.4 (ต่อ)

เอกสารอ้างอิง	ความขุ่น น้ำดิบ  NTU	สารพอลิอิเล็กโทรไลต์		G  วินาที <sup>-1</sup>	สารกรอง				อัตรากรอง ม/ชม	อายุกรอง ชม	จุดสิ้นสุด	หมายเหตุ
		ชนิด	ปริมาณ มก/ล		ประเภท	สูง ชม.	ES. มม.	UC มม.				
Digiano F.A. (28)	6-15	cat-PE	7	-	-	-	-	-	14.7	6.5-12.5	1	กำจัดสีได้ 66-83 % THMFP <sup>(1)</sup> 45-55 %
Yeh H.H. (18)	20 (เนนโทไนท์)	cat-PE	0.3-0.5	300-650 3-8 นาที	ทราย	15.2	1.00	1.2	5.04-8.64	-	-	-
McCormic R.F. (29)	1.2-24	สารส้ม & PE	-	3 นาที กวนเร็ว	ทราย	51	1.3	-	12.6	>8	-	สามารถผลิตน้ำที่มี ความขุ่นต่ำถึง 0.1 NTU
Kieth C.E. (30)	>3.5 <3.5	PE ดิน & PE	-	-	-	-	-	-	17.1	-	-	-
Tanaka T.S. (31)	5 มก/ล คาโอลิน	cat-PE	-	-	แอนทราไซท์ ทราย	50.8 20.3	1.26 0.51	1.42 1.32	-	-	-	ทดสอบเบื้องต้นโดยการ หาค่าดัชนีการกรอง

(1) THMFP = TRIHALOMETHANE FORMATION POTENTIAL