



## ทฤษฎีพื้นฐานของหน่วยปฏิบัติการที่เลือก

### การกรองด้วยวัสดุเม็ด (Granular-Medium Filtration)

การกรองด้วยวัสดุเม็ดนอกจากจะใช้ในกระบวนการผลิตน้ำดื่มแล้ว ยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกรองน้ำทั้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอย

การกรองเป็นกระบวนการทางกายภาพและทางเคมีสำหรับขจัด หรือ แยกสารแขวนลอยคอลลอยด์ (colloid) และพวกจุลชีพต่าง ๆ เช่น แอลจีแบคทีเรีย สาหร่าย ไวรัส ตลอดจน สี แมงกานีส และ เหล็กที่ถูกออกซิไดส์ ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำหรือเป็นตะกอนที่เกิดจากผลของ กระบวนการจับตัวและรวมตัวตกตะกอน น้ำที่เข้ากรองจะไหลผ่านช่องว่างของชั้นสารกรอง (filter media) ซึ่งจะดักจับสารต่าง ๆ ไว้

กระบวนการกรองประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ

- 1 การกรอง (Filtration)
- 2 การทำความสะอาด (Cleaning) วัสดุกรอง

กลไกของการกรอง (Particle-Removal Mechanisms)

(George T. and Franklin L., 1991)

กลไกของการกรองในวัสดุเม็ดประกอบด้วยรูปแบบหลักดังนี้

- 1 การดักกอนภาค (Straining)

การดักกอนภาคทางกล (Mechanical) อณูภาคขนาดใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างสารกรองจะถูกดักจับไว้ ไม่สามารถลอดผ่านสารกรองได้

การดักกอนภาคตามการไหล (Chance contact) อณูภาคขนาดเล็ก แม้จะสามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างสารกรองได้ แต่อาจจะถูกดักจับไว้หากอณูภาคนั้นไปสัมผัสกับวัสดุกรองในระหว่างที่ไหลผ่าน

## 2 การตกตะกอน (Sedimentation)

อนุภาคจะเคลื่อนที่และตกตะกอนลงบนสารกรองที่อยู่ชั้นสารกรอง

## 3 การสกัดกั้น (Interception)

อนุภาคที่เคลื่อนที่ตามการไหลจะถูกจับเมื่ออนุภาคนั้นสัมผัสกับผิวของสารกรอง

## 4 การยึดติด (Adhesion)

อนุภาคอาจยึดติดอยู่ที่ผิวของสารกรองและอนุภาคเหล่านี้ อาจเกาะรวมตัวกันจนเกิดการอุดตันของชั้นสารกรอง ทำให้เพิ่มแรงเฉือน (shear force) ขึ้นอย่างมาก

## 5 การจับตัวเป็นฟล็อก (Flocculation)

อนุภาคที่มีขนาดเล็กอาจรวมตัวกันเองหรือรวมกับอนุภาคขนาดใหญ่ กลายเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจนไม่สามารถลอดผ่านช่องว่างระหว่างสารกรองได้

กลไกการกรองที่กล่าวมาข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1

สารกรอง (Filter Medium) (ณรงค์ วุฑฒเสถียร, 2526)

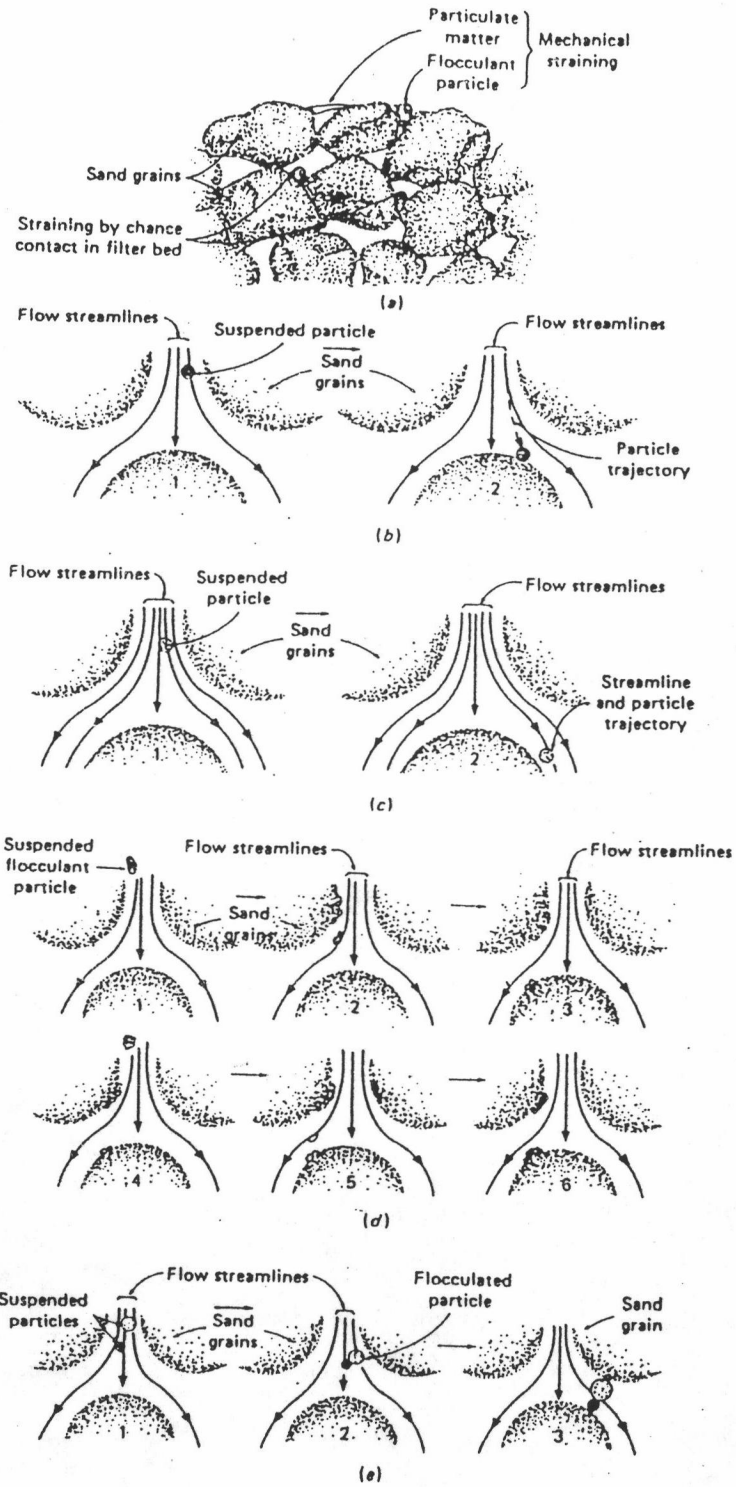
สารกรองที่ดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- 1 ป้องกันไม่ให้ตะกอนหรืออนุภาคแขวนลอยไหลผ่านสารกรองได้
- 2 ดักและจับตะกอนหรืออนุภาคแขวนลอยไว้อย่างแน่นพอเหมาะ เพื่อจะง่ายในการชะออกโดยการล้างกลับ
- 3 สามารถดักจับตะกอนไว้ปริมาณมากที่สุดโดยไม่อุดตันง่าย

ชนิดของสารกรอง

ทราย ทรายที่ใช้กรองน้ำส่วนใหญ่จะเป็นทรายซิลิกา แต่บางกรณีก็ใช้ไม่ได้ เพราะซิลิกาจะละลายน้ำเกิดปัญหาต่อไปในการใช้งาน นอกจากนี้กรวดและทรายที่ใช้สำหรับการกรองน้ำต้องไม่มีหินปูน (limestone) ซึ่งมีเนื้ออ่อนและละลายน้ำได้ดีปนอยู่ เพราะเมื่อใช้งานกรองน้ำแล้วมีการล้างและกวนมากเข้า จะทำให้มีการสึกกร่อนขนาดเล็กลงได้

แอนทราไซต์ เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของทรายและดักจับตะกอนและอนุภาคต่าง ๆ ได้มากกว่าทราย เพราะมีรูปร่าง



รูปที่ 4.1 กลไกการกรองผ่านสารกรอง : (a) การดักอนุภาค (b) การตักตะกอน (c) การสกัดกั้น (d) การยึดติด (e) การจับตัวเป็นฟลอค

เกลี้ยงกลมกว่า สิ้นเปลืองน้ำล้างในตอนล้างกลับน้อยลง ยืดอายุการใช้งานของ เครื่องกรอง สามารถกรองได้ที่อัตราการกรองสูงขึ้น

ตัวแปรของกระบวนการกรอง

### 1 ลักษณะสมบัติของน้ำเข้า (Influent Characteristics)

สิ่งสำคัญในลักษณะสมบัติของน้ำเข้ามี ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย ขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาค และ ความแข็งแรงของฟล็อก (floc strength) น้ำทั้งจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียระบบสลัดจ์กัมมันต์ส่วนใหญ่มิ ค่าของแข็งแขวนลอย อยู่ในช่วง 6-30 มก./ล. เนื่องจากความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย เป็นตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงมักใช้ ความขุ่น (turbidity) เป็นดัชนีวัดสมรรถนะของกระบวนการกรอง

### 2 ลักษณะสมบัติของสารกรอง

(Filter Medium Characteristics)

ขนาดเม็ดของสารกรองมีส่วนสัมพันธ์กับกระบวนการกรอง ในแง่ของความดันสูญเสียของน้ำใส (clear water headloss) และ การเพิ่มสะสมของความดันสูญเสีย (buildup of headloss)

Munsin T. (1971) รายงานว่าเพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำ ขนาดเม็ดของสารกรองที่ใช้ใน Dual media filtration ควรประกอบด้วย ขนาดของเม็ดทราย ประมาณ 0.45 มม. และ ขนาดของเม็ดแอนทราไซด์ ประมาณ 1.0 มม.

Contley และ Pitman (1960) กล่าวว่าปฏิบัติการกรองที่ใช้ขนาดเม็ดและความสูงของสารกรองที่เหมาะสมของทรายและแอนทราไซด์ ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ ทราย หรือ แอนทราไซด์ เพียงอย่างเดียว

Shull (1967) แนะนำให้ใช้สารกรองซึ่งประกอบด้วยชั้นของแอนทราไซด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.9 มม. ความสูงของชั้นประมาณ 50 ซม. อยู่ชั้นบน ส่วนชั้นล่างเป็นชั้นของทรายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.44 มม. ความสูงของชั้นประมาณ 15 ซม.

### 3 อัตราการกรอง (Filtration Rate)

อัตราการกรองเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้กำหนด ขนาดของถังกรองที่ต้องการ อัตราการกรองจะขึ้นกับ ความแข็งแรงของฟล็อก และ ขนาดเม็ดของสารกรอง จากการศึกษาพบว่า อัตราการกรอง 5-20 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. จะไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรอง

การวิเคราะห์กระบวนการกรอง

(George T. and Franklin L., 1991)

โมเดลคณิตศาสตร์ (mathematic model) ที่ใช้กับการกำจัดอนุภาค โดยสารกรองจะวางอยู่บนหลักการของ สมการความต่อเนื่อง (equation of continuity) และ สมการอัตราการกรอง (rate equation)

สมการความต่อเนื่อง :

$$-v(dC/dx) = (dq/dt) + \alpha(t)(dC/dt) \quad (4.1)$$

ในกระบวนการกรองปริมาตรน้ำที่มีอยู่ในเบตน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านเบต ดังนั้นสมการ (4.1) อาจเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$-v(dC/dx) = (dq/dt) \quad (4.2)$$

กำหนด :

$v$  = ความเร็วของการกรอง (ลบ.ม./ตร.ม.-นาที)

$dC/dX$  = ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่เปลี่ยนไปในของไหล เทียบกับระยะทาง (กรัม/ลบ.ม.-นาที)

$dq/dt$  = การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ค้างอยู่ในเวลากรอง (กรัม/ลบ.ม.-นาที)

$dC/dt$  = ความเข้มข้นของของแข็งในช่องว่างที่เปลี่ยนแปลง  
(กรัม/ลบ.ม.-นาท)

$\alpha(t)$  = ช่องว่างเฉลี่ยในชั้นกรอง ณ เวลา  $t$  ใด ๆ

สมการอัตราการกรอง :

$$dC/dx = \left[ \frac{1}{(1+ax)^n} \right] r_o C \quad (4.3)$$

กำหนด :

$C$  = ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (กรัม/ลบ.ม.)

$x$  = ระยะทาง (ม.)

$r_o$  = อัตราการกำจัดเริ่มต้น (1/ม.)

$a$  = ค่าคงที่ (1/ม.)

$n$  = ค่าคงที่

การประเมินความดันสูญเสีย (headloss development)

ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนสารที่ถูกกรองสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$H_t = H_o + \sum_{i=1}^n (h_i)_t \quad (4.4)$$

กำหนด :

$H_t$  = ความดันสูญเสียทั้งหมด ณ เวลา  $t$  (ม.)

$H_o$  = ความดันสูญเสียเริ่มต้นทั้งหมดของน้ำใส (ม.)

$(h_i)_t$  = ความดันสูญเสีย ณ ชั้นที่  $i$  ของสารกรอง  
ที่ เวลา  $t$  (ม.)

### วิธีการล้างทำความสะอาดสารกรอง

การล้างทำความสะอาดสารกรองก็เพื่อไล่ตะกอน หรือ อนุภาคที่ถูกสารกรองดักจับไว้ให้ออกไปกับน้ำล้าง นอกจากการล้างแบบใช้น้ำล้างไหลสวนทางกับทิศทางของการกรองแล้ว การล้างกลับยังมีการเป่าลมไล่เพื่อช่วยการล้าง ถ้าเป็นเครื่องกรองที่มีขนาดใหญ่หรือมีอัตราการกรองสูง ในการล้างกลับมักใช้อัตราการไหล 5-8 เท่าของอัตราการกรองซึ่งต้องการน้ำปริมาณมากในการล้างกลับ

### การหาความสามารถในการกรอง

การหาความสามารถในการกรองของเครื่องกรองส่วนใหญ่มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในการผลิตน้ำประปา ได้มีผู้เสนอวิธีการต่าง ๆ โดยอาศัยการวัดความขุ่นของน้ำที่กรองได้หรือการวัดความดันสูญเสีย หรือการวัดทั้งสองอย่างควบคู่กัน นอกจากนี้ยังมีการวัดระยะเวลาในการกรองภายใต้เงื่อนไขการทดลองอย่างเดียวกัน เพื่อใช้เป็นดัชนีในการเปรียบเทียบความเหมาะสมในการเกิดโคแอกกูเลชัน (ชัยฤทธิ์ วสันสมบัติ , 2530)

สำหรับงานวิจัยนี้การพิจารณาความสามารถในการกรอง ได้คำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

- 1 อัตราการไหลในการกรอง(Q)
- 2 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย(R) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการไหล(Q) ระยะเวลาในการกรอง( $T_f$ ) ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำเข้า( $C_{in}$ ) และ ความขุ่นเฉลี่ยของน้ำออก ( $C_{out}$ )

