

วท.

# เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

เรื่อง

## เทคโนโลยีการผลิตน้ำดื่ม

วันที่ 29-30 พฤษภาคม 2545

ณ ห้องประชุม 4 อาคาร 1 วท.

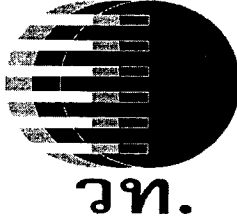
663.6

กรฝ

จัดโดย

ฝ่ายฝึกอบรม

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.)



# เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ

เรื่อง

## เทคโนโลยีการผลิตน้ำดื่ม

ฝ่ายฝึกอบรม



ฝ่ายฝึกอบรม วท.

TRAINING DEPARTMENT : TISTR

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

196 ถนนพหลโยธิน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-2579-1121-30, 0-2579-5515, 0-2579-0160 ต่อ 4206-8

โทรสาร 0-2940-7431, 0-2561-4771

<http://www.tistr.or.th>

E-mail : [tistr@tistr.or.th](mailto:tistr@tistr.or.th)

## กำหนดการอบรมเชิงปฏิบัติการเรื่อง

### เทคโนโลยีการผลิตน้ำดื่ม

วันที่ 29-30 เมษายน 2545 เวลา 08.30-16.30 น.

ณ ห้องประชุม 4 อาคาร 1 วท.

#### วันจันทร์ที่ 29 เมษายน 2545

08.30-09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00-10.00 น.	เป้าหมายคุณภาพน้ำที่ต้องการ
10.00-10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง น้ำชา – กาแฟ
10.15-12.00 น.	เทคโนโลยีเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา
12.00-13.00 น.	พักรับประทานอาหาร
13.00-14.30 น.	การกำจัดมลสารอื้ออนในน้ำประปา
14.30-14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง น้ำชา – กาแฟ
14.45-16.30 น.	การฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน โอโซน และรังสีอุลตราไวโอเล็ต

#### วันอังคารที่ 30 เมษายน 2545

08.30-09.00 น.	ลงทะเบียน
09.00-10.00 น.	การกำจัดความขุ่น
10.00-10.15 น.	พักรับประทานอาหารว่าง น้ำชา – กาแฟ
10.15-12.00 น.	การกำจัดความขุ่น (ต่อ)
12.00-13.00 น.	พักรับประทานอาหาร
13.00-14.30 น.	การกรองทราย
14.30-14.45 น.	พักรับประทานอาหารว่าง น้ำชา – กาแฟ
14.45-16.30 น.	การฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม

วิทยากร : ● ผศ.ดร.เชาวลิต รัตนธรรมสกุล

● ผศ.ยุทธนา มหัจฉริยวงศ์

## เป้าหมายคุณภาพน้ำดื่มที่ต้องการ

ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

เป้าหมายคุณภาพน้ำดื่มที่ต้องการสำหรับน้ำประปานั้นจะต้องมีความปลอดภัยต่อสุขภาพอนามัยของผู้บริโภคเป็นสำคัญ เนื่องจากแหล่งน้ำประปาในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดินหรือน้ำใต้ดินหลายแห่งมีการปนเปื้อนของน้ำเสียและสิ่งปนเปื้อน นอกจากนี้มาตรฐานน้ำดื่มในต่างประเทศ เช่นสหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่นนั้นจะเคร่งครัดมากยิ่งขึ้น โดยในปี 1986 USEPA ได้ประกาศใช้กฎข้อบังคับการทำความสะอาดน้ำผิวดิน (Surface Water Treatment Rule , SWTR) เพื่อแก้ไขมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัย โดยบังคับให้องค์กรที่ผลิตน้ำสำหรับสาธารณูปโภค ต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและการกรอง อีกทั้งค่ามาตรฐานต่างๆ ของน้ำประปาเคร่งครัดมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels , MCLs) มีค่าต่ำลงมาก ซึ่งในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยอาจจะต้องปรับมาตรฐานในการผลิตน้ำประปาให้สูงขึ้นด้วย คุณภาพน้ำดื่มอาจพิจารณาแยกย่อยออกเป็นทางด้าน คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางแบคทีเรีย ตามลักษณะคุณสมบัติของน้ำดิบตามธรรมชาติ

คุณสมบัติของน้ำดิบตามธรรมชาติ สามารถจำแนกตามปริมาณและชนิดของสารที่เจือปน ได้เป็น 3 ประเภท คือ

- คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติเกี่ยวกับสี กลิ่น รส และความขุ่นของน้ำ
- คุณสมบัติทางเคมี เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับแร่ธาตุและสารต่าง ๆ ที่ละลายอยู่ในน้ำ
- คุณสมบัติทางแบคทีเรีย เป็นคุณสมบัติที่เกี่ยวกับพวกเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์

### 1. คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพ เป็นคุณสมบัติของน้ำที่เกิดขึ้นจากมีสิ่งบางสิ่งมาทำให้คุณสมบัติอันนี้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพนี้เราสามารถจะทราบได้จากประสาทสัมผัสทั้ง 5 ของมนุษย์ และสามารถจะกำจัดออกได้โดยวิธีง่าย ๆ มากกว่าคุณสมบัติด้านอื่น ๆ นอกจากนั้นยังอาจเป็นอันตรายน้อยกว่าคุณสมบัติด้านอื่นถ้าหากมีความจำเป็นต้องบริโภคน้ำนั้น ตัวอย่างเช่น น้ำผิวดิน โดยมากคุณสมบัติทางด้านกายภาพมักจะไม่ค่อยดีนัก เพราะมีตะกอนหรือความขุ่นมากเนื่องจากน้ำได้พัดพาเอาอนุภาคของสารต่าง ๆ บนพื้นดินปะปนมา ซึ่งขึ้นอยู่กับ

ฤดูกาลด้วย เช่น ฤดูฝน น้ำผิวดินจะชุ่มมาก และมีผลกระทบต่อ การปรับปรุงคุณภาพน้ำอย่างมาก ในที่นี้จะขอกล่าวถึงคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำเฉพาะความชุ่มและสีเท่านั้น

### 1.1 ความชุ่ม

ความชุ่มในน้ำผิวดินเกิดจากการสลายตัวของดิน หิน โคลน ออกไซด์ของโลหะที่อยู่ในดิน เยื่อไม้ แพลงตอนและจุลินทรีย์ น้ำที่มาจากอาคารบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสารที่ทำให้เกิดความชุ่มได้มากมายหลายชนิด คอลลอยด์ที่คงตัวมักเกิดจากสบู่ ผงซักฟอก นอกจากนี้ emulsifying agents ก็เป็นตัวทำให้เกิดความชุ่มด้วย

เราไม่นิยมวัดค่าของแข็งแขวนลอย ในการวิเคราะห์คุณภาพน้ำดื่ม น้ำใช้ เพราะน้ำที่มีของแข็งแขวนลอยเท่ากัน อาจให้ความรู้สึกยอมรับต่างกัน เช่น น้ำที่มีหินก้อนเล็ก ๆ อยู่จะไม่ให้ค่าความชุ่ม แต่ถ้านำหินนั้นมาบดให้ละเอียดจะวัดความชุ่มได้ทันที ค่าความชุ่มจึงมีความสำคัญต่อทัศนคติของผู้ใช้น้ำมากกว่าปริมาณของแข็งแขวนลอย อย่างไรก็ตาม น้ำที่ชุ่มบางครั้งอาจไม่มีโทษต่อร่างกาย แต่จะทำให้ไม่น่าดื่ม น้ำใช้ ในทางตรงกันข้ามน้ำที่ใสสะอาดอาจจะไม่ปลอดภัยสำหรับดื่ม ตัวอย่างเช่น น้ำที่มีแร่เหล็กอาจใสสะอาดในตอนแรก แต่จะค่อย ๆ เปลี่ยนเป็นมีสีน้ำตาลอ่อนเมื่อสัมผัสกับอากาศในภายหลัง

ความชุ่มทำให้น้ำไม่เป็นที่ยอมรับ เพราะสังเกตเห็นได้ทันทีถ้าบรรจุในภาชนะใส สารคอลลอยด์ที่ทำให้ความชุ่มจะเป็นตัวดูดซับสารเคมี อาจก่อให้เกิดสารอันตรายหรือทำให้เกิดกลิ่นและรสที่ไม่ต้องการ ความชุ่มในน้ำธรรมชาติมีสีน้ำตาล แต่อาจมีสีอื่นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารที่ก่อให้เกิดความชุ่ม ความชุ่มจะบดบังการส่องผ่านของแสงลงสู่ น้ำ มีผลให้การสังเคราะห์แสงของพืชในลำน้ำและทะเลสาปลดลง นอกจากนี้ความชุ่มที่ทับถมจมลงสู่ก้นลำน้ำหรือทะเลสาปจะจับตัวเป็นโคลนเลน และเปลี่ยนสภาพความเป็นอยู่ของสิ่งมีชีวิตใต้น้ำต่าง ๆ

ความชุ่มของน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- ขนาดของสิ่งแขวนลอย (ละเอียดหรือหยาบ)
- ปริมาณมากหรือน้อย
- ความกระจัดกระจายของอนุภาค
- คุณสมบัติของการดูดซึมแสงของสารแขวนลอยเหล่านั้น

ความชุ่มของน้ำมีความสำคัญเกี่ยวกับกิจการประปา มาก กล่าวคือ

1. ประชาชนที่ใช้น้ำประปาทั่ว ๆ ไป มักจะเข้าใจกันว่า น้ำที่ชุ่มมักจะถูกปนเปื้อนมาจากพวกน้ำที่มาจากอาคารบ้านเรือน เพราะส่วนมากแล้วพวกน้ำที่มาจากอาคารบ้านเรือนมักจะมี

ความขุ่นมาก ซึ่งจะก่อให้เกิดพิษภัยต่อสุขภาพขึ้นได้ ทำให้ประชาชนไม่นิยมดื่ม น้ำของการประปา หันไปใช้น้ำจากแหล่งอื่นที่อาจจะไม่ปลอดภัยพอก็ได้

2. น้ำที่มีความขุ่นสูง จะทำให้การกรองน้ำของกิจการประปาช้าลง และระยะเวลาในการใช้งานสั้นลง น้ำที่มีความขุ่นมาก ๆ จะใช้กับถังกรองช้าแทบไม่ได้เลย ต้องใช้กับถังกรองเร็ว ซึ่งถ้าใช้ถังกรองเร็วก็ขึ้นอยู่กับสารโคแอกกูแลนต์ว่าจะสามารถกำจัดความขุ่นได้มากน้อยเท่าไร อายุการใช้งานของเครื่องกรองจะไต่ยาวนานขึ้น

3. การฆ่าเชื้อโรค น้ำที่มีความขุ่นสูง ๆ จะเป็นอุปสรรคต่อการฆ่าเชื้อโรคมาก เพราะแบคทีเรียอาจจะไปหลบอยู่ตามสารแขวนลอยเหล่านั้น ทำให้สารฆ่าเชื้อโรคเข้าไปทำลายไม่ถึงทำให้การฆ่าเชื้อโรคไม่ได้ผลเต็มที่ และเป็นการเปลืองสารฆ่าเชื้อโรคด้วย

4. ตะกอนแขวนลอยที่ลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งโดยมากเป็นสารอินทรีย์ที่จะทำปฏิกิริยากับคลอรีนทำให้เกิดสาร Thihalomethanes ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มมากที่จะก่อให้เกิดมะเร็งในร่างกาย

5. อาจเป็นตัวที่พาหรือเก็บสะสมสารพิษอันตรายได้ เช่น โลหะหนักต่าง ๆ

ความขุ่นของน้ำสามารถวัด โดยใช้หลักการให้แสงผ่านขวดแก้วใสที่บรรจุตัวอย่างน้ำ หากมีความขุ่นมากแสงก็จะผ่านได้ยากหรือได้น้อยลง การวัดความขุ่นของน้ำจะต้องมีค่าความขุ่นมาตรฐานที่กำหนดขึ้นมา โดยใช้สารซิลิกาเป็นตัวแสดงความขุ่นมาตรฐาน คือมี 1 มก SiO<sub>2</sub>/ล จะเทียบเท่ากับค่าความขุ่น 1 หน่วย

วิธีวัดความขุ่นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังนี้

1. Jackson Candle Turbidimeter มีหน่วยเป็น JTU
2. Formazin Turbidimeter มีหน่วยเป็น FTU
3. Nephelometric Turbidimeter มีหน่วยเป็น NTU

ในปัจจุบันนิยมใช้วิธี Nephelometric Turbidimeter เป็นเครื่องมือวัด โดยมีหน่วยเป็น Nephelometric Turbidity Units (NTU) เพราะเป็นเครื่องมือวัดที่ง่ายและได้ผลรวดเร็ว

## 1.2 สี

สีของน้ำเกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ ๆ 2 ประการ คือ

เกิดจากการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น ใบไม้เน่าเปื่อย โดยมากมักจะเป็นสีน้ำตาลปนเหลืองหรือสีชา ทั้งนี้เพราะเกิดสารประกอบของพวกกรดแทนนิก (tannic acid)

เกิดจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมหรือเกิดจากน้ำทิ้งของฟาร์มต่าง ๆ สีของน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม มักจะมีสีตามน้ำทิ้งนั้น ๆ

ส่วนมากแล้วสารต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดสีในน้ำ มักจะเป็นสารแขวนลอยที่มีประจุลบ ด้วยเหตุนี้เราจึงสามารถกำจัดสีของน้ำได้โดยใช้เกลือของธาตุที่มีวาเลนซ์ 3 ได้ เช่น  $Al^{+3}$  และ  $Fe^{+3}$  เป็นต้น โดยมากน้ำผิวดินจะปรากฏว่ามีสีสูงมาก ทั้งนี้เพราะสารที่ทำให้สีสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ และน้ำผิวดินมีโอกาที่จะถูกปนเปื้อนได้มากกว่าน้ำชนิดอื่น ๆ

สีของน้ำจะมีปรากฏอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ

1. สีปรากฏ เกิดจากสารพวกแขวนลอยต่าง ๆ ซึ่งสามารถจะกำจัดออกได้โดยการกรองหรือเหวี่ยง (centrifugal)
2. สีจริง เกิดจากสารพวกที่ละลายได้เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ

โดยปกติสีธรรมชาติของน้ำจะไม่เป็นอันตรายสำหรับการบริโภค แต่จะทำให้ไม่พึงประสงค์ น้ำที่มีสีไม่เหมาะที่จะใช้ซักล้างเสื้อผ้า อุตสาหกรรมพลาสติก ผลิตเครื่องดื่ม ย้อมผ้า ทำกระดาษ เป็นต้น ดังนั้นการกำจัดสีจึงเป็นเป้าหมายที่สำคัญ ในการผลิตน้ำใช้ทั้งในครัวเรือน และในอุตสาหกรรม สารอินทรีย์ที่ทำให้เกิดสีจริงในน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคลอรีน ทำให้ค่าความต้องการคลอรีนของน้ำเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสามารถฆ่าเชื้อโรคลดลง นอกจากนี้สารประกอบของคลอรีนกับกรดอินทรีย์บางตัวที่เกิดขึ้นจัดเป็นสารก่อมะเร็งด้วย และสารประกอบพวกฟีนอลที่ได้จากการเน่าเปื่อยของผักผลไม้ สามารถรวมตัวกับคลอรีนเกิดเป็นสารประกอบที่มีกลิ่นและรสที่รุนแรง

สีสามารถวัดหาค่าขนาดความเข้มข้นของสีด้วยเครื่องเทียบสีกับสีมาตรฐาน ที่ได้มาจากสารแพลตทินัม คือ 1 มก/ล ของแพลตทินัม ( $K_2PtCl_6$ ) จะมีความเข้มสีเท่ากับ 1 หน่วย โดยการเตรียมสารมาตรฐานนี้จะเติมสารโคบอลต์คลอไรด์ผสมลงไปด้วย การวัดสีไม่ควรเก็บตัวอย่างไว้นาน เพราะจุลินทรีย์ต่าง ๆ อาจมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพหรือทางกายภาพ ทำให้มีผลต่อสี ค่าที่อ่านได้อาจผิดพลาด จากค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลก กำหนดไว้ว่า น้ำประปาควรมีความเข้มของสีไม่เกิน 5 หน่วย

## 2. คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีเป็นคุณสมบัติที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า หรือสัมผัสอื่น ๆ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปฏิกิริยาเคมีเพื่อจะได้ทราบผล โดยจะสามารถบอกได้ว่า น้ำมีคุณภาพลักษณะไหน คือ น้ำมีความกระด้างหรือเป็นน้ำอ่อน น้ำมีสภาพเป็นกรดหรือด่างมากน้อยเพียงใด น้ำมีแร่ธาตุอะไรละลายอยู่ มีสารพิษอันตรายปะปนอยู่หรือไม่ เมื่อทราบผลการวิเคราะห์น้ำแล้วจึงสามารถบอกได้ว่าน้ำมีคุณภาพไปในลักษณะใด จำเป็นต้องผ่านกระบวนการ

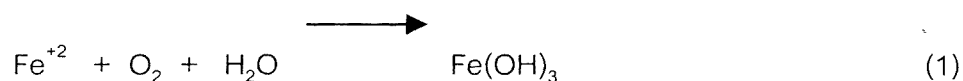
บำบัดเป็นน้ำประปาด้วยวิธีใด และจะช่วยในการออกแบบโรงผลิตน้ำประปาด้วย ช่วยในการคำนวณหาปริมาณสารเคมีที่ต้องการเติมผสมลงไปใต้น้ำดิบ ทั้งหมดนี้จำเป็นต้องอาศัยความรู้ประสบการณ์ต่าง ๆ ในการใช้ข้อมูลของคุณสมบัติทางเคมีมาพิจารณาในงานการประปา ซึ่งจะขอกล่าวถึงเฉพาะเหล็ก , แมงกานีส และสารอินทรีย์เท่านั้น

### 2:1 เหล็ก (Fe)

เหล็กมักจะพบได้ในแหล่งน้ำทั่วไป โดยเฉพาะน้ำใต้ดิน เหล็กเกิดขึ้นในแหล่งธรรมชาติที่ชั้นใต้ดิน ซึ่งมีมากที่สุดแร่ธาตุหนึ่ง เหล็กที่อยู่ในน้ำจะมีอยู่ 2 รูปคือ ในรูปของเฟอร์รัส ( $Fe^{+2}$ ) ซึ่งจะละลายน้ำได้ดี และในรูปของเฟอร์ริก ( $Fe^{+3}$ ) ซึ่งจะไม่ละลายน้ำแต่จะตกตะกอนติดเป็นคราบอยู่ตามภาชนะ พวกเหล็กเฟอร์รัสจะพบได้มากในน้ำใต้ดินโดยเฉพาะน้ำบาดาล โดยมักจะละลายอยู่ในรูปของ  $Fe(HCO_3)_2$  และ  $FeCl_2$  จากคุณสมบัติทางเคมีของเฟอร์รัส ทำให้น้ำที่มี  $Fe^{+2}$  ยังคงเป็นน้ำใสอยู่ แต่เมื่อสูบน้ำขึ้นมา พวก  $Fe^{+2}$  จะไปทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ ซึ่งทำให้เกิดเป็น  $Fe^{+3}$  ที่ตกตะกอน ทำให้มีน้ำขุ่นขึ้นและมีสีสนิมเหล็กอยู่ในน้ำประปา

โดยทั่วไปเหล็กที่อยู่ในน้ำประปาจะไม่ส่งผลกระทบต่อผู้บริโภค ซึ่งค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกได้กำหนดไว้ว่า น้ำประปาควรมีความเข้มข้นของเหล็กไม่เกิน 0.3 มก/ล ทั้งนี้เพื่อไม่ให้น้ำประปามีสีสนิมเหล็ก ไม่ให้มีกลิ่นและรส ไม่ให้เกิดคราบสนิมเหล็กที่เครื่องสุขภัณฑ์ ไม่ทำให้เสื้อผ้าเปื้อนสนิมเหล็ก และอาจเป็นแหล่งอาหารให้แก่แบคทีเรียที่เจริญขยายพันธุ์ขึ้นในระบบท่อจ่ายน้ำประปาและในบ่อน้ำทั่วไป ซึ่งเรียกแบคทีเรียนี้ว่า Iron Bacteria เช่น พวก Gallionella ซึ่งทำให้น้ำประปาเกิดปัญหาดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น และยังทำให้ท่อประปาอุดตันได้ พร้อมทั้งทำให้เครื่องสูบน้ำประปาเสียหายได้อีกด้วย

นอกจากนี้เหล็กเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต เพราะเป็นส่วนประกอบของเม็ดเลือดแดงของคนและสัตว์ ความต้องการของคนอยู่ในช่วง 7-35 มก/วัน ดังนั้นคนที่ขาดเหล็กมักจะเป็นโรคโลหิตจาง แต่ถ้าน้ำดื่มมีเหล็กมากเกินไปอาจทำให้ผู้ที่ดื่มน้ำนั้นเป็นโรคเกี่ยวกับไต เพราะร่างกายไม่สามารถขับถ่ายออกได้หมด เหล็กก็จะถูกสะสมอยู่ที่ตับ ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับตับอีกด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับและระยะเวลาที่ร่างกายได้รับเข้าไป ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในน้ำจึงนับว่าสำคัญมาก เหล็กสามารถถูกกำจัดได้โดยการเติมอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นของการเติมอากาศ คือ





ซึ่งจะทำให้เหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{+2}$ ) กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริก ( $Fe^{+3}$ ) หากน้ำมีความกระด้างอยู่ด้วย เหล็กจะถูกกำจัดได้ง่ายมาก แต่ถ้าน้ำมีกรดสูงเหล็กจะถูกกำจัดออกได้ยากกว่า เพราะน้ำที่มีค่าความเป็นกรดสูงเหล็กมักจะเกิดอยู่ในรูปเฟอร์รัส ดังนั้นเราต้องเติมด่างลงไปเพื่อยกระดับของพีเอชของน้ำให้มีค่าประมาณ 9 เสียก่อน จึงค่อยทำการเติมอากาศต่อไป

วิธีการตรวจวัดเหล็กที่ใช้กันมาก คือ วิธีฟีแนนโทโรลีน (Phenanthroline) โดยวัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสจะรวมตัวกับ 1, 10-phenanthroline ที่ pH 3.2-3.3 เกิดเป็นอิมอนเชิงซ้อนที่มีสีแดงส้ม วัดค่า Absorbance นำไปเทียบกับเส้นกราฟมาตรฐานก็จะหาความเข้มข้นของเหล็กในน้ำได้ นอกจากนี้ยังมีวิธี Atomic Absorption Spectrometric ซึ่งใช้วิเคราะห์เหล็กได้ทั้งในรูปเฟอร์รัสและเฟอร์ริก โดยทั้ง 2 วิธีเหมาะสำหรับน้ำธรรมชาติและน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

## 2.2 แมงกานีส (Mn)

แมงกานีสจะพบอยู่ในแหล่งน้ำทั่วไป โดยมักจะพบปะปนอยู่กับเหล็กเสมอ แต่โดยจะมีปริมาณที่น้อยกว่า แมงกานีสก็จะพบได้ในน้ำบาดาลมากกว่าน้ำผิวดิน แมงกานีสที่อยู่ในน้ำจะมีอยู่ 2 รูป คือ  $Mn^{+2}$  ซึ่งไม่ละลายน้ำและ  $Mn^{+4}$  ซึ่งละลายน้ำ โดยแมงกานีสจะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนรูปง่ายกว่าของเหล็ก ทำให้การกำจัดแมงกานีสออกจากน้ำจึงกระทำได้ยากกว่า จำเป็นต้องมีทั้งออกซิเจนและคลอรีนมาช่วยในการกำจัดแมงกานีสออก

เนื่องจากแมงกานีสเป็นโลหะจำเป็นสำหรับการทำงานของเอนไซม์บางตัว ดังนั้นการรับแมงกานีสจากอาหารในระดับ 10 มก/วัน จึงไม่ถือว่าเป็นอันตราย หากปริมาณมากกว่านี้อาจเป็นอันตรายได้ แต่ก็จะถึงระดับนั้นมันจะก่อความรำคาญอย่างหนักขึ้นก่อน แมงกานีสความเข้มข้นเกินกว่า 0.05 มก/ล หรือความเข้มข้นรวมกับเหล็กที่มากกว่า 0.3-0.5 มก/ล จะเริ่มสร้างปัญหา โดยที่แมงกานีสจะตกตะกอนแยกตัวจากน้ำถ้าสัมผัสกับออกซิเจนหรือคลอรีน เกิดเป็นคราบจับติดอยู่ภายในท่อ ซึ่งบางครั้งก็หลุดติดไปกับน้ำประปาด้วย คราบที่เกิดจากแมงกานีสไดออกไซด์จะมีสีดำ แต่ถ้ามีเหล็กอยู่ด้วยจะเป็นคราบสีน้ำตาลเข้ม ถ้าใช้น้ำประปาที่มีแมงกานีสเจือปนอยู่ซักผ้าสีอ่อน ๆ จะมีรอยด่าง หรือถ้าใช้กับสุขภัณฑ์สีขาวจะมีคราบน้ำที่มีแมงกานีสอยู่ สำหรับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า น้ำประปาควรมีความเข้มข้นของแมงกานีสไม่เกิน 0.1 มก/ล

## 2.3 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่ไม่เสถียรจะถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำ โดยออกซิเจนจะถูกใช้ในปฏิกิริยา สารอินทรีย์ที่ละลายน้ำเหล่านี้ประกอบด้วย แป้ง ไขมัน โปรตีน

แอลกอฮอล์ กรด อัลดีไฮด์ และเอสเทอร์ ซึ่งมาจากการย่อยสลายซากพืชซากสัตว์ในแหล่งน้ำ หรือจากน้ำเสียชุมชน น้ำเสียอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากการเกษตร สารอินทรีย์เหล่านี้มักทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความขุ่น สี กลิ่นและรสของน้ำ

เราใช้ค่า TOC (Total Organic Carbon) ในการวัดปริมาณสารอินทรีย์ทุกชนิดที่มีองค์ประกอบเป็นธาตุคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วย

- สารคาร์บอนอินทรีย์ละลาย (Dissolved Organic Carbon , DOC) ซึ่งเป็น TOC ส่วนที่ผ่านสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

- อนุภาคสารอินทรีย์คาร์บอน (Particulate Organic Carbon , POC) คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำ และถูกกักแยกโดยสารกรองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน

- สารอินทรีย์คาร์บอนระเหย (Volatile Organic Carbon , VOC) คือ สารอินทรีย์คาร์บอนที่สลายตัวได้และถูกกำจัดออกโดย gas stripping ภายใต้สภาวะจำเพาะ

VOC ส่วนใหญ่เป็นสารจากอุตสาหกรรม พบปนเปื้อนอยู่ทั้งในแหล่งน้ำผิวดิน และน้ำใต้ดิน หลายตัวในสารกลุ่มนี้จัดให้เป็นสารก่อมะเร็ง สารในกลุ่มนี้ที่ EPA กำหนดค่าสูงสุดในน้ำดื่ม ได้แก่ Benzene , 1,1-dichloroethylene , para - dichlorobenzene , 1,1-trichloroethane , trichloroethylene และ Vinyl chloride

- สารอินทรีย์คงตัว (Nonpurgeable Organic Carbon , NPOC) คือ ส่วนของ TOC ที่ไม่ถูกกำจัดออกโดย gas stripping

สำหรับสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ในน้ำธรรมชาติ เช่น เซลลูโลส กรดแทนนิน กรดลิกนิน สารฮิวมิก เป็นต้น จะใช้ค่าการดูดซึมรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นตัวแทนของปริมาณสารอินทรีย์เหล่านี้ทั้งในน้ำสะอาดและน้ำเสีย ซึ่งช่วงค่าความยาวคลื่นมาตรฐานคือ 253.7 นาโนเมตร แต่ก็สามารถกำหนดใช้ช่วงค่าความยาวคลื่นอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงสารรบกวนอื่น ๆ ในน้ำ ซึ่งอาจจะสามารถดูดซึมรังสีอัลตราไวโอเล็ตในช่วงค่าความยาวคลื่นนั้น ๆ ได้เช่นกัน ทำให้ค่าที่วัดได้ผิดไปจากที่ควรจะเป็น โดยอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดซึมรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อสารอินทรีย์คาร์บอน สามารถแสดงถึงลักษณะของสารอินทรีย์ธรรมชาติได้

นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้อีกประเภทหนึ่ง ซึ่งไม่ได้เกิดขึ้นเองตามกระบวนการตามธรรมชาติ แต่มักจะมาจากการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้งานในจุดประสงค์ต่าง ๆ และจะถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติหลังใช้งานเสมอ สารอินทรีย์เหล่านี้มักจะมีเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย แต่จะมีอันตรายต่อผู้ได้รับ เราอาจเรียกสารอินทรีย์กลุ่มนี้ว่า Trace

Organics ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงบางชนิดเท่านั้น และเชื่อว่าในอนาคตจะต้องมีจำนวนและปริมาณเพิ่มขึ้นอีกมาก สารเหล่านี้ได้แก่ สารซัลฟาล์ง (ABS) , สารปราบศัตรูพืช (DDT) , สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน (THMs) , ไทฮาไนต์ และฟีนอล เป็นต้น

### 3. คุณสมบัติทางแบคทีเรีย

คุณสมบัติอันนี้ถือว่าสำคัญที่สุด เพราะเป็นอันตรายที่จะทำให้เกิดโรคมัยไข้เจ็บขึ้นได้ โรคที่เกิดจากน้ำเป็นสื่อหลายชนิดด้วยกัน เช่น บิด อหิวาตกโรค ไทฟอยด์ และโรคระบบทางเดินอาหารต่าง ๆ เกิดขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียชนิดที่เป็นอันตราย (pathogenic bacteria) ที่นำโรคเหล่านี้ปนเปื้อนลงไปใต้น้ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าโรคเหล่านี้มักจะมีการระบาดบ่อย ๆ ในประเทศที่ด้อยพัฒนาหรือกำลังพัฒนา ทั้งนี้เพราะประเทศเหล่านั้นมีระดับความเป็นอยู่และการดำเนินชีวิตที่ไม่ถูกต้องตามสุขลักษณะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสุขาภิบาลเรื่องน้ำยังไม่ดีพอ เชื้อแบคทีเรียที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำอาจจะแบ่งเป็นพวกใหญ่ ๆ ได้ 2 พวก คือ

1. พวกที่สามารถทำให้เกิดโรคได้ในคน เป็นแบคทีเรียชนิดที่เป็นอันตรายและมีอยู่ในลำไส้คน เรียกว่า เอนเทอริก พาโทเจน (Enteric pathogens) เชื้อพวกนี้จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ  $37^{\circ}\text{C}$  คือเท่ากับอุณหภูมิในร่างกายคน เมื่อคนป่วยที่เป็นโรคบิดก็ดี อหิวาต์ก็ดี หรือไทฟอยด์ก็ดี ถ่ายอุจจาระลงไปใต้น้ำ แบคทีเรียพวกนี้ก็จะไปปนเปื้อนอยู่ในน้ำและสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำได้เป็นเวลานาน การที่จะตรวจวิเคราะห์เชื้อแบคทีเรียพวกนี้จากน้ำ มีกรรมวิธีที่ละเอียดรอบคอบและยุ่งยากมาก ดังนั้นการตรวจวิเคราะห์น้ำทางด้านแบคทีเรียจึงไม่นิยมตรวจเชื้อพวกนี้โดยตรง

2. แบคทีเรียพวกที่อยู่ในลำไส้คนและสัตว์มากที่สุด มีชื่อเรียกว่า โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform bacteria) พวกนี้จะมีอยู่ในลำไส้ของสัตว์เลือดอุ่นทุกชนิด ในอุจจาระปกติของคน 1 กรัม จะมีโคลิฟอร์มแบคทีเรียอยู่ประมาณ  $10^5$  ถึง  $10^9$  ตัว โดยปกติแล้วแบคทีเรียพวกนี้ไม่ก่อให้เกิดโรค เป็น non-pathogen แต่เมื่อถ่ายออกมาที่อุจจาระลงไปปนเปื้อนอยู่ในน้ำ มันจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ในน้ำได้นานกว่าพวกแรก การตรวจวิเคราะห์ก็ง่ายกว่าพวกแรก ดังนั้นเขาจึงตกลงกันเลือกเอาโคลิฟอร์มแบคทีเรีย เป็นดัชนีชี้ถึงคุณภาพทางแบคทีเรียของน้ำ

เหตุที่เลือกเอาโคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นดัชนีในการตรวจคุณภาพน้ำ มีดังนี้

1. การตรวจโคลิฟอร์มแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำ ทำได้ง่ายกว่าการตรวจหาพวกเอนเทอริก พาโทเจนตัวอื่นๆ เพราะโคลิฟอร์มแบคทีเรียสามารถย่อยน้ำตาลแลคโตสได้กรดและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแบคทีเรียอื่น ๆ ที่ย่อยสลายน้ำตาลแลคโตสได้ก็มีแต่จำนวนน้อยมาก

2. เนื่องจากโคลิฟอร์มแบคทีเรียปกติจะมีอยู่ในอุจจาระคนและสัตว์ 95% อยู่ในดินเพียง 5% ดังนั้นน้ำที่มีอุจจาระปนอยู่จึงมีโอกาสตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

3. ในสภาวะอย่างเดียวกัน คือ น้ำชนิดเดียวกัน อุณหภูมิเท่ากัน โคลิฟอร์มแบคทีเรียจะมีความทนทานได้ดีกว่าเอนเทอริค พาโทเจน แบคทีเรียตัวอื่น ๆ

4. เมื่อตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ ก็พอจะลงความเห็นได้ว่าน้ำนั้นมีอุจจาระของคนหรือของสัตว์ปนอยู่ด้วยแน่ และอาจจะคาดการณ์ได้ว่าอาจจะมีเชื้อโรคของระบบทางเดินอาหารปนอยู่ด้วย

5. การตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ เป็นเครื่องชี้ให้ทราบว่าน้ำนั้นมีความสกปรกมากน้อยเพียงใด ไม่เหมาะสมที่จะใช้ กล่าวคือ ถ้าตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียมาก แสดงว่าน้ำนั้นสกปรกมาก ถ้าน้ำสกปรกน้อยก็พบจำนวนโคลิฟอร์มแบคทีเรียน้อย หรืออาจจะไม่พบเลย

การตรวจวิเคราะห์ทางแบคทีเรียจะมี 3 ตัวกำหนด คือ

1. การตรวจจำนวนแบคทีเรียทั้งหมด (Total or standard Plate Counting)

ใช้น้ำตัวอย่าง 1 มล. มาเพาะเชื้อในตูบที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 24 ชม. แบคทีเรียแต่ละตัวที่อยู่ในน้ำจะเจริญเติบโตและแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวนมากขึ้น จับเป็นกลุ่มหรือเป็นจุดเล็ก ๆ บนอาหารวุ้นที่เลี้ยงไว้ เรียกกลุ่มหรือจุดเหล่านี้ว่า โคโลนี ซึ่งสามารถนับได้ด้วยตาเปล่า

ตามค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า น้ำประปาจะต้องตรวจไม่พบแบคทีเรียทั้งหมด เพราะแบคทีเรียที่มีอยู่ในน้ำมีปริมาณสูง โอกาสที่จะมีเชื้อโรคก็ย่อมมีมากด้วยแต่ไม่ได้ใช้เป็นค่าตายตัวแน่นอน นอกจากสำหรับควบคุมหรือตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำประปาเท่านั้น

2. การตรวจหาโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Coliform Index)

แบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

- ฟีคอลลโคลิฟอร์ม แบคทีเรียพวกนี้ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ของคนและสัตว์เลือดอุ่น จะถูกขับถ่ายออกมาพร้อมกับอุจจาระ เช่น *Escherichia coli* (*E.coli*)

- นันฟีคอลลโคลิฟอร์ม แบคทีเรียพวกนี้มักจะอาศัยอยู่ในดินและพืช เช่น *Aerobacter aerogenes* (*A.aerogenes*)

ดังนั้นการตรวจพบโคลิฟอร์มแบคทีเรียในน้ำ จึงไม่ได้เป็นการยืนยันว่าน้ำนั้นได้รับการปนเปื้อนจากของเสียของคนหรือสัตว์ ควรตรวจหาฟีคอลลโคลิฟอร์ม หรือ *E.coli* เพื่อให้แน่ชัดลงไป

การตรวจหาโคลิฟอร์มแบคทีเรียในงานวิเคราะห์ประจำ (routine work) จะใช้วิธี Multiple Tube Technique ซึ่งต้องอาศัยการเปรียบเทียบเชิงสถิติมาอ่านเป็นค่าตัวเลข ดังนั้น

หน่วยที่ใช้จึงเป็น MPN/100 ml โดย MPN ย่อมาจาก Most Probable Number สำหรับค่ามาตรฐานน้ำประปาขององค์การอนามัยโลกกำหนดไว้ว่า จะต้องตรวจไม่พบโคลิฟอร์มแบคทีเรีย

### 3. การตรวจหา E.coli

การตรวจหา E.coli จะใช้ membrane filter technique โดยกรองน้ำที่ต้องการตรวจผ่านเยื่อกรองแบบ cellulose acetate หรือ glass filter ที่มีรูเปิดเล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร นำเยื่อกรองที่มีแบคทีเรียค้างอยู่ไปเพาะเชื้อในอาหารพิเศษ ซึ่งจะทำให้โคโลนีของ E.coli มีสีต่างจากแบคทีเรียตัวอื่นสามารถนับได้อย่างแน่นอน สำหรับค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำประปាកำหนดไว้ว่า จะต้องตรวจไม่พบ E.coli

การตรวจวิเคราะห์หาแบคทีเรียมีข้อควรคำนึงหลายประการ ตามปกติน้ำที่ผ่านการกรองถูกต้องจะมีแบคทีเรียน้อยมาก แต่ถ้าท่อน้ำประปาหรือภาชนะที่บรรจุไม่สะอาดเพียงพอ ก็จะทำให้พบว่ามีโคลิฟอร์มมากกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นจึงมีข้อควรระวังอย่างมากในการตรวจวิเคราะห์ทางด้านนี้ ตั้งแต่วิธีการเก็บตัวอย่างที่ถูกต้องและปราศจากการปนเปื้อนจากแบคทีเรียภายนอก ภาชนะที่บรรจุตัวอย่างมาวิเคราะห์ ตลอดจนวิธีการในการตรวจวิเคราะห์ทุกขั้นตอน ควรทำแบบปลอดเชื้อ (Sterile technique)

### เป้าหมายของการปรับปรุงคุณภาพน้ำ

องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ให้นิยามของวัตถุประสงค์การปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคไว้ 3 ประการ คือ

- ผลิตน้ำสะอาดเพื่อใช้ในการอุปโภคได้โดยปลอดภัย (Safe and Wholesome)
- ผลิตน้ำให้พอกับความต้องการของผู้ใช้น้ำ (Adequate Quantity)
- ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำและพร้อมที่จะจ่ายน้ำให้แก่ผู้ต้องการใช้น้ำได้อย่างทั่วถึง

(Readily Available To The Users)

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของน้ำผิวดินที่สมควรใช้ในการผลิตน้ำประปา ตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา

Constituent or Characteristic	Permissible Criteria	Desirable Criteria
Physical:		
Color (color units)	75	< 10
Odor	Narrative	Virtually absent
Temperature <sup>a</sup>	do	Narrative
Turbidity	do	Virtually absent
Microbiological:		
Coliform organisms	10,000/100 ml	< 100/100 ml
Fecal coliforms	2,000/100 ml	< 20/100 ml
Inorganic chemicals:		
	(mg/l)	(mg/l)
Alkalinity	Narrative	Narrative
Ammonia	0.5 (as N)	< 0.01
Arsenic <sup>a</sup>	0.05	Absent
Barium <sup>a</sup>	1.0	do
Boron <sup>a</sup>	1.0	do
Cadmium <sup>a</sup>	0.01	do
Chloride <sup>a</sup>	250	< 25
Chromium <sup>a</sup> , hexavalent	0.05	Absent
Copper <sup>a</sup>	1.0	Virtually absent
Dissolved oxygen	≥ 4 (monthly mean) ≥ 3 (individual sample)	Near saturation
Fluoride <sup>a</sup>	Narrative	Narrative
Hardness <sup>a</sup>	do	do
Iron (filterable)	0.3	Virtually absent
lead <sup>a</sup>	0.05	Absent
Manganese <sup>a</sup> (filterable)	0.05	do
Nitrates plus nitrites <sup>a</sup>	10 (as N)	Virtually absent

Constituent or Characteristic	Permissible Criteria	Desirable Criteria
pH (range)	6.0-8.5	Narrative
Phosphorus <sup>a</sup>	Narrative	do
Selenium <sup>a</sup>	0.01	Absent
Silver <sup>a</sup>	0.05	do
Sulfate <sup>a</sup>	250	< 50
Total dissolved solids <sup>b</sup> (filterable residue)	500	< 200
Uranyl ion <sup>a</sup>	5	Absent
Zinc <sup>a</sup>	5	Virtually absent
Organic chemicals:		
Carbon chloroform extract <sup>a</sup> (CCE)	0.15	< 0.04
Cyanide <sup>b</sup>	0.20	Absent
Methylene blue active substances <sup>a</sup>	0.5	Virtually absent
Oil and grease <sup>a</sup>	Virtually absent	Absent
Pesticides:		
Aldrin <sup>a</sup>	0.017	do
Chlordane <sup>d</sup>	0.003	do
DDT <sup>a</sup>	0.042	do
Dieldrin <sup>a</sup>	0.017	do
Endrin <sup>a</sup>	0.001	do
Heptachlor <sup>a</sup>	0.018	do
Heptachlor epoxide <sup>a</sup>	0.018	do
Lindane <sup>a</sup>	0.056	do
Organic chemicals: (Contd.)		
Methoxychlor <sup>a</sup>	0.035	do
Organic phosphates plus carbamates <sup>a</sup>	0.1	do
Toxaphene <sup>a</sup>	0.005	do
Herbicides:		
2,4-D plus 2,4,5-T. plus 2,4,5-TP <sup>a</sup>	0.1	do
Phenois <sup>a</sup>	0.001	do
Radioactivity:	(pc/l)	(pc/l)
Gross beta <sup>a</sup>	1,000	< 100
Radium-226 <sup>a</sup>	3	< 1
Strontium-90 <sup>a</sup>	10	< 2

ตารางที่ 2 มาตรฐานน้ำดิบขององค์การอนามัยโลก

Constituent or Characteristic	Maximum allowable limit	
<b>Physical</b>		
Color	300	unit
Turbidity	Narrative	
<b>Chemical</b>		
TDS	1500	mg/l
Iron	50	mg/l
Manganese	5	mg/l
Copper	1.5	mg/l
Zinc	1.5	mg/l
MgSO <sub>4</sub> + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1000	mg/l
ABS (Alkyl Benzyl Sulfonates)	0.5	mg/l
Nitrate as NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	45	mg/l
Fluoride	1.5	mg/l
Phenolic Substances	0.002	mg/l
Arsenic	0.05	mg/l
Cadmium	0.01	mg/l
Chromium	0.05	mg/l
Cyanide	0.2	mg/l
Lead	0.05	mg/l
Selenium	0.01	mg/l
Radionuclides (gross beta activity)	1000	uuc/l
COD	10	mg/l
BOD	6	mg/l
Total Nitrogen (exclusive of NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	1	mg/l
Ammonia	0.5	mg/l
CCE (Carbon Chloroform Extract)	0.5	mg/l
Grease	1	mg/l
Coliform Bacteria	Narrative	

ที่มา Chamras Chayabongse (1981) "Environmental Quality Standard" UNEP Report, Bangkok, Thailand.



ตารางที่ 3 มาตรฐานน้ำดื่มของกระทรวงอุตสาหกรรม (มอก.)

ลำดับที่	ชนิด	ความเข้มข้น (มก./ล.)
1	สารที่เป็นพิษ ถ้ามีเกินกำหนดทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ คือ ตะกั่ว (Lead) เซเลเนียม (Selenium) โครเมียม (Chromium) ไซยาไนด์ (Cyanide) อาร์เซนิก (Arsenic) ปรอท (Mercury) แบเรียม (Barium)	0.05 0.01 0.05 0.2 0.05 0.001 1.0
2	สารบางจำพวกที่เกี่ยวกับสุขภาพ ถ้ามีมากเกินไปจนเกินที่กำหนดอาจทำให้เกิดโรคได้ คือ ฟลูออไรด์ (Fluoride) ไนเตรต (Nitrate)	0.7 10 (as N)
3	สารบางจำพวกที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำดื่ม สารพวกนี้ถ้ามีมากเกินไปกำหนดทำให้น้ำไม่บริสุทธิ์ กลิ่นและรส (Odour and Taste) สี (Colour) ความขุ่น (Turbidity) ความเป็นกรดหรือด่าง (pH Value) สารทั้งหมด (Total Solids) แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) เหล็กและแมงกานีส (Iron and Manganese) ทองแดง (Copper) สังกะสี (Zinc) ซัลเฟต (Sulphate) คลอไรด์ (Chloride) ฟีนอล (Phenol)	ไม่เป็นที่รังเกียจ 5 Units 5 Units 6.5 - 8.5 500 75 0.5 0.30 0.50 5 50 200 250
4	แบคทีเรียที่อาจทำให้เกิดโรคต่อมนุษย์ได้ ยอมให้มีดังนี้ Standard Plate Count ค่า MPN E. Coli	500 โคโลนิ/มล. น้อยกว่า 2.2 ต่อ น้ำ 100 มล. ไม่มี

ตารางที่ 4 มาตรฐานน้ำดื่มขององค์การอนามัยโลก

Standard of Drinking Water (WHO) (Physical and Chemical)		
<b>Toxic Substance</b>	<b>Maximum Allowable mg/l</b>	
Lead (as Pb)	0.05	
Selenium (as Se)	0.01	
Arsenic (as As)	0.05	
Chromium (as Cr hexavalent)	0.05	
Cyanide (as CN)	0.2	
Cadmium	0.01	
<b>Substances Affecting the Potability of Water</b>		
<b>Substance</b>	<b>Max.Acceptable</b>	<b>Max.Allowable</b>
Total Solids	500 mg/l	1,500 mg/l
Color	5 Units	50 Units
Turbidity	5 Units	25 Units
Taste	Unobjectionable	-
Odor	Unobjectionable	-
Iron (Fe)	0.3 mg/l	1.0 mg/l
Manganese (Mn)	0.1 mg/l	0.5 mg/l
Copper (Cu)	1.0 mg/l	1.5 mg/l
Zinc (Zn)	5.0 mg/l	15 mg/l
Calcium (Ca)	75 mg/l	200 mg/l
Magnesium (Mg)	50 mg/l	150 mg/l
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	200 mg/l	400 mg/l
Chloride (Cl)	200 mg/l	600 mg/l
pH range	7.0-8.5	
Magnesium + Sodium Sulfate	500 mg/l	1,000 mg/l
Phenolic Substances (as Phenol)	0.001 mg/l	0.002 mg/l
Carbon Chloroform Extract	0.2 mg/l	0.5 mg/l
Alkyl Benzyl Sulfonates	0.5 mg/l	1.0 mg/l
<b>Standard of Bacteriological Quality</b>		
90% of Samples in year negative for Coliforms i.e.		
90% of Samples MPN < 1.0		
No Samples MPN > 10		
MPN 8-10 not to occur in Consecutive Sample		

# เทคโนโลยีเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา

โดย

ผศ.ดร.ชาวลิต รัตนธรรมกุล

# เทคโนโลยีเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา

ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความต้องการน้ำดื่มที่มีคุณภาพสูงขึ้นเพื่อความปลอดภัยในด้านสุขภาพอนามัย ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาที่สามารถบรรลุเป้าหมายมาตรฐานน้ำดื่มที่เคร่งครัดมากขึ้น

กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) หมายถึง กระบวนการต่าง ๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน(semi-permeable membrane)ในการแยกสารละลายออกจากน้ำหรือของเหลวอื่น ๆ ความสามารถในการแยกขึ้นกับขนาดช่องว่าง (pore size) หรือ molecular weight cut-off (MWCO)ของเมมเบรน กระบวนการเมมเบรนจะแตกต่างจากการกรองทรายแบบติดผิวชั้นกรอง (surface filtration) และแบบติดค้ำในชั้นกรอง (in-depth filtration) ตรงที่การกรองแบบเมมเบรนจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า concentration polarization ซึ่งเกิดการสะสมผลสารต่างๆที่ผิวหน้าเมมเบรน ในระดับที่สูงกว่าในเฟสของสารละลายที่เข้ามาบำบัด

ปัจจุบันในบางประเทศ เช่น ญี่ปุ่น อเมริกา ได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนมาใช้เป็นกระบวนการผลิตน้ำประปาแทน Conventional Process เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีขนาดเล็กกระทัดรัด การดำเนินระบบไม่ยุ่งยาก น้ำที่ออกจากกระบวนการมีคุณภาพสูง ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการดำเนินระบบและการบำรุงรักษาอีกด้วย

รูปแบบต่างๆของเทคโนโลยีเมมเบรนในการผลิตน้ำประปามีดังนี้

1. Microfiltration (MF) เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดใหญ่ไมครอน หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบ MF สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลาย และน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้
2. Ultrafiltration (UF) เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไป สารที่ไม่มี

ประจุจะถูกกั้นเอาไว้ และไอออนจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ โดยขึ้นอยู่กับ MWCO ของเมมเบรน ค่า MWCO จะบอกให้รู้ว่าสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight, MW) ที่มากกว่าจะถูกกั้นเอาไว้ด้วยเมมเบรน การทำงานของ UF ใช้แผ่นเยื่อที่มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 10 อังสตรอม ถึง 0.1 ไมครอน ใช้ความดันสูงถึง 10-200 psig (69-1380 kPa) มักนิยมใช้ในการแยกโปรตีน และใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์ โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger เป็นต้น

3. Nanofiltration (NF) หรือ membrane softening เป็นกระบวนการซึ่งใช้ความดันต่ำมาก โดยจะยอมให้ผ่านได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรเท่านั้น มีลักษณะการทำงานของทั้ง UF และ RO รวมอยู่ในตัว โดยทั่วไป เมมเบรนแบบ NF จะกำจัดไอออนชนิดวาเลนซ์คู่ ในอัตราที่สูงกว่าไอออนวาเลนซ์เดี่ยว

4. Reverse Osmosis (RO) หรือ hyperfiltration ทำงานโดยอาศัยการไล่ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น ความดันที่ใส่เข้าไปต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลาย จากผลของความดันนี้ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนชนิดยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้ โดยจะทิ้งเกลือ และสิ่งปนเปื้อนเอาไว้ หลักการทำงานของ RO จะตรงกันข้ามกับกระบวนการออสโมซิส โดยใช้ความดันสูงถึง 200-1000 psig (1380 - 6890 kPa) สารต่าง ๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100 จะถูกกรองไว้บนแผ่นเมมเบรน การกรองแบบ RO สามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger ใช้ในงานแยกโลหะ การทำให้น้ำตาลเข้มข้นสูงขึ้น การทำให้สีย้อมมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เป็นต้น แต่การใช้ประโยชน์ของเครื่องกรองแบบ RO ไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากราคาอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายสูงมาก

5. Electrodialysis (ED) เป็นกระบวนการกำจัดเกลือ ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน โดยที่ไอออนจะถูกกำจัดโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปสู่เมมเบรนซึ่งมี 2 ชนิด คือ แผ่นบวก และแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกัน ไหลผ่าน น้ำจะไหลผ่านเมมเบรนเพียงแค่อัฒมผัส ซึ่งจะตรงกันข้ามกับไอออน ที่จะเคลื่อนที่ดึงดูดกับเมมเบรน

ตารางที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนแบบต่าง ๆ  
(Rautenbach และ Albrecht ,1989)

Membrane Process	Separation potential for	Driving Force	Permeating component
Microfiltration	Suspensions, emulsions	Pressure (0.1-500 kPa)	Solvent
Ultrafiltration	Macromolecular solutions, emulsions	Pressure (100-1000 kPa)	Solvent
Nanofiltration	Di and multivalent ions, macromolecules, organics	Pressure (300-1400 kPa)	Solvent
Reverse Osmosis	Aqueous low molecule mass solution, organic solutions	Pressure (1000-10000 kPa)	Solvent
Electrodialysis	Aqueous solutions	Electric potential	Solute (ions)

โมดูลชนิดต่าง ๆ ของระบบกรองน้ำโดยใช้เทคโนโลยีเมมเบรน

- แบบท่อ (tubular module)
- แบบแผ่น (plate and frame module)
- แบบม้วน (spiral wound module)
- แบบเส้นใยกลวง (hollow-fiber module)

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการกรองน้ำของเมมเบรน ( Membrane's Permeate Flux)

อุปสรรคที่สำคัญในการทำงานของเมมเบรน คือ ปัญหาการอุดตันซึ่งเกิดจากสิ่งสกปรกในน้ำที่ยังไม่ได้ผ่านการบำบัด ปัจจัยที่ลดอัตราการไหลของน้ำ (permeate flux) ผ่านเมมเบรนขึ้นกับ

- Concentration polarization (CP) หรือ gel layer
- Membrane fouling

### (1) Concentration polarization

การที่อนุภาคสิ่งสกปรก หรือโมเลกุลเคลื่อนที่มาสะสมใกล้ผิวเมมเบรน จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่า ค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่า ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การเกิด concentration polarization (CP)

Flux ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด CP สามารถแก้ไขให้มีสภาพดังเดิมได้ โดยใช้การล้างย้อน (backflushing) และการกระแทกเป็นช่วง ๆ (pulsing) ของน้ำ

### (2) Membrane fouling

คำว่า membrane fouling จะใช้สำหรับอธิบาย การสูญเสียสภาพการกรองแบบ irreversible ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำ หรือสารเคมี

Fouling ที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการดูดเกาะของสารอินทรีย์ในรูปพูนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้ดีเหมือนเดิม หลังจากใช้เมมเบรนไปได้เพียงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ลักษณะสมบัติของสารอินทรีย์ในน้ำดิบ และธรรมชาติของแรงกระทำระหว่างสารละลายอินทรีย์กับเมมเบรน เป็นสิ่งสำคัญที่จะกำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการเมมเบรน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ membrane fouling มีดังต่อไปนี้ คือ

#### 1. ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ความเข้มข้น และชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำจะมีผลถึง ลักษณะสมบัติของน้ำที่จะผ่านระบบเมมเบรนโดยตรง องค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำจะแตกต่างกันในแต่ละแห่ง จากการศึกษาสารอินทรีย์ในน้ำธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับการเกิด fouling ของเมมเบรน แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

- polysaccharide
- polyhydroxy aromatics
- proteins
- amino sugars

โมเลกุลของแต่ละประเภทนี้จะมีผลต่อ fouling ต่างกัน แต่ละตัวจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ขนาด และโครงสร้างของโมเลกุล ภายในโมเลกุลจะมีแรงกระทำต่อผิวเมมเบรน และต่อตัวมันเอง ทำให้เกิดการต้านแรงไหลของน้ำ เมื่อโมเลกุลขนาดใหญ่ต่างชนิดกันเหล่านี้อยู่ในสารละลายเดียวกันจะก่อให้เกิด fouling มากกว่า เมื่ออยู่แยกกันตัวใดตัวหนึ่ง divalent cation และ pH ที่ต่ำ จะทำให้สารอินทรีย์มีความสามารถในการดูดเกาะมากขึ้น น้ำที่กระด้าง และ pH มีผลต่อลักษณะการเกิด fouling ของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (dissolved organic carbon, DOC)

pH ที่จุด isoelectric point (จุดที่สารมีประจุไฟฟ้าเท่ากัน) ของตัวถูกละลายใด ๆ จะทำให้เกิด flux ต่ำสุด เนื่องจากที่จุดนี้ ประจุของตัวถูกละลายจะลดลง ทำให้เกิดการรวมตัวใหญ่ขึ้น (agglomeration) ซึ่งจะลดอัตราการแพร่ผ่านผิวของเมมเบรนลง ดังนั้น การใช้วิธีการปรับ pH เพื่อตกตะกอนสารอินทรีย์ก็มีผลต่อการเกิด fouling จากสารอินทรีย์ในน้ำนั้นด้วย

