



## ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### วิธีการกำจัดเหล็กในน้ำ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตน้ำมีวิธีการกำจัดเหล็กให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ 0.3 มก./ล. หลายวิธีได้แก่

1. วิธีออกซิเดชันและตกผลึก โดยใช้การออกซิเดชันเหล็ก Fe(II) ให้ตกผลึกเป็นเหล็ก Fe(III)

1.1 การแอร์เรชันโดยออกซิเจน ตามด้วยการตกตะกอนและการกรอง

1.2 การออกซิเดชันโดย  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{ClO}_2$  ตามด้วยการตกตะกอนและ

การกรอง

1.3 การกรองด้วย Calcined Magnesite-Diatomeaceous earth filtration

2. วิธี Ion-Exchange methods โดย "Zeolite" Softening และ "Manganese-zeolite" process วิธีใช้น้ำที่มีเหล็กไม่เกิน 10 มก./ล.

3. วิธีรักษาเสถียรภาพ (Stabilization) ของเหล็ก ด้วยโพลีฟอสเฟต และซิลิเกต วิธีนี้ใช้วิธีการทำให้เหล็กเกิดเสถียรภาพ อยู่ในสภาวะแขวนลอย (Suspended State) โดยใช้ สารเคมี เช่น โพลีฟอสเฟตหรือซิลิเกต เป็นสาร Dispersing Agent โดยจะช่วยไม่ให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก จริง ๆ แล้ว อาจจะกล่าวได้ว่าไม่ได้เป็นการกำจัด แต่เป็นการควบคุมและจำกัด ใช้น้ำกับเหล็กในน้ำ ที่มีปริมาณไม่เกิน 1.0 มก./ล. (Faust และ Aley, 1983)

### จลศาสตร์ของกาวเติมออกซิเจน

โดยปกติเหล็ก Fe(II) จะไม่เสถียรในสภาวะปกติ โดยจะถูกออกซิไดซ์เป็น Fe(III) โดย

ออกซิเจนทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและจะตกผลึกในเวลาต่อมา เช่น  $\text{Fe(OH)}_3$

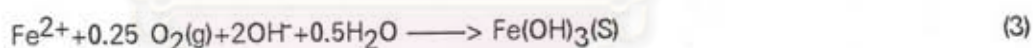
Weiss ได้ลงความเห็นว่าการให้ออกซิเจนแก่  $\text{Fe(II)}$  จะเป็นดังนี้



อัตราการออกซิเดชัน จะเป็นลำดับที่ 1 (first order) โดยจะขึ้นกับปริมาณ  $[\text{Fe(II)}]$  และ  $[\text{O}_2]$

$$-\frac{d[\text{Fe(II)}]}{dt} = K[\text{Fe(II)}][\text{O}_2] \quad (2)$$

ปฏิกิริยานี้ค่อนข้างจะซับซ้อน อัตราการออกซิเดชัน ขึ้นกับธรรมชาติของอนุภาคแอนไอออนที่เข้าสู่ น้ำ และเพิ่มขึ้นตามความสามารถ จะรวมเป็นสารประกอบคอมเพล็กซ์กับเหล็กเฟอร์ริก จลศาสตร์ของการเติมออกซิเจนให้เหล็ก (II) มีปฏิกิริยา Stoichiometric ดังนี้



ในสารละลายที่มีค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต อัตราการออกซิเดชันจะกลายเป็น

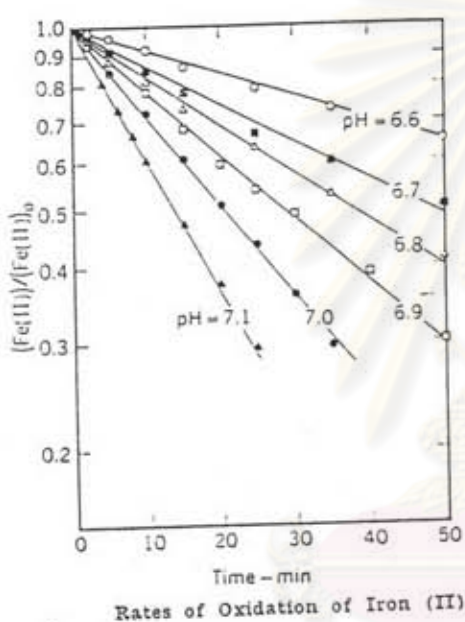
$$-\frac{d[\text{Fe(II)}]}{dt} = K[\text{OH}^-]_2 \cdot \text{PO}_2[\text{Fe(II)}] \quad (4)$$

$$K = \text{ค่าคงที่}$$

$$[\text{OH}^-] = \text{ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน}$$

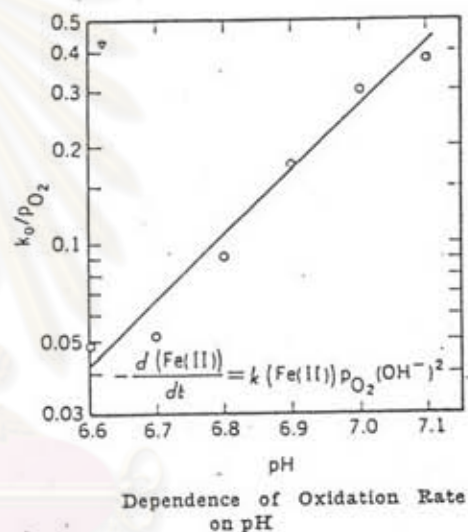
$$[\text{Fe(II)}] = \text{ความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส}$$

Stumm และ Lee (1967) ได้แสดงผลในรูปที่ 2.1 โดยปฏิกิริยาลำดับ 1 จะขึ้นกับ Fe(II) และไม่ขึ้นกับ Fe(III)



รูปที่ 2.1

ที่มา : Schenk และ Weber Jr.(1968)



รูปที่ 2.2

ที่มา : Schenk และ Weber Jr.(1968)

รูปที่ 2.2 แสดงผลของ pH (หรือค่า OH) เมื่อเพิ่มค่า pH ขึ้น 1 หน่วย จะเพิ่มอัตราการเติมออกซิเจน 100 เท่า

### การออกซิเดชันด้วยสาร Oxidants

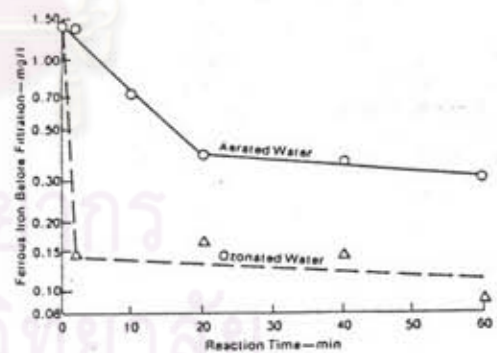
การใช้คลอรีน, โปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต, โอโซน, คลอรีนไดออกไซด์ สามารถใช้เป็นสาร Oxidants สำหรับกำจัดเหล็กได้ สมการรีดักชันจะแสดงในรูปที่ 2.3 ในการออกซิไดซ์เหล็ก Fe(II) เป็น Fe(OH)<sub>3</sub>

