

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีของการกำจัดเหล็ก

##### 2.1.1 สถานะของเหล็กในน้ำ

การเลือกกระบวนการในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำ จะต้องทราบถึงสถานะของเหล็กในน้ำก่อน เพื่อที่จะได้สามารถเลือกกระบวนการในการบำบัดอย่างเหมาะสม (มันสิน คัตกุลเวศม์, 2527)

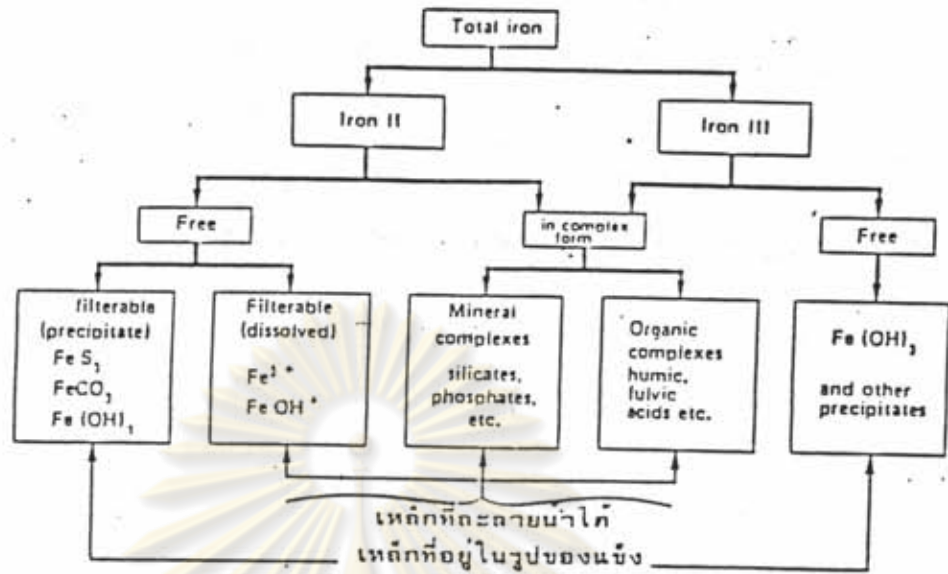
ข้อมูลขั้นต่ำที่จำเป็นต้องทราบในการกำจัดเหล็ก ได้แก่

- ปริมาณเหล็กทั้งหมด
- ปริมาณเหล็กละลายน้ำทั้งหมด
- ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส

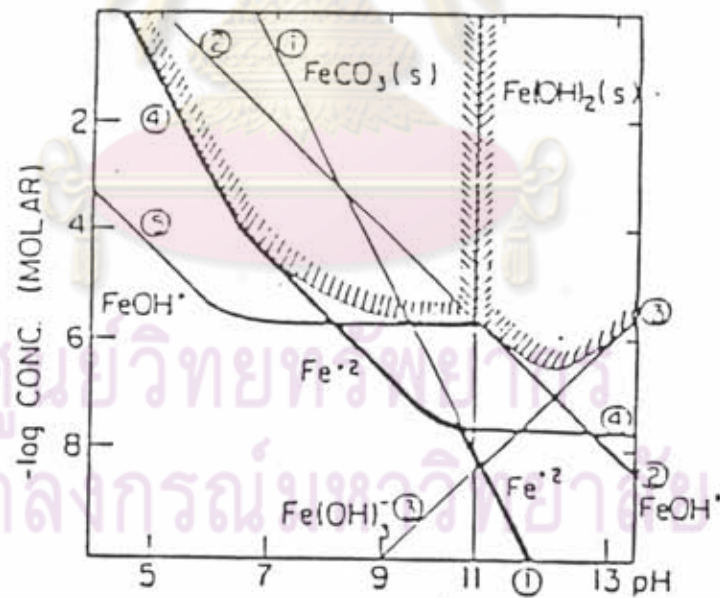
สถานะต่างๆ ของเหล็กสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.1

##### 2.1.2 ความสามารถในการละลายน้ำของเหล็ก

ความสามารถในการละลายน้ำของเหล็กขึ้นอยู่กับค่า pH ของน้ำ ในกรณีที่น้ำมี pH เป็นกลาง หรือ pH ต่ำ (เป็นกรด) ปริมาณเหล็กที่ละลายน้ำขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของเฟอร์รัสคาร์บอเนต ( $\text{FeCO}_3$ ) และในกรณีที่น้ำมี pH สูง (เป็นเบส) ปริมาณเหล็กละลายน้ำขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ )  
ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 สถานะต่างๆ ของเหล็กที่อยู่ในน้ำ ( มั่นสิน คัตกุลเวศม์, 2527)