## 2. วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรู และการกระจายขนาดของรูในเมมเบรน มีผลต่อลักษณะ fouling วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำ ที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติปนอยู่ผ่านเมมเบรนก่อน และหลังจากการทำการล้างย้อน (backwash) พบว่า เมมเบรนที่ชอบน้ำจะมีการไหลผ่านมากกว่าเมมเบรนแบบที่ไม่ชอบน้ำเมื่อมี MWCO เท่ากัน คำอธิบายอย่างหนึ่งสำหรับพฤติกรรมนี้คือ เมมเบรนชนิดที่ชอบน้ำจะดูดซับสารอินทรีย์น้อยกว่าเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่าการเกิด fouling จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

## 3. การปรับสภาพน้ำ

จุดมุ่งหมายของการปรับสภาพในขั้นตอนนี้ ก็เพื่อที่จะลดปริมาณของ irreversible fouling และเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ผ่านเมมเบรน ด้วยเหตุนี้สารที่ใช้ปรับสภาพเมมเบรนควรจะเป็นตัวที่ดูดซับได้ดีบนผิวของเมมเบรน และยับยั้งการดูดซับของ foulant และมีผลกระทบต่อการไหลน้อยที่สุด



## กระบวนการเมมเบรนในการผลิตน้ำประปา

นลินี เหลืองรุ่งรอง \*, ปฎิรูป ผลจันทร์ \*, ผศ.ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล \*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนติดตั้งจมตัวภายในถังปฏิกรณ์ สำหรับบำบัดน้ำดิบจากคลองประปาในช่วงที่มีความขุ่นต่ำและสูง เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้จริงในทุกช่วงความขุ่นตลอดทั้งปี โดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (MF) ซึ่งได้แก่ ขนาดช่องว่างของเมมเบรน และค่าฟลักซ์ในการกรองน้ำ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความดันดูด (Suction Pressure) รวมทั้งประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, UV260, DOC, Fe, Mn และโคลิฟอร์มแบคทีเรียออกจากน้ำ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงการใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (NF) ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการ MF อีกด้วย

จากผลการวิจัย พบว่า กระบวนการ MF สามารถกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถกำจัดโคลิฟอร์มแบคทีเรียได้ 100% กำจัดความขุ่นได้มากกว่า 99% และกำจัดสีได้มากกว่า 97% นอกจากนี้จากข้อดีของระบบที่เป็นแบบ Submerged Tank ซึ่งจะทำให้การเป่าอากาศเพื่อลดการอุดตันของเมมเบรน ยังส่งผลช่วยให้ระบบสามารถกำจัดเหล็กได้เฉลี่ยถึง 90% และกำจัดแมงกานีสได้เฉลี่ย 50% ซึ่งจากผลของคุณภาพน้ำที่ผลิตได้นี้พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำประปาของการประปานครหลวง แต่หากพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการกำจัดค่า UV260 และ DOC แล้วจะเห็นว่ากระบวนการ MF สามารถกำจัดได้ไม่สูงมาก คือเฉลี่ยเท่ากับ 70% สำหรับค่า UV260 และ 30% สำหรับค่า DOC ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาสาร DBPs ภายหลังกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน จึงมีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการ NF ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำประปาให้สูงขึ้น และจากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำน้ำที่ผ่านกระบวนการ MF มาผ่านกระบวนการ NF สามารถกำจัดค่า UV260 และ DOC ได้มากกว่า 97% และ 90% แสดงให้เห็นว่าน้ำที่ผ่านกระบวนการ MF สามารถปรับปรุงให้คุณภาพสูงขึ้นได้โดยใช้กระบวนการ NF

### บทนำ

ปัจจุบันแหล่งน้ำผิวดินที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ทะเลสาบ เป็นต้น ได้รับการปนเปื้อนจากสิ่งต่าง ๆ มากมาย เนื่องจากการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำทั้งจากชุมชน และจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มว่าคุณภาพน้ำจะเสื่อมโทรมลง ทำให้ระบบผลิตน้ำประปาที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน การตกตะกอน และการฆ่าเชื้อโรค อาจจะไม่เพียงพอที่จะบำบัดน้ำดิบจากแหล่งน้ำผิวดินให้มีคุณภาพดีได้

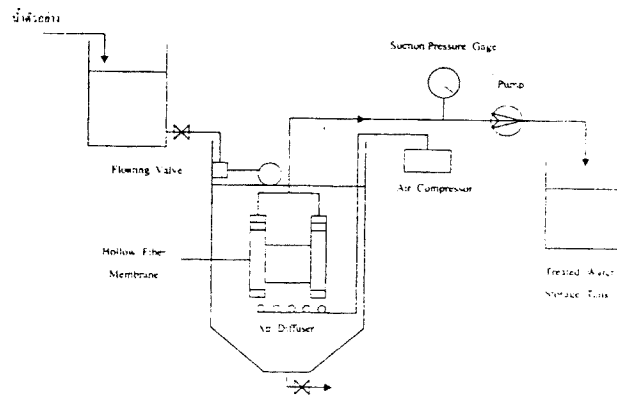
ในปี 1986 USEPA ได้ประกาศใช้กฎข้อบังคับการทำความสะอาดน้ำผิวดิน (Surface Water Treatment Rule, SWTR) แก่ไขมาตรฐานน้ำดื่มที่ปลอดภัย โดยบังคับให้องค์กรที่ผลิตน้ำสำหรับสาธารณูปโภค ต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคและการกรอง อีกทั้งค่ามาตรฐานต่าง ๆ ของน้ำประปาเคร่งครัดมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels, MCLs) มีค่าต่ำลงมาก ซึ่งในอนาคตอันใกล้ประเทศไทยอาจจะต้องปรับมาตรฐานในการผลิตน้ำประปาให้สูงขึ้นด้วย

\* ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ด้วยเหตุผลดังกล่าวได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อีกทั้งระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบันเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่และใช้พื้นที่มาก มีการเดิมสารเคมีซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย คุณภาพของน้ำที่ออกจากระบบก็ไม่คงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของแหล่งน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตว่าเปลี่ยนแปลงไปมากน้อยเพียงไร กระบวนการเมมเบรนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งได้รับความสนใจอย่างมาก และมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นระบบที่มีขนาดกระทัดรัด น้ำที่ออกจากระบบมีคุณภาพดีกว่าระบบบำบัดแบบธรรมดา ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการเดินระบบและการบำรุงรักษาอีกด้วย ซึ่งกระบวนการ MF สามารถกำจัดอนุภาคมลสารต่าง ๆ และจุลชีพจากน้ำ เพื่อใช้ผลิตเป็นน้ำประปาได้

**ส่วนประกอบ การควบคุมการทำงานและการดำเนินการทดลอง**

ส่วนประกอบของชุดการทดลองระบบ Submerged Tank MF แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังต่อไปนี้

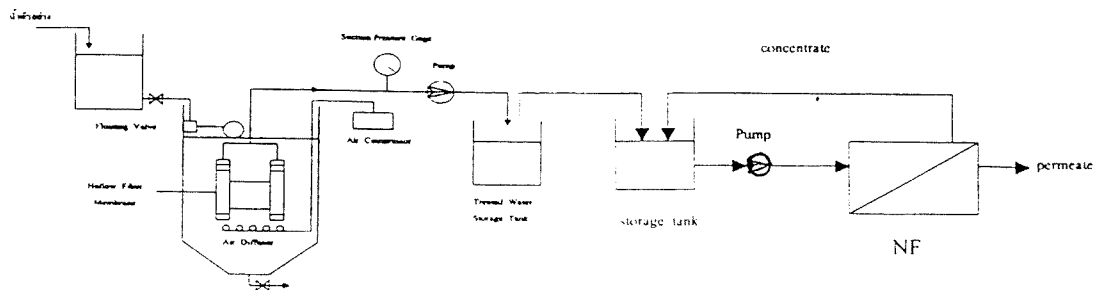


รูปที่ 1 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ถังปฏิกรณ์ขนาด 40 ลิตร ใช้ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนชนิดเส้นใยกลวง (Mitsubishi Rayon CO., LTD) ที่มีขนาดช่องว่าง 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . (ในแต่ละการทดลอง) พื้นที่ผิวการกรอง 0.3  $\text{m}^2$  ติดตั้งจมตัวในถัง สูบน้ำให้กรองผ่านเมมเบรนตลอดเวลา โดยควบคุมค่าฟลักซ์ขณะที่ป้อนชุดทำงานครั้งที่ 2 ค่าคือ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2$  - วัน ดำเนินระบบเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่ด้านล่างของถังจะเป่าอากาศอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราไหลอากาศ 50 ลิตรต่อนาที การจ่ายน้ำดิบเข้าถัง จะใช้หลอดความสูงระดับน้ำจากถังรับน้ำดิบ และควบคุมการจ่ายน้ำด้วยวาล์วลูกกลอย

น้ำที่ใช้ในการทดลอง จะใช้น้ำดิบจากคลองประปาที่บริเวณจุดรับน้ำของโรงงานผลิตน้ำบางเขน ซึ่งมีค่าความขุ่น 2 ช่วง คือช่วงความขุ่นต่ำ (60-90 NTU) และช่วงความขุ่นสูง (230-260 NTU) คุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ความดันด้านดูด, pH, อุณหภูมิ, ความขุ่น, สี, UV260, DOC, เหล็ก, แมงกานีสและโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ดังแสดงในตารางที่ 2

นอกจากนี้ยังทำการทดลองเพื่อปรับปรุงให้น้ำมีคุณภาพสูงขึ้น โดยนำน้ำที่ผ่านไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนมาผ่านนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนชนิด NTR-729HF ของบริษัท Nitto Denko ดำเนินระบบแบบ Batch เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยใช้ค่าความดัน 3 bar และค่า Crossflow Velocity 0.7  $\text{m/s}$  [3] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองกระบวนการ MF + NF

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	น้ำตัวอย่าง	น้ำดิบ	น้ำดิบ
		ความขุ่นต่ำ	ความขุ่นสูง
pH		7.50	7.77
Temp (°C)		31.0	29.9
Turbidity (NTU)		60.1	260
Color (Pt-Co)		42.36	428
UV260 (cm <sup>-1</sup> )		0.0974	0.5332
DOC (mg/l)		3.116	5.732
Fe (mg/l)		0.33	1.98
Mn (mg/l)		0.09	0.09
Total Coliforms (MPN / 100 ml)		2100	9300
Fecal Coliforms (MPN / 100 ml)		1500	4300

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆที่ทำการวัดและวิธีวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์ *
ความขุ่น	Hach Turbidity meter
สี	เครื่องเทียบสีมาตรฐาน
TOC	เครื่องวิเคราะห์ TOC
UV260	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
Fe	เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer
Mn	เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer
Total Coliform	Multiple Tube Fermentation Technic
Fecal Coliform	Multiple Tube Fermentation Technic
แรงดัน	เครื่องวัดแรงดัน
พีเอช	พีเอชมิเตอร์

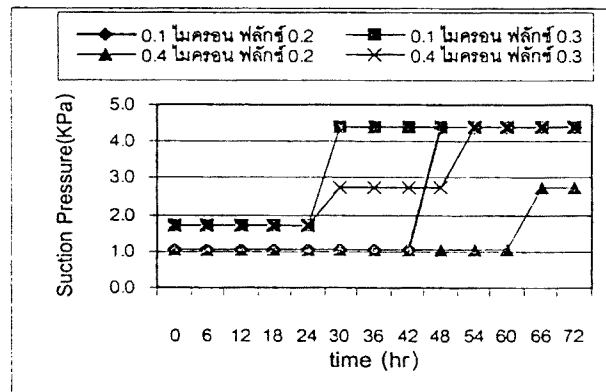
หมายเหตุ สำหรับอัตราการไหล จะใช้ระบอบคงตัวกับนาฬิกาจับเวลาในการวัด

\* วิธีวิเคราะห์อ้างอิงจาก Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater 19<sup>th</sup> Edition 1995

ผลการทดลองและบทวิเคราะห์

การทดลองที่ 1 การศึกษากระบวนการ MF ในการบำบัดน้ำดิบช่วงความขุ่นต่ำ

รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันด้านดูดต่อเวลาของเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  จะเห็นว่า ที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  จะทำให้ความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและมีค่ามากกว่าที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  ทั้งในเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ส่วนที่ค่าฟลักซ์เดียวกัน ในช่วงแรกของเมมเบรนทั้ง 2 ขนาด มีค่าความดันด้านดูดเท่ากัน แต่เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่ง เมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . จะมีค่าความดันเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . เนื่องจากขนาดช่องว่างของเมมเบรนซึ่งเล็กกว่าทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ .

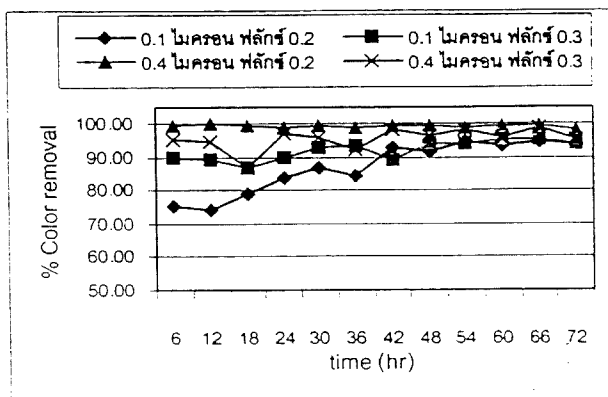
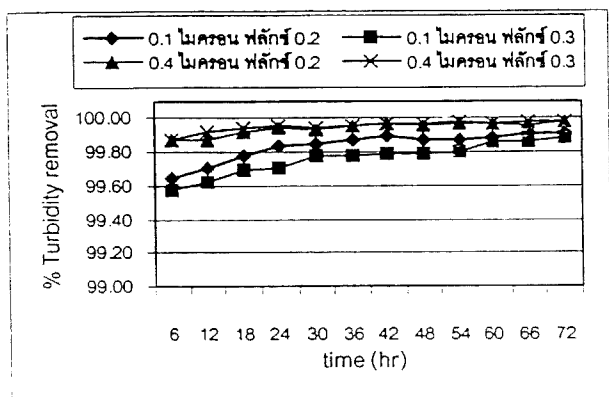


รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความดันด้านดูดต่อเวลา ของเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$

จากรูปที่ 4 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Turbidity Removal เกือบ 100% โดยจะเพิ่มขึ้นจากเมื่อเริ่มเดินระบบเล็กน้อย คือสามารถกำจัดความขุ่นได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ไม่ว่าจะที่ระยะเวลาใด เนื่องจากอนุภาคแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่าช่องว่างของเมมเบรน ทำให้อนุภาคเหล่านั้นถูกกำจัดโดยติดค้างที่ผิวหน้าและในช่องว่างของเมมเบรน ซึ่งเรียกกลไกนี้ว่า “กลไกการแยกสารแบบคัดเลือกว่าอนุภาค (Sieve Mechanism)” [1]

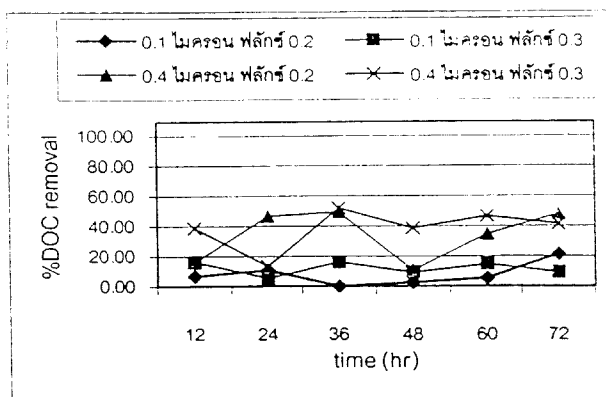
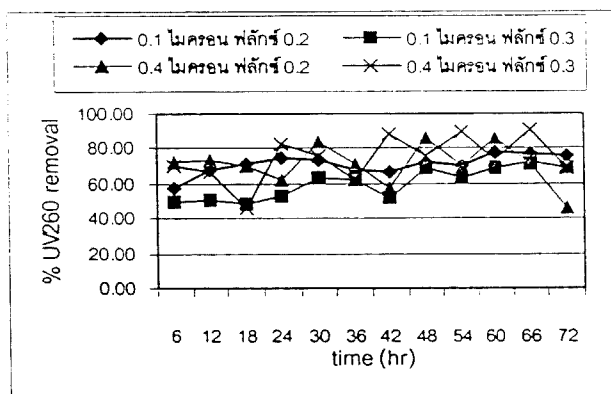
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่า เมื่อระยะเวลาเดินระบบเพิ่มขึ้น % Color Removal จะมากขึ้นจนเกือบ 95% เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  ของเมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . พบว่าในช่วงแรกค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  มี % Color Removal มากกว่าจนถึงเวลา 48 ชม. % Color Removal ของทั้ง 2 ค่าฟลักซ์มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 95% สำหรับเมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . มี % Color Removal ใกล้เคียงกันทั้ง 2 ค่าฟลักซ์เช่นเดียวกันคือ ประมาณ 98% และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  พบว่า เมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . มี % Color Removal มากกว่าเมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . แต่ที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เมมเบรนทั้ง 2 ขนาดมี % Color

Removal ใกล้เคียงกัน เหตุที่สีถูกกำจัดได้ประมาณ 90% ขึ้นไป เนื่องจาก สีในน้ำตัวอย่างเป็นสีปรากฏ ดังนั้น เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ที่ทำให้เกิดสีถูกกำจัดไปมาก จึงทำให้สีถูกกำจัดไปด้วย ส่วนสีที่เหลืออยู่จะเป็นสีที่เกิดจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ ที่ย่อยสลายยากประเภทกรดฮิวมิกและฟัลวิค ซึ่งเป็นสารที่มีความคงตัวสูงมาก กระบวนการ MF จึงกำจัดได้น้อยดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลง % Turbidity Removal ต่อเวลา รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลง % Color Removal ต่อเวลา

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่า % UV260 Removal มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสีแต่มีค่าน้อยกว่าคือ ประมาณ 50-80% ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ธรรมชาติที่ใช้ UV260 เป็นตัวแทนมีขนาดเล็กกว่าขนาดช่องว่างของเมมเบรน ทำให้สามารถหลุดรอดไปได้ ซึ่งเมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  มี % UV260 Removal มากกว่าที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เล็กน้อยคือประมาณ 70% และ 60% ตามลำดับ ซึ่งเมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ทั้งสองค่าฟลักซ์มี % UV260 Removal ใกล้เคียงกันคือประมาณ 70% ส่วนที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เมมเบรนทั้ง 2 ขนาดมี % UV260 Removal ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 70% แต่ที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . มี % UV260 Removal มากกว่าขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . เล็กน้อยคือประมาณ 70% และ 60% ตามลำดับ



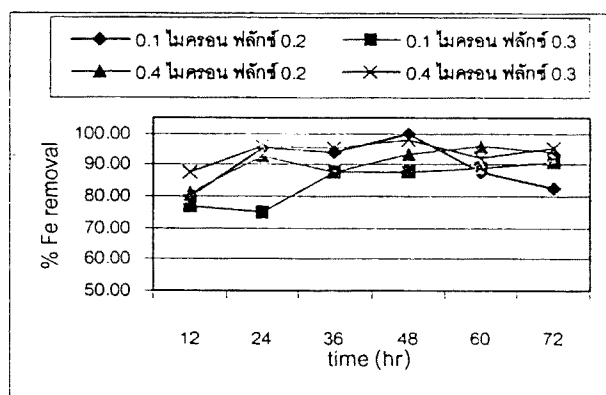
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลง % UV260 Removal ต่อเวลา รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลง % DOC Removal ต่อเวลา

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่า % DOC Removal ใกล้เคียงกันทั้งที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  คือ ประมาณ 5-20% สำหรับเมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . และประมาณ 10-50% สำหรับเมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . ซึ่งที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เมม

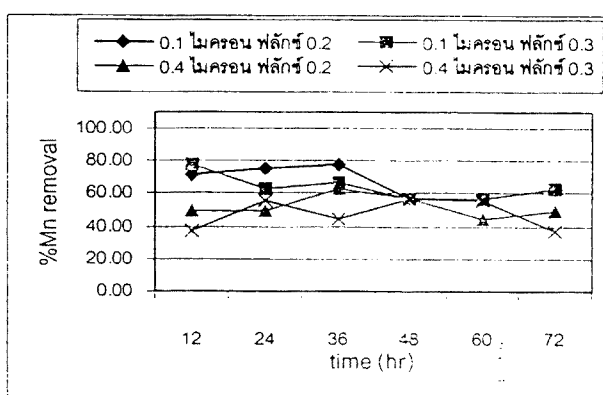
เบรขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . มี % DOC Removal มากกว่าขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . คือประมาณ 30% และ 10% ตามลำดับ เช่นเดียวกับที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  คือประมาณ 40% และ 10% ตามลำดับ เหตุที่ DOC ถูกกำจัดได้น้อยก็เนื่องมาจาก DOC เป็นสารอินทรีย์ซึ่งละลายน้ำทำให้กำจัดได้ยากด้วยกระบวนการ MF ซึ่งใช้กลไก Sieve Mechanism ในการกำจัด

จากรูปที่ 8 จะเห็นว่า เมมเบรทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Fe Removal ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 85-95% เหตุที่เหล็กถูกกำจัดได้ค่อนข้างมากก็เนื่องมาจากการเป่าอากาศทางด้านล่างของถัง ทำให้เหล็กเฟอรัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ซึ่งละลายอยู่ในน้ำกลายเป็นเหล็กเฟอริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้กำจัดออกจากน้ำได้ด้วยกระบวนการ MF

จากรูปที่ 9 จะเห็นว่า สำหรับเมมเบรขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  มี % Mn Removal ใกล้เคียงกันคือประมาณ 65 % เช่นเดียวกับที่ขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . แต่มีค่า % Mn Removal ประมาณ 50% เมื่อพิจารณาที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  จะเห็นว่า เมมเบรขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . มี % Mn Removal มากกว่าขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . เล็กน้อยคือประมาณ 65% และ 50% ตามลำดับ เหตุที่กระบวนการ MF กำจัดแมงกานีสได้น้อยกว่าเหล็ก เนื่องจากแมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำตัวอย่าง ( $\text{Mn}^{2+}$ ) เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนจะกลายเป็น  $\text{Mn}^{4+}$  ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่ปฏิกิริยานี้จะเกิดยากเนื่องจาก แมงกานีสจะคงตัวไม่แปรเปลี่ยนรูปร่างเหมือนเหล็ก [2] การกำจัดแมงกานีสออกจากน้ำโดยกระบวนการ MF จึงทำได้ยากกว่า ดังนั้น % Mn Removal จึงต่ำกว่า % Fe Removal



รูปที่ 8 การเปลี่ยนแปลง % Fe Removal ต่อเวลา



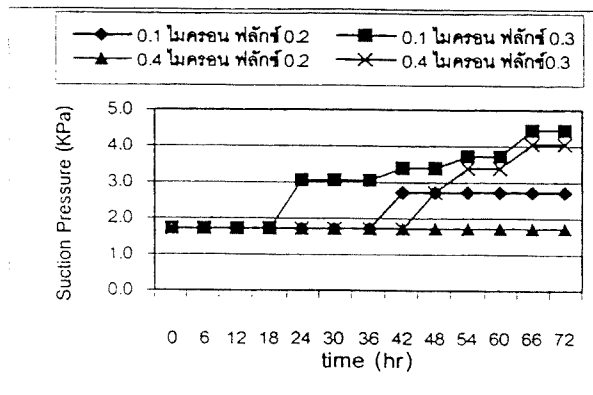
รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลง % Mn Removal ต่อเวลา

จากการทดลองยังพบว่ากระบวนการ MF สามารถกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform Bacteria ได้ 100% ในทุกการทดลอง เนื่องจาก bacteria นี้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดช่องว่างของเมมเบรทั้ง 0.1  $\mu\text{m}$  และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ทำให้ติดถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยติดค้างอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบร

## การทดลองที่ 2 การศึกษากระบวนการ MF ในการบำบัดน้ำดิบช่วงความขุ่นสูง

รูปที่ 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความดันด้านดูดต่อเวลาของเมมเบรขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  โดยในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้จะให้ผลใกล้เคียงกับในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 3) คือพบว่า ที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  จะทำให้ความดันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและมีค่ามากกว่าที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  ทั้งในเมมเบรขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ส่วนที่ค่าฟลักซ์เดียวกัน ในช่วงแรกของเมมเบรทั้ง 2 ขนาด มีค่าความดันด้านดูดเท่ากัน แต่เมื่อเดิน

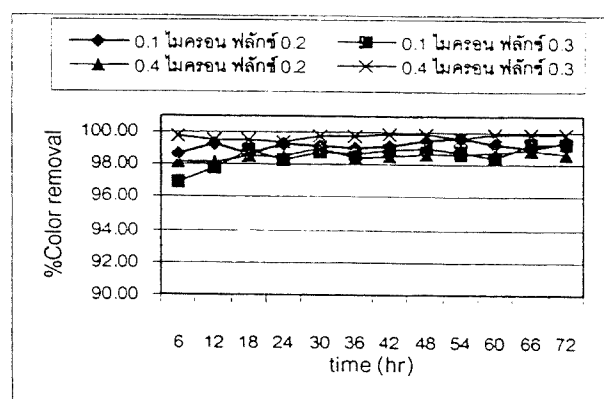
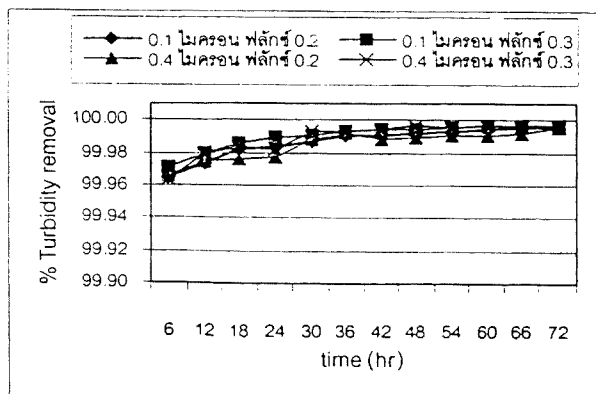
ระบบไประยะหนึ่ง เมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$ . จะมีค่าความดันเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าเมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ . เนื่องจากขนาดช่องว่างของเมมเบรนซึ่งเล็กกว่าทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเมมเบรนมากกว่าขนาด 0.4  $\mu\text{m}$ .



รูปที่ 10 การเปลี่ยนแปลงความดันด้านดูดต่อเวลาของเมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$

จากรูปที่ 11 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Turbidity Removal เกือบ 100% โดยจะเพิ่มขึ้นจากเมื่อเริ่มเดินระบบเล็กน้อย คือสามารถกำจัดความขุ่นได้ค่อนข้างสมบูรณ์ ไม่ว่าจะที่ระยะเวลาใด เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดลองที่ 2 จะพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % Turbidity Removal สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 4) เล็กน้อย เนื่องจากถึงในน้ำที่มีความขุ่นสูง จะมีความเข้มข้นของอนุภาคแขวนลอยมากกว่า แต่ค่าความขุ่นในน้ำที่ผ่านการบำบัดใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง ทำให้ % Turbidity Removal ที่ได้ มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำที่มีความขุ่นต่ำ

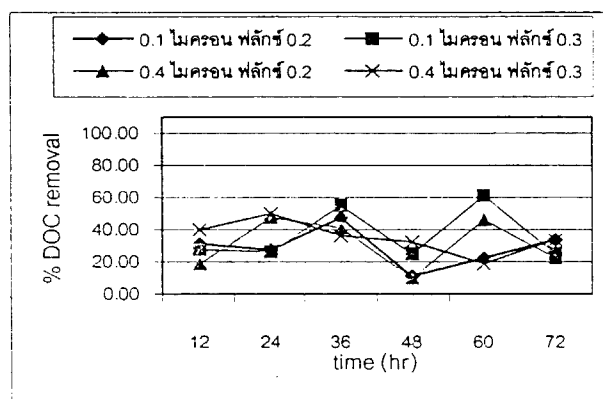
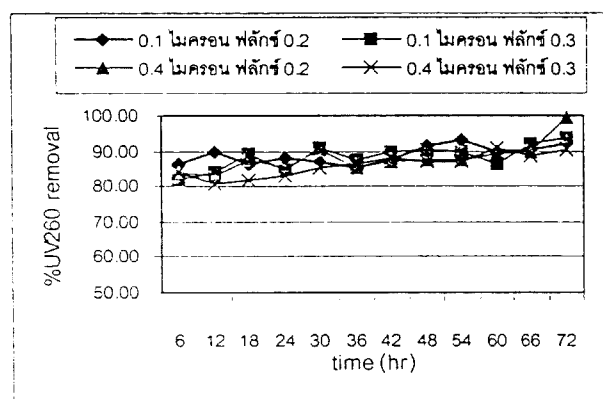
จากรูปที่ 12 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Color Removal ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 98.5-99.5% โดยจะเพิ่มขึ้นจากเมื่อเริ่มเดินระบบเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดลองที่ 2 จะพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % Color Removal สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 5) เล็กน้อย เนื่องจากถึงในน้ำที่มีความขุ่นสูง จะมีความเข้มข้นมากกว่า แต่ค่าสีในน้ำที่ผ่านการบำบัดใกล้เคียงกันตลอดการทดลอง ทำให้ % Color Removal ที่ได้ มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำที่มีความขุ่นต่ำ



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลง % Turbidity Removal ต่อเวลา รูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลง % Color Removal ต่อเวลา

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % UV260 Removal ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 85-90% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับสแตมมีค่าน้อยกว่า และเนื่องจากในน้ำที่มีความขุ่นสูง มีค่า UV260 สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ แต่ค่า UV260 ในน้ำที่ผ่านการบำบัดใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 จึงพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % UV260 Removal สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 6) เล็กน้อย

จากรูปที่ 14 จะเห็นว่า % DOC Removal ใกล้เคียงกันทั้งที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  คือ ประมาณ 25% และ 35% ตามลำดับ สำหรับเมมเบรนทั้งขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ซึ่งที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  เมมเบรนทั้งขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$ . มี % DOC Removal เท่ากัน คือประมาณ 25% เช่นเดียวกับที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  คือประมาณ 35% เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 จะพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % DOC Removal ใกล้เคียงกับในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 7) ซึ่งมาจากเหตุผลเดียวกันคือ กระบวนการ MF ไม่สามารถกำจัด DOC ได้มากนัก



รูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลง % UV260 Removal ต่อเวลา

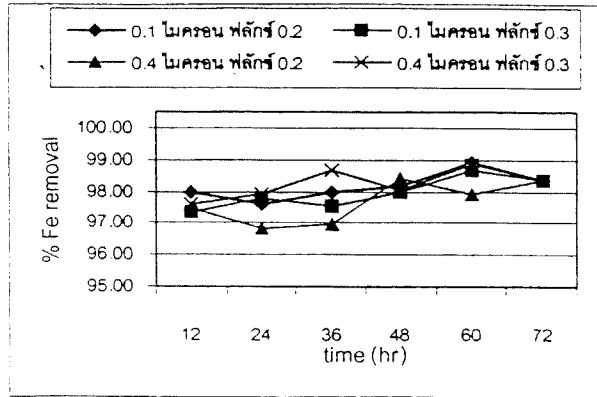
รูปที่ 14 การเปลี่ยนแปลง % DOC Removal ต่อเวลา

จากรูปที่ 15 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Fe Removal ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 97-98% โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเนื่องจากในน้ำที่มีความขุ่นสูง มีค่า Fe สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ แต่ค่า Fe ในน้ำที่ผ่านการบำบัดใกล้เคียงกันในแต่ละการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 จึงพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % Fe Removal สูงกว่าในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 8) เล็กน้อย

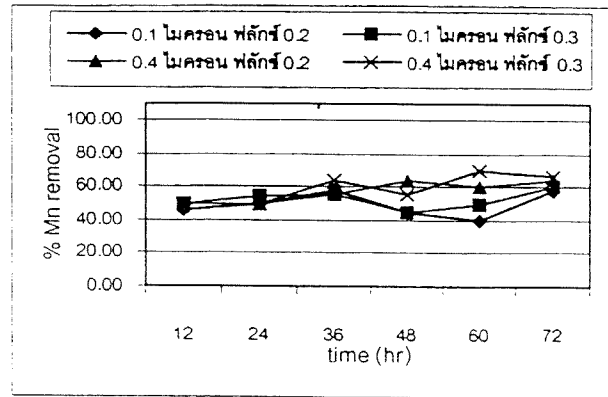
จากรูปที่ 16 จะเห็นว่า เมมเบรนทั้ง 2 ชนิดที่ทั้ง 2 ค่าฟลักซ์ มี % Mn Removal ใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 40-60% โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเนื่องจากในน้ำที่มีความขุ่นสูง มีค่า Mn ใกล้เคียงกับในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองที่ 2 จึงพบว่าในน้ำที่มีความขุ่นสูงนี้ จะมี % Mn Removal ใกล้เคียงกับในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ (ดังแสดงในรูปที่ 9)

จากการทดลองยังพบว่า กระบวนการ MF สามารถกำจัด Total Coliform และ Fecal Coliform Bacteria ได้ 100 % ในทุกการทดลอง เนื่องจาก bacteria นี้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดช่องว่างของเมมเบรนทั้ง 0.1  $\mu\text{m}$ . และ 0.4  $\mu\text{m}$ . ทำให้ถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยติดค้างอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน





รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลง % Fe Removal ต่อเวลา



รูปที่ 16 การเปลี่ยนแปลง % Mn Removal ต่อเวลา

### การทดลองที่ 3 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำจาก MF โดยใช้ NF

ผลจากการทดลองที่ 1 และ 2 จะเห็นได้ว่า กระบวนการ MF สามารถกำจัดความขุ่น, สี, เหล็ก และโคลิฟอร์มแบคทีเรีย ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยกเว้น DOC ซึ่งสามารถกำจัดได้เพียงเล็กน้อย คือประมาณ 5-50% ในน้ำที่มีความขุ่นต่ำ และประมาณ 10-60% ในน้ำที่มีความขุ่นสูง จึงทำการศึกษาต่อโดยการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการ MF (ที่ขนาดช่องว่าง 0.1  $\mu\text{m}$ . และน้ำคืบที่มีความขุ่นสูง) มาผ่านกระบวนการ NF ต่อ เพื่อกำจัด DOC ให้มีค่าต่ำลง และเป็นการปรับปรุงคุณภาพให้สูงขึ้นอีกด้วย โดยผลการวิจัยที่ได้สามารถแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณภาพน้ำที่ผ่าน MF และ MF + NF เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานน้ำประปา

น้ำตัวอย่าง พารามิเตอร์	น้ำคืบ ความขุ่นสูง	น้ำที่ผ่าน MF	น้ำที่ผ่าน MF + NF	ค่ามาตรฐาน น้ำประปา
1. pH	7.77	7.88	7.71	6.5-8.5
2. Temp ( $^{\circ}\text{C}$ )	29.9	31.1	29.3	*
3. Turbidity (NTU)	260	0.12	N.D.	5
4. Color (Pt-Co)	428	6.89	N.D.	15
5. UV260 ( $\text{cm}^{-1}$ )	0.533	0.123	0.020	*
6. DOC (mg/l)	5.73	4.34	0.72	*
7. Fe (mg/l)	1.98	0.08	N.D.	0.3
8. Mn (mg/l)	0.09	0.05	N.D.	0.1
9. Total Coliforms (MPN / 100 ml)	9300	N.D.	N.D.	N.D.
10. Fecal Coliforms (MPN / 100 ml)	4300	N.D.	N.D.	N.D.

หมายเหตุ

N.D. = ไม่พบ

\* = ไม่มีค่ามาตรฐาน

จากตารางจะเห็นได้ว่า คุณภาพของน้ำที่ผ่านกระบวนการ MF และ MF+NF สามารถผ่านค่ามาตรฐานน้ำประปาได้ในทุกพารามิเตอร์ที่มีค่ามาตรฐาน นอกจากนี้กระบวนการ MF+NF ยังเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัด UV260 และ DOC ให้สูงขึ้นกว่าการใช้กระบวนการ MF เพียงอย่างเดียว

#### สรุปผลการทดลอง

1. เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.4  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน ทั้งที่ค่าฟลักซ์ 0.2 และ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  หรือในน้ำตัวอย่างที่มีความขุ่นต่ำและสูงด้วย แต่เมมเบรนขนาด 0.1  $\mu\text{m}$  จะกำจัด Fe และ Mn ได้มากกว่า ในขณะที่เมมเบรนขนาด 0.4  $\mu\text{m}$  จะกำจัดสี, UV260 และ DOC ได้มากกว่า
2. ที่ค่าฟลักซ์ 0.3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  ทำให้ความคั่งค้างคอลลอยเพิ่มขึ้นกว่าที่ค่าฟลักซ์ 0.2  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-วัน}$  ในเมมเบรนทั้ง 2 ขนาด แต่ค่าฟลักซ์จะไม่มีผลที่แน่นอนต่อประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่น, สี, UV260, DOC, Fe และ Mn
3. การใช้กระบวนการ MF กับน้ำที่มีความขุ่นสูง ให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดความขุ่น, สี, UV260, DOC, Fe และ Mn ต่ำกว่าน้ำที่มีความขุ่นต่ำ
4. กระบวนการ NF ร่วมกับ MF ช่วยให้น้ำประปาที่ผลิตได้มีคุณภาพสูง และน่าเชื่อถือ ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำประปาที่กำหนด

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (สวสท.) ที่ให้ทุนอุดหนุนส่วนหนึ่งเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Vigneswaran, S. (1991). Application of Microfiltration for Water and Wastewater Treatment. Environmental Sanitation Reviews. June, No. 31.
- [2] มั่นสิน ตันจุลเวศม์. 2539. วิศวกรรมกรรมประปาเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] ปฎิรูป ผลจันทร์. 2544. การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำ โดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

## การกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

ปฏิรูป ผลจันทร์ \* , ผศ.ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล \*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (NF) ในการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matter หรือ NOM) ออกจากน้ำในระดับห้องปฏิบัติการ โดยจะพิจารณาถึงปัจจัยที่มีบทบาทสำคัญที่จะพบในการดำเนินระบบจริง ซึ่งประกอบด้วย ชนิดของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนที่ใช้ , ค่าความดัน , ค่า Crossflow Velocity , พีเอช และความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำดิบ โดยใช้ค่าความดันในการดำเนินระบบในช่วงต่ำมาก (1-5 บาร์) เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่เคยทำมา โดยใช้ น้ำดิบจากคลองประปาบริเวณจุฬารัตน์ของโรงกรองน้ำสามเสน กรุงเทพมหานคร ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า นาโนฟิลเตรชันเมมเบรนทั้งสามชนิดที่ใช้สามารถกำจัดค่า UV260 ได้มากกว่า 80% โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมมเบรนชนิด ES-10 สามารถกำจัดได้เกือบ 100% และพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความดัน และค่า Crossflow Velocity ที่ใช้จะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด NOM สูงขึ้น โดยค่าความดันที่เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าฟลักซ์ของน้ำที่ผลิตได้ ในขณะที่ค่า Crossflow Velocity จะไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์ และยังคงพบว่าช่วงค่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่า UV260 ของเมมเบรนมากนัก แต่สามารถบอกถึงกลไกที่ใช้ในการกำจัดค่า UV260 ของเมมเบรนได้ เช่นเดียวกับความเข้มข้นของโบรไมด์ในน้ำดิบ โดยเมมเบรนชนิด ES-10 สามารถกำจัดโบรไมด์ได้จนถึงระดับที่ไม่สามารถวัดปริมาณได้ และชนิด NTR-729HF กำจัดโบรไมด์ได้เล็กน้อย ส่วนชนิด NTR-7410 กำจัดโบรไมด์ได้น้อยมาก และจากการหาค่าอัตราส่วน UV260 : TOC ทั้งในน้ำดิบและน้ำ Permeate แสดงให้เห็นว่า NOM ในน้ำดิบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นสารอะโรมาติก และโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวอื่น ๆ ซึ่งย่อยสลายทางชีววิทยาได้ยาก และกลไกสำคัญในการกำจัดค่า UV260 ของเมมเบรน คือ กลไกการกรองคอลลอยด์เมมเบรน

### บทนำ

งานวิจัยนี้ทำเพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของ NOM และวิธีที่จะใช้ในการกำจัดสารนี้ออกจากน้ำในสมัยแรก ๆ นั้น เกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการที่จะกำจัดสีออกจากน้ำประปาต่อมาจึงได้มีการค้นพบปัญหาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการมี NOM ในน้ำ ซึ่งประกอบไปด้วย การหาปริมาณความต้องการสารโคแอกกูแลนต์ และสารฆ่าเชื้อโรคของ NOM ความสามารถในการขนส่งโลหะ และสารอินทรีย์ไม่ชอบน้ำ การก่อให้เกิดการกัดกร่อน และการเกิดเมือกในระบบจ่ายน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้สารออกซิแดนต์ เช่น คลอรีน หรือ โอโซน ในกระบวนการบำบัด การก่อให้เกิดกลิ่น และรส ของน้ำ แนวโน้มในการเป็นตัวขัดขวางการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่น และ การเป็นตัวการที่ก่อให้เกิดสาร Disinfection By-products (DBPs) [1] Conventional Process ที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันนอกจากจะไม่สามารถกำจัด NOM ออกจากน้ำได้อย่างเพียงพอแล้ว ยังมีโอกาสที่จะทำให้เกิดปัญหาขึ้นได้ เช่นในกระบวนการเคมี

\* ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คลอรีนให้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด NOM ค่า ทำให้มีปริมาณ NOM เหลืออยู่ในน้ำมาก หากเติมคลอรีน โดยคำนึงถึงแต่ปริมาณคลอรีนที่ต้องการให้ตกค้างอยู่ในน้ำ (Chlorine Residual) อาจทำให้เกิดสาร DBPs เช่น สารไตรฮาโลมีเทน (Trihalomethane หรือ THMs) ในปริมาณสูง นอกจากนี้หากในน้ำดิบมีโบรไมด์ปะปนอยู่ด้วย ก็จะเป็นตัวการหนึ่งที่เสริมให้เกิดปัญหา DBPs ให้มีมากขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าสาร DBPs นี้เป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ [2]

ในปัจจุบันค่ามาตรฐานของน้ำประปา หรือที่เรียกว่าค่าระดับความปนเปื้อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Contaminant Levels หรือ MCLs) ของสารปนเปื้อนต่าง ๆ ในน้ำมีค่าต่ำลงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสาร DBPs และ ปริมาณโลหะหนักต่าง ๆ ซึ่ง NOM เป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดสารปนเปื้อนเหล่านี้ โดยจะเห็นได้ชัดเจนในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา เป็นต้น [3] ทำให้มีการพัฒนาและทำการวิจัยเพื่อหากระบวนการที่จะสามารถใช้ในการกำจัด NOM ออกจากน้ำอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งยังมีงานวิจัยในเรื่องนี้น้อยมากในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งยังไม่มีการวิจัยใดที่ใช้ น้ำจากแหล่งน้ำดิบจริงที่ใช้ในการผลิตน้ำประปา

มีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าการใช้กระบวนการเมมเบรน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการ NF มีประสิทธิภาพดีที่สุดในกรณีการดำเนินการบำบัดน้ำดิบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก [1] นอกจากนี้ เนื่องจากในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับกระบวนการเมมเบรนไปอย่างมาก ทำให้กระบวนการนี้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการใช้กำจัด NOM ในระบบผลิตน้ำประปาของประเทศไทยในอนาคต

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาถึงปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการ NF เพื่อให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการ โดยคำนึงถึงการประหยัดพลังงานโดยใช้ความดันในช่วงค่าต่ำมาก นอกจากนี้ยังใช้น้ำจากแหล่งน้ำจริงที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาของกรุงเทพมหานคร เพื่อให้ได้ตัวแทนของ NOM ที่จะพบจริงในการประยุกต์ใช้ต่อไป

## วิธีการวิจัย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### แหล่งน้ำดิบที่ใช้

แหล่งที่มาของ NOM ในแหล่งน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อส่วนประกอบของสารอินทรีย์ เช่น NOM ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดินจะมีส่วนที่เป็นสารอะโรมาติกในปริมาณที่สูงกว่า NOM ที่เกิดในน้ำนอกจากนี้ยังขึ้นกับองค์ประกอบอื่น ๆ ด้วย เช่น สถานะ และอายุของดิน เป็นต้น [4] ในงานวิจัยนี้เลือกใช้น้ำดิบจากคลองประปา บริเวณจุดรับน้ำของโรงกรองน้ำสามเสน เพื่อเป็นตัวแทนของ NOM ในแหล่งน้ำผิวดินประเภทแม่น้ำ ซึ่งเป็นประเภทของแหล่งน้ำส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตน้ำประปาในประเทศไทย

### การบำบัดน้ำดิบขั้นต้น

จากงานวิจัยของ Chellam และคณะ [5] แสดงให้เห็นว่าการบำบัดน้ำดิบขั้นต้นมีความสำคัญต่อการลดการอุดตันของ NF เมมเบรน นอกจากนี้ยังช่วยยืดเวลาในการทำงานต่อการล้างเมมเบรนในแต่ละครั้งอีกด้วย ดังนั้นน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะผ่านการบำบัดขั้นต้น โดยการกรองผ่านแผ่นกรองใยแก้ว หลังจากนั้นจะถูกสูบลำผ่าน Cartridge Filter ขนาดรูพรุน 1  $\mu\text{m}$ . โดยจะทำการเตรียมน้ำดิบ 1 ครั้งต่อ 1 การทดลอง

### พารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวแทนปริมาณของ NOM

งานวิจัยเกี่ยวกับ NOM เกือบทั้งหมดใช้ค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 254 nm. (UV254) และค่าคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด(TOC) เป็นตัวแทนปริมาณ NOM ในน้ำ [6],[7],[8] โดยพบว่าค่า UV254 มีความสัมพันธ์ที่ติมากกับปริมาณ TOC และสารที่ก่อให้เกิดสารDBPs โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ค่า UV260 เพื่อลดผลจากการรบกวนของไนเตรต และเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันกับการประปานครหลวง โดยจะทำการวัดค่าTOC เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง

**เมมเบรนและโมดูลที่ใช้**

ในงานวิจัยนี้ใช้ NF เมมเบรนทั้งหมด 3 ชนิด ซึ่งมีลักษณะสมบัติแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1 ชนิดและลักษณะสมบัติของ NF เมมเบรนที่ใช้ในงานวิจัย**

ชนิดของเมมเบรน	วัสดุ	%การกำจัด NaCl*
NTR-7410	Polysulfonate	15%
NTR-729HF	Polyvinyl alcohol/Polyamide	93%
ES-10	Aromatic polyamide	99.6%

\* ที่ 15 บาร์ , 0.15% NaCl

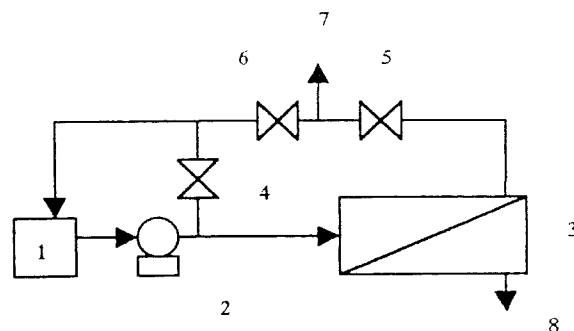
เมมเบรนและโมดูลที่ใช้เป็นแบบ Flat Sheet ชนิด C-10T ของบริษัท Nitto Denko มีพื้นที่ผิวประสิทธิภาพของเมมเบรน 60 ตารางเซนติเมตร

**ขั้นตอนและรายละเอียดในการทดลอง**

ในการศึกษาผลของความดันที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการกำจัด NOM ของ NF เมมเบรนทั้ง 3 ชนิด จะใช้ค่าพีเอชและอุณหภูมิจริงของน้ำดิบ โดยปรับค่า Crossflow Velocity ให้เท่ากับ 0.7 ม./ว. (Crossflow Velocity 0.42 ม./ว. = ค่าอัตราไหล 1 ลิตร/นาที) ค่าความดันที่ใช้ในช่วง 1-5 บาร์ ในการศึกษาถึงผลของค่า Crossflow Velocity จะใช้ค่าความดันสำหรับเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF เท่ากับ 3 บาร์ และสำหรับชนิด NTR-7410 เท่ากับ 2 บาร์ โดยค่า Crossflow Velocity ที่ใช้ในช่วง 0.05-0.7 ม./ว. ส่วนการศึกษาถึงผลของพีเอชจะใช้ในช่วง 4-8 และการศึกษาผลของความเข้มข้นโบรไมด์จะใช้ในช่วง 0-0.8 มก./ล. โดยจะใช้ค่าความดันค่าเดียวกับการศึกษาผลของ Crossflow Velocity โดยปรับให้ค่าอัตราไหลคงที่ที่ 1.67 ลิตร/นาที

**รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในงานวิจัย**

รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 1



**รูปที่ 1 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ในงานวิจัย :**

1=ถังน้ำดิบ, 2=ปั๊ม, 3=โมดูลเมมเบรน, 4,5,6=วาล์ว, 7,8=อัตราไหลในระบบ,อัตราไหลของPermeate

ความดันและค่าอัตราการไหลจะปรับโดยการควบคุมวาล์ว 4 และ 5 ทำการวัดค่าฟลักซ์ของ Permeate หลังจากการดำเนินระบบ 1 และ 2 ชม.ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบสถานะ Steady-state ของระบบ และเก็บตัวอย่างน้ำ Permeate หลังจากการดำเนินระบบ 2 ชม. ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในน้ำเข้าและน้ำ Permeate ทุกครั้งของการทดลอง

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมรรถนะของกระบวนการ NF แสดงได้โดยค่าฟลักซ์และค่าการกำจัดสารที่ไม่ต้องการ โดยค่าฟลักซ์เป็นค่าสำคัญที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่สามารถผลิตได้ส่วนค่าการกำจัดจะแสดงถึงคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้

ค่าฟลักซ์สำหรับกระบวนการ NF ซึ่งเป็นเมมเบรนแบบไม่มีรูพรุน ใช้ผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อน การผ่านเยื่อแผ่นของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ ดังนั้นค่าฟลักซ์จึงสามารถแสดงได้โดยใช้แบบจำลองการละลายการแพร่ ซึ่งแสดงในรูปสมการที่ง่ายที่สุดได้ดังนี้

$$F_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) \quad (1)$$

โดย  $F_w$  =ค่าฟลักซ์ของน้ำ ( $m^3/m^2 \cdot s$ );  $K_w$  =สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ( $m^3/m^2 \cdot s \cdot bar$ );  $\Delta P$  =ผลต่างความดันระหว่างเยื่อแผ่น(bar) และ  $\Delta \pi$  =ผลต่างความดันออสโมติกระหว่างเยื่อแผ่น(bar) และ

$$F_s = K_s (C_m - C_p) \quad (2)$$

โดย  $F_s$  =ฟลักซ์ของตัวถูกละลาย( $mole/m^2 \cdot s$ );  $K_s$  =สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของตัวถูกละลาย( $m/s$ );  $C_m$  =ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวเมมเบรน( $mole/m^3$ ) และ  $C_p$  =ความเข้มข้นPermeate( $mole/m^3$ ) ค่าการกักกัน หรือค่าการกำจัดสามารถแสดงได้ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ดังนี้ [9]

$$\text{ค่าการกักกัน} = 1 - \frac{K_s}{[K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left( \frac{2-2R}{2-R} \right) + K_s]} \quad (3)$$

โดย R=ค่าRecovery ของน้ำ ซึ่งเท่ากับ  $Q_p/Q_f$  เมื่อ  $Q_p$  และ  $Q_f$  =อัตราไหลของPermeateและน้ำเข้าระบบตามลำดับ ( $m^3/s$ )

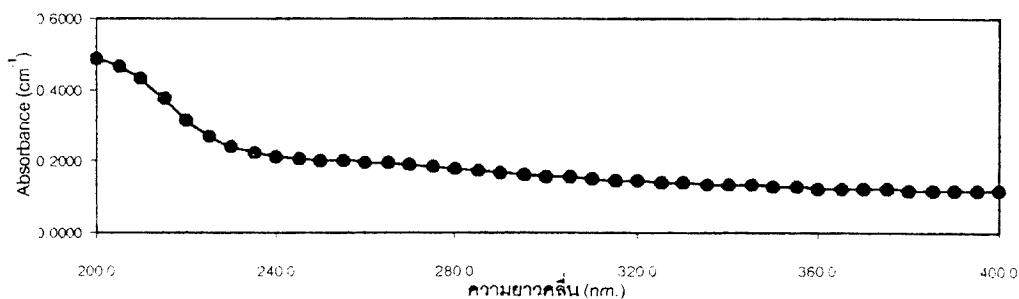
### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### ลักษณะสมบัติของน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัย

จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของน้ำดิบในคลองประปาบริเวณโรงกรองน้ำสามเสน ของการประปานครหลวง ตลอดปี พ.ศ. 2543 [10] พบว่าคุณภาพของน้ำดิบในคลองประปาสามเสนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ควบคุมของการประปานครหลวง และจะมีค่าแปรผันไปตามฤดูกาลโดยคุณภาพน้ำดิบในช่วงฤดูฝน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำดิบมาใช้ในการทำงานวิจัย มีค่าความขุ่น , ของแข็งแขวนลอย และของแข็งทั้งหมดสูงกว่าในฤดูอื่น ๆ ซึ่งจากการที่ NOM ที่อยู่ในแหล่งน้ำผิวดินส่วนใหญ่จะมีกำเนิด

มาจากดิน และเป็นสารที่ก่อให้เกิดสีเหลืองถึงน้ำตาล รวมถึงความขุ่นและสารแขวนลอยต่าง ๆ ในน้ำทำให้สามารถคาดได้ว่าปริมาณของ NOM ในน้ำช่วงฤดูฝนน่าจะมีค่าสูงกว่าในฤดูอื่น ๆ ด้วย ส่วนค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ทำการวัดในงานวิจัย คือ ค่าความนำไฟฟ้า, ทีเอช และอุณหภูมิก็มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดโดยการประปานครหลวง

ผลจากการตรวจสอบค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ความยาวคลื่น 200-400 nm. ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานที่ใช้ตรวจสอบถึงความเหมาะสมในการใช้ค่า UV260 เป็นตัวแทนของปริมาณ NOM ในน้ำ [8] (แสดงในรูปที่ 2) จะเห็นได้ว่าน้ำตัวอย่างมีค่าการดูดกลืนแสง UV เพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นที่ลดลงโดยไม่มีส่วนใดมีค่าผิดปกติไปตามแนวโน้มนี้ แสดงให้เห็นว่าในน้ำดิบไม่มีสารใดที่เป็นตัวบดบังค่า UV260 ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่า UV260 เป็นตัวแทนปริมาณของ NOM ในน้ำตัวอย่างได้



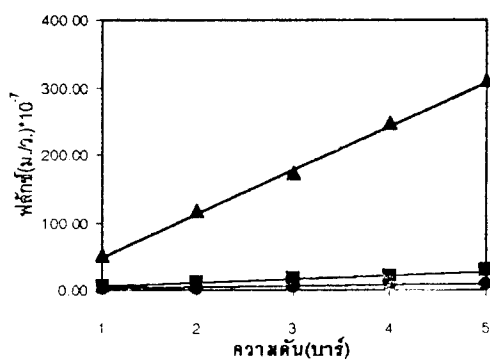
รูปที่ 2 แสดงค่าการดูดกลืนแสง UV ในช่วง 200-400 nm. ของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