การเติมคลอรีน สามารถที่จะออกซิไดซ์เหล็กได้ดี และรวดเร็วกว่าการเติมออกซิเจน โดยเฉพาะที่ค่า pH ต่ำ นอกจากนี้การใช้โปตัสเซียมเปอร์มังกาเนตก็สามารถที่จะกำจัดเหล็กและแมงกานีสได้ดีเช่นกัน

ในการทดลองใน Pilot test Matthews พบว่า การเติมคลอรีน 9.5 มก./ล. จะกำจัดเหล็กในน้ำ 4.5 มก./ล. ได้ทั้งหมด Willey และ Jennings ได้ทดลองพบว่าโปตัสเซียมเปอร์มังกาเนต 6 มก./ล. จะทำปฏิกิริยาตาม Stoichiometry พอดีในการกำจัดเหล็ก Fe(II) 10 มก./ล. ส่วน Cromley และ O'connor ได้ใช้โอโซนในการกำจัดเหล็กพบว่าได้ผลดีกว่าการแอร์เรชันดังในรูปที่ 2.4

Reactions of Fe(II) with Alternative Oxidants at 25°C

Reaction	$\nu^0$
$\text{Fe}^{2+} + 3 \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3 \text{H}^+ + e$	+1.052
$\text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+ + 2 e = \text{O}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}$	+2.07
$2 \text{Fe}^{2+} + 5 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2(\text{g}) = 2 \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 4 \text{H}^+ + \text{O}_2$	+1.06
$\text{ClO}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 5 e = \text{Cl}^- + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.511
$\text{ClO}_2(\text{g}) + 5 \text{Fe}^{2+} + 13 \text{H}_2\text{O} = 5 \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 11 \text{H}^+ + \text{Cl}^-$	+0.501
$\text{Cl}_2(\text{aq}) + 2 e = 2 \text{Cl}^-$	+1.3599
$2 \text{Fe}^{2+} + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2(\text{g}) = 2 \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 2 \text{Cl}^- + 6 \text{H}^+$	+0.385
$\text{MnO}_4^- + 4 \text{H}^+ + 3 e = \text{MnO}_2(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1.695
$3 \text{Fe}^{2+} + 7 \text{H}_2\text{O} + \text{MnO}_4^- = 3 \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + \text{MnO}_2(\text{s}) + 5 \text{H}^+$	+0.685



รูปที่ 2.3 ตารางแสดงปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก

Fe(II) กับสาร Oxidants

ที่มา : Faust และ Aley (1983)

รูปที่ 2.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการ

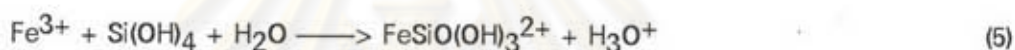
กำจัดเหล็กโดยการแอร์เรชัน  
กับการเติมโอโซน

ที่มา : Faust และ Aley (1983)

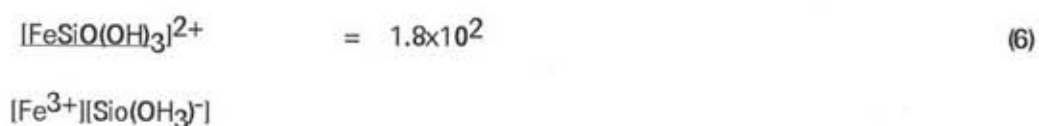


### การเกิดเสถียรภาพของเหล็กที่ละลายในน้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่าง กรดซิลิซิก ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) กับไอออนของโลหะ ถูกพบโดย Mattson ในปี 1933 ในระหว่างการทดลองวิธีอิเล็กโตรไดออลิซิสกับดิน พบว่า มีสารประกอบคอมเพล็กซ์ระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิเกต Hazel ได้ทดลองต่อในปี 1949 เพื่อหาความสัมพันธ์ของซิลิกากับอลูมิเนียม เหล็กและโครเมียม Yedava และ Ghosh ได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของซิลิกาละลายน้ำที่มีต่อค่าความนำ (Conductivities) ของเหล็ก โครเมียม แบริียมและสตรอนเชียม ในปี 1950 Henry ได้สังเกตว่าผลของการเติมซิลิเกตอาจใช้ควบคุมเหล็กได้โดยการสร้างเสถียรภาพของฟล็อกเหล็กในค่า pH สูง จนกระทั่งปี 1965 Weber และ Stumm ได้แสดงสมการของปฏิกิริยารวมตัวเป็นสารประกอบของซิลิเกตกับเหล็กเฟอร์ริก ดังสมการ



การทดสอบกระทำที่ pH ต่ำกว่า 3 เพื่อให้ไอออนอิสระของเหล็กเฟอร์ริก สามารถเกิดไฮโดรลisisได้ช้าลง เพื่อจะศึกษาปฏิกิริยาได้เต็มที่ แต่ก็คาดว่าถ้าให้ค่า pH อยู่ในช่วงปกติของน้ำตามธรรมชาติ ก็ยังจะเกิดความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการข้างต้น น้ำที่มีความเข้มข้นของซิลิกา 60 มก./ล. และมีเหล็ก 5.6 มก./ล. จะเกิดสารประกอบคอมเพล็กซ์ของซิลิกากับเหล็กประมาณหนึ่งในสาม Dart และ Foley (1970) ได้ทำการทดลองเติมซิลิเกตเพื่อรักษาเสถียรภาพของเหล็กที่ละลายน้ำ พบว่า ซิลิเกตจะทำให้เหล็กเกิดเสถียรภาพได้ดีที่ pH สูงๆ ที่ pH 7.5 เป็นช่วงความเสถียรภาพเกิดได้ดี ซิลิเกต เช่น โซเดียมซิลิเกต แบบ Unactivated จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบ Activated Silica Dart และ Foley เชื่อว่าปฏิกิริยาของโซเดียมที่มีต่อเหล็กจะอยู่ในรูปสารประกอบคอมเพล็กซ์ ค่าคงที่สมดุลย์ (Equilibrium constant) ระหว่างซิลิเกตกับเหล็กเฟอร์ริก ได้เสนอโดย Weber และ Stumm (1965) ดัง สมการ



การรวมค่าคงที่ของปฏิกิริยานี้กับค่าคงที่การไอออนไนเซชัน สำหรับกรดออร์โธซิลิซิก

$$\frac{[\text{SiO}(\text{OH})_3][\text{H}^+]}{[\text{Si}(\text{OH})_4]} = 2 \times 10^{-10} \quad (7)$$

จาก (5) และ (6) จะได้

$$\frac{[\text{Fe}^{3+}]}{[\text{FeSiO}(\text{OH})_3^{2+}]} = 2.78 \frac{[\text{H}^+]}{[\text{Si}(\text{OH})_4]} \quad (8)$$

