

## บทที่ 2

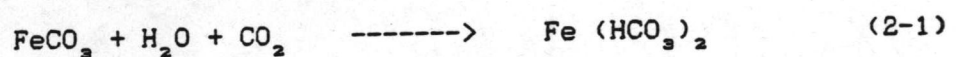
### ทบทวนเอกสาร

#### 2.1 แหล่งกำเนิดของเหล็ก

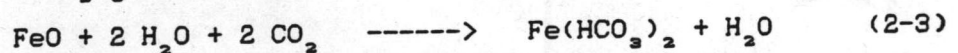
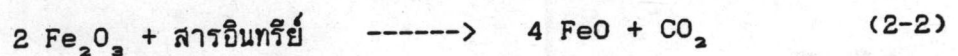
เหล็กเป็นธาตุที่มีอยู่ประมาณ 5% ของแร่ธาตุทั้งหมดบนพื้นโลก (1) เหล็กเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นในชั้นดินและชั้นหิน อาจอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กชนิดต่าง ๆ โดยอาจอยู่ในรูปของออกไซด์ คาร์บอเนต หรือบางครั้งอาจอยู่ในรูปของซัลไฟด์ เช่น แมกเนไทต์ (Magnetite,  $Fe_3O_4$ ), เฮมาไทต์ (Hematite,  $Fe_2O_3$ ), ลิโมนาइट (Limonite,  $2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ ), ไพไรต์ (Pyrite,  $FeS_2$ ) และลิเดอไรต์ (Siderite,  $FeCO_3$ ) (1)

สำหรับน้ำใต้ดิน เหล็กส่วนใหญ่จะละลายอยู่ในรูปของเหล็ก (II) ซึ่ง Ghosh (2) ได้ให้ความเห็นว่า การที่เหล็กในชั้นดินและชั้นหิน สามารถละลายอยู่ในน้ำใต้ดินได้ อาจเกิดจากสาเหตุดังนี้

(1) น้ำที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการดำรงชีพ ของแบคทีเรียในชั้นดิน เมื่อน้ำไหลผ่านชั้นดินหรือชั้นหินที่มีเหล็ก ก็จะทำปฏิกิริยากับเหล็กให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ละลายน้ำ คือ เหล็ก (II) ดังสมการ



(2) ภายใต้ภาวะไร้ออกซิเจน แบคทีเรียที่มีอยู่ในชั้นดินซึ่งมีสารอินทรีย์สามารถเปลี่ยนเหล็ก (III) เป็นเหล็ก (II) ได้ในขั้นแรก แล้วเหล็ก (II) จะละลายน้ำดังสมการต่อไปนี้



ในน้ำธรรมชาติทั่วไปมักจะมีทั้งเหล็กที่ละลายน้ำและเหล็กที่ไม่ละลายน้ำ โดยปกติปริมาณเหล็กที่พบในน้ำธรรมชาติ จะขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบของเหล็กและคาร์บอเนต เช่น ลิเดอไรต์ เป็นต้น นอกจากนั้นน้ำที่มีสภาพความเป็นด่างสูงจะมีเหล็กละลายอยู่ในปริมาณที่

น้อยกว่าน้ำที่มีสภาพความเป็นด่างต่ำ (1)

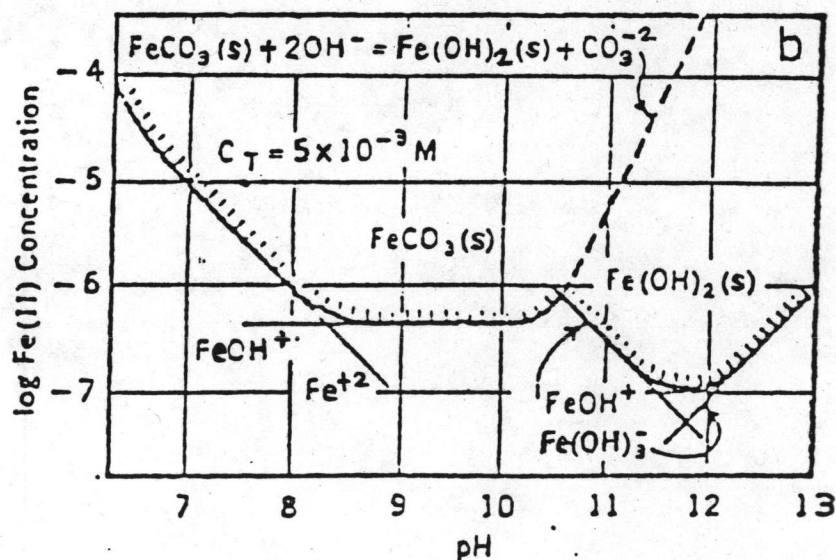
น้ำผิวดินมักมีเหล็กละลายอยู่น้อยกว่าน้ำใต้ดิน เหล็กที่พบในน้ำผิวดินอาจเป็นเหล็กอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารประกอบเหล็กที่อยู่ร่วมกับสารอินทรีย์ ซึ่งเกิดจากการเนาเปื่อยของพืชในน้ำ

## 2.2 เคมีของเหล็กในน้ำ

ปริมาณเหล็ก (II) หรือเหล็ก (III) ในน้ำชนิดใด ๆ จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นกับสภาพของน้ำนั้น เช่น สภาพความเป็นด่าง, พีเอช, ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ปริมาณออกซิเจนละลาย และปริมาณแร่ธาตุอื่น ๆ ที่มีอยู่ในน้ำนั้น (1)

### 2.2.1 ความสามารถในการละลายน้ำของเหล็ก

ในน้ำใต้ดินซึ่งส่วนใหญ่ปราศจากออกซิเจน และมีพีเอชเป็นกลาง หรือพีเอชต่ำ เหล็กที่พบจะอยู่ในรูปของ เหล็ก (II) โดยปริมาณเหล็กละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับการละลายน้ำของซิลิเกต หรือเฟอร์รัสคาร์บอเนต เมื่อน้ำมีพีเอชต่ำกว่า 10.5 และจะขึ้นอยู่กับการละลายน้ำของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ถ้าน้ำมีพีเอชสูงกว่า 10.5 (3) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



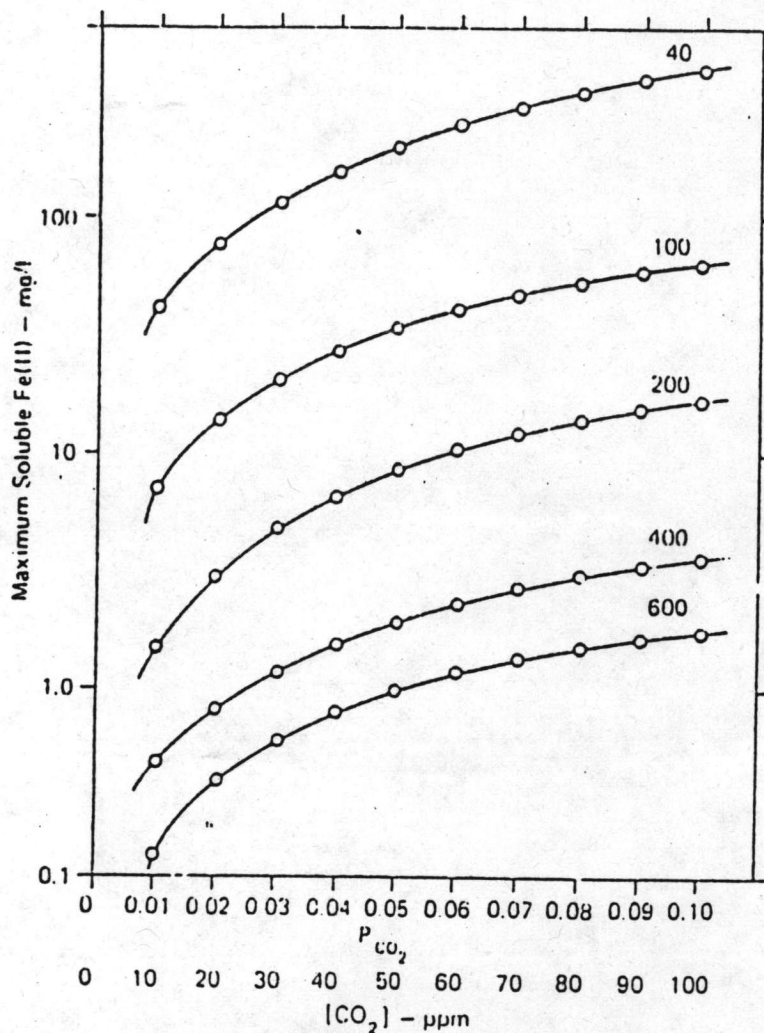
รูปที่ 2.1 ปริมาณเหล็ก (II) ที่ละลายในน้ำธรรมชาติที่มีความเป็นด่างมากกว่า 250 มก./ล. หินปูน และ Total Carbonate Species  $5 \times 10^{-3}$  M (3)