#### ผลของค่าความดันที่ใช้

รูปที่ 3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์และความดันที่ใช้ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิด พบว่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระบวนการ NF เป็นกระบวนการที่ใช้ความดันระหว่างเยื่อแผ่นเป็นแรงขับเคลื่อน ดังนั้นค่าฟลักซ์จึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความดันที่เพิ่มขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ดังสมการ(1) เมื่อเพิ่มค่าผลต่างความดันระหว่างเยื่อแผ่น,  $\Delta P$  จะทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำ,  $F_w$  เพิ่มขึ้นซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Schrigl และ Widmer [11] และ Visvanathan และคณะ [12] โดยเมมเบรนชนิด NTR-7410 ให้ค่าฟลักซ์ที่มากที่สุดคือ 50.66 ถึง  $309.52 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ที่ความดัน 1-5 บาร์ ในขณะที่เมมเบรนชนิด NTR-729HF และ ES-10 ให้ค่าฟลักซ์ 4.75 ถึง  $29.19 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$  และ 1.62 ถึง  $9.94 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}$  ตามลำดับในช่วงความดันเดียวกัน โดยค่า  $K_w$  สำหรับเมมเบรนชนิด NTR-7410, NTR-729HF และ ES-10 มีค่า  $64.942 \times 10^{-7}$ ,  $5.734 \times 10^{-7}$  และ  $2.046 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{bar}$  ตามลำดับ ค่าฟลักซ์ที่มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดของเมมเบรนชนิด NTR-7410 เนื่องจากลักษณะสมบัติของเมมเบรนที่ใกล้เคียงกับเมมเบรนแบบมีรูพรุนมากกว่าเมื่อเทียบกับเมมเบรนอีกสองชนิดที่ใช้ในการทดลอง (ตารางที่ 1)

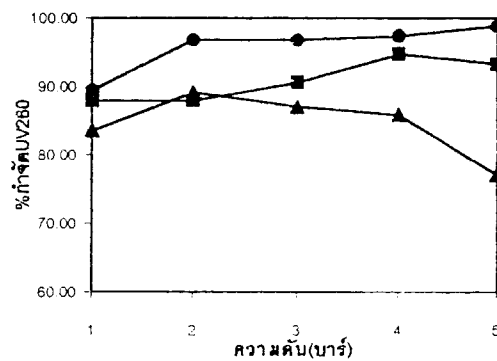
ผลของความดันที่ใช้ต่อค่าการกำจัด UV260 ของเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF ก็เป็นไปในทำนองเดียวกับค่าฟลักซ์ (รูปที่ 4) คือเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นมีค่าไม่มากนักในช่วงความดันที่ใช้ ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนทั้งสองชนิดเป็นเมมเบรนแบบไม่มีรูพรุนและจากการหาค่าการกำจัดความนำไฟฟ้าพบว่าเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF สามารถกำจัดได้ถึงมากกว่า 90% และ 30% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถกำจัด NOM ซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่ได้เกือบทั้งหมดโดยไม่ขึ้นกับความ

คั้นที่ใช้มากนั้ก สมการ(3)สามารถใช้อธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของค่าการกำจัดกับความคั้น เมื่อความคั้นที่ใช้เพิ่มขึ้นค่าของเทอม  $K_w(\Delta P - \Delta \pi)$  และค่า  $R$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของ  $R$  ทำให้เทอม  $(2 - 2R)/(2 - R)$  มีค่าน้อยลงแต่เนื่องจากค่า  $R$  จะอยู่ในช่วงเพียง 0.5-1% ทำให้การลดลงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการเพิ่มของ  $K_w(\Delta P - \Delta \pi)$  ทำให้ค่าตัวหารของสมการ(3)มีค่ามากขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มความคั้นจึงทำให้ค่าการกำจัดมีค่ามากขึ้น แต่ผลของความคั้นที่เพิ่มขึ้นไม่ทำให้ค่าการกำจัดUV260 ของเมมเบรนชนิด NTR-7410 เพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อใช้ความคั้นมากเกิน 2 บาร์กลับทำให้ค่าการกำจัดลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่การกำจัดความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามความคั้นไปจนถึงความคั้น 4 บาร์ และลดลงเล็กน้อยที่ความคั้น 5 บาร์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มความคั้นจะทำให้ความเข้มข้นของ NOM ที่ผิวของเมมเบรนเพิ่มขึ้นทำให้ผลของ Concentration Polarization มีมากขึ้น และเนื่องจากเมมเบรนนี้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับเมมเบรนแบบมีรูพรุน จึงทำให้ปริมาณNOMในน้ำPermeate มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุการณ์นี้พบเช่นเดียวกันในงานวิจัยของWaypa [13] ในขณะที่เดียวกันชั้นของความเข้มข้นของNOM ที่มากขึ้นที่ผิวของเมมเบรนจะทำหน้าที่ช่วยกักกันไม่ให้ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน จึงทำให้ค่ากำจัดความนำไฟฟ้ายังคงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความคั้นไปอีกช่วงค่าหนึ่ง



รูปที่3 ผลของความคั้นต่อค่าฟลักซ์

(●)ES-10, (■)NTR-729HF, (▲)NTR-7410



รูปที่4 ผลของความคั้นต่อ%กำจัดUV260

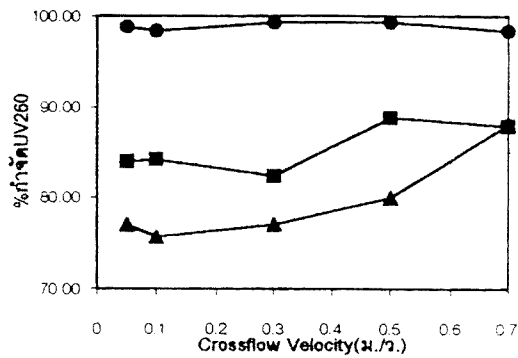
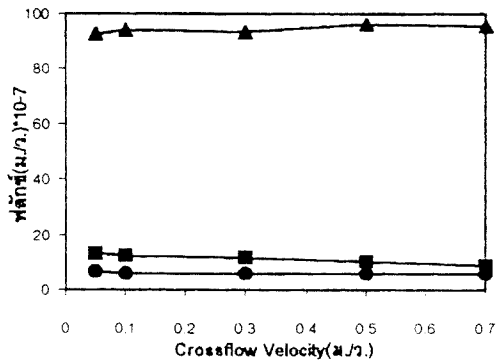
(●)ES-10, (■)NTR-729HF, (▲)NTR-7410

#### ผลของค่า Crossflow Velocity

ผลของค่า Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์และการกำจัดค่าUV260 ของเมมเบรนทั้ง 3 ชนิดแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่า Crossflow Velocity ที่เพิ่มขึ้นในช่วงที่ใช้(0.05-0.7 ม./ว.) มีผลน้อยมากต่อสมรรถนะของเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF ที่ความคั้น 3 บาร์ ถึงแม้ว่าจะใช้ค่า Crossflow Velocity ที่ต่ำมากถึง 0.05 ม./ว. ทั้งนี้เนื่องจากเมมเบรนทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนที่สูงมาก ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในการกำจัด NOM ถึงแม้ว่าค่า Crossflow Velocity ที่ใช้จะต่ำมากก็ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของเมมเบรนตรงกันข้ามกับเมมเบรนชนิด NTR-7410 ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าการกำจัดมีค่าสูงขึ้นมาก ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อค่า Crossflow Velocity มีค่าต่ำจะทำให้มีการสะสมของตัวถูกละลายต่าง ๆ รวมถึง NOM ที่ผิวของเมมเบรนทำให้เกิด Concentration Polarization จากสมการ(2) เมื่อค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวของเมมเบรนมีค่ามากขึ้นก็จะทำให้ฟลักซ์ของตัวถูกละลายมีค่าสูงขึ้น แต่เมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่มากขึ้นก็จะช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์นี้ลงทำให้ค่าการกำจัดสูงขึ้น นอกจากนี้หากใช้ค่า Crossflow Velocity ที่



ไม่เพียงพอ ก็จะมีผลทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการใช้ค่า Crossflow Velocity ที่เพียงพอ [14] แต่ในงานวิจัยนี้จะไม่เห็นผลการลดลงของค่าฟลักซ์เนื่องจากการทดลองในช่วงเวลาสั้นซึ่งคิดค่าฟลักซ์เฉลี่ยหลังจากดำเนินระบบ 1 และ 2 ชม. ตามลำดับ



รูปที่ 5 ผลของ Crossflow Velocity ต่อค่าฟลักซ์

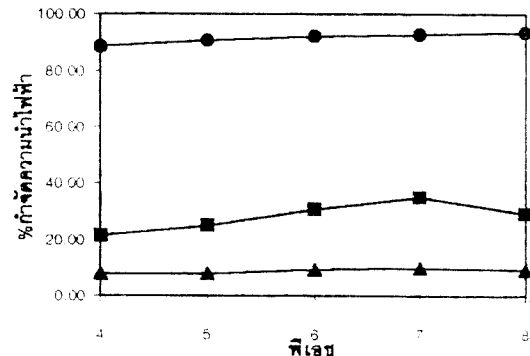
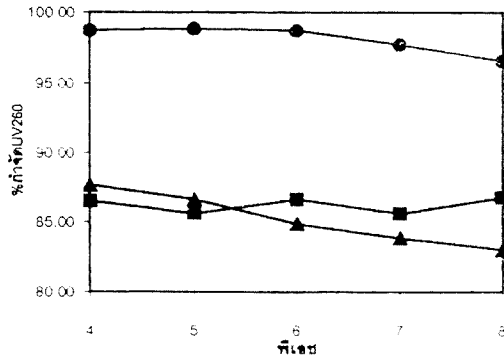
รูปที่ 6 ผลของ Crossflow Velocity ต่อ % กำจัด UV260

(●) ES-10, (■) NTR-729HF, (▲) NTR-7410

(●) ES-10, (■) NTR-729HF, (▲) NTR-7410

ผลของค่าพีเอช

ผลของค่าพีเอชในช่วง 4-8 (ซึ่งเป็นช่วงค่าพีเอชของน้ำหลังกระบวนการโคแอกกูเลชัน) ต่อค่าการกำจัด UV260 และค่าการกำจัดความนำไฟฟ้า แสดงในรูป 7 และ 8 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลของพีเอชต่อ % กำจัด UV260

รูปที่ 8 ผลของพีเอชต่อ % กำจัดความนำไฟฟ้า

(●) ES-10, (■) NTR-729HF, (▲) NTR-7410

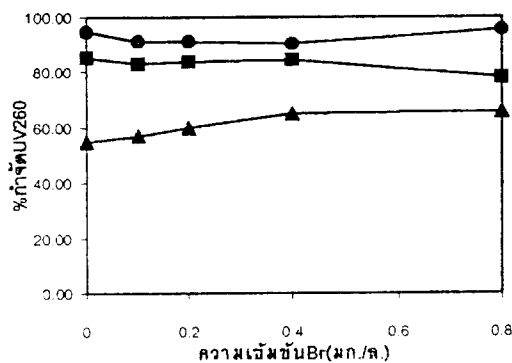
(●) ES-10, (■) NTR-729HF, (▲) NTR-7410

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าการกำจัด UV260 มีค่าลดลงตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการกำจัดความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าจากการศึกษาถึงลักษณะสมบัติของกรดฮิวมิก [15] พบว่าที่ค่าพีเอชต่ำกรดฮิวมิกจะสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนส่งผลให้ขนาดโมเลกุลและประจุลบของโมเลกุลของกรดฮิวมิกมีค่าลดลง ซึ่งส่งผลให้ถูกดูดซับและแพร่เข้าสู่ NF เมมเบรนซึ่งมีประจุลบได้ดีขึ้น ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นกลุ่มทำปฏิกิริยาที่ผิวของกรดฮิวมิกจะกลายเป็นไอออนส่งผลให้เพิ่มประจุลบในน้ำ และจะถูกเมมเบรนซึ่งมีประจุลบผลักออก แต่จากผลการทดลองเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นค่าการกำจัด UV260 กลับลดลง แสดงให้เห็นว่ากลไกที่สำคัญในการกำจัด NOM (ในรูปของค่า UV260) ไม่ใช่

ปฏิกริยาระหว่างประจุของNOM กับเมมเบรน แต่กลไกที่สำคัญ คือการกรองคอลลอยด์เมมเบรน เนื่องจากที่ค่าพีเอชสูงทำให้ความสามารถในการละลายได้ของสารชีวโมเลกุลเพิ่มขึ้น และสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้สมมติฐานข้อนี้ยังสนับสนุนเหตุผลที่การกำจัดค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่าพีเอชลดต่ำลงจะทำให้ประจุลบของเมมเบรนมีค่าลดลงจนถึงค่าที่พีเอชลดลงต่ำกว่า Isoelectric Point (IEP) ของเมมเบรน จะทำให้ประจุของเมมเบรนกลายเป็นประจุบวก ส่งผลให้อิออนสามารถแพร่ผ่านเมมเบรนได้โดยง่าย ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นเกินกว่าค่า IEP จะทำให้ประจุของเมมเบรนเป็นประจุลบ จากงานวิจัยของ Waypa และคณะ[13] พบว่าการกำจัดอิออนในสารละลายจะลดลงเมื่อประจุลบของเมมเบรนมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้การกำจัดความนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ส่วนค่าฟลักซ์ของเมมเบรนทั้งสามชนิดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงตามค่าพีเอช ถึงแม้ว่าค่าฟลักซ์ของตัวถูกละลายจะมีค่ามากขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น แต่ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับฟลักซ์ของน้ำ

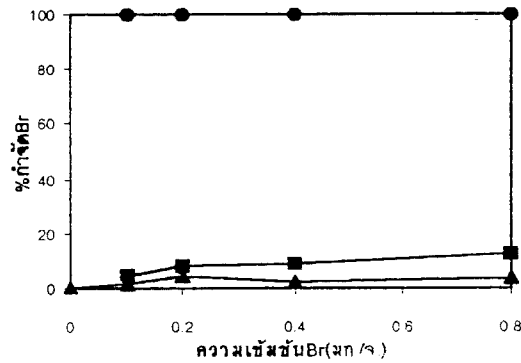
#### ผลของค่าความเข้มข้นของโบรไมด์

รูปที่ 9 และ 10 แสดงผลของค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ต่อการกำจัดUV260 และโบรไมด์



รูปที่ 9 ผลของความเข้มข้นBr ต่อ%กำจัดUV260

(●)ES-10, (■)NTR-729HF, (▲)NTR-7410



รูปที่ 10 ผลของความเข้มข้นBr ต่อ%กำจัดBr

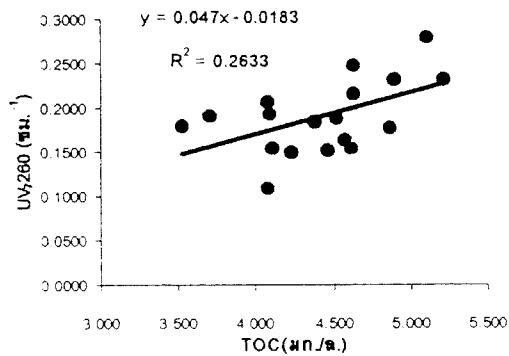
(●)ES-10, (■)NTR-729HF, (▲)NTR-7410

ผลของความเข้มข้นของโบรไมด์ต่อการกำจัดค่า UV260 และโบรไมด์ของเมมเบรนทั้งสามชนิดไม่มีแนวโน้มที่แน่นอน ค่าการกำจัดที่ได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักในแต่ละค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ ความแตกต่างกันนี้เกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของ NFเมมเบรนโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของอิออนอื่น ๆ ในน้ำ แต่จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมมเบรนชนิด ES-10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า UV260 และโบรไมด์ได้ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดค่า UV260 ได้มากกว่า 90% และสามารถกำจัดโบรไมด์ได้มากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ ส่วนเมมเบรนชนิด NTR-729HF สามารถกำจัดค่า UV260 ได้มากกว่า 80% แต่กำจัดโบรไมด์ได้ค่อนข้างน้อยคือไม่เกิน 12.5% และเมมเบรนชนิด NTR-7410 กำจัดค่าUV260 ได้ประมาณ 60% และกำจัดโบรไมด์ได้น้อยมากคือไม่เกิน 4% จากค่าการกำจัด UV260 ของเมมเบรนชนิด NTR-7410 จะเห็นว่ามีค่าน้อยกว่าค่าการกำจัดโดยใช้เมมเบรนชนิดนี้ในชุดการทดลองอื่น ๆ ค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความผิดปกติและไม่สม่ำเสมอในลักษณะสมบัติของเมมเบรนที่ใช้ จากผลการศึกษาของ Laine และคณะ[16] ถึงผลของโบรไมด์ต่อการทำงานของUF และNFเมมเบรนในการควบคุมการเกิดDBPs ในน้ำผิวดินพบว่าหากสามารถกำจัด NOM ออกจากน้ำดิบได้มากจนเหลือปริมาณ NOMในน้ำPermeate น้อยมากถึงแม้จะมีปริมาณ โบรไมด์ในน้ำPermeate สูงก็จะ

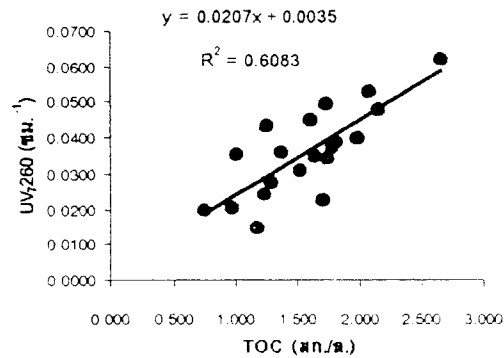
เกิด Brominated THMs ในปริมาณต่ำ เนื่องจากไม่มี NOM มากพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรด HOBr และ OBr ดังนั้นหากในน้ำดิบมีไบรไมค์ เมมเบรนที่ควรพิจารณาเลือกใช้งานวิจัยนี้คือ ชนิด ES-10 และ NTR-729HF เนื่องจากสามารถกำจัด UV260 ได้มาก

อัตราส่วนค่า UV260 : TOC

รูปที่ 11 และ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า UV260 และค่า TOC ของน้ำดิบและน้ำ Permeate ตามลำดับ



รูปที่ 11 UV260 : TOC ของน้ำดิบ



รูปที่ 12 UV260 : TOC ของน้ำ Permeate

จากค่าอัตราส่วน UV260 : TOC ของน้ำดิบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.047 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Goel และคณะ [4] พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับแหล่งน้ำผิวดินที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง แสดงให้เห็นว่า NOM ในน้ำดิบส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกและโครงสร้างที่ไม่อิ่มตัวอื่น ๆ และจากค่า UV260 : TOC ของน้ำ Permeate ที่ได้จากการดำเนินระบบในแต่ละชุดการทดลองจะเห็นได้ว่ามีค่าลดลงเหลือ 0.0207 บ่งบอกว่า NOM ที่ถูกกำจัดเป็น NOM ส่วนที่เป็นสารชีวโมเลกุล สามารถดูดกลืนแสง UV ได้ และมีขนาดโมเลกุลใหญ่ สอดคล้องกับผลของพีเอชต่อการกำจัดค่า UV260 ที่แสดงให้เห็นว่ากลไกสำคัญของกระบวนการ NF ที่ใช้ในการกำจัด NOM (ในรูปของค่า UV260) คือ กลไกการกรองตึงผิวเมมเบรน

**สรุปผลการทดลอง**

จากการทำการวิจัยเพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ในการกำจัด NOM ออกจากน้ำจากแหล่งน้ำผิวดิน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ค่าความดันในการดำเนินระบบที่มากขึ้น ทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่มีผลไม่มากนักต่อค่าการกำจัดของเมมเบรนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเมมเบรนแบบไม่มีรูพรุนที่ใช้ในงานวิจัย คือ ชนิด ES-10 และ NTR-729HF ในทางกลับกันความดันที่มากขึ้นอาจทำให้ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับเมมเบรนแบบมีรูพรุน(NTR-7410) มีค่าลดลงเนื่องจากผลของ Concentration Polarization
2. ค่า Crossflow Velocity มีผลต่อค่าการกำจัดของ NF เมมเบรนทั้ง 3 ชนิด โดยช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดดีขึ้น เมื่อใช้ค่า Crossflow Velocity ที่มากขึ้น โดยจะเห็นผลอย่างชัดเจนกับเมมเบรนชนิด NTR-

7410 ทั้งนี้เนื่องจากค่า Crossflow Velocity ที่เพียงพอจะช่วยลดการเกิด Concentration Polarization และช่วยลดการอุดตันของเมมเบรน

3. จากการศึกษาถึงผลของพีเอชต่อประสิทธิภาพของ NF เมมเบรนทำให้ทราบว่าค่าพีเอชที่สำคัญที่ใช้ในการกำจัดค่า UV260 ของเมมเบรน คือการกรองติดผิวของเมมเบรน เนื่องจากเมมเบรนสามารถกำจัดค่า UV260 ที่พีเอชต่ำได้ดีกว่าที่ค่าพีเอชสูง ในขณะที่จะกำจัดค่าความนำไฟฟ้าที่พีเอชสูงได้ดีกว่าที่พีเอชต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของค่า IEP ของเมมเบรน และค่าการละลายที่เพิ่มขึ้นของสารฮิวมิกเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น
4. ค่าความเข้มข้นของโบรไมด์ในช่วงที่ใช้ในการทดลอง ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่า UV260 และโบรไมด์ของเมมเบรนทั้งสามชนิด โดยเมมเบรนชนิด ES-10 และ NTR-729HF ซึ่งสามารถกำจัดค่า UV260 ได้มากเป็นเมมเบรนที่ควรพิจารณาเลือกใช้หากในน้ำดิบมีโบรไมด์
5. จากค่า UV260 : TOC ของน้ำดิบและน้ำ Permeate แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชที่สำคัญในการกำจัดค่า UV260 ของ NF เมมเบรนคือกลไกการกรองติดผิวเมมเบรน

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Jacangelo, J.G., DeMarco, J., Owen, D.M. and Randtke, S.J. (1995). **Selected processes for removing NOM: an overview.** *Journal AWWA*, Vol. 87: No. 1: pp. 64-77.
- [2] Onodera, S., Tabucanon, M., Uvanichkul, S., and Siriwong, C. (1984). **Seminar on Trihalomethane in Drinking Water in Bangkok Metropolitan Area.** Bangkok: Laboratory and Research Section Environmental Quality Standard Division Office of the National Environment Board, Thailand.
- [3] Pontius, F.W. (1998). **New horizons in federal regulation.** *Journal AWWA*, Vol. 90: No. 3: pp. 38-50.
- [4] Goel, S., Hozalski, R.M., and Bouwer, E.J. (1995). **Biodegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose.** *Journal AWWA*, Vol. 87: No. 1: pp. 90-105.
- [5] Chellam, S., Jacangelo, J.G., Bonacquisti, T.P., and Schauer, B.A. (1997). **Effect of pretreatment on surface water nanofiltration.** *Journal AWWA*, Vol. 89: No. 10: pp. 77-89.
- [6] Edzwald, J.K., Becker, W.C., and Wattier, K.L. (1985). **Surrogate parameters for monitoring organic matter and THM precursors.** *Journal AWWA*, Vol. 77: No. 4: pp. 122-132.
- [7] Najm, I.N., Patania, N.L., Jacangelo, J.G., and Krasner, S.W. (1994). **Evaluating surrogates for disinfection by-products.** *Journal AWWA*, Vol. 86: No. 6: pp. 98-106.
- [8] Eaton, A. (1995). **Measuring UV-absorbing organics: a standard method.** *Journal AWWA*, Vol. 87: No. 2: pp. 86-90.
- [9] Blau, T.J., Taylor, J.S., Morris, K.E., and Mulford. (1992). **DBP Control by Nanofiltration: Cost and Performance.** *Journal AWWA*, Vol. 84: No. 12: pp. 104-116
- [10] รายงานการผลิต-การจ่ายน้ำ การใช้สารเคมี การใช้กระแสไฟฟ้า และคุณภาพน้ำประปา ประจำเดือน มกราคม-ธันวาคม (2543). ฝ่ายโรงงานผลิตน้ำสามเสน-ธนบุรี
- [11] Schrig, P. and Widmer, F. (1992). **Characterisation of nanofiltration membrane for the**

- separation of aqueous dye-salt solution. Desalination. Vol. 89: pp. 89-107.
- [12] Visvanathan, C., Marsono, B.D., and Basu, B. (1998). **Removal of THMP by nanofiltration: Effects of interference parameters.** Wat. Res. Vol. 32: No. 12: pp. 3527-3538.
- [13] Waypa, J.J., Elimelech, M., and Hering, J.G. (1997). **Arsenic removal by RO and NF membranes.** Journal AWWA. Vol. 89: No. 10: pp. 102-114.
- [14] Williamson, J. and Paulson, D. (1990). **Select Engineering Principles of Crossflow Membrane Technology.** <http://osmonics.com/products/Page832.htm>
- [15] Schnitzer, M. and Khan, S.U. (1972). **Humic Substances in Environment.** New York: Marcel Dekker, Inc.
- [16] Laine, J.M., Jacangelo, J.G., Cummings, E.W., Carns, K.E., and Mallevalle, J. (1993). **Influence of bromide on low-pressure membrane filtration for controlling DBPs in surface waters.** Journal AWWA. Vol. 85: No. 6: pp. 87-99.

# การกำจัดมลสารอินทรีย์ในน้ำประปา

โดย

ผศ.ดร.เชาวลิต รัตนธรรมกุล

## การกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออน

ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

### บทนำ

การกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออนนั้นเป็นขบวนการซึ่งไอออนที่อยู่ในน้ำถูกดูดซับในของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ และถูกแทนที่ด้วยไอออน ที่มีประจุชนิดเดียวกันที่ออกมาจากของแข็งที่เป็นสารแลกเปลี่ยนประจุนั้น

ถ้าหากว่าเรซินสำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวกนั้นเป็นรูปแบบของไฮโดรเจนเมื่อใช้กับน้ำดิบหรือน้ำเสียที่มีเกลือของโลหะหนักอยู่ หลังขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว จะให้ผลผลิตของน้ำทิ้งเป็นกรด ซึ่งสามารถถูกดูดซับต่อไปโดยเรซินสำหรับแลกเปลี่ยนประจุลบที่มีไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ ผลสุดท้ายของการบำบัดจะได้น้ำสะอาดออกมา

การประยุกต์ใช้งานของขบวนการนี้สำหรับการบำบัดน้ำได้แก่การกำจัดไอออนเพื่อเตรียมน้ำบริสุทธิ์ในโรงงานอุตสาหกรรม, การกำจัดซัลเฟตออกจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล, การลดความเป็นกรดของน้ำดิบและน้ำเสีย, การลดความเป็นด่างของน้ำดิบและน้ำเสีย, การกำจัดซิลิกาออกจากน้ำดิบ, การนำกลับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสีย

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

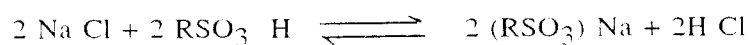
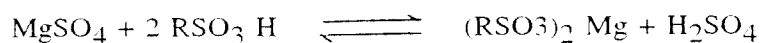
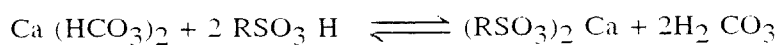
#### 1. กรณีของเรซินชนิดกรดแก่และด่างแก่ (Strongly acidic and basic resins)

เรซินสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นเป็นโครงสร้างที่มีส่วนประกอบของ active group อยู่ภายในเครือข่ายโครงสร้างของสารอินทรีย์ ตัวอย่างเช่นกรณีของ cross-linked polystyrene ซึ่งผลิออกมาเป็นวัสดุแข็ง, ไม่มีสี, น้ำไม่ซึมผ่านเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุนี้ให้เป็นสารเรซินสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกก็ได้มีการเติมกลุ่มของซัลโฟนิกเข้าไปในโครงสร้างเครือข่ายของโพลีเมอร์นี้ทำให้เรซินมีคุณสมบัติ hydrophilic และน้ำซึมผ่านได้และมีส่วนประกอบของน้ำบริสุทธิ์อยู่ภายในโครงสร้าง กลุ่มของซัลโฟนิกถูกตรึงแน่นภายในโครงสร้างและแสดงคุณสมบัติของประจุลบ และเมื่อไปจับกับไอออนของไฮโดรเจน ทำให้เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระภายในโครงสร้างของเรซิน

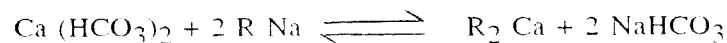
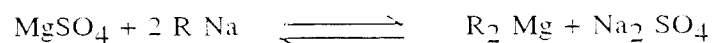
ส่วนกรณีของเรซินสำหรับการแลกเปลี่ยนประจุลบนั้นเตรียมได้โดยใส่กลุ่มประจุบวกของออสอน สารอินทรีย์, สารประกอบอะมิโนหรือสารประกอบควอเตอนารีแอมโมเนียเข้าไปยังโครงสร้างของ Styrene ทำให้เรซินแสดงคุณสมบัติของออสอนของไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนออสอนลบได้

- ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนออสอนของ Strongly acidic resin

- กรณีของ HSO<sub>3</sub> group

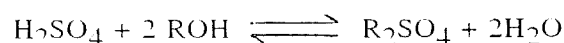
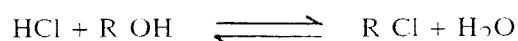


- กรณีของ Na-form (NaR - form)



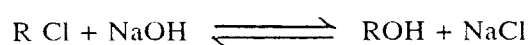
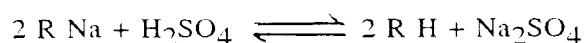
- ปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนออสอนของ Strongly basic resin

- กรณีของ OH-form



สำหรับการ regeneration เมื่อเรซินหมดสภาพนั้นสามารถใช้กรดสำหรับเรซินสำหรับแลกเปลี่ยนออสอนพวกและใช้ NaOH กับเรซินสำหรับแลกเปลี่ยนออสอนลบดังนี้

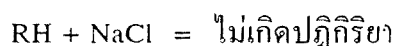
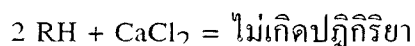
**Regeneration**



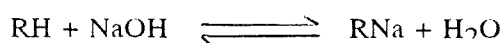
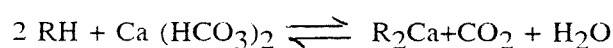


## 2) กรณีของเรซินชนิดกรดอ่อนและด่างอ่อน

วัสดุชนิดนี้คล้ายคลึงกับกรณีเรซินชนิดกรดแก่และด่างแก่ต่างกันเพียงแต่สำหรับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกนั้นใช้หมู่ของคาร์บอกซิลิกแทนที่ซัลโฟนิก ซึ่งคาร์บอกซิลิกนั้นเป็นกรดอ่อนไม่แตกตัวในสารละลายแต่ทำปฏิกิริยาในภาวะที่เป็นด่างดังเช่น

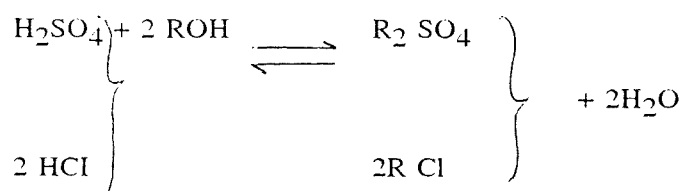


แต่ในกรณีดังข้างล่างนี้



เนื่องจากว่าน้ำกระด้างโดยทั่วไปแล้วมีแคลเซียมและแมกนีเซียมไบคาร์บอเนตในปริมาณที่มากกว่าของคลอไรด์และซัลเฟตดังนั้นเรซินชนิดกรดอ่อนจึงมีความเหมาะสมที่จะช่วยในการบำบัดไบคาร์บอเนตในน้ำก่อนที่จะส่งต่อไปบำบัด ซัลเฟตด้วยเรซินชนิดกรดแก่ ซึ่งการบำบัดขั้นต้นบางส่วนด้วยเรซินชนิดกรดอ่อนนั้นมีข้อดีตรงที่สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายได้มากพอสมควร

สำหรับเรซินชนิดด่างอ่อนนั้นได้แก่กลุ่มของ primary (R-NH), secondary (R-NHR'), tertiary (R-N-R'2) และบางครั้งเป็นกลุ่มของควอเตอร์นารีอามีน ซึ่งสามารถดูดซับสารละลายกรดได้ง่ายเช่นกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟูริก ดังสมการข้างล่างนี้



แต่เรซินชนิดนี้ไม่สามารถดูดซับกรดอ่อนประเภทคาร์บอนไดออกไซด์และซิลิกาได้อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายของเรซินชนิดกรดอ่อนนี้ถูกกว่าของชนิดกรดแก่มาก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็สามารถกำจัดออกจากรน้ำได้โดยวิธีการไล่ก๊าซ

การฟื้นฟูสภาพของเรซินชนิดกรดอ่อนสามารถทำได้โดยใช้กรด ซึ่งอาจใช้กรดทั้งจาก  
 ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนโดยใช้เรซินประเภทกรดแก่ ส่วนในกรณีของเรซินชนิดต่างแก่นั้น  
 สามารถฟื้นฟูสภาพได้โดยใช้โซดาไฟ, โซดาแอสหรือแอมโมเนีย

ตัวอย่างของพื้นฐานการใช้งานขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

สมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออน

สมการสมดุลมวลสารอย่างง่ายแสดงได้ดังนี้

$$\frac{[\overline{\text{Na}^+}]}{[\overline{\text{H}^+}]} = K_{\text{Na}} \frac{[\text{Na}^+]}{[\text{H}^+]}$$

โดยที่  $[\overline{\text{H}^+}]$  และ  $[\overline{\text{Na}^+}]$  เป็นความเข้มข้นของไอออนของ  $\text{H}^+$  และ  $\text{Na}^+$  ในเรซิน ส่วน  
 $[\text{H}^+]$  และ  $[\text{Na}^+]$  เป็นความเข้มข้นของไอออนของ  $\text{H}^+$  และ  $\text{Na}^+$  ในน้ำ

สมมติว่าสารละลายมี  $\text{Na}^+$  ไอออนอยู่และเกลืออนที่ผ่านเรซินที่มีเรซินในรูปไฮโดรเจน ใน  
 ช่วงเวลาเริ่มต้น  $[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]=0$  หมายความว่าในเวลาเริ่มต้น น้ำที่บำบัดแล้วมี  $\text{Na}^+ = 0 \text{ mg/l}$  แต่  
 หลังจากที่มีการสัมผัสและดูดซับโดยเรซินค่า  $[\text{Na}^+]/[\text{H}^+]$  จะเพิ่มขึ้น และมีการรั่วไหลออกของ  
 $\text{Na}^+$  บางส่วนไปในน้ำทิ้ง

สำหรับกรณีของ univalent-bivalent reaction สมการสมดุลมวลสารของปฏิกิริยาจะเป็น

$$\frac{[\overline{\text{Ca}^{2+}}]}{[\overline{\text{Na}^+}]^2} = K_{\text{Ca}} \frac{[\text{Ca}^{2+}]}{[\text{Na}^+]^2}$$

โดยที่ค่า  $K_{\text{Na}}$  และ  $K_{\text{Ca}}$  เป็นค่า selectivity coefficient ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาวะการดำเนินงาน  
 ระบบด้วย อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ค่า Selectivity coefficient ที่ถูกต้องมากขึ้นควรใช้ค่า activity  
 ของไอออนแทน ความเข้มข้นของไอออนทั้งในสารละลายและในเรซินด้วย

## การออกแบบระบบการกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออน

### 1. ส่วนประกอบของถังแลกเปลี่ยนไอออน

ถังแลกเปลี่ยนไอออนหรือถังเรซิน มีลักษณะคล้ายคลึงกับถังกรองน้ำ สิ่งที่แตกต่างกัน คือ วัสดุตัวกลางที่ใช้ กล่าวคือ เป็นเรซินสำหรับและเปลี่ยนไอออน กับทรายกรองหรือวัสดุกรองอื่น ๆ ถังเรซินอาจทำงานภายใต้ความดัน (ปิดฝา) หรือภายใต้ความดันบรรยากาศธรรมดาก็ได้ ถังแบบความดันสูงมักเป็นถังเหล็กกล้าซึ่งอาจวางตั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง แต่ถังแบบยืนมีคุณสมบัติทางชลศาสตร์ดีกว่า และทำงานได้ดีกว่าถังแบบวางนอน ถังที่ทำงานในบรรยากาศปรกติ เป็นถังที่ไม่ได้ปิดฝามิดชิด ส่วนมากสร้างเป็นถังคอนกรีตเสริมเหล็กและมีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ข้อดีและข้อเสียของถังเรซินทั้งสองแบบเป็นเช่นเดียวกับของถังกรองน้ำ กล่าวคือ ถ้าเป็นถังแบบความดันสูงน้ำที่ผลิตได้จะมีแรงดันสูงพอที่จะไหลไปบริการตามจุดต่างๆได้โดยไม่ต้องอาศัยเครื่องสูบน้ำ ส่วนถังแบบความดันปรกติมีข้อดีคือสามารถมองเห็นสภาพภายในถังได้โดยง่าย ทำให้อาจสังเกตเห็นความผิดปกติต่างๆของชั้นเรซินเช่นรอยแยกเป็นช่องภายในชั้นเรซินความสกปรกปรกติ ฯลฯ เรซินที่หลุดออกจากถังในระหว่างการล้างย้อนก็จะสามารถมองเห็นได้ด้วย โดยทั่วไปแล้ว ถังแบบความดันสูงมักใช้ในระบบประปาขนาดเล็ก เช่น ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นต้น ส่วนถังแบบความดันปรกติมักนิยมใช้ในระบบประปาขนาดใหญ่ เช่นระบบประปาจังหวัด ระบบประปาอำเภอ เป็นต้น

ถังเรซินอาจเป็นแบบที่มีน้ำไหลจากข้างบนลงข้างล่าง (แบบ Down Flow) หรือแบบที่มีน้ำไหลย้อนจากข้างล่างขึ้นข้างบน (แบบ Up Flow) โดยปรกติแล้ว มักนิยมควบคุมให้มีการไหลผ่านชั้นเรซินเป็นเช่นแบบแรก เพราะควบคุมได้ง่ายกว่าแต่อย่างไรก็ตาม ถังแบบ Up Flow ก็มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ไม่ต้องมีการล้างย้อนก่อนทำรีเจนเนอเรชัน เป็นต้น

รูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของถังแลกเปลี่ยนไอออน แบบความดันสูงที่นิยมใช้กับระบบประปาขนาดเล็ก ส่วนประกอบต่าง ๆ มีดังนี้

---

ตัวถังบรรจุเรซิน

ชั้นรองรับเรซิน

ระบบกระจายน้ำเหนือเรซินและระบบระบายน้ำกันถึง

ท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออก

ช่องว่างเหนือชั้นเรซิน

---

### 1.1 ตัวถังบรรจุเรซิน

ถังเรซินมักสร้างด้วยเหล็กกล้าซึ่งเคลือบผิวภายในด้วยยางหรือวัสดุทนกรดและด่างอื่น ๆ มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ฟุต จนถึง 7 ฟุต สูงตั้งแต่ 4 ฟุต ถึง 12 ฟุต อัตราส่วนระหว่างความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลาง มีความสำคัญ ทั้งในทางปฏิบัติและทางทฤษฎี วิศวกรจะต้องตัดสินใจให้ได้ว่า ควรใช้ถังสูงและผอมหรือเตี้ยและอ้วนหรือใช้ถังขนาดใหญ่ในเดียวหรือขนาดเล็กหลาย ๆ ใบ ความสูงหรือขนาดของถังอาจถูกจำกัดโดยความสูงของห้องหรือปัญหาในเรื่องการเคลื่อนย้ายจากโรงงานผลิตมายังผู้ใช้ ถังขนาดใหญ่อาจต้องวางนอนเพราะไม่อาจวางตั้งได้ ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานด้อยลง การใช้ถังขนาดใหญ่ใบเดียวมักเสียเงินค่าก่อสร้างต่ำกว่าถังขนาดเล็กหลายใบ แต่ระบบกระจายน้ำของถังขนาดใหญ่ (ทั้งเข้าและออกจากชั้นเรซิน) มักมีราคาแพงกว่าตัวถัง ถังสูงมีการสูญเสียแรงดันน้ำ (Head) มากกว่า แต่การกระจายน้ำสามารถกระทำได้ง่ายกว่าถังอ้วนและเตี้ย

เพื่อให้ได้ประโยชน์จากการทำงานแบบคอลัมน์ (ซึ่งเป็นการปล่อยให้ไหลผ่านชั้นเรซิน) อย่างเต็มที่ ชั้นเรซินควรมีความลึกไม่ต่ำกว่า 24-30 นิ้ว ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่ามีเวลาสัมผัส (หรือเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน) พอเพียงนั่นเอง

### 1.2 ระบบกระจายน้ำเข้าและออกจากชั้นเรซิน

สิ่งสำคัญอย่างยิ่งประการหนึ่งของการทำงานแบบคอลัมน์ของถังเรซิน คือ จะต้องออกแบบระบบกระจายน้ำเข้าและออกจากชั้นเรซินให้ได้ดีที่สุด น้ำดิบต้องไหลผ่านชั้นเรซินได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วทุกส่วนของผิวหน้าของชั้นเรซิน หลังจากน้ำสัมผัสกับทุก ๆ เม็ดของเรซินแล้ว ต้องสามารถระบายน้ำที่ลงถึงตอนล่างของชั้นเรซินออกไปได้ทันที โดยไม่มีการขังน้ำส่วนใดส่วน

หนึ่งไว้เลย ระบบการจ่ายน้ำของถังเรซินไปได้ทันที โดยไม่มีการขังน้ำส่วนใดส่วนหนึ่งไว้เลย ระบบกระจายน้ำของถังเรซินขนาดเล็กมักไม่มีปัญหา แต่จะยุ่งยากขึ้นตามขนาดของถังที่ใหญ่ขึ้น ถังขนาดใหญ่อาจต้องมีระบบกระจายน้ำหลายชุด

ระบบกระจายน้ำเข้าของเรซิน มักเป็นแบบระบบท่อเจาะรูและติดหัว Nozzle หรือ เป็นแบบเดียวกับของถังกรอง ส่วนระบบกระจายน้ำออกของชั้นเรซินอาจเป็นระบบท่อเจาะรู หรืออาจใช้เป็นพื้นเจาะรูหรือแผ่น porous plate ก็ได้ ในขณะที่เป็นท่อเจาะรู ควรมีตาข่ายหรือตะแกรง ขนาดรูเล็กปิดรูระบายน้ำด้วย เนื่องจากรูมักมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดเรซิน ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เรซิน หลุดออกไปกับน้ำ โดยปรกติมักวางท่อระบายน้ำไว้ใต้ชั้นรองรับเรซิน ซึ่งอาจเป็นชั้นกรวดหรือชั้น ถ่านแอนทราไซต์ (Anthracite)

ความแตกต่างเบื้องต้นในการออกแบบระบบระบายน้ำกันถัง ของถังแลกเปลี่ยนไอออน และถังกรองน้ำ คือ ระบบระบายน้ำของถังเรซินต้องออกแบบให้สามารถระบายน้ำออกจากกันถัง ได้หมด มิฉะนั้นแล้ว เกลือหรือสารรีเจนเนอเรนต์อื่นที่ตกค้างจะทำให้น้ำที่ผลิตได้ในภายหลังมี มลทิน และไม่ได้ความบริสุทธิ์เท่าที่ควร สำหรับถังเรซินที่ใช้กำจัดความกระด้าง พื้นที่ของรูทั้งหมดของระบบระบายน้ำกันถัง ควรมีค่าประมาณ 0.16-0.18% ของพื้นที่หน้าตัดของถังเรซิน รู เหล่านี้ไม่ควรเจาะห่างกันเกินกว่า 12 นิ้ว ถ้าไม่ใช่ท่อเจาะรู อาจใช้ porous plate แทนก็ได้ ซึ่งใน กรณีนี้ชั้นกรวดก็ไม่จำเป็นต้องใช้

### 1.3 ชั้นรองรับเรซิน

ชั้นรองรับเรซิน คล้ายกับชั้นรองรับสารกรองของเครื่องกรองน้ำ มีหน้าที่ป้องกันมิให้เร ซินหลุดออกไปกับระบบระบายน้ำกันถัง และช่วยให้น้ำไหลได้อย่างสม่ำเสมอและทั่วถึงในระหว่าง การล้างย้อน ชั้นรองรับเรซินอาจใช้กรวดที่มีขนาดเรียงตั้งแต่ 1/8" ถึง 1" และมีความลึกทั้งหมด ประมาณ 15-18 นิ้ว ถ่านแอนทราไซต์อาจใช้แทนกรวดได้ แต่มีราคาแพงกว่า ชั้นรองรับสารกรอง แบบอื่น ๆ ที่ใช้ในเครื่องกรองน้ำก็อาจนำมาใช้ในกรณีนี้ได้

#### 14. ช่องว่างเหนือชั้นเรซิน

ช่องว่างหรือความสูงเหนือชั้นเรซิน เรียกว่า Free Board มีไว้สำหรับการขยายตัวของชั้นเรซินในระหว่างที่มีการล้างย้อน (Back Wash) เพื่อนำความสะอาดหรือกำจัดสิ่งตกค้างในชั้นเรซิน ช่องว่างนี้จะต้องสูงพอเพียง ที่จะยอมให้น้ำสกปรกที่เกิดจากการล้างย้อนไหลออกไปจากถังเรซิน แต่ในขณะเดียวกันต้องไม่ยอมให้มีเรซินหลุดออกไปเลย โดยปกติ ช่องว่างหรือ Free Board นี้ ควรสูงประมาณ 50-100% ของความสูงของชั้นเรซิน ถังเรซินแบบกรวด (ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนบวก) มักมี Free Board ประมาณ 50-75 % เนื่องจากมีความหนาแน่นสูง ส่วนถังเรซินแบบด่าง (ที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนลบ) มักมี Free Board ประมาณ 75-100% เนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ

#### 1.5 ท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออก

การเลือกขนาดของท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออกให้เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราไหลของน้ำและแรงดันย้อนกลับ (Back Pressure) ได้การควบคุมอัตราไหลของน้ำต้องทำที่ท่อน้ำออก เพื่อให้มีความดันอยู่ในถังได้ตามประสงค์ การควบคุมอัตราไหลที่ท่อน้ำเข้าถัง เป็นการลดความดันของถังน้ำ ที่ส่งเข้าถังเรซิน เป็นผลให้ก๊าซซึมหนีออกจากน้ำ (เนื่องจากถูกลดความดัน) และเกิดผลเสียต่าง ๆ ตามมา เช่น ทำให้เกิดรอยแยกในชั้นเรซินขึ้นเป็นต้น

### 2. การเลือกชนิดของเรซิน

ในการเลือกชนิดของเรซินนั้นต้องพิจารณาวัตถุประสงค์ของการจัดออสอนในน้ำดิบหรือน้ำเสียนั้น และต้องพิจารณาคุณสมบัติของเรซินที่จะต้องใช้ด้วยว่ามีคุณสมบัติเป็นกรดแก่, กรดอ่อน หรือด่างแก่, ด่างอ่อน นอกจากนี้จุดเด่นของเรซินนั้น ๆ ด้วย

#### 2.1 หมู่ฟังก์ชันของเรซิน

- Cation exchanger : แลกเปลี่ยนไอออนบวกกับสารละลายหรือสารอินทรีย์
- Anion exchanger : แลกเปลี่ยนไอออนลบกับสารละลายหรือสารอินทรีย์

## 2.2 ความสามารถในการละลาย

วัสดุที่นำมาทำเรซินนั้น  
มาใช้ผลิตเรซินนั้นส่วนใหญ่มีที่  
พิจารณาความเหมาะสมของ

## 2.3 ขนาดของเรซินที่ใช้

เรซินควรมีรูปทรงไป  
เรซินอยู่ในช่วง 16-50 mesh  
ไป

## 2.4 ความทนทานต่อสภาพ

เรซินควรมีความแข็งแรง  
ทนทานต่อแรงดันเนื่องจาก

## 3. สภาพการตั้งพิมพ์

### 3.1 ลักษณะของน้ำดิบ

น้ำดิบที่ผ่านเข้ามาใช้  
และน้ำมันอยู่ในความเข้มข้นที่  
สูง ก็ต้องกำจัดเหล็กออกก่อน  
เมื่อผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้วมี  
ไม่เกิน 700 ppm สามารถใช้  
และพีเอชของน้ำดิบต้องอยู่ในช่วงที่ 7-8.5

## 3.2 ลักษณะทางศาสตร์ของระบบ

### 3.2.1 เวลาสัมผัส (Contact time)

เพื่อให้ปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสมควรออกแบบระบบให้มีเวลาสัมผัสอย่างน้อยที่เพียงพอ ผู้ผลิตเรซินจะบอกให้ทราบถึงค่าอัตราการทางศาสตร์ที่เหมาะสมนี้ในเทอมของ bed volumes per hour (BV/h) ในกรณีของการใช้เรซินชนิดกรดแก่และด่างแก่ ค่าออกแบบที่ใช้มักอยู่ในช่วง 30-40 BV/h (เทียบเท่ากับเวลาสัมผัสประมาณ 1.5-2 นาที) สำหรับกรณีของเรซินชนิดกรดอ่อนและด่างอ่อนนั้นค่าออกแบบที่ใช้มักอยู่ในช่วง 20-30 BV/h (เทียบเท่ากับเวลาสัมผัสประมาณ 2-3 นาที)

ค่าเวลาสัมผัสนี้เป็นตัวบอกถึงปริมาณของน้ำดิบที่ระบบสามารถรับได้มากที่สุดด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการไหลของน้ำดิบที่เข้าระบบนั้นสามารถออกแบบให้ยืดหยุ่นได้ขึ้นกับลักษณะและความเข้มข้นของน้ำดิบด้วย

### 3.2.2 ความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นเรซิน (Flow velocity)

เนื่องจากปัญหา pressure drop ที่เกิดขึ้นในชั้นเรซินค่า pressure drop ที่ยอมให้มีได้เป็นตัวกำหนดความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นเรซินที่มากที่สุด สำหรับระบบการกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออนหนึ่ง ๆ รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับค่า Pressure drop ในชั้นเรซินนอกจากนี้ถ้าความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นเรซินน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดปัญหา channelling (การที่น้ำไหลในชั้นเรซินบางทิศทางไม่สม่ำเสมอเนื่องจากความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นเรซินน้อยเกินไป) ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ควรกำหนดให้ความเร็วน้ำไหลผ่านชั้นเรซินไม่น้อยกว่า 1 m/h



### 3.3 ความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงการนำไปใช้ประโยชน์

การนำขบวนการกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออน ไปใช้กับการบำบัดน้ำนั้นมีความเป็นไปได้ดังนี้

วัตถุประสงค์	ชนิดของเรซิน
- การกำจัดความกระด้าง	- Strong Acid Cation - Weak Acid Cation - Chelating
- การลดความเป็นด่าง	- Weak Acid Cation - Strong Base Anion
- การกำจัดไอออนในน้ำ	- Strong Acid Cation - Weak Acid Cation - Strong Base Anion - Weak Base Anion
- การกำจัดสารอินทรีย์	- Strong Base Anion - Weak Base Anion
- การกำจัดไนเตรท	- Strong Base Anion
- การกำจัดออกซิเจน	- Strong Base Anion

### 3.4 การจัดเรียงลำดับของเรซิน

รูปแบบการจัดลำดับของชั้นเรซินนั้นมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการนำไปใช้งานของขบวนการกรองแบบแลกเปลี่ยนไอออน รวมทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายลงด้วยดังแสดงในรูปที่ 4

### 3.5 ลำดับของการดำเนินระบบ

ระบบจะทำงานเป็นลำดับดังนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 5)

#### 3.5.1 ขั้นตอนที่ 1 : Service Cycle

วงจรเวลาการทำงานของระบบขึ้นอยู่กับ

- ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทิ้งที่บำบัดแล้ว
- ปริมาณน้ำดิบที่เข้าระบบที่สามารถรับได้
- ค่าการสูญเสียความดันของชั้นเรซิน
- ค่าความเข้มข้นที่สูงของซิลิกาในน้ำทิ้งที่บำบัดแล้ว
- ค่าความเข้มข้นที่สูงของโซเดียมในน้ำทิ้งที่บำบัดแล้ว
- ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลง

#### 3.5.2 ขั้นตอนการล้างย้อน : Backwash Cycle

เป็นขั้นตอนก่อนการทำ regeneration เพื่อให้เกิดการล้างแบบไหลย้อนกลับและการขยายตัวของชั้นเรซินต้องคำนวณ backwash rate ที่เพียงพอทั้งปริมาณและอัตราการไหล

#### 3.5.3 ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพเรซิน : Regeneration

ใช้สารเคมีในการฟื้นฟูความสามารถของเรซิน ซึ่งจำเป็นที่จะต้องคำนวณปริมาณ, ความเข้มข้น, อัตราการไหล, เวลาสัมผัสของขบวนการ regeneration นี้

#### 3.5.4 ขั้นตอนการ Rinse & Displacement Cycle

หลังจากการทำ regeneration แล้วควรมีการล้างอีกครั้งเพื่อกำจัดสาร regenerant ที่อาจตกค้างอยู่ในชั้นเรซินออกไป เพื่อให้คุณภาพน้ำทิ้งหลังเริ่มระบบแล้วได้ตามต้องการ

## ตัวอย่างกรณีของ Mixed Bed Units

- Cation & anion resins ผสมกันโดยใช้ลมได้อย่างทั่วถึง (ดังแสดงในรูปที่ 6)

### Service Cycle

- น้ำไหลจากข้างบนลงข้างล่าง
- regeneration และ backwash นั้นต้องแยกกัน cation และ anion อย่างชัดเจน และ regeneration แยกกันด้วย
- หลังจาก regenerate แล้วก็ทำการ remix โดยใช้ลมเป่า

### Backwash Cycle

- ก่อนการ regeneration, cation & anion ถูกแยกโดย backwashing  $Q_{BW} = 3-3.5 \text{ gpmft}$  หลัง Backwash ทิ้งไว้ 5-10 นาที เพื่อให้ settle down

### Regeneration

- anion resin ใช้ NaOH ไหล down flow
- cation resin ใช้ HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ไหล up flow

## 4. ตัวอย่างการคำนวณออกแบบระบบ

ตัวอย่างที่ 1 จงออกแบบกำจัดความกระด้างด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนให้กับน้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำ

ในอัตรา 100,000 ปอนด์ต่อ ชม. น้ำดิบมีคุณภาพดังนี้

Ca <sup>++</sup> 66 mg/l CaCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup> 7 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Mg <sup>++</sup> 20 mg/l CaCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> 79 mg/l CaCO <sub>3</sub>
Na <sup>++</sup> 42 mg/l CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> 28 mg/l CaCO <sub>3</sub>
	OH <sup>-</sup> 14 mg/l CaCO <sub>3</sub>

### วิธีการคำนวณ

น้ำเลี้ยงหม้อไอน้ำต้องมีความกระด้างไม่เกิน 1-2 มก./ล.

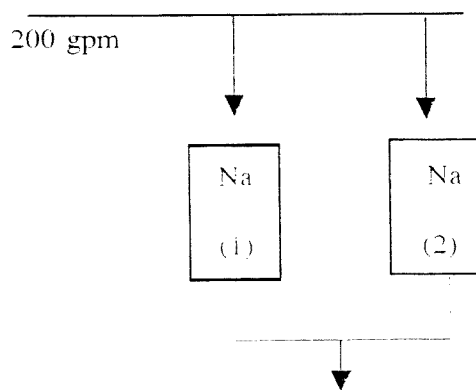
น้ำดิบมีความกระด้าง = 66 + 20 = 86 มก./ล.

= 66/17.1 = 5 เกรนต่อแกลลอน

น้ำ 100,000 ปอนด์/ชม. = 100,000/(60 x 8.33)

= 200 แกลลอนต่อนาที

สมมติว่าใช้ถังเรซิน 2 ใบต่อกันอย่างขนาน



Mode of Operation ของถังแต่ละใบจะไม่พร้อมกัน เพื่อให้ถังอย่างน้อย 1 ใบ ทำงาน

ตลอดเวลา

ดังนั้นถังแต่ละใบจะต้องมีความสามารถรับอัตราไหลสูงสุดได้ =

200 แกลลอน/นาที

สมมติว่า Regeneration Cycle = 24 ชม.