รูปที่ 2.2 stability ของเหล็กในน้ำธรรมชาติที่มี total carbonate 100 mg/l  $\text{CaCO}_3$  ( มั่นสิน คัตกุลเวศม์, 2527)

### 2.1.3 ปฏิริยาออกซิเคชันของเหล็ก

การกำจัดเหล็กโดยอาศัยปฏิริยาออกซิเคชันในการเปลี่ยน  $Fe^{2+}$  ซึ่งละลายน้ำให้อยู่ในรูป  $Fe^{3+}$  ซึ่งตกผลึกหรือสามารถแยกออกด้วยวิธีอื่นได้ง่ายกว่า oxidizing agent ที่นิยมใช้ ได้แก่ ออกซิเจน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ โซเดียมเปอร์แมงกาเนต และโอโซน สาร oxidizing agent ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ อากาศ (ออกซิเจนในอากาศ) เพราะหาง่าย ราคาถูก และสะดวกที่สุดสำหรับการผลิตน้ำประปา จึงจะขอล่าวแต่ปฏิริยาออกซิเคชันของเหล็กที่ใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์ดังสมการ (มันสัน คัททูลเวสม์, 2527)



ในการกำจัดเหล็กเฟอร์รัส 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะต้องใช้ออกซิเจน 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากปฏิริยานี้จะสร้างไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) 0.036 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำให้ค่าความเป็นด่าง 1.80 มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน ดังนั้นถ้ามีค่าความเป็นด่างไม่พอที่จะทำลายไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่เกิดขึ้นจะทำให้ pH ลดลง ซึ่งจะทำให้อัตราของปฏิริยาออกซิเคชันช้าลงไปด้วย

### 2.1.4 จลนศาสตร์ของปฏิริยาออกซิเคชันของเหล็ก

จากสมการปฏิริยาออกซิเคชันของเหล็กที่ใช้ ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดส์  
ดังสมการ



สมการเคมีนี้ไม่ได้บอกถึงอัตราเร็วของปฏิริยา ผลการวิจัยทางจลนศาสตร์ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราเร็วของปฏิริยาออกซิเคชันในน้ำธรรมชาติที่มีไบคาร์บอเนต อัตราเร็วของปฏิริยาออกซิเคชันระหว่างเหล็กเฟอร์รัสและออกซิเจนสามารถแทนด้วยสมการ (Weston, 1914)

$$d Fe/dt = -k(P_o)(OH^-)^2 (Fe^{2+}) \longrightarrow (1)$$

$$\text{หรือ } d \text{ Fe}/dt = -k(\text{O}_2)(\text{OH}^-)^2 (\text{Fe}^{+2}) \text{ -----} \rightarrow (2)$$

โดยที่ $d \text{ Fe}/dt$	=	อัตราเร็วของการออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัส
$k$	=	ค่าคงที่ มีค่าประมาณ $8 \times 10^3$ ที่ $20^\circ\text{C}$
$P_{\text{O}_2}$	=	Partial Pressure ของออกซิเจนในอากาศ
$\text{O}_2$	=	ความเข้มข้นของออกซิเจน
$\text{OH}^-$	=	ความเข้มข้นของไฮดรอกซิล
$\text{Fe}^{+2}$	=	ความเข้มข้นของ $\text{Fe}^{+2}$ ที่เวลาใด ๆ

สมการที่ (1) สามารถเปลี่ยนจาก Partial Pressure ของออกซิเจนในอากาศให้อยู่ในรูปความเข้มข้นของออกซิเจนได้ดังสมการ (2) โดยใช้กฎของเฮนรีและกฎของคาลตัน (Weston, 1914)

## 2.2 ทฤษฎีของถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้ง

### 2.2.1 ถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้ง

ถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้งเพื่อใช้ในการกำจัดเหล็กประยุกต์มาจากถังปฏิกรณ์วนเวียนที่ใช้เมมเบรนเป็นตัวกั้นฟองอากาศ (Membrane gas/liquid contactor) ถังปฏิกรณ์แบบที่มีเมมเบรนเป็นตัวกั้นฟองอากาศอาจมีข้อจำกัดเมื่อใช้ในการกำจัดเหล็กเพราะเมื่อเหล็กที่อยู่ในรูปสารละลายถูกออกซิไดส์กลายเป็นเหล็กในรูปผลึก ซึ่งจะทำให้เมมเบรนอุดตันได้ การประยุกต์ถังปฏิกรณ์แบบนี้โดยตัดส่วนที่เป็นเมมเบรนออก

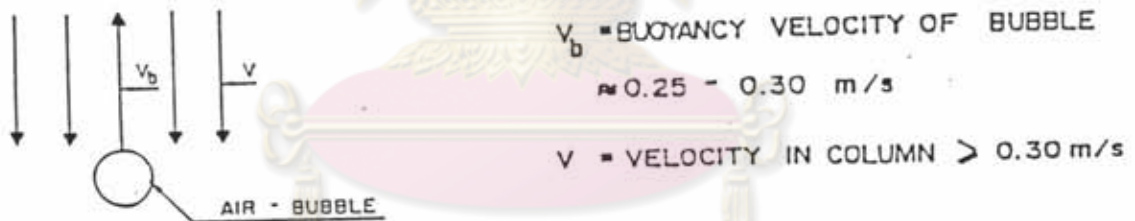
ถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้งประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆ ดังรูป 1.1

### 2.2.2 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของถังปฏิกรณ์

ตัวแปรที่ใช้ควบคุมการทำงานของถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้ง (Bernard, Aurelle, Rouston, Roques, 1986) ได้แก่

### 2.2.2.1 ความเร็วของการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์

ความเร็วของการหมุนเวียนของเหลวในถังปฏิกรณ์ จะเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของฟองก๊าซที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ ความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระของฟองก๊าซประมาณ 0.25-0.3 เมตรต่อวินาที ในถังปฏิกรณ์จะต้องควบคุมความเร็วของของเหลวและฟองก๊าซให้มากกว่าความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระในที่นี้คือ ใช้เครื่องสูบน้ำภายในวงจรสูบน้ำ โดยให้ความเร็วซึ่งได้จากค่าอัตราการไหลของน้ำค่อพื้นที่หน้าตัดของวงจรมากกว่าความเร็วของการลอยตัวอย่างอิสระของฟองก๊าซ เมื่อฟองก๊าซถูกควบคุมให้หมุนเวียนอยู่ในวงจร จะทำให้ก๊าซในฟองละลายน้ำจนหมด ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการละลายของก๊าซของถังปฏิกรณ์แบบนี้มีค่าสูง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.3 ภาพแสดงความเร็วในวงจรกับความเร็วในการลอยตัวของฟองก๊าซ  
(Bernard, Aurelle, Roustan, Roques, 1986)

### 2.2.2.2 ความดันที่เหมาะสมในวงจร

ความดันภายในวงจรเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะทำให้ก๊าซสามารถละลายน้ำได้เร็วขึ้น ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ

1) กฎของเฮนรี (Henry's law) ทิวการณสมคูลระหว่ง ก๊าซชนิดหนึ่งกับของเหลวชนิดหนึ่ง จากกฎของเฮนรีได้ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความดันของก๊าซในอากาศ (Partial Pressure) กับความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายในของเหลวตามสมการ

$$P_G = H X_G^* \quad \text{-----} \rightarrow (3)$$

โดยที่

$P_G$  = dissolved gas partial pressure (atm)

$H$  = Henry's law coefficient (atm/mole)

$X_G^*$  = dissolved gas molar concentration in bulk liquid at the equilibrium (mol)

หมายเหตุ : ค่าคงที่ของเฮนรีขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ, ของเหลว, และอุณหภูมิ ดังตารางที่ 2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของเฮนรีกับชนิดของก๊าซที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

I.C.	$H \times 10^{-4}$ , atm/molfraction							
	Air	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
0	4.32	0.0728	3.52	5.79	0.0268	2.24	5.29	2.55
10	5.49	0.104	4.42	6.36	0.0367	2.97	6.68	3.27
20	6.64	0.142	5.36	6.83	0.0483	3.76	8.04	4.01
30	7.71	0.186	6.20	7.29	0.0609	4.49	9.24	4.75
40	8.70	0.233	6.96	7.51	0.0745	5.20	10.4	5.35
50	9.46	0.283	7.61	7.65	0.0884	5.77	11.3	5.88
60	10.1	0.341	8.21	7.65	0.103	6.26	12.0	6.29

2) กฎของดาลตัน (Dalton's law) พิจารณาถึงอากาศที่มีก๊าซหลายๆ ชนิดผสมกันอยู่ จากกฎของดาลตันได้ให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความดันของก๊าซในอากาศ (Partial pressure) กับความเข้มข้นของก๊าซในอากาศ ดังสมการ (4)

$$P_G = Y_G \cdot P \quad \text{----- (4)}$$

โดยที่

$P_G$  = gas partial pressure (atm)

$Y_G$  = gas concentration in the mixing of gases at the equilibrium

$P$  = global pressure of the mixing of gases (atm)

3) ความสัมพันธ์ระหว่างกฎของเฮนรีและกฎของดาลตัน ความสัมพันธ์ระหว่างสมการทั้งสอง มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 P_G &= H X_G^* && \text{(Henry's law)} \\
 P_G &= Y_G^* P && \text{(Dalton's law)} \\
 \text{ดังนั้น} \quad P_G &= H X_G^* = Y_G^* P \\
 X_G^* &= Y_G^* P/H
 \end{aligned}$$

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ (%) ในอากาศ

องค์ประกอบ	ร้อยละ	ส่วนในล้านส่วน
ไนโตรเจน	78.09	780,900
ออกซิเจน	20.94	209,400
อาร์กอน	.93	9,300
คาร์บอนไดออกไซด์	.0318	318
นีออน	.0018	18
ฮีเลียม	.00052	5.2
คริปทอน	.0001	1
ซีนอน	.000008	0.08
ไนตรัสออกไซด์	.000025	0.25
ไฮโดรเจน	.00005	0.5
มีเทน	.00015	1.5
ไนโตรเจนไดออกไซด์	.0000001	0.001
โอโซน	.000002	0.02
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	.00000002	0.0002
คาร์บอนมอนอกไซด์	.00001	0.1
แอมโมเนีย	.000001	0.01

หมายเหตุ อัตรส่วนของก๊าซในตาราง อาจเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพการณ์ และเวลา ค่าที่แสดงเป็นเพียงค่า แสดงให้เห็นถึงระดับของส่วนประกอบ



$H$  = Henry's law coefficient ซึ่งเป็นค่าคงที่  
ของก๊าซชนิดหนึ่งที่ละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่ง

$Y_G^*$  = gas concentration in the mixing of  
gases at the equilibrium ซึ่งเป็นค่าคงที่

ดังนั้น  $X_G^*$  ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของก๊าซที่ละลายได้

๗ จุดสมดุลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันของก๊าซที่อยู่ในระบบ

4) จลนศาสตร์ของการละลายของก๊าซ อัตราเร็วของการ  
ละลายของก๊าซสามารถแสดงได้ด้วยสมการ ดังต่อไปนี้ (Bernard)

โดยที่

$$d(X_G)/dt = k_L a (X_G^* - X_G) \text{ ----- (5)}$$

$$d(X_G)/dt = \text{อัตราเร็วของการละลายของก๊าซต่อหน่วยเวลา}$$

$k_L$  = สัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนย้าย (Mass transfer Coefficient)

$a$  = พื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะระหว่างอากาศกับน้ำ

$X_G^*$  = ความเข้มข้นของก๊าซอิ่มตัวในน้ำ

$X_G$  = ความเข้มข้นของก๊าซที่เวลาใดๆ  
(gas molar concentration in bulk liquid at anytime)

ถ้าให้ค่า  $(k_L a)$  เป็นค่าคงที่ในถ้งปฏิกิริยา จะสามารถ  
สรุปได้ว่าจลนศาสตร์ของการละลายของก๊าซแปรผันตามค่าความแตกต่าง  $X_G^* - X_G$

ดังนั้นถ้าต้องการให้อัตราการเร็วของการละลายของก๊าซ  
ในของเหลวเพิ่มขึ้น จะต้องเพิ่มค่าความแตกต่างของ  $(X_G^* - X_G)$  นั่นคือ เพิ่มค่า  $X_G^*$  นั่นเอง

### 2.2.2.3 ค่าเฉลี่ยของเวลาที่ของเหลวอยู่ในถังปฏิกรณ์

ในถังปฏิกรณ์ ถ้ากำหนดความเข้มข้นของก๊าซที่ต้องการให้ละลายในของเหลวให้มีค่าคงที่ ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำผ่านถังปฏิกรณ์จะมีค่าคงที่ด้วย

ปริมาตรของถังปฏิกรณ์มีค่าคงที่ ดังนั้นเวลาที่ของเหลวอยู่ในวงจรจึงสามารถแสดงด้วยสมการ ดังต่อไปนี้

$$t_r = V/Q \text{ -----(6)}$$

โดยที่  $t_r$  = เวลาการกักเก็บ (the residence time)  
 $V$  = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (volume of reactor)  
 $Q$  = อัตราการสูบน้ำ (the liquid flow rate)

เวลาในการละลายของก๊าซ จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับเวลาที่ของเหลวอยู่ในวงจร

$$\text{โดยที่ } t_d \leq t_r \text{ ----- (7)}$$

$t_d$  = เวลาในการละลายของก๊าซ (the dissolution time)

$t_r$  = เวลาการกักเก็บ (the residence time)

ถ้าเวลาในการละลายของก๊าซมากกว่าเวลาที่ของเหลวอยู่ในวงจรจะเกิดการสะสมของก๊าซในถังปฏิกรณ์  $t_d > t_r$

### 2.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลโดยการเติมอากาศ

ในปี ค.ศ. 1868 ซาลเบช (Salbach) ได้ค้นพบวิธีกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยวิธีเติมอากาศด้วยการกรอง

ในปี ค.ศ. 1916 แอปเปิลเบม (Applebaum) ได้ให้ความเห็นว่าการเติมอากาศตามด้วยการกรองเป็นวิธีสามัญวิธีหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดเหล็กได้

ในปี ค.ศ. 1922 โดแนลสัน (Donaldson) ได้พบวิธีกำจัดเหล็กและก๊าซที่ละลายในน้ำบาดาล โดยใช้เครื่องเติมอากาศแบบตาดหลายชั้น ตามด้วยระบบทรายกรองเร็ว ภายในชั้นต่างๆ ของเครื่องเติมอากาศดังกล่าวได้ใส่ถ่านโค้ก เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมอากาศให้แก่เครื่องเติมอากาศ

ในปี ค.ศ. 1950 บราวน์ (Brown) ได้พบวิธีกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลโดยวิธีเติมอากาศตามด้วยการตกตะกอนและการกรอง เครื่องมือที่ใช้ในการเติมอากาศเป็นเครื่องเติมอากาศแบบตาดหลายชั้นซึ่งไม่ได้ใส่ถ่านโค้ก เครื่องมือที่ใช้ในการตกตะกอนเป็นถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยม ซึ่งมี ระยะเวลาเก็บกักประมาณ 3 ชม. จากผลการทดลอง Brown ได้พบว่า น้ำดิบซึ่งมีเหล็กประมาณ 8.7 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสประมาณ 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อผ่านการกำจัดเหล็กโดยไม่มีการเติมสารเคมีใด ๆ เข้าไปในน้ำแล้ว ปรากฏว่าน้ำที่ผ่านการกำจัดเหล็กจะมีเหล็กเหลืออยู่ประมาณ 1.1 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแมงกานีสเหลืออยู่ประมาณ 0.98 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองโดยใช้เครื่องมือแบบเดิมแต่มีการจ่ายน้ำยาคลอรีนเข้าไปยังน้ำที่ผ่านการเติมอากาศแล้ว Brown ได้พบว่าน้ำที่ผ่านการกำจัดเหล็กจะมีเหล็กเหลืออยู่ประมาณ 0.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีแมงกานีสเหลืออยู่ประมาณ 0.88 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นว่าการทำพรี-คลอรีนเนชันช่วย กำจัดเหล็กได้ดี

ในปี ค.ศ. 1961 ลองเล่, เองเงลบริช และมาร์เกรฟ (Longley, Engelbrecht, and Margrave) ได้ศึกษาวิธีกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลโดยการเติมออกซิเจนตามด้วยการทำตะกอน การตกตะกอน และการกรอง ผลการทดลองจากแบบทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) การเติมอากาศสามารถกำจัดเหล็กได้ 0.1 - 44%
- 2) การตกตะกอนซึ่งมีระยะเวลาเก็บกัก 1 1/2 ชม. สามารถกำจัดเหล็กได้ประมาณ 13%