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{Q(C_{in} - C_{out})T_f}{QC_{in}T_f} & (4.5) \\
 &= (1 - C_{out}/C_{in})
 \end{aligned}$$

3 พลังงานที่ใช้ในการกรอง (W) ซึ่งสัมพันธ์กับ อัตราการไหล (Q) และ ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น ( $\Delta P$ ) สามารถคำนวณจาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันสูญเสีย กับ เวลาการกรอง

$$W = Q\Delta P \quad (4.6)$$

$$\Delta P = AR/T_f$$

กำหนด :

$$AR = \text{พื้นที่ใต้กราฟความดันสูญเสีย}$$

จากปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวได้กำหนดดัชนีสมรรถนะการกรองชั้น 2 ประเภท ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ดัชนีประเภท 1} &= \frac{\text{(ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัดของแข็งแขวนลอย)}}{\text{(ความดันสูญเสียเฉลี่ย)}} \\ &= \frac{Q \times R}{W} \\ &= \frac{T_f (1 - C_{out} / C_{in})}{AR} \quad (4.7) \end{aligned}$$

ดัชนีประเภท 1 ที่ดัชนีตัวเศษควรมีค่าสูงกล่าวคือได้ อัตราการกรองน้ำสูง และ คุณภาพน้ำที่กรองได้ดี ส่วนตัวหารควรมีค่าต่ำกล่าวคือสิ้นเปลืองพลังงานน้อย ในการกรอง

นอกจากนี้ปัจจัยหนึ่งที่ควรพิจารณาคือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนสร้างถังกรอง (CF) ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำหนักของเครื่องกรองที่ใช้ ในกรณีของถังกรองที่มีความสูงและผนังหนาเท่ากันแต่รัศมีต่างกัน น้ำหนักของถังกรองจะแปรผันโดยตรงกับรัศมีของถัง



ในงานวิจัยนี้ใช้ถังกรองขนาดเดียวแต่ทดลองที่อัตราการไหลต่าง ๆ เมื่อพิจารณาถึงพื้นที่หน้าตัดของถังกรองของอัตราการไหลต่าง ๆ ควรพิจารณาโดยกำหนดให้ ปริมาตรน้ำที่ต้องการที่เวลาเดียวกันมีปริมาตรเท่ากันของทุกอัตราการไหล ตัวอย่างเช่น อัตราการไหล 20 , 30 และ 40 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. กำหนดให้ได้ปริมาตรน้ำ 40 ลบ.ม./ชม. ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดของถังกรองที่ต้องใช้คือ 2 , 1.33 และ 1 ตร.ม. ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นจึงกำหนด ดัชนีประเภท 2 ขึ้นดังนี้

$$\text{ดัชนีประเภท 2} = \frac{\text{ดัชนีประเภท 1}}{\text{CF}} \quad (4.8)$$

$$\text{CF} = \sqrt{A} \quad (4.9)$$

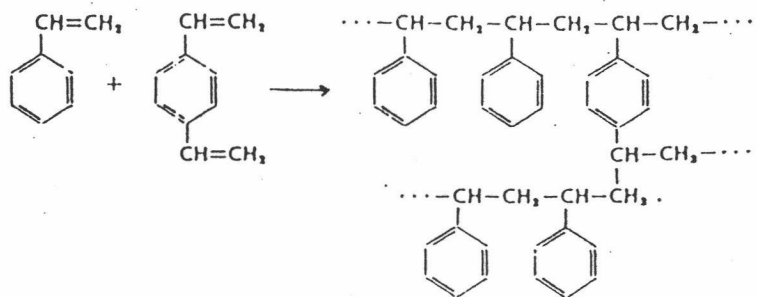
ดัชนีประเภท 2 ที่ได้นั้น ตัวเศษควรมีค่าสูง (จากการพิจารณาข้างต้น) ส่วนตัวหารควรมีค่าต่ำกล่าวคือ ค่าใช้จ่ายในการสร้างถังต่ำ นั่นคือดัชนีประเภท 2 ที่ดีควรมีค่าสูง

#### การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

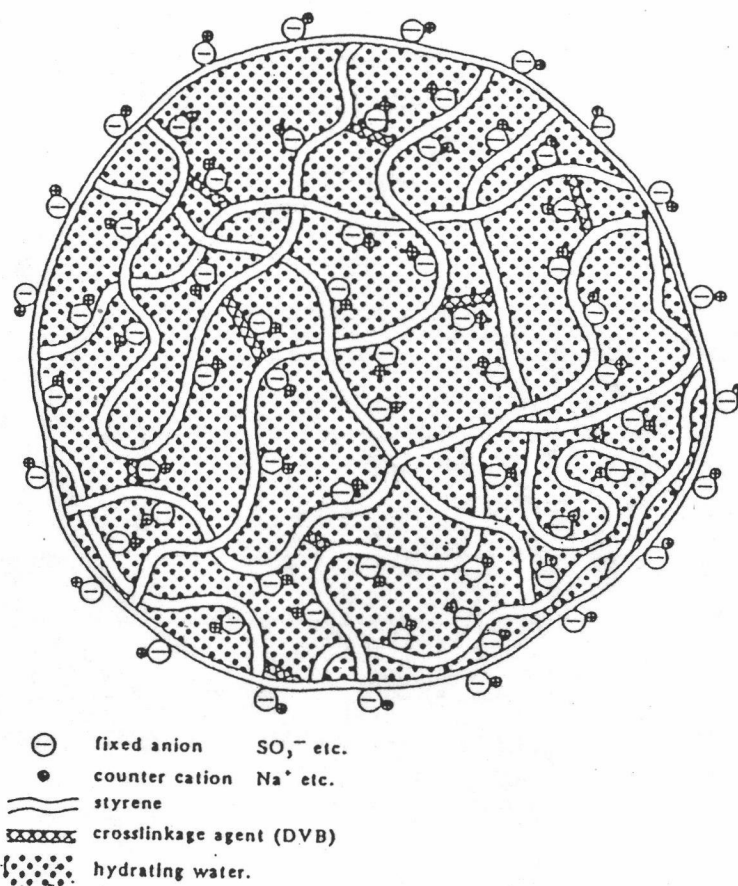
การกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อยู่ในรูปของสารละลายต้องใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัด วิธีนี้สามารถขจัดสารปนเปื้อนต่างๆ ได้ดังนี้คือ ความกระด้าง ความเป็นกรดอิสระ (free mineral acidity) คลอไรด์ ซัลเฟต ซิลิกา ไนเตรต เหล็ก แอมโมเนีย เป็นต้น

Hiester และ Phillips (1954) ให้คำจำกัดความของการแลกเปลี่ยนไอออนว่าเป็น การแลกเปลี่ยนไอออนที่ผันกลับได้ระหว่างสถานะของแข็งกับสถานะของเหลวโดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็ง

ในปี พ.ศ. 2487 (ณรงค์ วุฑฒเสถียร, 2526) มีการค้นพบวิธีการควบอูระหว่างสไตรีน (Styrene) โดยใช้ Divinylbenzene (DVB) เป็นตัวจับระหว่างโพลีสไตรีน เรียกว่า crosslinkage ดังรูปที่ 4.2 เกิดเป็นเรซิน (resin) ซึ่งมีเม็ดค่อนข้างกลมแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การควบอมุระหว่าง สไตรีน กับ DVB



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของเม็ดเรซิน

การจำแนกประเภทของเรซิน

ในปัจจุบันมีการจำแนกเรซินออกเป็น 4 ประเภทคือ

- 1 ชนิดแคตไอออนกรดแก่ (Strong Acid Cation)
- 2 ชนิดแคตไอออนกรดอ่อน (Weak Acid Cation)
- 3 ชนิดแอนไอออนด่างแก่ (Strong Base Anion)
- 4 ชนิดแอนไอออนด่างอ่อน (Weak Base Anion)

เรซินทั้ง 4 แบบนี้จะมีไอออนประจำตัวดังนี้

ประเภทของเรซิน

ไอออนประจำตัว

ชนิดแคตไอออนกรดแก่

$-\text{SO}_3^-$

ชนิดแคตไอออนกรดอ่อน

$-\text{COO}^-$

ชนิดแอนไอออนด่างแก่

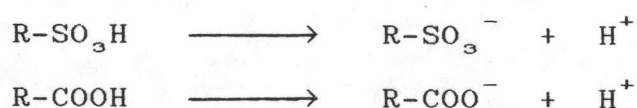
$-\text{NR}_3^+$

ชนิดแอนไอออนด่างอ่อน

$-\text{NH}_2$  ,  $-\text{NHR}$  ,  $-\text{NR}_2$

โครงสร้างหลักของเรซินทุกประเภทจะเหมือนกันแต่ต่างกันที่ชนิดของกลุ่มไอออนที่ติดอยู่กับเรซินเท่านั้น

เรซินชนิดแคตไอออน เป็นเรซินที่จับไอออนประจุบวกได้ โครงสร้างจะมีกลุ่มไอออน  $-\text{SO}_3\text{H}$  และ  $-\text{COOH}$  ติดอยู่กับส่วนที่เป็นโพลีเมอร์ของเรซิน ( $\text{R} = \text{เรซิน}$ ) ดังนั้นจึงเขียนได้ในรูป  $\text{R}-\text{SO}_3\text{H}$  หรือ  $\text{R}-\text{COOH}$  ได้ เมื่อเรซินอยู่ในน้ำจะแตกตัวได้ดังนี้



เรซินแบบ  $\text{R}-\text{SO}_3\text{H}$  จะแตกตัวง่าย เมื่อแตกตัวจะให้ความเป็นกรดเหมือนกับ  $\text{HCl}$  และ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ซึ่งเป็นกรดแก่ แต่ถ้าเป็นเรซินแบบ  $\text{R}-\text{COOH}$  จะแตกตัวได้ยากเหมือนกับกรดอ่อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกกรดอินทรีย์

เรซินชนิดแคตไอออนกรดแก่ เป็นเรซินที่มีการใช้งานมากที่สุดในจำพวกเรซินชนิดแคตไอออนและปกติจะอยู่ในรูปของเกลือโซเดียม ( $\text{R}-\text{SO}_3\text{Na}$ ) แต่เวลา

จะใช้งานจะใช้ในรูป  $R-SO_3H$  ดังนั้นจึงต้องมีการฟื้นฟูเรซิน (regeneration) ด้วย กรดเกลือ หรือ กรดกำมะถัน ตัวอย่างเรซินแคตไอออนกรดแก่ เช่น เรซิน Duolite C20

เรซินแคตไอออนกรดอ่อน เป็นเรซินที่มีกลุ่มไอออน  $-COOH$  จึงไม่สามารถจับไอออนประจุบวกของเกลืออนินทรีย์ แต่แลกเปลี่ยนไอออนกับต่างโซดาไฟ หรือเกลือของกรดอ่อนได้ ตัวอย่างเรซินแคตไอออนกรดอ่อนเช่นเรซิน Duolite C433

เรซินแอนไอออน เป็นเรซินที่ใช้จับไอออนประจุลบได้ โครงสร้างจะมีกลุ่มไอออน  $-NR_3^+$ ,  $-NH_2$ ,  $-NHR$  และ  $-NR_2$  ติดอยู่กับส่วนที่เป็นโพลิเมอร์ของเรซิน เขียนได้ในรูป  $R-NOH$  เมื่อเรซินอยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาจะแตกตัวได้ดังนี้



เรซินแอนไอออนต่างแก่ จะมีกลุ่มไอออน  $-NR_3^+$  ซึ่งแตกตัวได้ดีที่ pH ทุกช่วง เรซินชนิดนี้จะขายในรูปของคลอไรด์ ( $R-NCl$ ) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงกว่า การใช้งานจึงต้องมีการฟื้นฟูเรซินด้วยต่างโซดาไฟ ตัวอย่างเรซินแอนไอออนต่างแก่ เช่น เรซิน Duolite A132

เรซินแอนไอออนต่างอ่อน จะมีกลุ่มไอออน  $-NH_2$ ,  $-NHR$ ,  $-NR_2$  จะแตกตัวและจับไอออนได้ในสารละลายที่เป็นกรด สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับกรดเกลือ กรดกำมะถัน และ เกลือของต่างอ่อน แต่ไม่สามารถจับคลอไรด์ใน  $NaCl$  ได้ ตัวอย่างเรซินแอนไอออนต่างอ่อน เช่น เรซิน Duolite A378

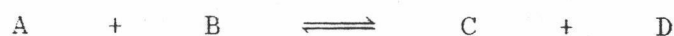
#### กลไกของการแลกเปลี่ยนไอออน

พิจารณาแคตไอออนเรซิน เมื่อผ่านสารละลายเข้าไปในคอลัมน์ (column) ขณะที่สารละลายสัมผัสกับแคตไอออนเรซิน จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนที่อยู่บนเรซินกับไอออนที่อยู่ในสารละลายซึ่งสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ดังนี้



กำหนด :  $C_1^+$  และ  $C_2^+$  คือ ไอออนบวกของสารต่างชนิดกัน  
 $R^-$  คือ แคตไอออนเรซิน

Kunin (1960) กล่าวว่า การผันกลับได้ของปรากฏการณ์การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถเอากฎของ mass action มาใช้ได้กฎนี้ตั้งโดย Sawyer และกล่าวว่า ปฏิกิริยาที่จุดสมดุลจะพยายามปรับตัวให้เข้าสู่สภาวะสมดุล โดยการปลดปล่อยสิ่งที่เข้ามากระทบต่อสภาวะสมดุล สภาวะสมดุลอธิบายได้ดังนี้



$$K = \frac{(C)(D)}{(A)(B)}$$

$$K = \text{ค่าคงที่ของสมดุลเคมี}$$

ดังนั้นหากถือเสมือนว่าเฟสของแข็งละลายอยู่ในสารละลาย จากสมการ (4.10) สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$K = \frac{(C_1^+R^-)(C_2^+)}{(C_1^+)(C_2^+R^-)}$$

$$K = \text{สัมประสิทธิ์การคัดเลือกที่สมดุล}$$

(Equilibrium Selectivity Coefficient)

ความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนไอออน

(Total Ion Exchange Capacity)

ความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นลักษณะสมบัติอย่างหนึ่งของเรซินซึ่งแสดงถึงจำนวนของไอออนที่สามารถแลกเปลี่ยนระหว่างเรซินกับของเหลวต่อเรซินหนึ่งหน่วย

หน่วยที่ใช้แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งเป็น

- ความจุเชิงน้ำหนัก (weight capacity)
- ความจุเชิงปริมาตร (volume capacity)

ความจุเชิงน้ำหนัก =  $\frac{\text{จำนวนสมมูลของไอออนที่แลกเปลี่ยน}}{\text{น้ำหนักแห้งเรซิน}}$

ความจุเชิงปริมาตร =  $\frac{\text{จำนวนสมมูลของไอออนที่แลกเปลี่ยน}}{\text{ปริมาตรของเรซินที่ฟื้นฟูแล้ว}}$

โดยทั่วไปค่าความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนไอออนหมายถึงค่าความจุที่สูงที่สุดในเชิงทฤษฎี

ความจุเบรคทรู (Breakthrough Capacity)

ความจุเบรคทรู เป็นค่าแสดงถึงความสามารถของเรซินในการกำจัดไอออนชนิดหนึ่งชนิดใดออกจากสารละลาย เมื่อเทียบกับความเข้มข้นที่ทางเข้าของไอออนชนิดนั้น หากความเข้มข้นของไอออนชนิดนี้ที่ทางออกเท่ากับความเข้มข้นตั้งต้นแสดงว่า เรซินได้หมดประสิทธิภาพอย่างสิ้นเชิง ค่าความจุเบรคทรูเป็นการวัดความสามารถของเรซินในเชิงปฏิบัติการซึ่งแตกต่างจาก ค่าความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยน โดยทั่วไปค่าความจุเบรคทรูมีค่าน้อยกว่าค่าความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนเสมอ

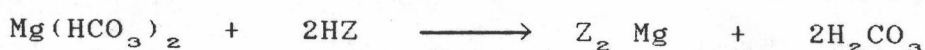
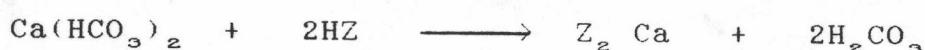
ความจุเบรคทรู =  $\frac{\text{ปริมาณไอออนทั้งหมดที่ถูกกำจัดได้จนเริ่มเกิดเบรคทรู (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของเรซิน (ลบ.ม.)}}$

### ปฏิบัติการแลกเปลี่ยนไอออนในคอลัมน์

ปฏิบัติการแลกเปลี่ยนไอออนในคอลัมน์เป็น วิธีการที่นิยมมากที่สุดเพราะ กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาที่มีจุดสมดุล (equilibrium reaction) จึงควรมีการสัมผัสที่ต่อเนื่องของเรซินกับสารละลายเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ การกำจัดความกระด้างของน้ำเป็นตัวอย่าง ที่ใช้อธิบายการปฏิบัติการแบบคอลัมน์ได้ดีที่สุด ความกระด้างจากแคลเซียมและแมกนีเซียมสามารถกำจัดได้ โดยการแลกเปลี่ยนกับโซเดียมที่อยู่บนเรซินอธิบายดังรูปที่ 4.4 ก่อนอื่นพิจารณาย่านที่ 1 (ด้านบนของคอลัมน์) ซึ่งเป็นบริเวณที่ป้อนน้ำเข้ามาในคอลัมน์ เรซินในย่านดังกล่าวได้สัมผัสกับน้ำอย่างต่อเนื่องจนกลายเป็น  $\text{CaR}$  และ  $\text{MgR}$  ซึ่งเป็นสภาพที่หมดประสิทธิภาพ ย่านถัดมา (ย่านที่ 2) จึงเป็นบริเวณที่กำลังเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำที่ไหลจากด้านบน ย่านการแลกเปลี่ยนจะเลื่อนลงไปเรื่อย ๆ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่เวลา  $t$  แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งย่านที่ 3 จะยังไม่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน หากยังคงปฏิบัติการต่อไปย่านที่ 3 จะแคบลงเรื่อยๆจนกลายเป็นศูนย์ จุดเบรคทรูของความเข้มข้นของ แคลเซียม และ แมกนีเซียม ณ จุดเบรคทรูนี้เรซินที่อยู่ข้างล่างนั้นจะยังไม่ถูกเปลี่ยนเป็น  $\text{CaR}$  หรือ  $\text{MgR}$  โดยสมบูรณ์จึงทำให้ค่าความจุเบรคทรูต่ำกว่าค่าความจุทั้งหมดของการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมด

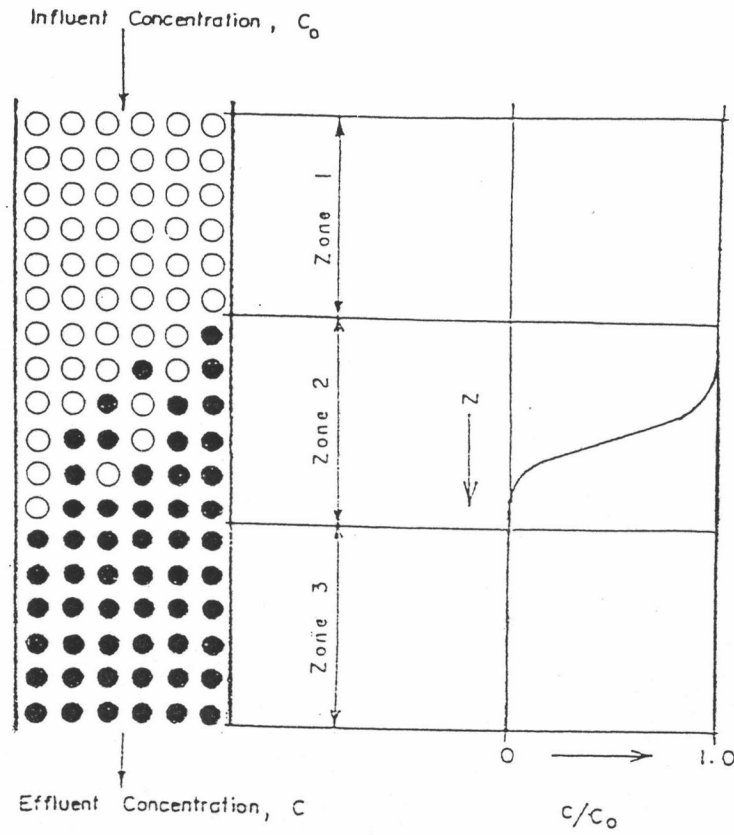
### การกำจัดความเป็นด่าง

การกำจัดความเป็นด่างโดยใช้ เรซินชนิดแคตไอออนกรดแก่หรือแคตไอออนกรดอ่อน สามารถอธิบายได้ดังสมการ



Z = แคตไอออนกรดแก่หรือแคตไอออนกรดอ่อน

จากสมการนี้จะเห็นว่าเกิดกรดคาร์บอนิกขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีท่อไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น



Legend :

- Exhausted resin, CaR or MgR form
- Unconverted resin, NaR form
- Z is the zone where ion exchange is occurring
- $c/c_0$  is the ratio of effluent to influent concentration

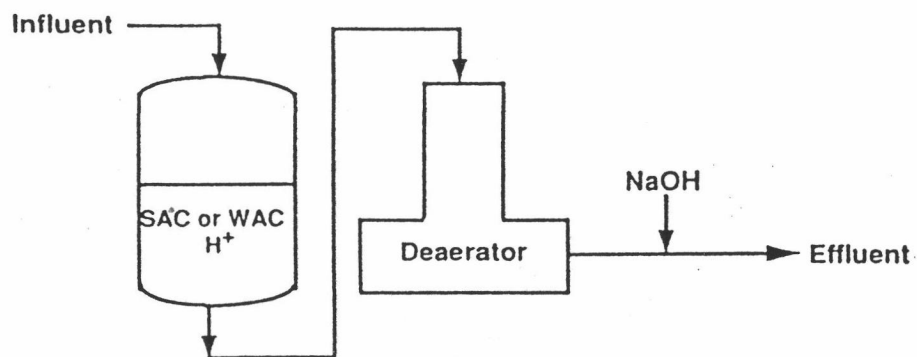
รูปที่ 4.4 ปฏิบัติการแลกเปลี่ยนไอออนในคอลัมน์

รูปแบบของระบบที่ใช้กำจัดความเป็นด่าง

- 1 การกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วยด่าง (Dealkalization & Softening with Caustic Neutralization)

ระบบนี้(รูปที่ 4.5)เหมาะสำหรับน้ำเข้าที่มีค่าความกระด้างสูง แต่ค่าซีลเฟต และ คลอไรด์ ต่ำ ระบบนี้สามารถบำบัดได้น้ำที่ไม่มีค่าความกระด้าง และ ค่าความเป็นด่างตามกำหนด

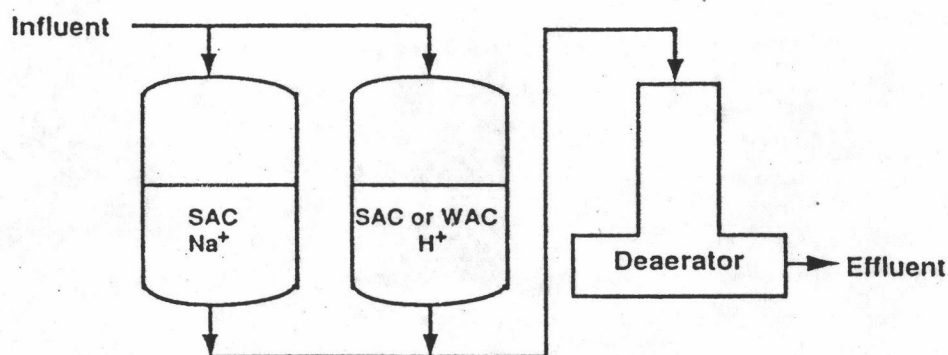




รูปที่ 4.5 ระบบการกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วยด่าง

2 การกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วยระบบโซเดียม  
(Dealkalization & Softening with Sodium Cycle  
Neutralization)

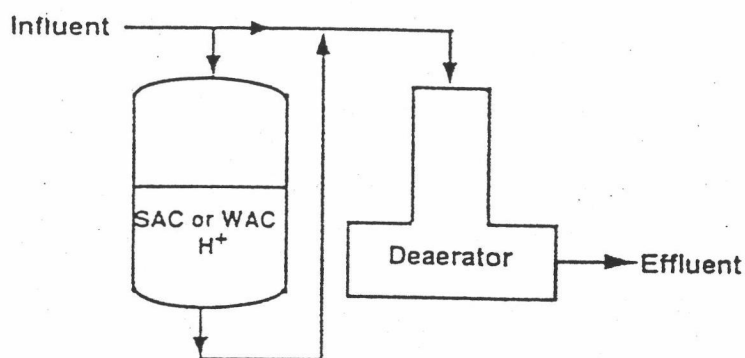
ระบบนี้(รูปที่ 4.6) เหมาะสำหรับน้ำเข้าที่มี ค่าความกระด้าง ชัลเฟต และ คลอไรด์ สูง ระบบนี้สามารถบำบัดได้น้ำที่ ไม่มีค่าความกระด้าง และ ค่าความเป็นด่างตามกำหนด



รูปที่ 4.6 ระบบการกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วย  
ระบบโซเดียม

3 การกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วยน้ำเข้า  
(Dealkalization & Softening with Influent  
Neutralization)

ระบบนี้(รูปที่ 4.7)เหมาะสำหรับน้ำเข้าที่มี ค่าความเป็นด่างสูง แต่ค่าความกระด้างต่ำ ระบบนี้สามารถบำบัดได้น้ำที่มีค่าความกระด้างบ้าง และค่าความเป็นด่างตามกำหนด

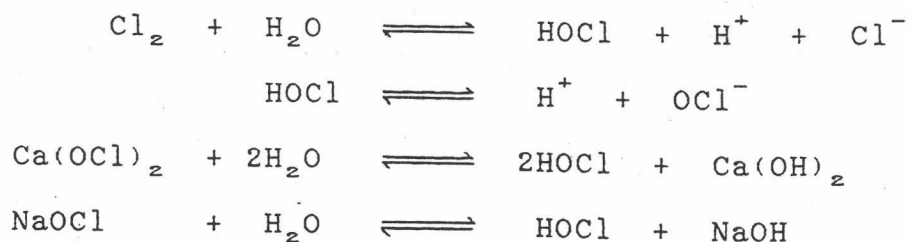


รูปที่ 4.7 ระบบการกำจัดความเป็นด่างและทำน้ำอ่อนแล้วสะเทินด้วยน้ำเข้า

คลอรีเนชัน (Chlorination)

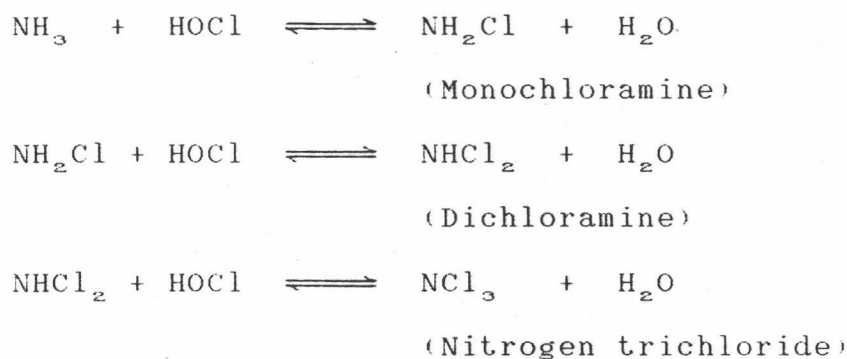
คลอรีนเป็นสารออกซิไดซ์ที่มีฤทธิ์แรงและสลายตัวง่าย นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ สารประกอบคลอรีนที่ใช้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ โซเดียมไฮโปคลอไรต์ คลอรีนไดออกไซด์ และ ก๊าซคลอรีน

ปฏิกิริยาของคลอรีนในน้ำ



ปริมาณของ กรดไฮโปคลอรัส (HOCl) และ ไฮโปคลอไรต์ไอออน (Hypochlorite ion,  $\text{OCl}^-$ ) ที่อยู่ในน้ำเรียกว่า คลอรีนอิสระ (Free chlorine) ปริมาณของสารสองชนิดนี้มีส่วนสำคัญมากในการฆ่าเชื้อซึ่งกรดไฮโปคลอรัสมีประสิทธิภาพมากกว่าไฮโปคลอไรต์ไอออนประมาณ 40-80 เท่า

ปฏิกิริยาของคลอรีนกับแอมโมเนียในโตรเจน

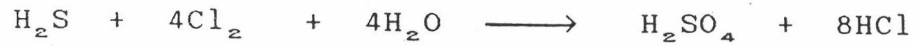


น้ำที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียส่วนใหญ่มีไนโตรเจนปนอยู่ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียหรือไนเตรท ไฮโปคลอรัสเป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงจึงเข้าทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียที่อยู่ในน้ำเสียได้เป็นคลอราไมน์ (Chloramine) รูปแบบต่าง ๆ 3 รูปแบบด้วยกันดังสมการเคมีข้างต้นคือ โมโนคลอราไมน์ (Monochloramine) , ไดคลอราไมน์ (Dichloramine) และ ไนโตรเจนไตรคลอไรด์ (Nitrogen trichloride) ซึ่งเรียกว่า คลอรีนที่รวมตัว (Combined chlorine)

ปริมาณของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้น และ อัตราการเกิด โมโนคลอราไมน์ และ ไดคลอราไมน์ จะขึ้นกับ ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ และ เวลา

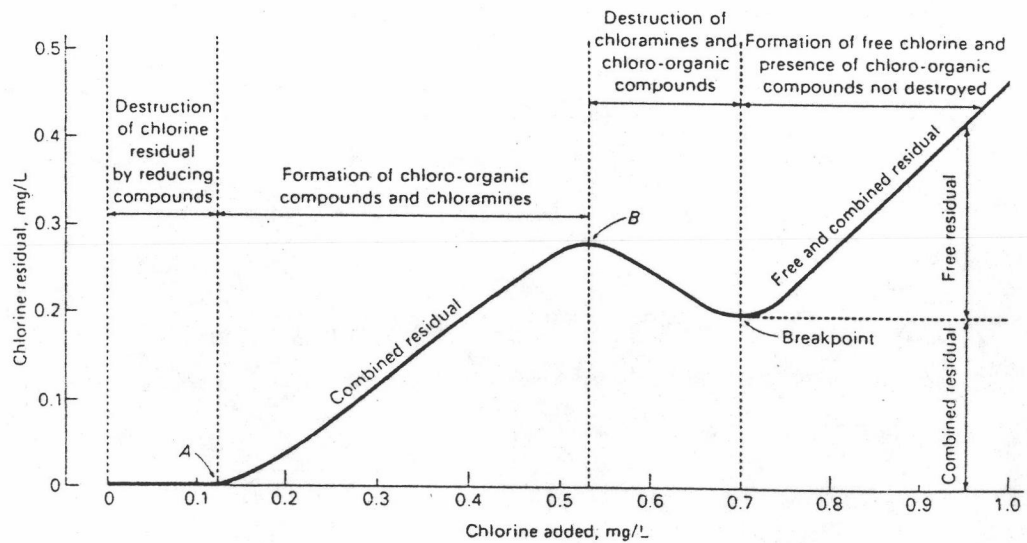
ปฏิกิริยาคลอรีนกับสารอื่นๆ

คลอรีนสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ โดยเฉพาะสารรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เฟอรัสไอออน แมงกานีสไอออน และ สารประกอบไนไตรต์ ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับคลอรีน



### ปฏิกิริยาเบรคพ้อยต์ (Breakpoint Reaction)

เมื่อเริ่มเติมคลอรีนในน้ำที่มีแอมโมเนียไนโตรเจน คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับ เพอร์ซไดออกไซด์ แมงกานีสไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ สารอินทรีย์ จากนั้นคลอรีนจึงจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียไนโตรเจนได้ โมโนคลอราไมน์ และ ไดคลอราไมน์ ดังช่วง A-B ในรูปที่ 4.8 ระหว่างจุด B กับ จุดเบรคพ้อยต์ คลอราไมน์บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไตรคลอไรด์ ส่วนที่เหลือจะถูกออกซิไดซ์เป็นไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) และ ไนโตรเจน เมื่อเติมคลอรีนไปเรื่อยๆ ทำให้คลอราไมน์ ส่วนใหญ่ถูกออกซิไดซ์ที่จุดเบรคพ้อยต์ หากยังคงเติมคลอรีนต่อไปหลังจากจุดเบรคพ้อยต์จะมีคลอรีนอิสระซึ่งสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ได้ ปฏิกิริยาเบรคพ้อยต์แสดงดังรูปที่ 4.8

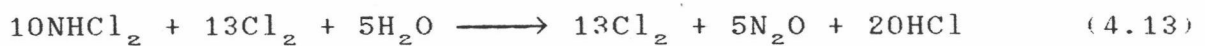


รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาเบรคพ้อยต์

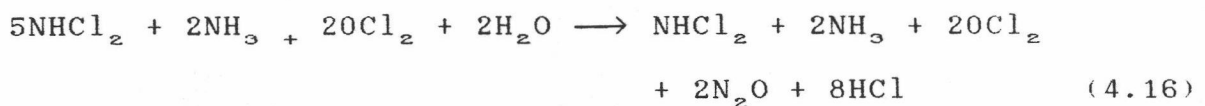
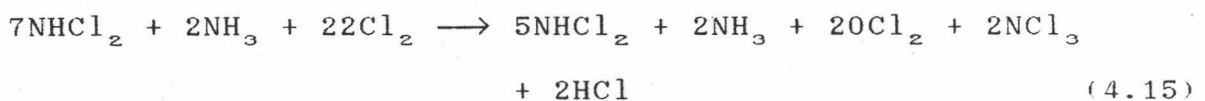
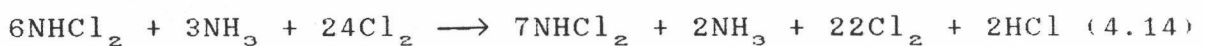
ผลของค่า pH ต่อปฏิกิริยาเบรคพ้อยต์

โมโนคลอราไมน์ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาเบรคพ้อยต์จะมีความเสถียรในสภาพที่มีแอมโมเนียมากเกินพอ แต่ในสภาพที่มีคลอรีนมากเกินพอ โมโนคลอราไมน์จะสลายตัว ปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นได้มีดังนี้

1 ค่า pH 9.0 ขณะที่ปริมาณคลอรีนมากเกินพอในการทำปฏิกิริยากับคลอราไมน์



2 ค่า pH 4.5-5.0 ขณะที่ปริมาณคลอรีนมากเกินพอในการทำปฏิกิริยากับคลอราไมน์



เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาข้างต้น ที่ค่า pH ต่ำ สารประกอบแอมโมเนียในโตรเจน ยังคงเหลืออยู่ แต่ที่ค่า pH สูงขึ้น พบว่ามีคลอรีนอิสระเกิดขึ้น หากค่า pH ของน้ำค่อนข้างต่ำ สารที่เหลืออยู่จะเป็นไปตามสามการที่ 4.16 ซึ่งมีสารอื่น ๆ ปนอยู่กับคลอรีนอิสระ

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วยคลอรีน

1 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของคลอรีน

ตัวแปรหลักที่สามารถวัดได้จากการใช้คลอรีนในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์คือ จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ และ ปริมาณคลอรีนที่เหลือทั้งหมดหลังจากเวลาที่กำหนดให้ จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งวัดจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีชีวิตเหลืออยู่ขึ้นกับ ปริมาณคลอรีนที่เหลือทั้งหมด และ ระยะเวลาการสัมผัส

จากการศึกษาโดยใช้ถังกวนแบบแบดซ์พบว่า การลดลงของเชื้อคอลิฟอร์มสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$N_t/N_0 = (1 + 0.23C_t t)^{-3} \quad (4.17)$$

กำหนด :  $N_t$  = จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เวลาที่  $t$  (โคโลนี/มล.)

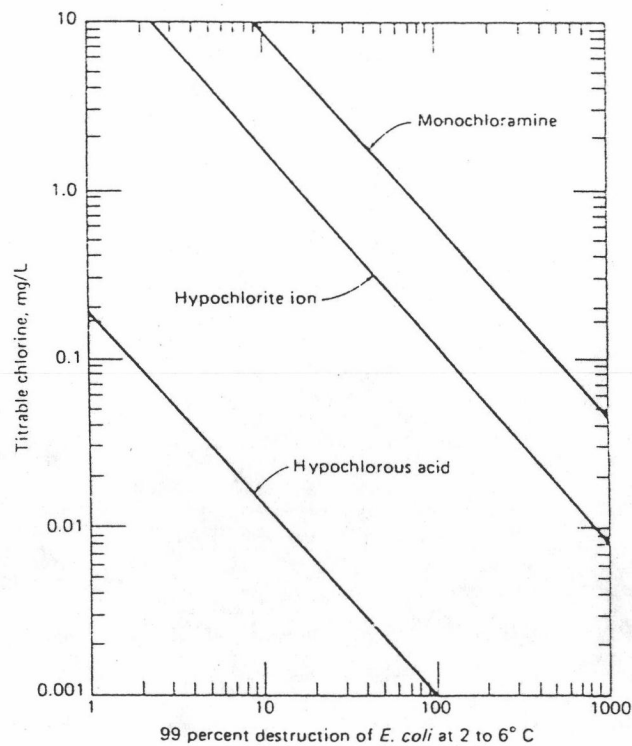
$N_0$  = จำนวนเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (โคโลนี/มล.)