สมการที่ 8 แสดงให้เห็นว่าทำไมเหล็กเฟอร์ริก Fe(III) จะเพิ่มขึ้นในกรณีเราเติมซิลิเกตลงไป ที่ pH ต่ำ เพื่อให้เกิดสารประกอบคอมเพล็กซ์ ทั้งนี้เนื่องจาก  $[\text{H}^+]$  จะเพิ่มมากเมื่อ pH ต่ำ จึงควรเติมซิลิเกตในการควบคุมเหล็กที่ pH สูงจะได้ผลดีกว่า

อย่างไรก็ตาม Dart และ Foley (1970) ก็ได้ตั้งสมมติฐานว่าเสถียรภาพที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากการที่เหล็กเฟอร์ริก (Fe(III)) เป็นสารโมโนเมอร์ที่ไม่มีเสถียรภาพ(Unstable) และปกติมีแนวโน้มที่เกิดการโพลีเมอไรเซชัน เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ จะรวมตัวเป็นฟลอค เหล็กที่มองเห็นได้ชัดซึ่งปรากฏทั่วไปในน้ำใต้ดินที่ถูกออกซิเดชัน ส่วนซิลิเกตก็คล้ายคลึงกันเมื่อ เติมในรูปโซเดียมซิลิเกต ก็จะไม่เสถียรภาพ ที่ pH ของน้ำตามธรรมชาติ จะถูกไฮโดรไลซ์จนกลายเป็นกรดซิลิซิกซึ่งอาจเกิดโพลีเมอไรซ์ กลายเป็นโพลีซิลิเกตได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม จะเกิดความสัมพันธ์ระหว่างไอออนเหล็กที่ไม่มีเสถียรภาพ กับไอออนของออร์โธซิลิซิกที่ไม่มีเสถียรภาพ พบว่า ปฏิกิริยาจะกั้นการเกิดโพลีเมอไรเซชันของไอออนของเหล็กเฟอร์ริก ที่เกิดเป็นตะกอนฟลอคของเหล็กได้ อาจไม่สามารถหยุดยั้ง การรวมตัวเกิดเป็นตะกอนฟลอคของเหล็ก แต่อาจทำให้มันเกิดได้ช้าลงในอัตราที่ขึ้นกับสมดุลย์ของไอออนเฟอร์ริกอิสระในสารประกอบของซิลิเกต ดังใน สมการ (7)

แต่ Cameron และ Liss (1982) มีความเห็นว่าความเสถียรไม่น่าจะเกิดจากการรวมตัวเป็นสารประกอบคอมเพล็กซ์ของเหล็กกับซิลิเกต แต่อธิบายว่าเกิดจากการที่สารซิลิเกตทำให้

อนุภาคของเหล็กมีขนาดเล็กและยับยั้งมิให้จับตัวรวมกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ โดยกรดซัลฟิวริกซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดูดติดผิว (Adsorption) อยู่ในอนุภาคคอลลอยด์ของเหล็กออกไซด์ ที่เป็นประจุบวก การเติมซิลิเกตในรูปเกลือโซเดียมจะให้ประจุลบที่ทำให้เหล็กเกิดเสถียรภาพ

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการทำให้เกิดเสถียรภาพ

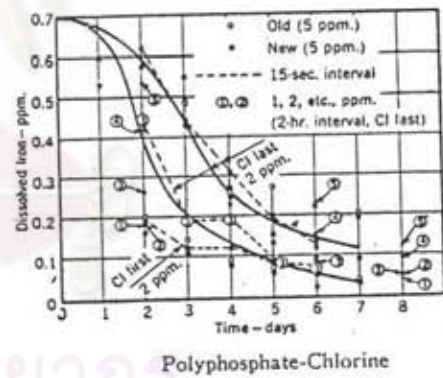
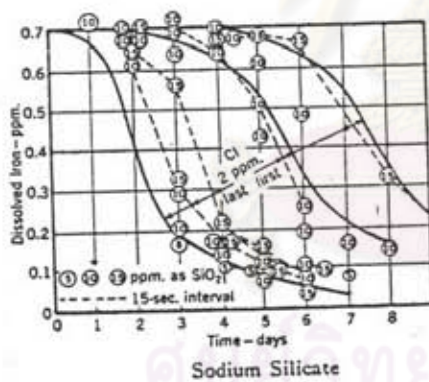
1. pH ที่ pH สูง ซิลิเกตจะทำให้เหล็กเกิดเสถียรภาพได้ดี โดย pH มากกว่า 7.5 มีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพดี การเติมซิลิเกตจะช่วยทำให้ค่า pH สูงขึ้น
2. ความกระด้าง การเติมซิลิเกตทำให้ pH สูงขึ้นเนื่องจากสภาพการเป็นรีเอเจนต์ต่างของมันแต่ค่าความกระด้างจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มจะทำให้เกิดการตกผลึก โดยการเติมซิลิเกตอาจทำให้ความกระด้างเพิ่มขึ้น 5 เท่าของปกติ
3. การกระตุ้นด้วยคลอรีนเนชั่น การเติมซิลิเกตจะได้ผลดีที่สุด เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยการเติมคลอรีน หรือการออกซิไดซ์ ด้วยวิธีการออกซิเดชันอื่นๆ การเติมซิลิเกตที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดจะอยู่ที่ช่วงเวลา 15 วินาที ก่อนหรือหลัง การออกซิเดชันเหล็ก
4. การกวน การกวนเร็วจะเพิ่มเสถียรภาพได้
- 5) อุณหภูมิ ความเสถียรจะหมดไปถ้าอุณหภูมิสูงเกิน 80°C ขึ้นไป

#### การทดลองที่ผ่านมา

ในปี 1950 Henry ได้ทำการทดลองเติมสารต่าง ๆ ลงในน้ำใต้ดิน เพื่อหาแนวทางป้องกันการเกิดการตกตะกอนของ  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ซึ่งทำให้เกิดน้ำมีสีแดงในเส้นท่อ ทำให้ผู้บริโภคได้รับความเดือดร้อน โดยผลการวิเคราะห์น้ำดิบ มีเหล็กในน้ำเพียงประมาณ 0.5-0.9 มก./ล. แต่เมื่อทำการฆ่าเชื้อโรค โดยการเติมคลอรีน แล้วส่งน้ำเข้าสู่ระบบจ่ายน้ำ ปรากฏว่าในเส้นท่อบาง