สมการเคมีที่แสดงถึงการละลายของเฟอร์รัสคาร์บอเนต และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมการเคมีและค่าคงที่ ณ จุดสมมูล ของเฟอร์รัสคาร์บอเนตและเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

สมการเคมี	ค่าคงที่ ณ จุดสมมูล (ที่ 25 °ซ) (K <sub>eq</sub> )	log K <sub>eq</sub> @ 25 °C	เอกสารอ้างอิง
$\text{FeCO}_3(\text{s}) = \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	$2.1 \times 10^{-11}$	-10.68	3
$\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) = \text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^-$	$8 \times 10^{-16}$	-15.1	3
$\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) = \text{Fe}^+\text{OH} + \text{OH}^-$	$4 \times 10^{-10}$	-9.4	3
$\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_3^-$	$8.3 \times 10^{-6}$	-5.08	3

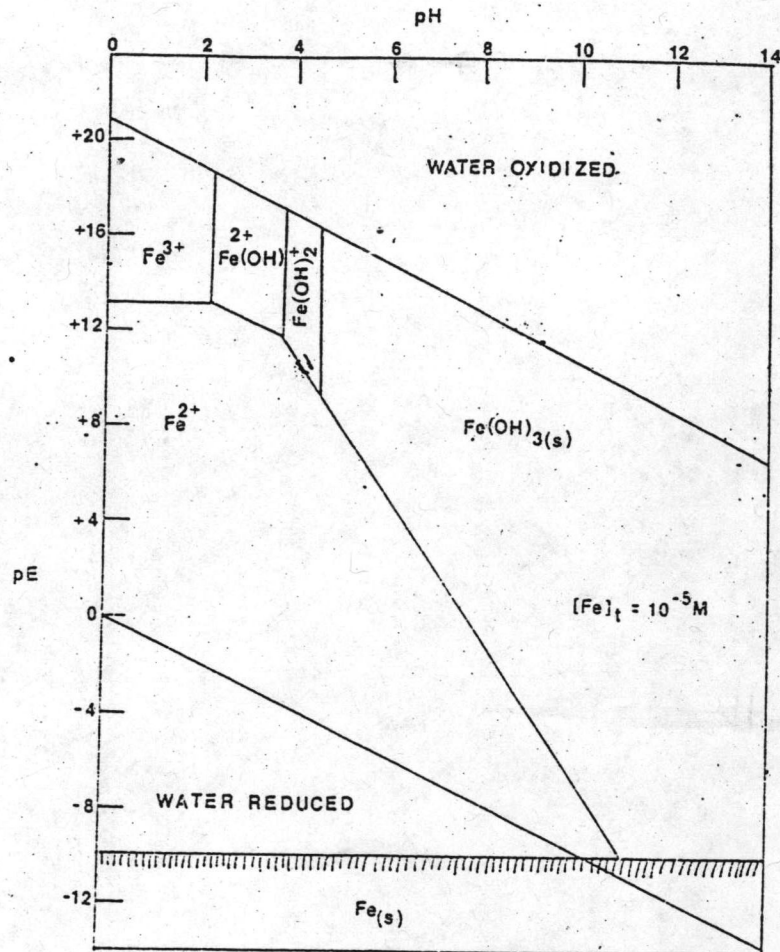
นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเหล็กที่ละลายน้ำจะลดลง เมื่อสภาพความเป็นด่างในน้ำเพิ่มขึ้น (4) และจากการวิจัยของ Olson และ Twardowski Jr. (5) พบว่า ความดันย่อย (partial pressure) ของคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำมีผลต่อปริมาณสูงสุดของเหล็กที่สามารถละลายได้ในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าเหล็กละลายน้ำได้มากขึ้น เมื่อปริมาณแคลเซียมไอออนในน้ำน้อยลง และความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 ปริมาณของเหล็กละลายน้ำ (Iron II) มากที่สุดที่ควบคุมโดยเฟอร์รัสคาร์บอเนตกับ ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ ในน้ำที่มีคลอไรด์ในปริมาณต่าง ๆ กัน (5)

เนื่องจากเหล็กสามารถละลายอยู่ในน้ำได้หลายสถานะ ดังนั้นนักวิจัย (6,7) จึงได้สร้าง ไดอะแกรมระหว่างค่า พีอี และพีเอช (pE - pH diagram) ขึ้น เพื่อแสดงให้เห็นขอบเขต ของสถานะของหมู่เหล็ก (Iron Species) ที่เสถียร หรือมีอยู่เป็นส่วนใหญ่ในน้ำ ดังแสดงในรูป ที่ 2.3



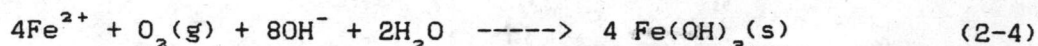


รูปที่ 2.3 พีอี-พีเอชไดอะแกรม ของเหล็ก (3)

### 2.2.2 ปฏิริยาออกซิเดชันและจลนศาสตร์ของปฏิริยาออกซิเดชันของเหล็ก

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าปฏิริยาออกซิเดชันเพื่อเปลี่ยนเหล็ก (II) ให้เป็นเหล็ก (III) สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มค่า พีอี และพีเอช (3) ซึ่งการเพิ่มค่า พีอี สามารถกระทำได้โดยการเติมออกซิไดซิงเอเจนต์ เช่น ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ), คลอรีน ( $Cl_2$ ) หรือโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ( $KMnO_4$ ) ส่วนการเพิ่มค่าพีเอชสามารถกระทำได้โดยเพิ่มไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ซึ่งได้จากการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $Ca(OH)_2$ ) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) นอกจากนี้แล้วจากรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ค่า พีอี ที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิริยาออกซิเดชันจะลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็ก (II) กับออกซิเจน สามารถเขียนได้  
ดังนี้ (8)



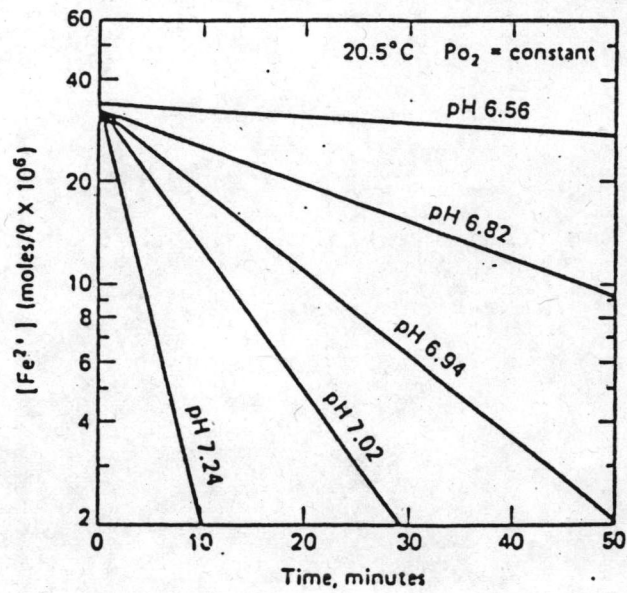
ในการกำจัดเหล็ก (II) 1 มก./ล. ใช้ออกซิเจน 0.14 มก./ล. และสร้างไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) 0.036 มก./ล. เนื่องจากมีกรดเกิดขึ้น จึงทำลายความเป็นต่าง 1.8 มก./ล. หินปูน ถ้าน้ำมีความเป็นต่างไม่พอเพียงในการทำละลายไฮโดรเจนไอออน ฝิเอชจะลดลงซึ่งทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันช้าลงด้วย (9)

ในน้ำธรรมชาติที่มีสภาพความเป็นต่างแบบไบคาร์บอเนต อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็ก (II) กับออกซิเจน สามารถแทนได้ด้วยสมการ (3,4,8)

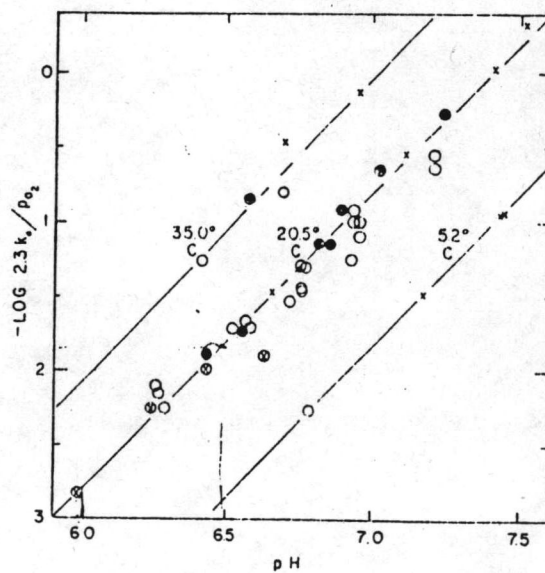
$$-d[\text{Fe}(\text{II})]/dt = k[\text{Fe}(\text{II})][\text{OH}^-]^2 p\text{O}_2 \quad (2-5)$$

โดย  $d[\text{Fe}(\text{II})]/dt$  = อัตราเร็วของการออกซิไดซ์เหล็ก (II), โมล.ลิตร<sup>-1</sup>.นาท<sup>-1</sup>  
 $k$  = ค่าคงที่, นาท<sup>-1</sup> atm<sup>-1</sup> โมล.<sup>-2</sup>, ที่ 20.5 °C  
 $p\text{O}_2$  = ความดันย่อยของออกซิเจน, บรรยากาศ  
 $[\text{OH}^-]$  = ความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน, โมล/ลิตร

จากการทดลองของ Stumm และ Lee (8) พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันกับปริมาณเหล็ก (II) จะเป็นแบบลำดับที่ 1 (first order) และไม่ขึ้นกับปริมาณเหล็ก (III) นอกจากนั้นยังพบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็กกับออกซิเจนจะขึ้นอยู่กับ ฝิเอช ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก (II) จะเกิดช้าเมื่อ ฝิเอชต่ำกว่า 6 และจากสมการที่ 2.5 ยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออนเป็นแบบลำดับที่ 2 (second order) ดังนั้นเมื่อ ฝิเอชเพิ่มขึ้น 1 หน่วย จะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก (II) เพิ่มขึ้น 100 เท่า (3) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



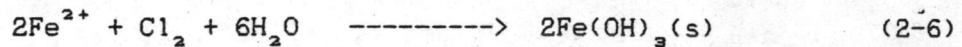
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน และพีเอชของเหล็ก (8)



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันกับความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน (3)

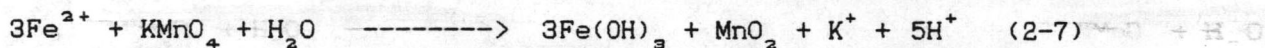
นอกจากออกซิเจนแล้วยังสามารถใช้ออกซิไดซิงเอเจนต์ชนิดอื่นได้เช่นกัน ซึ่งได้แก่ คลอรีน โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต และโอโซน เป็นต้น ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นมีดังนี้ (3,4)

(ก) คลอรีน

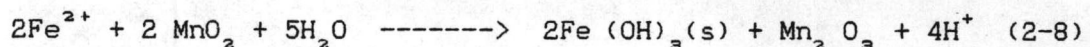


คลอรีนสามารถออกซิไดซ์เหล็ก (II) ได้อย่างรวดเร็ว แม้น้ำจะมีพีเอชต่ำ (3) ในการกำจัดเหล็ก (II) 1 มก./ล ต้องการคลอรีน 0.6 มก./ล และความแตกต่าง 2.70 มก./ล หินปูน

(ข) โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต

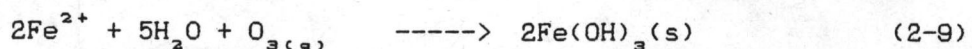


โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถออกซิไดซ์เหล็ก (II) ได้อย่างรวดเร็วตามทฤษฎีในการกำจัดเหล็ก 1 มก./ล. ต้องการโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.94 มก./ล. และความแตกต่าง 1.50 มก./ล. หินปูน แต่ในทางปฏิบัติ  $\text{MnO}_2$  ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกริยาออกซิเดชัน ดังสมการ



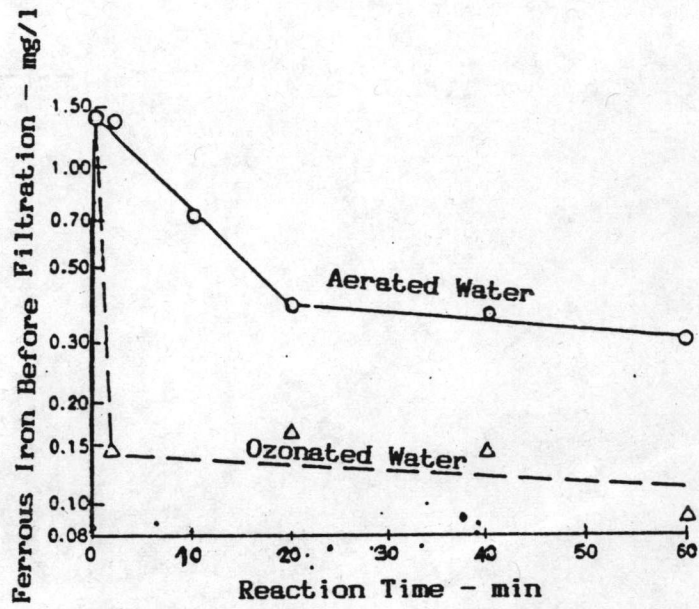
ซึ่งปรากฏว่า โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพียง 0.60 มก./ล. สามารถออกซิไดซ์เหล็กได้ 1 มก./ล.

(ค) โอโซน



โอโซนสามารถออกซิไดซ์เหล็ก (II) ได้ ถึงแม้ในน้ำจะมีสารอินทรีย์ รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบการกำจัดเหล็ก (II) ด้วยวิธีเติมอากาศอย่างต่อเนื่องกับวิธีการใช้โอโซน (3)





รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบปริมาณเหล็ก (II) ในน้ำใต้ดินเมื่อใช้การกำจัดด้วย การเติมอากาศอย่างต่อเนื่องกับการใช้โอโซน (3)

### 2.3 แหล่งกำเนิดของแมงกานีส

แมงกานีสเป็นธาตุที่มีอยู่ประมาณ 0.1% บนพื้นโลก (9) โดยอาจพบได้ทั่วไปในรูปของแร่แมงกาไนต์ (Manganite,  $MnO(OH)$ ), ฮอสแมนไนต์ (Housmannite,  $Mn_3O_4$ ), ไพโรลูไซต์ (Pyrolusite,  $MnO_2$ ), โรโดไนต์ (Rhodonite,  $MnSiO_3$ ), บรูไนต์ (Braunite,  $3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$ ) โรโดโครไซต์ (Rhodochrosite,  $MnCO_3$ ) และอะลามเบนไดต์ (Alabandite,  $MnS$ ) นอกจากนี้ยังอาจพบแมงกานีสได้ในเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ทั่วไป (9) น้ำธรรมชาติมักมีแมงกานีสละลายอยู่ ซึ่งมีสาเหตุจาก

- (1) เกิดจากการละลายของแร่ธาตุที่มีแมงกานีสผสมอยู่ เช่นน้ำในมหาสมุทรน้ำที่มีแร่ธาตูละลายอยู่ เป็นต้น
- (2) เกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากเหมืองแร่หรือน้ำเสียจากกระบวนการทำแร่และโลหะ
- (3) เกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืชและสัตว์

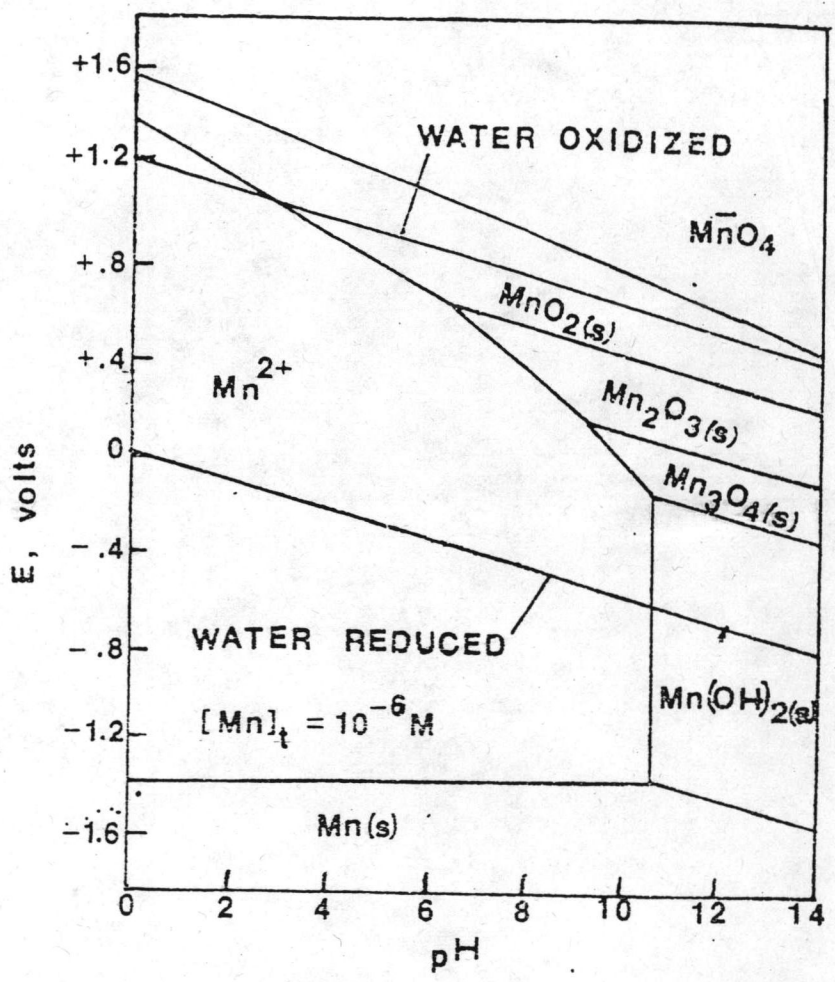
แมงกานีสมักพบอยู่ในน้ำพร้อมกับเหล็ก แต่มีปริมาณน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณแมงกานีสที่มีบนพื้นโลกมีปริมาณน้อย และความสามารถในการละลายในน้ำธรรมชาติต่ำ (10)

### 2.4 เคมีของแมงกานีสในน้ำ

เคมีของแมงกานีสในน้ำมีลักษณะคล้ายคลึงกับเหล็ก คือ แมงกานีสจะอยู่ได้หลายสถานะ ดังนี้ คือ  $Mn(II)$ ,  $Mn(III)$ ,  $Mn(IV)$ ,  $Mn(VI)$  และ  $Mn(VII)$  แต่ที่พบว่าสำคัญต่อเคมีของแมงกานีสในน้ำธรรมชาติ คือ  $Mn(II)$  และ  $Mn(IV)$  โดย  $Mn(II)$  จะมีบทบาทและสำคัญมากที่สุด จากรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงถึงสถานะต่าง ๆ ของแมงกานีสที่พีเอชและพีอีค่าต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าในช่วงพีอีและพีเอชของน้ำธรรมชาติส่วนใหญ่แมงกานีสจะอยู่ในสถานะของ  $Mn^{2+}(aq)$  (3)

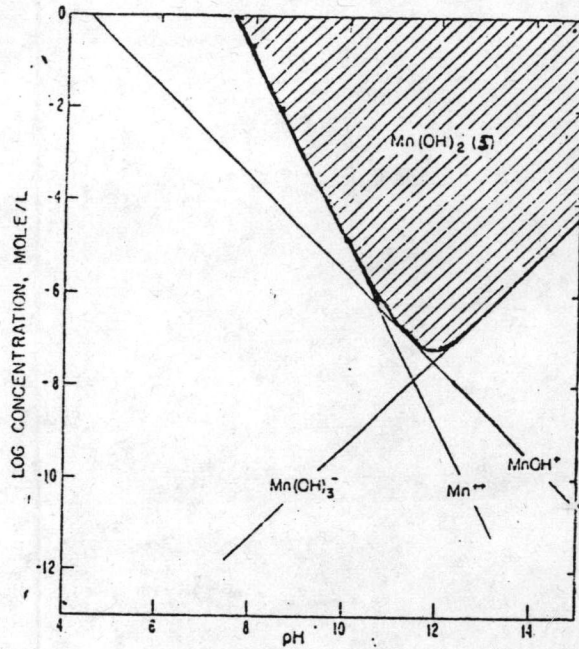
#### 2.4.1 ความสามารถในการละลายน้ำของแมงกานีส

ปริมาณแมงกานีส (II) ที่ละลายในน้ำขึ้นกับความสามารถในการละลายของแมงกานีสไฮดรอกไซด์, คาร์บอเนต หรือซัลไฟด์ ที่มีอยู่ในน้ำ Morgan(9) ได้ทำการทดลองและพบว่าในน้ำที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ปริมาณแมงกานีส (II) ที่ละลายน้ำจะขึ้นอยู่กับการละลายของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ ( $Mn(OH)_2$ )

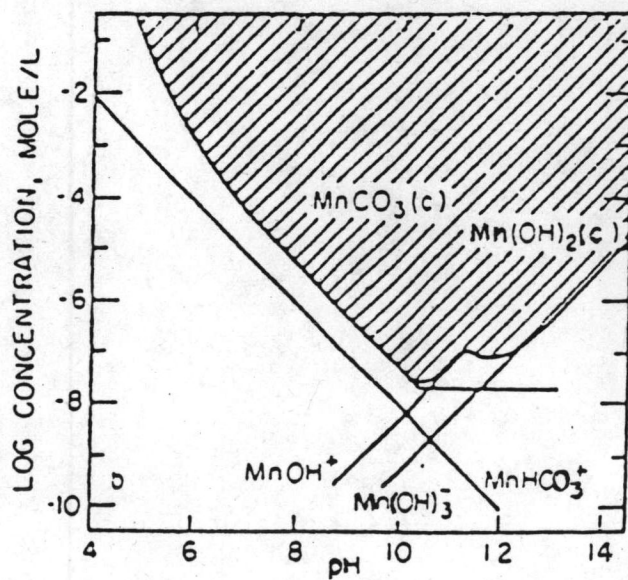


รูปที่ 2.7 พิธี-พีเอชไดอะแกรม ของแมงกานีส (3)

ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สำหรับในน้ำที่มีคาร์บอเนต จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า แมงกานีสไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้มากขึ้นที่พีเอชสูง (ตั้งแต่พีเอช 12 ขึ้นไป) (3) ส่วนแมงกานีสคาร์บอเนตละลายน้ำได้มากขึ้นที่พีเอชเป็นกลางและพีเอชต่ำ ดังนั้นแมงกานีสคาร์บอเนตจะมีความสำคัญที่สุดในการกำหนดปริมาณของแมงกานีสในน้ำธรรมชาติ (10) จากรูปที่ 2.9 ยังจะเห็นได้ว่าที่พีเอชต่ำกว่าหรือเท่ากับ 10 ปริมาณแมงกานีส (II) ทั้งหมดที่ละลายน้ำ จะลดลงเมื่อความเป็นด่างคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น (3)



รูปที่ 2.8 การละลายน้ำของแมงกานีสไฮดรอกไซด์ (9)



รูปที่ 2.9 ปริมาณแมงกานีส (II) ที่ละลายในน้ำที่มี  
Total carbonic species  $2 \times 10^{-3}$  M. (9)



สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับการละลาย และการตกผลึกของสารประกอบแมงกานีสในน้ำที่มีและไม่มีคาร์บอเนต แสดงในตารางที่ 2.2 (3)

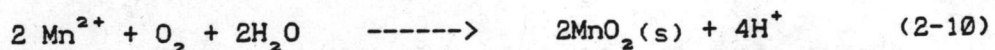
ตารางที่ 2.2 สมการเคมีเกี่ยวกับการละลายและการตกผลึกของสารประกอบแมงกานีส

สมการเคมี	log keq @ 25 °C	เอกสารอ้างอิง
$Mn^{2+} + 2OH^- \rightleftharpoons Mn(OH)_2(s)$	+ 12.96	9
$Mn(OH)_2(s) \rightleftharpoons MnOH^+ + OH^-$	- 9.95	9
$Mn(OH)_2(s) + OH^- \rightleftharpoons Mn(OH)_3^-$	- 5.35	3
$MnCO_3(s) \rightleftharpoons Mn^{2+} + CO_3^{2-}$	- 10.41	9
$MnCO_3(s) + OH^- \rightleftharpoons MnOH^+ + CO_3^{2-}$	- 7.00	9
$MnCO_3(s) + 3OH^- \rightleftharpoons Mn(OH)_3^- + CO_3^{2-}$	- 2.80	9
$MnCO_3(s) + H^+ \rightleftharpoons MnHCO_3^+$	+ 1.91	9

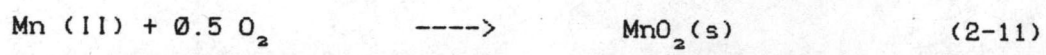
#### 2.4.2 ปฏิริยาออกซิเดชันและจลนศาสตร์ของปฏิริยาออกซิเดชันของแมงกานีส

วิธีการกำจัดแมงกานีสในปัจจุบัน มักอาศัยปฏิริยาออกซิเดชัน เพื่อเปลี่ยนแมงกานีส (II) ซึ่งละลายในน้ำให้เป็นแมงกานีส (IV) ซึ่งไม่ละลายน้ำออกซิไดซิงเอเจนต์ที่ใช้จะเหมือนกับที่ใช้ในการออกซิไดซ์เหล็ก

ปฏิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจนสามารถเขียนได้ดังนี้



แต่จากการทดลองของ Morgan (9) พบว่าปฏิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิริยาออกโตคะตะไลติก (autocatalytic reaction) เนื่องจากปริมาณแมงกานีสที่ถูกกำจัดนั้นไม่เป็นไปตามสโตยชิโอเมตริก เพราะแมงกานีส (II) บางส่วนถูกดูดซับ (adsorb) ของแมงกานีสไดออกไซด์ในน้ำที่มีสภาพความเป็นด่างไม่มากนัก นอกจากนั้นแล้วปฏิริยาออกซิเดชันยังเกิดไม่สมบูรณ์อีกด้วย โดยพบว่าสารประกอบที่เกิดขึ้นมีค่าตั้งแต่  $MnO_{1.3}$  ถึง  $MnO_{1.9}$  ขึ้นกับสภาพความเป็นด่างของน้ำ Morgan เสนอว่าปฏิริยาที่เกิดขึ้นมีขั้นตอนดังนี้คือ

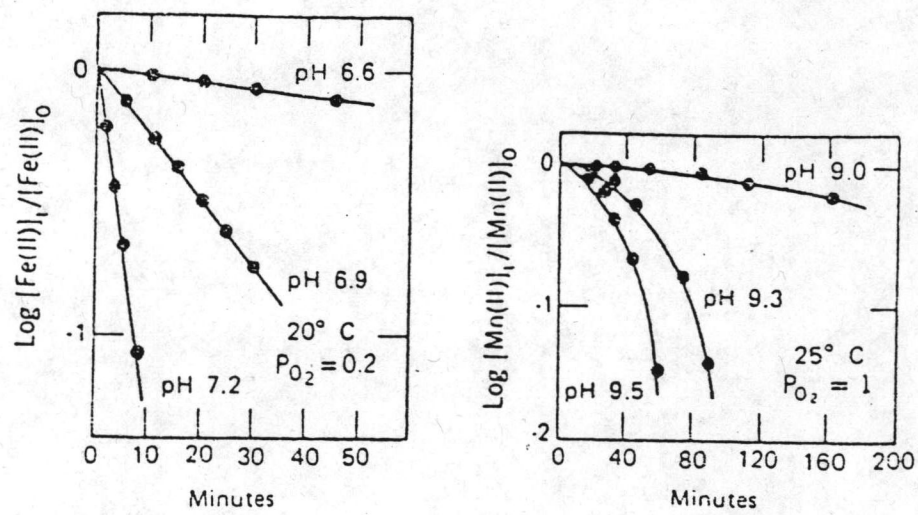


อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจน สามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{-d[\text{Mn(II)}]}{dt} = K_o[\text{Mn(II)}] + k[\text{Mn(II)}][\text{MnO}_2] \quad (2-14)$$

โดย  $k = k' [\text{OH}^-]^2 P_{\text{O}_2}$

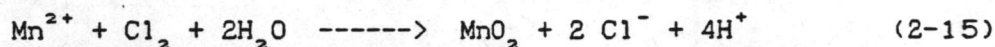
อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจนมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเกิดที่พีเอชต่ำกว่า 9.5 (10) และถึงแม้ว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับระดับพีเอช แต่ไม่ได้เป็นแบบลำดับหนึ่ง (first order kinetics) เหมือนกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กกับออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจนเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็ก กับออกซิเจน

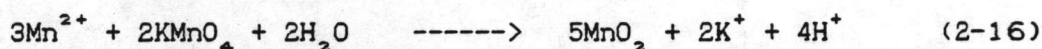
ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น เมื่อใช้ออกซิโดซิงเอเจนต์ชนิดอื่น อาจเขียนได้ดังนี้

(ก) คลอรีน

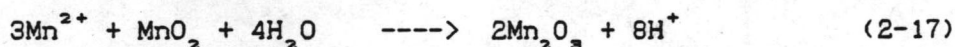


การกำจัดแมงกานีส 1 มก./ล. ต้องใช้คลอรีน 1.29 มก./ล. และความเป็นด่าง 3.64 มก./ล. หินปูน

(ข) โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต



ตามทฤษฎีการกำจัดแมงกานีส 1 มก./ล. ต้องการโพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต 1.92 มก./ล. และความเป็นด่าง 1.21 มก./ล. หินปูน แต่ในทางปฏิบัติ  $\text{MnO}_2$  ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังสมการ



เป็นผลให้ความต้องการโพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีค่าน้อยกว่าตัวเลขตามทฤษฎี

## 2.5 การกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์

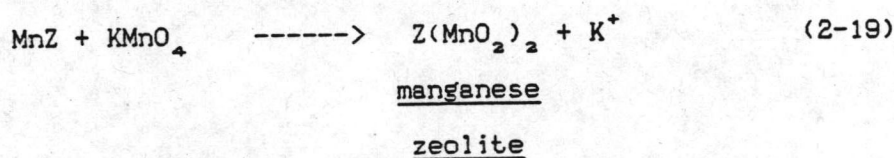
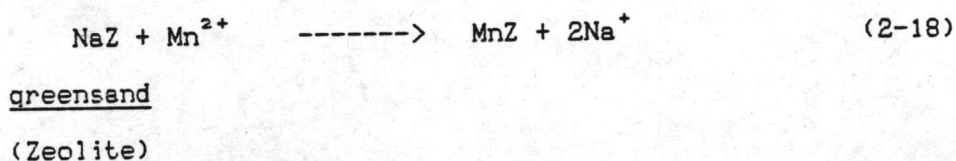
### 2.5.1 คุณสมบัติของแมงกานีสกรีนแซนด์

แมงกานีสแซนด์เป็นสารที่ทำมาจาก กลูโคโคนิตกรีนแซนด์ ซึ่งเป็นซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง ในสมัยแรก ๆ จะนำกรีนแซนด์มาทำปฏิกิริยากับแมงกานีสคลอไรด์ เพื่อเปลี่ยนกรีนแซนด์ให้เป็นแมงกานีสซีโอไลต์ จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยากับโพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งจะก่อให้เกิดออกไซด์ของแมงกานีสที่สูงขึ้นเคลือบอยู่บนเม็ดของกรีนแซนด์ เมื่อนำแมงกานีสกรีนแซนด์ไปใช้จนเสื่อมแล้วจะทำการรีเจนเนอเรชันโดยใช้โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (12) ต่อมาจึงเปลี่ยนมาใช้โพตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ทำการรีเจนเนอเรชัน (13)



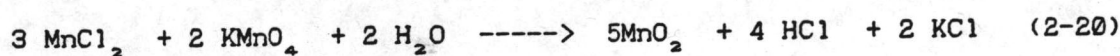
สำหรับปัจจุบันนี้แมงกานีสกรีนแซนด์มี 2 ประเภท คือ

ก. ประเภทที่ 1 เป็นแมงกานีสกรีนแซนด์ชนิดทั่วไป (Conventional-greensand) เป็นประเภทที่ต้องใช้โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการรีเจนเนอเรชัน แมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทนี้ทำมาจากกลูโคนิตติกกรีนแซนด์ ที่นำมาทำปฏิกิริยากับแมงกานีสซัลเฟตและโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (14, 15, 16) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้



แมงกานีสกรีนแซนด์มีลักษณะเป็นเม็ดกลม สีน้ำตาลจนถึงสีดำส่วนใหญ่จะหนักประมาณ 80-90 ปอนด์/ลบ.ฟุต (17) สามารถออกซิไดซ์เหล็ก และแมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ และจะทำหน้าที่เป็นสารกรอง เพื่อกรองผลึกของเหล็กและแมงกานีสที่เกิดขึ้นด้วย

ข. ประเภทที่ 2 เป็นประเภทที่ต้องเติมคลอรีนเพื่อเป็นการกระตุ้นแมงกานีสกรีนแซนด์ให้มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีส แมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทนี้ทำมาจากทรายซึ่งผ่านการคัดขนาดแล้ว (graded sand) นำมาเคลือบด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของแมงกานีสคลอไรด์และโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต (18, 19) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ดังนี้



ลักษณะของแมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทที่ 2 จะคล้ายกับประเภทแรก คือ เป็นเม็ดกลม สีน้ำตาลจนถึงสีดำ



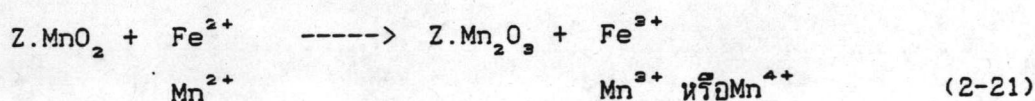
## 2.5.2 กลไกในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสของแมงกานีสกรีนแซนด์

Wong (20) กล่าวว่า กลไกที่ใช้ในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส (II) ในน้ำของแมงกานีสกรีนแซนด์ มี 2 กลไก คือ

### 2.5.2.1 การออกซิไดซ์

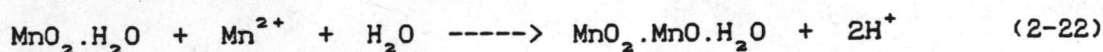
แมงกานีสกรีนแซนด์ทั้ง 2 ประเภท มีปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แตกต่างกัน ดังนี้

ก. ประเภทที่ 1 แมงกานีสกรีนแซนด์จะออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีสที่ละลายอยู่ในน้ำ ซึ่งอยู่ในรูปของเหล็ก (II) และแมงกานีส (II) ให้อยู่ในรูปของเหล็ก(III), Mn (IV) ซึ่งไม่ละลายน้ำ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้น มีดังนี้

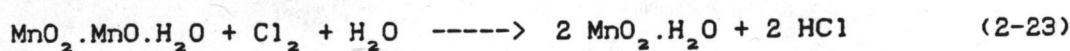


เมื่ออำนาจในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์หมดลงจะทำการรีเจนเนอเรชัน โดยใช้โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ข. ประเภทที่ 2 แมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทที่ 2 นี้ ต้องมีการเติมคลอรีนลงในน้ำดิบก่อนที่จะเข้าสู่ชั้นกรองเพื่อทำการกระตุ้นให้แมงกานีสกรีนแซนด์มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีส เนื่องจากถ้าไม่มีการเติมคลอรีนก่อนเข้าสู่ชั้นกรองแล้ว แมงกานีสไดออกไซด์ที่เคลือบอยู่บนผิวของแมงกานีสกรีนแซนด์ เมื่อทำการออกซิไดซ์เหล็กและ/หรือแมงกานีสแล้วจะกลายเป็น  $\text{MnO}_2 \cdot \text{MnO} \cdot \text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของแมงกานีสกรีนแซนด์ค่อย ๆ หมดลง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในกรณีที่ไม่มีเติมคลอรีน มีดังนี้



แต่เมื่อมีการเติมคลอรีนลงในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ชั้นกรองแมงกานีสกรีนแซนด์ ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเปลี่ยนไป คือ



จากสมการที่ 2-23 จะเห็นว่าแมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทนี้จะมึประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์ เหล็กและแมงกานีสอยู่ตลอดเวลาเมื่อมีการเติมคลอรีน

ปริมาณคลอรีนที่เติมเพื่อเป็นการกระตุ้นแมงกานีสกรีนแซนด์นั้นโดยทั่วไปจะเติมเพื่อให้มีปริมาณคลอรีนที่ตกค้าง (Residual chlorine) อยู่ในน้ำที่กรองแล้ว ประมาณ 0.5 - 1.0 มก./ล. (18, 19)

#### 2.5.2.2 การกรอง

เมื่อเหล็กและแมงกานีสถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปของออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำแล้ว แมงกานีสกรีนแซนด์จะทำหน้าที่เป็นสารกรอง โดยผลึกของเหล็กและแมงกานีสจะติดอยู่ภายในชั้นกรองของแมงกานีสกรีนแซนด์ ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียเฮดในชั้นกรอง ดังนั้นในทางปฏิบัติจะกำหนดค่าสูงสุดที่ยอมให้ไว้ค่าหนึ่ง เมื่อระบบดำเนินการจนถึงค่าสูญเสียเฮดที่กำหนดจะหยุดระบบเพื่อทำการล้างย้อนแล้วจึงดำเนินการต่อไป

#### 2.5.3 การรีเจนเนอเรชัน

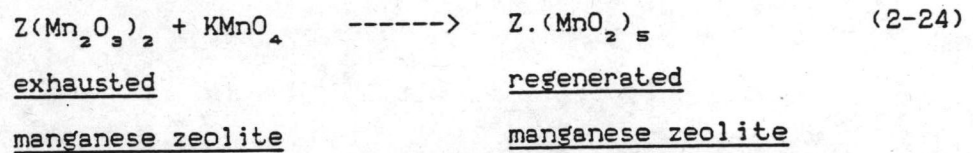
เมื่ออำนาจในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์หมดลงต้องทำการรีเจนเนอเรชัน โดยใช้สารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งสามารถแบ่งการรีเจนเนอเรชันได้ 2 แบบ คือ

##### 2.5.3.1 การรีเจนเนอเรชันแบบทิลเท

ก. แมงกานีสกรีนแซนด์ประเภทที่ 1 ในกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบทิลเทนี้ แมงกานีสกรีนแซนด์จะทำหน้าที่เป็นทั้งออกซิไดซิงเอเจนต์ และสารกรอง โดยชั้นของแมงกานีสกรีนแซนด์จะออกซิไดซ์เหล็ก (II) และแมงกานีส (II) ในน้ำ ให้อยู่ในรูปออกไซด์ของเหล็ก และแมงกานีส ซึ่งไม่ละลายน้ำ แล้วถูกกรองออกจากน้ำโดยชั้นของแมงกานีสกรีนแซนด์

เนื่องจากความสามารถในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์มีจำกัด ดังนั้นเมื่ออำนาจในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์หมดลง (สังเกตได้จากการที่มีเหล็กหรือแมงกานีสที่ละลายน้ำ รั่วปนออกไปกับน้ำที่กรองแล้ว) จึงต้องทำการรีเจนเนอเรชันชั้นกรองของแมงกานีสกรีนแซนด์ด้วยโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนต หลังจากที่ทำกรล้างย้อนเสร็จแล้ว

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อทำการรีเจนเนอเรชัน มีดังนี้



ข. แมงกานีสกรินแซนด์ประเภทที่ 2 เมื่อมีการเติมคลอรีนเพื่อกระตุ้นให้แมงกานีสกรินแซนด์ประเภทที่ 2 นี้ มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการรีเจนเนอเรชัน (18, 19)

#### 2.5.3.2 การรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่อง (Continuous Regeneration)

สำหรับกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องนั้นมีวิธีการดังนี้คือ เติมสารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงไปในท่อน้ำดิบอย่างต่อเนื่อง ก่อนที่น้ำดิบจะเข้าสู่ถังกรอง แทนที่จะใช้สารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตทำการรีเจนเนอเรชันชั้นกรองแมงกานีสกรินแซนด์แบบกระบวนการทีละเท ด้วยวิธีการนี้เหล็กและแมงกานีสในน้ำจะถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในสถานะที่ไม่ละลายน้ำ ก่อนที่จะเข้าสู่ชั้นกรองแมงกานีสกรินแซนด์เมื่อชั้นกรองเกิดการอุดตันเนื่องจากผลึกของเหล็กและแมงกานีสเข้า จะหยุดการกรองแล้วทำการล้างย้อนเหมือนเครื่องกรองแบบธรรมดาทั่วไป ดังนั้นจึงใช้กระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องได้กับแมงกานีสกรินแซนด์ทั้ง 2 ประเภท

จากการทดลองของ Willey & Jennings (14) พบว่าวิธีการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องสามารถกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปริมาณโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตซึ่งใช้ในการทดลองหาได้จากวิธี Permanganate Demand Test นอกจากนั้นวิธีการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องยังสามารถกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำที่มีสารอินทรีย์ ได้แต่ต้องใช้เวลาทำปฏิกิริยามากขึ้นกว่าเดิม คือ ประมาณ 5-20 นาที ในขณะที่โดยทั่วไปใช้เวลา 15-60 วินาที ก็เพียงพอ (11, 16)

Cheremisinoff et.al. (15) รายงานว่าการกำจัดเหล็กและแมงกานีสด้วยแมงกานีสกรินแซนด์โดยใช้วิธีการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องมีข้อดีคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดอย่างสมบูรณ์และรวดเร็ว เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นในขณะที่อยู่ในสถานะเดียวกัน คือ ในสถานะของเหลว (liquid-to-liquid phase) ในขณะที่ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบที่จะทะเลจะเป็นปฏิกิริยาแบบต่างสถานะ คือ แมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ใน

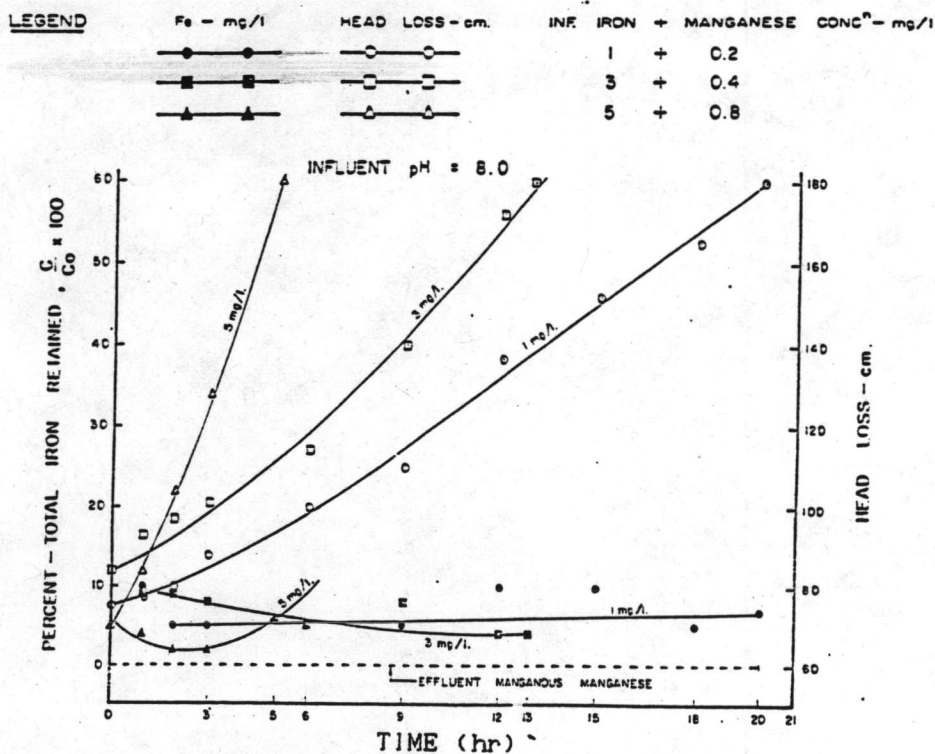


สถานะของแข็งกับเหล็กและแมงกานีสในน้ำ ซึ่งอยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะเกิดช้ากว่า นอกจากนี้แล้วยังสามารถใช้แมงกานีสกรีนแซนด์เป็นบัฟเฟอร์ได้ เนื่องจากถ้า ปริมาณสารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เติมน้อยเกินไป ไม่สามารถออกซิไดซ์เหล็กและ แมงกานีสที่ละลายน้ำได้หมดแมงกานีสกรีนแซนด์จะออกซิไดซ์ส่วนที่เหลือ แต่ถ้าปริมาณสารละลาย โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เติมมากเกินไป จะทำให้น้ำที่ผ่านชั้นกรองมีสีชมพู

## 2.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดเหล็ก และแมงกานีสในน้ำด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์

### 2.6.1 ปริมาณเหล็กและ/หรือแมงกานีสในน้ำ

เมื่อปริมาณเหล็กและ/หรือแมงกานีสในน้ำเพิ่มมากขึ้น อำนาจในการออกซิไดซ์ ของแมงกานีสกรีนแซนด์จะหมดลงเร็ว ทำให้อายุการกรองของระบบสั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (21) ซึ่งจะทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้ในการรีเจนเนอเรชัน นอกจากนี้ อัตราการกรองที่ใช้จะ ต่ำลงเพื่อให้เหล็กและ/หรือแมงกานีสถูกกำจัดออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.11 ผลของปริมาณเหล็กและหรือแมงกานีสเริ่มต้นในน้ำที่มีต่อการกำจัดเหล็ก และแมงกานีสด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์ (21)



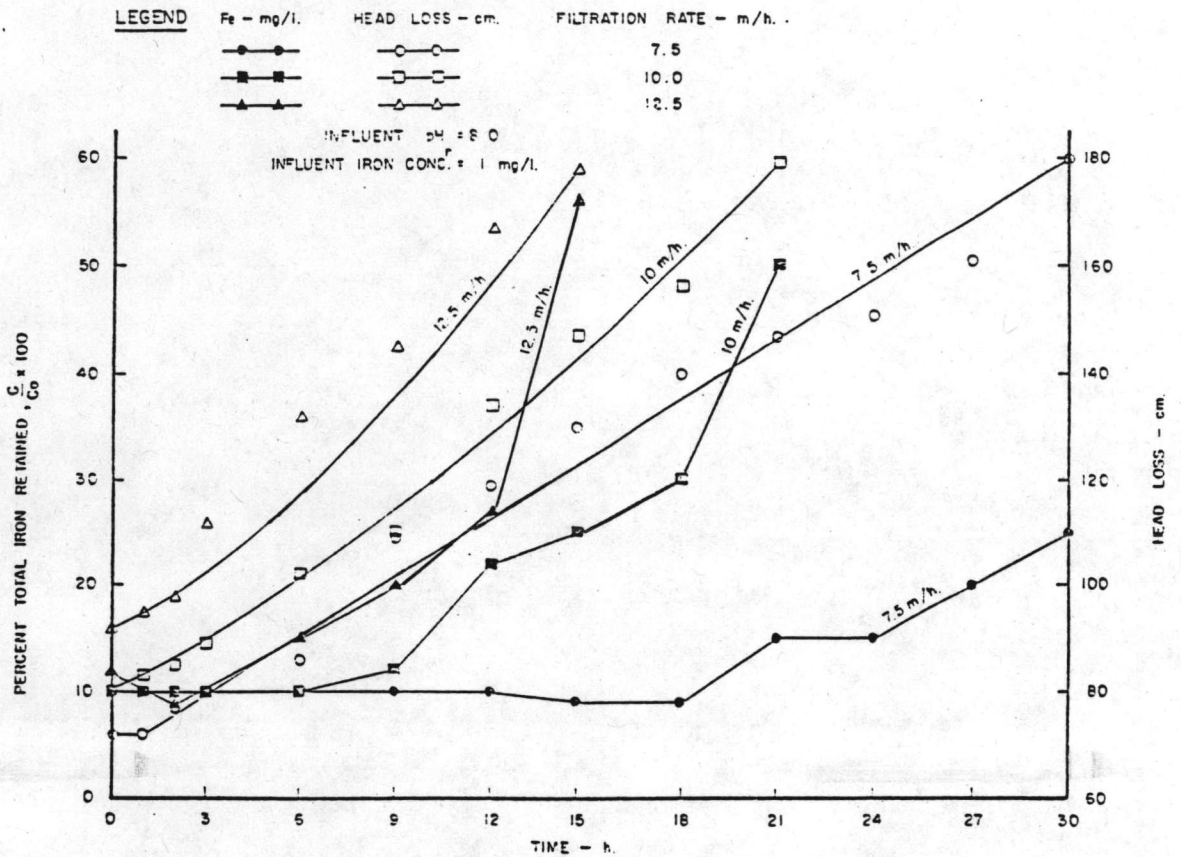
### 2.6.2 พีเอช

พีเอชจะมีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กและแมงกานีส โดยอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเพิ่มตามการเพิ่มของพีเอชหรือลดลงเมื่อพีเอชลดลง จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างเหล็ก (II) กับออกซิเจนเกิดขึ้นได้ดีเมื่อน้ำมีพีเอชสูงกว่าหรือเท่ากับ 7 ส่วนอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจน มีค่าค่อนข้างต่ำที่พีเอชต่ำกว่า 9.5 (10) สำหรับพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์ คือ พีเอชในช่วง 7.5-8 สำหรับกระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบทีจะเท (16) ส่วนการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่อง สารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถออกซิไดซ์เหล็กและแมงกานีสในช่วงพีเอชที่กว้างกว่า

### 2.6.3 อัตราการกรอง

อัตราการกรองต่ำจะทำให้เวลาสัมผัสระหว่างน้ำดิบกับชั้นกรองมีมากขึ้น เหล็กและ/หรือแมงกานีสถูกออกซิไดซ์โดยชั้นกรองของแมงกานีสกรีนแซนด์ได้มาก ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและ/หรือแมงกานีสเพิ่มขึ้น แต่ถ้าอัตราการกรองสูง เวลาสัมผัสระหว่างน้ำดิบกับชั้นกรองน้อยลง โอกาสที่เหล็กและแมงกานีสจะถูกออกซิไดซ์ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสลดลง

จากการทดลองของ Jamawatr (21) พบว่า เมื่อปริมาณเหล็กเริ่มต้นในน้ำดิบ 1 มก./ล. ที่อัตราการกรอง 7.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กของแมงกานีสกรีนแซนด์ประมาณ 75% อายุการกรอง 30 ชม. เมื่อเพิ่มอัตราการกรองเป็น 10 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กลดลงเหลือ 50% และเมื่อเพิ่มอัตราการกรองเป็น 12.5 ลบ.ม./ตร.ม.-ชม. ประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กลดเหลือเพียง 44% ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ผลของอัตราการกรองที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและหรือแมงกานีสด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์ (21)

#### 2.6.4 การรีเจนเนอเรชัน

การรีเจนเนอเรชันเป็นการฟื้นฟูอำนาจการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์ให้มีประสิทธิภาพเช่นเดิม การรีเจนเนอเรชันจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กและแมงกานีสของแมงกานีสกรีนแซนด์ ดังนั้นในการรีเจนเนอเรชันแบบทีละเท จึ่งต้องใช้สารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อให้แน่ใจว่าแมงกานีสกรีนแซนด์มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เหมือนเดิม สำหรับการรีเจนเนอเรชันแบบต่อเนื่องนั้น ณาเติมสารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตคาร์ให้มีความเข้มข้นระหว่างน้ำดิบกับสารละลายประมาณ 15-60 วินาที (11,16) ก่อนที่น้ำดิบจะเข้าสู่ถังกรอง เพื่อให้เกิดการออกซิเดชันได้อย่างสมบูรณ์

### 2.6.5 สารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำดิบ

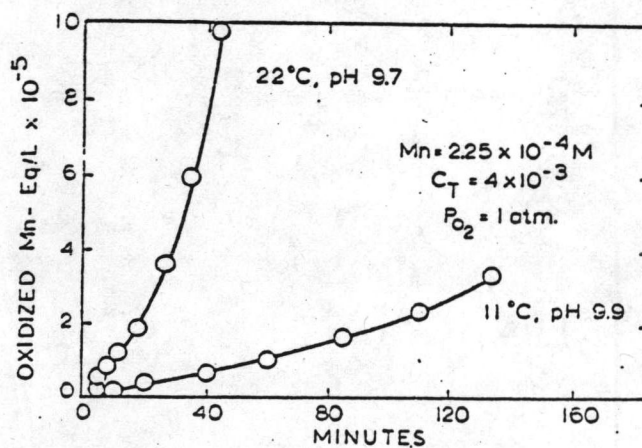
สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำ, สารประกอบไนโตรเจน หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะมีผลทำให้ปริมาณสารละลายโปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์เพิ่มขึ้น และยังทำให้อำนาจในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์ลดลงด้วย

### 2.6.6 ความเป็นต่าง

เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็กและแมงกานีสที่เกิดขึ้น จะทำลายสภาพความเป็นต่างของน้ำเนื่องจากมีการเกิดจากปฏิกิริยา ดังนั้นพีเอชของน้ำจะลดลงถ้าไม่มีสภาพความเป็นต่างไม่เพียงพอที่จะทำลายกรดที่เกิดขึ้น ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะช้าลง

### 2.6.7 อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชัน และยังมีผลต่อสมดุลของกรด-ด่าง และการละลายน้ำของสารต่าง ๆ ในน้ำ รูปที่ 2.14 แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจน จะเห็นได้ว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาออกซิเดชันจะช้าลงเมื่ออุณหภูมิลดลง



รูปที่ 2.13 ผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแมงกานีสกับออกซิเจน



## 2.7 ข้อดีและข้อเสียของการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำด้วยแมงกานีสกรีนแซนด์

### 2.7.1 ข้อดี

1. เหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำถูกกำจัดออกจากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพบว่าวิธีรีเจนเนอเรชันอย่างต่อเนื่องใช้ได้ผลกับน้ำที่มีเหล็กและแมงกานีสที่ละลายน้ำ ซึ่งไม่สามารถกำจัดออกด้วยวิธีธรรมดา
2. วิธีนี้สามารถกำจัดเหล็กและแมงกานีสได้โดยตรง ทำให้ไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการอื่น เช่น การเติมอากาศ การตกตะกอน เป็นต้น
3. สามารถกำจัดเหล็กอินทรีย์, กลิ่น, สี ได้ แต่ต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าปกติ เพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์

### 2.7.2 ข้อเสีย

1. โปตัสเซียมเปอร์แมงกาเนตมีราคาแพง อาจทำให้ไม่ประหยัดในเชิงเศรษฐศาสตร์
2. อำนาจในการออกซิไดซ์ของแมงกานีสกรีนแซนด์จะลดลงถ้าในน้ำมีริตวาลิงเอเจนต์อื่น ๆ เช่น สารอินทรีย์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, สารประกอบไนโตรเจน เป็นต้น
3. พีเอชที่เหมาะสมมีช่วงจำกัดเมื่อใช้กระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบทีเจเท
4. กระบวนการรีเจนเนอเรชันแบบทีเจเท ต้องใช้สารละลายโปตัสเซียม-เปอร์แมงกาเนตในปริมาณมากเกินไป เพื่อให้แน่ใจว่าแมงกานีสกรีนแซนด์มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์เช่นเดิม ทำให้เปลืองสารเคมีที่ใช้รีเจนเนอเรชัน และใช้น้ำปริมาณมากในการชะล้าง (rinse)