ความกระด้างที่ถูกกำจัดออกในแต่ละวัฏจักร =  $5 \times 200 \times 1440 / 1000$

= 1440 กิโลเกรน

ถ้าเรซินมี Exchange Capacity = 7 กิโลเกรน/ลบ.ฟุต

จะต้องการเรซินทั้งหมด = 1440/7

= 206 ลบ.ฟุต

$$\begin{aligned}
 \text{หรือตั้งแต่ละไบจะมีเรซิน} &= 206/2 \\
 &= 103 \text{ ลบ.ฟุต} \\
 \text{สมมติว่าอัตราไหลของน้ำผ่านถึงเรซินไม่ควรเกิน} & 8 \text{ gpm/ft}^2 \\
 \text{ตั้งแต่ละไบต้องมีพื้นที่} &= 200/8 = 25 \text{ ตร.ฟุต} \\
 & \text{(คิดจาก Max Flow)} \\
 \text{เลือกถังกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง} & 72 \text{ นิ้ว} \\
 \text{ความสูงของเรซิน} &= 103 \times 12 / (3.14 \times 6^2 / 4) \\
 &= 43.7 > 30" \text{ OK}
 \end{aligned}$$

## ตัวอย่างที่ 2

- น้ำเสียจากโรงงาน ชุบโลหะ ซึ่งเดินขบวนการผลิต 5 วัน/สัปดาห์ มีลักษณะของส่วนประกอบโลหะหนัก

- Capper = 2.2 mg/l as Cu
- Zinc = 10 mg/l as Zn
- Nickel = 15 mg/l as Ni
- Chromium = 130 mg/l as CrO<sub>3</sub>

ถ้า flowrate = 50 gal/min ให้ออกแบบระบบ ion exchange เพื่อที่จะนำกลับมาและโครเมียม โดยลักษณะของ exchanger เป็นดังนี้

	Exchanger	
	Cation	Aniown
Regenerant	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH
Dosage, lb/ft <sup>3</sup>	12	4.8
Conc. %	5	10
flowrate	0.5 gal/min.ft <sup>3</sup>	
Operating Capacity	1.5 eq.wt./l	3.8 lbCrO <sub>3</sub> /ft <sup>3</sup>

### Anion Exchanger :

$$- \text{CrO}_3 \text{ ถูกจับโดยแลกเปลี่ยนกับ OH}^- \text{ ในปริมาณ } 130 \text{ mg/l} \times 50 \text{ gal/min} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \times 16 \frac{\text{h}}{\text{d}} \times 8.34 \times 10^{-6} \frac{\text{lb/gal}}{\text{mg/l}}$$

$$= 52 \text{ lb/d}$$

- ใช้ resin ที่มีความสามารถจับได้

$$= 3.8 \text{ lbCrO}_3/\text{ft}^3$$

ดังนั้นปริมาตรของ resin ที่ใช้

$$= 52/3.8 = 13.7 \text{ ft}^3$$

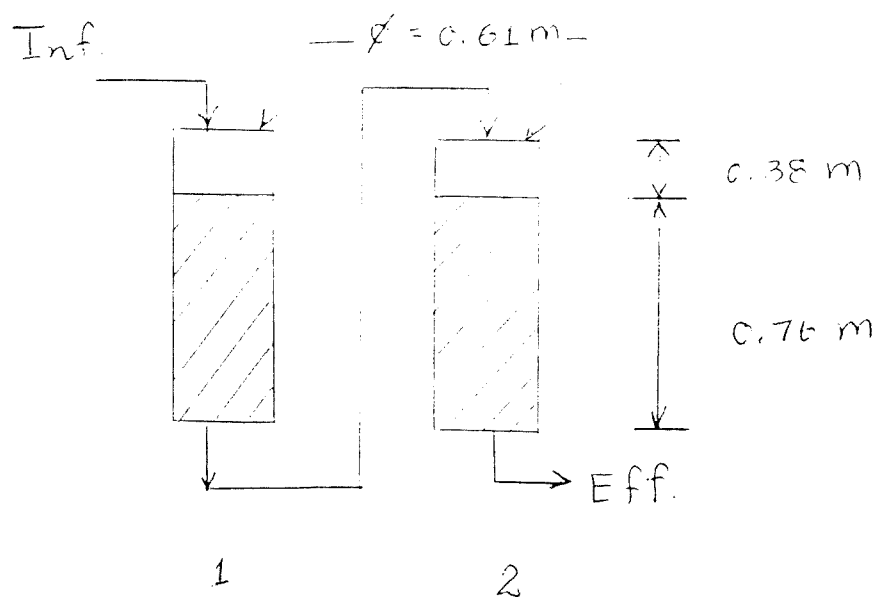
- flowrate ของน้ำเสียที่จะมาบำบัด

$$= 50 \text{ gal/min}/(13.7 \text{ ft}^3)$$

$$= 3.6 \text{ gal}/(\text{min}\cdot\text{ft}^3)$$

$$= 0.48 \text{ m}^3/(\text{min}\cdot\text{m}^3)$$

- ออกแบบ I.E. Column 2 Column



### Regeneration

- ใช้น้ำ NaOH =  $(4.8 \times 13.7) / 0.1$   
 $= 660$  lb/ครั้งของ regeneration
- Rinse Water ต้องการที่  $100 \text{ gal/ft}^3$   
 $= 100 \times 13.7 = 1,370 \text{ gal}$

### Cation Exchanger

- ปริมาณ Cation ที่จะต้องกำจัด

$$1) \text{ Zn} = \frac{10 \text{ mg/l}}{32.7 \text{ mg/meq}} = 0.306 \text{ meq/l}$$

$$2) \text{ Cu} = \frac{22 \text{ mg/l}}{31.8 \text{ mg/meq}} = 0.693 \text{ meq/l}$$

$$3) \text{ Ni} = \frac{15 \text{ mg/l}}{29.4 \text{ mg/meq}} = 0.511 \text{ meq/l}$$

$$\text{Total} = 273 \text{ equi/d}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตร resin ที่ใช้} &= \frac{273}{1.5 \times 28.3 \text{ l/ft}^3} \\ &= 6.5 \text{ ft}^3 \end{aligned}$$

### Regeneration :

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 5\% ที่ } 12 \text{ lb/ft}^3 \\ \text{ต้องการ} &= \frac{12 \times 6.5}{0.05} = 1,560 \text{ lb} \\ \text{Rinse requirement} &= 120 \text{ gal/ft}^3 \\ &= 120 \times 6.5 = 780 \text{ gal} \end{aligned}$$

## ปัญหาที่เกิดขึ้นและวิธีการควบคุมแก้ไขระบบการแลกเปลี่ยนไอออน

- 1) การล้างย้อนไม่เหมาะสม
  - resin หลุดออกจากระบบเมื่อ QBW สูงไป
  - เวลาต้องเพียงพอสำหรับการล้าง
- 2) การไหลไม่ทั่วคอลัมน์
  - สัมผัสตัว resin ไม่ทั่วถึงดีพอ
  - เกิดจากการอุดตันชั้น resin หรือ underdrain
- 3) การใช้สาร regenerant ไม่เหมาะสม
  - ความเข้มข้นสูงหรือน้อยเกินไป
  - ตำแหน่งที่ตั้งของ regen, distributor
- 4) resin แตกหักง่าย เกิดการอุดตัน
  - pressure drop สูงขึ้น
  - การไหลลัดทาง → capacity ลดลง
- 5) resin fouling
  - capacity losses
  - สาเหตุของ fouling ได้แก่

-**Organic Fouling** : เกิดกับ anion resin เมื่อสารอินทรีย์ตกตะกอนลงบน basic exchange site ทำให้ความสามารถในการ regen ลดลง \* E.C. ลดลง

- สาเหตุ ได้แก่ กรดฟอสฟอริก, กรดฮิวมิค, กรดแทนนิก และ DVB

- **Iron Fouling** :

- Soluble form ของ Iron สามารถแลกเปลี่ยนไอออน และเข้าไปจับ E.S. ซึ่งจะเกิดการ oxidize และตกตะกอน เป็น ferric oxide ภายในชั้น bed

- Insoluble form ของ Iron เคลือบผิวหน้าชั้น bed



- **Silica Fouling :**

- การสะสมของ insoluble silica บน anion resins → มาจากการ regeneration ไม่ถูก  
วิธีการ → ท้ายสุดเกิดเป็น colloid silicic acid ในชั้น bed

- **Microbiological fouling :**

- เกิดจากการเติบโตของแบคทีเรีย ทำให้ pressure drop อุดตันชั้น bed และคุณภาพน้ำที่  
บำบัดแล้วไม่ดีพอ

- **Calcium Sulfate Fouling**

- เกิดเมื่อใช้  $H_2SO_4$  regen Cation exchanger โดยเฉพาะถ้า น้ำมี Ca มาก ๆ
- ปัญหา  $Ca^{2+}$  &  $SO_4^{2-}$  leakage
- แก้โดย Stepwise Injection

- **Aluminum Fouling**

- เกิดจาก aluminium floc จาก alum เข้ามาใน resin bed
- ถูกกำจัดออกโดยขบวนการ regen ได้ยาก

- **Copper Fouling**

- E.C.loss เนื่องจาก Copper oxide coating ชั้น resin

- **Oil Fouling**

- Film น้ำมันเคลือบชั้น resin
- Pressure drop, การไหลลัดทาง

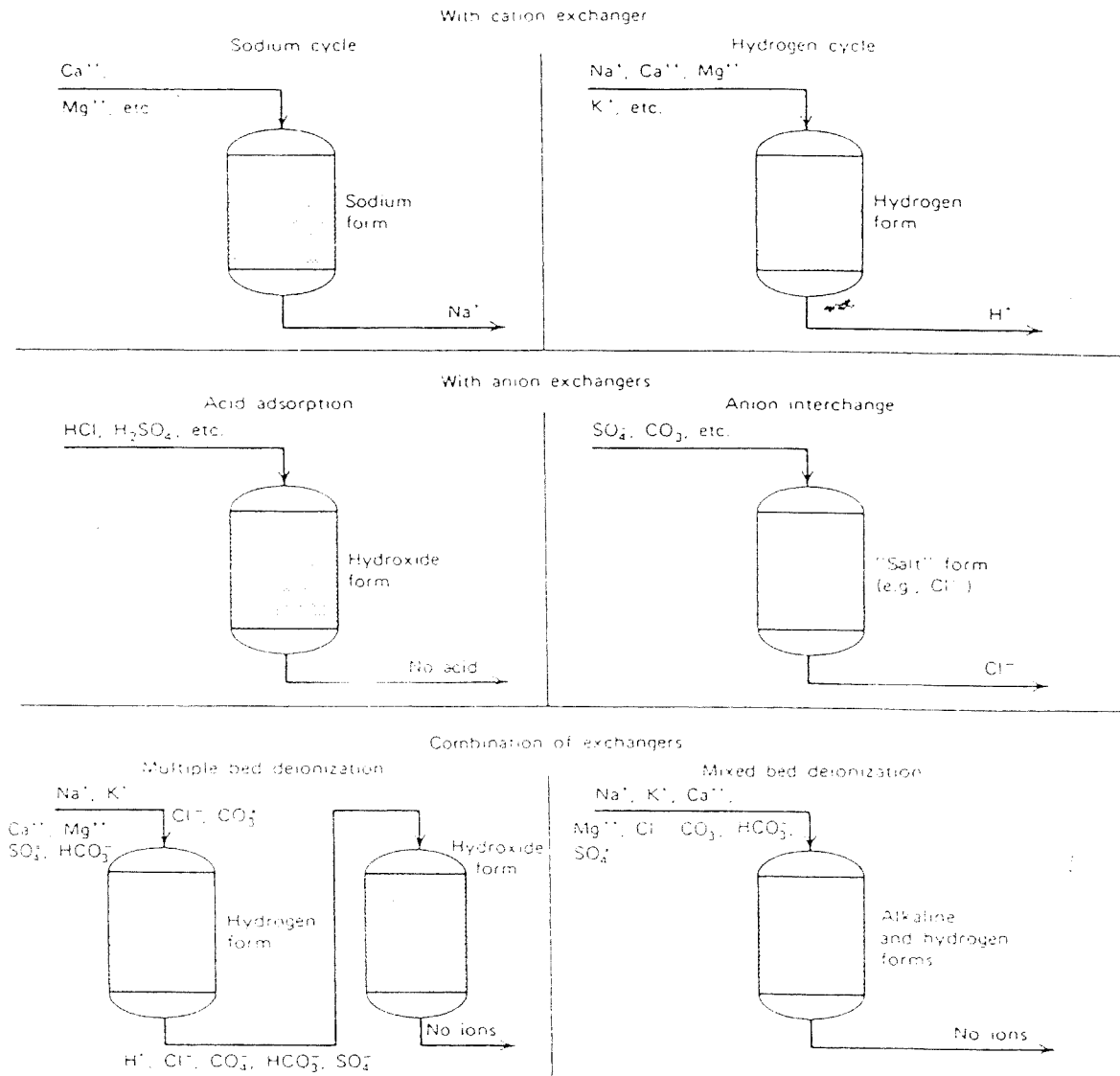


Fig.1 Ion exchange process

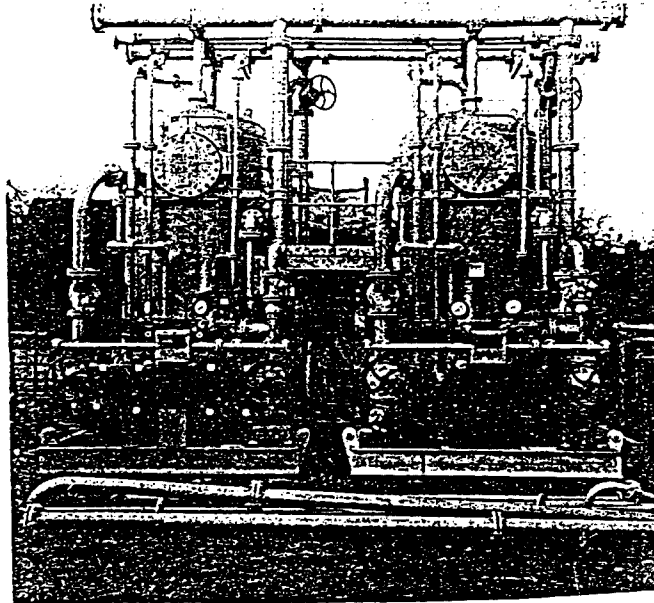


Fig.2 Example of Softening Plant

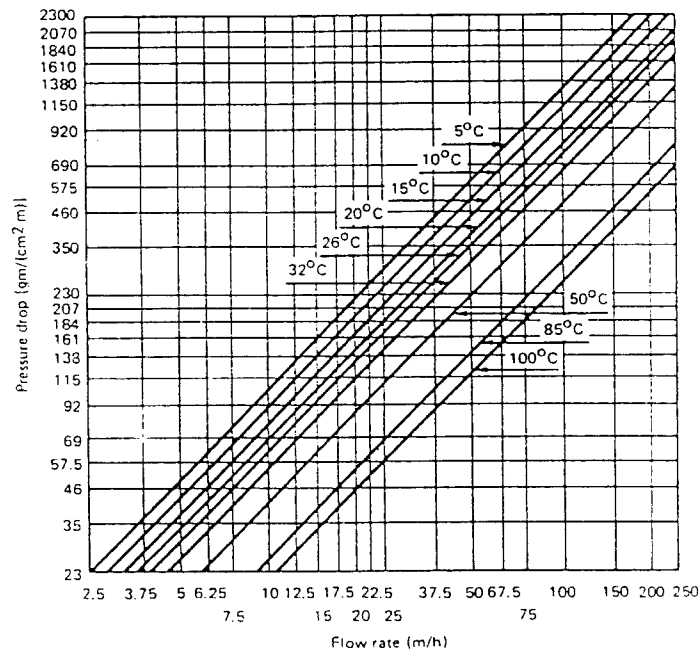


Fig.3 Relationship between pressure drop and hydraulic expansion

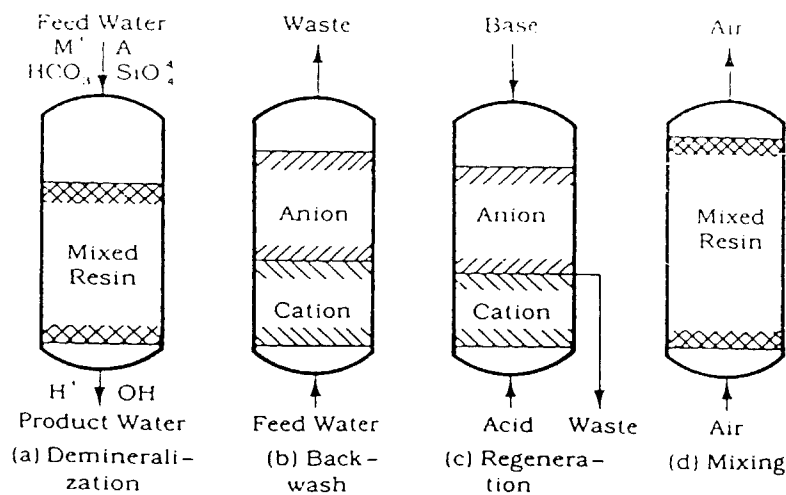
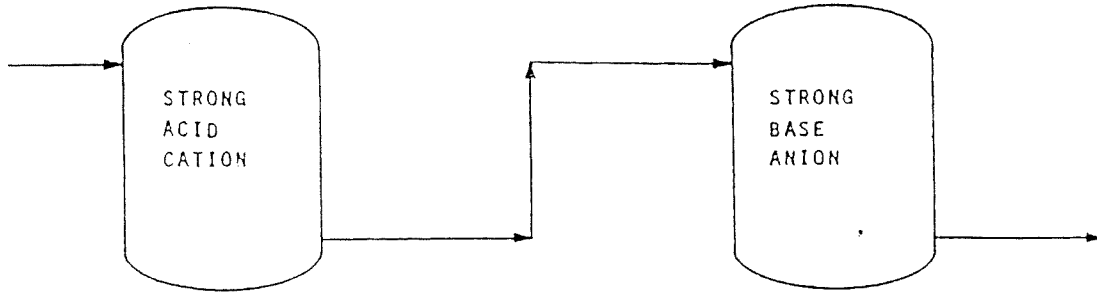


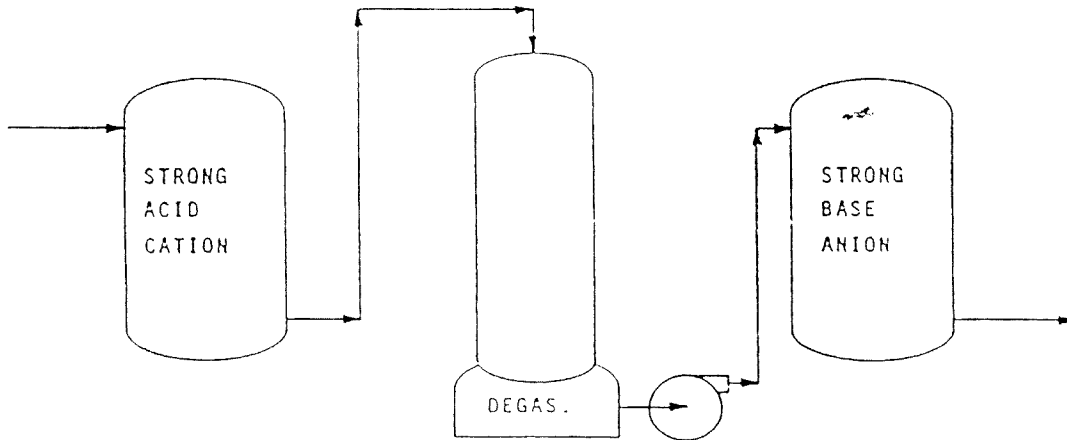
Fig.6 Mixed bed demineralization



APPLICATION:

- LOW ALKALINITY WATER WITH LOW EFFLUENT SILICA LEVELS REQUIRED
- HIGH OPERATING COSTS
- YIELDS APPROXIMATELY NEUTRAL WASTE

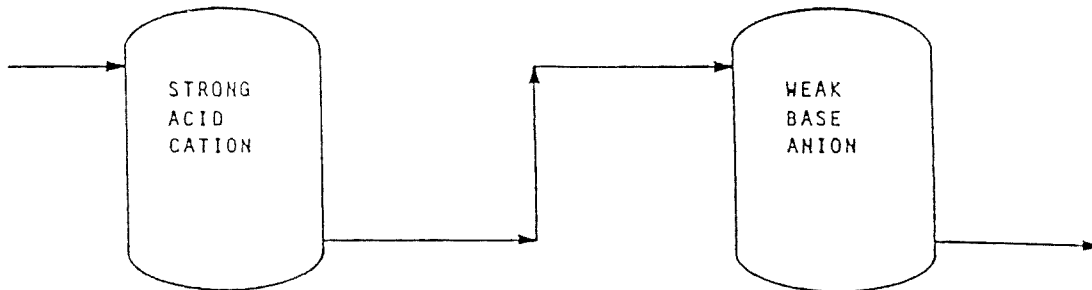
Fig.4.1 Arrangement 1



APPLICATION:

- HIGH ALKALINITY WATER WITH LOW EFFLUENT SILICA LEVELS REQUIRED.
- HIGHER INITIAL COST BUT LOWER OPERATING COST THAN ARRANGEMENT 1
- REQUIRES ADDITIONAL CHEMICALS TO NEUTRALIZE WASTE.
- REPUMPING REQUIRED.

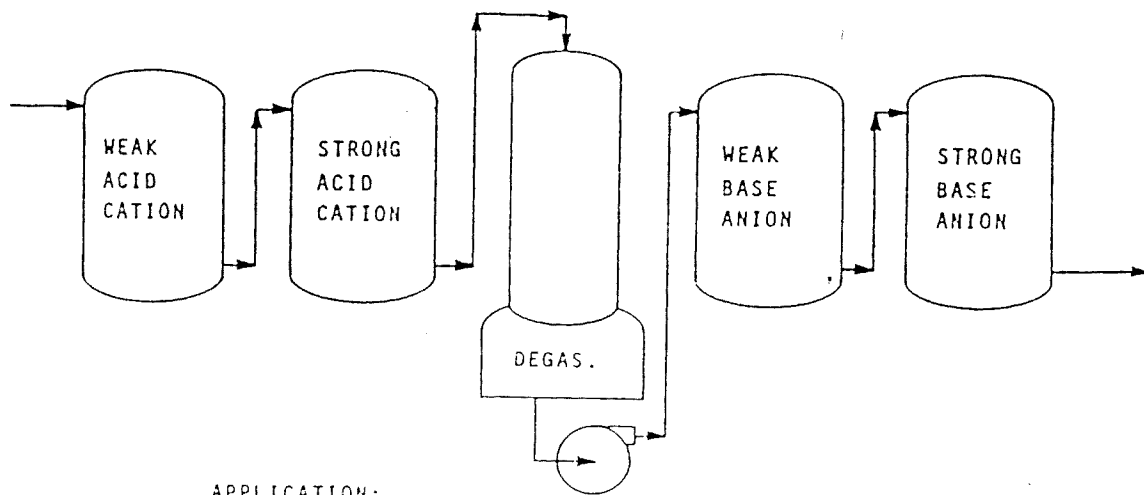
Fig.4.2 Arrangement 2



APPLICATION:

- SAME AS ARRANGEMENT 1 EXCEPT NO SILICA REMOVAL
- EXCELLENT REMOVAL OF STRONG ACIDS
- LOW OPERATING COST
- REQUIRES ADDITIONAL CHEMICALS TO NEUTRALIZE WASTE

Fig.4.3 Arrangement 3

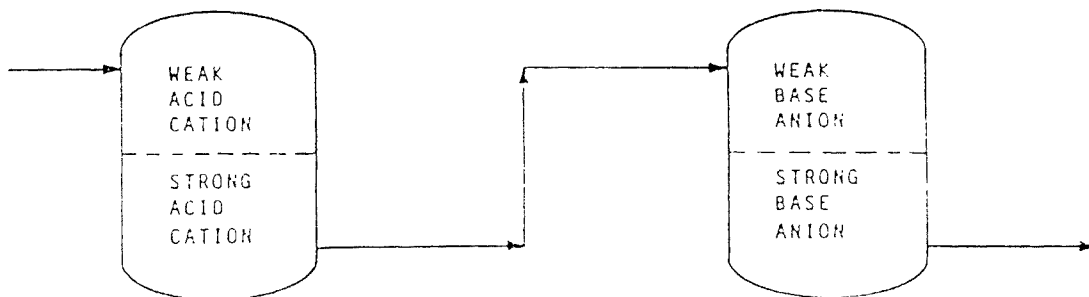


## APPLICATION:

HIGH ALKALINITY, HIGH HARDNESS, HIGH CHLORIDE AND SULFATE WATERS WITH HARDNESS TO ALKALINITY RATIO NEARING 1.0.

- HIGH REGENERATION EFFICIENCIES (CATIONS AND ANIONS) REGENERATED IN SERIES.
- LOW SILICA EFFLUENT
- REPUMPING REQUIRED

Fig.4.4 Arrangement 4

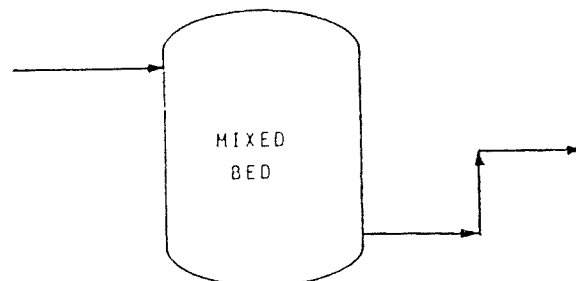


## APPLICATION:

SAME AS ARRANGEMENT 4 BUT WITH LOWER ALKALINITY

- LOW OPERATING AND LOW INITIAL COSTS
- RESIN SEPARATION MUST BE MAINTAINED
- DIFFICULT TO OPERATE
- REQUIRES PRECISE BACKWASH RATES TO MAINTAIN STRATIFICATION
- SILICA POLYMERIZATION CAN OCCUR ON THE WEAK BASE ANION RESIN, LEADING TO EMBRITTLEMENT AND FRACTURE

Fig.4.5 Arrangement 5



## APPLICATION:

USED AS AN EFFLUENT POLISHER TO FURTHER REDUCE THE T.D.S. BEYOND THE LIMIT OF A PRECEDING SYSTEM.

- YIELDS EXTRA PURE WATER
- CATION AND ANION RESINS ARE ULTIMATELY MIXED DURING SERVICE, THEN STRATIFIED BY A BACKWASH PRIOR TO REGENERANT INTRODUCTION.

Fig.4.6 Arrangement 6

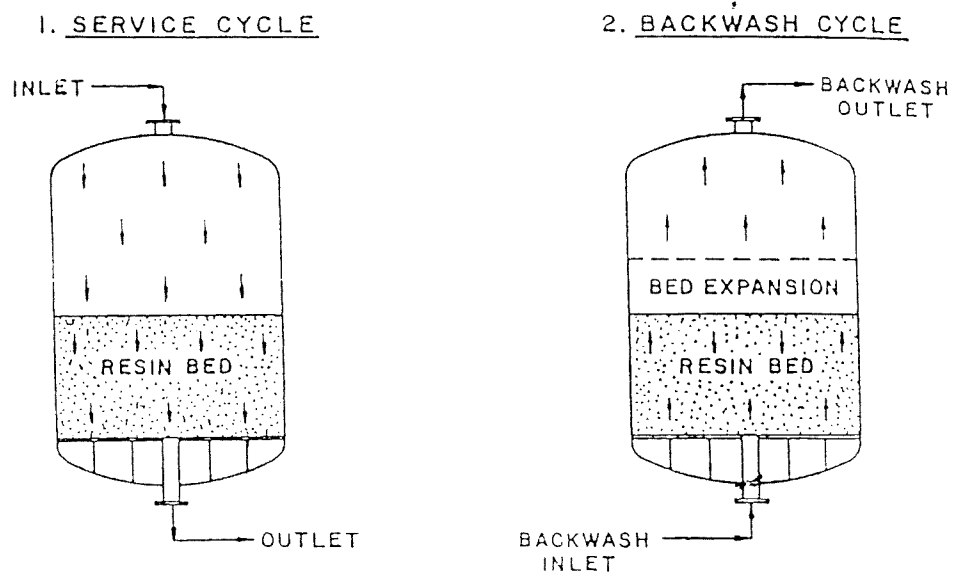


Fig.5.1 Service and backwash cycles

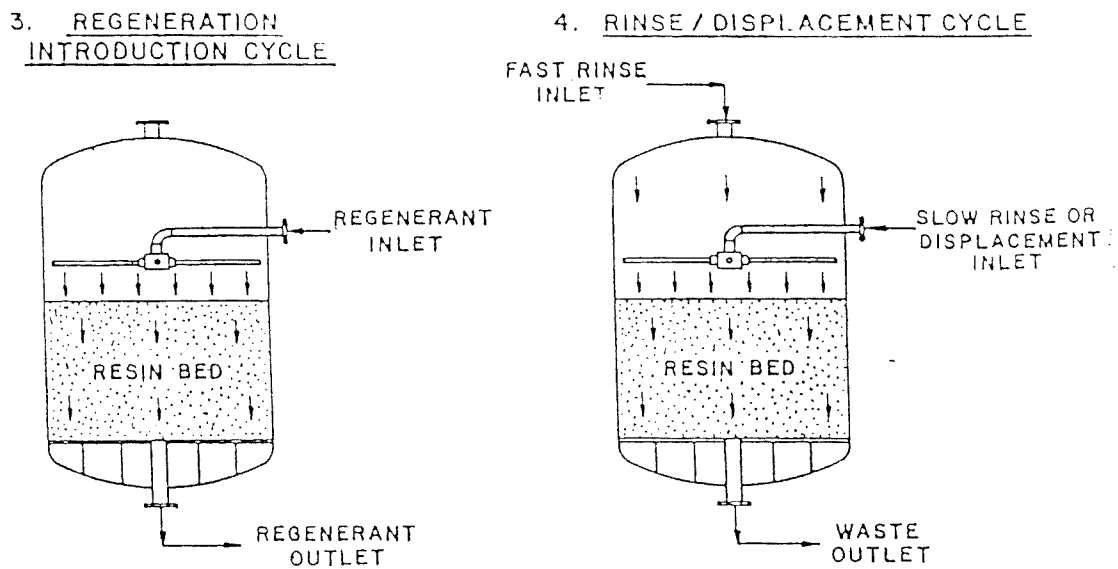


Fig.5.2 Regeneration and rinse cycles

# การฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน

โดย

ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

## ระบบฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน

ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล

1. วัตถุประสงค์ : ลด disinfection by product  $\Rightarrow$  THM

2. ประโยชน์ของระบบโอโซน

- Oxidation & volatization of organic mater
- ควบคุม algae และ สปก. ก่อรส, กลิ่น
- กำจัดสารประกอบก่อให้เกิดสี
- Oxidation ของ  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$
- ใช้เวลา disinfection time สั้นกว่า
- Partial Oxidation ของสารอินทรีย์แล้วตามด้วยการย่อยสลายโดย bacteria.

3. ข้อพิจารณาในการออกแบบ :

- การเลือก feed gas system
- การเตรียม feed gas system
- การเลือก ozone generator
- การเลือก ozone contact
- การทำลาย off-gas ozone
- \*\*ozone เป็นก๊าซพิษ และติดไฟได้

### Comparison of Disinfection by Chlorination & Ozonation

1. กรณี 60,000 Coliform/ml

- คลอรีน 0.1 mg/l , 100 % kill = 15,000 s
- โอโซน 0.1 mg/l , 100 % kill = 5 s

2. กรณี 350 สปอร์ของ B. Suvtitis/ml

- คลอรีน 1.4 mg/l , 100 % kill = 9,000 s
- โอโซน 0.05 mg/l , 100 % kill = 30 s

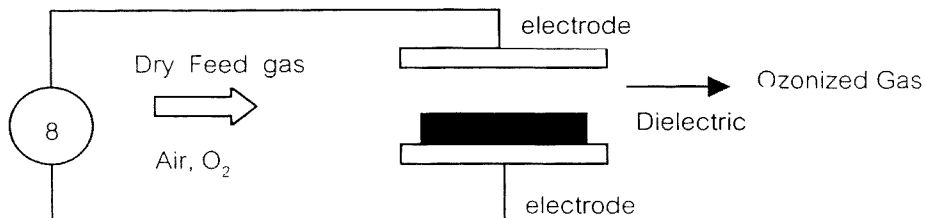
### สถานะเอื้ออำนวยต่อการบำบัดน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

- 1.)  $O_3$  เข้าผสมเนื้อน้ำภายใต้ Pressure ไม่น้อยกว่า  $1.5 \text{ kg/cm}^2$  เพื่อให้  $O_3$  ละลายน้ำได้เต็มที่
- 2.) Contac time : เวลาสัมผัสระหว่าง  $O_3$  กับน้ำ ไม่ควรน้อยกว่า 2 นาที เพื่อความมั่นใจในประสิทธิผล



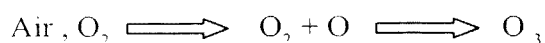
## หลักการทํางาน

- อาศัยการส่งผ่านของกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นกระแสสลับที่มีแรงดันสูง (High Voltage) เพื่อจ่ายให้แก่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว โดยมีวัสดุไม่เป็นสื่อ (Dielectric) คั่นระหว่างขั้วทั้งสองเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟฟ้า และมีช่องว่างเพื่อให้ก๊าซผ่าน



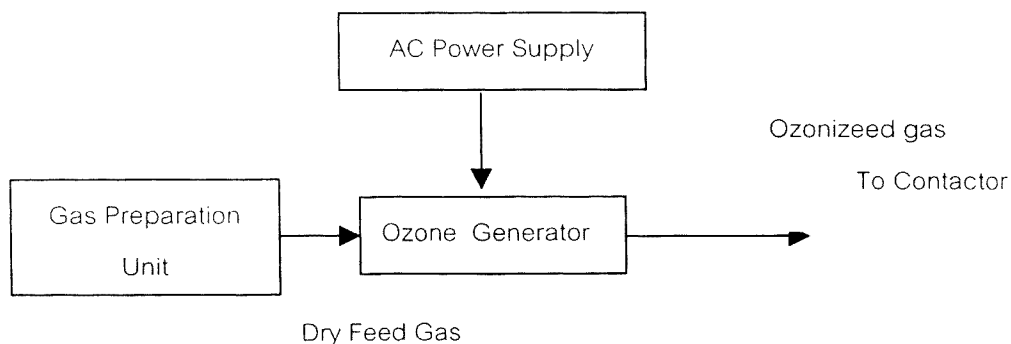
## Ozonizer Diagram

- Silent Discharge เกิดขึ้นระหว่างช่องระหว่างไฟฟ้า ทำให้เกิดก๊าซ O<sub>3</sub> เมื่อ O<sub>2</sub> บางส่วนถูกไอออไนซ์ และรวมตัวกับโมเลกุลของก๊าซ O<sub>2</sub> ที่ยังไม่ไอออไนซ์



## ส่วนประกอบหลักของระบบจ่าย O<sub>3</sub>

### 1. ชุดเตรียมก๊าซ



ระบบจ่าย O<sub>3</sub>

- ถ้าใช้อากาศ → แห้งสนิท ( $\text{NO}$   $\text{HNO}_3$ ) ลดอุณหภูมิ gas และทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส

## 2. Electric Power Supply

ปริมาณ  $\text{O}_3$  ที่เกิดขึ้นและพลังงานที่ใช้  $\propto$  Voltage, ความถี่ที่ใช้มี 50 – 60 Hz และ 150 – 600 Hz

## 3. Ozone Generation

การผลิต  $\text{O}_3$  เกิดความร้อนขึ้น ใช้น้ำหรืออากาศระบายความร้อนได้

### ● Feed Gas Selection

- Ozone ผลิตได้จาก Air,  $\text{O}_2$
- ความเข้มข้นของ Ozone จาก air = 1.5 – 2.5 % โดยน้ำหนัก
- ความเข้มข้นของ Ozone เพิ่มขึ้น 3 - 5 % ถ้าใช้ High – Purity  $\text{O}_2$

### ● Feed Gas Treatment

- Air,  $\text{O}_2$  → บำบัดก่อน feed เข้าไป Ozone generator เพื่อให้ได้ค่า  $\text{O}_3$  Production rate สูงสุด และการดูแลรักษา  $\text{O}_3$  generator น้อยที่สุด
  - ลดเศษฝุ่นผง, ความชื้น, น้ำมัน,  $\text{N}_2$  (g)

### ระบบฆ่าเชื้อโรคโดยโอโซนสำหรับน้ำประปา

- ประกอบด้วย
- Pre compressor มีกระดาษกรอง 5 um + main compress after cooler
  - Oil coalescer
  - Refrigerant dryer
  - Heat reactivated desiccant dryer

- อย่างไรก็ตามข้อเสียของระบบโอโซน

- 1) ราคาแพง, ต้องใช้พลังงานมาก
- 2) การแพร่กระจายของ  $\text{O}_3$  (g) ในน้ำทำได้ยาก ลักษณะการไหลในท่อเปิด (open – channel flow) ไม่เอื้ออำนวยต่อการเติม  $\text{O}_3$  (g)

- สำหรับระบบจ่ายก๊าซ O<sub>3</sub> ขนาดใหญ่

- ใช้อากาศซึ่งเป็นแหล่ง O<sub>2</sub> ผลิต ปริมาณ O<sub>3</sub> ที่เกิดขึ้น = 0.5 – 1.5 % โดยปริมาตรของก๊าซที่เกิดขึ้น
- กรณีใช้ O<sub>2</sub> ผลิตได้ O<sub>3</sub> 1 – 2 % โดยปริมาตรของ Gas ที่เกิดขึ้น

- ระยะเวลาสัมผัสของโอโซน (มี 3 Phase)

- Demand Phase
- Residual Maintenance Phase : 5 – 10 นาที
- Decay Phase : Stripping

### ข้อควรพิจารณาสำหรับ Ozone Generator

#### 1. ระบบเตรียมอากาศแห้ง

- จำเป็นสำหรับการผลิต O<sub>3</sub> ด้วยระบบ High Voltage → อากาศชื้นไม่ได้

1.1 สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง

1.2 มีระบบ Generation อย่างอัตโนมัติในกรณีหมดสภาพการใช้งาน

1.3 มีระบบเตือนถ้าหากมีอากาศชื้นหลุดลอดเข้าไปในระบบและสามารถสั่งการให้ระบบหยุดการทำงาน

1.4 มีระบบวงจรไฟฟ้าตรวจสอบสภาพของระบบขจัดความชื้นตลอดการใช้งาน

#### 2. ส่วนของ Ozone Generator : เป็นหัวใจสำคัญของระบบทำหน้าที่เปลี่ยนแปลง

O<sub>2</sub> → O<sub>3</sub> โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ทำงานหนักมาก ควรออกแบบให้มีลักษณะดังนี้

2.1 Compact Module → สามารถถอดเข้าออกจากตู้บรรจุได้ง่ายในช่วงเวลาที่มีปัญหาและสามารถเปลี่ยนใส่ชุดสำรองเข้าไปแทนที่ได้

2.2 สามารถถอดประกอบชิ้นส่วนอะไหล่ได้ยามที่ชำรุด

2.3 ควรมีระบบ Cooling System เนื่องจากในช่วงกำเนิด O<sub>3</sub> นั้นมีความร้อนเกิดขึ้นด้วย → จำเป็นมาก → และควรมี Warning System ในยามที่ขาดน้ำหล่อเย็น

#### 3. ระบบไฟฟ้ามี 2 ส่วน คือ

3.1 ระบบผลิตไฟฟ้าแรงสูง

- หม้อแปลงที่หล่อเย็นด้วยน้ำมัน

3.2 ระบบไฟฟ้าควบคุม

- ตรวจสอบการทำงานของระบบต่าง ๆ ยามขัดข้องมีการเตือนและอาหยุดระบบ

#### 4. ผู้บรรจุอุปกรณ์

- บรรจุในตู้ที่แข็งแรง, ดูแลรักษาง่าย จัดสัดส่วนภายในเป็นระเบียบ

#### Design Criteria ของระบบโอโซน

1. ปริมาณการจ่ายโอโซน : 1.5 – 3 mg/l แต่ทั้งนี้ขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน
2. จำนวนเครื่องผลิตโอโซน :
  - >  $\geq 2$  เครื่อง, มี 1 เครื่องสำรองไว้
3. Ozone Generator
  - การผลิตขั้นต่ำ : 10 – 20 % ของความต้องการ
  - การผลิตขั้นสูง : 75 % ของความต้องการ
  - Cooling Temp : < 24 องศาเซลเซียส ตรงทางเข้า
  - วัสดุที่ใช้ผลิตถัง : ทน P ได้ 15 psig —> สร้างด้วย 304 LSS หรือ 315 LSS พร้อมด้วย Hypalon / Teflon gasket
  - Type : Low Frequency กับ Voltage เปลี่ยนแปลง medium frequency กับ frequency Control หรืออื่น ๆ
4. Compressor
  - ความดัน : 10 – 40 psig. ถ้าเป็น heat reactive desiccant : 80 – 100 psig. ถ้าเป็น pressure swing type desiccant
  - จำนวน : ขั้นต่ำ 2 เครื่อง
  - type : Liquid ring ( < 1,000 lb/d O<sub>3</sub> production)
  - Centrifugal ( > 1,000 lb/d O<sub>3</sub> production)
  - Position, Oil lubricated with oil removal filter ( < 100 lb/d O<sub>3</sub> production)
5. เครื่องกรอง
  - ก่อนเข้า compressor : filter ปกติ
  - ก่อนเข้า dryer : 3 – 5 um filter
  - ก่อนเข้า generator : 0.3 um filter
  - pressure drop : 0.5 psi (clean filter) : 2 psi (dirty filter)

6. เครื่องลดความชื้น
  - Refrigerant dryer : 41 F dew point (80 % removal from air)
  - Desiccant dryer : - 76 F dew point (99 % removal from air)
7. Desiccant Regeneration
  - Minimum Cycle time = 8 hr.
  - Design Cycle time = 16 hr.
8. Ozone Contractor
  - Transfer Efficiency : 90 – 95 %
  - เวลาการผสม : 5 – 15 นาที (ปกติ < 8 min.)
  - ความลึกของน้ำ : 18 – 20 ฟุต
  - ระดับความลึกของ Diffuser : 16 – 18 ฟุต
  - Freeboard : 4 – 6 ฟุต
  - Stage of contact : ปกติ 2 – 3 stage
9. Ozone Diffuser :
  - วัสดุ : แก้ว, เซรามิก, เทฟลอน, 304 LSS
  - Bubble size : 2 – 5 mm
  - อัตราการไหลของก๊าซ : 0.5 – 4 cfm ขึ้นกับชนิด diffuser
  - ความดันสูญเสีย : max. 0.5 psi
  - Permeability : 8 – 20 cfm/ft<sup>2</sup>
  - Porosity : 35 – 45 %
10. เครื่องตรวจสอบ residual : UV – ozone monitor (แบบต่อเนื่อง)
11. เครื่องทำลาย O<sub>3</sub> ที่หลงเหลือ :
  - Type : Heat catalyst Unit
  - Temp : 80 – 100 F
  - Catalyst : Metal (Platinum) / Metal Oxides

**Factors ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคด้วยโอโซน**

- |  |   |                 |
|--|---|-----------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. O<sub>3</sub> – dose</li> <li>2. Contact time</li> </ol> | } | พื้นฐานที่สำคัญ |
|--|---|-----------------|

3. Suspended Solids
4. Temperature
5. COD & Organic Carbon Level
6. pH
7. Contractor Design : Mass Transfer efficiency, mixing adequacy, ปัญหา short – circuiting

### การนำโอโซนไปประยุกต์ใช้งาน

1. สำหรับการบำบัดน้ำดื่ม
  - ขจัดโลหะหนัก เช่น Fe , Mn
  - ขจัดสารที่ก่อให้เกิดกลิ่น สี รส
  - ขจัดสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำด้วยกระบวนการ Oxidation
2. ปรับปรุงคุณภาพน้ำในสระว่ายน้ำ
  - ขจัดสารอินทรีย์และตะกอนในน้ำ
  - ขจัดและฟอกยูเรียให้อยู่ในรูปสารธรรมดา (สาร N, CN<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S)
  - ลดปัญหาเรื่องกลิ่นของสระว่ายน้ำ
  - ขจัดสารขนาดเล็ก, bacteria และ Virus
  - ทำให้น้ำในสระว่ายน้ำมีประกาย (O<sub>2</sub> มาก)
  - ให้ความสบายต่อผิวหนัง ไม่ระคายเคือง
$$2\text{Fe}^{2+} + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{Fe}^{3+} + \text{O}_2 + \text{OH}^-$$

$$2\text{Mn}^{2+} + 5\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{MnO}_4^- + 5\text{O}_2 + 6\text{H}^+$$
  - สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ทุกชนิดแม้กระทั่ง Virus ที่ฆ่ายากที่สุด เช่น Protozoa & Virus

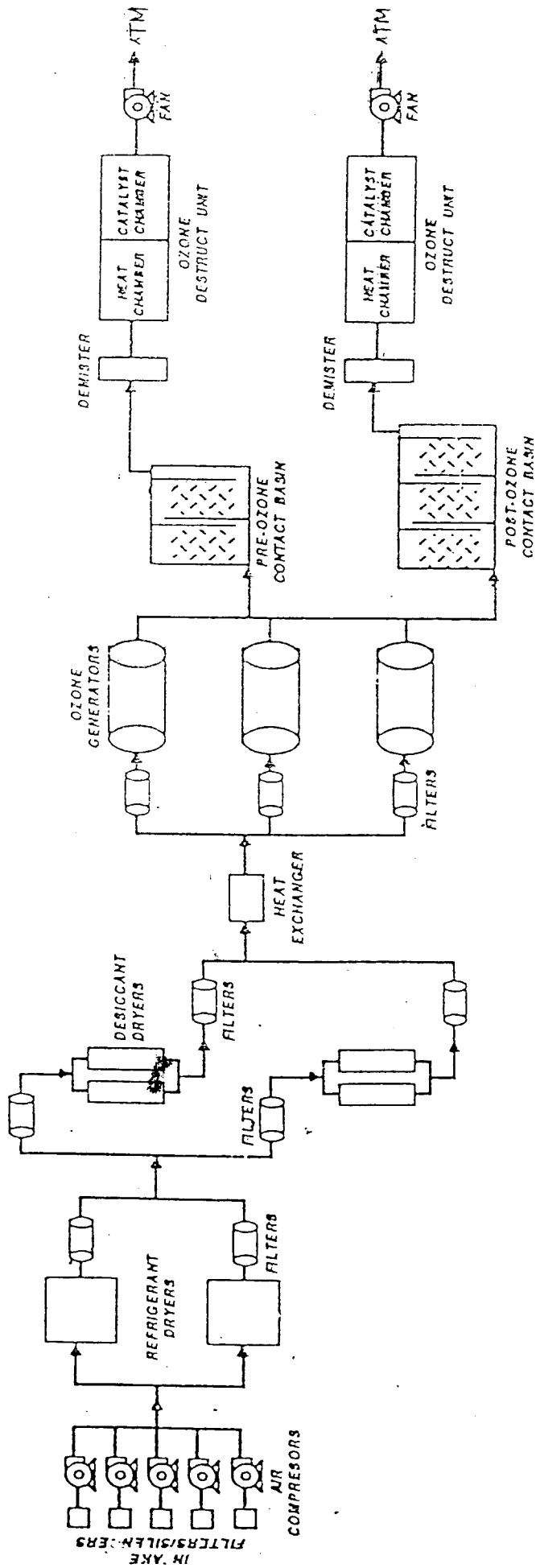
### การออกแบบระบบโอโซน

1. ตรวจสอบ Feasibility ของระบบ
  - พิจารณาลักษณะของน้ำดิบ
  - Bench Scale & Pilot Scale Tests
  - ดูว่าคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์หรือไม่
2. Process Components
3. การสัมผัสระหว่างน้ำกับ O<sub>3</sub>
  - Gas – mass transfer :

- ความเข้มข้นของ  $O_3$  (g)
- gas flowrate
- การกวนผสม
- ขนาดของฟองอากาศ  $O_3$
- รูปร่างของ  $O_3$  - Contact tank
- คุณลักษณะของน้ำดิบที่บำบัด

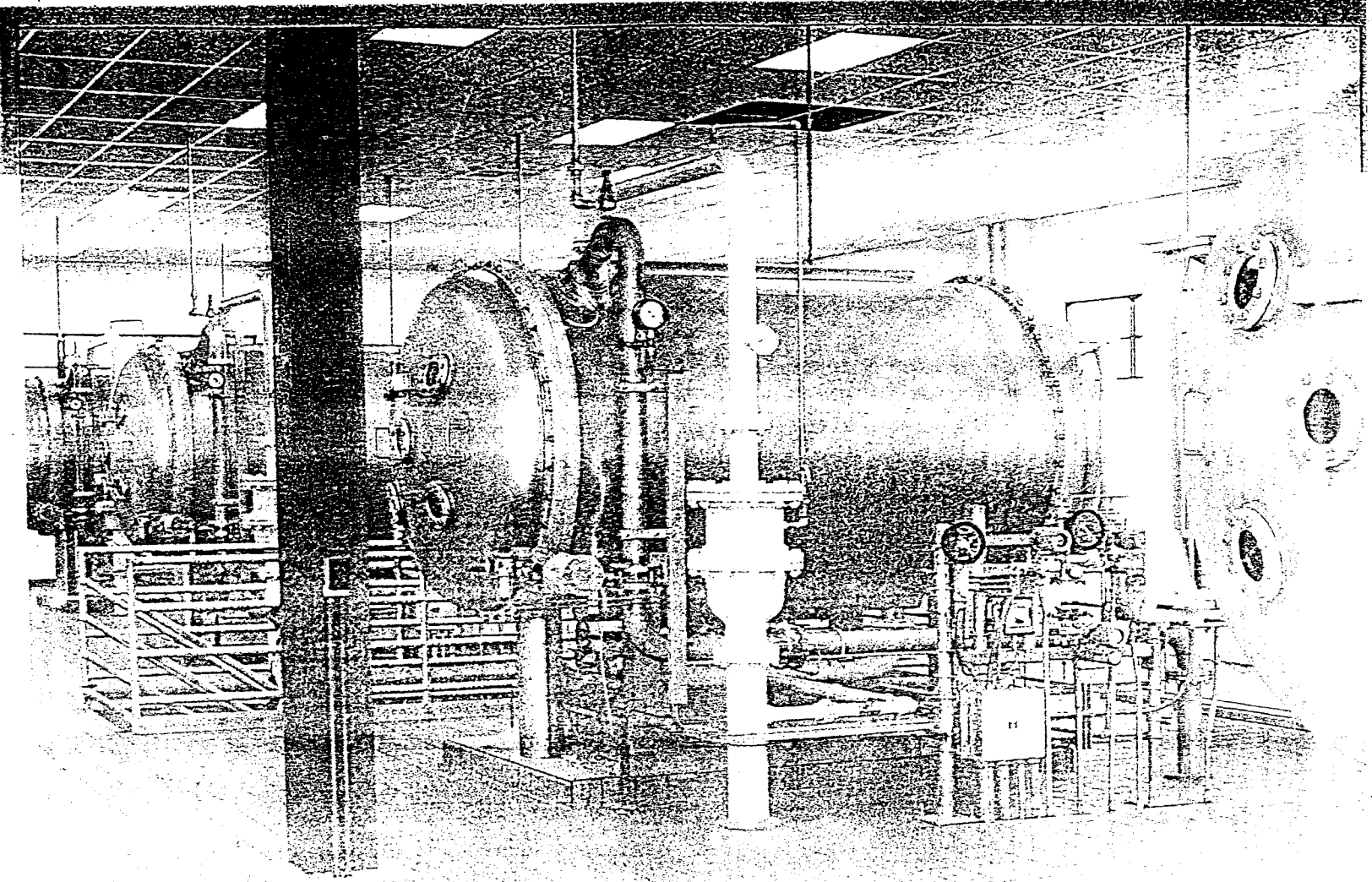
#### 4. ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อโรคด้วย $O_3$

- ประสิทธิภาพการถ่ายเท  $O_3$
- ปัญหา Short – circuiting
- การกวนผสม - เวลาสัมผัส

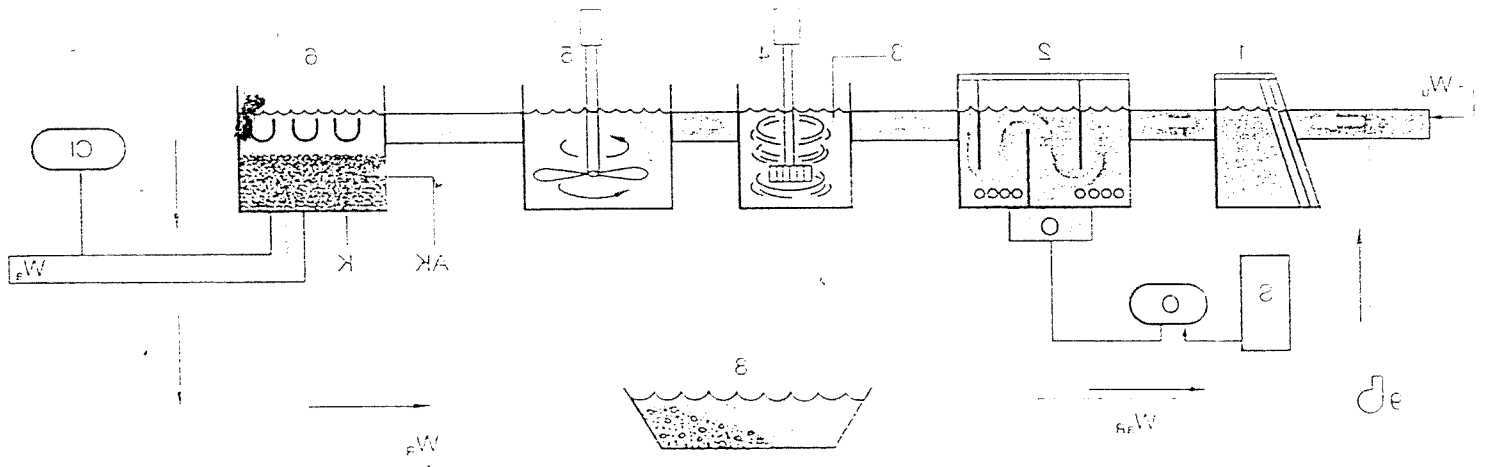


ภาพ 2.4 ระบบผลิตโอโซนและบำบัดน้ำดื่ม





Oxidation facility in the Los Angeles Aqueduct Filtration Plant. Five oxidators in all are installed, each of which can produce 10% of ozone from oxygen per hour.



- |   |                         |   |                 |   |                        |
|---|-------------------------|---|-----------------|---|------------------------|
| 9 | Pump                    | 3 | Chemical dosing | 1 | Ozone oxygen mixture   |
| 8 | Backwash water recovery | 2 | Ozonation       | 2 | Oxygen                 |
| 7 | Chlorination            | 1 | Basins          | 1 | Cleaned backwash water |
| 6 | Filter                  | 4 | Basins          | 2 | Backwash water         |
| 5 | Filter                  | 3 | Basins          | 3 | Washed water           |
| 4 | Filter                  | 2 | Basins          | 4 | Filtered water         |
| 3 | Filter                  | 1 | Basins          | 5 | Filtered water         |
| 2 | Filter                  | 0 | Basins          | 6 | Filtered water         |
| 1 | Filter                  | 0 | Basins          | 7 | Filtered water         |

The treatment processes installed in the Los Angeles Aqueduct Filtration Plant.

Table 6.4 Effects of residual ozone on aquatic organisms (Ward, 1977)

Organism	Residual ozone, mg/L	Summary of effects	Reference
Seven genera of freshwater protozoa	Unknown low concentrations	Death	(Thurberg, 1975)
Rotifer	Unknown low concentrations	Death	(Thurberg, 1975)
Sea urchin and marine worm eggs	Unknown low concentrations	Membrane and cortical changes	(Thurberg, 1975)
Commercial American oyster	Very low or none	Fertilization; developmental and genetic changes	(Dawson <i>et al.</i> , 1974)
Rainbow trout	0.01–0.96	Died within 4 hours	(Sengupta <i>et al.</i> , 1975)
Barnacle	0.4 and 1.0	Died in several days to a week	(Mangum and McIlhenny, 1975)
Marine phytoplankton	0.1–1.0	Populations decreased in 24–48 hours after exposure to ozone	(Pichet and Hurtubise, 1975)
Crab zoea	0.08 (1 minute)	20% mortality within 24 hours; 30–40% within 48 hours	(Pichet and Hurtubise, 1975)
Crab megalops	0.2	Died within 24 hours	(Pichet and Hurtubise, 1975)
Atlantic silversides	0.08–0.2 (5 minutes)	Died within 30 minutes	(Pichet and Hurtubise, 1975)
Fathead minnow	0.2–0.3	Died within 3 hours	
Fathead minnow	0.00–0.43 ( $\bar{x}^a = 0.23$ )	Died within 23 hours	
Lake trout	0.18–0.28 ( $\bar{x} = 0.23$ )	Died within 45 minutes	
Lake trout	0.03–0.06 ( $\bar{x} = 0.05$ )	Died within 5 hours	
<b>Goldfish</b>	0.222	Died within 72 hours	

<sup>a</sup>  $\bar{x}$  = mean concentration.