### 3) การกรองสามารถกำจัดเหล็กได้ 96 - 100%

ในปี ค.ศ. 1967 เองเจลบริช, โอคอนเนอร์และก๊อช (Engelbretcht, O'Connor, and Ghosh) ได้ศึกษาถึงผลทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ ที่มีต่อการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลในระบบทรายกรอง เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบทดลอง ประกอบด้วยถังเติมอากาศแบบใช้อากาศอัดซึ่งสามารถเพิ่ม D.O. ของน้ำดิบจาก 0 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 6.5-8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังเก็บกักซึ่งสามารถเก็บกักน้ำที่ผ่านการเติมอากาศแล้วได้เป็นระยะเวลาประมาณ 1 ชม. และถังกรองซึ่งมีตัวกรองเป็นทรายกรองเร็ว จากการทดลองโดยควบคุมให้น้ำดิบผ่านการเติมอากาศ, การเก็บกักและการกรองอย่างต่อเนื่องกันเป็นเวลานานถึง 8 สัปดาห์ Engelbrech และคณะได้พบว่า D.O. ของน้ำที่กรองแล้วได้ลดลงจาก D.O. ของน้ำที่ไหลเข้าถังกรองและ D.O. ของน้ำที่กรองแล้วจะลดลงตามอายุการกรองที่มากขึ้น ขณะที่ D.O. ของน้ำที่กรองแล้วมีค่าลดลง ปรากฏว่าเหล็กในน้ำที่กรองแล้วได้มีค่ามากขึ้นทุกขณะ และอยู่ในรูปของเฟอร์รัสเป็นส่วนใหญ่ ต่อมา Engelbretcht และคณะได้พบว่าในการกรองแต่ละครั้งอย่างต่อเนื่องภายหลังจากการล้างทราย น้ำที่กรองแล้วใหม่ ๆ ยังมีปริมาณเหล็กน้อยอยู่ ต่อมาเมื่อระยะเวลาในการกรองมากขึ้น ปรากฏว่าเหล็กในน้ำที่กรองแล้วได้เพิ่มมากขึ้นด้วย จนกระทั่งระยะเวลาในการกรองนานถึง 48 ชม. ปรากฏว่าเหล็กในน้ำที่กรองแล้วจะมีปริมาณเกือบเท่ากับเหล็กในน้ำก่อนกรอง วิธีแก้ปัญหานี้ Engelbretcht และคณะได้แนะนำว่าต้องกำจัดแบคทีเรียในทรายกรองให้หมดไปด้วยการใช้คลอรีนหรือด่างทับทิม

ในปี ค.ศ. 1967 ก๊อช, โอคอนเนอร์และองเจลบริช (Ghosh, O'Connor and Engbretcht) ได้เขียนบทความเรื่องผลของจุลินทรีย์ที่มีต่อการกำจัดเหล็กในตัวกรอง เช่นเดียวกับ Engelbrech และคณะดังกล่าวข้างต้น

ในปี ค.ศ. 1967 โรบินสัน (Robinson) ได้ทำการทดลองและศึกษาเกี่ยวกับการทำตะกอน (Precipitation) ของเหล็กและแมงกานีสในน้ำบาดาลที่มีความเป็นด่างต่ำ พอสรุปได้ดังนี้

(1) ถ้าต้องการให้เหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาลที่มีความเป็นด่างต่ำถูกออกซิไดส์ได้ในทันทีที่สัมผัสกับอากาศ จะต้องเพิ่มความเป็นด่างไบคาร์บอเนตของน้ำให้มีค่าประมาณ 100 - 130 มิลลิกรัมต่อลิตรเทียบ  $\text{CaCO}_3$  โดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต หรือปูนขาวหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์

(2) ค่าถังทับทิมช่วยในการออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้ดีโดยไม่ต้องมีการควบคุม pH หรือความเป็นด่าง

(3) เหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาลจะถูกออกซิไดส์ได้ต่อเมื่อ pH ของน้ำมีค่าตั้งแต่ 6.6 ขึ้นไป และจากการศึกษาโดยทั่วไปพบว่าเหล็กเฟอร์รัสจะถูกออกซิไดส์เมื่อ pH มีค่าอยู่ในช่วง 7.0-8.2

(4) สารเคมีที่ดีที่สุดในการเพิ่ม pH และความเป็นด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพราะว่า NaOH เป็นสารเคมีที่ไม่ทำให้น้ำมีความกระด้างเพิ่มขึ้น และราคาไม่แพงนัก เมื่อเทียบกับค่าถังทับทิม อนึ่ง ในทางปฏิบัติจะต้องเพิ่มความเป็นด่างให้อยู่ในช่วง 100 - 120 มิลลิกรัมต่อลิตร เทียบ  $\text{CaCO}_3$

ในปี ค.ศ. 1968 ลิมรัตน์ (Limrat) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพิจารณาใช้เครื่องเติมอากาศแบบตาดหลายชั้นเป็นหน่วยกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ ทดลองประกอบด้วยเครื่องเติมอากาศแบบตาดหลายชั้น ตามด้วยถังผสมสารเคมี และถังตกตะกอนแบบหลายชั้นในการวิจัยของ Limrat สามารถสรุปได้ว่า

(1) เครื่องเติมอากาศแบบตาดหลายชั้น ซึ่งมีจำนวน 6 ชั้น ห่างกันชั้นละ 30 เซนติเมตร เมื่อใช้ตัวกลางที่เป็นถ่านชนิดต่างๆ ใส่ลงในตาดของเครื่องเติมอากาศให้ครบทุกชั้นในการทำงานของเครื่องเติมอากาศ พบว่า เครื่องเติมอากาศสามารถเพิ่ม D.O หรือ ออกซิเจนละลายให้แก่ น้ำดิบได้ถึง 6.30 - 6.80 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ออกซิเจนจำนวนนี้สามารถ ออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสในน้ำดิบได้อย่างมากเพียง 12% เท่านั้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ pH ของน้ำบาดาลมีค่าเพียง 6.0

(2) ขนาดที่เหมาะสมของถ่านที่ควรใส่ในตาดเติมอากาศคือ 2 1/2 นิ้ว ถึง 4 1/2 นิ้ว

(3) ชั้นตะกอนในถังตกตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาในถังผสมระหว่างเหล็กในน้ำ ปูนขาว และสารส้ม สามารถกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลได้สูงถึงประมาณ 96% แต่มักเกิดปัญหา คือ น้ำที่ผ่านการกำจัดเหล็กแล้วจะมีความกระด้างสูงขึ้นเนื่องจากการเติมปูนขาว

ในปี ค.ศ. 1975 โรบินสัน (Robinson) ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับผลของซิลิกาใน น้ำบาดาลที่มีต่อการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล จากผลการทดลอง Robinson ได้พบว่าน้ำบาดาล ที่มีซิลิกามากขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะมีค่ามากขึ้นด้วย เมื่อความเป็นด่างไบคาร์บอเนต มีค่ามากขึ้นก็จะมีผลทำให้เหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาลถูกออกซิไดส์ได้ง่ายขึ้น หรือหมายถึงจะมีผล ทำให้เหล็กในน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมอากาศจะสามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

ในปี ค.ศ. 1979 ประภิต จันอุไร (1979) ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อ หน่วยพื้นที่ถาดเติมอากาศที่มีต่อการกำจัดเหล็กในระบบทรายกรองเร็ว พบว่าประสิทธิภาพของ การกำจัดขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว คือ อัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ถาดเติมอากาศ และอัตราการกรอง ที่อัตราการกรอง 5 เมตรต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของน้ำต่อหน่วยพื้นที่ ถาดเติมอากาศ 12.5 เมตรต่อชั่วโมง ระบบทรายกรองเร็วสามารถกำจัดเหล็กได้ประมาณ 70% และน้ำกรองแล้วมีความขุ่นสูง แต่ที่อัตราการกรองเดียวกัน เมื่ออัตราการไหลของน้ำ ต่อหน่วย พื้นที่ถาดเติมอากาศสูงมาก หรือการกรองโดยตรงโดยไม่ต้องใช้เครื่องเติมอากาศ ปรากฏว่าระบบทรายกรองเร็วสามารถกำจัดเหล็กได้ถึง 94%

ในระบบกรองโดยตรงอัตราการกรองที่เหมาะสมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 5 - 7.5 เมตรต่อ ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กจะอยู่ระหว่าง 94-98%

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย