

บทที่ 3

ทฤษฎี



3.1 วิธีกำจัดเหล็กในน้ำ

3.1.1 วิธีกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล

เหล็กในน้ำบาดาลมักจะเกิดจากแร่ธาตุต่าง ๆ ในชั้นหิน เช่น หินอัคนี, หินทราย, หินดินดาน และหินชนิอื่น ๆ ดังนั้นเหล็กในน้ำบาดาลส่วนใหญ่จึงอยู่รูปของเหล็กอินทรีย์ รูปของเหล็กอินทรีย์ที่มีมากที่สุดในน้ำบาดาลคือ $Fe(HCO_3)_2$ เนื่องจากน้ำบาดาลที่มีเหล็กชนิดนี้มักถูกนำไปใช้ในการผลิตน้ำประปา ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดเหล็กในน้ำ การกำจัดเหล็กอาจแบ่งได้ 3 วิธี คือ

1. วิธีออกซิเดชันตามด้วยการตกตะกอนและการกรอง
2. วิธีกรองแบบสัมผัส
3. วิธีแลกเปลี่ยนไอออน

3.1.1.1 วิธีออกซิเดชัน ตามด้วยการตกตะกอนและการกรอง วิธีออกซิเดชันในที่นี้อาจแบ่งออกได้เป็นหลายวิธีคือ

- (ก) การเติมอากาศ
- (ข) การใช้คลอรีนหรือคลอรีนไดออกไซด์
- (ค) การใช้ด่างทับทิม
- (ง) การเติมอากาศตามด้วยการเติมปูนขาว

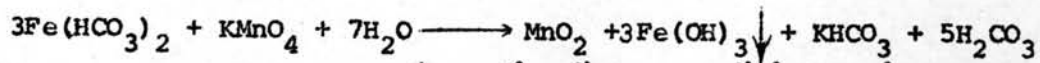
(ก) การเติมอากาศ

001463

วัตถุประสงค์ของวิธีนี้ก็เพื่อต้องการให้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปออกซิไดส์เหล็กในน้ำบาดาล ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $Fe(HCO_3)_2$ ให้เป็น $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_3$

(ค) การใช้ค่างทับทิม

เนื่องจากค่างทับทิมเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง เหล็กเฟอร์รัสในน้ำดิบจะถูกออกซิไดส์ และตกตะกอนในรูปของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดังสมการ

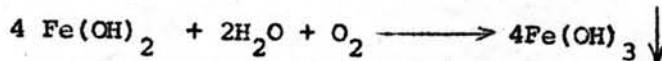
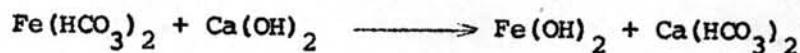


สำหรับ MnO_2 หรือเมงกานีสไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้น จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาข้างต้นให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (50) โดยปกติการกำจัดเหล็กโดยการใช้ค่างทับทิมนี้นิยมใช้กับถังกรองที่ใช้ความดัน (Pressure Filters)

ในทางปฏิบัติพบว่าค่างทับทิม 1 มก. สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้ 1.06 มก./ล. แต่เนื่องจากมีเมงกานีสไดออกไซด์หรือ MnO_2 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงพบว่าค่างทับทิม 1.00 มก. สามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้ถึง 1.66 มก.

(ง) การเติมอากาศตามด้วยการเติมปูนขาว

การเติมอากาศตามด้วยการเติมปูนขาวนี้ มักนิยมใช้เครื่องเติมอากาศตามด้วยถังตกตะกอน ปฏิริยาการกำจัดเหล็กมีดังนี้



Owen (40) ได้กำหนด pH ของน้ำเพื่อให้ปฏิกิริยาข้างต้นนี้เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ไว้ที่ 8.4 จากผลของปฏิกิริยาข้างต้นนี้จะเกิดขึ้นตะกอน (Sludge Blanket) ในถังตกตะกอน ชั้นตะกอนนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกำจัดเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ การกำจัดเหล็กวิธีนี้นอกจากกำจัดเหล็กได้แล้ว ยังช่วยกำจัดความกระด้างแบบไบคาร์บอเนตได้ด้วย

3.1.1.2 วิธีกรองแบบสัมผัส (Contact Filtration)

การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยวิธีนี้เป็นการรวมออกซิเดชัน และการกรองเข้าไว้เป็นขั้นตอนเดียวกันในตัวกรอง ดังนั้นจึงต้องควบคุมให้ออกซิเจนอยู่ในตัวกรองอยู่เสมอ สำหรับตัวกรองของการกรองนิยมใช้แร่ต่าง ๆ เช่น ไพโรลูไซต์, เมงกานีสโคทเซนต์,

เบอรัม หรือเมงกานีสซีโอไลต์

3.1.1.3 วิธีแลกเปลี่ยนอออน

โดยที่เหล็กก็เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้น้ำมีความกระด้างเช่นเดียวกับ แคลเซียม และ แมกนีเซียม ดังนั้นเมื่อผ่านน้ำดิบที่มีเหล็กมากลงไปยังสารซีโอไลต์ อออนของเหล็ก, แคลเซียม และแมกนีเซียม จะเปลี่ยนกับอออนของโซเดียม⁽³⁾ อย่างไรก็ตามการกำจัดเหล็กในน้ำ วิธีนี้ไม่มีข้อจำกัดหลายอย่าง คือ

(ก) เหล็กในน้ำดิบส่วนใหญ่ควรอยู่ในรูปของอออน
 (ข) น้ำดิบไม่ควรมีเหล็กเกิน 2 - 3 มก./ล.
 (ค) ข้อต่อของวาล์วของ เครื่องกำจัดต้องขันให้แน่นไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับซีโอไลต์ ได้

(ง) ต้องไม่จ่ายคลอรีน หรือตัวออกซิไดส์ใด ๆ เข้าไปในน้ำดิบก่อนที่น้ำดิบจะไหลผ่านซีโอไลต์

(จ) ต้องล้างสารซีโอไลต์บ่อย ๆ โดยการล้างแบบไหลกลับ ด้วยน้ำสะอาดเพื่อป้องกันการอุดตัน และต้องมีการล้างสารซีโอไลต์ด้วยสารละลายกรดเกลืออย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง เพื่อป้องกันมิให้สารซีโอไลต์เสื่อมสภาพ

3.1.2 วิธีกำจัดเหล็กในน้ำผิวดินหรือน้ำบ่อที่มีสี

เหล็กในน้ำชนิดนี้ส่วนใหญ่เป็นเหล็กอินทรีย์ มักพบในอ่างเก็บน้ำหรือในบ่อ ในอ่างเก็บน้ำ แหล่งกำเนิดของเหล็กในน้ำชนิดนี้ จะอยู่บริเวณโคลนตม และบริเวณชั้นน้ำที่ไม่ มีอากาศ หรือมีอากาศน้อย เมื่อเกิดการหมุนเวียนของชั้นน้ำเหล็กดังกล่าวก็จะกระจัดกระจายอยู่ทั่วไปในอ่างเก็บน้ำ⁽⁴⁾ เมื่อเหล็กเหล่านี้รวมตัวกับสารละลายอินทรีย์ในน้ำ ก็จะกลายเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน และอยู่ในรูปที่เสถียร สำหรับในบ่อน้ำ เหล็กอินทรีย์ในน้ำมักจะเกิดจากการระบายของเสียลงไปในดินรอบ ๆ บ่อ⁽⁴⁾ หรือเกิดจากน้ำฝนที่ได้ชะเอาสารละลายอินทรีย์จากรากพืช หรือซากพืช ลงไปรวมทำให้น้ำในบ่อมีสี⁽³⁾ เหล็กในน้ำชนิดนี้มักจะอยู่ในรูปคอลลอยด์ ซึ่งไม่ตกตะกอน⁽⁵³⁾ เมื่อน้ำบ่อจะได้รับการเติม

อากาศแล้วก็ตาม (17) น้ำที่มีเหล็กชนิดนี้มักจะมี pH อยู่ในช่วง 4.0 - 6.5 การกำจัดเหล็กในน้ำชนิดนี้ ต้องกำจัดสีออกให้หมดเสียก่อน จึงจะใช้ขบวนการกำจัดอื่น ๆ ต่อไป ในทางปฏิบัติพบว่าเมื่อกำจัดสีออกไปจากน้ำได้ประมาณ 50 % เหล็กในน้ำก็จะถูกกำจัดออกไปได้ประมาณ 50 % เช่นกัน (50)

การใช้ก๊าซคลอรีนหรือโซเดียมไฮโปคลอไรท์ โดยควบคุม pH ให้สูงไว้ตามด้วยการใช้สารส้ม หรือสารโพลีอิเล็กโทรไลต์ จะช่วยทำลายสีของคอลลอยด์ของสารอินทรีย์ที่มีเหล็กได้ดี เนื่องจากสารเคมีดังกล่าวสามารถทำให้คอลลอยด์ของสารอินทรีย์ที่มีเหล็กรวมตัวกันเป็นตะกอน (flocs) เมื่อสารอินทรีย์ที่มีเหล็กเหล่านี้รวมตัวเป็นตะกอนแล้ว จึงทำการกำจัดเหล็กเหล่านี้ต่อไปโดยการตกตะกอนและการกรอง (50)

3.2 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดเหล็ก

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดเหล็กมีหลายประการพอสรุปได้ดังนี้

3.2.1 สภาพการละลายของเหล็กในน้ำ

Ghosh (24) ได้แบ่งสารละลายของเหล็กในน้ำออกเป็น 2 รูปคือ รูปเฟอร์รัส หรือ Fe^{+2} และรูปเฟอร์ริก หรือ Fe^{+3} สารละลายของเหล็กในรูปเฟอร์รัสแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือรูปเฟอร์รัสในสารละลายคาร์บอเนต (Carbonate bearing water) อันได้แก่ Fe^{+2} , $[Fe(OH)]^+$, $Fe(OH)_3^-$, $[Fe(OH)]^+$ และรูปเฟอร์รัสในสารละลายที่ไม่ใช่คาร์บอเนตหรือไม่ใช่ซัลไฟด์ (Non Carbonate-Non Sulphide Solution) อันได้แก่ Fe^{+2} , $Fe(OH)^+$, และ $Fe(OH)_3^-$ ส่วนสารละลายของเหล็กในน้ำในรูปเฟอร์ริคได้แก่ Fe^{+3} , $FeOH^{++}$, $Fe(OH)_2^+$ และ $Fe(OH)_4^-$ อย่างไรก็ตาม อีออนที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะอยู่ในรูปใด ขึ้นอยู่กับ pH เป็นสำคัญ นอกจากนั้นการรวมตัวของอีออนเหล่านี้เป็นตะกอน เพื่อการตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับสภาพการละลายเป็นสำคัญ

Ghosh (24) ได้พบว่า ในสารละลายของเหล็กรูปต่าง ๆ ซึ่งมี pH เดียวกัน แต่มีสภาพการละลายต่างกัน สารละลายใดซึ่งมีสภาพการละลายน้อยกว่า อีออนของเหล็กในสารละลายนั้นจะรวมตัวกันเข้าเป็นผลึก และตกตะกอนไค้ช้ากว่า หรือสารละลายใดซึ่งสภาพการละลายมากกว่า อีออนของเหล็กในสารละลายนั้นจะรวมตัวกันเป็นผลึก และตกตะกอนไค้เร็วกว่า

3.2.2 อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำ

Just (32) ได้สรุปว่า อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับอีออนของไบคาร์บอเนต หรือ HCO_3^- และ CO_2 กล่าวคือ เมื่อ HCO_3^- หรือหมายถึงไบคาร์บอเนตแอลคาไลตีมากขึ้น อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสจะเร็วขึ้นด้วย ขณะเดียวกันเมื่อ CO_2 มากขึ้น อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสจะช้าลง ความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{-d [\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]}{dt} = \frac{k [\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2] [\text{O}_2]}{\text{CO}_2^2}$$

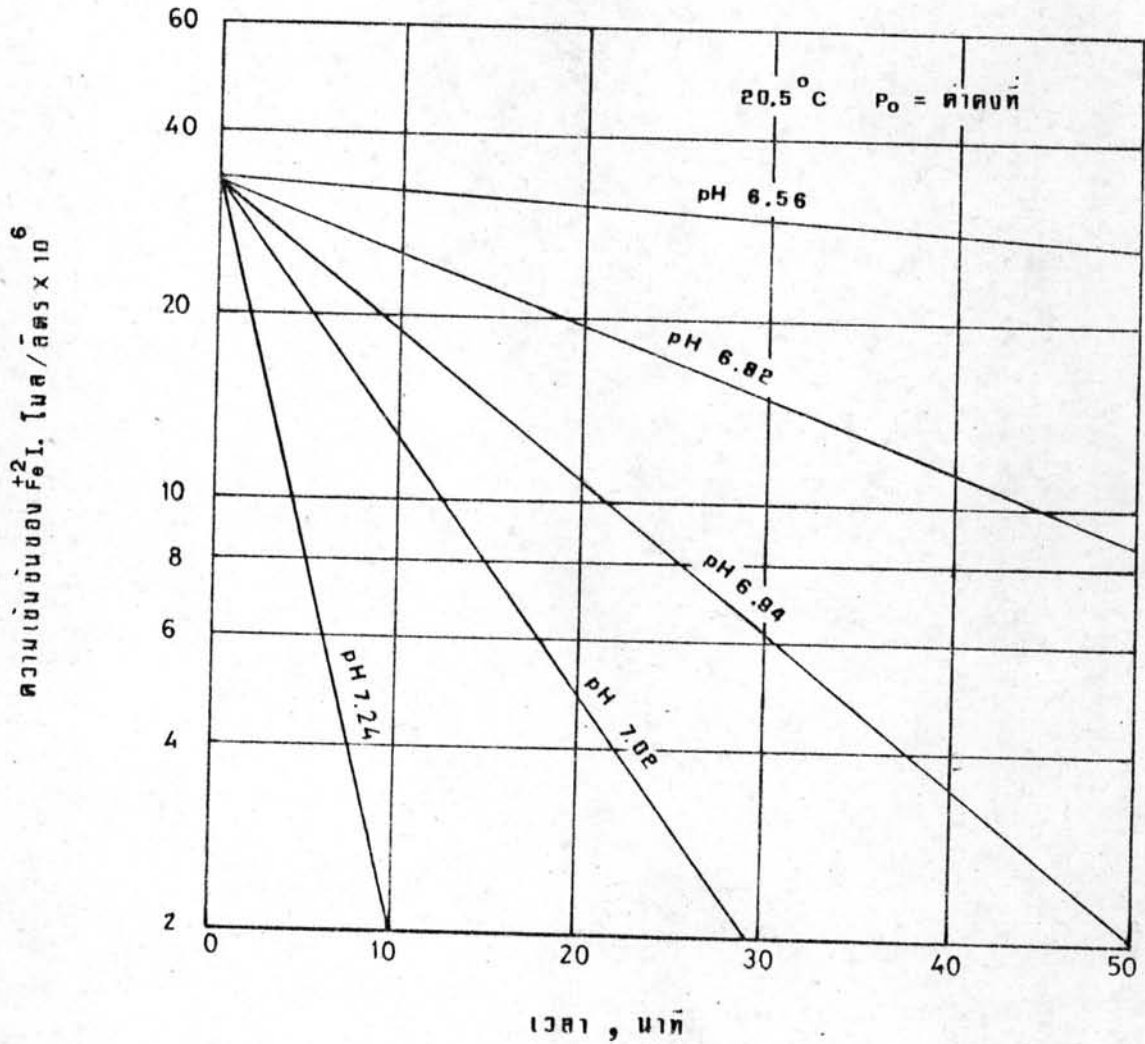
นอกจากนั้นแล้ว Just (32) ยังได้สรุปต่อไปอีกว่าเมื่อ pH ของน้ำสูงขึ้น อัตราออกซิเดชันจะเร็วขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{-d [\text{Fe}^{++}]}{dt} = \frac{k [\text{Fe}^{++}] [\text{O}_2]}{\text{H}^+ 2}$$

ต่อมาในปี ค.ศ. 1961 Stumm และ Lee (45) ได้พบความสัมพันธ์จากข้อมูลในการทดลองว่า อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสจะเร็วขึ้น เมื่อน้ำนั้นมีออกซิเจนอย่างพอเพียง และต้องมี pH สูงกว่า 7.2 ความสัมพันธ์ดังกล่าวคือ

$$\frac{-d [\text{Fe}^{++}]}{dt} = k [\text{Fe}^{++}] [\text{O}_2] [\text{OH}^-]^2$$

นอกจากนั้น Stumm และ Lee ได้แสดงอัตราการออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสที่ pH, ความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส และเวลาต่าง ๆ ดังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 อัตราการเปลี่ยนแปลงของเหล็กเฟอรัส [Ferrous Iron] ที่ความเข้มข้นของเหล็กเฟอรัสและที่ pH ต่าง ๆ

นอกจากนั้น Stumm และ Lee (45) ยังได้พบจากการทดลองว่า อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัส จะเร็วขึ้นเมื่อมี Cu^{++} , Mn^{++} , Co^{++} และ H_2PO_4^- เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Robinson (43) ได้พบว่าซิลิกาที่มีผลต่อการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อน้ำบาดาลมีซิลิกามากขึ้น ความเป็นด่างและ pH ของน้ำบาดาลจะมีค่ามากขึ้นด้วย จากการทดลองด้วยแบบทดลอง Robinson ได้พบว่า pH และความเป็นด่างต่ำ ทำให้การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลโดยขบวนการเติมอากาศตามด้วยการตกตะกอน และการกรองเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ แต่เมื่อได้เพิ่ม pH และความเป็นด่างให้สูงขึ้น โดยการเติมปูนขาวลงไปในน้ำก่อนการเติมอากาศ ในปริมาณ 44 มก./ล. เทียบ CaCO_3 ได้พบว่า การกำจัดเหล็กโดยขบวนการดังกล่าวจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ดังข้อมูลในตารางที่ 3.1

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้อ 3.2.2 นี้ จึงสรุปได้ว่าอัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาลจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับ pH และความเป็นด่าง เป็นสำคัญ กล่าวคือเมื่อ pH และความเป็นด่างของน้ำบาดาลมีค่ามากขึ้น อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาลจะเร็วขึ้น หรือทำให้น้ำที่ผ่านการเติมอากาศสามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น ซึ่งหมายถึงทำให้การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลสามารถทำได้ง่ายขึ้นด้วย

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลที่ pH กับความเป็นด่าง มีค่า
ค่า ระหว่างการเติมปูนขาวเพื่อเพิ่ม pH กับการไม่เติมปูนขาว

รายการ	ตัวอย่างน้ำที่ไม่ได้เติมปูนขาว			
	น้ำดิบ	น้ำที่ไหลผ่าน เครื่อง เติมอากาศ	น้ำที่ไหลผ่านถัง ตกตะกอนแล้ว	น้ำที่กรองแล้ว
D.O. หรือออกซิเจนละลาย, มก./ล.	0	5.1	5.1	5.0
pH	5.5	6.1	6.1	6.0
ความเป็นด่างทั้งหมด, มก./ล.เทียบ CaCO_3	26.5	28.0	29.0	23.0
เหล็กทั้งหมด, มก./ล.	3.9	3.5	3.5	1.5
ตัวอย่างน้ำที่ได้เติมปูนขาว 44 มก./ล. เทียบ CaCO_3 ลงไปใต้น้ำก่อนไหลผ่านเครื่องเติมอากาศ				
	น้ำดิบ	น้ำที่ไหลผ่าน เครื่อง เติมอากาศ	น้ำที่ไหลผ่านถัง ตกตะกอนแล้ว	น้ำที่กรองแล้ว
D.O., มก./ล.	0	5.0	5.0	4.9
pH	5.6	7.3	7.3	7.2
ความเป็นด่างทั้งหมด, มก./ล.เทียบ CaCO_3	27.0	50.0	50.0	49.0
เหล็กทั้งหมด, มก./ล.	3.9	3.4	0.7	≈ 0

หมายเหตุ

- (1) ถังตกตะกอนมีระยะเวลาเก็บกักนาน 1 ชั่วโมง
- (2) ถังกรองมีชั้นทรายลึก 36 นิ้ว หรือ 90 ซม. เป็นระบบทรายกรองเร็ว
ที่มีอัตราการกรองประมาณ 5 ม./ชม.

3.2.3 สาเหตุที่ทำให้การกำจัดเหล็กโดยการเติมอากาศ และการตกตะกอนไม่ได้ผล

Ghosh (24) ได้กล่าวถึงสาเหตุดังกล่าวไว้ 3 ประการ คือ

- (1) เกิดการรวมตัวของเหล็กในรูปไฮดรอกไซด์โพลิเมอร์ส (Hydroxo polymers) ในสารละลาย หรือที่เรียกว่า ซอล (sol) การเกิดเหล็กในรูปของซอลนี้ จะเกิดภายหลังจากการเติมอากาศ เหล็กในรูปของซอลนี้มีความเสถียรมาก เนื่องจากเป็นอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้า ซึ่งมีสูตรทั่วไปเป็น $[\text{Fe}_m(\text{OH})_n]^{+x}$ ดังนั้นเหล็กที่อยู่ในรูปนี้จึงไม่ตกตะกอน นอกเสียจากจะมีการเติมอนุภาคคอลลอยด์ที่มีประจุไฟฟ้าตรงข้ามกันเข้าไป
- (2) เกิดจากการระจุกกระจายของคอลลอยด์ของสารอินทรีย์ที่รวมตัวกับเหล็กในน้ำ กลายเป็นเหล็กอินทรีย์ เหล็กอินทรีย์นี้เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ที่มีความเสถียร และไม่ตกตะกอน แม้ว่าจะผ่านการเติมอากาศหรือไม่ก็ตาม
- (3) เกิดจากสารละลายที่แยกตัวออกมาจากสารอินทรีย์เมื่อรวมตัวกับเหล็กในน้ำ ก็มีผลทำให้เหล็กในน้ำไม่ตกตะกอน เช่นเดียวกับข้อ (2)

3.2.4 อุดหนุมิ

Vitayaudom Veera (48) ได้เขียนบทความไว้ว่า อุดหนุมิจะมีบทบาทต่อการกำจัดเหล็กในน้ำ โดยการตกตะกอนอย่างสำคัญ (เหล็กในน้ำในที่นี้หมายถึงเหล็กที่รวมตัวกันเป็นตะกอนแล้ว) กล่าวคือเมื่ออุดหนุมิสูงขึ้น ความหนืดของน้ำจะลดลง เมื่อความหนืดของน้ำลดลง อนุภาคของเหล็กก็จะมารวมตัวกันเป็นตะกอนได้ง่ายขึ้น

Stumm และ Lee (45) ได้กล่าวว่าเมื่ออุดหนุมิต่ำลง อัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำก็จะช้าลงด้วย เมื่ออัตราออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสช้าลง ก็อาจทำให้การกำจัดเหล็กในขบวนการอื่น ๆ ที่ต่อเนื่องจากขบวนการออกซิเดชัน ไม่สามารถกำจัดเหล็กได้มากเท่าที่ควร

3.2.5 อื่น ๆ

Longley (34) ได้พบว่าบรรดาสารอินทรีย์อันได้แก่ ซัลเฟต, ไนโตรเจน, ความกระด้าง, คลอไรด์ จะมีผลเพียงเล็กน้อยหรือไม่ผลเลย ต่อการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยการเติมอากาศ ตามด้วยการตกตะกอน และการกรอง