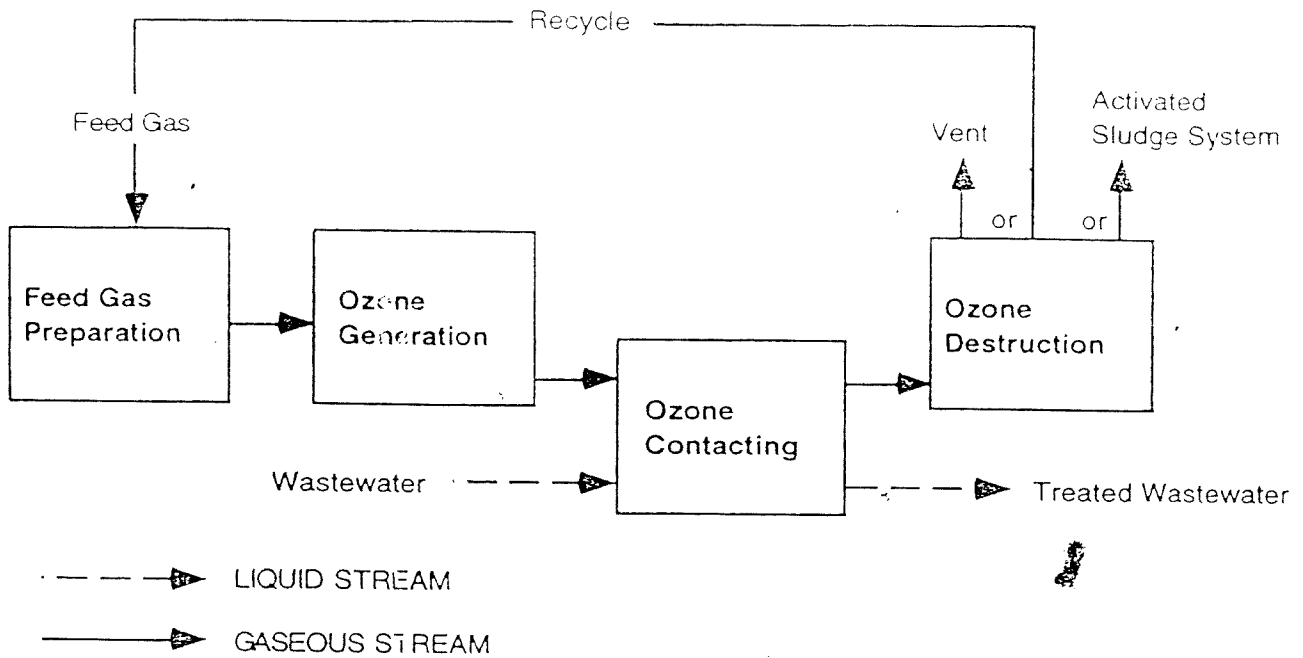


Figure 6.8 Flow diagram for ozone wastewater disinfection

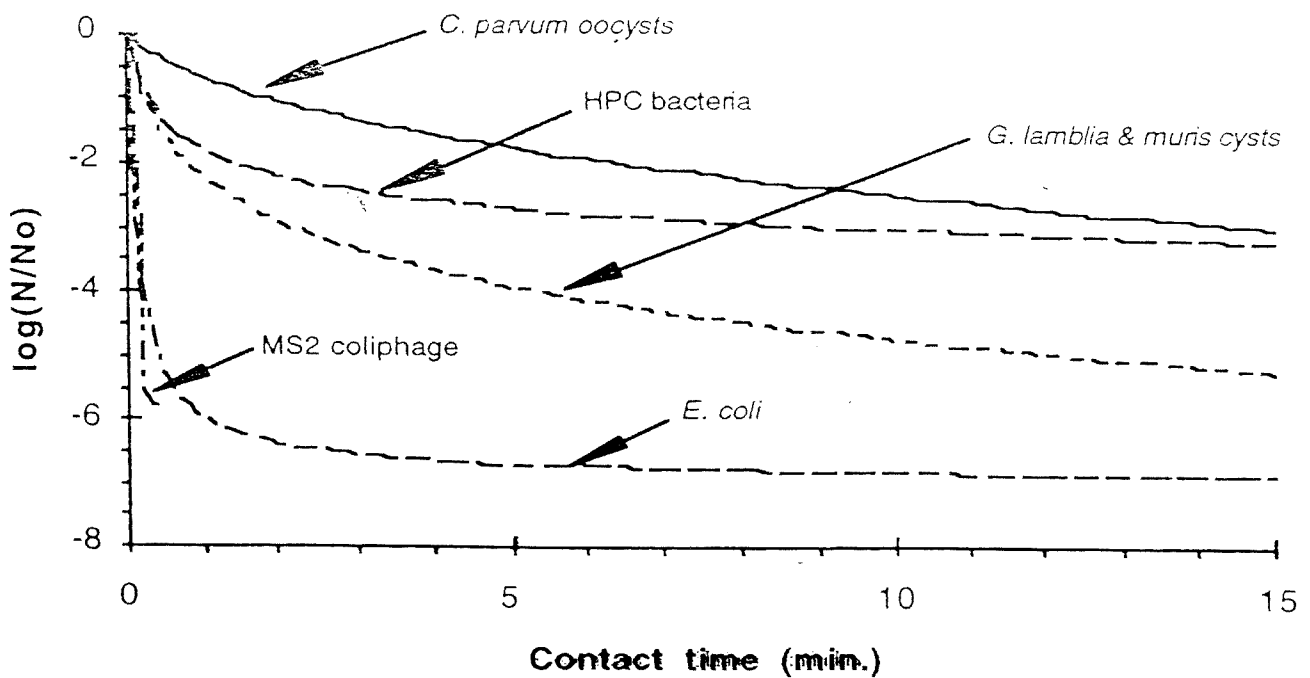


Figure 6.7 Relative susceptibility of MS2, *E. coli*, *Giardia*, *Cryptosporidium*, and heterotrophic plate count bacteria to ozone

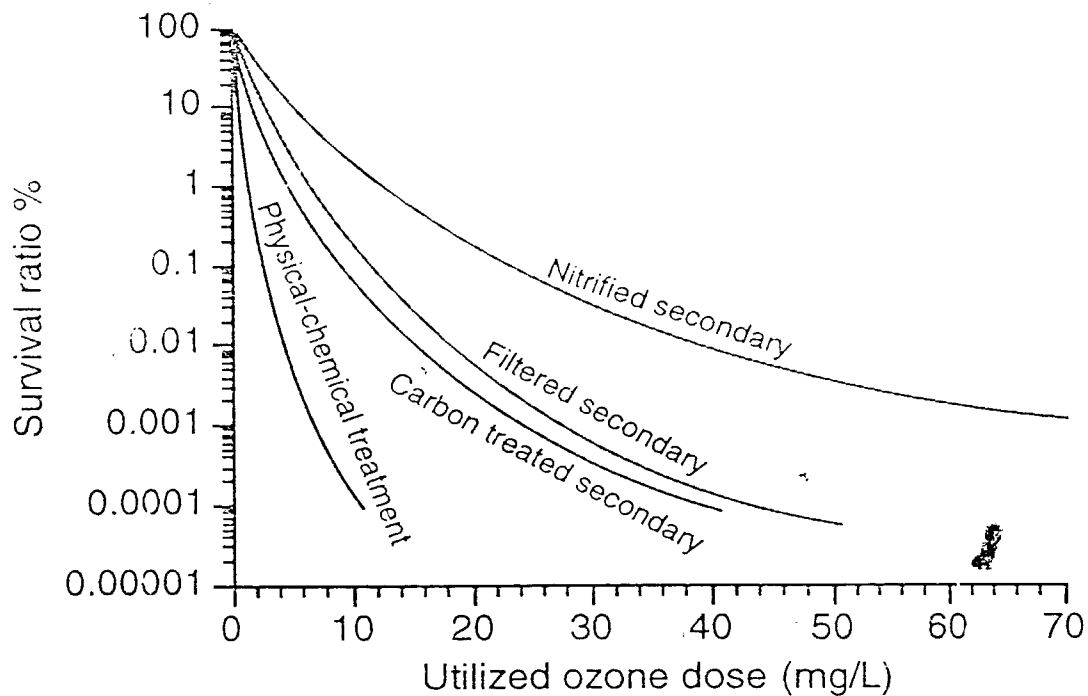


Figure 6.4 Ozone disinfection of total coliforms in various process effluents (Ghan *et al.*, 1977)

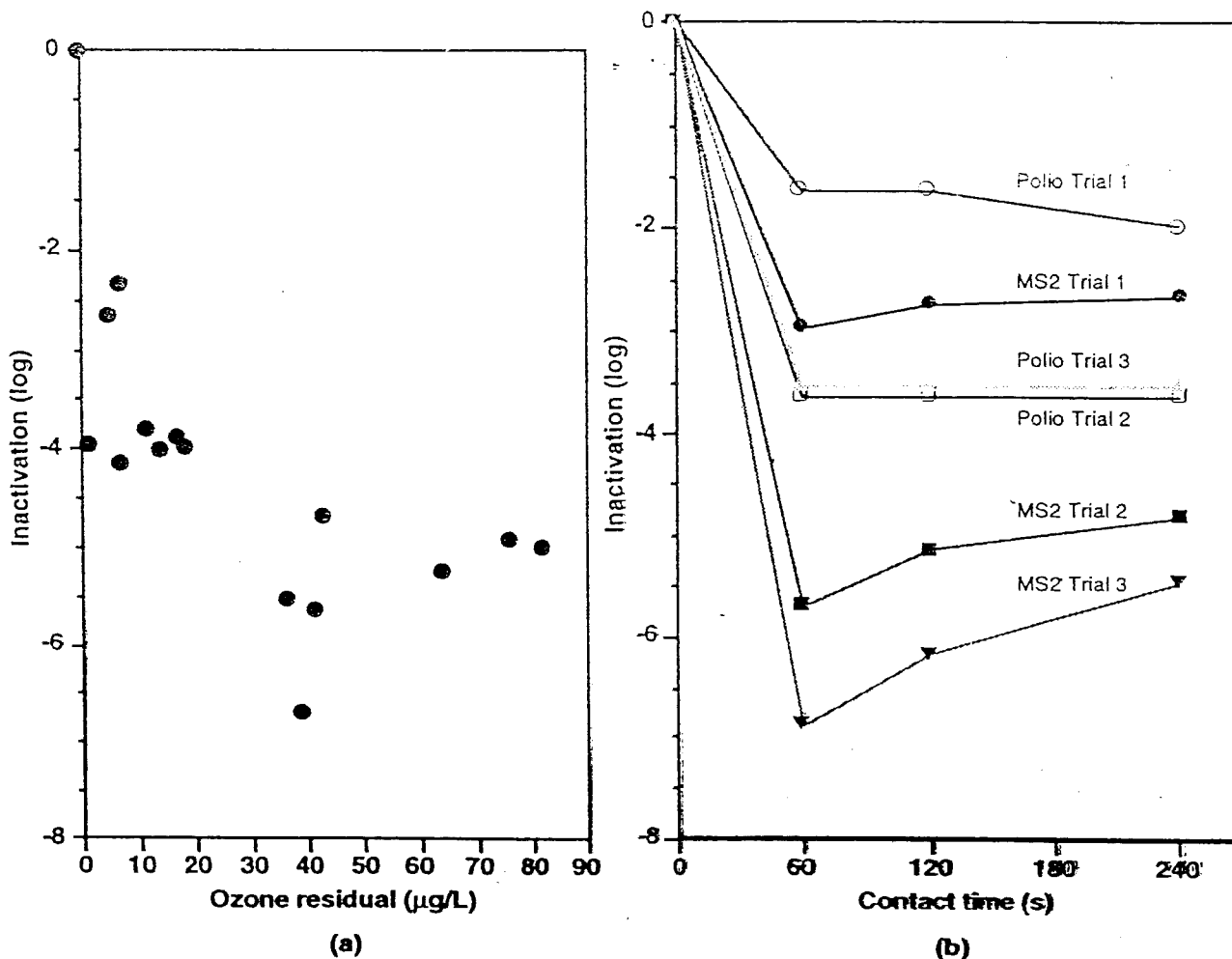


Figure 6.6 Relative sensitivity of MS2 coliphage and poliovirus type 3 (a = MS2 and ozone; b = MS2 and poliovirus) (Finch and Fairbairn, 1991)

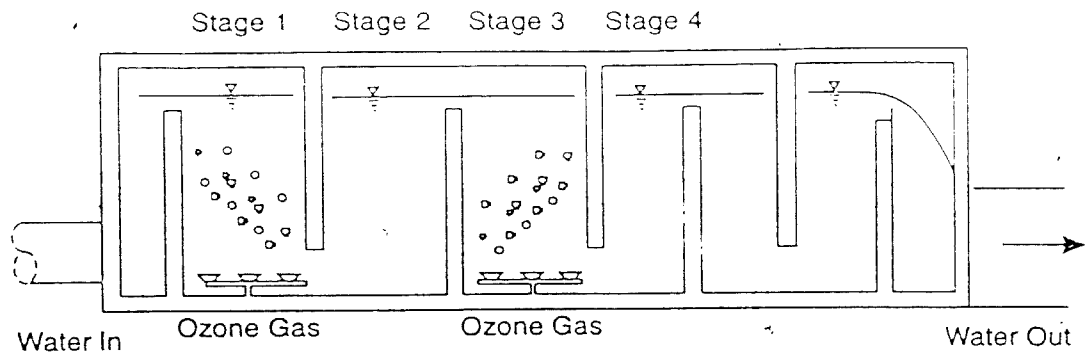


Figure 6.13 Schematic of a four-stage bubble diffuser ozone contact basin (for low gas-phase ozone concentrations) (Langlais *et al.*, 1991)

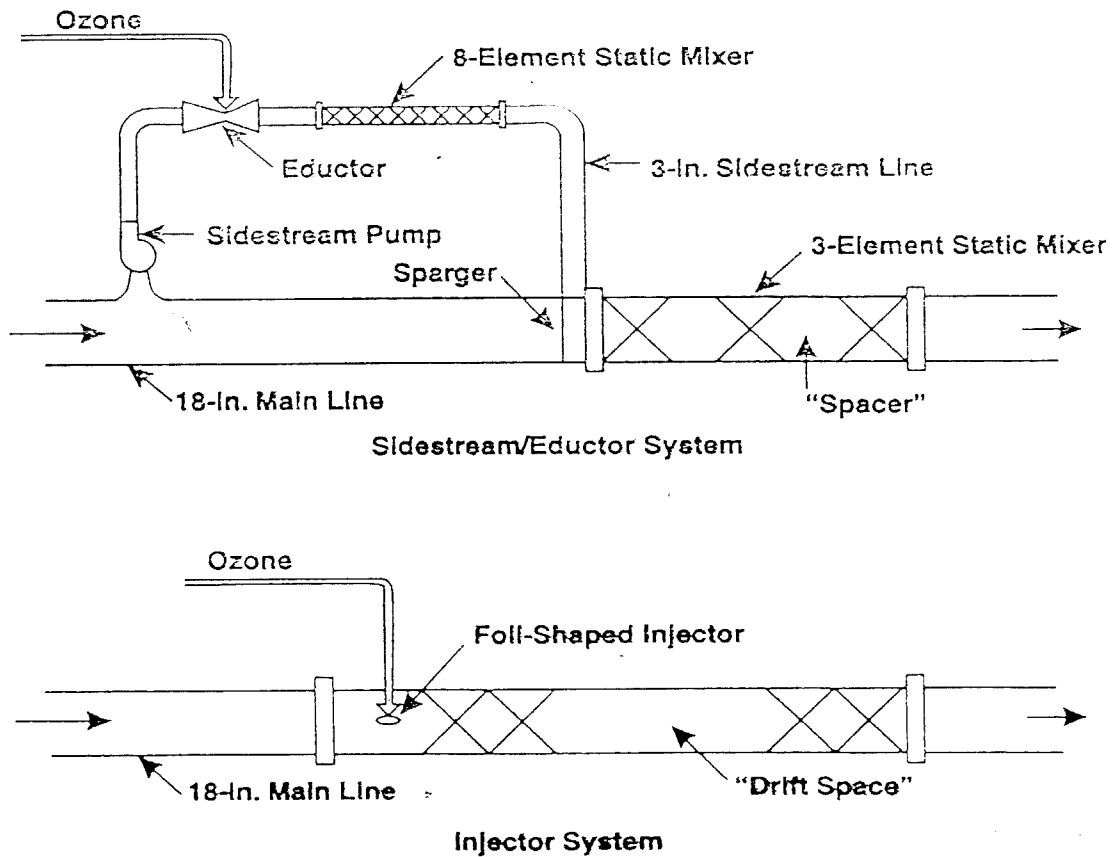


Figure 6.14 Schematic of a gas induction system with in-line static mixer (for high gas-phase ozone concentrations) ( $\text{in.} \times 25.44 = \text{mm}$ ) (James M. Montgomery, 1989)

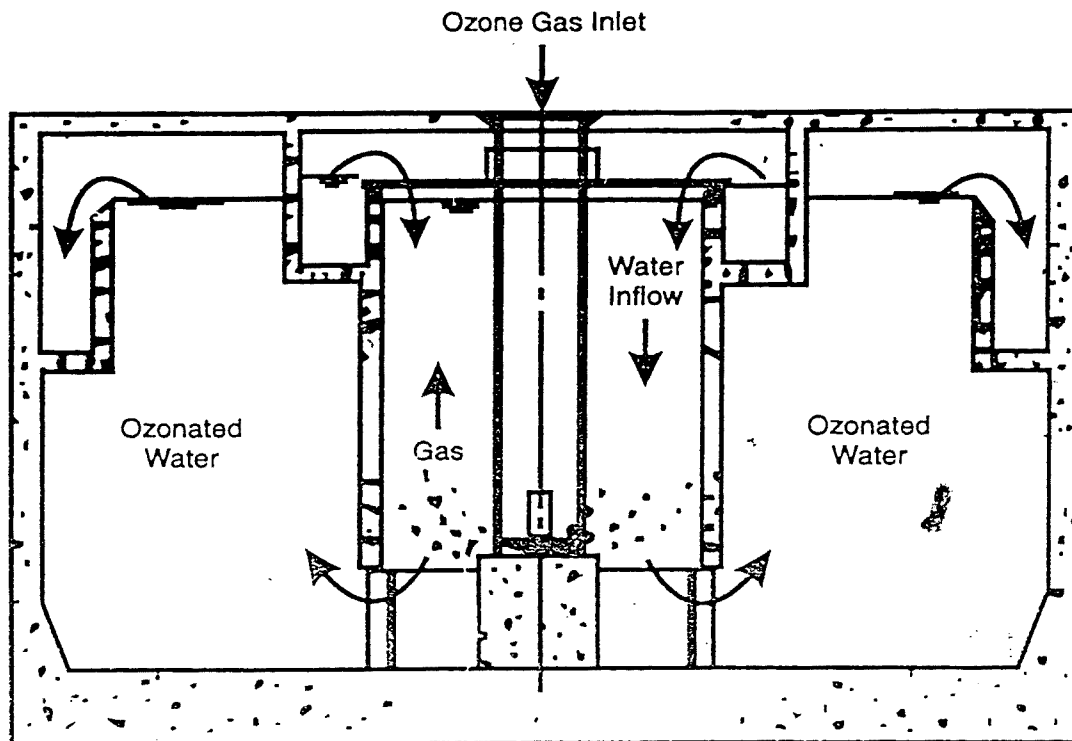


Figure 6.15 Schematic of a submerged turbine mixer ozone contactor (for low through high gas-phase ozone concentrations) (Langlais *et al.*, 1991)

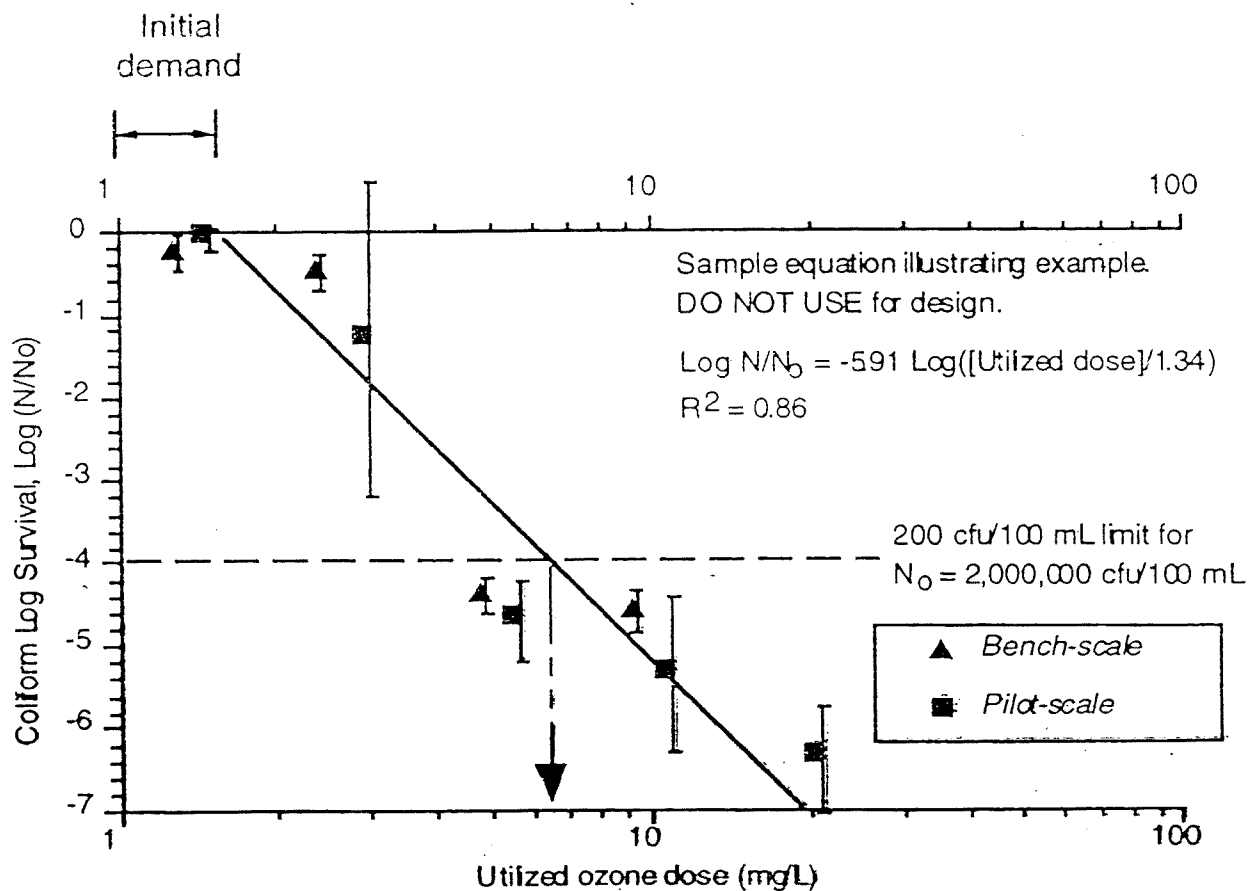


Figure 6.16 Sample dose-response curve for ozone disinfection of *E. coli* in secondary effluent

# การกำจัดความขุ่น

โดย

ผศ. ยุทธนา มหัจฉริยวงศ์

## การกำจัดความขุ่น

โดย ผศ.ยุทธนา มหัจฉริยวงศ์

การกำจัดความขุ่นหรือสารแขวนลอยที่จะกล่าวถึงนี้ประกอบไปด้วย กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) กระบวนการตกตะกอน (Sedimentation) และกระบวนการกรอง (Filtration)

### 1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal Particle) ซึ่งเป็นอนุภาคขนาดเล็กมากและเป็นตัวการที่ทำให้เกิดความขุ่นในน้ำ ตกตะกอนโดยการเติมสารเคมี กระบวนการนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ และขั้นตอนการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด แล้วเกาะติดกันเป็นกลุ่มหรือเป็นฟล็อก (Floc)

#### 1.1 อนุภาคคอลลอยด์

คอลลอยด์เป็นอนุภาคเล็กๆที่แขวนลอยอยู่ในตัวกลาง (dispersion media) ระบบคอลลอยด์จะมีชื่อเรียกต่าง ๆ กันตามสถานะของอนุภาค และสารตัวกลางที่อนุภาคนั้นๆแขวนลอยอยู่ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชื่อระบบคอลลอยด์ชนิดต่างๆ

สถานะของอนุภาค	สถานะของตัวกลาง	ชื่อ
ของเหลว	ของเหลว	อิมัลชัน
ก๊าซ	ของเหลว	ฟอง
ของแข็ง	ก๊าซ	ควัน
ของเหลว	ก๊าซ	หมอก
ของแข็ง	ของเหลว	sol

โดยปกติแล้ว อนุภาคเหล่านี้มีขนาดเล็กมาก ซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าหรือโดยการใช้อุปกรณ์จุลทรรศน์ธรรมดา และอนุภาคที่แขวนลอยเหล่านี้ล้วนแต่เป็นอนุภาคที่มีประจุทั้งสิ้น

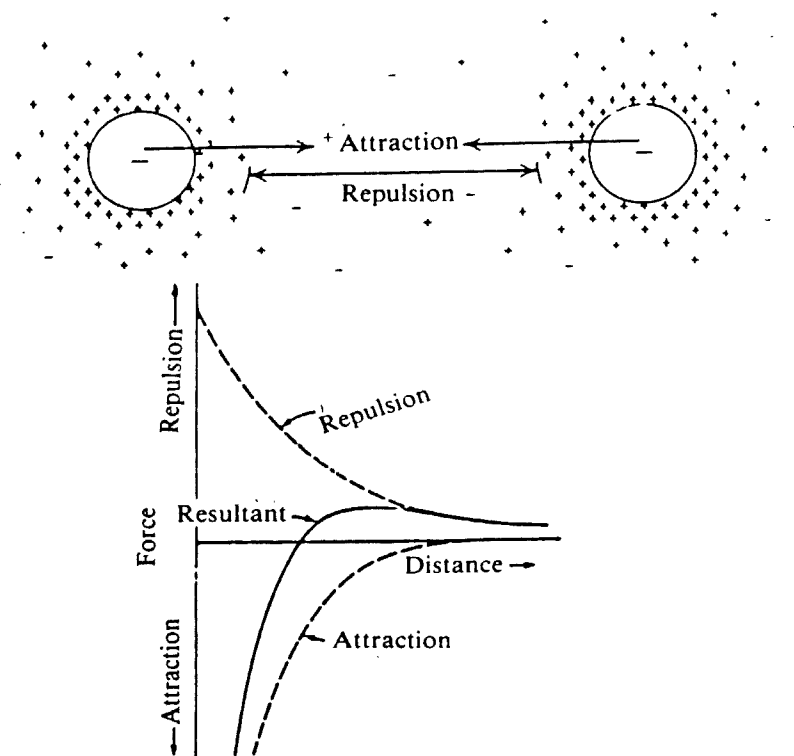
สำหรับระบบคอลลอยด์ที่วิศวกรสิ่งแวดล้อมสนใจก็คือระบบคอลลอยด์ที่มีน้ำเป็นสารตัวกลาง โดยอนุภาคคอลลอยด์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1.1 ประเภทที่ชอบน้ำ (hydrophilic colloids) โดยปกติแล้วอนุภาคประเภทนี้มักมีประจุบวกและกำจัดออกจากน้ำได้ยาก เช่น สบู่ แป้งที่ละลายน้ำ ผงซักฟอก เป็นต้น



1.1.2 ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic colloids) โดยทั่วไปอนุภาคประเภทนี้ มักมีประจุเป็นลบเสถียรภาพของมันจะขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าบนอนุภาคมากกว่าอย่างอื่น อนุภาคเหล่านี้ ได้แก่ คินเหนียว สารอินทรีย์ละลายน้ำบางชนิด เป็นต้น

การที่อนุภาคคอลลอยด์สามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำได้อย่างมีเสถียรภาพก็เนื่องมาจากว่าอนุภาคมีขนาดเล็กมาก จนไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักตัวเองภายในเวลาจำกัด และเนื่องจากแรงผลักรันระหว่างอนุภาคที่เกิดจากประจุไฟฟ้าบนอนุภาคที่เหมือนกัน ในรูปที่ 1 จะเห็นว่าแรงที่กระทำระหว่างอนุภาคทั้งสอง มี 2 แรงด้วยกันคือแรงผลักรันเนื่องจากประจุเหมือนกัน (repulsive force) และแรงคูระหว่างอนุภาค (van der Waals force) ซึ่งมีขนาดขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของอนุภาคและระยะทางระหว่างอนุภาค โดยปกติแล้วแรงผลักรันจะมากกว่าแรงคูจึงเป็นผลให้อนุภาคแยกตัวออกจากกัน และแขวนลอยอยู่อย่างเสถียรภาพ ถ้าต้องการกำจัดเอาอนุภาคเหล่านี้ออกจากน้ำก็ต้องพยายามทำให้อนุภาครวมตัวกันให้มีขนาดใหญ่ขึ้นจนสามารถตกตะกอนได้ แต่ก่อนที่จะทำให้อนุภาครวมตัวกันได้ ต้องทำลายเสถียรภาพของอนุภาคเสียก่อน โดยการเติมสารเคมีลงไป สารเคมีที่เติมลงไปเพื่อช่วยในการตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์นี้เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ และกระบวนการกำจัดอนุภาคดังกล่าวนี้ก็คือ กระบวนการ โคแอกกูเลชัน

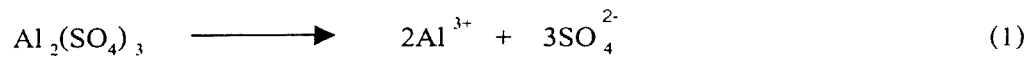


รูปที่ 1 แรงกระทำระหว่างอนุภาคคอลลอยด์

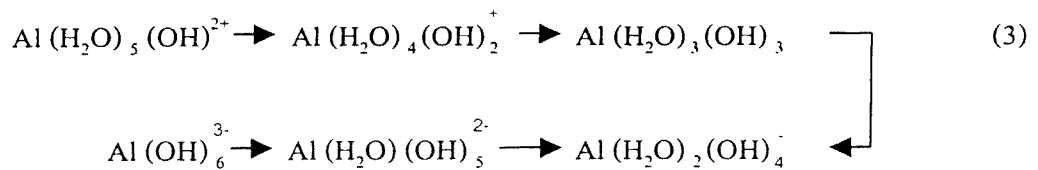
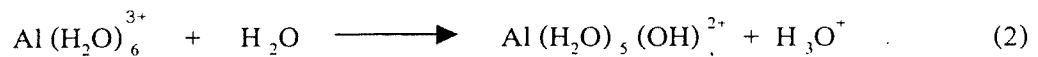
## 1.2 โคแอกกูเลชันด้วยสารส้ม

โคแอกกูเลชันที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ สารส้ม (alum ;  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$  , ) และสารประกอบของเหล็กบางตัว อย่างเช่น เฟอร์ริกคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) และ เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) สำหรับในประเทศไทยนั้นนิยมใช้สารส้มกันมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากสารส้มใช้ได้กับน้ำดิบจากแหล่งน้ำต่างๆ และหาซื้อได้ง่ายในราคาพอสมควร

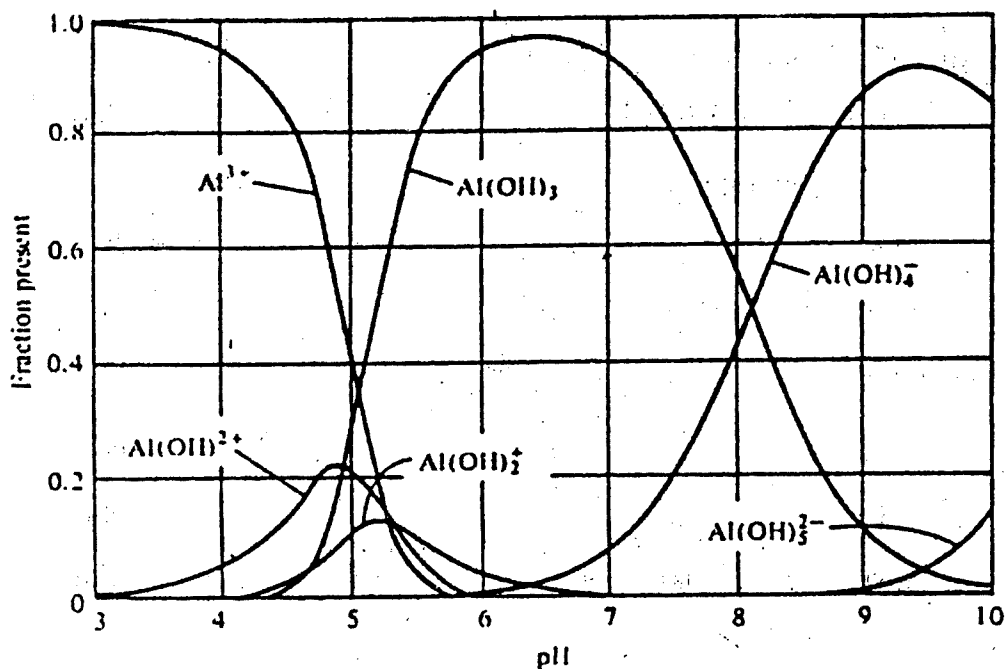
เมื่อสารส้มละลายน้ำมันจะแตกตัวให้อิออนคอมเพลกซ์ของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  (ซึ่งเพื่อความสะดวกอาจจะเขียนให้อยู่ในรูปของ  $\text{Al}^{3+}$  ก็ได้) ดังแสดงในสมการที่ 1



อิออนคอมเพลกซ์ตัวนี้มีฤทธิ์เป็นกรดสามารถที่จะให้  $\text{H}^+$  ได้ ดังนั้นมันจึงพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับน้ำให้อิออนคอมเพลกซ์ต่างๆ ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3

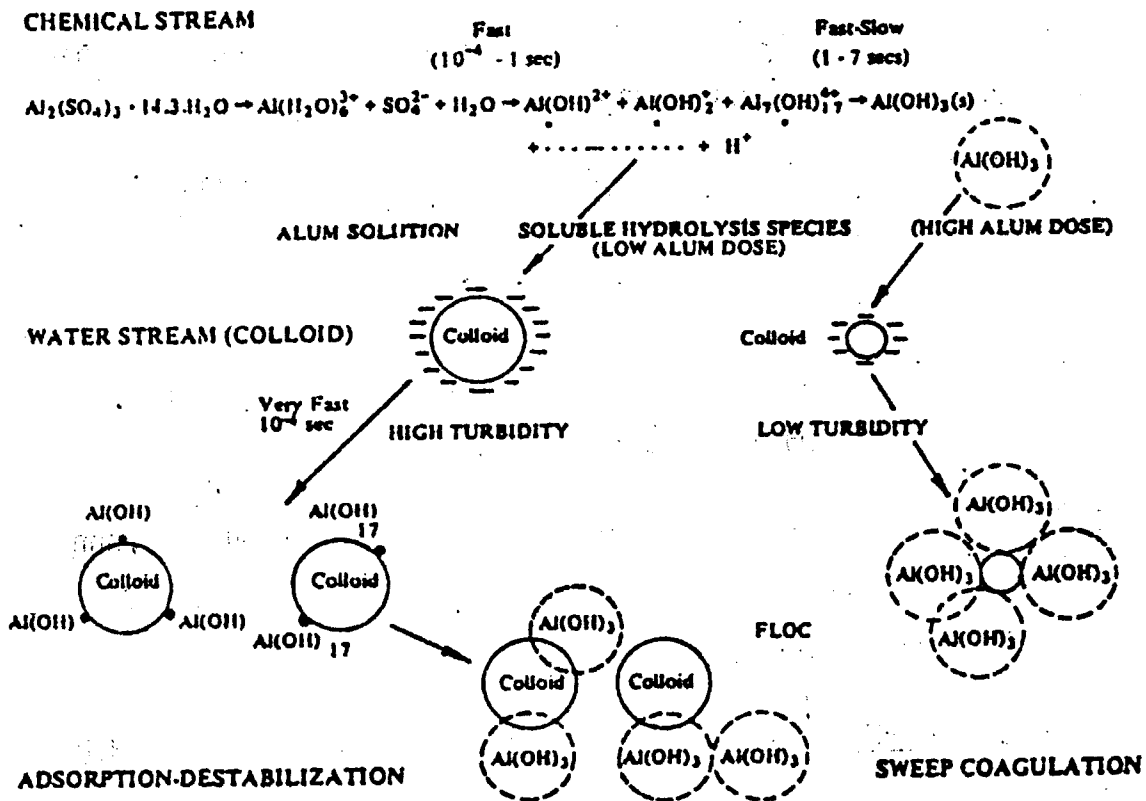


สมการที่ 2 นี้แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสขั้นแรกสุดที่น้ำ 1 โมเลกุลของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  ถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 1 หมู่ ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสนี้สามารถดำเนินต่อไปได้อีกจนกระทั่งโมเลกุลของน้ำถูกแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจนหมด (ดังสมการที่ 3) จะเห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสนั้นจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ กล่าวคือเมื่อน้ำมีพีเอชต่ำ (เป็นกรด) ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสจะเกิดขึ้นได้น้อย อิออนคอมเพลกซ์ที่ปรากฏส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$  เมื่อพีเอชของน้ำสูงขึ้นก็จะได้อิออนคอมเพลกซ์ที่มีประจุบวกลดน้อยลง จนกระทั่งเมื่อพีเอชของน้ำเข้าใกล้ความเป็นกลางจะเกิด  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$  มากกว่าอย่างอื่น และถ้าพีเอชของน้ำสูงขึ้นไปอีกจนเป็นด่างอิออนคอมเพลกซ์ส่วนใหญ่จะเป็นอิออนที่มีประจุลบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 อิทธิพลของพีเอชที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$

สารส้มสามารถทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยกลไกหลัก 2 อย่าง คือ กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ และกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยตะกอนของสารประกอบซึ่งจะเกิดกลไกแบบโคแอกกูเลชันขึ้นอยู่กับปริมาณของสารส้มที่ใช้และพีเอชของน้ำภายหลังจากการเติมสารส้ม สำหรับการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยสารส้มในน้ำตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยตะกอนสารประกอบเป็นกลไกหลัก โดยอาจมีกลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุเป็นกลไกร่วมแต่มีบทบาทน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไอออนคอมเพลกซ์ที่มีประจุบวกต่างๆ จะต้องดูดติดผิวอนุภาคภายใน  $10^{-4}$  - 1 วินาที มิฉะนั้นแล้วไอออนคอมเพลกซ์เหล่านี้จะถูกไฮโดรไลซ์ต่อให้ตะกอน  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$  เกิดเป็นกลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคคอลลอยด์ด้วยตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้กลไกแบบดูดติดผิวและทำลายประจุที่สารส้มสร้างขึ้นจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อปริมาณของสารส้มมีน้อยจนกระทั่งผลคูณของ  $[\text{Al}^{3+}]$  และ  $[\text{OH}^-]^3$  ต่ำกว่าค่า  $K_{sp}$  ของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  และพีเอชต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไป จึงเป็นเหตุให้การออกแบบและการควบคุมให้โคแอกกูเลชันเกิดขึ้นโดยกลไกแบบนี้ในทางปฏิบัติไม่สามารถกระทำได้ เพราะการสัมผัสระหว่างไอออนคอมเพลกซ์ที่มีประจุบวกต่างๆกับอนุภาคคอลลอยด์ยากที่จะทำให้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา  $10^{-4}$  - 1 วินาทีและความสามารถในการละลายของ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ก็อยู่ในระดับต่ำด้วย



รูปที่ 3 กลไกในการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ที่สร้างขึ้นโดยสารส้ม

### 1.3 การเลือกใช้สารโคแอกกูแลนต์

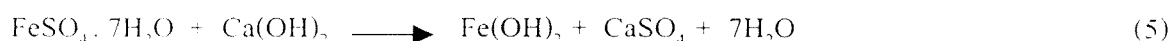
โคแอกกูแลนต์ที่นิยมใช้กันมากที่สุดได้แก่ สารส้ม รองลงมาได้แก่สารประกอบของเหล็ก เช่น เฟอร์ริกคลอไรด์นั้น ยังมีสารเคมีอีกประเภทหนึ่งที่สามารถใช้เป็นโคแอกกูแลนต์ได้อีกคือ โพลีเมอร์ แต่เนื่องจากว่าโพลีเมอร์มีราคาต่อหน่วยน้ำหนักแพงกว่าสารส้มหรือโคแอกกูแลนต์อื่นๆ เป็นอันมาก ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้สารดังกล่าวเป็นตัวช่วยเหลือหรือสนับสนุนโคแอกกูแลนต์อื่นในการทำโคแอกกูแลชั่น สารเคมีที่ใช้เป็นตัวช่วยทำให้โคแอกกูแลนต์ทำงานมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นนี้เรียกว่าโคแอกกูแลนต์เอ็ด ซึ่งนอกจากโพลีเมอร์แล้วยังมีสารอย่างอื่นๆ อีกเช่น แอ็คติเวตเต็ดชิลิกา ดินเหนียว ฯลฯ การใช้โคแอกกูแลนต์เอ็ดมักนิยมกระทำในกรณีที่น้ำมีความขุ่นสูงมากเพื่อช่วยประหัดโคแอกกูแลนต์หรือใช้ในกรณีที่น้ำมีความขุ่นน้อยเกินไปเพื่อช่วยในการสร้างเป่าส้มผัส

การเลือกใช้โคแอกกูแลนต์และความจำเป็นในการเติมโคแอกกูแลนต์เอ็ดนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำดิบเป็นสำคัญ สำหรับการเลือกใช้โคแอกกูแลนต์ในการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำสามารถที่จะจำแนกตามประเภทของน้ำดิบได้ดังนี้

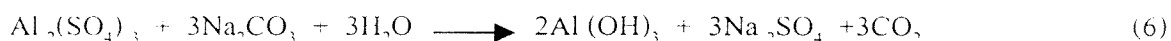
1.3.1 น้ำที่มีความขุ่นมากและมีความเป็นด่างสูง น้ำประเภทนี้เกิดโคแอกกูเลชันได้ง่าย ดังนั้นโคแอกกูเลชันสามารถที่จะกระทำได้โดยใช้สารส้มหรือเฟอร์ริกคลอไรด์หรือโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ โดยไม่จำเป็นต้องใช้โคแอกกูแลนท์เอคหรือสารต่างๆ

1.3.2 น้ำที่มีความขุ่นสูงแต่มีความเป็นด่างต่ำ ในกรณีนี้โพลีเมอร์อาจใช้เป็นโคแอกกูแลนท์ได้ดี หรืออาจใช้สารส้มและสารประกอบเหล็กได้แต่จำเป็นต้องเพิ่มความเป็นด่างให้กับน้ำโดยการใช้สารด่าง ทั้งนี้เนื่องจากสารส้มและสารประกอบเหล็ก เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะให้  $H^+$  ออกมา เมื่อน้ำมีความเป็นด่างต่ำมันจึงมีบัฟเฟอร์ไม่พอเพียงที่จะรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการโคแอกกูเลชันได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารด่างลงไปเพื่อป้องกันมิให้พีเอชของน้ำลดต่ำลงจนเกิดโคแอกกูเลชันไม่สมบูรณ์

สารด่างที่นิยมใช้คือปูนขาว เนื่องจากว่าปูนขาวมีราคาถูก แต่การใช้ปูนขาวร่วมกับสารส้มหรือสารประกอบเหล็กมีข้อเสียคือ มันจะทำให้เกิดความกระด้างถาวรคือ  $CaSO_4$  ขึ้นในน้ำ ดังตัวอย่างที่แสดงในสมการที่ 4 และ 5



เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดความกระด้างถาวรในน้ำอาจเลือกใช้สารด่างอื่นแทนปูนขาว เช่น  $Na_2CO_3$  ดังแสดงในสมการที่ 6 แต่เนื่องจากมีราคาแพง การใช้สารดังกล่าวจึงมีข้อจำกัด



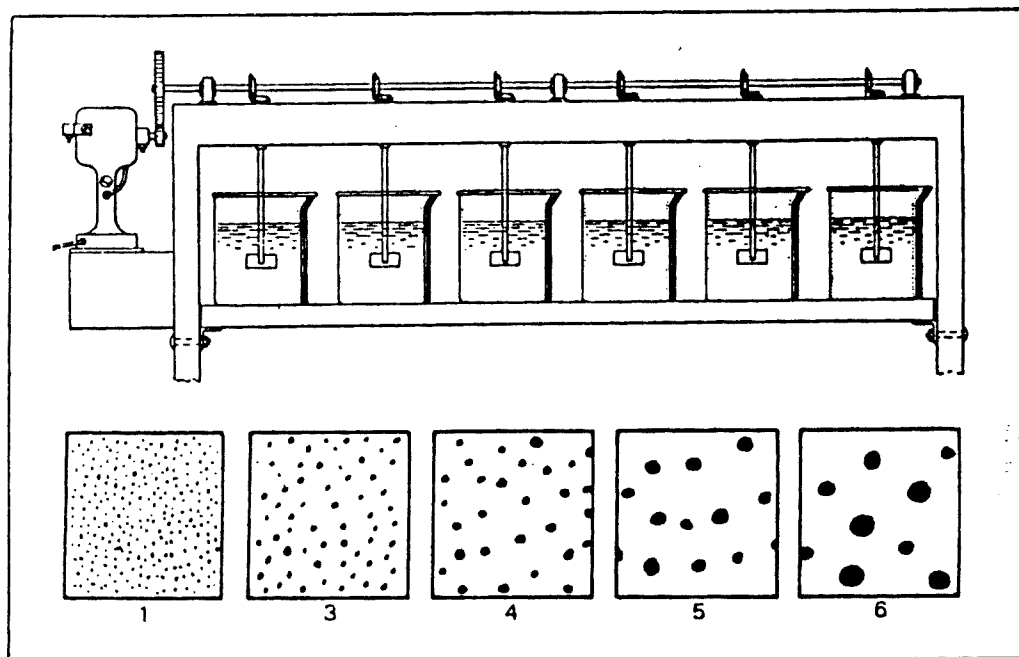
1.3.3 น้ำที่มีความขุ่นต่ำแต่มีความเป็นด่างสูง สำหรับการทำให้โคแอกกูเลชันของน้ำชนิดนี้ควรมีการเติมโคแอกกูแลนท์เอคก่อนการเติมโคแอกกูแลนท์เพื่อเพิ่มเป่าสัมผัส โคแอกกูแลนท์เอคที่ใช้ อาจจะเป็น ผงดินเหนียว เช่น kaolite หรือ bentonite หรืออาจใช้แอสติเวตซิลิกาก็ได้ ถ้าหากไม่ใช้โคแอกกูแลนท์เอค อาจใช้สารส้มหรือสารประกอบเหล็กเป็นโคแอกกูแลนท์ แต่ต้องใช้ ในปริมาณที่ค่อนข้างสูงเพื่อสร้างตะกอน  $Al(H_2O)_3(OH)_3$  หรือ  $Fe(H_2O)_3(OH)_3$  ให้เป็นเป่าสัมผัส

1.3.4 น้ำที่มีความขุ่นและความเป็นด่างสูง น้ำแบบนี้สร้างโคแอกกูเลชันได้ยากที่สุดและการใช้โคแอกกูแลนท์อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงลำพังจะไม่ให้ผลดีเลย เนื่องจากว่าน้ำมีเป่าสัมผัสน้อยเกินไป นอกจากนี้การใช้สารส้มหรือสารประกอบเหล็กเพียงลำพังก็จะทำให้พีเอชของน้ำลดต่ำลง

อย่างมากจนอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการสร้างโคแอกกูเลชัน ดังนั้นการทำโคแอกกูเลชันในน้ำประเพณีนี้ด้วยสารส้มหรือสารประกอบเหล็กจึงควรเริ่มต้นจากการเติมสารต่างเพื่อเพิ่มบัฟเฟอร์ให้กับน้ำและ/หรือเติมโคแอกกูแลนท์แอดเพื่อช่วยเพิ่มเป้าสัมผัส จากนั้นจึงเติมโคแอกกูแลนท์

#### 1.4 การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชัน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นมีมากมาย เช่น คุณภาพของน้ำ ปริมาณและชนิดของอนุภาคคอลลอยด์ในน้ำ พีเอชและอุณหภูมิของน้ำ ความเร็วและระยะเวลาในการกวนน้ำ ดังนั้นการควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันจึงมีจุดหมายที่จะควบคุมปริมาณของโคแอกกูแลนท์และระดับพีเอชของน้ำให้เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดโคแอกกูเลชันที่ดีที่สุด การควบคุมกระบวนการโคแอกกูเลชันนั้นสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีจาร์เทสต์ และวิธีวัดซีตาโพเทนเชียล สำหรับวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดและใช้กันมานานแล้วคือวิธีจาร์เทสต์ ดังรูปที่ 4

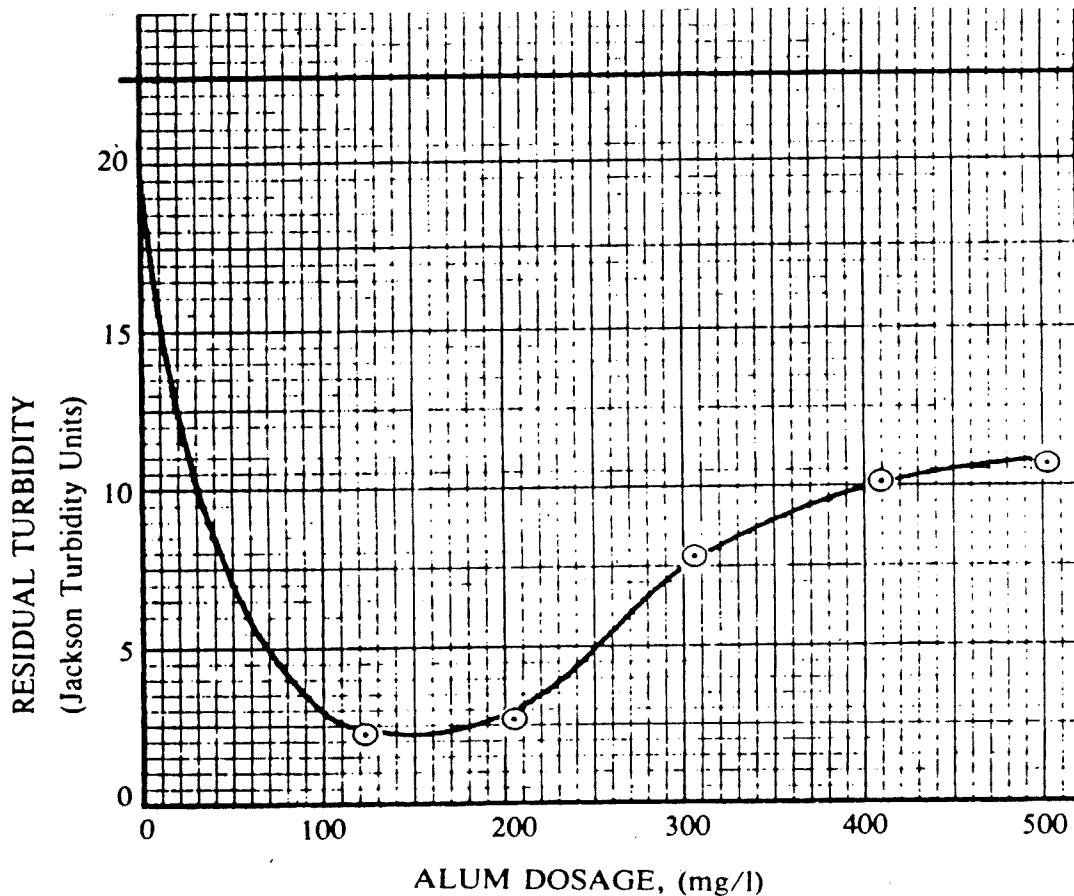


รูปที่ 4 การทดลอง จาร์เทสต์ (Jar Test)

ขั้นตอนต่างๆในการทำจาร์เทสต์ มีดังนี้คือ

- วิเคราะห์ลักษณะของน้ำดิบ โดยเฉพาะ พีเอชและความขุ่น อาจทำการวิเคราะห์สีและความเป็นด่างด้วยก็แล้วแต่ความจำเป็น

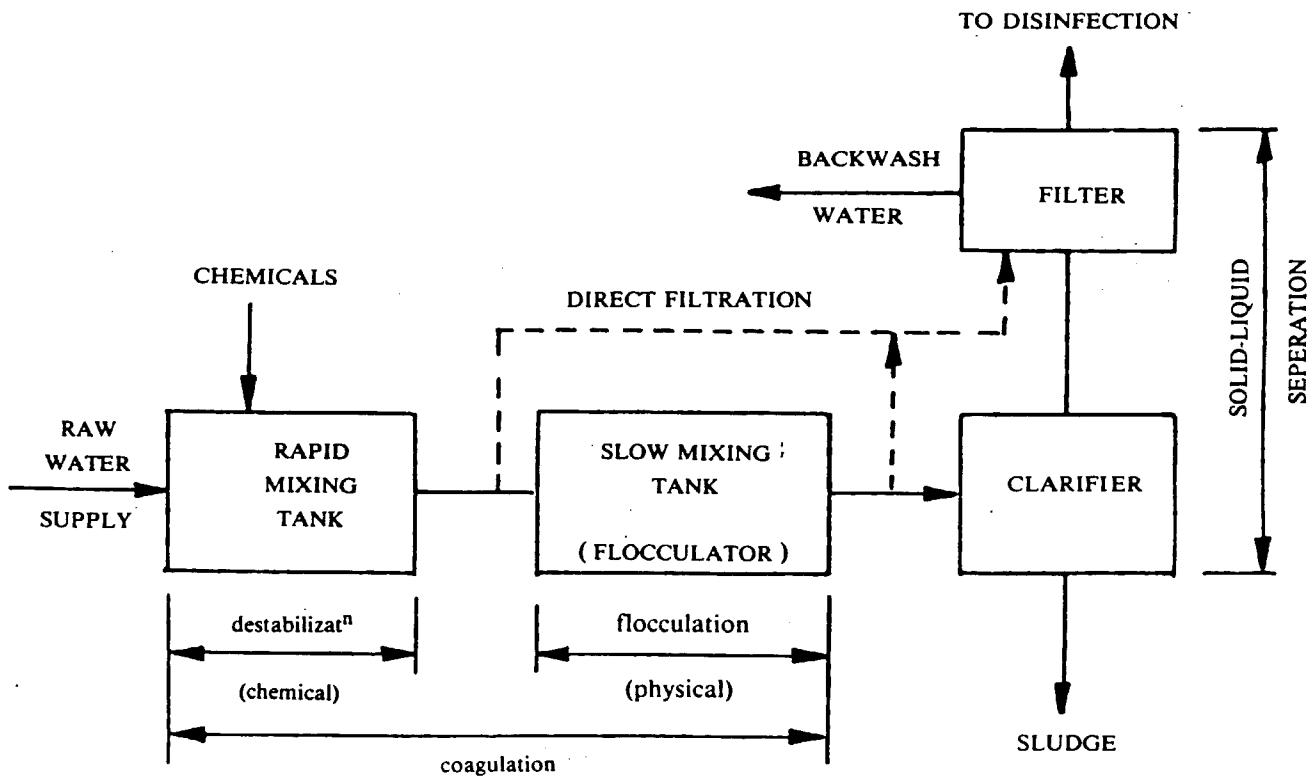
- เติมน้ำตัวอย่างลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ในปริมาณที่เท่ากัน แล้วเติมโคแอกกูแลนทีพร้อมกับกวนเร็วด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที
- กวนช้าด้วยความเร็ว 30 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที
- จดบันทึกเวลาที่เริ่มมีฟล็อกปรากฏให้เห็น
- ปิดเครื่องกวนแล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 นาที
- ใช้ปิเปตดูดเอาน้ำใสออก แล้วนำไปวิเคราะห์ลักษณะเช่นเดียวกันกับน้ำดิบ
- นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความขุ่นกับปริมาณโคแอกกูแลนที หรือความขุ่นกับพีเอชของน้ำ แล้วแต่จุดหมายของการทำจาร์เทสต์นั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 แล้วอ่านผลที่ได้จากกราฟโดยที่โคแอกกูแลนทีเกิดได้ดีที่สุดเมื่อน้ำมีความขุ่นเหลือน้อยที่สุด



รูปที่ 5 ผลการทดลองของการทำจาร์เทสต์

### 1.5 ส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

กระบวนการโคแอกกูเลชันมีส่วนประกอบสำคัญ 2 อย่าง คือ ถังกวนเร็วและถังกวนช้า ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของกระบวนการโคแอกกูเลชัน

### 1.6 ถังกวนเร็ว

ถังกวนเร็วมีหน้าที่ในการกระจายโคแอกกูแลนต์ไปให้ส่วนต่างๆของน้ำอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ โคแอกกูแลนต์สัมผัสกับอนุภาคคอลลอยด์มากที่สุดและเร็วที่สุด หรือเพื่อให้การทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วที่สุดและสมบูรณ์ที่สุด

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ที่เกิดขึ้นในถังกวนเร็ว มีดังนี้คือ

- ความเร็วเกรเดียนท์ (velocity gradient) ความเร็วเกรเดียนท์นี้แสดงให้เห็นถึงระดับความปั่นป่วนของน้ำ น้ำในถังกวนเร็วจะต้องมีระดับความปั่นป่วนสูงเพื่อให้การผสมกันระหว่าง



สารเคมีกับน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและพร้อมๆกันทุกจุด และโดยปกติแล้วความเร็วแกระเดียนท์ของน้ำในถังกวนเร็วจะมีค่าไม่ต่ำกว่า 300 ต่อวินาที

- เวลาสัมผัสระหว่างอนุภาคคอลลอยด์และสารเคมีหรือเวลาผสม เนื่องจากการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก ดังนั้นถังกวนเร็วจึงต้องการเวลาผสมเพียง 1 นาทีหรือน้อยกว่า และในทางปฏิบัติมักถือว่าเวลาผสมเป็นเวลาที่น้ำอาศัยอยู่ในถังกวนเร็ว ซึ่งหมายถึงเวลากักน้ำนั่นเอง

สำหรับพลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำนั้นสามารถที่จะคำนวณหาได้จากสมการของแคมท์และสไตน์ดังนี้

$$G = \left( \frac{P}{\rho V} \right)^{1/2} \quad (7)$$

เมื่อ  $G$  = ความเร็วแกระเดียนท์ , ต่อวินาที  
 $P$  = พลังงานที่ใช้ในการสร้างความปั่นป่วน , ฟุต - ปอนด์ต่อวินาที  
 $\rho$  = ความหนืดของน้ำ , ปอนด์ - วินาทีต่อตารางฟุต  
 $V$  = ปริมาตรของน้ำในถังกวนเร็ว , ลูกบาศก์ฟุต

ปริมาตรของถังกวนเร็ว ;  $V$  นี้สามารถคำนวณหาได้จากผลคูณของอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังกวนเร็ว ;  $F$  กับเวลากักน้ำ ;  $T$  ดังแสดงในสมการที่ 8

$$V = F \cdot T \quad (8)$$

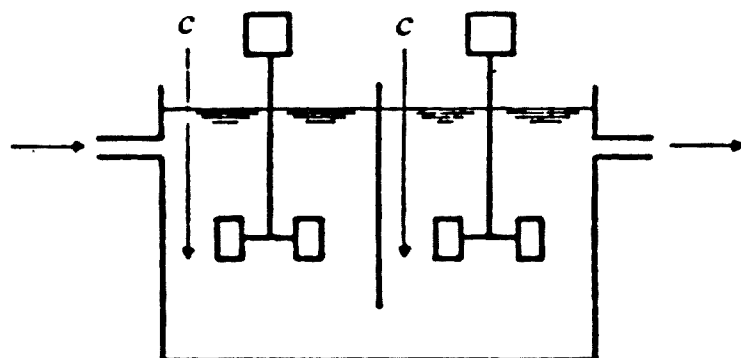
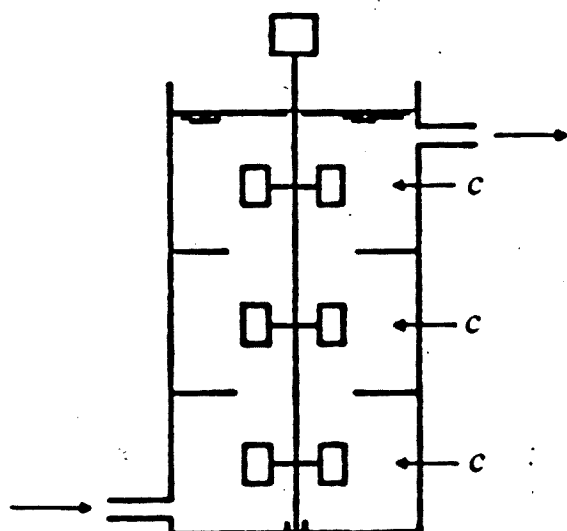
และถ้าโคแอกกูแลนท์ที่ใช้เป็นสารส้ม ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแกระเดียนท์ เวลากวนน้ำที่เหมาะสม ;  $T_{opt}$  และปริมาณของสารส้มที่เหมาะสม ;  $C$  อาจแทนได้ด้วยสมการที่ 9

$$G \cdot T_{opt} \cdot C^{1.46} = 5.9 \times 10^6 \quad (9)$$

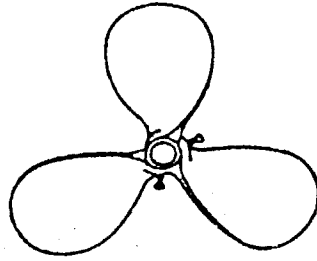
ในกรณีที่ต้องการเติมสารเคมีหลายชนิดและเติมพร้อมกันไม่ได้ ถังกวนเร็วก็จะมีมากกว่าหนึ่งใบและคอกันอย่างอนุกรม ดังตัวอย่างในรูปที่ 7 ถังกวนเร็วที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายแบบดังนี้คือ

1.6.1 ถังกวนเร็วแบบที่ใช้ใบพัดกวนน้ำ ถังกวนเร็วแบบนี้เป็นถังที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ข้อดีของถังชนิดนี้คือ มีประสิทธิภาพสูง สูญเสียเสดค่าและรับความแปรปรวนของอัตราการไหลของน้ำได้ สำหรับใบพัดที่ใช้กับถังกวนเร็วนี้มีหลายแบบ เช่น แบบพัดลม แบบเทอร์

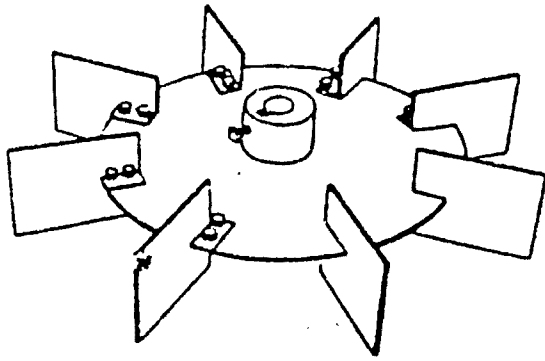
ไบน์ และแบบใบพายหรือใบแบน ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับลักษณะทั่วไปของถังกวนเร็วและการวางตำแหน่งของใบพัดนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 9



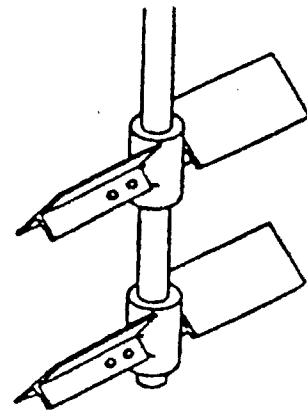
รูปที่ 7 ถังกวนเร็วแบบหลายใบที่ต่อกันอย่างอนุกรม



ก



ข



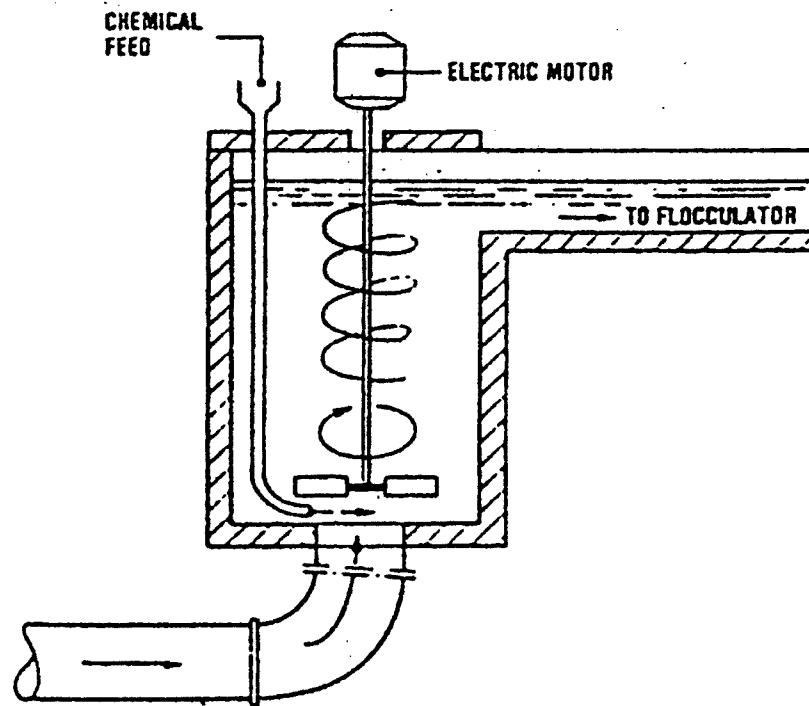
ค

รูปที่ 8 ใบพัดแบบต่างๆที่ใช้ในการกวนน้ำในถังกวนเร็ว

ก. แบบพัดลม (propeller)

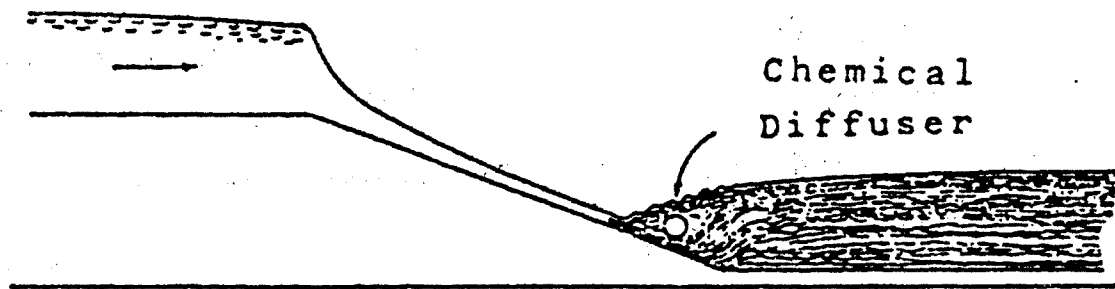
ข. แบบเทอร์ไบน์ (turbine)

ค. แบบใบพาย (paddle)



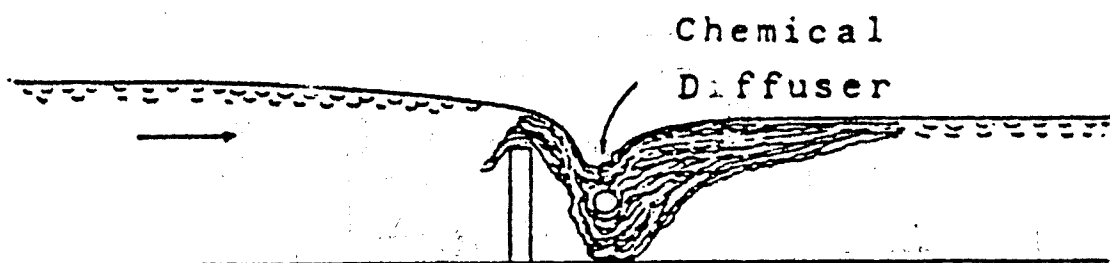
รูปที่ 9 ลักษณะทั่วไปของถังกวนเร็วแบบใช้ใบพัด

1.6.2 ถังกวนเร็วแบบ Hydraulic jump การใช้ hydraulic jump เพื่อกวนน้ำนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในยุโรปซึ่งมักออกแบบให้มี parshall flume อยู่หน้าการกวนเร็ว สารเคมีจะไหลเข้าทางด้านเหนือน้ำโดยให้มีเวลาผสมประมาณ 2 วินาที และมีความเร็วเกรเดียนต์ประมาณ 800 ต่อวินาที โดยปกติการกวนน้ำแบบนี้จะสูญเสียเฮดประมาณ 1 ฟุต หรือมากกว่า แต่มีข้อดีคือไม่ต้องใช้เครื่องกลใดๆ สำหรับกวนน้ำเลย ถังกวนเร็วชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ถังกวนเร็วแบบ hydraulic jump

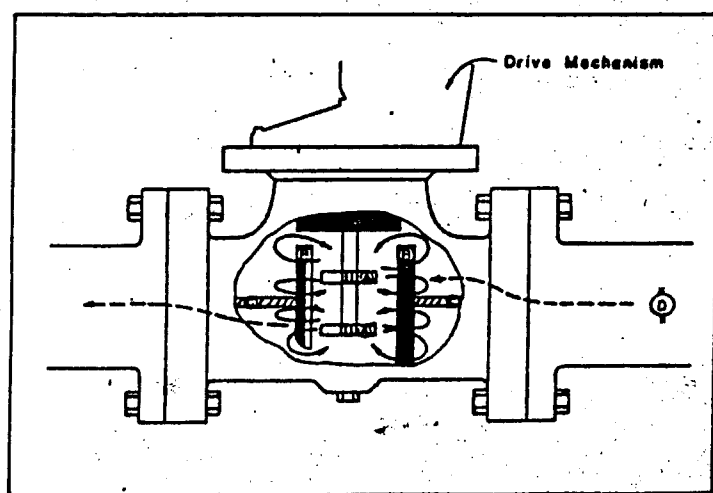
1.6.3 ถังกวนเร็วแบบใช้เวียร์ มีหลักการในการกวนน้ำคล้ายกับแบบ hydraulic jump เพียงแต่ใช้เวียร์ก้นให้น้ำไหลล้นแทน ดังแสดงในรูปที่ 11



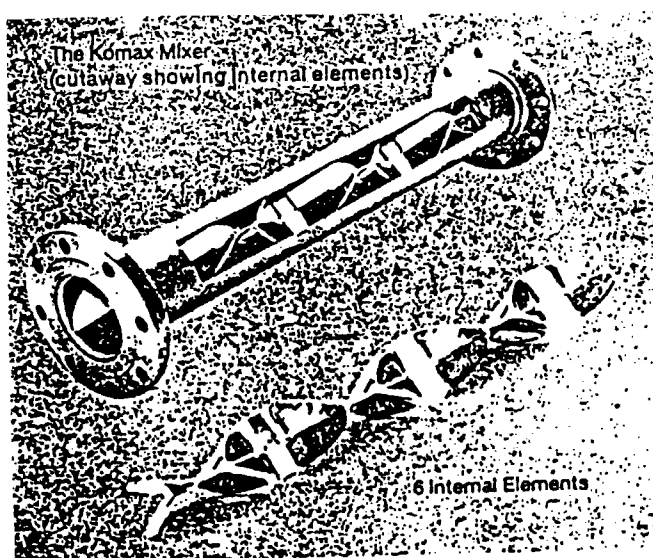
รูปที่ 11 ถังกวนแบบใช้เวียร์

1.6.4 ระบบกวนน้ำสมัยใหม่ ปัจจุบันมีอุปกรณ์ใหม่ๆหลายชนิดที่สามารถสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำได้ดีเช่นเดียวกับของเก่าอย่างอื่นเช่น เครื่องบดในท่อ (in-line blender) และ เครื่องกวนน้ำในเส้นท่อ (static mixer) อุปกรณ์ดังกล่าวมีข้อดีคือมีขนาดเล็กกระทัดรัดจนสามารถติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของท่อส่งน้ำได้ สำหรับเครื่องบดในท่อนั้นเป็นเครื่องกวนขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งอยู่ในท่อส่งน้ำดิบได้ดังแสดงในรูปที่ 12 เครื่องกวนแบบนี้มีรอบหมุนจัดมากโดยจะให้น้ำมีความเร็วแรงแยงที่ประมาณ 3000 - 5000 ต่อวินาที ดังนั้นการผสมกันระหว่างสารเคมีกับน้ำจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

โดยต้องการเวลาสัมผัสประมาณ 0.5 วินาที เท่านั้น เครื่องบดเช่นนี้ต้องการพลังงานประมาณ 0.5 แรงม้าต่ออัตราการไหลของน้ำทุกๆ 1 ล้านแกลลอนต่อวัน และมีการสูญเสียเฮดอยู่ในช่วง 1-3 ฟุต ส่วนเครื่องกวนในท่อนั้นมีลักษณะพิเศษคือ ไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเลยเนื่องจากไม่มีส่วนใดของอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว ใบพัดซึ่งบิดเป็นเกลียวจะติดตายตัวอยู่ในท่อท่อนสั้น ดังแสดงในรูปที่ 13 อุปกรณ์แบบนี้สามารถนำไปต่อเข้ากับท่อส่งน้ำดิบได้ การกวนน้ำจะเกิดขึ้นเมื่อน้ำดิบไหลผ่านใบพัดในท่อ

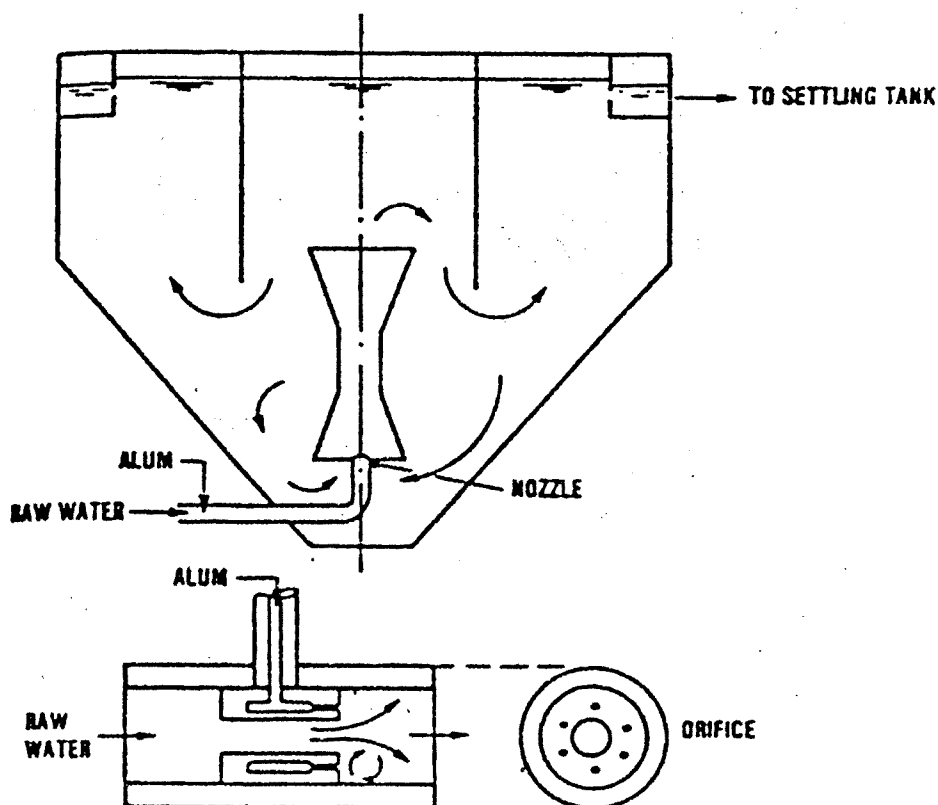


รูปที่ 12 อุปกรณ์กวนเร็วแบบเครื่องบด (in - line blender)



รูปที่ 13 อุปกรณ์กวนเร็วแบบเครื่องกวน (static mixer)

นอกจากนี้การกวนเร็วอาจออกแบบให้เกิดขึ้นภายในท่อส่งน้ำโดยใช้ orifice หรือ venturi tube และฉีดสารเคมีเข้าไปในบริเวณที่ปั่นป่วน ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 การกวนเร็วโดยการสร้างความเป็นป่วนในท่อด้วยการติดตั้ง orifice

### 1.7 ถังกวนช้า

ถังกวนช้านี้มีหน้าที่สร้างโอกาสสัมผัสให้กับอนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเพื่อทำให้อนุภาคดังกล่าวรวมตัวกันจนเป็นกลุ่มก้อนหรือเป็นฟล็อกนั่นเอง ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฟล็อกคูเลชันแบบนี้จึงเหมือนกับปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ในถังกวนเร็ว นั่นก็คือ ความเร็วแรงแเดียนท์ และเวลาสัมผัสหรือเวลารวมตะกอน ความเร็วแรงแเดียนท์ในถังกวนช้ามักมีค่าต่ำคือไม่เกิน 60-100 ต่อวินาที ส่วนเวลารวมตะกอนนั้นมักจะนานและควรมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 นาที สำหรับความสัมพันธ์ของความเร็วแรงแเดียนท์ที่เหมาะสมกับเวลารวมตะกอนนั้นสามารถแสดงได้โดยใช้สมการที่ 10

$$(G^*)^{2.8} T = K \quad (10)$$

- เมื่อ  $G^*$  = ระดับความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสม, ต่อวินาที  
 $T$  = เวลารวมตะกอนซึ่งเท่ากับเวลากักน้ำของถังกวนช้า, นาที  
 $K$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโคแอกกูแลนท์ที่ใช้

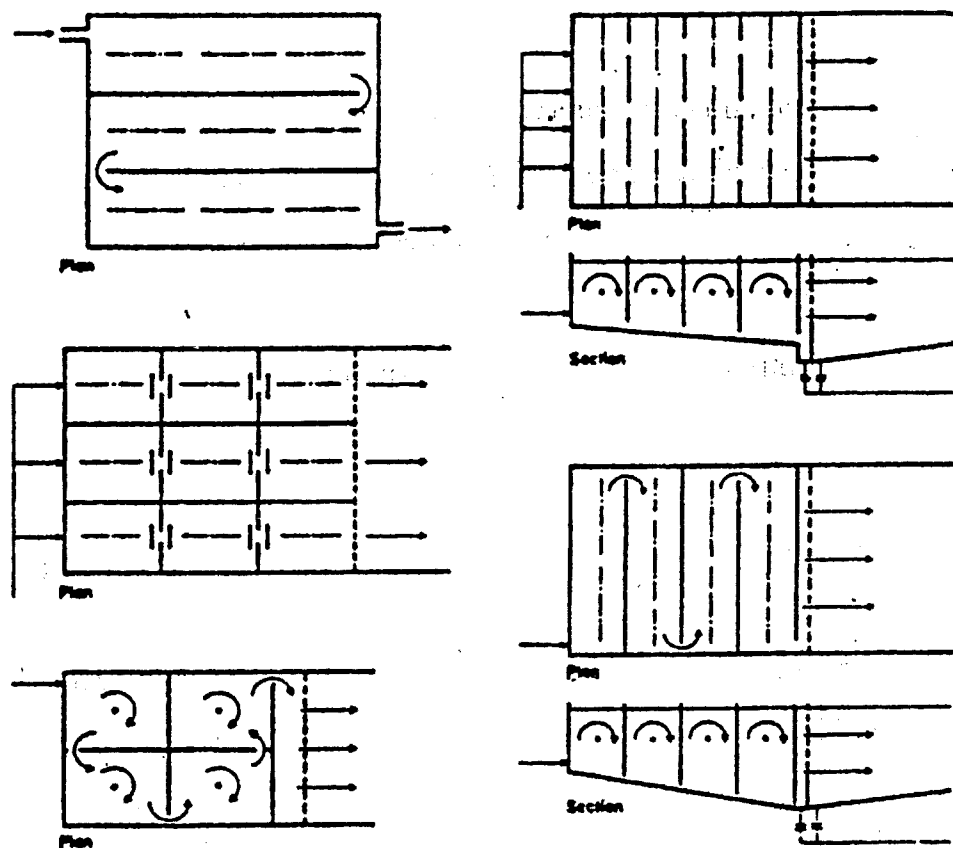
และในกรณีที่ใช้สารส้มเป็นโคแอกกูแลนท์ในปริมาณที่ไม่เกินกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการที่ 10 จะเป็นดังนี้

$$(G^*)^{2.8} T = 44 \times 10^5 / C \quad (11)$$

เมื่อ  $C$  = ความเข้มข้นของสารส้มที่อยู่ในช่วง 0 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมนั้นหมายถึงความเร็วแกรเดียนท์ที่ทำให้เกิดฟล็อกูเลชันที่ดีที่สุด กล่าวคือภายหลังจากการตกตะกอน น้ำจะมีความขุ่นเหลืออยู่น้อยที่สุด ความเร็วแกรเดียนท์ที่เหมาะสมดังกล่าวควรมีค่าอยู่ในช่วง 20 – 50 ต่อวินาที

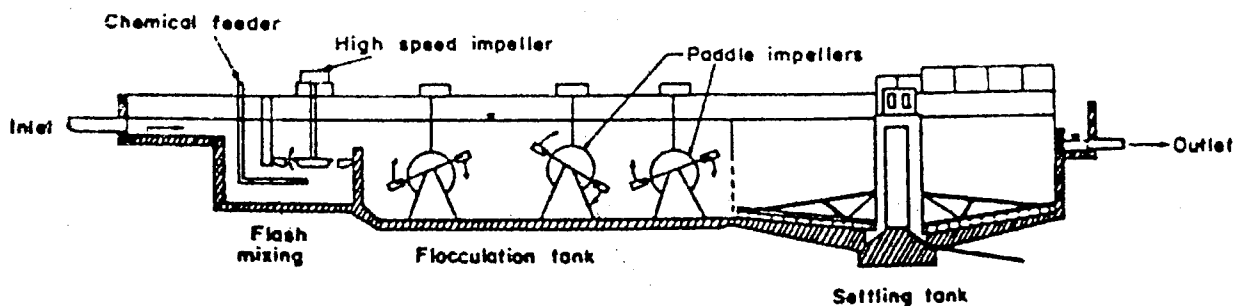
สิ่งสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบถังกวนช้า คือการจัดผังเพื่อวางตำแหน่งของถังกวนช้าให้เหมาะสมเพื่อให้ฟล็อกที่ออกจากถังกวนช้าเข้าสู่ถังตกตะกอนอยู่ในสภาพดีเหมือนเดิม วิศวกรจะต้องมีความระมัดระวังในการออกแบบทางเชื่อมระหว่างถังกวนช้าและถังตกตะกอนเพื่อให้ความปั่นป่วนภายในทางเชื่อมไม่น้อยเกินไปจนเกิดการตกตะกอนและไม่มากจนฟล็อกแตก วิธีที่ดีที่สุด ในทางปฏิบัติก็คือการออกแบบให้ถังกวนช้าและถังตกตะกอนมีโครงสร้างร่วมกัน และต่อถึงกันโดยใช้แผ่นกั้นน้ำดังแสดงในรูปที่ 15 และ 16 การออกแบบถังกวนช้าดังกล่าวจะทำให้ น้ำไหลออกจากถังกวนช้าและเข้าถังตกตะกอนได้โดยมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางชลศาสตร์น้อยที่สุด





Arrows represent the path of water flow. The easiest way to manage flocculated water is to build the flocculator and settling basin integrally, with a permeable baffle discharging the flocculated water into the basin to assure uniform horizontal and vertical distribution of settling basin inlet flow.

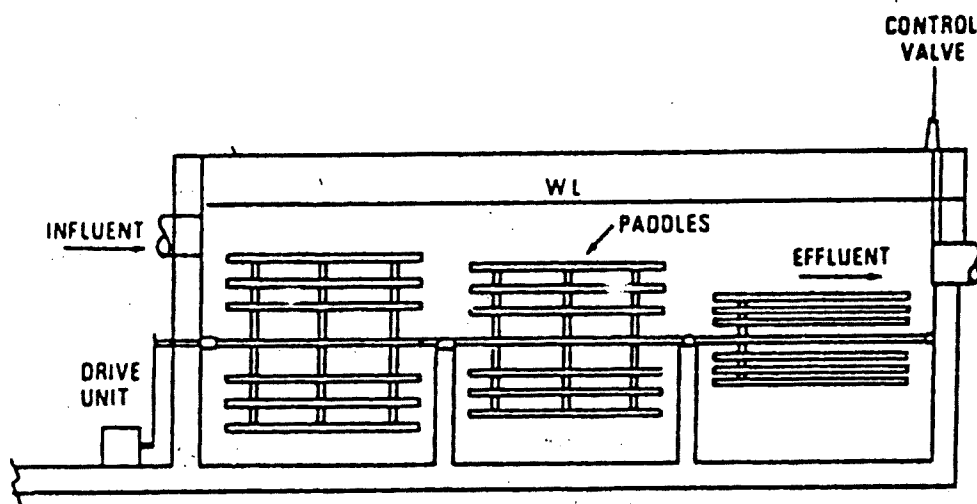
รูปที่ 15 การออกแบบถังกวนช้าและถังตกตะกอนให้อยู่ในถังเดียวกัน



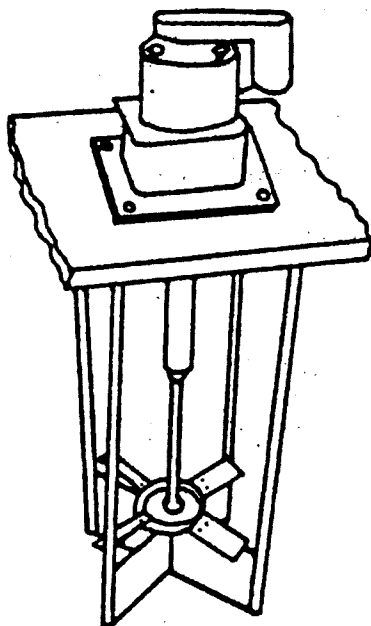
รูปที่ 16 ถังกวนช้าและถังตกตะกอนที่มีโครงสร้างร่วมกันและต่อกันโดยใช้แผ่นกั้นน้ำ

ถังกวนช้าที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ คือ

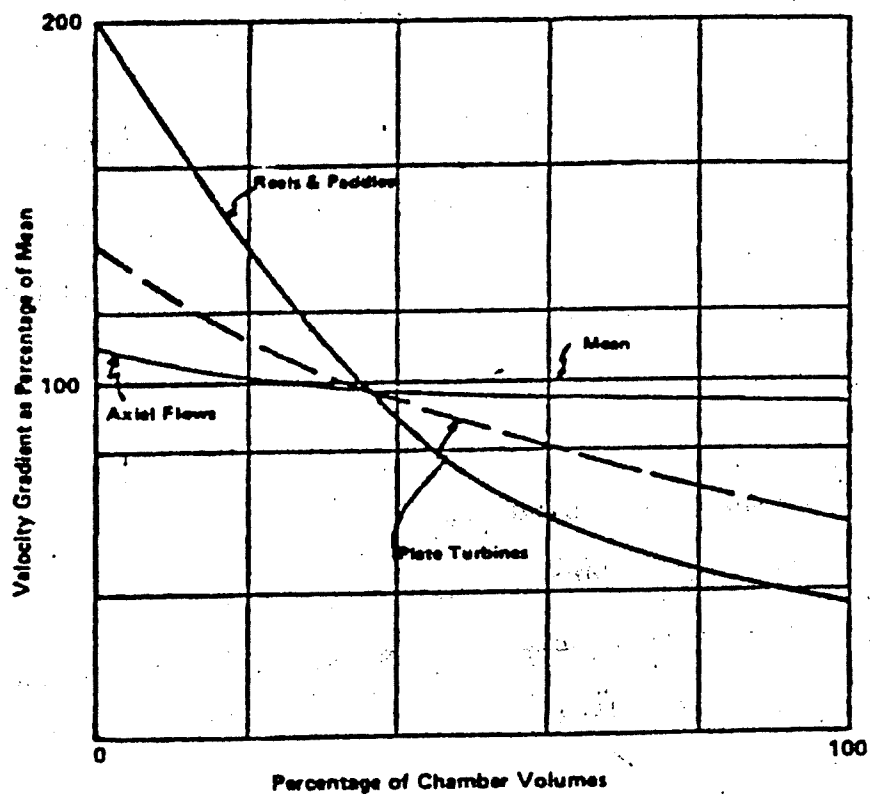
1.7.1 ถังกวนช้าแบบใช้ใบพัด ถังกวนช้าแบบนี้ใช้อุปกรณ์กวนน้ำเป็นใบพัดซึ่งมี 3 แบบคือ แบบใบพาย (paddle) แบบเทอร์ไบน์ และแบบพัดลม (propeller) เช่นเดียวกันกับที่ใช้ในถังกวนเร็ว เครื่องกวนแบบใบพายนั้นอาจติดตั้งให้หมุนในทิศทางตามน้ำหรือตัดน้ำก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยทั่วไปเครื่องกวนแบบนี้มักหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำคือ อยู่ในช่วง 2 – 15 รอบต่อนาทีโดยมีความเร็วขอบใบพัดประมาณ 0.3 – 0.7 เมตรต่อวินาที และมักมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบอื่น สำหรับเครื่องกวนแบบเทอร์ไบน์นั้นมีใบพัดที่มีลักษณะเป็นแผ่นจานหมุนซึ่งมีใบพัดขนาดเล็กติดตั้งฉากกับงานแผ่นในแนวรัศมีของจาน ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) แผ่นจานนี้มักติดตั้งฉากกับแกนหมุน เครื่องกวนดังกล่าวอาจจะติดตั้งให้หมุนในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ และควรให้หมุนโดยมีความเร็วรอบของใบเทอร์ไบน์อยู่ในช่วง 10 – 15 รอบต่อนาที และมีความเร็วขอบไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาทีในกรณีที่ใช้กับฟล็อกที่เปราะอย่างเช่นฟล็อกที่เกิดจากสารส้มหรือสารประกอบเหล็กและไม่เกิน 1.2 เมตรต่อวินาทีในกรณีที่ใช้กับฟล็อกที่แข็งแรงอย่างเช่นฟล็อกของหินปูนที่เกิดจากกระบวนการกำจัดความกระด้าง เครื่องกวนแบบเทอร์ไบน์นี้มีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบอื่นและใช้ไม่ได้ดีในกรณีที่การกวนช้านั้นๆ ต้องการระดับความเร็วแรงแผ่นเกินกว่า 40 ต่อวินาที ส่วนเครื่องกวนน้ำแบบใบเรื่อนั้น ได้แสดงไว้ในรูปที่ 18 เครื่องกวนน้ำดังกล่าวสามารถติดตั้งให้หมุนในแนวนอนหรือแนวตั้งก็ได้เช่นเดียวกับเครื่องกวนชนิดอื่นๆ นอกจากนี้เครื่องกวนที่ติดตั้งให้หมุนในแนวยืนอาจวางให้อยู่นอกจุดศูนย์กลางก็ได้ เครื่องกวนน้ำแบบนี้จะให้ความเร็วรอบสูงคืออยู่ในช่วง 150 – 1500 รอบต่อนาทีโดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องความเร็วขอบ และสามารถที่จะใช้ได้ดีกับถังกวนช้าที่ต้องการระดับความเร็วแรงแผ่นสูงถึง 90 ต่อวินาที นอกจากนี้ยังเป็นเครื่องกวนที่ให้ระดับความเร็วแรงแผ่นเท่ากับถังกวนช้าอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งถังมากกว่าแบบอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากกราฟแสดงการกระจายความเร็วแรงแผ่นที่ใช้ใบพัดแบบต่างๆ ในรูปที่ 19



รูปที่ 17 ถังกวนช้าที่ใช้ใบพัดแบบใบพาย

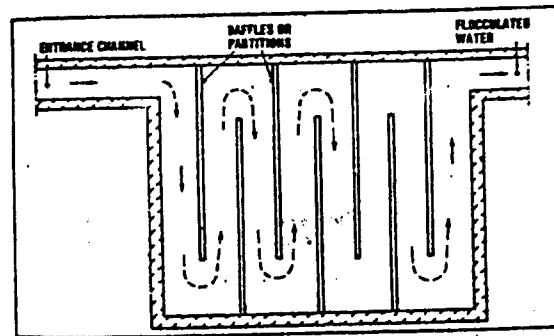


รูปที่ 18 ใบพัดแบบใบเรือ (axial flow propeller)

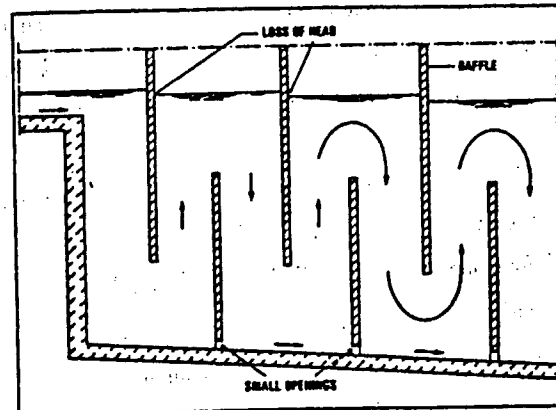


รูปที่ 19 การกระจายของความเร็วกวเรเดียนท์ในถังกวนซ้ำที่ใช้ใบพัดแบบต่างๆ

1.7.2 ถังกวนช้าแบบใช้แผ่นกั้นน้ำ (baffled flocculator) ถังกวนช้าเช่นนี้ไม่มีอุปกรณ์กวนน้ำ การสร้างความปั่นป่วนให้กับน้ำนั้นทำโดยการบังคับให้น้ำไหลวกวนและคดเคี้ยวไปมาด้วยแผ่นกั้นน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 20 รูปที่ 20 แสดงให้เห็นถึงถังกวนช้าแบบใช้แผ่นกั้นน้ำ 2 ประเภท คือ ประเภทแรก (รูปที่ 20 ก.) เป็นถังกวนช้าที่บังคับให้น้ำไหลวกวนในแนวระนาบ ส่วนประเภทที่สอง (รูปที่ 20 ข.) เป็นถังกวนช้าที่บังคับให้น้ำไหลวกวนในแนวตั้ง จะเห็นได้ว่าถังกวนช้าทั้ง 2 ประเภทจะถูกแบ่งเป็นห้องเล็กๆด้วยแผ่นกั้นน้ำจะไหลวกวนไปตามห้องต่างๆ ทุกห้องเกิดความปั่นป่วนขึ้น อนุภาคคอลลอยด์ที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วก็จะสัมผัสกันแล้วจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน น้ำที่ไหลเข้าถังกวนช้าแบบใช้แผ่นกั้นน้ำนี้ต้องมีความเร็วไม่ต่ำเกินไปจนทำให้มีการตกตะกอนเกิดขึ้น การใช้แผ่นกั้นน้ำมีข้อดีตรงที่มันช่วยทำให้มีการไหลลัดทางเกิดขึ้นน้อย แต่มีข้อเสียตรงที่การออกแบบและควบคุมกระบวนการฟล็อกกูเลชันให้ได้ผลดีนั้นจะเป็นเรื่องยาก ถ้าหากว่าอัตราการไหลของน้ำมีความแปรปรวนมาก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่าระดับความปั่นป่วนของน้ำในถังกวนช้าขึ้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ



ก. Horizontal-flow baffled channel flocculator (plan)



ข. Vertical-flow baffled chamber flocculator (cross section)

รูปที่ 20 ถังกวนช้าแบบใช้แผ่นกั้นน้ำ

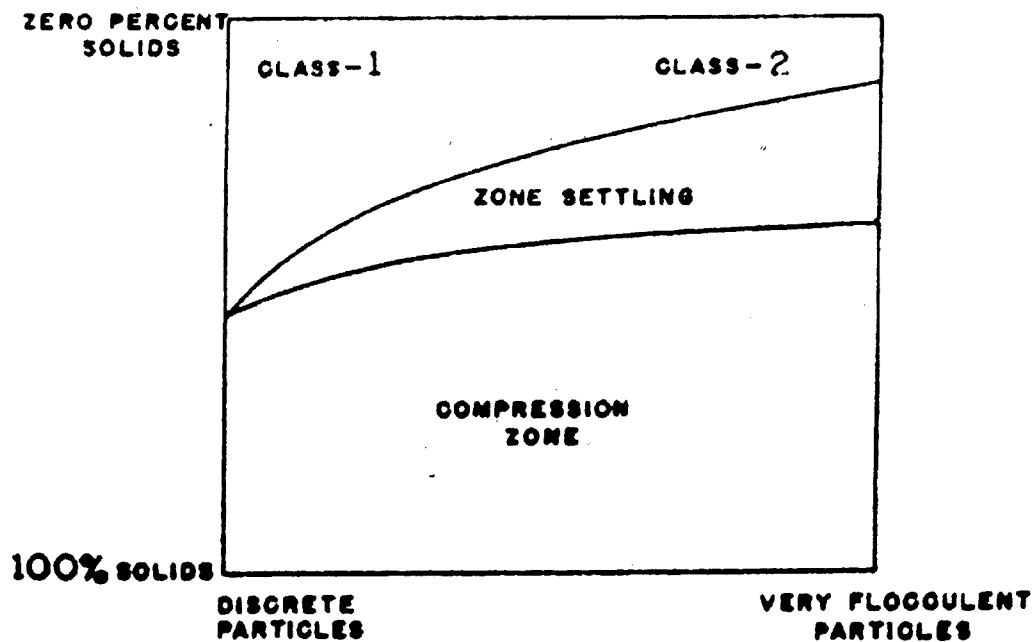
## 2. การตกตะกอน (sedimentation)

### 2.1 การจำแนกประเภทของการตกตะกอน

การตกตะกอนเป็นกระบวนการทางกายภาพใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำด้วยแรงดึงดูดของโลกเพื่อให้ได้ส่วนที่เรียกว่าน้ำใส การตกตะกอนนั้นอาจแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้คือ

- 2.1.1 การตกตะกอนแบบ โดค (discrete settling)
- 2.1.2 การตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม (flocculent setting)
- 2.1.3 การตกตะกอนแบบแบ่งชั้น (zone settling)
- 2.1.4 การตกตะกอนแบบอัดตัว (compression settling)

การที่อนุภาคของแข็งแขวนลอยจะตกตะกอนแบบใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้น และสมบัติของอนุภาคที่มีอยู่ในน้ำนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 21

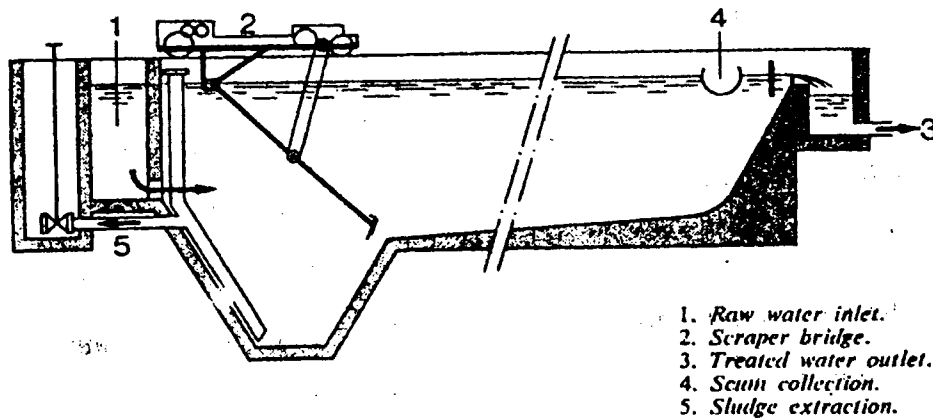


รูปที่ 21 ประเภทของการตกตะกอน

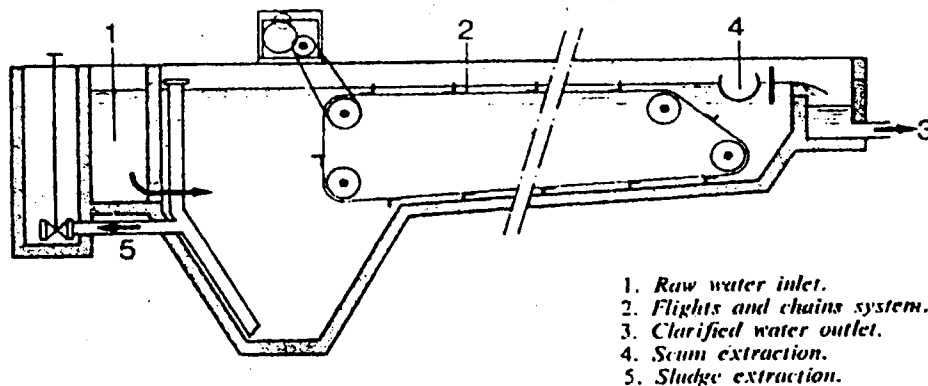
## 2.2 การจำแนกประเภทของถังตกตะกอน

ถังตกตะกอนที่ใช้ในงานทางด้าน การประปา นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้ดังนี้คือ

2.2.1 ถังตกตะกอนแบบธรรมดา ถังตกตะกอนแบบนี้ น้ำจะไหลเข้าและออกในลักษณะที่ทำให้อนุภาคแขวนลอยเกิดการตกตะกอนตามธรรมชาติ ซึ่งอาจแบ่งตามทิศทางการไหลของน้ำได้เป็น 2 แบบคือ แบบน้ำไหลในแนวนอน และแบบน้ำไหลในแนวตั้ง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 22 และ 23 ตามลำดับ สำหรับแบบน้ำไหลในแนวนอนนั้นเป็นที่นิยมใช้กันมากในประเทศไทย โดยเฉพาะในโรงงานประปาขนาดเล็กและโรงประปาของการประปาภูมิภาค ถังตกตะกอนแบบนี้นิยมทำให้เป็นถังรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนแบบน้ำไหลในแนวตั้งนั้นมักออกแบบให้เป็นถังกลมหรือถังรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส

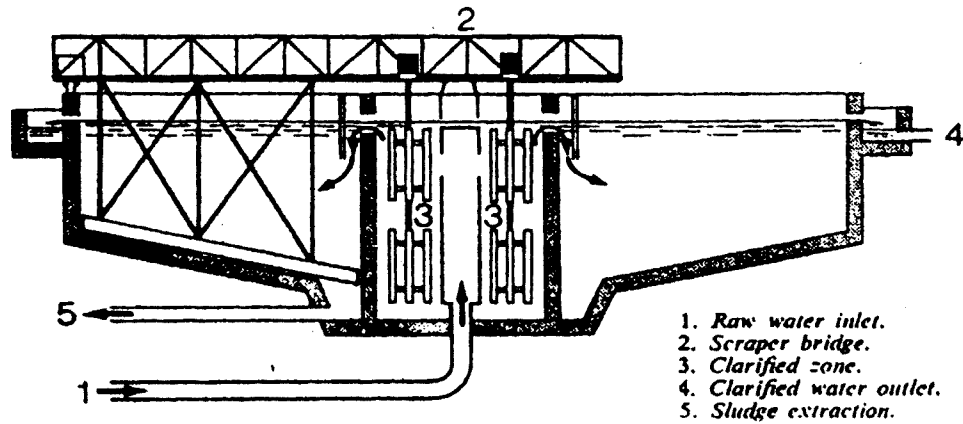


๒. — Scraper-type rectangular settling tank.



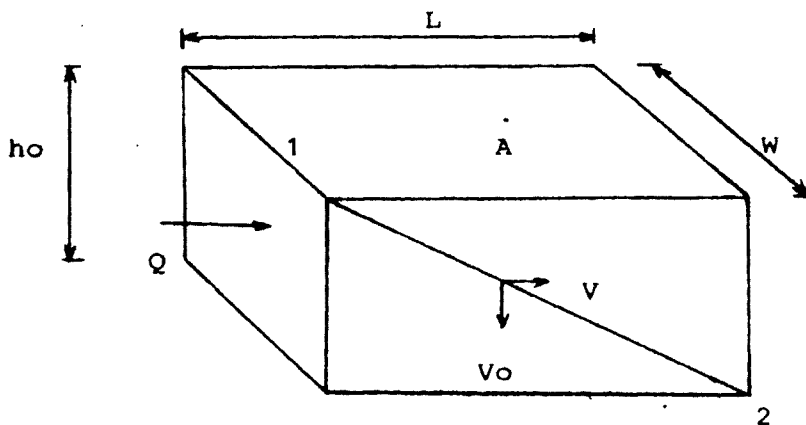
๓. — Rectangular settling tank with flight scraper mechanism.

รูปที่ 22 ถังตกตะกอนแบบน้ำไหลในแนวนอน



รูปที่ 23 ถังตกตะกอนแบบน้ำไหลในแนวตั้ง

2.2.2 ถังตกตะกอนแบบแผ่นหรือแบบท่อ ถังตกตะกอนชนิดนี้เป็นถังตกตะกอนธรรมดาที่มีการใส่แผ่นหรือท่อตกตะกอนเข้าไปในถังเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน สาเหตุที่ได้มีการพัฒนาถังตกตะกอนประเภทนี้ขึ้นมาใช้ ก็เนื่องมาจากแนวความคิดที่ว่าตามทฤษฎีนั้นอัตราการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวหน้าของถังตกตะกอน ซึ่งพิสูจน์ได้จากการพิจารณาถังตกตะกอนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาว  $L$  ความกว้าง  $W$  และความลึก  $h_0$  ดังแสดงในรูปที่ 24 โดยมีปริมาณการไหลของน้ำที่เข้าถังตกตะกอนนี้เท่ากับ  $Q$  และมีอนุภาคขนาดเล็กที่สุดที่สามารถตกตะกอนด้วยความเร็วของการตกตะกอนเท่ากับ  $V_0$  เคลื่อนที่มาจากผิวหน้าคือที่จุด 1 แล้วตกตะกอนที่ก้นถังถึงที่จุด 2 พอดี



รูปที่ 24 ถังตกตะกอนแบบอุดมคติ

จะเห็นว่า เวลาที่น้ำ;  $t$  นั้นมีค่าเท่ากับเวลาที่น้ำไหลในแนวนอนจากจุด 1 ถึงจุด 2 และเท่ากับเวลาที่อนุภาคใช้ในการตกตะกอนจากจุด 1 ถึงจุด 2 เช่นเดียวกัน

$$\text{ดังนั้น } t = \frac{L}{V} = \frac{h_0}{V_0}$$

$$\text{หรือ } V_0 = \frac{h_0 V}{L}$$

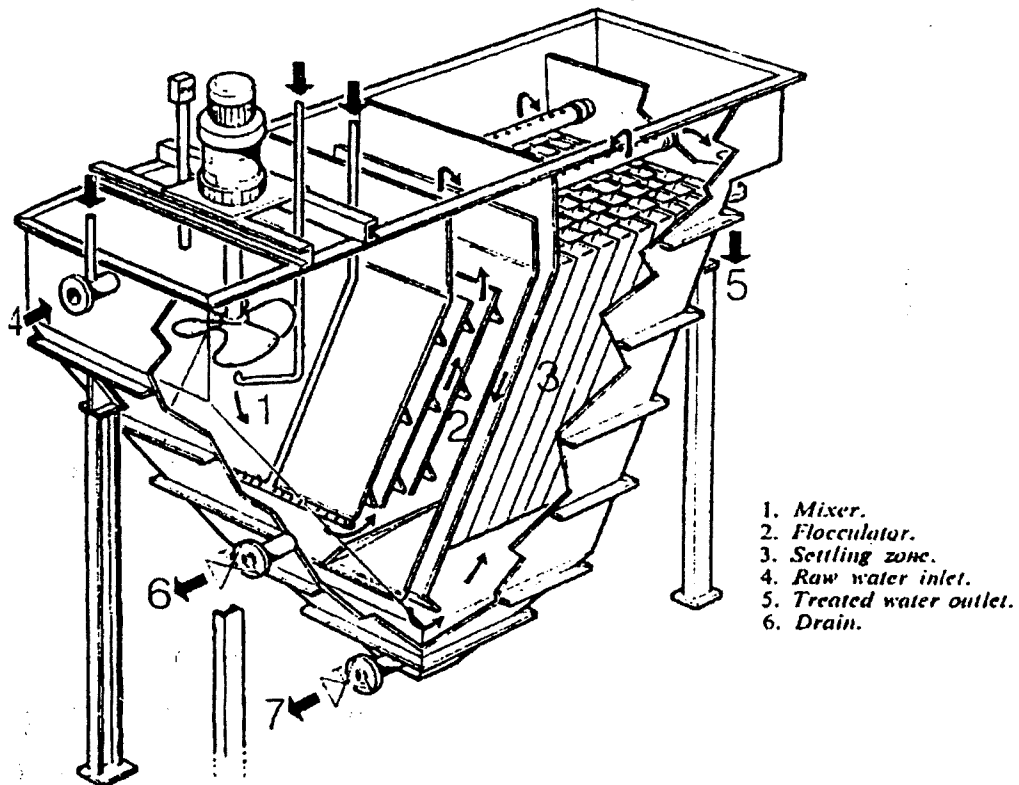
$$\text{เนื่องจาก } V = \frac{Q}{h_0 W}$$

$$\text{ดังนั้น } V_0 = \frac{h_0 \left( \frac{Q}{h_0 W} \right)}{L} = \frac{Q}{WL}$$

$$\text{เนื่องจาก } WL = A = \text{พื้นที่ผิวหน้าของถังตกตะกอน}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } V_0 = Q/A \quad (12)$$

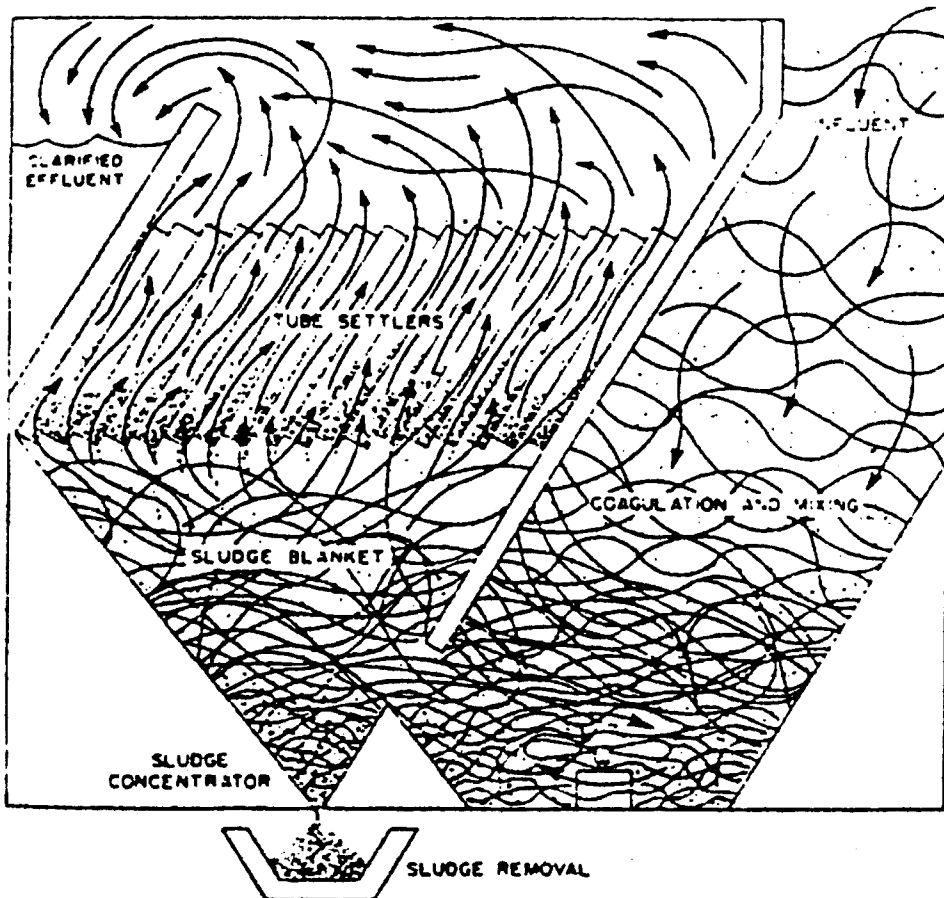
ถังตกตะกอนที่มีการสอดแผ่นราบหรือแผ่นลอนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอน ซึ่งได้แสดงตัวอย่างไว้ดังในรูปที่ 25 นั้น เรียกว่า ถังตกตะกอนแบบแผ่น (plate settler) ส่วนถังตกตะกอนที่ใช้ท่อแทนแผ่นต่าง ๆ นั้น เรียกว่า ถังตกตะกอนแบบท่อ (tube settler) ดังตัวอย่างในรูปที่ 26



รูปที่ 25 ถังตกตะกอนแบบแผ่น

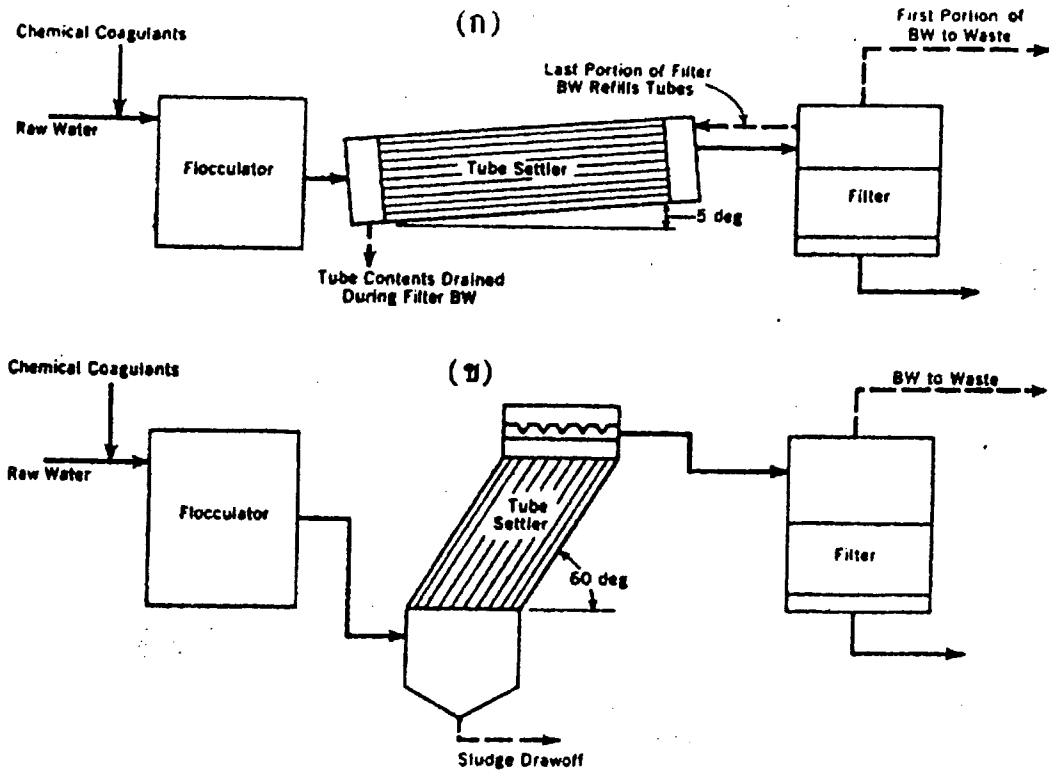


ระบบถังตกตะกอนแบบท่อนั้นมี 2 ชนิด คือ แบบท่อเอียงน้อย และแบบท่อเอียงมาก ดังแสดงในรูปที่ 27 ถังตกตะกอนแบบท่อเอียงน้อยนั้นท่อจะวางตัวเอียงสูงขึ้น โดยทำมุมประมาณ  $5^{\circ}$  กับพื้นราบ การที่ท่อเอียงน้อยนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้มีการสะสมของตะกอนภายในท่อ จึงต้องทำการล้างตะกอนเป็นประจำ ซึ่งโดยปกติแล้วมักจะทำการล้างพร้อมๆกับการล้างถังกรอง



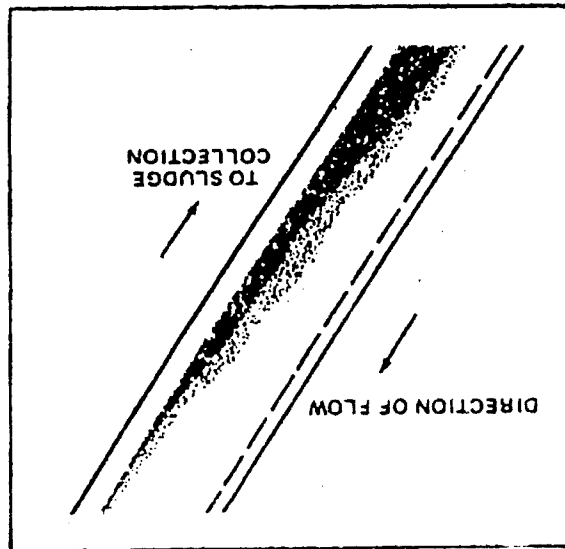
รูปที่ 26 ถังตกตะกอนแบบท่อ

การใช้ถังตกตะกอนแบบท่อเอียงน้อยนั้นทำให้เกิดความไม่สะดวกในการทำงาน เพราะการทำงานเป็นไปอย่างไม่ต่อเนื่อง ดังนั้น ถังตกตะกอนแบบนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในระบบประปาขนาดใหญ่หรือขนาดกลาง และโดยทั่วไปมักนิยมใช้ถังตกตะกอนดังกล่าวในระบบประปาสำเร็จรูป หรือระบบประปาขนาดเล็กที่มีกำลังผลิตไม่เกิน 4,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน



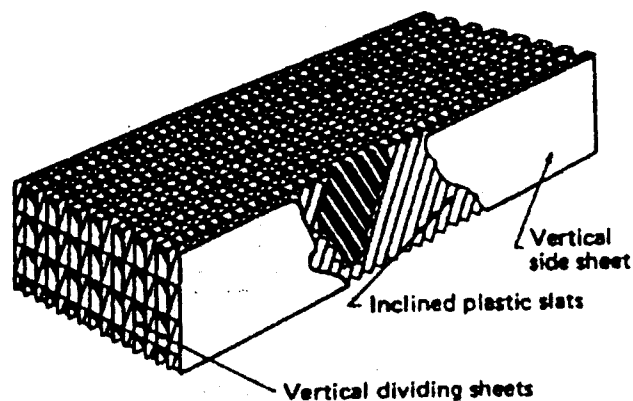
รูปที่ 27 ชนิดของถังตกตะกอนแบบท่อ (ก) แบบท่อเอียงน้อย (ข) แบบท่อเอียงมาก

สำหรับถังตกตะกอนแบบท่อเอียงมากนั้น ท่อจะวางเอียงขึ้นจากพื้นราบประมาณ  $45^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  น้ำที่ไหลเข้าถังตกตะกอนจะไหลจากข้างล่างขึ้นข้างบนของท่อ ซึ่งมีทิศทางสวนกับการไหลของตะกอนดังแสดงในรูปที่ 28 เป็นเหตุให้อนุภาคแขวนลอยในน้ำถูกจับอยู่ในกระแสน้ำของตะกอนเข้มข้นที่เคลื่อนที่สวนลงมาตามท่อ การใช้ถังตกตะกอนดังกล่าวมีข้อดีมากกว่าตรงที่ไม่จำเป็นต้องทำความสะอาดท่อเพื่อชะล้างตะกอน ดังนั้นจึงสามารถใช้ได้ดีกับโรงประปาขนาดใหญ่และขนาดกลางได้ เพราะสามารถที่จะทำงานได้



รูปที่ 28 การไหลของน้ำและสลัดจ์ในท่อตะกอนแบบชั้นมาก

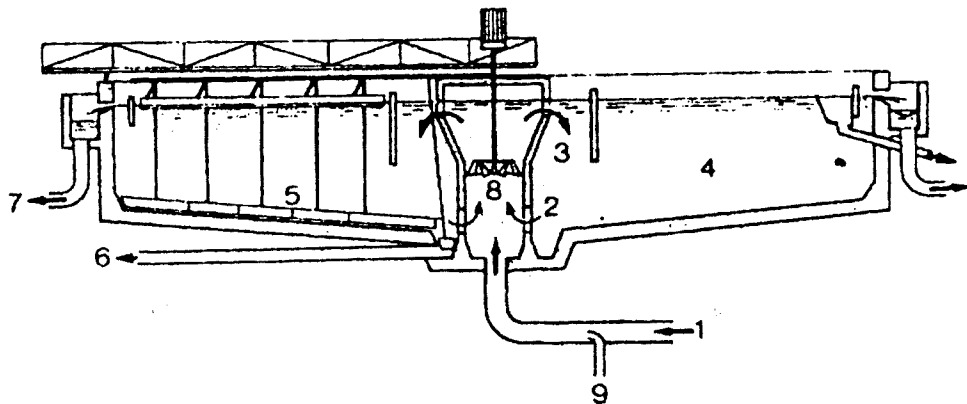
อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ในปัจจุบันยังได้มีการพัฒนาออกแบบ และผลิตท่อตกตะกอนแบบชั้นมาก ที่มีรูปร่างลักษณะต่างๆที่เป็น โครงสร้างมาตรฐาน ซึ่งสามารถที่จะนำไปติดตั้งกับถังตกตะกอน ขนาดไหนก็ได้อีกด้วย ท่อหรือแผ่นพื้นสำเร็จรูปดังกล่าวนี้เรียกว่า โมดูล ตัวอย่างของ โมดูลนี้ได้ แสดงไว้ในรูปที่ 29



รูปที่ 29 ท่อตกตะกอนสำเร็จรูป (โมดูล)

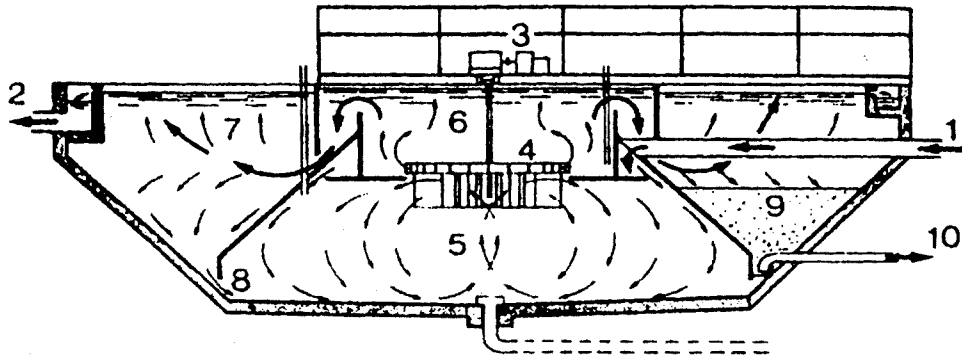
### 2.2.3 ถังตกตะกอนแบบโซลลิคซ์คอนแทคท์ ถังตกตะกอนแบบ

โซลลิคซ์คอนแทคท์นี้เป็นถังตกตะกอนที่รวมเอากระบวนการโคแอกกูเลชันไว้ในถังเดียวกัน ถังตกตะกอนดังกล่าว สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบหมุนเวียนสลัดจ์ (slurry recirculation) และแบบชั้นสลัดจ์ (sludge blanket) สำหรับถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนสลัดจ์นั้น จะมีการหมุนเวียนเอาสลัดจ์จากบริเวณตกตะกอนไปยังเขตคววน้ำซึ่งเป็นทางเข้าของน้ำดิบกับสารเคมีและเป็นที่เกิดโคแอกกูเลชัน โดยอาจใช้การคววน้ำด้วยใบพัดหรือใช้การไหลของน้ำเป็นตัว หมุนเวียนสลัดจ์ก็ได้ ตัวอย่างของถังตกตะกอนชนิดนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 30 ส่วนถังตกตะกอนแบบชั้นสลัดจ์นั้น ไม่มีการหมุนเวียนสลัดจ์ แต่ต้องรักษาชั้นสลัดจ์ให้คงอยู่ตลอดเวลา โดยไม่แตกกระจายและไม่อัดตัวจนเกาะกันแน่นที่ก้นถัง น้ำที่ผสมกับโคแอกกูแลนท์จนอนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้วจะถูกบังคับให้ไหลผ่านชั้นสลัดจ์แล้วเกิดฟล็อกกูเลชันขึ้นในชั้นสลัดจ์ ฟล็อกที่เกิดขึ้นจะถูกจับอยู่ในชั้นสลัดจ์และตกตะกอน น้ำที่ผ่านออกจากชั้นสลัดจ์จะใส ลักษณะการทำงานเช่นนี้คล้ายๆกับ การกรองน้ำด้วยชั้นสลัดจ์นั่นเอง ตัวอย่างของถังตกตะกอนแบบชั้นสลัดจ์นี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 31



- |                        |  |
|------------------------|--|
| 1. Raw water inlet.    | 6. Excess sludge.                                    |
| 2. Sludge recycling.   | 7. Treated water outlet.                             |
| 3. Flocc maturing.     | 8. Mixing turbine for raw water and recycled sludge. |
| 4. Clarification zone. | 9. Reagent feed.                                     |
| 5. Scrapers.           |  |

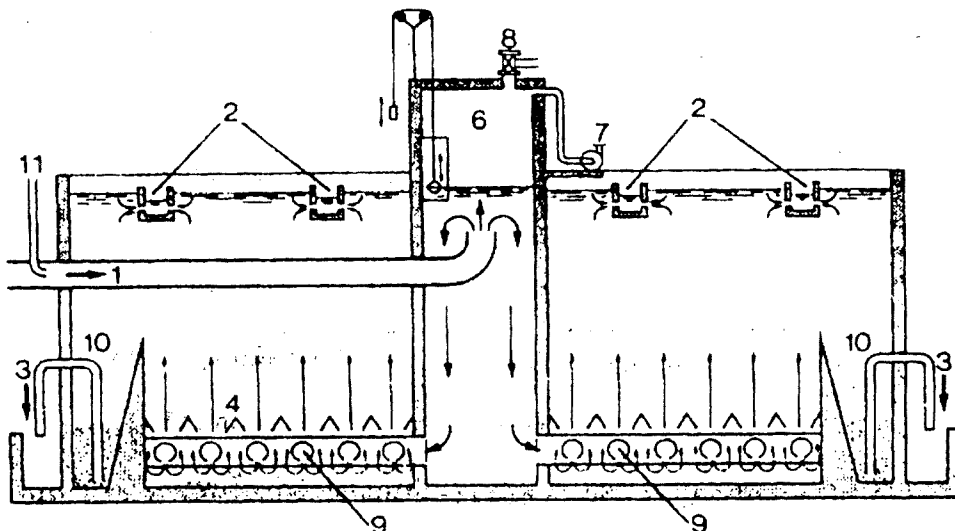
รูปที่ 30 (ก)



- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. Raw water inlet.                  | 6. Secondary mixing and reaction zone. |
| 2. Clarified water outlet.           | 7. Clarified water.                    |
| 3. Impeller drive.                   | 8. Sludge return.                      |
| 4. Rotor impeller.                   | 9. Sludge concentrator.                |
| 5. Primary mixing and reaction zone. | 10. Excess sludge discharge.           |

รูปที่ 30 (ข)

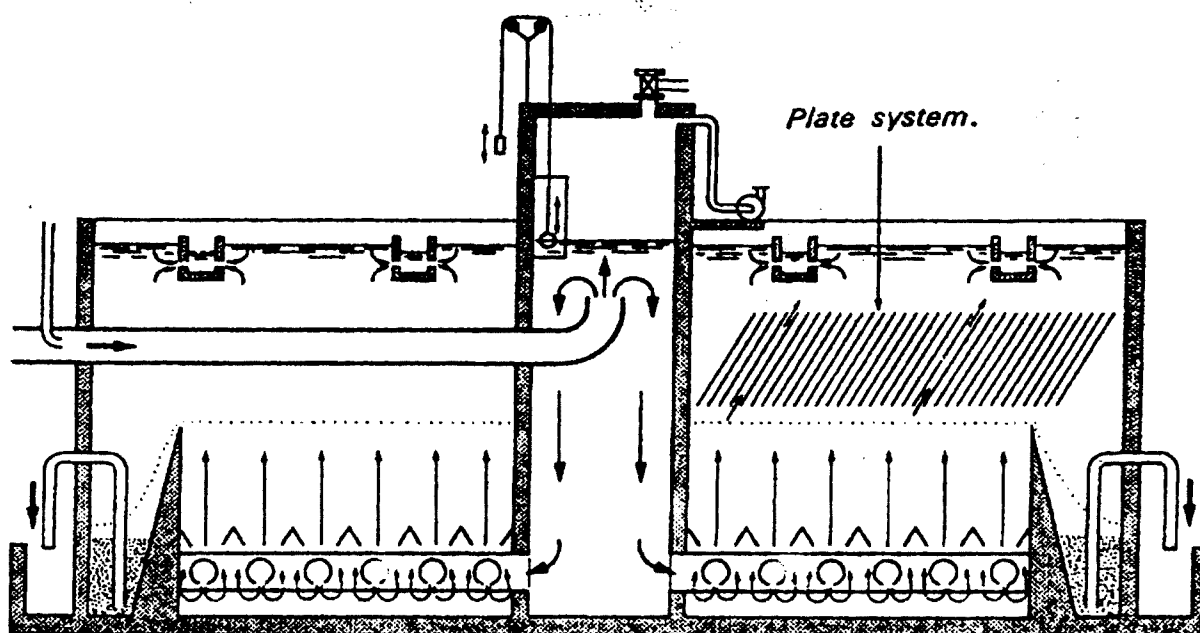
รูปที่ 30 ถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนสลัดจ์



- |                            |  |
|----------------------------|--|
| 1. Raw water inlet.        | 8. Automatic vacuum-breaker.                 |
| 2. Clarified water outlet. | 9. Raw water perforated distribution piping. |
| 3. Sludge discharge.       | 10. Sludge concentrators.                    |
| 4. Stilling plates.        | 11. Reagent inlet.                           |
| 6. Vacuum chamber.         |  |
| 7. Vacuum pump.            |  |

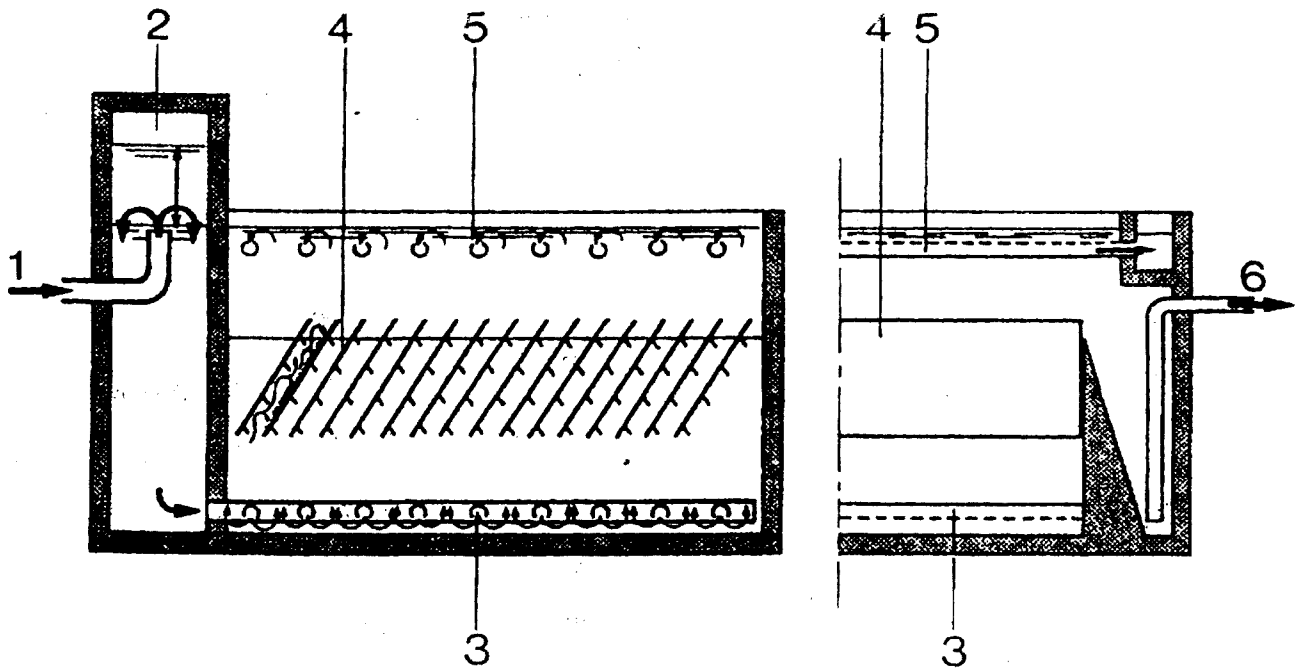
รูปที่ 31 ถังตกตะกอนแบบชั้นสลัดจ์

การเพิ่มประสิทธิภาพของถังตกตะกอนแบบ ไชลิกซ์คอนแทคที่นั่นอาจกระทำได้โดยการใส่แผ่นหรือท่อตกตะกอนให้กับถัง สำหรับการใส่ท่อตกตะกอนนั้นจะต้องใช้ท่อที่มีขนาดใหญ่พอเพียง เพื่อป้องกันมิให้มีการอุดตันเกิดขึ้น การใส่แผ่นหรือท่อตกตะกอนดังกล่าวให้กับถังตกตะกอนแบบหมุนเวียนสลัดจ์นั้นจะใส่ไว้ในเขตตกตะกอน ส่วนการใส่ให้กับถังตกตะกอนแบบชั้นสลัดจ์อาจใส่ในเขตตกตะกอนหรือในบริเวณที่มีชั้นสลัดจ์ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 32 และ 33



รูปที่ 32 ถัง ไชลิกซ์คอนแทคที่แบบมีชั้นสลัดจ์ที่ใส่แผ่นตกตะกอนไว้ในเขตตกตะกอน

ถังตกตะกอนแบบ ไชลิกซ์คอนแทคที่นี้นิยมใช้กับกระบวนการกำจัดความกระด้างออกจากน้ำด้วยปูนขาว-โซดาแอช ทั้งนี้เนื่องจากว่ากระบวนการดังกล่าว มีตะกอนเกิดขึ้นมาก จึงทำให้สามารถควบคุมชั้นสลัดจ์หรือทำให้มีสลัดจ์สำหรับหมุนเวียนได้ง่าย สำหรับน้ำที่มีตะกอนแขวนลอยต่ำก็สามารถใช้กับถังตกตะกอนแบบ ไชลิกซ์คอนแทคที่นี้ได้เหมือนกัน แต่อาจจะมีปัญหาเกิดขึ้นในตอนเริ่มต้นเนื่องจากการขาดแคลนตะกอนแขวนลอยที่จะใช้ในการสร้างชั้นสลัดจ์ หรือในการหมุนเวียนสลัดจ์ ปัญหานี้สามารถที่จะแก้ไขได้โดยการเติมผงดินเหนียวต่างๆ เช่น เคาลิน ฯลฯ ลงไปในน้ำเพื่อช่วยเพิ่มตะกอนแขวนลอยในตอนเริ่มใช้ถังตกตะกอน



- |   |   |
|---|---|
| 1. Raw water inlet.                         | 5. Perforated pipes for clarified water collection. |
| 2. Vacuum chamber.                          | 6. Sludge discharge.                                |
| 3. Perforated pipes for water distribution. |   |
| 4. Plate system.                            |   |

รูปที่ 33 ถังโซลิกซ์คอนแทกต์แบบมีชั้นสไลด์ที่ใส่แผ่นคกตะกอนไว้ในชั้นสไลด์

### 2.3 หลักเกณฑ์ในการออกแบบถังตกตะกอน

ปัจจัยสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบถังตกตะกอนที่ใช้ในโรงประปาทั่วไป มีดังนี้คือ

- อัตราน้ำล้นผิว เนื่องจากการตกตะกอนที่เกิดขึ้นในระบบประปาส่วนใหญ่เป็นการตกตะกอนแบบรวมกลุ่ม ดังนั้นค่าอัตราน้ำล้นผิวจึงมีความสำคัญมากเพราะมันจะเป็นตัวกำหนดขนาดของถังตกตะกอน และเนื่องจากความเร็วในการตกตะกอนนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำดิบ อย่างเช่น อุณหภูมิของน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากว่าความเร็วในการตกตะกอนนั้นแปรผกผันกับความหนืดของน้ำ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิของน้ำ และจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก  $10^{\circ}\text{C}$  ไปเป็น  $30^{\circ}\text{C}$  จะทำให้อุณหภูมิตกตะกอนได้เร็วขึ้นถึง 1.63 เท่า นอกจากนี้ อัตราน้ำล้นผิวยังขึ้นกับลักษณะสมบัติของอนุภาคแขวนลอยที่ต้องการกำจัดด้วย ซึ่งได้แก่ความถ่วงจำเพาะ ขนาดและรูปร่างของอนุภาคแขวนลอย โดยปกติแล้วอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะมีน้ำหนักมาก จึงสามารถตกตะกอนได้ดีกว่าอนุภาคที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ แต่มีขนาดเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นอัตราน้ำล้นผิวจึงขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำดิบ และของอนุภาคดังกล่าวมาแล้วข้างต้นด้วย สำหรับค่าอัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนชนิดต่าง ๆ นั้น ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางด้านตกตะกอนของอนุภาคประเภทต่างๆ

Nature of Solids	Specific Gravity	Settling Velocity (cps)	Surface Loading (gpd per ft <sup>2</sup> )	Detention Period (for 10-ft tank)(hr)
Sand , Silt , clay	2.65	as low as $7 \times 10^{-3}$	146	12.3
Aluminum and iron floc	1.002	$8.3 \times 10^{-2}$	1800	10
Calcium carbonate	1.2	$4.2 \times 10^{-2}$	<900	>2
Precipitates				
Primary waste organics	1.001	$4.2 \times 10^{-2}$	<900	>2
Activated sludge organics	1.005	$2 \times 10^{-1}$	1200	>0.5



ตารางที่ 3 อัตราน้ำล้นผิวของถังตกตะกอนประเภทต่างๆ

ชนิดของถังตกตะกอน	อัตราน้ำล้นผิว ( $m^3/d \cdot m^2$ or $m/d$ )
ถังตกตะกอนแบบธรรมดา	
- ตะกอนที่ได้จากระบวนการโคแอกกูเลชันที่ใช้	
- กำจัดความขุ่น	49
- กำจัดสี	33
- ตะกอนที่ได้จากระบวนการกำจัดความ	
กระด้างด้วยปูนขาวเมื่อน้ำมีปริมาณแมกนีเซียม	
- ต่ำ	81
- สูง	65
ถังตกตะกอนแบบไซคลิซค์คอนแทคท์	ไม่เกิน 100

- ความลึกและเวลากักน้ำ ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนขึ้นอยู่กับ ความสามารถในการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ของอนุภาค ความสามารถในการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคดังกล่าวขึ้นกับเวลากักน้ำ และในทางทฤษฎีเมื่อปริมาณการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถังตกตะกอนและพื้นที่ผิวน้ำมีค่าคงที่ เวลากักน้ำจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความลึกของถัง ดังนั้น ประสิทธิภาพของถังตกตะกอนจึงขึ้นอยู่กับเวลากักน้ำและความลึกของถังด้วย

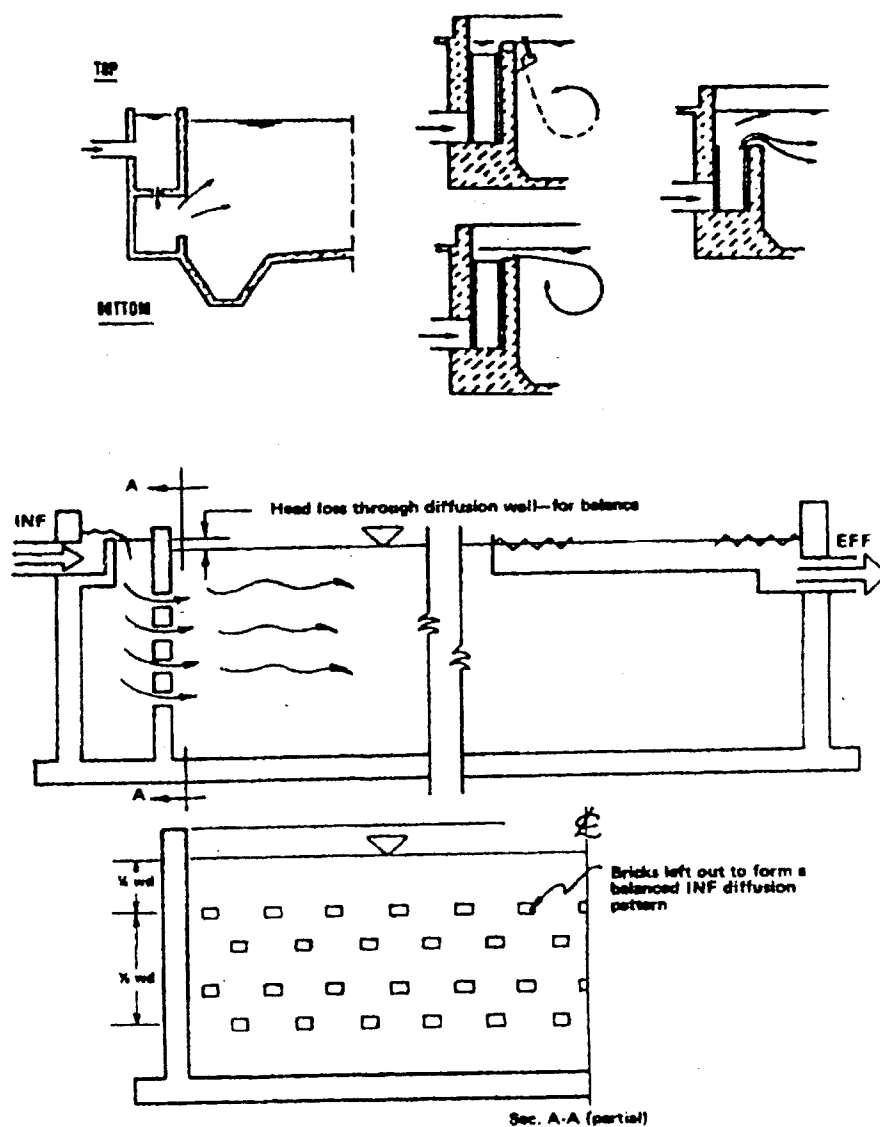
ในการเลือกความลึกของถังตกตะกอนจะต้องให้ความลึกสัมพันธ์กับเวลากักน้ำที่ได้เลือกไว้แล้ว โดยที่เวลากักน้ำจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้หรือประเภทของถังตกตะกอน ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 4 ถังตกตะกอนในปัจจุบันนิยมออกแบบให้มีความลึกไม่ต่ำกว่า 3 เมตร เพื่อให้มีปริมาตรในการเก็บสลัดจ์และเพื่อป้องกันมิให้ตะกอนแขวนลอยหนีออกจากถังตกตะกอนในกรณีที่เกิดมีการฟุ้งกระจายของตะกอนอันเนื่องมาจากกระแสความหนาแน่นได้โดยง่าย

ตารางที่ 4 เวลาพักน้ำของถังตกตะกอนประเภทต่างๆ

ประเภทของถังตกตะกอน	เวลาพักน้ำ
Plain sedimentation basin	หลายวัน
Presedimentation tank	1 – 4 ชั่วโมง
ถังตกตะกอนที่ใช้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน	2 – 4 ชั่วโมง
ถังตกตะกอนที่ใช้กับน้ำที่ผ่านกระบวนการกำจัดความกระด้างด้วยปูน-โซดา	1 – 2 ชั่วโมง

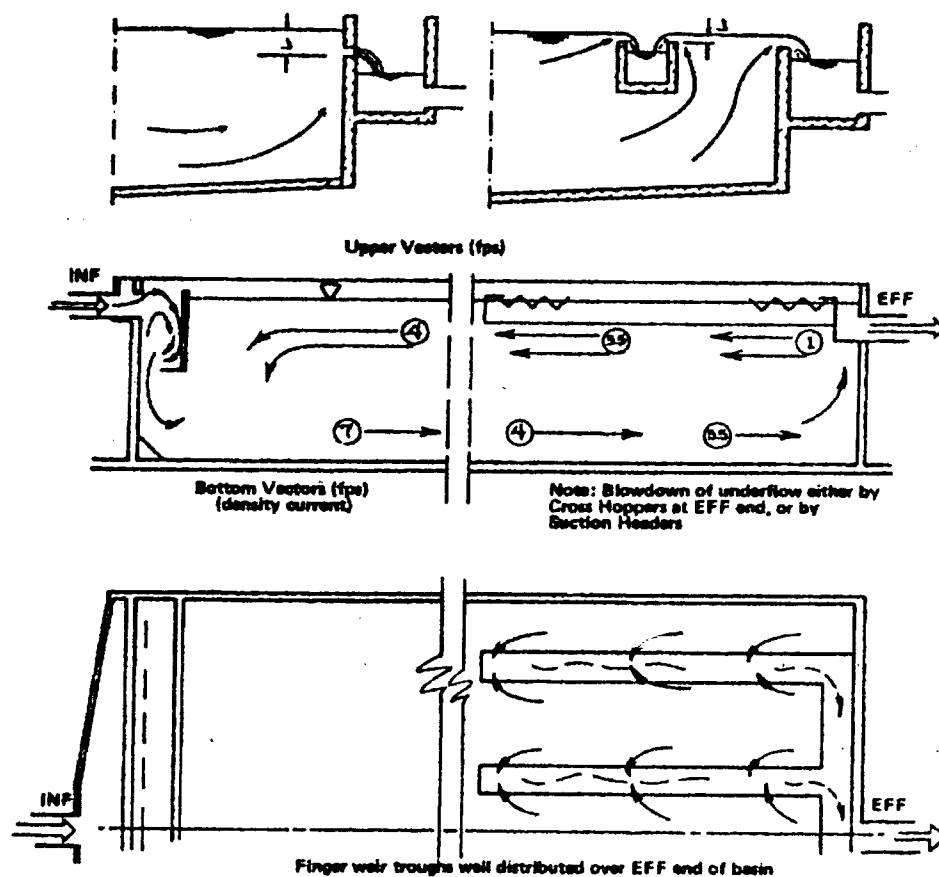
- อัตราเร็วของน้ำที่ไหลผ่านถัง การที่น้ำไหลผ่านถังตกตะกอนด้วยอัตราเร็วที่สูงเกินไปจะทำให้ตะกอนที่ตกตะกอนนอนก้นแล้วฟุ้งกระจายขึ้นมาอีก โดยเฉพาะในถังตกตะกอนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าวควรควบคุมให้ความเร็วของการไหลของน้ำมีค่าต่ำๆ ยิ่งต่ำยิ่งดี กล่าวคือ ประมาณไม่เกิน 0.15 เมตรต่อวินาที และถ้าจำเป็นอาจใช้ได้ถึง 0.9 เมตรต่อวินาทีแต่ไม่ควรให้มากกว่านี้

- ทางน้ำเข้าและทางน้ำออก ทางน้ำเข้าที่ดีนั้นจะต้องทำหน้าที่ในการกระจายน้ำให้ไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนด้วยความเร็วสม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งการควบคุมทางน้ำเข้านี้จะป้องกันการฟุ้งกระจายของตะกอนได้ดีกว่าการควบคุมทางน้ำออก การออกแบบถังตกตะกอนควรออกแบบให้เป็นถึงร่วมกับถังกวนช้า เพื่อจะได้ไม่ต้องใช้ท่อหรือรางน้ำในการนำน้ำจากถังกวนช้าไปยังถังตกตะกอน สำหรับการกระจายน้ำในบริเวณทางน้ำเข้านั้นสามารถกระทำได้หลายวิธี ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 34 ในกรณีที่มีการใช้รางน้ำเป็นทางน้ำเข้านั้นจะต้องออกแบบให้อัตราการไหลของน้ำในรางมีค่าอยู่ในช่วง 0.15 – 0.60 เมตรต่อวินาที เพื่อป้องกันมิให้ฟล็อกแตกตัวหรือเกิดการตกตะกอนภายในรางน้ำ ส่วนในกรณีที่ใช้แผ่นกั้นน้ำเจาะรูเป็นเครื่องกระจายน้ำก็จะต้องออกแบบให้น้ำไหลผ่านช่องเปิดด้วยอัตราเร็วในช่วง 1 – 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 34 ตัวอย่างทางน้ำเข้าถังตกตะกอน

ทางน้ำออกก็มีหน้าที่เช่นเดียวกับทางน้ำเข้า กล่าวคือ มีหน้าที่ในการกระจายน้ำให้ไหลออกจากถังตกตะกอนด้วยความเร็วสม่ำเสมอมากที่สุด เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของตะกอน และเพื่อควบคุมระดับน้ำในถังตกตะกอนให้มีระดับคงที่ ทางน้ำออกที่นิยมใช้มี 2 แบบคือแบบ weir รูปตัว V และแบบผนังเจาะรู ดังแสดงในรูปที่ 35 ความยาวของเวียร์นั้นขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำและ weir loading rate ที่ใช้ในการตกตะกอนฟล็อกแบบต่างๆ ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 5 และในบางครั้ง that weir loading rate ทำให้ต้องใช้เวียร์ยาวมากก็นิยมทำเวียร์หลายๆจุดแทนจุดเดียว ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 35

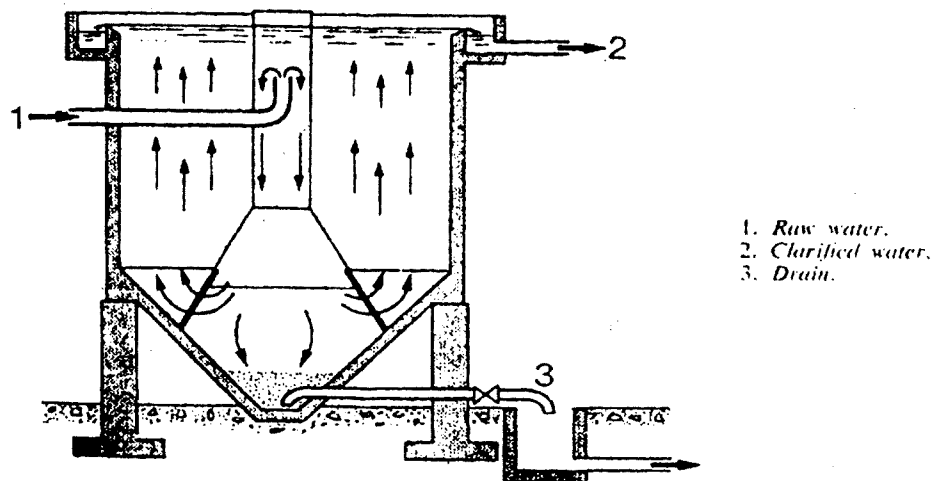


รูปที่ 35 ตัวอย่างของรางน้ำล้น ซึ่งเป็นทางน้ำออกของถังตกตะกอน

ตารางที่ 5 weir loading rate ของถังตกตะกอน

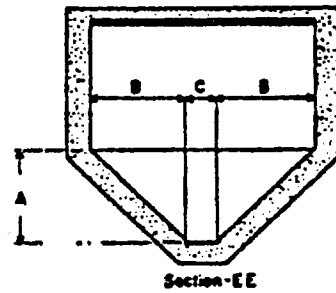
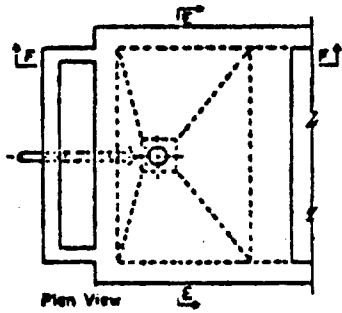
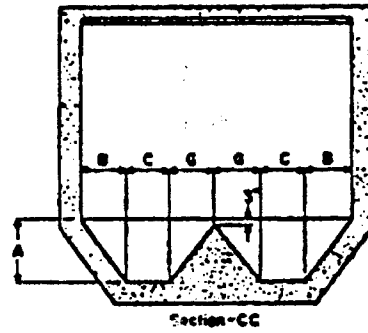
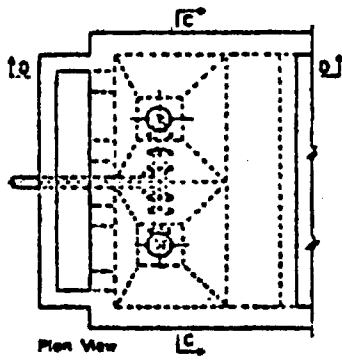
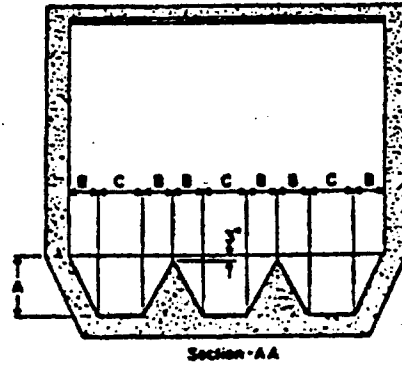
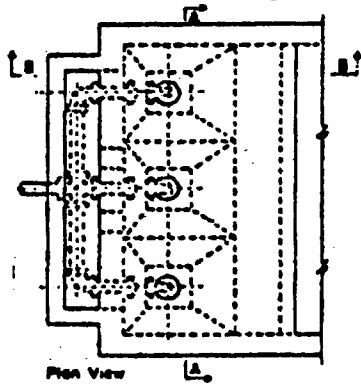
ประเภทของฟล็อก	Weir loading rate (m <sup>3</sup> /d-m)
ฟล็อกสารส้มที่เบา (น้ำที่มีความขุ่นน้อย)	143 – 179
ฟล็อกสารส้มที่หนัก (น้ำที่มีความขุ่นสูง)	179 – 269
ฟล็อกของ CaCO <sub>3</sub> และ Mg(OH) <sub>2</sub>	269 – 322

- ระบบระบายตะกอน ถึงตกตะกอนโดยทั่วไปนั้นมักออกแบบให้พื้นของกันถังลาดเอียงไปหาหลุมเก็บตะกอน (sludge hopper) เพื่อให้ตะกอนที่นอนกันสามารถไหลลงหลุมได้สะดวก นอกจากนี้ยังอาจใช้เครื่องกวาดตะกอนด้วยเพื่อช่วยป้องกันมิให้ตะกอนเกาะติดกับพื้นถังและเพื่อช่วยทำให้ตะกอนมีการเคลื่อนที่ในกรณีที่มีการใช้เครื่องกวาดตะกอนดังกล่าว ต้องออกแบบให้ถังมีขนาดความกว้างหรือเส้นผ่าศูนย์กลางตามมาตรฐานของเครื่องกวาดตะกอนที่มีขายในท้องตลาด สำหรับการออกแบบถังตกตะกอนที่ไม่ใช้เครื่องกวาดตะกอนนั้น ต้องพิจารณาถึงความลึกของหลุมเก็บตะกอน ซึ่งโดยทั่วไปมักทำให้ลาดเอียงเป็นมุมระหว่าง  $45^{\circ}$  –  $65^{\circ}$  กับพื้นราบ ดังแสดงในรูปที่ 36 ถ้าหากว่าความลึกของหลุมเก็บตะกอนมากเกินไปก็ควรออกแบบให้มีหลุมเก็บสลัดจ์หลายๆหลุม เพื่อลดความลึก ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 37



รูปที่ 36 ถังตกตะกอนแบบไหลขึ้นที่ไม่ใช้เครื่องกวาดตะกอน

สำหรับการเอาตะกอนออกจากหลุมเก็บนั้นอาจกระทำได้โดยการใช้การไหลตามแรงโน้มถ่วง (gravity flow) หรือใช้เครื่องสูบ หรืออุปกรณ์ดูดตะกอนแบบอื่น ในกรณีที่ใช้การไหลตามแรงโน้มถ่วงนั้นควรจะใช้ที่ระบายขนาดใหญ่เพียงพอและอาจต้องระบายตะกอนออกบ่อยๆ เพื่อป้องกันการอุดตัน ส่วนการใช้เครื่องสูบนั้น ถ้าหากว่าถังตกตะกอนมีหลุมเก็บตะกอนหลายๆหลุม ก็ควรจะมีที่ดูดตะกอนของแต่ละหลุม แยกออกจากกันเป็นอิสระ เพื่อให้สามารถดูดตะกอนได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน



รูปที่ 37 หลุมเก็บตะกอนแบบต่างๆ

### 3. การกรอง (Filtration)

การกรองเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารแขวนลอยออกจากของเหลวโดยให้ของเหลวไหลผ่านชั้นของตัวกลางอันหนึ่ง ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทดังนี้คือ

- การกรองแบบติดผิวชั้นกรอง (surface filtration) การกรองแบบนี้สารแขวนลอยจะถูกดักจับและติดค้างอยู่บนผิวของตัวกลางหรือสารกรอง ซึ่งได้แก่ ฝ้ายแผ่นใยสังเคราะห์ แผ่นโลหะ แท่งกรอง ฯลฯ

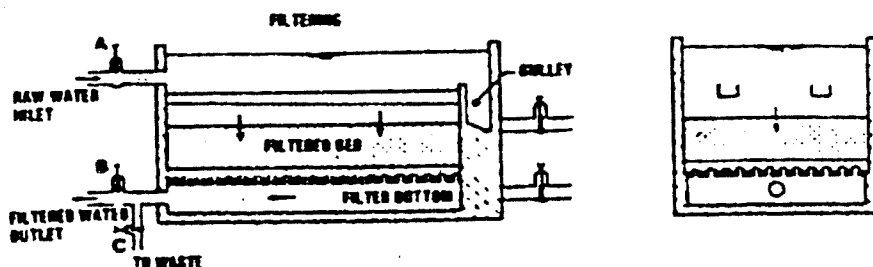
- การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (in – depth filtration) เป็นการกรองที่สารแขวนลอยมีโอกาสเล็ดลอดเข้าไปภายในชั้นกรองได้เนื่องจากสารกรองที่ใช้มักมีขนาดใหญ่ ตัวอย่างของเครื่องกรองแบบนี้ได้แก่ เครื่องกรองทราย เครื่องกรองถ่าน ฯลฯ การกรองแบบติดค้างในชั้นกรองนี้จะประกอบไปด้วยกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีหลายชนิด อย่างเช่น กระบวนการที่สารแขวนลอยจับตัวที่ผิวบนของสารกรอง (straining) การตกตะกอนภายในช่องว่างระหว่างเม็ดสารกรอง (sedimentation) กระบวนการดูดติดผิวระหว่างสารแขวนลอยกับสารกรอง (adsorption) ฯลฯ นอกจากนี้ ยังมีปฏิกิริยาทางชีวภาพเกิดขึ้นด้วยโดยเฉพาะในการกรองด้วยทรายแบบกรองช้า

#### 3.1 การจำแนกชนิดของเครื่องกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง

การจำแนกชนิดของเครื่องกรองแบบติดค้างในชั้นกรองนั้นทำได้หลายแบบดังนี้

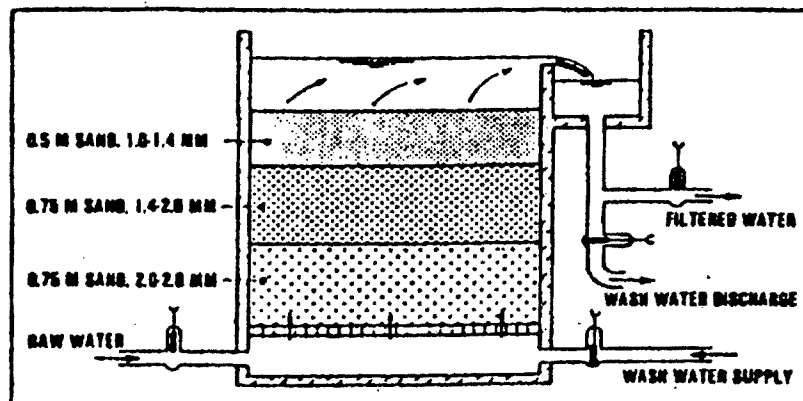
3.1.1 การจำแนกตามทิศทางการไหลของน้ำ โดยวิธีนี้สามารถแบ่งเครื่องกรองออกเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

ก. แบบไหลลง (downflow filter) เป็นแบบที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำประปาทั่วไป น้ำจะไหลเข้าด้านบนและไหลออกทางด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 38



รูปที่ 38 เครื่องกรองแบบน้ำไหลลง

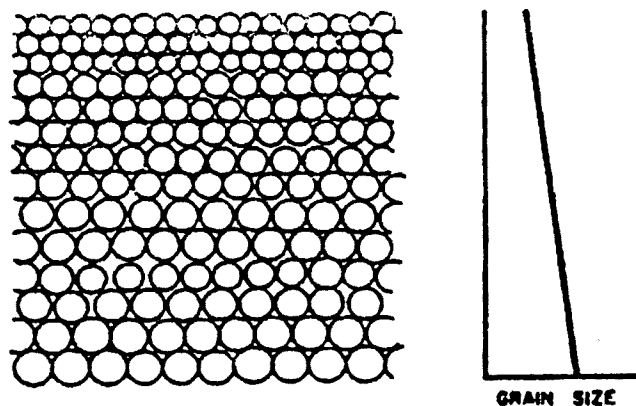
ข. แบบไหลขึ้น (upflow filter) เครื่องกรองแบบนี้ น้ำจะไหลเข้าด้านล่างและไหลออกทางด้านบนดังแสดงในรูปที่ 39 การกรองแบบไหลขึ้นนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้น



รูปที่ 39 เครื่องกรองแบบน้ำไหลขึ้น

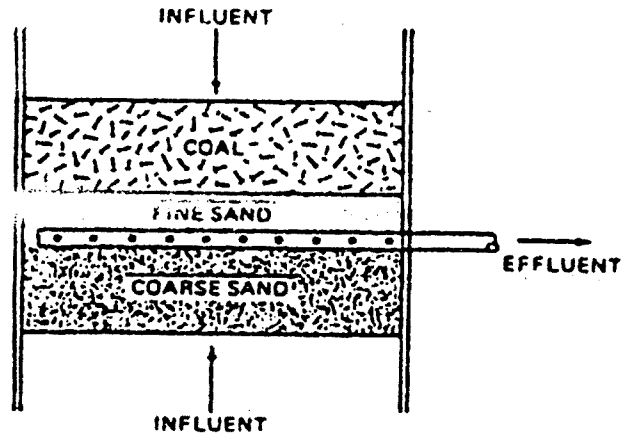
เพื่อให้ใช้ประโยชน์จากสารกรองได้เต็มที่ ทั้งนี้เนื่องจากการกรองแบบกรองเร็ว และให้น้ำไหลจากข้างบนลงล่างไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารกรองได้เต็มที่ ทั้งๆที่มีชั้นทรายลึกประมาณ 75 เซนติเมตร แต่ใช้ประโยชน์ได้เพียง 5 - 8 เซนติเมตรเท่านั้น สาเหตุก็เนื่องมาจากการเรียงตัวของเม็ดทรายหลังจากการล้างเครื่องกรองซึ่งจะเป็นไปในลักษณะที่มีทรายเม็ดละเอียดอยู่ข้างบนและเม็ดหยาบอยู่ข้างล่าง ดังแสดงในรูปที่ 40

ค. แบบไหลสองทาง (biflow filter) เครื่องกรองแบบนี้ น้ำจะไหลเข้าทั้งทางด้านบนและด้านล่างแล้วไหลออกตรงกลาง ดังในรูปที่ 41 ปัจจุบันมีการใช้เครื่องกรองดังกล่าวในประเทศรัสเซียและเนเธอร์แลนด์



รูปที่ 40 การเรียงตัวของเม็ดสารกรองในเครื่องกรองแบบชั้นกรองเดียว





รูปที่ 41 เครื่องกรองแบบน้ำไหล 2 ทาง

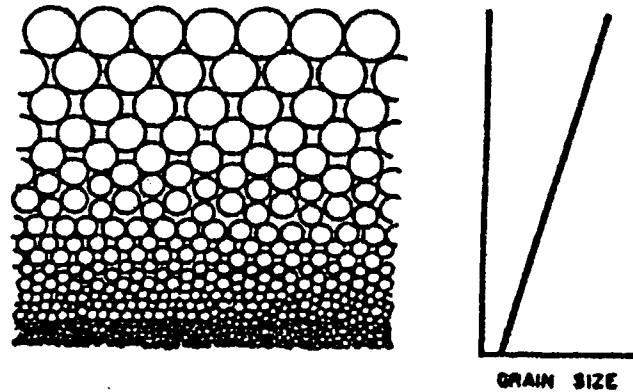
3.1.2 การจำแนกตามจำนวนชนิดของสารกรองที่ใช้ เครื่องกรองสามารถที่จะแบ่งตามจำนวนชนิดของสารกรองที่ใช้ได้ดังนี้

ก. แบบชั้นกรองเดียว (single media filter) เป็นเครื่องกรองที่มีชั้นกรองเป็นสารกรองชนิดเดียว ถ้าสารกรองเป็นทรายจะเรียกว่า เครื่องกรองทราย แต่ถ้าสารกรองเป็นถ่านก็จะเรียกว่า เครื่องกรองถ่าน

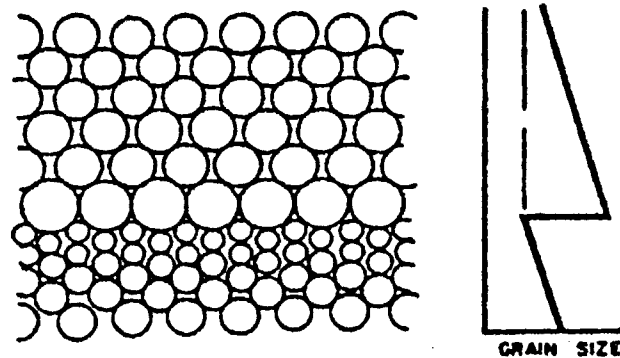
ข. แบบหลายชั้นกรอง เป็นเครื่องกรองที่มีชั้นกรองหลายชั้น ซึ่งเป็นสารกรองต่างชนิดที่มีขนาดและความถ่วงจำเพาะต่างกัน สารกรองที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมี 4 ชนิด คือ

- ทราย มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.65 ขนาดที่ใช้ประมาณ 0.5 มม.
- แอนทราไซท์ มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.5 ขนาดที่ใช้ประมาณ 1 มม.
- ทรายกาเน็ท มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.8 ขนาดที่ใช้ประมาณ 0.3 มม.
- อิลมิไนต์ มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 4.8 ขนาดที่ใช้เล็กกว่า 0.3 มม.

ในทางทฤษฎีนั้นเครื่องกรองแบบกรองเร็วที่ดีที่สุดจะต้องมีการเรียงตัวของเม็ดสารกรองจากขนาดใหญ่ไปหาขนาดเล็กอย่างสม่ำเสมอตามทิศทางการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 42 ภายหลังจากการล้างเครื่องกรอง การจัดเรียงตัวของสารกรองก็จะเป็นไปในลักษณะที่มีเม็ดสารกรองขนาดใหญ่อยู่ข้างบนและขนาดเล็กอยู่ข้างล่างตามเดิม การจัดเรียงตัวของเม็ดสารกรองในเครื่องกรองแบบหลายชั้นนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 43



รูปที่ 42 การเรียงตัวของเม็ดสารกรองในเครื่องกรองแบบอุดมคติ



รูปที่ 43 การเรียงตัวของเม็ดสารกรองในเครื่องกรองแบบสองชั้นกรอง

### 3.2 เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (rapid sand filter)

เครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วเป็นเครื่องกรองที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โดยเฉพาะในระบบประปาขนาดใหญ่ จนอาจถือได้ว่าเครื่องกรองชนิดนี้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานของอุตสาหกรรมการผลิตน้ำ เครื่องกรองดังกล่าวมักมีทรายเป็นสารกรองปละมีการเรียงขนาดจากละเอียดไปหาหยาบตามทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งตามปกติซึ่งตามปกติ น้ำจะไหลจากข้างบนลงล่างเสมอ นอกจากเวลาล้างเครื่องกรองซึ่งจะกระทำโดยการปล่อยให้น้ำไหลย้อนทิศทางการกรอง โดยปกติเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็วมักเป็นแบบถังเปิดฝา และน้ำไหลด้วยแรงธรรมชาติ

#### 3.2.1 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกรองเร็ว

เครื่องกรองเร็วโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 44

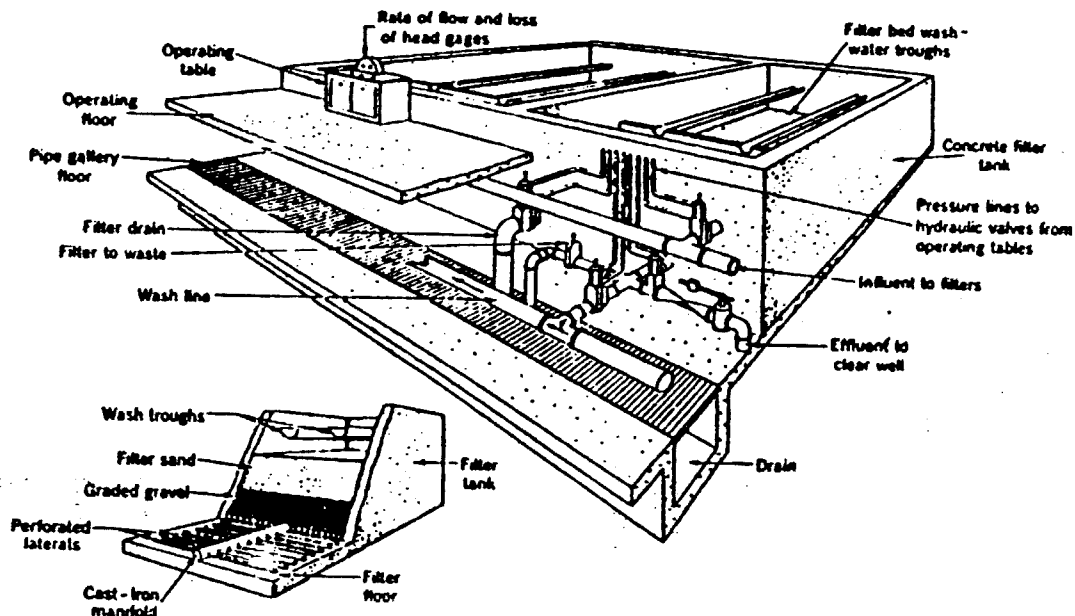
ซึ่งมีดังนี้

- ชั้นสารกรองและชั้นวัสดุรองรับสารกรอง

- ระบบระบายน้ำที่กรองแล้ว
- ระบบล้างเครื่องกรอง
- ระบบท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออก
- ห้องเก็บท่อและวาล์วต่างๆ
- ระบบควบคุมเครื่องกรอง

ก. ชั้นสารกรอง ชั้นสารกรองนี้เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งของเครื่องกรองเร็ว โดยที่คุณภาพของน้ำที่กรองได้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวกรองและขนาดของรูพรุนของสารกรอง กล่าวคือ สารกรองที่มีพื้นที่ผิวกรองสูงและมีรูพรุนขนาดเล็กก็จะกรองน้ำได้ดี นั่นก็คือชั้นสารกรองที่มีขนาดเล็กจะกรองได้ดีกว่าที่มีขนาดใหญ่ แต่อายุการใช้งานของชั้นสารกรองที่มีขนาดเล็กดังกล่าวจะสั้น เนื่องจากเกิดการอุดตันได้ง่าย

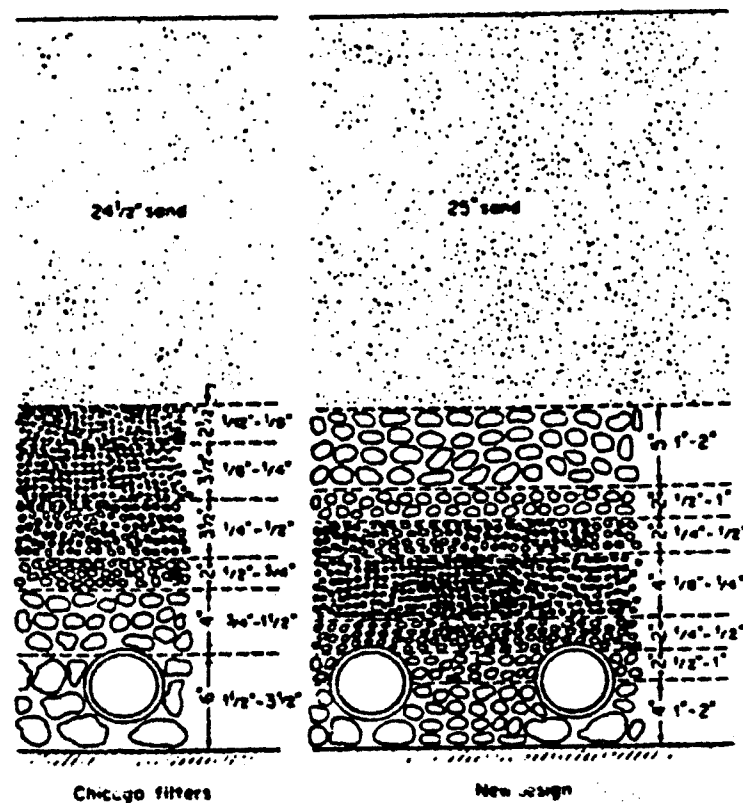
สารกรองที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการผลิตน้ำประปา ก็คือ ททราย ซึ่งปกติจะใช้ทรายจากแม่น้ำ ทั้งนี้เพราะหาได้ง่ายและราคาไม่แพง ทรายที่เก็บได้ตามธรรมชาติจากแม่น้ำดังกล่าวมักมีขนาดใหญ่เล็กคละกันไปและบางขนาดก็อาจจะใหญ่หรือเล็กเกินกว่าที่จะนำมาใช้เป็นทรายกรองได้ ดังนั้นก่อนที่จะนำเอาทรายดังกล่าวมาใช้เป็นทรายกรองจึงต้องมีราคัดขนาดของทรายเพื่อให้ได้มาตรฐานเสียก่อน



รูปที่ 44 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว

ข. ชั้นวัสดุรองรับสารกรอง ชั้นวัสดุรองรับสารกรองนี้ทำหน้าที่รองรับสารกรองและป้องกันมิให้สารกรองหนีหลุดออกไปพร้อมกับน้ำที่กรองแล้ว ชั้นวัสดุรองรับสารกรองดังกล่าวมักเป็นชั้นกรวดหรือหินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.6 – 5 เซนติเมตร เรียงกันเป็นชั้นๆตามลำดับขนาดและมีความสูงรวมกันประมาณ 0.25 – 0.60 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 45 โดยปกติขนาดของชั้นทรายโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 0.45 – 0.75 เมตร ถ้าใช้กรวดเป็นชั้นวัสดุรองรับทรายก็จะมีชั้นตัวกลางทั้งหมด 1.0 – 1.3 เมตร ในกรณีที่ใช้ filter floor แบบที่ไม่ใช้กรวดก็จะมีแต่เพียงชั้นทรายเท่านั้น

ค. ระบบระบายน้ำที่กรองแล้ว ระบบนี้ทำหน้าที่รวบรวมน้ำที่กรองแล้วและส่งไปเก็บไว้ในบ่อเก็บน้ำใส นอกจากนี้ยังทำหน้าที่กระจายน้ำเพื่อล้างเครื่องกรองด้วย ระบบระบายน้ำที่กรองแล้วสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

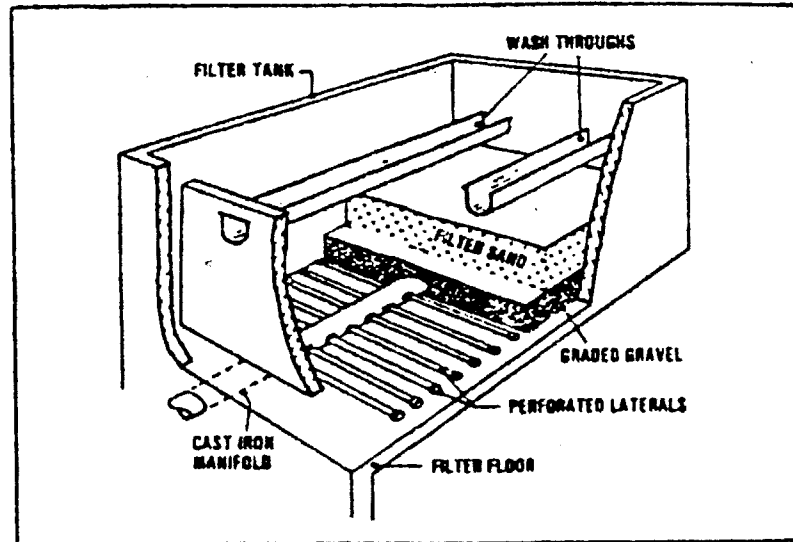


(ก)

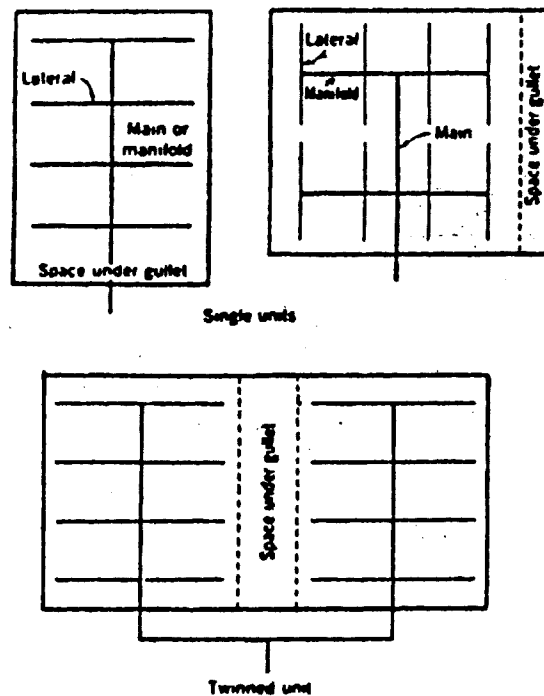
(ช)

รูปที่ 45 ชั้นวัสดุรองรับสารกรอง (ก) แบบไม่มีสมดุลย์ และ (ข) แบบมีสมดุลย์

- ระบบระบายน้ำแบบท่อ ระบบระบายน้ำแบบนี้ใช้ท่อเจาะรู ซึ่งประกอบด้วยท่อหลักที่เรียกว่า manifold และท่อย่อยที่เรียกว่า lateral ต่อเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 46 การจัดวางท่อดังกล่าวทำได้หลายแบบขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องกรอง ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 47



รูปที่ 46 ระบบระบายน้ำแบบท่อ



รูปที่ 47 ลักษณะการจัดวางท่อระบายน้ำได้ชั้นกรองแบบต่างๆ

ระบบระบายน้ำแบบท่อนี้เป็นแบบเดิมที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปในไทย ระบบดังกล่าวจะต้องใช้ร่วมกับกรวดเสมอ โดยให้กรวดเป็นชั้นวัสดุรองรับชั้นทราย การเจาะรูบนท่อขอย่นนั้นทำได้ 2 แบบคือ แบบ single orifice และ double orifice สำหรับข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบระบบระบายน้ำแบบท่อนี้มีดังนี้คือ

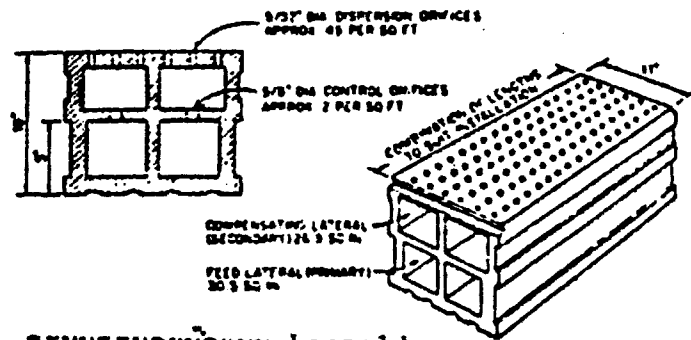
- อัตราส่วนของพื้นที่ของท่อขอย่นต่อพื้นที่รวมของรูเจาะ อยู่ในช่วง 2 : 1 ถึง 4 : 1
- พื้นที่รวมของรูเจาะอยู่ในช่วง 0.15 – 0.5 % ของพื้นที่ถึงกรอง
- อัตราส่วนของพื้นที่ของท่อหลักต่อด้วยพื้นที่ของท่อขอย่นอยู่ในช่วง 1.5 : 1 ถึง 4 : 1
- เส้นผ่าศูนย์กลางของรูเจาะอยู่ในช่วง 1/4 ถึง 3/4 นิ้ว
- ระยะห่างระหว่างรูเจาะอยู่ในช่วง 3 ถึง 12 นิ้ว (วัดจากจุดศูนย์กลาง)
- ระยะห่างระหว่างท่อขอย่นควรใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างรูเจาะ

- ระบบระบายน้ำแบบพื้น ระบบระบายน้ำแบบพื้นในบางครั้งอาจเรียกว่า พื้นปลอม (false floor) ระบบระบายน้ำดังกล่าวไม่จำเป็นต้องมีชั้นรองรับวัสดุสารกรอง เนื่องจากมันสามารถรองรับทรายได้โดยตรงทำให้สามารถลดความสูงของถังกรองได้ ตัวอย่างของระบบระบายน้ำแบบพื้นชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 48

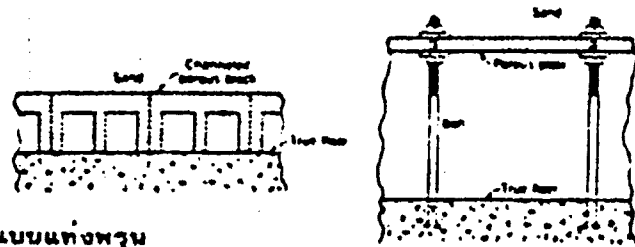
ง. ระบบล้างเครื่องกรอง การล้างเครื่องกรองแบบกรองเร็วนั้นใช้การล้างย้อน ดังแสดงในรูปที่ 49 อัตราการไหลของน้ำล้างย้อนนิยมใช้ในช่วง 24 – 56 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง-ตารางเมตร ซึ่งจะทำให้ชั้นทรายขยายตัวตั้งแต่ 20 – 50 % และต้องมีความดันไม่น้อยกว่า 10 เมตรของน้ำ โดยทั่วไปนิยมใช้น้ำจากถังสูงในการล้างย้อนดังแสดงในรูปที่ 50 บางครั้งอาจใช้เครื่องสูบน้ำในการสูบน้ำล้างย้อนโดยตรงก็ได้ น้ำที่ใช้ในการล้างย้อนนี้ต้องเป็นน้ำใสที่ผ่านการกรองแล้วเท่านั้น การล้างย้อนในแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณ 6 – 10 นาทีหรือมากกว่าถ้าหากว่า น้ำล้นยังขุ่นอยู่

### 3.3 เครื่องกรองทรายแบบกรองช้า

เครื่องกรองทรายแบบกรองช้านี้เป็นระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในยุโรป มีอัตราการกรองน้ำช้ากว่าเครื่องกรองแบบกรองเร็วประมาณ 20 – 30 เท่า การเปรียบเทียบเครื่องกรองทรายแบบกรองช้ากับแบบกรองเร็วได้แสดงไว้ในตารางที่ 6 เครื่องกรองทรายแบบกรองช้านี้นอกจากจะสามารถแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำแล้ว ยังสามารถแยกและกำจัดเชื้อโรคและสารอินทรีย์ออกจากน้ำได้ด้วย ส่วนประกอบของเครื่องกรองทรายแบบกรองช้านี้ได้แสดงไว้ดังในรูปที่ 51



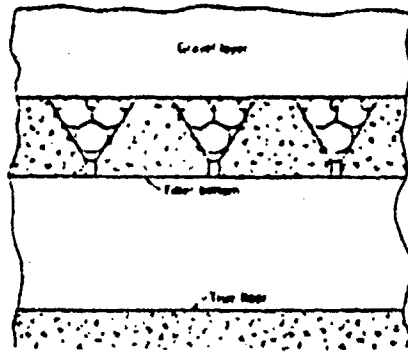
ก. ระบบระบายน้ำแบบ Leopold



ข. แบบแท่งพรุน

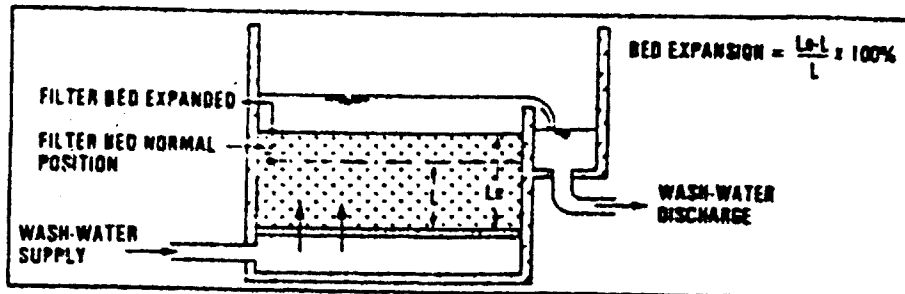
(Porous Block)

ค. แบบแผ่นพรุน (Porous Plate)

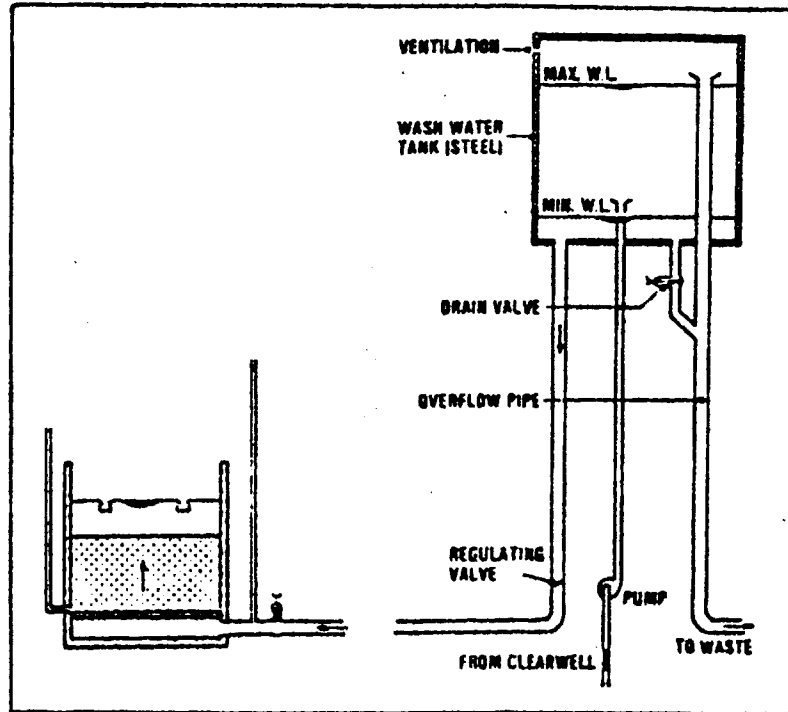


ง. แบบวีลเลอร์ (Wheeler)

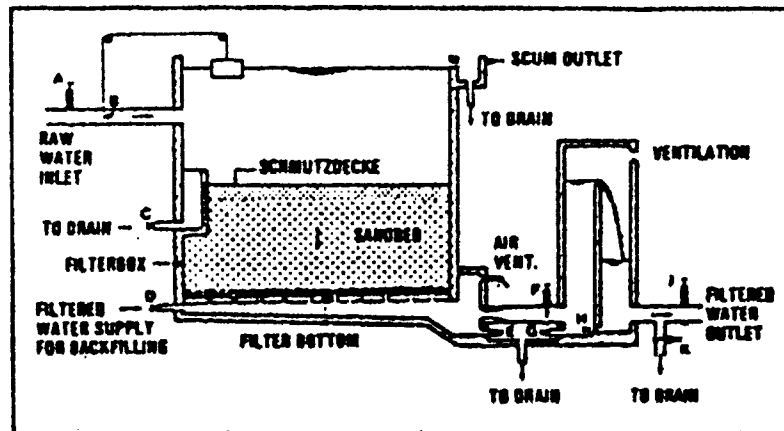
รูปที่ 48 ระบบระบายน้ำแบบพื้นชนิดต่างๆ



รูปที่ 49 การทำความสะอาดเครื่องกรองด้วยการล้างย้อน



รูปที่ 50 การใช้น้ำจากถังสูงในการล้างย้อน



รูปที่ 51 ส่วนประกอบของถังกรองทรายแบบกรองซ้ำ



ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเครื่องกรองทรายแบบกรองช้ากับแบบกรองเร็ว

	เครื่องกรองช้า	เครื่องกรองเร็ว
พื้นที่	ต้องการพื้นที่มาก	ต้องการพื้นที่น้อย
ปริมาณทรายกรอง	ต้องการทรายกรองปริมาณมาก	ต้องการทรายกรองน้อย
คุณภาพของทรายกรอง	ต้องการทรายที่มีขนาดสัมฤทธิ์ 0.2 – 0.4 มม. และสัมประสิทธิ์ ความไม่สม่ำเสมอ 2 – 4	ต้องการทรายที่มีขนาดหยาบกว่า คือ มีขนาดสัมฤทธิ์ 0.36 – 0.6 มม. และสัมประสิทธิ์ความไม่ สม่ำเสมอ 1.2 – 1.8
ความหนาของชั้นทรายกรอง	0.6 – 1.2 m	0.45 - 0.75 m
คุณภาพของน้ำดิบ	ต้องมีความขุ่นไม่เกิน 50 มก./ล	ต้องผ่านกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการตกตะกอนก่อน
ความยืดหยุ่นในการ โอเปอเรต	ไม่มี	มี
อัตราการกรอง	0.1 - 0.2 m <sup>3</sup> / h-m <sup>2</sup>	4 - 5 m <sup>3</sup> / h-m <sup>2</sup>
ขนาดของถังกรอง	30 m x 60 m	6 m x 8 m ถึง 8 x 10 m
การกระจายขนาดของ สารกรอง	ขนาดเท่ากันหมด	สารกรองมีขนาดเล็กไปหาใหญ่ จากบนลงล่าง

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบเครื่องกรองทรายแบบกรองช้ากับแบบกรองเร็ว (ต่อ)

	เครื่องกรองช้า	เครื่องกรองเร็ว
ประสิทธิภาพ	สามารถกำจัดสารแขวนลอย เชื้อโรคและสารอินทรีย์	กำจัดได้เฉพาะสารแขวนลอย
ความยากง่ายในการควบคุม การกรอง	ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีความรู้ และประสบการณ์สูง	ยาก ต้องการผู้ที่มีความรู้และ ประสบการณ์สูง
อายุการใช้งาน	1 - 3 เดือน	24 - 48 ชั่วโมง
การทำความสะอาด	ขูดผิวหน้าทรายกรองออก 2 - 3 เซนติเมตร	การล้างย้อนด้วยน้ำสะอาด
การสูญเสียเฮด	15 - 75 เซนติเมตร	2 ถึง 4 เมตร
ปริมาณน้ำที่ต้องการใช้ในการ ล้างสารกรอง	0.2 ถึง 0.6 % ของน้ำที่กรองได้	2 - 4 % ของน้ำที่กรองได้
ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง	แพงเพราะต้องการพื้นที่ และ วัสดุก่อสร้างมาก	ถูกและประหยัด
ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา	น้อย	มาก

# กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำดื่ม

โดย

ผศ. ยุทธนา มหัจฉริยวงศ์

## กระบวนการฆ่าเชื้อโรค

กระบวนการฆ่าเชื้อโรคในน้ำมี 2 แบบคือ sterilization และ disinfection sterilization นั้น เป็นการทำลายจุลินทรีย์ทุกชนิดที่อยู่ในน้ำ ส่วน disinfection นั้น เป็นการฆ่าหรือกำจัดเฉพาะจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค หรือเป็นการทำให้น้ำมีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค อยู่ในปริมาณที่ต่ำมากจนไม่ทำให้เกิดการแพร่เชื้อโรค สำหรับในกระบวนการผลิตน้ำประปานิยมใช้กระบวนการ disinfection ในการฆ่าเชื้อโรค กระบวนการดังกล่าวนี้ถือว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญในการผลิตน้ำประปา ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุประสงค์หลักของการผลิตน้ำประปา คือ การผลิตน้ำดื่มที่ปลอดภัย ถึงแม้ว่าน้ำที่ผลิตได้อาจจะมี มีสี มีกลิ่น แต่ถ้าดื่มแล้วไม่เกิดโรค ก็อาจถือได้ว่าบรรลุเป้าหมายแล้ว กระบวนการ disinfection นี้ สามารถทำได้หลายวิธี อย่างเช่น โดย การใช้ความร้อน สารเคมี หรือโดยการใช้รังสีแกมมา

### 1. การใช้ความร้อน

วิธีการใช้ความร้อนที่นิยมใช้ก็คือ การต้ม การต้มนี้เหมาะที่จะใช้กับน้ำปริมาณน้อย เช่น น้ำดื่ม หรือน้ำที่นำมาปรุงอาหาร และใช้ในกรณีฉุกเฉิน อย่างเช่น ในช่วงที่มีการระบาดของโรคที่แพร่ทางน้ำ เป็นต้น

### 2. การใช้สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคเรียกว่า disinfectant disinfectant ที่มีความมีประสิทธิภาพดังนี้คือ

- ฆ่าเชื้อโรคได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
- ละลายน้ำได้ง่ายตามความเข้มข้นที่ต้องการ
- สามารถมีฤทธิ์การฆ่าเชื้อโรคตกค้างอยู่ในน้ำได้ภายหลัง เป็นระยะเวลาานพอควร
- ไม่ให้กลิ่นและรสในน้ำ
- ไม่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค
- ตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นในน้ำได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว

- ขนส่ง เคลื่อนย้าย และใช้งานได้ง่าย
- มีขายทั่วไป หาซื้อได้ง่าย และ
- ราคาถูก

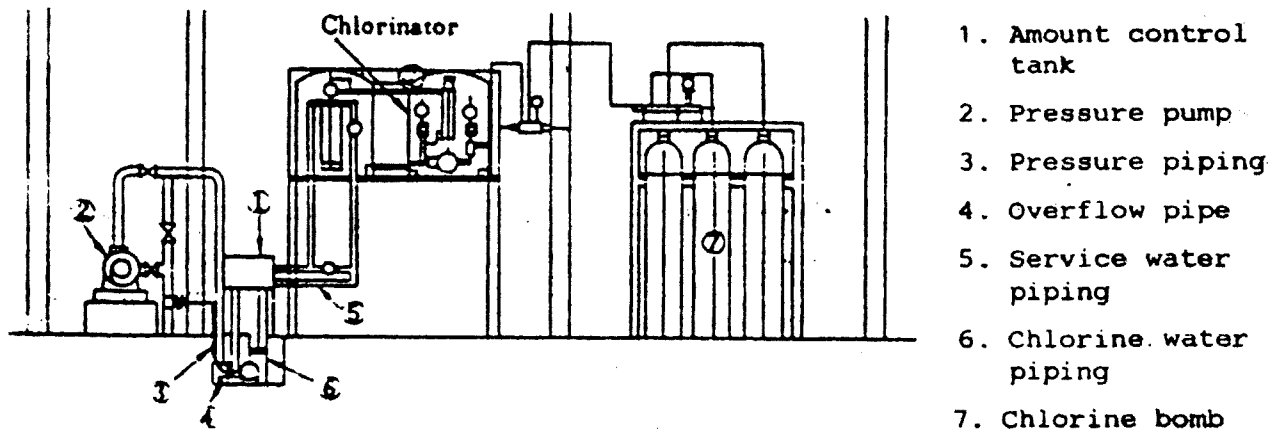
disinfectant ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบันคือ คลอรีน และการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนนี้เรียกว่า คลอรีเนชัน นอกจากนี้ก็ยังมีการใช้สารเคมีชนิดอื่นอีกอย่างเช่น คลอรีนไดออกไซด์ โอโซน ฯลฯ

## 2.1 คลอรีเนชัน

### 2.1.1 ชนิดของคลอรีน

คลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรคมีหลายแบบดังนี้คือ

ก. ก๊าซคลอรีน ;  $Cl_2$  ก๊าซคลอรีนที่มีจำหน่ายทั่วไปจะอยู่ในรูปของเหลว บรรจุถังภายใต้ความดันประมาณ 40-80 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เวลาใช้งานก็ค้ำท่อกาออกมาแล้วป้อน ก๊าซให้ผสมกับน้ำสะอาดก็จะได้น้ำคลอรีน แล้วจึงป้อนน้ำคลอรีนเข้าเส้นท่อที่มาจากถังกรองและจะเข้า ถังน้ำใส ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเติมก๊าซคลอรีนลงในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรค

ข. ปูนคลอรีน ปูนคลอรีนหรือผงฟอกขาวนี้เป็นส่วนผสมของแคลเซียม-คลอไรด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮโปคลอไรด์ ปูนคลอรีนทั้งกล่าวมีลักษณะเป็นผง ซึ่งผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาของปูนขาวกับคลอรีน และมี available chlorine อยู่ในช่วง 27-37%

ค. แคลเซียมไฮโปคลอไรต์;  $\text{Ca}(\text{OCl})_2$  แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ที่มีจำหน่ายทั่วไปมี 2 แบบคือ แบบสารละลายซึ่งจะมี available chlorine ประมาณ 6% กับแบบผงซึ่งมี available chlorine ประมาณ 70-80% และเป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก ในระบบประปาขนาดเล็กของไทย

ง. โซเดียมไฮโปคลอไรต์;  $\text{NaOCl}$  โซเดียมไฮโปคลอไรต์ที่มีจำหน่าย ในรูปของสารละลายเท่านั้น โดยมี available chlorine ประมาณ 5-10% สารนี้เหมาะ ที่จะใช้กับโรงประปาขนาดเล็กหรือสระว่ายน้ำ เนื่องจากโซเดียมไฮโปคลอไรต์นี้มีเสถียรภาพต่ำ เสื่อม คุณภาพได้เร็ว ดังนั้นจึงควรเก็บรักษาเอาไว้ในที่เย็นและมีค อายุในการเก็บนั้นก็ไม่ควรเกิน 60-90 วัน

ลักษณะการใช้งานของปูนคลอรีน แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ และโซเดียม ไฮโปคลอไรต์ นั้น กระทำโดยการนำสารดังกล่าวมาละลายน้ำ แล้วป้อนเข้าเส้นท่อจากถังกรองไปยัง น้ำใส หรือเติมลงในถังน้ำใสโดยตรงก็ได้ หรือในกรณีที่ต้องสูบน้ำใสขึ้นที่สูงแล้วจ่ายน้ำโดย gravity ก็อาจเติมคลอรีนพร้อมกับการสูบน้ำใสขึ้นที่สูงก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 2

### 2.1.2 ปฏิกิริยาของคลอรีนกับน้ำ

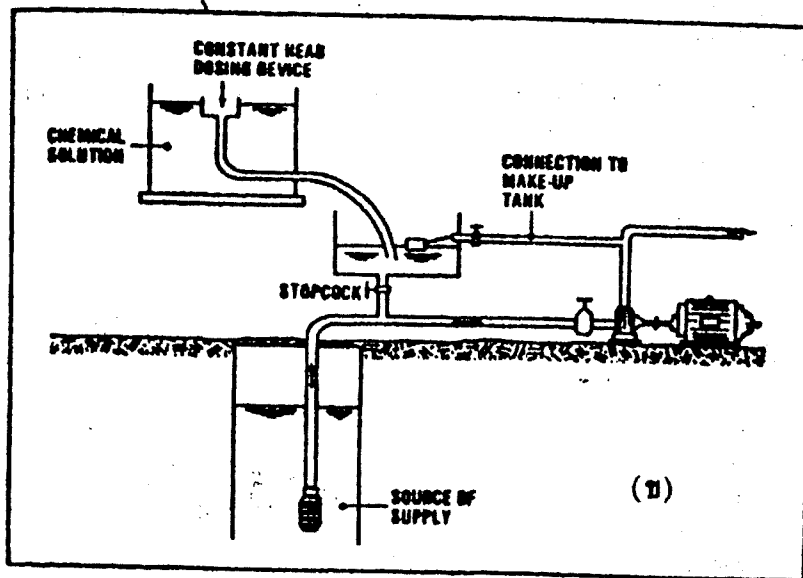
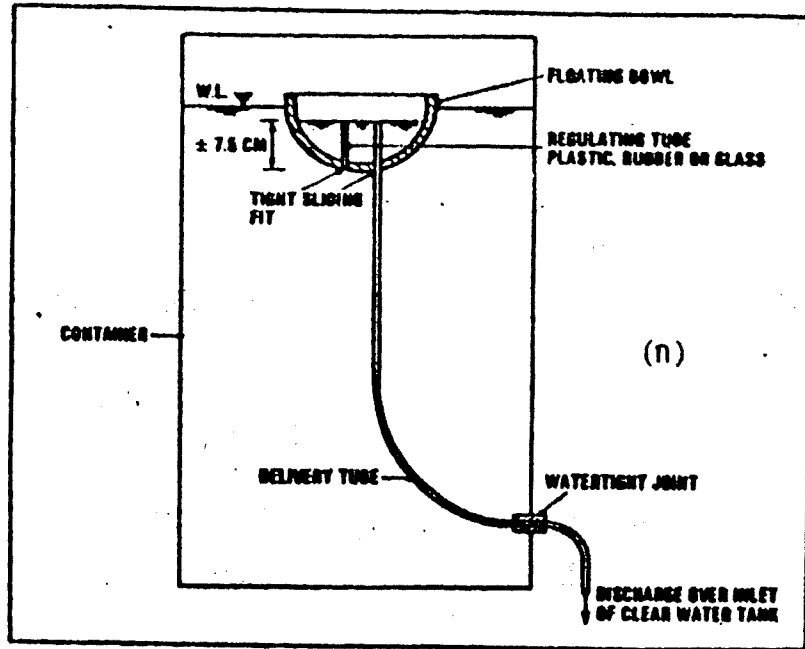
ในกรณีของน้ำบริสุทธิ์ เมื่อเติมกาซคลอรีนลงในน้ำ กาซคลอรีนจะทำ ปฏิกิริยากับน้ำให้กรดไฮโปคลอรัส ดังแสดงในสมการที่ 1



กรดไฮโปคลอรัสที่ได้นี้สามารถแตกตัวให้ไฮออนไฮโปคลอไรต์ ดังแสดงในสมการที่ 8.2



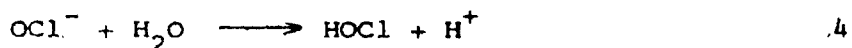
การแตกตัวของไฮออนไฮโปคลอไรต์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้หรือไม่ขึ้นอยู่กับพีเอชของน้ำ โดยพบว่า การแตกตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 ในกรณีของการใช้สารประกอบคลอรีน ตัวอย่างเช่น โซเดียมไฮโปคลอไรต์ เมื่อละลายน้ำมันจะแตกตัวให้ไฮออนไฮโปคลอไรต์ดังแสดงในสมการ ที่ 3 และไฮออนไฮโปคลอไรต์ที่เกิดขึ้นก็จะทำปฏิกิริยากับน้ำค่อ ให้กรดไฮโปคลอรัส ดังแสดงใน สมการที่ 4 จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าไม่ว่าจะใช้คลอรีนแบบไหน สิ่งที่จะได้ภายหลังจากการทำ



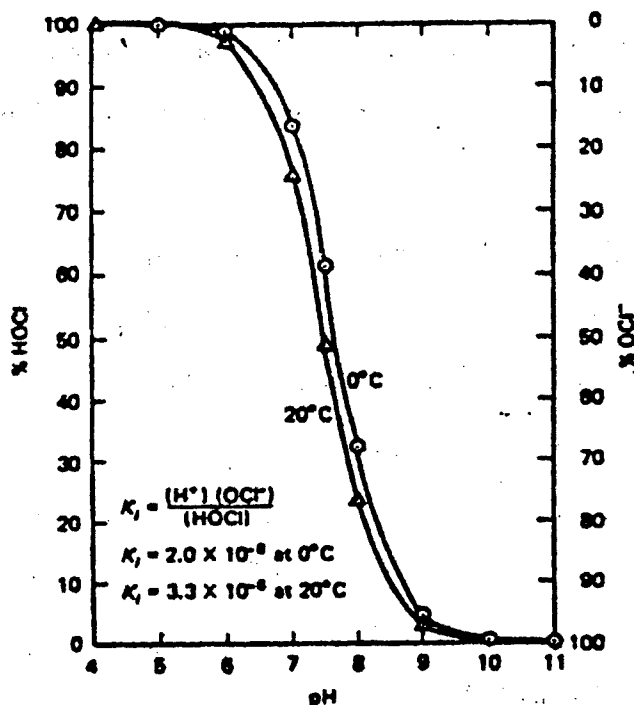
รูปที่ 2 การเติมสารประกอบคลอรีนลงในน้ำ

(ก) การป้อนเข้าถังน้ำใส

(ข) การเติมคลอรีนพร้อมกับการสูบน้ำใสขึ้นถังสูง



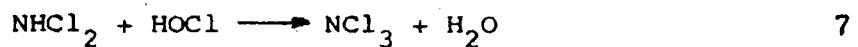
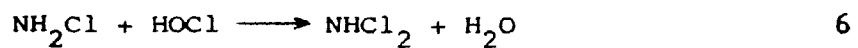
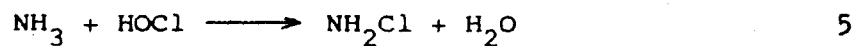
ปฏิกิริยากับน้ำก็คือ กรดไฮโปคลอรัสและไอออนไฮโปคลอไรด์ สารทั้ง 2 ดังกล่าวเป็นสารที่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคและเรียกว่าเป็น คลอรีนอิสระตกค้าง (free residual chlorine) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารทั้ง 2 ในการฆ่าเชื้อโรค พบว่า กรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าไอออนไฮโปคลอไรด์ประมาณ 80-100 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากกรดไฮโปคลอรัสมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า และมีโมเลกุลขนาดเล็กมาก มันจึงสามารถซึมผ่านผนังเซลล์ของเชื้อโรคแล้วเข้าไปทำลายภายในเซลล์ได้ ในขณะที่ไอออนไฮโปคลอไรด์ซึ่งมีประจุลบซึมผ่านไม่ได้จึงทำลายได้แต่ผิวนอกของเซลล์เท่านั้น ดังนั้นเมื่อน้ำมีพีเอชค่า ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคจึงสูงกว่าเมื่อน้ำมีพีเอชสูง เพราะที่พีเอชค่านั้นคลอรีนอิสระตกค้างส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกรดไฮโปคลอรัส



รูปที่ 3 การแตกตัวของกรดไฮโปคลอรัสในน้ำที่พีเอชต่าง ๆ



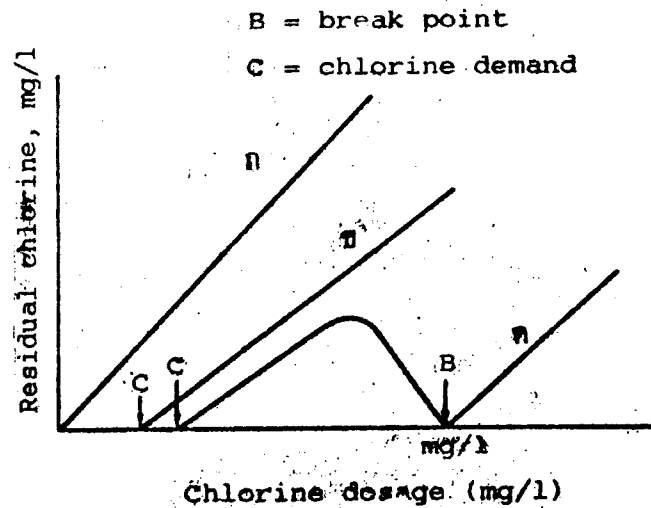
ในกรณีที่มีสารเจือปนอยู่ คลอรีนที่เติมลงไปสามารถทำปฏิกิริยากับสารเจือปนบางชนิดได้ ตัวอย่างเช่น แอมโมเนีย เหล็ก 2+ แมงกานีส 2+ และสารอินทรีย์บางชนิด ถ้าไม่มีแอมโมเนียเจือปนอยู่ คลอรีน จะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียให้สารประกอบคลอรามิน ดังแสดงในสมการที่ 5- 7 สารประกอบคลอรามินดังกล่าวมีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อโรคและเรียกว่าเป็นคลอรีนรวมตัวตกค้าง (combined residual chlorine) คลอรีนรวมตัวตกค้างนี้มีประสิทธิภาพ



ในการฆ่าเชื้อโรคได้น้อยกว่าคลอรีนอิสระตกค้าง กล่าวคือ ถ้าฆ่าเชื้อโรคชนิดเดียวกันปริมาณเท่ากัน ภายในเวลาเท่ากัน จะต้องใช้คลอรีนรวมตัวตกค้างมากกว่าคลอรีนอิสระตกค้างถึง 25 เท่า หรือถ้าฆ่าเชื้อโรคชนิดเดียวกันปริมาณเท่ากันโดยใช้ความเข้มข้นของคลอรีนเท่ากัน พบว่าคลอรีนอิสระตกค้าง จะใช้เวลาในการฆ่าน้อยกว่าคลอรีนรวมตัวตกค้างถึง 100 เท่า แต่อย่างไรก็ตามคลอรีนรวมตัวตกค้าง ก็มีข้อดีตรงที่มีเสถียรภาพมากกว่าคลอรีนอิสระ จึงตกค้างได้นานกว่า นอกจากนี้ยังไม่ทำให้เกิดรสในน้ำที่มีสารประกอบฟีนอลด้วย

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่าในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้น เนื่องจากน้ำประปาไม่ใช่ น้ำบริสุทธิ์และยังมีสารอื่น ๆ ปนอยู่ ดังนั้นเมื่อเติมคลอรีนลงในน้ำประปา คลอรีนส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปในการทำปฏิกิริยากับสารเจือปน และถ้าคลอรีนที่เติมลงไปมากเกินไปก็จะมีคลอรีนอิสระตกค้างอยู่ในน้ำ ปริมาณของคลอรีนที่ต้องเติมจึงมากกว่าปริมาณของคลอรีนตกค้างที่ต้องการ เมื่อนำปริมาณคลอรีนที่เติมมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกับปริมาณคลอรีนตกค้าง ก็จะได้ดังแสดงในรูปที่

4 การเติมคลอรีนลงในน้ำเพื่อฆ่าเชื้อโรคจนกระทั่งมีคลอรีนอิสระตกค้างในน้ำนั้น เรียกว่า break-point หรือ free residual chlorination สำหรับการบอกความเข้มข้นของคลอรีนในน้ำประปานั้นจะไม่บอกปริมาณคลอรีนที่เติมแต่จะบอกปริมาณคลอรีนตกค้าง และการบอกปริมาณคลอรีนตกค้างดังกล่าวจะต้องบอกด้วยว่าเวลาที่เวลาสัมผัสเท่าใด โดยทั่วไปแล้วในการผลิตน้ำประปา นิยมให้น้ำประปามีคลอรีนตกค้างอยู่ในช่วง 0.3-0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายหลังจากเวลาสัมผัส 20 นาที และให้มีเวลาสัมผัสไม่น้อยกว่า 20-30 นาที



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคลอรีนที่เติมกับคลอรีนตกค้างของน้ำชนิดต่าง ๆ ก. น้ำบริสุทธิ์ ข. น้ำประปา ค. น้ำที่มีแอมโมเนียและสารอื่น ๆ ปนอยู่

2.1.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีนมีดังนี้คือ

ก. ชนิดและจำนวนจุลินทรีย์ที่ต้องการทำลาย จุลินทรีย์บางชนิดมีความทนต่อสารออกซิแดนท์ค่อนข้างสูง และโดยธรรมชาติยังมีจุลินทรีย์ในน้ำมากเท่าไร ประสิทธิภาพในการกำจัดคลอรีนก็จะลดลงตามนั้น

ข. ชนิดและความเข้มข้นของคลอรีนที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ถ้าใช้คลอรีนอิสระตกค้างในการฆ่าเชื้อโรค ประสิทธิภาพในการฆ่าจะสูงกว่าการใช้คลอรีนรวมตัวตกค้าง และยังใช้ความเข้มข้นของคลอรีนสูงเท่าไร ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคก็จะดีขึ้นตามด้วย

ค. เวลาสัมผัส เวลาสัมผัสเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคของคลอรีน ทั้งนี้เนื่องจากว่าถ้าคลอรีนมีเวลาสัมผัสกับเชื้อโรคน้อย โอกาสที่คลอรีนจะฆ่าเชื้อโรคได้ก็จะลดลง ดังนั้นที่เวลาสัมผัสนานประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคก็จะดีกว่าที่เวลาสัมผัสสั้น

ง. อุณหภูมิของน้ำ โดยทั่วไปพบว่าเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคจะดีขึ้นตามไปด้วย เพราะที่อุณหภูมิสูงอัตราเร็วของการทำปฏิกิริยาระหว่างคลอรีนกับเซลล์ของสิ่งมีชีวิตจะสูงขึ้น และจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่ทนต่ออุณหภูมิสูง

จ. คุณภาพน้ำ คุณภาพน้ำที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคมากคือ ความขุ่น โดยพบว่าน้ำที่มีความขุ่นสูงจะทำให้ประสิทธิภาพดังกล่าวลดลง เนื่องจากความขุ่นหรือสารแขวนลอยสามารถเป็นเกราะป้องกันไม่ให้เชื้อโรคสัมผัสกับคลอรีนได้

ฉ. พีเอชของน้ำ ดังได้กล่าวมาแล้วว่าพีเอชของน้ำนั้นมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของกรดไฮโปคลอรัส ดังนั้นที่พีเอชต่ำประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคจะดีกว่าที่พีเอชสูง เนื่องจากกรดไฮโปคลอรัสแตกตัวได้น้อย นอกจากนี้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ (ยกเว้นรา) ยังทนต่อสภาพด่างได้ดีกว่าสภาพกรดด้วย

#### 2.1.4 ชนิดของกระบวนการคลอรีเนชัน

ในขั้นตอนการผลิตน้ำประปาอาจมีการเติมคลอรีนได้หลายครั้ง และในแต่ละครั้งจะมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เติมดังนี้

ก. prechlorination เป็นการเติมคลอรีนในน้ำดิบก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการทำน้ำให้สะอาด วัตถุประสงค์ของการทำคลอรีเนชันชนิดนี้ก็เพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและสาหร่ายอันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสี กลิ่น และรส ในน้ำ หรือเพื่อตกตะกอนสารเจือปนบางตัว เช่น เหล็ก และแมงกานีส หรือเพื่อฆ่าเชื้อโรคในกรณีที่น้ำดิบถูกปนเปื้อนมาก ๆ การทำ prechlorination นี้ ต้องตามด้วย postchlorination เสมอ

ข. postchlorination เป็นการเติมคลอรีนลงในน้ำภายหลังจากการผ่านกระบวนการทำน้ำให้สะอาดอื่น ๆ แล้ว วัตถุประสงค์ของการทำคลอรีเนชันแบบนี้คือ เพื่อฆ่าเชื้อโรค และเพื่อให้มีคลอรีนตกค้างสำรองไว้ฆ่าเชื้อโรคที่อาจปนเปื้อนเข้ามาในน้ำประปาได้ในระหว่างการจ่ายน้ำจากโรงประปาไปยังชุมชนผู้ใช้น้ำ

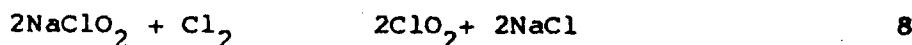
ค. rechlorination เป็นการเติมคลอรีนระหว่างทางจากจุดจ่ายน้ำกับจุดที่มีการใช้น้ำที่ห่างออกไปมาก ๆ โดยที่น้ำประปานั้นได้ผ่านการเติมคลอรีนมาแล้ว เพื่อรักษาระดับคลอรีนตกค้าง

นอกจากการแบ่งประเภทของคลอรีเนชันตามตำแหน่งของการเติมแล้ว อาจแบ่งตามปริมาณของคลอรีนที่เติมก็ได้ อย่างเช่น superchlorination ก็เป็นการเติมคลอรีน

ในปริมาณสูงมาก จนมีคลอรีนตกค้างสูง ๆ แล้วจึงทำ dechlorination superchlorination นี้ จะใช้ในกรณีที่มีโรคระบาดหรือในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการน้ำที่สะอาดมาก ๆ เช่น อุตสาหกรรม ทำน้ำอัดลม เป็นต้น ส่วน dechlorination นั้น เป็นการทำลายคลอรีนตกค้างที่มากเกินไป ออกจากน้ำซึ่งอาจจะทำโดยการกรองน้ำด้วยแอคทีเวคเต็คคาร์บอน การแอเรชันหรือการใช้สารเคมี อย่างเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมซัลไฟท์ หรือโซเดียมไบซัลไฟท์ ฯลฯ เติมน้ำลงในน้ำเพื่อ ให้ทำปฏิกิริยากับคลอรีนก็ได้

## 2.2 ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์

ก๊าซคลอรีนไดออกไซด์นี้จะต้องเตรียมแล้วใช้ทันที เนื่องจากเสื่อมคุณภาพเร็วมาก ดังนั้นถ้าต้องการฆ่าเชื้อโรคในน้ำด้วยก๊าซนี้ ระบบประปาจะต้องมีระบบที่ใช้ผลิตก๊าซดังกล่าวด้วย การเตรียมก๊าซดังกล่าวทำได้โดยการนำโซเดียมคลอไรด์มาทำปฏิกิริยากับก๊าซคลอรีน ดังแสดงในสมการที่ 8 ข้อดีของการใช้ก๊าซนี้คือ สามารถฆ่าเชื้อโรคได้ดีเท่า ๆ กันในช่วงพีเอช 6-10 ไม่รวมกับ



แอมโมเนียหรือสารอื่น ๆ ทำให้สิ้นเปลืองน้อยกว่าการใช้คลอรีน แต่อย่างไรก็ตาม ก๊าซดังกล่าวนี้ มีราคาแพง และในปัจจุบันยังไม่มีวิธีวัดปริมาณตกค้างที่มีประสิทธิภาพ การควบคุมระบบการฆ่าเชื้อโรค จึงทำได้ยาก

## 2.3 โอโซน

โอโซนเป็นสารออกซิแดนท์อย่างแรง และมีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงกว่าคลอรีนเกือบเท่าตัว โอโซนนั้นสามารถผลิตได้โดยการผ่านอากาศแห้งหรือออกซิเจนบริสุทธิ์เข้าไประหว่างขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่มีความต่างศักย์ประมาณ 15,000-20,000 โวลต์ โดยทั่วไปการผลิตโอโซนด้วยอากาศแห้ง จะผลิตโอโซนได้ไม่เกิน 30 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรของอากาศ แต่ถ้าผลิตด้วยก๊าซออกซิเจน จะผลิตได้ประมาณ 60-90 กรัมต่อลูกบาศก์เมตรของออกซิเจน

ข้อดีของการใช้โอโซนในการฆ่าเชื้อโรคก็คือ ใช้ในปริมาณต่ำเนื่องจากโอโซนมี ประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคสูง และสามารถฆ่าได้ทั้งสปอร์ของแบคทีเรียและไวรัส นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดกลิ่น สี และรสในน้ำได้ด้วย แต่โอโซนก็มีข้อเสียตรงที่มีราคาแพง ต้องผลิตโอโซนที่

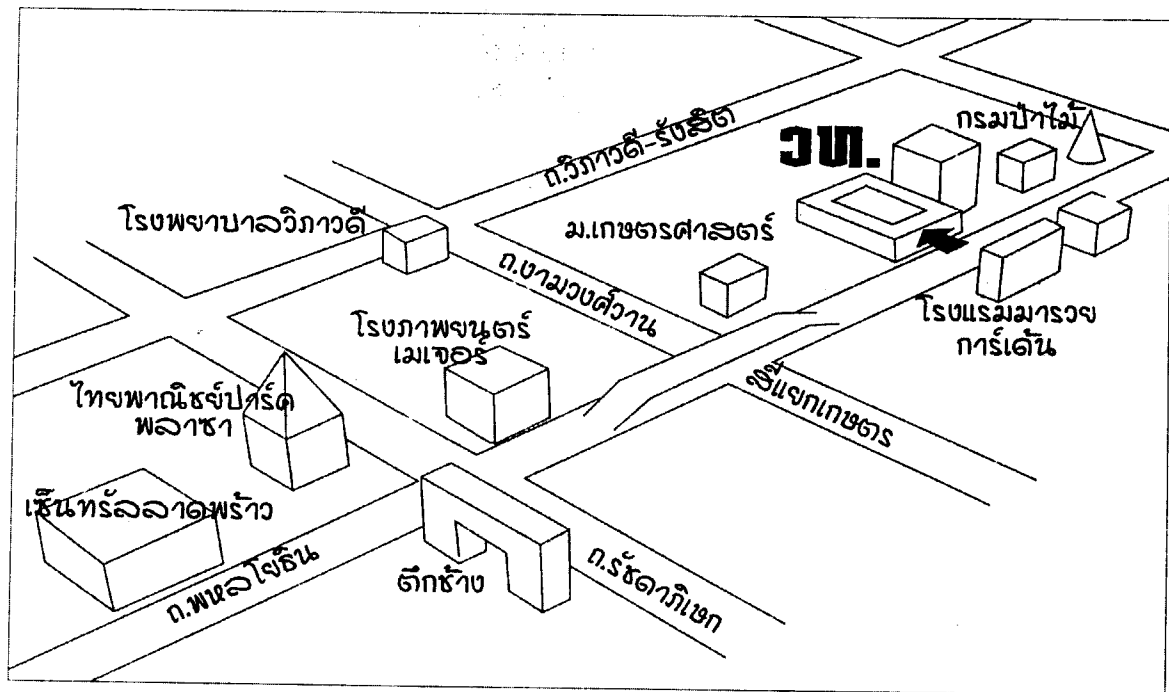
โรงปรอบา ถ้าไม่เช่นนั้นก็ต้องใช้ภาชนะบรรจุที่เป็นวัสดุที่ทนต่อการกักความร้อน ต้องใช้อุปกรณ์การเค็มที่ยุ่ยยากและซับซ้อน เพราะไอโซนละลายน้ำได้น้อย และที่สำคัญคือไม่มีฤทธิ์ตกค้าง เนื่องจากคงตัวอยู่ได้ชั่วระยะสั้นคือไม่เกิน 30 นาที จึงไม่เหมาะที่จะใช้ไอโซนในการฆ่าเชื้อโรคในระบบท่อส่งน้ำ

### 3 การใช้รังสีเหนือม่วง

การใช้รังสีเหนือม่วงในช่วงความยาวคลื่น 200-290 นาโนเมตร ผ่านเข้าไปในน้ำสามารถที่จะฆ่าเชื้อโรคได้ เพราะจุลินทรีย์หรือสารอินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นดังกล่าวได้ดี ในปัจจุบันรังสีเหนือม่วงที่ใช้กันอยู่ได้จากการเผาไฮปรอทที่ความดันต่ำหรือความดันปานกลางในหลอดแก้ว ซึ่งจะให้รังสีเหนือม่วงที่มีความยาวคลื่นแสงประมาณ 254 นาโนเมตรออกมา การฆ่าเชื้อโรคในน้ำทำได้โดยให้น้ำไหลผ่านหลอดแก้วรังสีเหนือม่วงโดยมีอัตราการไหลประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที การใช้รังสีดังกล่าวในการฆ่าเชื้อโรคมีข้อเสียตรงที่ราคาแพง ไม่มีฤทธิ์ตกค้าง และใช้ไม่ได้ดีกับน้ำขุ่น แต่อย่างไรก็ตามการฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธีนี้ไม่ทำให้เกิดคราบ และสารตกค้างที่เป็นพิษในน้ำ

Date Due		

BT 14907



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.)

196 ถนนพหลโยธิน จตุจักร กทม. 10900

โทร. 02 - 579 - 1121 - 30, 02 - 579 - 5515, 02 - 579 - 0160

แฟกซ์. 02 - 561 - 4771, 02 - 579 - 8533

E - mail : [tistr@tistr.or.th](mailto:tistr@tistr.or.th) [www.tistr.or.th](http://www.tistr.or.th)

663.6  
กรฝ

ศูนย์บริการเอกสารการวิจัยฯ



BT14907

เอกสารประกอบการฝึก