จุดที่น้ำไหลช้าและที่อยู่ปลายท่อ ซึ่งน้ำหยุดนิ่งจะเกิดปัญหาดังกล่าว การทดลองโดยใช้สารต่าง ๆ เช่น ฟลูออไรด์ โพลีฟอสเฟต และ โซเดียมซิลิเกต โดยทดลองเติมโซเดียมซิลิเกตในปริมาณ 5 10 15 มก./ล. ตามลำดับ และทดลองเติมพวกฟอสเฟต เช่น โพลีฟอสเฟต,  $\text{NaH}_2\text{P}_2\text{O}_4$   $\text{Na}_2\text{HPO}_4$   $\text{Na}_3\text{PO}_4$  พบว่า การใช้ซิลิเกตให้ผลในการทดลองได้ดีกว่า โดยการเติมคลอรีนก่อนประมาณ 15 วินาที แล้วจึงเติมซิลิเกตจะให้ผลดีกว่าการเติมซิลิเกตก่อนการเติมคลอรีน ส่วนการใช้สารโพลีฟอสเฟตจะให้ผลดี ถ้าเติมลงไปก่อนการเติมคลอรีน โดยการใช้ช่วงเวลาในการเติม ห่างกัน 15 วินาที และ 2 ชั่วโมง ใน 2 การทดลองตามลำดับ การใช้สารโพลีฟอสเฟต จะได้ผลดีต้องใช้อัตราส่วนต่อปริมาณเหล็กในน้ำตั้งแต่ 3:1 ขึ้นไป แต่พบว่าถ้าเติมโพลีฟอสเฟตมากเกินไป จะทำให้น้ำขุ่นเป็นสีน้ำเงินขาว (bluish-white turbidity) ภายในเวลาไม่กี่ชั่วโมง การเติมโพลีฟอสเฟต 5 มก./ล. จะทำให้เกิดความขุ่นประมาณ 2 พีพีเอ็ม ในหน่วยของซิลิกา พบว่าที่ปริมาณการเติม 5 มก./ล. โพลีฟอสเฟต และซิลิเกตจะให้ผลใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.5 การเติมโซเดียมซิลิเกต  
ที่มา : Henry (1950)

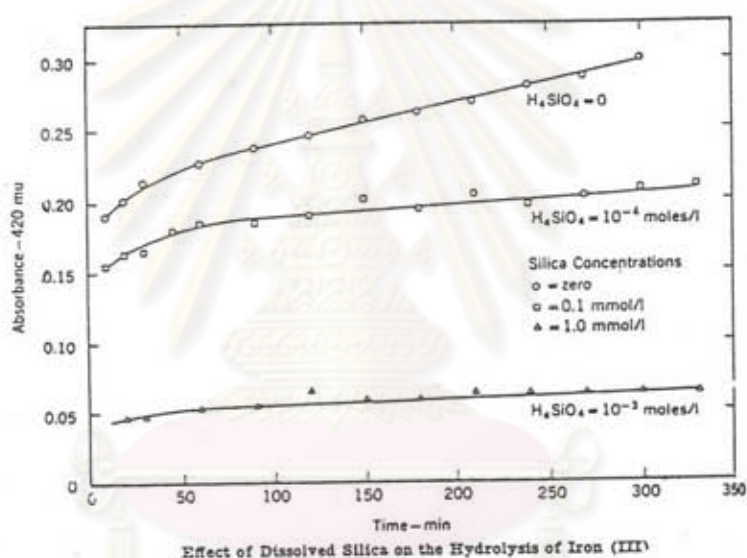
รูปที่ 2.6 การเติมโพลีฟอสเฟต  
ที่มา : Henry (1950)

จากรูปที่ 2.5 แสดงว่าการเติมซิลิเกตในปริมาณ 10-15 มก./ล. สามารถทำให้น้ำเกิดเสถียรภาพเป็นเวลา 5-6 วัน ก่อนจะเกิดการตกตะกอนของเหล็กออกมา ส่วนรูปที่ 2.6 โพลีฟอสเฟตจะช่วยให้เกิดเสถียรภาพได้ 1-2 วัน



Henry สรุปผลว่าโซเดียมซิลิเกตมีประสิทธิภาพมากกว่าโพลีฟอสเฟต และสามารถทำให้เกิดเสถียรภาพ เป็นเวลา 8 - 10 วัน ก่อนที่เหล็กจะตกตะกอน การเติมซิลิเกตมากกว่า 40 มก./ล. ไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ และเป็นสิ่งไม่จำเป็น ที่จะทำให้เกิดเสถียรภาพมากกว่า 10 วัน

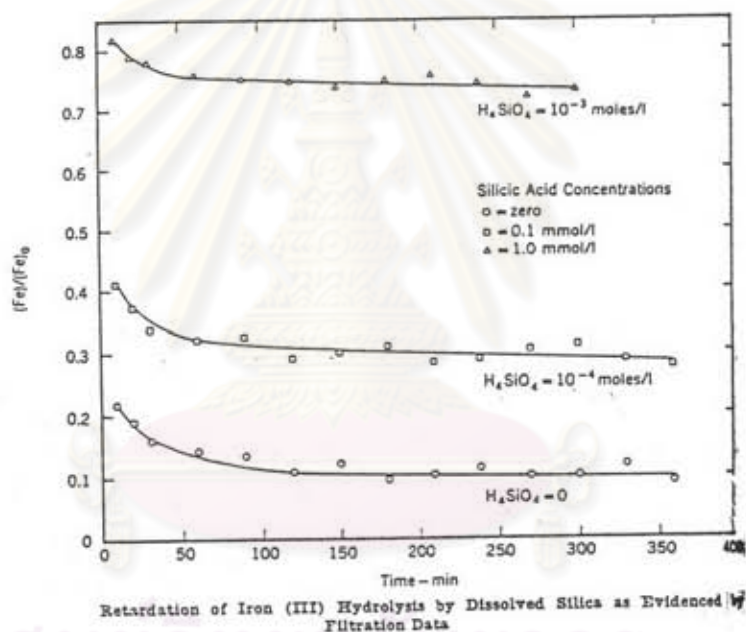
ในปี 1965 Weber และ Stumn ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของ อีออนเหล็กเฟอร์ริก ในปี 1968 Schenk และ Weber ใช้วิธีวิเคราะห์ 2 อย่าง แบบแรกใช้วิธีการวัด สีที่ความยาวคลื่น 420 mu ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลของซิลิกาละลายน้ำที่มีต่อการไฮโดรไลซิสของ Fe(III)  
ที่มา : Schenk และ Weber (1968)

จากรูปที่ 2.7 แสดงว่าสีที่เกิดจากตะกอนเหล็กเฟอร์ริกจะลดลง เมื่อเติมกรดซิลิกามากขึ้น

วิธีการที่สองใช้การกรองผ่านกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน และหาปริมาณเหล็กที่กรองได้โดยวิธีพีแนนโทรอน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.8

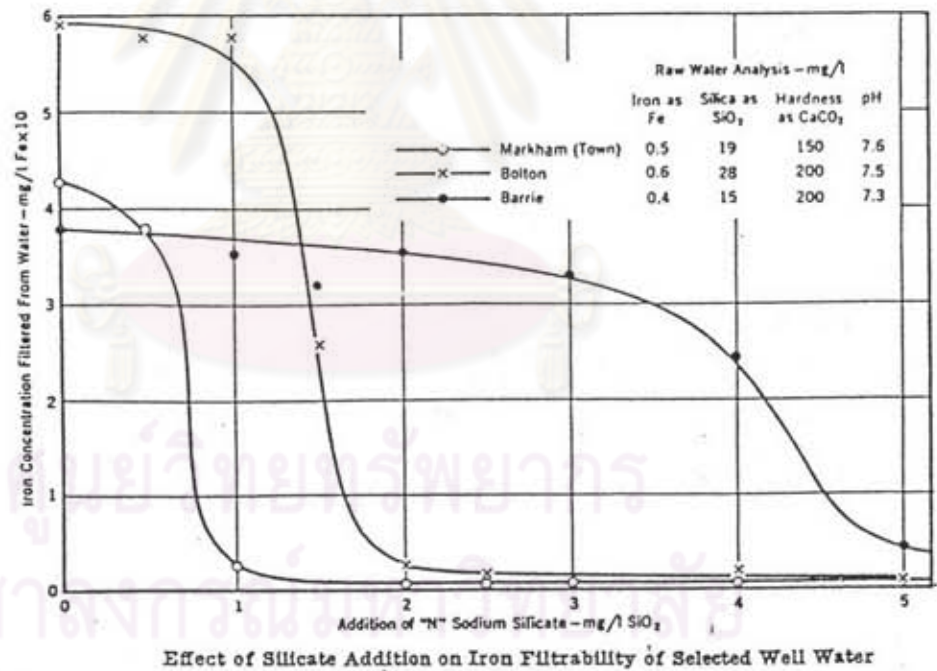


รูปที่ 2.8 การหน่วงการเกิดไฮโดรลีสซิสของเหล็ก Fe(III) โดยซิลิกาละลายน้ำ  
ที่มา : Schenk และ Weber Jr. (1968)

จากรูปที่ 2.8 แสดงว่าเหล็กจะผ่านกระดาษกรองไปได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกาหรืออีกนัยหนึ่งก็คือเหล็กเฟอร์ริกจะตกตะกอนน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของซิลิกามากขึ้น

ซิลิกาหรืออีกนัยหนึ่งก็คือเหล็กเฟอร์ริกจะตกตะกอนน้อยลง เมื่อความเข้มข้นของซิลิกามากขึ้น

ในปี 1970 Dart และ Foley ได้ทำการทดลองเติมโซเดียมซิลิเกต ลงในน้ำใต้ดิน ที่เมืองเล็กๆ ใกล้เคียง เมืองออนตาริโอ โดยการเติมสารโซเดียมซิลิเกต ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 6 มก./ล. ลงในระบบเส้นท่อที่เคยมีปัญหา น้ำแดง อันเนื่องมาจากการตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริก ภายหลังจากการคลอรีนเนชั่น และลดปริมาณซิลิกา ลงเหลือ 5.5 มก./ล. 4.3 มก./ล. 3.2 มก./ล. และ 2.5 มก./ล. ตามลำดับ พบว่าปริมาณต่ำสุดที่จะไม่ทำให้เกิดปัญหาน้ำแดงก็คือ 2.7 มก./ล. โดยปริมาณเหล็กในน้ำดิบเริ่มต้นประมาณ 0.5 มก./ล.

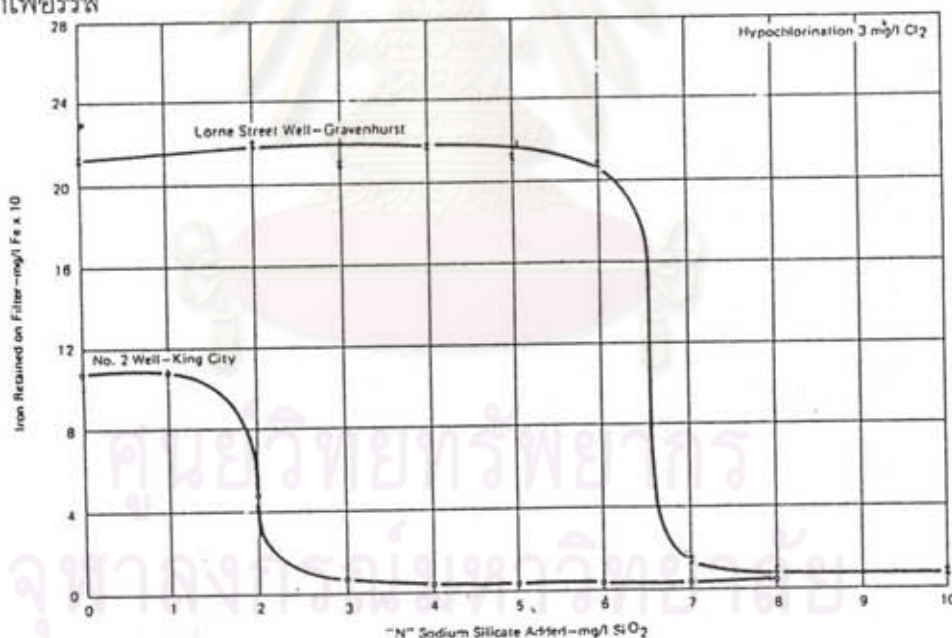


รูปที่ 2.9 ผลของการเติมสารซิลิเกตต่อปริมาณความเข้มข้นของเหล็กที่กรองได้  
ที่มา : Dart และ Foley (1970)



ในปี 1972 Dart และ Foley ได้ทำการทดลองเพิ่มเติม ที่ชุมชนเล็ก ๆ 6 แห่ง ใกล้เมือง ออนตาริโอ การทดลองในสนาม แบบทีละเท (Batch Tests) ใช้น้ำตัวอย่าง 1 ลิตร เติมสารละลายคลอรีนความเข้มข้น 1% ในอัตรา 3 มก./ล. จากนั้นเติมสารละลายซิลิเกตความเข้มข้น 1% ตามในทันที โดยเติมลงไปทีละ 0.1 มล. อย่างช้า ๆ น้ำตัวอย่างจะถูกกวนให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการกวนทำให้เกิดปฏิกิริยา (Reaction Time) เพื่อให้เกิดสมดุลง โดยใช้เวลาประมาณ 45-60 นาที

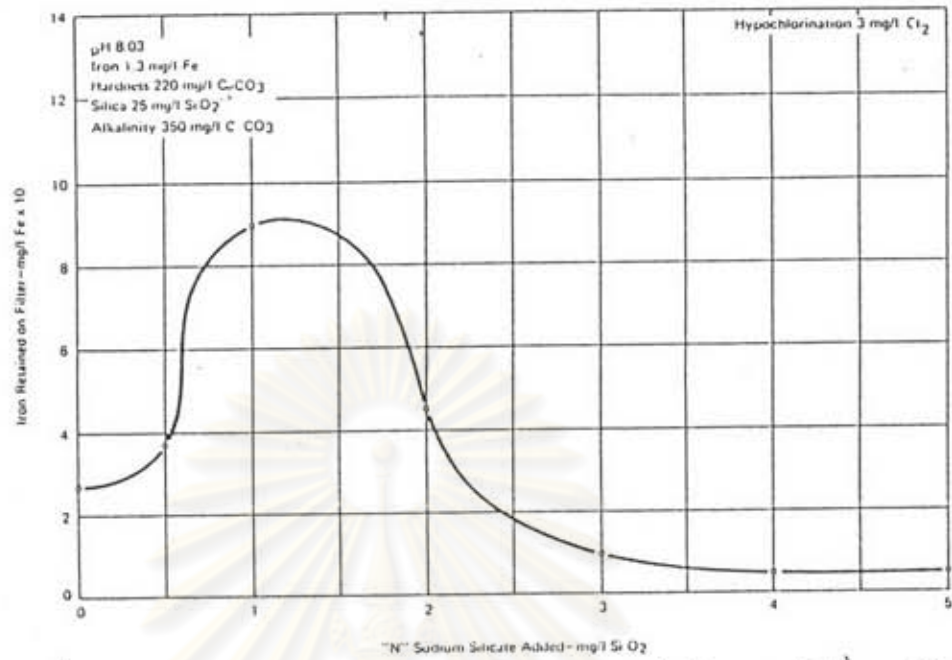
จากการเติมซิลิเกตลงในปริมาณไม่เกิน 6.2 มก./ล. ในน้ำใต้ดินที่มีอยู่ประมาณ 1.3 มก./ล. พบว่าไม่มีปัญหาสนิมเหล็กของตะกอนเหล็กเฟอร์ริก จากน้ำใต้ดินดังกล่าว โดยได้อธิบายว่า การเกิดเสถียรภาพเกิดจากอนุภาคประจุลบของสารออร์โธซิลิเกต จะรวมตัวกับอ็อกไซด์เหล็กเฟอร์ริกที่เกิดขึ้นใหม่ ๆ ก่อนที่อ็อกไซด์ของเหล็กเฟอร์ริกจะมีโอกาสเกิดการโพลีเมอไรส์ จนกลายเป็นอนุภาคตะกอนฟล็อกของเหล็กและอ็อกไซด์ของซิลิเกตจะไม่พบว่ารวมกันเข้ากับอ็อกไซด์ของเหล็กเฟอร์ริก



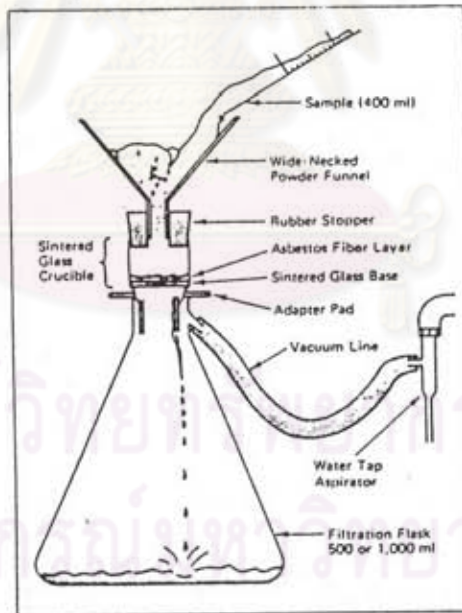
Filtrable Iron vs. Silicate Addition—Typical Results

รูปที่ 2.10 ผลของการเติมซิลิเกตต่อปริมาณความเข้มข้นของเหล็กที่กรองได้

ที่มา : Dart และ Foley (1972)



รูปที่ 2.11 ผลของการเติมสารซิลิกาเกิดต่อปริมาณความเข้มข้นของเหล็กที่กรองได้  
ที่มา : Dart และ Foley (1972)



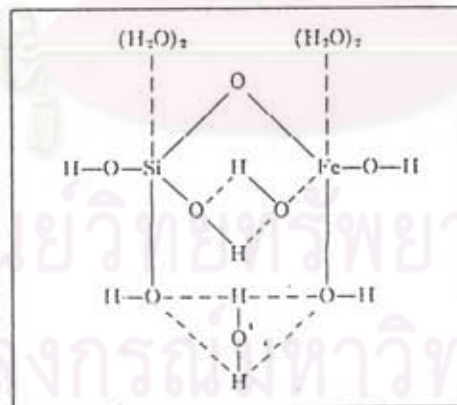
Basic Equipment Setup for the Filtration Test

รูปที่ 2.12 อุปกรณ์การกรองที่ใช้ในการทดลองของ Dart และ Foley  
ที่มา : Dart และ Foley (1972)

Dart และ Foley (1970) ได้อธิบายด้วยสมการซึ่งเคยเสนอในสมการที่ 5-8 ว่าการเติมสารออร์โธซิลิเกต ที่เป็นประจุลบ จะจับเข้ากับประจุบวกของไดไฮดรอกซิลเฟอร์ริกไอออน ซึ่งปกติ จะรวมตัวกันเกิดการโพลีเมอไรเซชัน และตกผลึก แต่ในกรณีนี้จะกลายเป็นรูปของสารประกอบซิลิเกตดังสมการ



จะมีโครงสร้างของสารประกอบของซิลิเกตกับเหล็กเฟอร์ริก ภายใต้สภาวะการทดลองต่าง ๆ ไป ดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสารประกอบ Silicate - iron(III) Complex  
ที่มา : Dart และ Foley (1972)



ในปี 1975 Robinson ได้ทำการทดลองในประเทศบังคลาเทศ พบว่าน้ำใต้ดินที่มีปริมาณซัลเฟตละลายอยู่ในอัตราสูง จะไม่สามารถกำจัดเหล็กได้ด้วยการออกซิเดชันทั่วไป ต้องแก้ไขด้วยการเติมสารละลายต่างลงไป การเติมซัลเฟตลงไปปริมาณ 75 มก./ล. จะทำให้น้ำดิบที่มีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสเริ่มต้นประมาณ 7 มก./ล. ซึ่งแต่เดิมไม่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีแอร์เรชันทั่วไป สามารถตกตะกอนเหล็กในน้ำได้ดี เมื่อเทียบกับการไม่เติมสารซัลเฟต ซึ่งสารซัลเฟตจะเพิ่มความเป็นด่างไบคาร์บอเนตให้มากขึ้น มีผลให้เหล็กเฟอร์รัสถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายขึ้น หรือหมายถึงจะมีผลทำให้เหล็กในน้ำบาดาลที่ผ่านการเติมอากาศ จะสามารถตกตะกอนได้ง่ายขึ้น

ในปี 1982 Cameron และ Liss ได้ทดลองหาเสถียรภาพของเหล็กละลายในน้ำได้ผลว่าซัลเฟตกับฟอสเฟตช่วยสร้างเสถียรภาพให้กับเหล็กที่ละลายในน้ำได้ดีโดยต้องรักษา ค่า pH ให้อยู่ในช่วง 6 - 11 และไม่ควรให้มีพวกประจุบวกไดวาเลนต์ เช่น  $Ca^{2+}$  และพวก  $Na^+$  ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของการรักษาสภาพละลายน้ำของเหล็กมีค่าลดลง การทดลองกระทำโดยปริมาณเหล็กในน้ำประมาณ 1 มก./ล. ในน้ำกลั่น พบว่าซัลเฟตจะเริ่มทำให้เหล็กในน้ำมีเสถียรภาพประมาณ 10 % เมื่อเติมซัลเฟตลงไป 77.4 มก./ล. และจะมีเสถียรภาพประมาณ 90% เมื่อเติมซัลเฟตลงไป 687 มก./ล. ส่วนฟอสเฟตก็สามารถช่วยทำให้เกิดเสถียรภาพได้เช่นเดียวกัน โดยจะมีเสถียรภาพสูงสุดประมาณ 99 % เมื่อเติมฟอสเฟต 250 มก./ล. แต่เมื่อเติมมากขึ้นเสถียรภาพจะลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการตกผลึกของเหล็กฟอสเฟต และเนื่องมาจากการรบกวนของ  $Na^+$  ซึ่งฟอสเฟตที่เติมอยู่ในรูปเกลือโซเดียม ปริมาณ  $Na^+$  เกิน 100 พีพีเอ็ม จะตกผลึกเหล็กในน้ำที่เติมฟอสเฟต 1.25 มก./ล. ได้ คาดไว้ว่า  $Na^+$  120 พีพีเอ็ม สามารถจะตกผลึกเหล็กในน้ำที่มีฟอสเฟต 170 มก./ล. ส่วน  $Ca^{2+}$  เกินกว่า 2 พีพีเอ็ม จะทำให้เหล็กที่เติมฟอสเฟตตกตะกอนได้ในปริมาณพอ ๆ กับการเติม  $Na^+$  100 พีพีเอ็ม และที่ค่าพีเอชสูง ๆ ฟอสเฟตจะมีประสิทธิภาพดีกว่า (ตารางที่ 1.1)