$C_t$  = ปริมาณคลอรีนที่เหลือทั้งหมด ที่เวลา  $t$  (มก./ล.)

$t$  = เวลา (นาที)

2 ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ของสารประกอบคลอรีน

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของ กรดไฮโปคลอรัส ( $\text{HOCl}$ ) ไฮโปคลอไรต์ไอออน ( $\text{OCl}^-$ ) และ โมโนคลอราไมน์ ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ) พบว่า ไฮโปคลอไรต์ไอออน หรือ โมโนคลอราไมน์ มีประสิทธิภาพมากกว่า กรดไฮโปคลอรัส ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อของ กรดไฮโปคลอรัส ไฮโปคลอไรต์ไอออน และ โมโนคลอราไมน์ ต่อการฆ่าเชื้อ *E. coli* ที่อุณหภูมิ 2-6 องศาเซลเซียส

### 3 การผสมแรกเริ่ม (Initial Mixing)

การเติมคลอรีนในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน มีประสิทธิภาพมากกว่า การเติมคลอรีนอย่างช้า ๆ ถึง 2 เท่า ในถังกวนแบบสมบูรณ์ (CSTR) ภายใต้ สภาวะเดียวกัน

### 4 ปฏิกริยาเบรคพ้อยต์

ถ้าในน้ำทั้งมีสารประกอบไนโตรเจน คลอรีนจำนวนหนึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารเหล่านั้นได้เป็น โมโนคลอราไมน์ หรือ ไดคลอราไมน์ จากการศึกษา พบว่าการกวนผสมที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ประสิทธิภาพการฆ่าเชื้อได้ผลดี

### 5 ระยะเวลาการสัมผัส (contact time)

ผลของระยะเวลาการสัมผัสมีความสำคัญมากในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ จากการศึกษาพบว่าที่ความเข้มข้นของคลอรีนระดับหนึ่ง ยิ่งเพิ่มระยะเวลาการสัมผัส นานขึ้นปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ก็จะถูกฆ่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ตาม กฎของ Chick ดังนี้

$$dN/dt = -kN_c \quad (4.18)$$

กำหนด :  $N_c$  = จำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่เวลา  $t$  (โคโลนี/มล.)

$t$  = ระยะเวลา (นาที)

$k$  = ค่าคงที่ (1/นาที)

ถ้าให้  $N_0$  เป็นจำนวนเชื้อที่เวลา  $t = 0$  เมื่ออินทิเกรตสมการ 4.18 สามารถจัดรูปใหม่ดังนี้

$$\ln(N_c/N_0) = -kt \quad (4.19)$$

การนำคลอรีนไปใช้งาน

การออกแบบและการคัดเลือกอุปกรณ์คลอรีนชั้นควรพิจารณาถึงการนำไปใช้งาน และ ปริมาณคลอรีนที่เติม

แนวทางการนำคลอรีนและสารประกอบคลอรีนไปใช้งาน มีแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ ในระบบบำบัดน้ำเสีย

Additional chemical applications in wastewater collection, treatment, and disposal

Application	Chemicals used <sup>a</sup>	Remarks
Collection		
Slime-growth control	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Control of fungi and slime-producing bacteria
Corrosion control (H <sub>2</sub> S)	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Control brought about by destruction of H <sub>2</sub> S in sewers
Corrosion control (H <sub>2</sub> S)	FeCl <sub>3</sub>	Control brought about by precipitation of H <sub>2</sub>
Odor control	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Especially in pumping stations and long, flat sewers
Treatment		
Grease removal	Cl <sub>2</sub>	Added before preaeration
BOD reduction	Cl <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Oxidation of organic substances
pH control	KOH, Ca(OH) <sub>2</sub> , NaOH	
Ferrous sulfate oxidation	Cl <sub>2</sub> <sup>b</sup>	Production of ferric sulfate and ferric chloride
Filter-ponding control	Cl <sub>2</sub>	Residual at filter nozzles
Filter-fly control	Cl <sub>2</sub>	Residual at filter nozzles, used during fly season
Sludge-bulking control	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Temporary control measure
Digester supernatant oxidation	Cl <sub>2</sub>	
Digester and Imhoff tank foaming control	Cl <sub>2</sub>	
Ammonia oxidation	Cl <sub>2</sub>	Conversion of ammonia to nitrogen gas
Odor control	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	
Oxidation of refractory organic compounds	O <sub>3</sub>	
Disposal		
Bacterial reduction	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	Plant effluent, overflows, and stormwater
Odor control	Cl <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub>	

<sup>a</sup> Cl<sub>2</sub> = chlorine, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = hydrogen peroxide, O<sub>3</sub> = ozone, KOH = potassium hydroxide, Ca(OH)<sub>2</sub> = calcium hydroxide, NaOH = sodium hydroxide.

<sup>b</sup> 6(FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O) + 3Cl<sub>2</sub> → 2FeCl<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> + 42H<sub>2</sub>O.



ปริมาณคลอรีนที่เติมขึ้นกับการนำไปใช้งานดังแสดงใน ตารางที่ 4.2 ค่าของปริมาณคลอรีนที่เติมในตารางกำหนดไว้เป็นช่วง เพราะปริมาณที่คลอรีนที่เติมขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำ ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสม นอกจากนี้ ปริมาณคลอรีนที่เติมต้องคำนึงถึงการกัดกร่อนโลหะของคลอรีนด้วย โดยทั่วไปกำหนดให้ปริมาณคลอรีนที่เหมาะสมเป็นปริมาณ ซึ่งให้ปริมาณคลอรีนอิสระ 0.4-0.6 มก./ล. หลังจากปล่อยให้ทำปฏิกิริยาในน้ำเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.2 ปริมาณคลอรีนที่เติมสำหรับการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ

Typical dosages for various chlorination applications  
in wastewater collection, treatment, and disposal

Application	Dosage range, mg/L
Collection	
Corrosion control (H <sub>2</sub> S)	2-9 <sup>a</sup>
Odor control	2-9 <sup>a</sup>
Slime growth control	1-10
Treatment	
BOD reduction	0.5-2 <sup>b</sup>
Digester- and Imhoff tank-foaming control	2-15
Digester supernatant oxidation	20-140
Ferrous sulfate oxidation	- <sup>c</sup>
Filter fly control	0.1-0.5
Filter-ponding control	1-10
Grease removal	2-10
Sludge-bulking control	1-10
Disposal (disinfection)	
Untreated wastewater (prechlorination)	6-25
Primary effluent	5-20
Chemical precipitation effluent	2-6
Trickling-filter plant effluent	3-15
Activated-sludge plant effluent	2-8
Filtered effluent (after activated-sludge treatment)	1-5

<sup>a</sup> Per mg/L of H<sub>2</sub>S

<sup>b</sup> Per mg/L of BOD<sub>5</sub> destroyed.

<sup>c</sup>  $6(\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}) + 3\text{Cl}_2 \rightarrow 2\text{FeCl}_3 + 2\text{Fe}_2(\text{SO}_4) + 42\text{H}_2\text{O}$ .