Cameron ใช้เวลาในการกวน 16-24 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการผสมจนเกิดสมดุลง และ การใช้การกรองน้ำตัวอย่างด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน

ตารางที่ 1.1 แสดงการเกิดเสถียรภาพของเหล็กในน้ำเมื่อเติมสารรีเอเจนต์ต่าง ๆ จากผลการทดลองของ Cameron และ Liss

Stabilization of "dissolved" iron in freshwaters

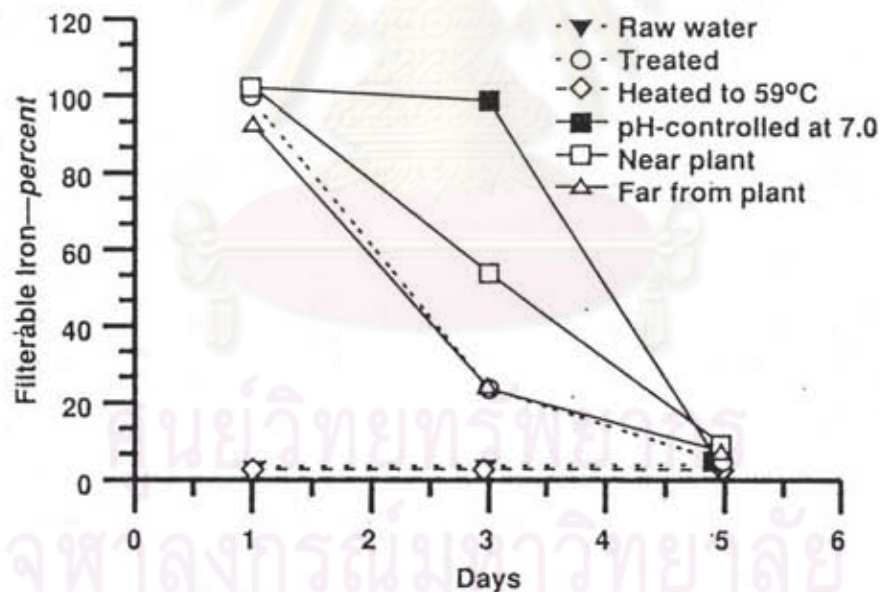
Table 1. Effect of various reagents on stabilization of approx. 1 ppm "dissolved" iron(III) in distilled water

Reagent	Reagent concentration (ppm)	pH of solution		Theoretical maximum "dissolved" Fe concn (ppm)	Measured "dissolved" Fe concn (ppm)	Amount of Fe stabilized (%)
		Initial	Final			
Humic acid	< 0.5	7.0		0.94	0.00	0
	< 3.4	6.8	6.6	0.98	0.96	98
	< 4.9	6.5		0.93	0.89	96
	< 9.6	6.7	6.7	0.96	0.96	100
Tannic acid	0.13	6.9	6.5	0.94	0.00	0
	0.50	6.8	6.5	0.94	0.00	0
	1.98	6.9	6.4	0.93	0.89	96
	3.47	6.8	6.4	0.99	0.89	90
	4.95	6.8	6.3	0.93	0.94	101
	7.35	6.9	6.2	0.93	0.91	98
	12.5	6.8		0.94	0.92	98
	49.5	6.7		0.93	0.89	96
Polyvinylpyrrolidone (PVP)	490	6.8		0.93	0.90	97
	12.5	6.9		0.94	0.00	0
	50	6.8		0.94	0.00	0
	495	6.7		0.93	0.00	0
Sodium dodecyl sulphate	4550	6.8		0.86	0.01	1
	12.5	6.7		0.94	0.00	0
	50	6.9		0.94	0.00	0
	347	6.8	6.5	0.99	0.02	2
Sodium dodecylbenzene sulphonate	495	6.8		0.93	0.20	22
	495	6.9		0.93	0.70	75
	4550	6.8		0.86	0.84	98
	12.5	6.7		0.94	0.00	0
Sodium dodecylbenzene sulphonate	25	6.8	6.5	1.00	0.76	76
	37.5	6.7	6.4	0.94	0.87	93
	50	6.8		0.94	0.92	98
	490	6.8	6.7	0.98	0.83	85
Silicate (expressed as SiO <sub>2</sub> )	7.8	6.7	6.2	0.93	0.00	0
	77.4	6.7	6.2	0.93	0.10	11
	687	6.7	6.4	0.83	0.75	90
Phosphate (expressed as PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	0.05	6.8	6.5	0.94	0.01	1
	0.15	6.8	6.5	0.94	0.00	0
	0.25	6.8	6.4	0.93	0.03	3
	0.35	6.9		0.93	0.00	0
	0.40	6.8	6.7	0.93	0.86	92
	0.50	6.8	6.7	0.93	0.87	94
	0.74	6.9	6.5	0.93	0.88	95
	0.98	6.9		0.93	0.89	96
	1.25	6.8	6.7	0.94	0.89	95
	5	6.9		0.94	0.91	97
	50	6.6		0.94	0.90	96
	149	6.8		0.93	0.92	99
	248	6.8		0.93	0.90	97
	294	6.8		0.93	0.83	89
490	6.6		0.93	0.26	28	
583	6.8		0.92	0.21	23	
762	6.8		0.90	0.24	27	
943	6.7	6.7	0.89	0.04	4	
2270	6.7		0.86	0.04	5	
4170	6.5		0.79	0.05	6	

ที่มา : Cameron และ Liss (1982)

Robinson และ Reed (1992) ได้ทำการทดลองเติมโซเดียมซิลิเกตเพื่อควบคุมเหล็กและแมงกานีส ในระบบประปาที่ชุมชน 5 แห่ง ใกล้ ๆ กับเมืองออนตาริโอ โดยเติมสารซิลิเกตในปริมาณ 6.8 12 18 9 มก./ล. ในแต่ละเมืองที่มีเหล็กในน้ำใต้ดินในปริมาณ 0.20 0.45 1.50 และ 0.8 มก./ล. ตามลำดับ แสดงว่าต้องเติมซิลิเกตมากขึ้นถ้ามีปริมาณเหล็กในน้ำสูง จะได้อัตราส่วนของสารซิลิเกตต่อปริมาณเหล็กในน้ำเป็น 34:1 27:1 12:1 และ 11:1 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณซิลิเกตที่ต้องการเมื่อมีเหล็กในน้ำปริมาณสูงจะมีน้อยลง

ในการทดลองในเมืองหนึ่งได้ทดลองเติมสารซิลิเกตก่อนการเติมคลอรีนพบว่าไม่ได้ผลสำเร็จในการควบคุมเหล็ก ส่วนเมืองอื่นๆ 4 เมืองที่เติมสารซิลิเกตลงในเส้นท่อ หลังจากจุดที่เติมสารละลายคลอรีนประมาณ 1 ฟุต และสามารถควบคุมเหล็กในน้ำได้ตามรูปที่ 2.14



Filterable iron through a 0.45-μm filter from city D, Ontario

รูปที่ 2.14 แสดงปริมาณเหล็กในน้ำใต้ดินที่สามารถผ่านกระดาษกรองได้

ที่มา : Robinson และ Reed (1992)



## ซิลิกา

ซิลิกา เป็นสารที่มาจากธาตุซิลิกอน ที่มีมากเป็นอันดับที่สองรองจากออกซิเจนในธรรมชาติจะอยู่ในรูปซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) หรือ ซิลิกา ถ้ารวมกับสารออกไซด์อื่นๆ จะกลายเป็นสารประกอบซิลิเกต

ซิลิกาในธรรมชาติ ถ้าอนุภาคมีการเรียงโครงสร้างภายใน ไม่เป็นระเบียบแบบแผน ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน เรียกว่า ซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous) แต่ถ้ามีรูปแบบที่มีการจัดเรียงโครงสร้างภายในอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ผลึกซิลิกา (Crystalline Silica) ได้แก่ ทราย ควอทซ์ เป็นต้น

ปริมาณความเข้มข้นของซิลิกาในน้ำ ตามธรรมชาติไม่สูงมากนัก อยู่ในช่วง 1-30 มก./ล. แต่มีบางครั้งอาจพบได้ถึง 100 มก./ล. ขึ้นกับชนิดของแร่ธาตุที่น้ำไหลผ่าน โดยส่วนใหญ่ ซิลิกาในน้ำเกิดจากการละลายของซิลิกาอสัณฐาน

### 1. สถานะของซิลิกาในน้ำธรรมชาติ

ซิลิกาอยู่ในน้ำทั้งที่อยู่ในสถานะเป็นคอลลอยด์ และที่ละลายน้ำ (Soluble) ขึ้นกับค่าความเข้มข้น pH และอุณหภูมิของสารละลาย ใน pH ช่วง 6 - 9 ซิลิกาจะอยู่ในรูปของซิลิกาที่ละลายน้ำมากกว่าอยู่ในรูปคอลลอยด์ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิสูงๆ และ pH ต่ำ จะเกิดขบวนการโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) รวมตัวเป็นอนุภาคที่อยู่ในสถานะที่เป็นคอลลอยด์ แต่ถ้ามีความเข้มข้นในน้ำน้อยกว่า 100 มก./ล. อนุภาคคอลลอยด์ของซิลิกาจะไม่อยู่ตัว กลายเป็นซิลิกาที่ละลายภายในเวลาอันสั้น

### 2. ปฏิกริยาเคมีระหว่าง $\text{Fe}^{3+}$ กับ $\text{H}_2\text{SiO}_4$

ปฏิกริยาเคมีระหว่าง  $\text{Fe}^{3+}$  กับ  $\text{H}_2\text{SiO}_4$  หรือ กรดซิลิซิก จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Silicato-iron complex) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (4) โดยเกิดเป็น  $\text{FeSiO}(\text{OH})_3^{+2}$  แสดงให้เห็นว่า ซิลิกาในน้ำ มีผลต่อการเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของ  $\text{Fe}^{3+}$  กล่าวคือ ซิลิกาจะเป็น

สารที่หนองเหนียวปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เนื่องมาจากการแข่งขันกันระหว่าง  $H_4SiO_4$  กับ  $H_2O$  และ  $OH^-$  ในการทำปฏิกิริยากับ  $Fe^{+3}$  หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า การเกิดสารเชิงซ้อนขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่าง  $Fe^{+3}$  กับซิลิกา ในการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

## ฟอสเฟต

ฟอสเฟตเป็นออกไซด์ของสารที่มาจากธาตุฟอสฟอรัส อาจอยู่ในรูปที่ละลายน้ำหรือรูปอื่นๆ ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่จำเป็นในการเจริญเติบโตของพืชและสัตว์ มักจะพบว่าเป็น growth limiting nutrient ของแหล่งน้ำ ถ้ามีมากเกินไป อาจจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชน้ำอย่างรวดเร็ว

### 1. สารประกอบของฟอสฟอรัสที่สำคัญ ได้แก่

#### 1.1 ออโรฟอสเฟต เช่น

$NaH_2PO_4$  (Monosodium phosphate)

$Na_2HPO_4$  (Disodium phosphate)

$Na_3PO_4$  (Tri Sodium phosphate)

#### 1.2 โพลีฟอสเฟต เช่น

$Na_3(PO_3)_6$  (Sodium hexametaphosphate)

$Na_5P_3O_{10}$  (Sodium Tripoly phosphate)

$Na_4P_2O_7$  (Tetrasodium Pyrophosphate)

สารพวกนี้เป็น Dehydrated phosphate ดังนั้นจะถูกไฮโดรไลซ์กลับไปเป็น Orthophosphate อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH ที่ต่ำ

#### 1.3 อินทรีย์ฟอสเฟต (Organic phosphite)

เกิดจากขบวนการทางชีวของสิ่งมีชีวิต เช่น กรด Nucleic acid,

Sugar phosphate เป็นต้น

## 2 ปฏิกริยาระหว่าง $Fe^{+3}$ กับสารฟอสเฟต

ปฏิกริยาจะเกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำ (Soluble phosphate complexes) ในรูป  $[Fe(HPO_4)]^+$  โดยมีค่า Stability constant =  $2.0 \times 10^8$  ในขณะที่พวก  $HPO_4^-$  จะเกิดสารประกอบ  $[Fe(H_2PO_4)]^{2+}$  ที่มีค่า Stability constant =  $3.0 \times 10^3$  โดยพบว่าที่ pH ระหว่าง 4 - 6 พวกออร์โธฟอสเฟตจะเกิดเป็น  $H_2PO_4^-$  ได้ดี ส่วน pH สูงกว่า 6 จะเกิดเป็น  $HPO_4^{2-}$  เป็นส่วนใหญ่ คาดว่าที่ pH สูงกว่า 6 ความเสถียรจะเกิดจากการรวมตัวเป็นสารประกอบโดย  $HPO_4^{2-}$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย