

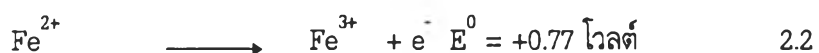
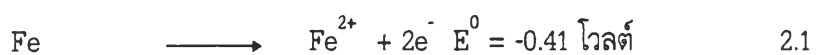
บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม

ตามธรรมชาติมักจะพบแร่เหล็กชนิดต่างๆ ในชั้นหินและชั้นดิน ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ทำให้พบเหล็กได้ในแหล่งน้ำ โดยเฉพาะแหล่งน้ำใต้ดิน ในชั้นหินพบว่ามีแร่เหล็กประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของแร่ทั้งหมด (Robinson, 1968) แร่เหล็กที่พบมักจะรวมกันเป็นสารประกอบชนิดต่างๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เหล็กซัลไฟด์ (FeS) และเหล็กคาร์บอเนต ($FeCO_3$) เป็นต้น (Vitayaudom, 1967)

คุณสมบัติทางเคมีของเหล็กพบว่า เหล็กจัดเป็นโลหะหนักชนิดหนึ่ง เป็นธาตุทรานสิชันลำดับที่ 26 ในตารางธาตุ มีมวลอะตอมเป็น 55.84 มีสถานะเป็นของแข็งมันวาว แร่เหล็กที่พบในธรรมชาติมักจะอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดต่างๆ ซึ่งสามารถละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ทำให้เหล็กที่พบในธรรมชาติทั่วไปจะอยู่ในรูปเหล็กเฟอร์รัส และเหล็กเฟอร์ริก เนื่องจากเหล็กจัดเป็นธาตุที่มีเลขออกซิเดชันได้ 2 ค่า คือ +2 (เหล็กเฟอร์รัส, Fe^{2+}) และ +3 (เหล็กเฟอร์ริก, Fe^{3+}) จากการพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าทางเคมี ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 พบว่า แร่เหล็กสามารถละลายออกมาได้ และจะอยู่ในรูปเหล็กเฟอร์รัส ซึ่งจะสามารถถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริกได้ง่าย และเหล็กเฟอร์ริกสามารถถูกรีดิวซ์กลับให้กลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสได้ในสภาวะที่เป็นกรด ดังนั้นในธรรมชาติจึงสามารถพบเหล็กได้ทั้งในรูปเหล็กเฟอร์รัส และเหล็กเฟอร์ริกในรูปสารประกอบต่างๆ หรือไอออนในสารละลาย



เหล็กที่พบตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะอยู่ในแหล่งน้ำใต้ดิน ทั้งนี้เนื่องจากแร่เหล็กสามารถละลายน้ำออกมาได้ โดยจะอยู่ในรูปของเหล็กเฟอร์รัส (Ghosh, 1966) สาเหตุของการละลายเกิดได้จากการทำงานของสิ่งมีชีวิตในดิน โดยเฉพาะแบคทีเรียในดิน คือ

1. แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) จะพบได้ในดินบริเวณที่มีออกซิเจนกระจายอยู่ เมื่อเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในการย่อยสลายอาหารในดิน พบว่า การทำงานของแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนนี้จะเปลี่ยนกาซออกซิเจน ให้กลายเป็นกาซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลทำให้น้ำใต้ดินมีสถานะเป็นกรด เมื่อน้ำกรดนี้ผ่านชั้นหิน หรือชั้นดินที่มีแร่เหล็กปนอยู่ สามารถที่จะละลายแร่เหล็กเหล่านั้นออกมาอยู่ในรูปเหล็กเฟอร์รัสได้

2. ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะพบแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ (anaerobic bacteria) ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้สามารถเปลี่ยนแร่เหล็กเฟอร์ริกให้กลายเป็นแร่เหล็กเฟอร์รัสได้ โดยเฉพาะแบคทีเรียที่ใช้ซัลเฟอร์ จะรีดิวซ์เหล็กเฟอร์ริกให้กลายเป็นเหล็กเฟอร์รัสได้ง่าย และเหล็กเฟอร์รัสสามารถละลายออกมาได้ถ้าอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดเช่นกัน

แร่เหล็กที่พบตามธรรมชาติทั่วไป จะอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัสไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) มากที่สุด รองลงมาคือ เฟอร์รัสคาร์บอเนต (FeCO_3) และเฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) (Walker, 1978; Hauer, 1950) ซึ่งสามารถละลายออกมาอยู่ในแหล่งน้ำใต้ดินได้โดยการทำงานของแบคทีเรีย และสภาพการละลายของแร่เหล็กจะเกิดได้มากขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้เกิดปัญหาขึ้นเมื่อนำน้ำใต้ดินมาใช้ เพราะจะทำให้เหล็กเฟอร์รัสที่มีอยู่ในน้ำถูกออกซิไดซ์กลายเป็นเหล็กเฟอร์ริก ซึ่งมีผลให้น้ำมีสีเหลืองขุ่น และมีกลิ่นเหม็น ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ได้ จึงต้องมีการกำจัดเหล็กออกจากน้ำใต้ดินก่อนที่จะนำมาใช้ โดยค่ามาตรฐานปริมาณเหล็กที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำเป็น 0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 ประโยชน์ของเหล็กในอุตสาหกรรม

เหล็กจัดเป็นโลหะที่มีความแข็งแรง และทนทาน สามารถนำไปแปรรูปใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้มาก เช่น เหล็กเส้นที่ใช้เสริมความแข็งแรงในการก่อสร้าง หรือนำไปชุบเคลือบโลหะชนิดต่างๆ ได้ เช่น นิกเกิล โครเมียม เป็นต้น เพื่อประโยชน์ในการใช้ ปัจจุบันอุตสาหกรรมเหล็กหรือ

อุตสาหกรรมแปรรูปโลหะในประเทศไทยมีเป็นจำนวนมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการนำเหล็กมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น การนำเหล็กมาใช้จะต้องมีการทำความสะอาดก่อนเข้าสู่กระบวนการแปรรูปโลหะ โดยวิธีการทำความสะอาดนั้นเป็นการขจัดสนิมเหล็กที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าของโลหะ วิธีการขจัดสนิมเหล็กส่วนใหญ่จะใช้กรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวล้าง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับออกไซด์ของเหล็กให้เกิดการละลายออกจากผิวหน้าของโลหะได้ ซึ่งแสดงได้ดังสมการเคมี 2.3 ดังนี้



ในกระบวนการขจัดสนิมเหล็ก พบว่า ของเสียที่ได้จะมีสถานะความเป็นกรดสูงมาก และมีเหล็กเฟอร์รัสละลายอยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นวิธีการกำจัดของเสียที่ได้นี้จะใช้วิธีการปรับระดับพีเอชให้เป็นกลาง เพื่อลดความเป็นกรดให้อยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และในการปรับระดับพีเอชนี้สามารถช่วยกำจัดเหล็กได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากเหล็กสามารถตกตะกอนได้บางส่วนในระดับพีเอชที่เป็นกลาง แต่ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่เหลืออยู่ยังคงมีปริมาณสูง ดังนั้นการปรับระดับพีเอชให้เป็นกลางสามารถช่วยลดปริมาณเหล็กได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งจำเป็นต้องมีการกำจัดเหล็กที่เหลืออยู่ให้มีปริมาณอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับให้มีได้ในแหล่งน้ำ เพื่อที่จะระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ โดยที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

การกำจัดเหล็กสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายที่สุดคือ การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ โดยใช้ตัวช่วยตกตะกอนที่มีสภาพเป็นเบส เพื่อให้มีความเข้มข้นของอนุมูลไฮดรอกไซด์ไอออนมากพอที่จะสามารถไปทำปฏิกิริยาเคมีกับเฟอร์รัสไอออนให้ตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ได้ ดังสมการที่ 2.4



การตกตะกอนในรูปเหล็กเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์นี้มีข้อเสียอยู่บ้าง คือ ตะกอนเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์มักไม่ค่อยอยู่ตัว สามารถละลายได้ง่ายในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน ซึ่งจะมีผลทำให้เหล็กเฟอร์รัสหลุดออกมาเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ จะก่อให้เกิดภาวะความเป็นพิษเกิดขึ้นได้

2.3 ความเป็นพิษของเหล็ก

เหล็กจัดเป็นธาตุที่มีประโยชน์เมื่อมีในปริมาณน้อย เนื่องจากปกติในร่างกายของคนเราจะมีเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย โดยเฉพาะในเลือดจะมีเหล็กอยู่ประมาณ 3-5 กรัม สองในสามของปริมาณเหล็กทั้งหมดอยู่ในรูปของฮีโมโกลบิน ลิปเปอร์เซ็นต์อยู่ในรูปของไมโอโกลบิน นอกจากนั้นอยู่ในรูปของเอนไซม์ชนิดต่างๆ เนื่องจากหน้าที่หลักของเหล็กในเลือดจะทำหน้าที่ในการรับ และถ่ายเทออกซิเจน และเป็นตัวช่วยในการเกิดเมตาบอลิซึมในร่างกาย ถ้าคนเราได้รับเหล็กในปริมาณที่มากเกินไป ร่างกายจะมีกลไกในการขับออก คือ ประมาณ 2-15 เปอร์เซ็นต์ของเหล็กทั้งหมดจะถูกดูดซับไว้ในเยื่อกระเพาะอาหาร ซึ่งจะถูกขับออกประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน เหล็กในปริมาณมากจะถูกขับออกโดยตับและตับอ่อน โดยอาศัยกลไกของเมตาบอลิซึมในร่างกาย เหล็กที่ถูกขับออกจะอยู่ในน้ำดี และน้ำปัสสาวะเป็นส่วนใหญ่ มีปริมาณน้อยที่จะถูกขับออกในรูปของเหงื่อ เล็บและผม ซึ่งโดยปกติร่างกายจะขับเหล็กออกมาประมาณ 0.5 มิลลิกรัมต่อวัน

ดังนั้นความเป็นพิษของเหล็กจะเกิดขึ้นได้จะขึ้นกับปริมาณของเหล็กที่ได้รับ และระยะเวลา ซึ่งความเป็นพิษจะแสดงออกได้ใน 2 ลักษณะ คือ พิษเฉียบพลัน หรือพิษสะสม ซึ่งก่อให้เกิดความผิดปกติของเลือด และโรคเกี่ยวกับตับได้ โดยความร้ายแรงจะแตกต่างกัน ขึ้นกับลักษณะของความเป็นพิษที่ได้รับ

พิษเฉียบพลันจะเกิดขึ้นได้จากการรับปริมาณเหล็กเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมาก ซึ่งพบว่า 0.5 กรัมของเหล็ก หรือ 2.5 กรัมของเฟอร์รัสซัลเฟต สามารถทำให้เกิดอาการอาเจียนได้ หลังจากเหล็กเข้าสู่ร่างกายประมาณ 1-6 ชั่วโมง และเกิดอาการช็อคตามมาได้ นอกจากนี้ยังพบว่า อาจจะมีเลือดออกที่เยื่อกระเพาะอาหาร กล้ามเนื้อตับถูกทำลาย และเอนไซม์ที่ตับและตับอ่อนจะถูกขับออกมามากซึ่งอาจทำให้เกิดภาวะตับวายได้ หรือเลือดมีความผิดปกติเนื่องจากมีความเป็นกรดสูงมาก

สำหรับพิษสะสมหรือพิษเรื้อรัง พบว่าเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

1. เกิดจากภาวะผิดปกติภายในร่างกาย ที่มีปริมาณเหล็กในเลือดมากเกินไป ซึ่งเกิดขึ้นจากกรรมพันธุ์
2. เกิดจากการรับประทานยาที่มีที่เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นองค์ประกอบ

3. เกิดจากการได้รับปริมาณเหล็กเข้าสู่ร่างกายโดยความบังเอิญ ในปริมาณน้อยๆ แต่บ่อยครั้ง ทำให้มีการสะสมในร่างกายมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้อุปกรณ์ที่ทำจากเหล็กที่มีออกไซด์ หรือสนิมของเหล็ก

อาการส่วนใหญ่เมื่อได้รับเหล็กเข้าไปสะสมในร่างกายจะทำให้มีความผิดปกติของเลือด คือ เลือดมีความเป็นกรดมากขึ้น และทำให้ตับและตับอ่อนทำงานมากเกินไป เกิดภาวะตับวายได้ (Casarett and Doull's., 1996)

จากความเป็นพิษของเหล็ก ทำให้จำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาหาวิธีการกำจัดเหล็กที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้มีปริมาณเหล็กปนเปื้อนออกไปสู่สิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุด หรืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมให้มีได้ในแหล่งน้ำ เทคนิควิธีการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ จึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กมากที่สุด และมีปริมาณเหล็กเหลืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

2.4 เทคนิคการกำจัดโลหะหนัก

เทคนิคการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมักจะใช้กระบวนการทางเคมี คือ ต้องการกำจัดหรือแยกสารต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยอาศัยสารเคมีที่ต้องเติมลงไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยกระบวนการทางเคมีในปัจจุบันมักมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสม เช่น ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ปรับสภาพสารที่สามารถละลายอยู่ในน้ำได้ให้กลายเป็นสารที่ไม่ละลายในน้ำ และปรับสภาพตะกอนให้มีการสร้างและรวมตะกอนที่มีขนาดเล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่าย เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ซึ่งเทคนิคการกำจัดโลหะหนักที่มีการพัฒนาให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้ จำแนกได้ดังนี้

2.4.1 การทำให้ตกตะกอน (precipitation)

วิธีนี้เป็นการเติมสารเคมีที่มีอนุมูลไอออนตรงข้ามกับไอออนของโลหะหนัก ซึ่งได้แก่สารจำพวกแอนไอออนต่างๆ เช่น คาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นต้น

ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำแล้วทำให้เกิดการตกตะกอนแยกโลหะหนักออกจากน้ำได้ เช่น ตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เฟอร์รัสคาร์บอเนต เฟอร์รัสซัลเฟต เป็นต้น (Nakashima, 1977)

การตกตะกอนส่วนใหญ่จะใช้สารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ โซเดียมคาร์บอเนต หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น เป็นตัวตกตะกอนโลหะหนัก ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่จะตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ในพีเอชที่เป็นเบส เช่น เหล็กตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีในพีเอช 6-8 (Robinson และ Dixon, 1968) แคดเมียมตกตะกอนไฮดรอกไซด์ในพีเอช 9.5-12.5 และตะกั่วตกตะกอนไฮดรอกไซด์ได้ดีในพีเอช 9.2-9.5 (Metcalf & Eddy, 1976) ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

2.4.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

วิธีนี้มักจะอาศัยอนุภาคที่ยึดจับไอออนของโลหะหนัก เพื่อแลกเปลี่ยนไอออนที่จับอยู่บนผิวอนุภาค อนุภาคนี้มักเรียกว่า เรซิน ซึ่งมีทั้งชนิดแคทไอออน (cation exchange resin) และแอนไอออน (anion exchange resin) การใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ในการกำจัดโลหะหนักจะให้เรซินชนิดแคทไอออน โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโซเดียมเรซิน หรือ ไฮโดรเจนเรซิน เป็นต้น เรซินที่ใช้เป็นพวกอินโซลูเบิล ออแกนิก แอซิด (insoluble organic acid) ในรูปของซัลโฟนิก หรือ คาร์บอกซิลิก แอซิด (sulfonic or carboxylic acid) วิธีการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเรซินมีความเฉพาะเจาะจง แต่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง แต่ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ด้วยจะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซินเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และจะต้องมีการล้างเรซินด้วยกรด เพื่อที่จะนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4.3 การระเหย (evaporation)

เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดโดยใช้วิธีการระเหยน้ำออกจากน้ำเสีย เพื่อให้มีความเข้มข้นของโลหะหนักมากขึ้น เหมาะกับกรณีที่มีน้ำเสียที่มีโลหะหนักอยู่ปริมาณมาก แต่ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ในการกำจัดน้ำนิยมใช้วิธีลดความดันเพื่อให้เกิดการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิต่ำ

2.4.4 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

เป็นวิธีการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการเติมตัวทำละลายที่สามารถละลายโลหะหนักได้ดีกว่าน้ำ เพื่อแยกโลหะหนักออกมา แต่พบว่าตัวทำละลายที่ว่ามีราคาถูกกว่านั้น แพงจึงไม่นิยมใช้

2.4.5 อิเลคโตรไดอะไลซิส (electrodialysis)

วิธีนี้จะอาศัยกระแสไฟฟ้าในการแยกไอออนโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยจะให้ผ่านเพอมีเอเบิล เมมเบรน (permeable membrane) ซึ่งเป็นเมมเบรนที่ยอมให้ไอออนผ่านได้ เพื่อให้ไอออนโลหะหนักเหล่านี้ไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) แยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ วิธีนี้ค่อนข้างนิยมใช้ในกรณีที่ปริมาณโลหะหนักน้อยชนิดในสารละลาย และมีค่าศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน แต่วิธีการนี้ค่อนข้างมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องอาศัยกระแสไฟฟ้าในการแยกโลหะหนัก

2.4.6 รีเวิร์สออสโมซิส (reverse osmosis)

วิธีนี้คล้ายกับอิเลคโตรไดอะไลซิสที่ต้องผ่านเมมเบรน แต่วิธีนี้จะใช้การอัดความดันสูงผ่านเซมิ-เพอมีเอเบิล เมมเบรน (semi-permeable membrane) แทนอาศัยกระแสไฟฟ้า โดยเมมเบรนจะยอมให้ไอออนบางชนิดเท่านั้นที่แพร่ผ่านไปได้ และจะต้องใช้ความดันสูงมาก ซึ่งอาจจะสูงกว่า 100 บรรยากาศ นอกจากนี้เมมเบรนที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติในการทนต่อการกัด-ต่าง ทนต่อความดัน เป็นต้น

2.4.7 ออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction)

เป็นวิธีการกำจัดที่มีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันก่อน แล้วจึงนำไปกำจัดด้วยวิธีอื่นร่วมด้วย เช่น วิธีการทำให้ตกตะกอน วิธีการนี้จะเปลี่ยนรูปของโลหะหนักที่อยู่ในรูปที่เป็นพิษ หรือรูปที่ตกตะกอนได้ยากให้กลายเป็นรูปที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ง่ายขึ้น เช่น ออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริก เพื่อลดความเป็นพิษลง และให้เกิดการตกตะกอนได้ง่ายขึ้น หรือรีดักชันเฮกซะโครเมียม (Cr^{6+}) ไปเป็นไตรโครเมียม (Cr^{3+})

เพื่อลดความเป็นพิษให้น้อยลง สารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ โอโซน โฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ เป็นต้น และสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เพอร์รอสัลเฟต เป็นต้น

วิธีการออกซิเดชัน-รีดักชัน และการทำให้ตกตะกอน เป็นวิธีที่จะใช้ควบคู่กันได้ใน การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย และสะดวก แต่จะมีข้อเสียในการตก ตะกอนที่จะต้องคำนึงถึงสภาวะที่เหมาะสม โดยเฉพาะพีเอช การเลือกใช้สารเคมีที่ใช้ในการ ออกซิเดชัน-รีดักชัน จำเป็นอย่างยิ่งในแง่ความเหมาะสม และค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึง ปริมาณที่เหลืออยู่ในน้ำเสียด้วยว่าจะมีปัญหาในการกำจัดต่อไปหรือไม่

วิธีการกำจัดโลหะหนักในวิธีการต่างๆ มักขึ้นกับชนิดของโลหะหนัก และประสิทธิ ภาของแต่ละวิธีการที่ใช้ในการกำจัด จากเทคนิคในการกำจัดโลหะหนักพบว่า วิธีที่สามารถนำไปใช้ ในการกำจัดเหล็กนั้นมีได้หลายวิธีเช่นกัน ขึ้นกับปริมาณเหล็กที่ต้องการกำจัด ในกรณีที่มีปริมาณ เหล็กมากจำเป็นต้องใช้วิธีการทางเคมีเพื่อให้สามารถกำจัดได้ในปริมาณมากในเวลาอันสั้น สำหรับ กรณีที่มีเหล็กในปริมาณน้อยอาจใช้วิธีการกรองแบบสัมผัสด่างก็ได้

2.5 วิธีการกำจัดเหล็กในน้ำ

วิธีการกำจัดเหล็กส่วนใหญ่ จะเป็นการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาล หรือน้ำใต้ ดิน เนื่องจากมีเหล็กปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเมื่อสูบน้ำขึ้นมาใช้ ทั้งนี้เนื่องจาก เหล็กสามารถถูกออกซิไดซ์จากเหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกได้ง่าย ทำให้ได้ตะกอนสีเหลืองและ น้ำมีสีและกลิ่นไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ ดังนั้นวิธีการกำจัดเหล็กในน้ำเสียนำวิธีการกำจัดเหล็กใน น้ำบาดาลมาประยุกต์ใช้ ซึ่งได้แก่

2.5.1 วิธีตกตะกอน (precipitation)

เป็นวิธีการตกตะกอนในรูปเกลือไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) เกลือคาร์บอเนต (FeCO_3) เกลือไบคาร์บอเนต ($\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$) เป็นต้น เหมาะกับน้ำเสียที่มีเหล็กเฟอร์รัสปนอยู่ใน ปริมาณมาก โดยจะเป็นไปตามสมการ 2.5 - 2.7 ดังนี้



2.5.2 วิธีออกซิเดชัน ร่วมกับการตกตะกอน (oxidation with precipitation)

วิธีการออกซิเดชันสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ ซึ่งแบ่งออกได้หลายประเภท คือ

ก. การใช้ด่างทับทิม หรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

ด่างทับทิม หรือโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้อยู่ในรูปเหล็กเฟอร์ริกได้ง่าย ในสภาวะที่เป็นกรดหรือด่าง (Knocke และคณะ, 1991) ดังนั้นการตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกจึงอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ หรือ เฟอร์ริกคาร์บอเนต ขึ้นกับอนุมูลแอนไอออนที่ใช้ในการตกตะกอน การออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกจะเป็นไปตามสมการที่ 2.8 (Ghosh, 1965)



แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการออกซิไดซ์ที่เร็วขึ้น และสมบูรณ์ (Walker, 1978) และสามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ พร้อมกับการตกตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ได้ (Conelly, 1958 ; Humphrey, 1962) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.9 (Ghosh, 1965)



ในทางทฤษฎีพบว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 1 มก. สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 1.76 มก. และ แมงกานีสไดออกไซด์ที่ได้สามารถช่วยในการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส ให้เกิดมากขึ้น ดังนั้น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 1 มก. จะสามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ทั้งหมด 2.66 มก.(Walker, 1978)

หลังจากเกิดการออกซิไดซ์แล้ว จะทำการตกตะกอนเหล็กเฟอร์ริกให้อยู่ในรูปต่างๆ ดังสมการ 2.10 - 2.12



โดยส่วนใหญ่จะตกตะกอนเหล็กเฟอร์ริกในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.10 มากกว่า เนื่องจากเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้ดีในช่วงพีเอช 6-8 (Robinson และ Dixon, 1968) โดยตะกอนที่ได้จะมีสีสนิม ส่วนตะกอนเฟอร์ริกคาร์บอเนตจะตกตะกอนได้ดีที่ระดับพีเอชมากกว่า 11 (Olson และ Twardowski, 1975)

ข. การใช้โซเดียมไฮโปคลอไรต์ หรือ คลอรีน หรือ คลอรีนไดออกไซด์

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ หรือ คลอรีน หรือ คลอรีนไดออกไซด์ จัดเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนกว่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตมาก แต่สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกได้เช่นเดียวกัน ดังสมการ 2.13 - 2.15



จากปฏิกิริยาข้างต้น พบว่าไฮโปคลอไรต์ 1 มก. สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 2.17 มก. คลอรีน 1 มก. ออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 1.57 มก. และคลอรีนไดออกไซด์ 1 มก. ออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 4.14 มก. การออกซิไดซ์นี้สามารถเกิดได้ในระดับพีเอช 4-10 เวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์จะนานกว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Knocke และคณะ, 1991) ซึ่งบางครั้งอาจใช้เวลานานถึง 60 นาที ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำ และปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในน้ำเสีย สำหรับการตกตะกอนของเหล็กเฟอร์ริกทำได้เช่นเดียวกับในสมการ 2.10 - 2.12

ค. การใช้อากาศ (air)

เป็นวิธีการเติมอากาศลงไปใต้น้ำ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายเพื่อให้ออกซิเจนในอากาศไปออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้อยู่ในรูปเหล็กเฟอร์ริก ดังสมการ 2.16 พบว่าออกซิเจน 1 มก. สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ 7 มก. (Engelbrecht และคณะ, 1967)

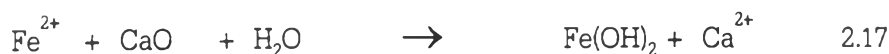


การออกซิไดซ์โดยการเติมอากาศ มักจะเกิดการออกซิไดซ์ในระดับพีเอชที่เป็นกลางหรือเบส โดยพีเอชส่วนใหญ่จะอยู่ในระดับ 7.5-8.0 ซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ได้ดี เวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์ประมาณ 30-60 นาที (Walker, 1978) การเติมอากาศนั้นมักจะทำพร้อมกับการเติมตัวช่วยตกตะกอนเพื่อให้เกิดเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ก่อน แล้วจึงทำการออกซิไดซ์เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ให้เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ได้ง่ายและเร็วขึ้น เนื่องจากอากาศหรือออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนมาก

Hauer (1950) ทำการศึกษาพบว่าถ้าเติมอากาศในการออกซิไดซ์เฟอร์รัสแล้วไม่มีการเติมตัวช่วยตกตะกอนลงไป จะต้องใช้เวลาในการตกตะกอนนานถึง 12-24 ชั่วโมง หรือมากกว่านั้น ขึ้นกับระดับพีเอชของน้ำเสีย ถ้าเป็นกรดมากจะใช้เวลาในการตกตะกอนยาวนานขึ้น

ง. การเติมอากาศตามด้วยการเติมปูนขาว

คล้ายการวิธีการเติมอากาศ คือตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ก่อน แล้วจึงทำการออกซิไดซ์ให้เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ดังสมการ 2.17 - 2.18



Owen (1963) ได้ศึกษาพบว่าพีเอชของน้ำจะมีผลต่อปฏิกิริยาทั้งสองสมการข้างต้น กล่าวคือ ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีพีเอชควรจะมีค่า 8.4 นอกจากนี้ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีการผสมของ

เพอร์ริคไฮดรอกไซด์และปูนขาว ซึ่งสามารถช่วยกำจัดเหล็กได้มากขึ้นด้วย และสามารถช่วยลดความกระด้างแบบไบคาร์บอเนตได้ด้วย แต่มีข้อเสียที่จะมีปริมาณตะกอนมากกว่าวิธีการอื่น

จ. การใช้โอโซน (ozone)

เป็นการออกซิไดซ์โดยใช้โอโซนที่เกิดจากการนำอากาศผ่านเครื่องโอโซนเจนเนอเรเตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนออกซิเจนในอากาศให้กลายเป็นโอโซน เพื่อเพิ่มความแรงของตัวออกซิไดซ์ให้มีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์มากขึ้น ดังนั้นโอโซนที่ได้จะเป็นตัวออกซิไดซ์เหล็กเพอร์ริสให้เป็นเหล็กเพอร์ริคแทนอากาศ แสดงได้ดังสมการ 2.19



พบว่าโอโซน 1 มก. สามารถออกซิไดซ์เหล็กเพอร์ริสได้ 2.33 มก. ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าออกซิเจนในอากาศ แต่เวลาที่ใช้ในการออกซิไดซ์ประมาณ 5-15 นาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการใช้อากาศ แต่จะมีข้อเสียที่เครื่องโอโซนเจนเนอเรเตอร์มีราคาแพง และจะต้องมีการกำจัดโอโซนที่มากเกินไปด้วย เนื่องจากโอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง และมีสถานะเป็นแก๊ส อาจเกิดอันตรายได้

2.5.3 วิธีการกรองแบบสัมผัส

การกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล มักจะใช้วิธีการโปรยกรองเป็นส่วนใหญ่ โดยมีการรวมวิธีออกซิเดชันร่วมกับการกรองให้อยู่ในขั้นตอนเดียวกัน โดยในระหว่างการกรองจะให้น้ำมีการผ่านอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์เปลี่ยนเหล็กเพอร์ริสให้เป็นเหล็กเพอร์ริคก่อน แล้วจึงกรองโดยผ่านตัวกรองที่มีรูพรุน ซึ่งสามารถเก็บอากาศไว้ในโพรงของอนุภาคได้ เพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ที่สมบูรณ์ และตะกอนที่ได้จะอยู่บนผิวของตัวกรองไม่หลุดออกมากับน้ำ (ประจิด จันอุไร, 2522) ตัวกรองที่นิยมใช้ คือ ไพรอูลูไซต์ หรือแมงกานีสโคทแซนด์ หรือแมงกานีสไฮโอไลต์ เป็นต้น วิธีในการกรองจำเป็นต้องใช้ความดันเข้ามาช่วย เนื่องจากอนุภาคของตัวกรองมีขนาดเล็กเฉียด และวิธีการนี้จำเป็นต้องควบคุมปริมาณอากาศในตัวกรองให้มีปริมาณมากพอที่จะออกซิไดซ์เหล็กเพอร์ริส (Fe^{2+}) ในน้ำที่จะผ่านตัวกรองด้วย

2.5.4 วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

ในการกำจัดเหล็กมักใช้ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนกับน้ำที่มีเหล็กเฟอร์รัสอยู่ โดยจะมีการแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนในซีโอไลต์กับเหล็กเฟอร์รัส (Dyer, 1988) ดังสมการที่ 2.20



วิธีการนี้สามารถทำร่วมกับการกำจัดความกระด้างของน้ำได้ และสามารถล้างซีโอไลต์เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ก็มีข้อจำกัดในวิธีการนี้คือ

1. เหล็กเฟอร์รัสจะต้องอยู่ในรูปที่เป็นไอออน และควรมีปริมาณไม่มากเกินไป เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงสุด
2. จะต้องระมัดระวังไม่ให้มีออกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะเป็นรูพรุนสามารถเก็บกักออกซิเจนได้ ซึ่งจะสามารถออกซิไดส์เหล็กเฟอร์รัสได้จะทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนลดลง (Breck, 1984)
3. น้ำเสียจะต้องไม่มีการเติมตัวออกซิไดซ์ชนิดๆ ลงไป โดยเฉพาะโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
4. จะต้องมีการล้างซีโอไลต์บ่อยๆ และจะต้องทำการล้างด้วยกรดอย่างน้อยเดือนละครั้ง เพื่อรักษาสภาพมิให้ซีโอไลต์เสื่อมสภาพ และจะต้องล้างด้วยน้ำที่สะอาดปราศจากไอออนอื่นๆ ด้วย

2.6 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกำจัดเหล็ก

2.6.1 สถานภาพของเหล็กในน้ำ และความสามารถในการตกตะกอน

ในอุตสาหกรรมชุบโลหะมีการล้างสนิมเหล็กจากแท่งโลหะเหล็กก่อนทำการชุบโลหะ ในวิธีการล้างสนิมจะใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น เป็นตัวล้างสนิมออก (บริษัท ไทยแลนด์ ไอออนเวคส์ จำกัด, 1995) ซึ่งจะทำให้เหล็กที่ถูกล้างออกจะอยู่ในรูปเหล็กเฟอร์รัสมากที่สุด มีบางส่วนอาจถูกเปลี่ยนไปเป็นเหล็กเฟอร์ริคได้บ้างแต่น้อยมาก ทั้งเหล็กเฟอร์รัสและเฟอร์ริคนั้นสามารถ

ละลายอยู่ในน้ำได้ในสภาวะที่เป็นกรด (Lide, 1992) แต่ความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กทั้งสองมีความแตกต่างกันในระดับพีเอชที่ต่างกัน (Ghosh, 1965) ค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) เป็นค่าคงที่ที่บ่งบอกความสามารถในการละลายของสารประกอบเหล็กต่างๆ ซึ่งสามารถบอกสภาพการตกตะกอนของเหล็กได้เช่นกัน กล่าวคือ สารประกอบเหล็กที่มีสภาพการละลายน้อยกว่าไอออนของเหล็กจะเกิดการรวมตัวตกตะกอนได้ง่ายกว่า เช่น เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ พบว่าสารประกอบเหล็กทั้งสองมีค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) เป็น 8×10^{-16} และ 4×10^{-38} ตามลำดับ (Lide, 1992) แสดงได้ว่าการตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จะเกิดการตกตะกอนได้ดีกว่า เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์

2.6.2 อัตราการออกซิเดชันเหล็กในน้ำ

เหล็กเฟอร์รัสในน้ำถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย โดยออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ดังนั้นปริมาณออกซิเจนในน้ำ (DO) อย่างน้อย 6 มก./ล. สามารถออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริกได้ง่าย (Engelbrecht และคณะ, 1967) นอกจากนี้ Just (1908) พบว่าอัตราการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสจะเกิดได้เร็วขึ้น ถ้าน้ำมีค่าความเป็นเบสสูง โดยเฉพาะไบคาร์บอเนตอัลคาไลไนต์ และขึ้นกับระดับพีเอช เมื่อระดับพีเอชของน้ำลดลงจะทำให้เกิดกาซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น อัตราการออกซิเดชันของเหล็กเฟอร์รัสจะลดลง และในทางตรงข้ามเมื่อพีเอชของน้ำมากขึ้น อัตราการเกิดออกซิเดชันจะสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$\begin{array}{lll}
 1. \frac{-d[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2]}{dt} & \propto & \frac{[\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2][\text{P}_{\text{O}_2}]}{[\text{P}_{\text{CO}_2}]} \quad (\text{Just, 1908}) \\
 2. \frac{-d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} & \propto & \frac{[\text{Fe}^{2+}][\text{P}_{\text{O}_2}]}{[\text{H}^+]^2} \quad (\text{Just, 1908}) \\
 \text{หรือ} \quad 3. \frac{-d[\text{Fe}^{2+}]}{dt} & \propto & [\text{Fe}^{2+}][\text{P}_{\text{O}_2}][\text{OH}^-]^2 \quad (\text{Stumm และ Lee, 1961})
 \end{array}$$

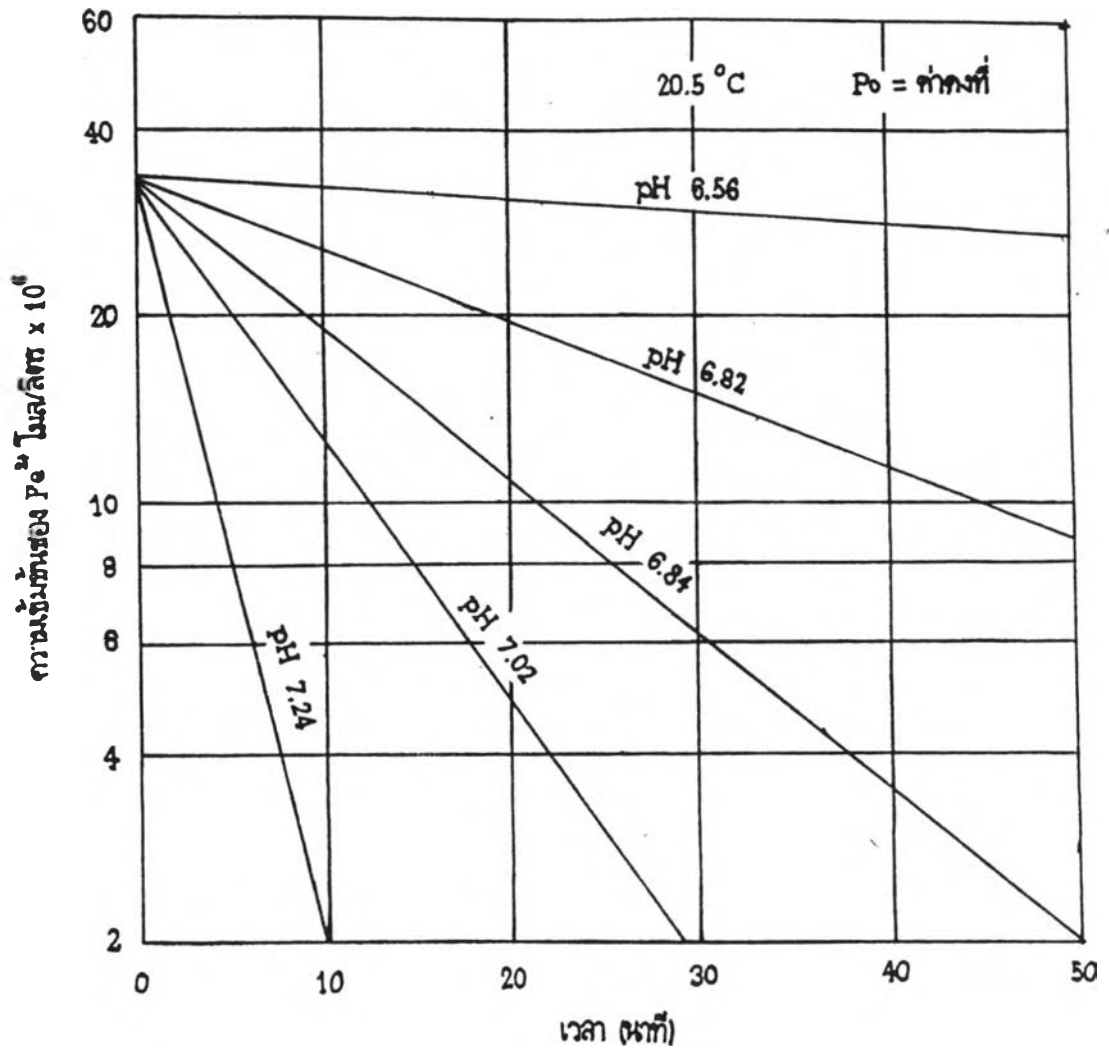
จากสมการ 2 และ 3 พบว่าอัตราการออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสจะเกิดได้เร็วขึ้น ถ้าน้ำมีออกซิเจนอย่างเพียงพอ และมีระดับพีเอชสูง โดยพีเอชที่เหมาะสมควรมีค่ามากกว่า 7.2 (Stumm และ Lee, 1961)

การออกซิไดซ์จะทำปฏิกิริยากับโลหะไดเวเลนต์ที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน
Hexaquoiron II : $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})^{2+}$

2.6.3 ระดับพีเอช (pH)

Robinson และ Dixon (1968) ทำการทดลองออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสที่ระดับพีเอชต่างๆ พบว่าในการออกซิไดซ์ที่ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตสามารถออกซิไดซ์ได้ในระดับพีเอชที่ 5.5-7.0 ในระดับพีเอช 6.5-7.0 อากาศจะออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสได้ ในกรณีที่ใช้น้ำร่วมกับอากาศร่วมกันในการออกซิไดซ์จะเกิดได้ดีในระดับพีเอช 9.0-9.5 นอกจากนี้ยังพบว่าในการออกซิไดซ์ที่ระดับพีเอชต่างๆ นี้จะเกิดการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ควบคู่ไปด้วย

Stumm และ Lee (1961) ได้ศึกษาถึงอัตราการออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสที่ระดับพีเอช ความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัส และเวลาต่างๆ แสดงได้ดังกราฟ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงอัตราออกซิเดชันของเหล็กเฟอร์รัสที่ระดับพีเอชต่างๆ

ที่มา : Stumm และ Lee, 1961.

2.6.4 ค่าความเป็นเบส (alkalinity)

ค่าความเป็นเบสอย่างน้อยที่สุด 100 มก./ล.เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำ จะทำให้เกิดการออกซิไดซ์ได้เกือบ 100 % และตกตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ได้เกือบ 100 % เช่นกันที่ระดับพีเอช 9.0-9.5 (Robinson และ Dixon, 1968)

2.6.5 อุณหภูมิ (temperature)

อัตราการออกซิเดชันจะแปรผันกับอุณหภูมิ กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิลดลงเหล็กเฟอร์รัสจะถูกออกซิไดซ์ได้น้อยลง (Stumm และ Lee, 1961)

จากองค์ประกอบต่างๆ ที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปได้ว่าอัตราการออกซิเดชันเหล็กเฟอร์รัสในน้ำจะเกิดได้เร็วหรือช้าขึ้น ขึ้นกับ ระดับพีเอช ค่าความเป็นเบสเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าระดับพีเอชและค่าความเป็นเบสสูงขึ้น อัตราการออกซิเดชันจะสูงขึ้นตามไปด้วย และจะทำให้เหล็กเฟอร์ริกที่ได้สามารถตกตะกอนได้เร็วยิ่งขึ้น

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการกำจัดเหล็ก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดเหล็กส่วนใหญ่ จะศึกษาการกำจัดเหล็กในแหล่งน้ำใต้ดิน เนื่องจากมีการพัฒนาน้ำใต้ดินมาใช้ประโยชน์กันมากขึ้น ปัญหาที่มักพบในแหล่งน้ำใต้ดินคือ มีปริมาณเหล็กและแมงกานีสอยู่มากเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมรับให้มีได้ในแหล่งน้ำ คือ 0.300 และ 0.050 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ต้องมีการศึกษาเพื่อที่จะสามารถนำน้ำใต้ดินไปใช้ประโยชน์ได้ และจากการวิจัยต่างๆ นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำเสียได้ เพื่อลดปริมาณเหล็กให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ในแหล่งน้ำ ไม่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้

Donaldson (1922) ศึกษาการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยใช้เครื่องเติมอากาศแบบหลายชั้นตามด้วยระบบการกรองเร็ว ซึ่งภายในชั้นการกรองต่างๆ ถ้ามีการเติมถ่านโค้กจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้น

Adam (1931) พบว่าน้ำที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ด้วย จำเป็นที่จะต้องกำจัดสารอินทรีย์นั้นก่อน โดยผ่านน้ำเข้าแอกทีเวเทด คาร์บอน (activated carbon) ก่อน เนื่องจากสารอินทรีย์ดังกล่าวสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็กเฟอร์รัสได้ง่าย จะทำให้ยากต่อการออกซิไดซ์ และตกตะกอนเหล็ก

Frick (1933) ศึกษาการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลโดยชั้นวิธีการกรองทราย พบว่าชั้นทรายที่ผ่านการกรองแล้วมีออกไซด์ของเหล็กเคลือบอยู่ จะช่วยให้มีการกำจัดเหล็กได้มากขึ้น เนื่องจากออกไซด์ของเหล็กจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการกำจัดเหล็กในระหว่างการกรอง

Mathew (1947) ใช้คลอรีนเป็นตัวออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัส และทำการตกตะกอนในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล พบว่าวิธีนี้สามารถกำจัดเหล็กได้ดีและเร็วกว่าการกรองเพียงอย่างเดียว

Brown (1950) ใช้คลอรีนร่วมกับการเติมอากาศในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล พบว่าคลอรีนที่เติมลงไปสามารถช่วยกำจัดเหล็กได้มากขึ้นจากการเติมอากาศเพียงอย่างเดียว 50 %

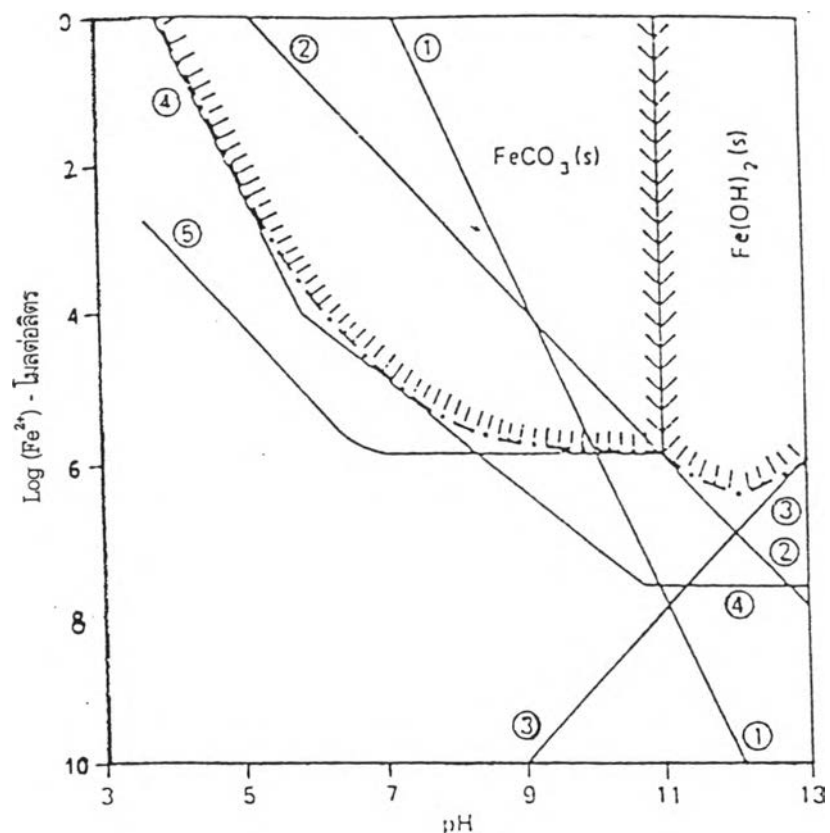
Hem (1960) ได้รายงานถึงหลักในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาล โดยมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาแตกต่างกันขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่างๆ คือ

1. เหล็กที่อยู่ในสภาพที่เป็นแร่จะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกับน้ำ (hydrolysis) และตกตะกอนออกมาในรูปไฮดรอกไซด์ได้
2. เหล็กบางส่วนที่อยู่ในสารละลายจะเกิดการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนตในกรณีที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง
3. เหล็กสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันกลับไป-มาได้ (reversible) ในสภาวะที่เหมาะสม
4. เหล็กบางส่วนสามารถตกตะกอนกับซัลไฟด์ได้
5. เหล็กสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนอื่นๆ หรือสารอินทรีย์ หรือคีเลตที่ทำให้ได้สารประกอบที่อยู่ตัว

นอกจากนี้ Hem (1960) ได้เสนอแนะว่าสารละลายที่มีเหล็กเฟอร์รัส จะสามารถเกิดการออกซิไดซ์ และตกตะกอนในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ได้ที่ระดับพีเอช 6.0-7.5

Stumm และ Lee (1961) พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาในการกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์นั้น มีอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ต่างกันในสภาวะที่มีค่าความเป็นเบส (alkalinity) ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของระดับพีเอช

Stumm และ Morgan (1970) ได้ทำการตกตะกอนเหล็กในระดับพีเอชต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงความสามารถในการตกตะกอนของเหล็กได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการตกตะกอนในรูปแบบต่างๆ ของเหล็กเฟอร์รัส ที่ระดับพีเอชต่างๆ

ที่มา : Stumm และ Morgan, 1970.

Komolit (1962) ได้ทำการเติมอากาศในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเหล็กเฟอร์รัสอยู่ โดยการปรับระดับพีเอชในการเติมอากาศให้อยู่ในช่วง 7.0-8.0 ประมาณ 20 นาที หลังจากนั้นทิ้งให้ตะกอนจมตัวประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงกรอง พบว่าน้ำที่ได้ผ่านการกรองยังมีเหล็กเฟอร์รัสและเหล็กเฟอร์ริกเหลืออยู่ในปริมาณที่มากกว่าค่ามาตรฐาน จึงทำการเติมตัวออกซิไดซ์เพิ่ม เพื่อเปลี่ยนรูปเหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริกแทนเพื่อลดความเป็นพิษของเหล็กเฟอร์รัสลง

Willey และ Jennings (1963) และ Yukpan Wattana (1973) ใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในการกำจัดเหล็ก และใช้แมงกานีสกรีนแซนด์เป็นตัวกรอง จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดเหล็กได้ค่อนข้างมาก

Ghosh และ คณะ (1967) ได้ศึกษาสภาวะการตกตะกอนของเหล็กในน้ำบาดาลในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถตกตะกอนได้ดีที่พีเอชประมาณ 9 แต่ตะกอนที่ได้มีลักษณะเป็นคอลลอยด์ยากต่อการกรอง จึงต้องใช้ระบบทรายกรองเข้ามาช่วย (George และ Charudhuri, 1977)

Engelbrecht และคณะ (1967) ใช้วิธีการเติมอากาศและการกรองเพื่อกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลจากการศึกษาดังกล่าวพบว่าการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาลโดยการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริกนั้นทำได้ง่าย โดยใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์ 1 มก./ล. (ออกซิเจนในน้ำ) สามารถออกซิไดซ์ เหล็กเฟอร์รัสได้ 7 มก./ล. ดังสมการเคมีที่ 2.21 และปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำอย่างน้อย 6 มก./ล. จะช่วยให้เกิดการออกซิไดซ์ และตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ได้ง่าย



และได้สรุปถึงผลของชนิดสารเคมีต่างๆ ที่มีผลต่อระดับพีเอช และค่าความเป็นเบสและความกระด้างที่มีผลต่อการตกตะกอนของเหล็กดังนี้

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อการเพิ่มค่าความเป็นเบส และระดับพีเอช แต่ไม่เพิ่มค่าความกระด้าง เหมาะกับน้ำที่มีเหล็กสูงจะช่วยให้ตกตะกอนได้ง่าย แต่จะมีราคาแพง

- โซเดียมคาร์บอเนต มีผลต่อค่าความเป็นเบสมาก เนื่องจากน้ำที่ได้หลังการกำจัด เหล็กจะมีค่าความเป็นเบสสูงมาก คุณสมบัติคล้ายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- ปูนขาว มีผลต่อค่าความเป็นเบส ระดับพีเอช และความกระด้าง สามารถเพิ่มค่าความเป็นเบสจนถึงระดับที่สามารถกำจัดเหล็กได้ นิยมนำมาใช้ในการกำจัดเหล็ก เนื่องจากมีราคาถูกกว่ามาก

ในปีเดียวกัน Engelbrecht และคณะ พบว่าน้ำบาดาลที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ เมื่อทำการเติมอากาศลงไป ออกซิเจนในอากาศจะไปออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริก และจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำถูกกำจัดออกไป ซึ่งจะมีผลให้ระดับพีเอช และปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะไอออนบางชนิด เช่น Cu^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นได้

Robinson และ Dixon (1968) ศึกษาถึงการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาลที่มีค่าความเป็นเบสต่ำ พบว่าสารที่ช่วยตกตะกอนที่สามารถเพิ่มพีเอชได้คือ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว เป็นต้น ซึ่งพบว่าสารทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถเพิ่มระดับพีเอชให้เกิดการตกตะกอนของเหล็กได้ แต่สารทั้ง 3 ชนิดนี้จะให้ค่าความเป็นเบสและความกระด้างไม่เท่ากันของน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว และได้ศึกษาสภาวะการออกซิไดซ์ของเหล็กเฟอร์รัสในน้ำบาดาล พบว่า ค่าความเป็นเบสในรูปไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต เหล็กเฟอร์รัสจึงจะถูกออกซิไดซ์ได้ โดยไม่ต้องเติมตัวออกซิไดซ์ชนิดอื่น นอกจากนี้ใช้การเติมอากาศลงไปเพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์ ในการทดลองดังกล่าวได้ใช้เวลาในการเติมอากาศประมาณ 2 นาที พบว่า สามารถเกิดการออกซิไดซ์ได้ในปริมาณหนึ่ง Robinson และ Dixon (1968) จึงเสนอแนะว่าถ้าให้เวลานาน 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง เหล็กเฟอร์รัสน่าจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนั้นยังพบว่าเกิดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวออกซิไดซ์แต่ละชนิดขึ้นกับระดับพีเอชด้วย คือ ถ้าใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ 100 % ที่ระดับพีเอช 5.5-7.0 และการใช้ปูนขาวหรือโซเดียมคาร์บอเนตร่วมในการออกซิไดซ์ พบว่าระดับพีเอชที่เหมาะสม คือ 9.0-9.5 ในกรณีของโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดได้มากขึ้น เมื่อระดับพีเอชมากขึ้น ส่วนการเติมอากาศที่ระดับพีเอช 6.5-7.0 พบว่าเกิดการออกซิไดซ์

เหล็กเฟอร์รัสได้เพียง 20 % เท่านั้น ดังนั้นในการใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ ระดับพีเอชมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างมาก

หลังจากการศึกษาของ Robinson และ Breland (1968) พบว่าน้ำที่มีค่าความเป็นเบสน้อยกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะใช้เวลาในการเติมอากาศเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะต้องใช้เวลานานประมาณ 1-20 ชั่วโมง แต่ถ้าค่าความเป็นเบสมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะใช้เวลาน้อยกว่า 1 ชั่วโมง ในกรณีที่น้ำมีค่าความเป็นเบสต่ำมาก Ghosh และคณะ (1966) พบว่าการตกตะกอนเหล็กในรูปเฟอร์รัสคาร์บอเนตนั้นไม่เหมาะสม เนื่องจากน้ำมีระดับพีเอชต่ำทำให้ใช้เวลาในการออกซิไดซ์และตกตะกอนนานมาก แต่ในกรณีที่น้ำมีค่าความเป็นเบสสูงมาก เหล็กจะเกิดการตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกคาร์บอเนตก่อน แล้วจึงจะเกิดการออกซิเดชันให้เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ แต่จะใช้เวลานานมาก และเกิดการออกซิไดซ์ได้ช้าและยากมากขึ้น

องค์กร AWWA ในนิวยอร์ก (1969) ได้ออกแบบวิธีการที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกจากน้ำ ไม่ว่าจะเป็นน้ำบาดาลหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมก็ตาม โดยการอาศัยวิธีการเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปเหล็กเฟอร์ริก แล้วทำการตกตะกอนและกรอง ถ้าน้ำที่ผ่านการกรองแล้วยังมีปริมาณเหล็กสูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ให้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคทไอออนก่อนอีกครั้ง

ปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดเหล็ก ได้แก่

1. ระดับพีเอช เนื่องจากอัตราการออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพีเอชเพิ่มขึ้น
2. ชนิดและปริมาณตัวออกซิไดซ์ ในกรณีที่เหล็กละลายอยู่ในน้ำมาก วิธีการเติมอากาศเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่เพียงพอต่อการกำจัดเหล็กต้องอาศัยตัวออกซิไดซ์ที่แรงกว่าเข้าช่วย เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต คลอรีนไดออกไซด์ โอโซน เป็นต้น
3. การปล่อยให้ตะกอนจมตัว (sedimentation) เพื่อช่วยให้เกิดการกรองได้ง่าย และมีการดูดตันในสารตัวกรองน้อยที่สุด
4. สารช่วยให้ตะกอนรวมตัว หรือสารช่วยให้ตะกอนจมตัว (floculant และ coagulant) อาจมีความจำเป็นเพื่อให้เกิดการจมตัวของตะกอนได้ดีขึ้น
5. การปรับเสถียรภาพ (stabilization) เพื่อป้องกันการรวมตัวของสารแขวนลอยให้เกิดตะกอนขึ้น

สารที่ช่วยให้เหล็กเกิดการจมน้ำได้มากขึ้น ส่วนใหญ่นิยมใช้สารส้ม เนื่องจากมีราคาถูก และตะกอนที่ได้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์เป็นสารที่ช่วยให้ตะกอนอื่นรวมตัวได้ (Pigeon และคณะ, 1978)

ชนิดของตัวออกซิไดซ์จะใช้เวลาต่างกันในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ จากการทํารวจของนักวิจัยในองค์กร AWWA (1969) พบว่าในกรณีที่ใช้คลอรีนอิสระเป็นตัวออกซิไดซ์ จะต้องใช้เวลาอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมง ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์ที่ระดับพีเอช 6.8-8.4 และในขั้นตอนการจมน้ำของตะกอน จะต้องใช้สารเคมีเข้ามาช่วยให้ใช้เวลาในการจมน้ำน้อยลง และหลังจากการกำจัดเหล็กแล้วจะต้องคำนึงถึงปริมาณสารเคมีต่างๆ ที่เหลืออยู่ในน้ำไม่ให้เกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยอาจจะผ่านเรซินที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆ ให้มีปริมาณไอออนลดน้อยลงได้ เช่น แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) และแมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) เป็นต้น

Oconnor (1971) ได้ทำรายงานเกี่ยวกับวิธีการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลที่ใช้กันทั่วไปของระบบบำบัด 598 โรงในสหรัฐอเมริกา พบว่าวิธีการที่ใช้ในระบบบำบัดมีตามลำดับดังนี้

- ตกตะกอน และตามด้วยการกรองโดยใช้วิธีการเติมอากาศ หรือเติมตัวออกซิไดซ์ และปรับระดับพีเอชด้วยปูนขาวเพื่อให้เกิดการตกตะกอน แล้วทำให้เกิดการจมน้ำของตะกอนและกรอง

- ใช้วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการใช้อิโอสต์หรือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคทไอออน

- ทำการปรับสภาพสารแขวนลอยโดยการเติมสารช่วยให้กระจายตัว (dispersing agent) ได้แก่สารจำพวกโพลีฟอสเฟต เพื่อป้องกันการตกตะกอนซ้ำ

ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ พบว่าสามารถกำจัดเหล็กได้มาก โดยความเข้มข้นของเหล็กหลังผ่านการกำจัดแล้วเหือนน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้วิธีการเติมตัวออกซิไดซ์จำเป็นที่จะต้องมีการรีดิวซ์ เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากตัวออกซิไดซ์ต่อไป โดยทำการเติมเหล็กเฟอร์รัสลงไป เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน

ต่อของตัวออกซิไดซ์ที่เหลืออยู่ และวิธีการปรับสภาพโดยสารจำพวกโพลีฟอสเฟตนั้น จะต้องเติมไม่มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้องกันการเกิดการเจริญเติบโตของสาหร่าย และแบคทีเรียมากเกินไป (baby bloom) ที่จะเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

Olson และ Twardoski (1975) พบว่าน้ำบาดาลที่มีค่าความเป็นเบสต่ำถึงระดับปานกลาง เหล็กเฟอร์รัสจะถูกกำจัดได้โดยการเติมอากาศ และกรองตะกอนออกได้ง่าย แต่ในน้ำบาดาลที่มีปริมาณเหล็กเฟอร์รัสอยู่สูง การเติมอากาศอาจจะไม่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องใช้ตัวออกซิไดซ์ชนิดอื่นช่วย เช่น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต คลอรีน เป็นต้น และสารช่วยในการตกตะกอน และเพิ่มระดับพีเอชคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปูนขาว เป็นต้น และอาจใช้สารช่วยให้ตะกอนรวมตัว (floculant) หรือสารช่วยให้ตะกอนจมน้ำ (coagulant) เป็นต้น

สำหรับการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลที่มีค่าความเป็นเบสสูงควรจะทำกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสคาร์บอเนตก่อนแล้วจึงทำการออกซิไดซ์ และตกตะกอนให้อยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ซึ่งน่าจะเป็นวิธีที่ดี เนื่องจากเฟอร์รัสคาร์บอเนตมีลักษณะเป็นตะกอนที่หนักกว่าจะกรองได้ง่าย และการออกซิไดซ์เป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์นั้นจะเกิดขึ้นในกระบวนการกรอง และจะถูกดูดซับไว้ในตัวกรอง

นอกจากนี้ Olson และ Twardowski (1975) จึงได้เสนอแนะว่าการกำจัดเหล็กในรูปเฟอร์รัสคาร์บอเนต โดยที่ไม่มีการออกซิไดซ์น่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมวิธีหนึ่ง เนื่องจากตะกอนเฟอร์รัสคาร์บอเนตมีลักษณะเป็นตะกอนที่หนักกว่าและมีรูปร่างเป็นผลึก (crystal) ซึ่งต่างจากตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่มีลักษณะเป็นตะกอนเบา และมีรูปร่างเป็นอสัณฐาน (amorphous) ทำให้ยากต่อการกรองมากกว่าเฟอร์รัสคาร์บอเนต แต่วิธีการนี้ไม่มีข้อมูลสนับสนุนว่าการกรองตะกอนเฟอร์รัสคาร์บอเนตจะช่วยให้เกิดการกำจัดเหล็กได้ดีกว่า นอกจากนี้ตะกอนเฟอร์รัสคาร์บอเนตจะเกิดการตกตะกอนได้จะต้องมีเหล็กเฟอร์รัสมากกว่า 1×10^{-4} โมลาร์ ระดับพีเอชมากกว่า 9 และมีระดับความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 0.01-0.1 บรรยากาศ ซึ่งจะมีผลทำให้ได้ค่าความเป็นเบสประมาณ 40-600 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต

Clearby (1975) ได้อาศัยหลักในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล โดยให้เกิดการออกซิไดซ์เหล็กเฟอร์รัสให้เป็นเหล็กเฟอร์ริกก่อน และทำการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ ซึ่งบางครั้งต้องมีการทำการออกซิไดซ์ และตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ควบคู่กันไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของตัวออกซิไดซ์ และตัวช่วยตกตะกอนที่ทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์

ในปีเดียวกัน Clearby ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลของสารช่วยให้ตะกอนรวมตัว (floculant) พบว่า สารส้มไม่ค่อยมีผลในการช่วยให้เกิดการรวมตัวของตะกอนมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า การกำจัดเหล็กโดยการตกตะกอนเหล็กเฟอร์ริกก่อน แล้วจึงเติมตัวออกซิไดซ์จะทำให้ตะกอนที่ได้อยู่ในรูปเฟอร์ริกคาร์บอเนตมากกว่าเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ เนื่องจากตะกอนของเฟอร์ริกจะถูกออกซิไดซ์ได้ช้า โดยเฉพาะถ้าใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

ค่าความเป็นเบสและความกระด้างมีผลต่อการตกตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์อีกด้วย กล่าวคือ ค่าความเป็นเบสอย่างน้อยที่สุด 280 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต จะช่วยให้เหล็กตกตะกอนได้ดีและเร็วขึ้น สำหรับความกระด้างควรมีอย่างน้อย 230 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับแคลเซียมคาร์บอเนต (Cleasby, 1975)

เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถตกตะกอนได้ในช่วงพีเอช 6-8 (Robinson และ Dixon, 1968) ตะกอนที่ได้มีสีสนิม และมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ โดย Olson และ Twardowski (1975) พบว่าเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์นั้นยากต่อการกรองเพื่อกำจัดออกจากน้ำเสีย จึงได้มีการศึกษาถึงการตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต แต่พบว่า เฟอร์ริกคาร์บอเนตนั้นสามารถตกตะกอนในพีเอชที่มีระดับมากกว่า 11 ซึ่งทำให้น้ำมีค่าความเป็นเบสมากขึ้น

นอกจากนี้ Olson และ Twardowski ได้เสนอแนะว่าการกำจัดเหล็กในน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยการทำการออกซิเดชันและตกตะกอนในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ น่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเลียนแบบวิธีการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาลที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่ เพราะปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นได้ดีที่ระดับพีเอชตั้งแต่ 7 ขึ้นไป ดังนั้นเมื่อมีการเติมอากาศลงไป ในน้ำบาดาล จะเป็นการไล่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปทำให้ระดับพีเอชเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงเกิดได้ง่ายขึ้น แต่สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจจะมีการคาร์บอนไดออกไซด์ละลายอยู่น้อยมาก หรือแทบจะไม่มีเลย จึงจำเป็นต้องเติมสารละลายเบสลงไป ร่วมกับการออกซิไดซ์ จึงจะสามารถตกตะกอนเหล็กในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ได้

Ficek (1980) ได้ทำการศึกษาการกำจัดเหล็กและแมงกานีสออกจากน้ำเสีย โดยศึกษาถึงชนิดของตัวออกซิไดซ์ต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดเหล็กและแมงกานีสดังนี้

ปริมาณของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการออกซิไดซ์เหล็ก 1 มิลลิกรัม แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.1

ปริมาณของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการออกซิไดซ์เหล็ก 1 มิลลิกรัม แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณของตัวออกซิไดซ์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการออกซิไดซ์เหล็ก 1 มิลลิกรัม

ตัวออกซิไดซ์	ปริมาณที่ใช้ในการออกซิไดซ์เหล็ก 1 มิลลิกรัม (มิลลิกรัม)
ออกซิเจน (O_2)	0.14
คลอรีนอิสระ (Cl_2)	0.62
แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($Ca(OCl)_2$)	0.64
โซเดียมไฮโปคลอไรต์ ($NaOCl$)	0.67
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$)	0.91
คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2)	1.21

จากการวิจัยของ Ficek (1980) พบว่าการใช้อากาศมักจะใช้เวลาในการออกซิไดซ์นาน แต่ถ้ามี Cu^{2+} เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ใช้เวลาในการออกซิไดซ์น้อยลง

โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และคลอรีนอิสระ จะต้องใช้ปริมาณมากกว่าทางทฤษฎี เนื่องจาก ไฮโปคลอไรต์ไฮออน (OCl^-) บางส่วนจะไปเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพทำให้ใช้ปริมาณตัวออกซิไดซ์มากขึ้น และต้องคำนึงถึงปริมาณมากเกินไปของอนุมูลคลอรีน เพื่อไม่ให้เกิดภาวะเป็นพิษต่อไป ซึ่งสามารถกำจัดคลอรีนที่มากเกินไปได้โดยการเติมเฟอร์รัสซัลเฟตลงไปให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันคลอรีนต่อ (Iatrou และ Knocke, 1992)

หลังจากการออกซิไดซ์เปลี่ยนเฟอร์รัสให้เป็นเฟอร์ริกแล้ว จะทำการปรับพีเอชด้วยปูนขาว หรือปูนขาว-โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยปรับพีเอชมากกว่า 9.5 เพื่อให้กำจัดได้ทั้งเหล็กและแมงกานีส

การใช้สารช่วยให้ตะกอนจมตัวนั้น นิยมใช้สารส้ม เนื่องจากตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์ จะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย จมตัวได้ยาก มีการนำเฟอร์ริกซัลเฟต ($Fe_2(SO_4)_3$) มาใช้

Vitayaudom Veera (1967) พบว่าสารเคมีที่ช่วยให้ตะกอนเกิดการรวมตัวและจมตัวไม่มีผลต่อการกำจัดเหล็กในน้ำ ถ้ามีการควบคุมระดับพีเอชของน้ำให้อยู่ในระดับ 8.0-9.0 เหล็กที่ละลายในน้ำสามารถรวมตัวกันและตกตะกอนลงมาเองได้

องค์กร AWWA (1990) ได้ทดลองศึกษาการกำจัดเหล็กโดยใช้ปูนขาว-โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับการเติมอากาศ และเติมคลอรีนเข้าช่วยในการกำจัดเหล็กในน้ำบาดาล เพื่อให้เกิดตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มากที่สุด แล้วเติมตัวช่วยให้ตะกอนรวมตัว หรือตัวช่วยให้ตะกอนจมตัวลงไป ทั้งให้ตะกอนจมตัวแล้วทำการกรอง พบว่าเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ได้ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดเช่นเดียวกัน

ในกรณีที่น้ำบาดาลมีปริมาณเหล็กไม่มาก จะใช้ซีโอไลท์ที่มีเมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) เป็นองค์ประกอบด้วยเป็นตัวกรอง เพื่อจับไอออนเหล็กไว้ให้อยู่ในซีโอไลท์ ความสามารถในการกำจัดมีประสิทธิภาพเช่นกัน

การใช้ปูนขาว หรือโซเดียมคาร์บอเนต จะทำให้เฟอร์รัสตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสคาร์บอเนตก่อนที่ระดับพีเอช 8-8.5 แล้วจึงตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะทำให้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์เปลี่ยนรูปไปเป็นเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ซึ่งตกตะกอนและกรองได้ง่ายกว่า

ในกรณีที่น้ำมีความกระด้างสูงมาก หลังการกำจัดเหล็กแล้ว จะทำการผ่านน้ำที่ได้เข้าสู่ซอร์พเทนเนอร์ (softener) เพื่อลดความกระด้างลง โดยปริมาณซอร์พเทนเนอร์ (softener) ที่ใช้ประมาณ 21-35 กรัมต่อลิตร

Knocke และคณะ(1991) ได้ศึกษาถึงกลไกในการกำจัดเหล็ก และเมงกานีส โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์เมงกานेट และคลอรีนไดออกไซด์ และได้สังเคราะห์น้ำเสียที่มีเหล็กเฟอร์รัส เมงกานีส (II) และมีไอออนอื่น ๆ อยู่ด้วย เช่น ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) คลอไรด์ไอออน (Cl^-) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) นอกจากนี้มีการเติมสารอินทรีย์บางชนิดคือ กรดซิวมิก และกรดฟลูวิกด้วย เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของไอออนต่าง ๆ และสารอินทรีย์ที่จะมีผลต่อการกำจัดเหล็กและเมงกานีส จากการทดลองพบว่า น้ำที่มีสารอินทรีย์ปนอยู่ด้วยปริมาณของตัวออกซิโดซ์ที่ใช้จะมีปริมาณมากกว่า ปริมาณที่คำนวณได้จากสมการเคมี ประมาณ 105-200 % เนื่องจากปริมาณตัวออกซิโดซ์บางส่วนจะ

ถูกนำไปออกซิไดซ์สารเคมี และเหล็กเฟอร์รัสจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้ง่ายกับสารอินทรีย์ในน้ำ จึงทำให้ต้องใช้เวลาในการออกซิไดซ์ และประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็กจะน้อยลง

Jobin และ Ghosh (1972) และ Theis และ Singer (1974) พบว่า เหล็กเฟอร์รัสเมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์แล้ว การใช้คลอรีน (Cl_2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) หรือโอโซน เป็นตัวออกซิไดซ์จะไม่มีผลในการออกซิไดซ์สารประกอบเชิงซ้อนของเหล็ก ทำให้เกิดการกำจัดเหล็กได้ยากขึ้น

นอกจากนี้ Knocke และคณะ (1991) ได้เตรียมน้ำบาดาลสังเคราะห์ไว้เพื่อศึกษาถึงชนิดของตัวออกซิไดซ์ที่สามารถออกซิไดซ์ เหล็กเฟอร์รัสไปเป็นเหล็กเฟอร์ริกได้ ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต คลอรีน โซเดียมไฮโปคลอไรต์ หรือ คลอรีนไดออกไซด์ เป็นต้น จะพบว่าโดยแต่ละชนิดของตัวออกซิไดซ์จะมีลักษณะการออกซิไดซ์ที่คล้ายกัน แต่การออกซิไดซ์จะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับความสามารถของตัวออกซิไดซ์ การเลือกใช้ตัวออกซิไดซ์ที่เหมาะสมยังขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสียอีกด้วย เนื่องจากน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์จะมีผลต่อการตกตะกอนของเหล็กและพบว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์จะใช้เวลาในการออกซิไดซ์น้อยกว่าการใช้คลอรีนไดออกไซด์มาก

นอกจากนี้การเลือกตัวออกซิไดซ์ควรคำนึงถึงปัญหาการสะสมของตัวออกซิไดซ์ในน้ำเสียเป็นสำคัญ Mathews (1947) พบว่าปริมาณคลอรีนที่มากเกินไปจะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำซึ่งจำเป็นที่จะต้องกำจัดคลอรีนที่มากเกินไปออกก่อน รวมทั้งแมงกานีสที่เหลือจากการใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตยังก่อให้เกิดปัญหาเช่นเดียวกัน (Conelly, 1958)

จากการกำจัดด้วยวิธีการออกซิเดชัน ร่วมกับการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารเคมีต่าง ๆ หลายชนิด พบว่าผลที่ได้จากการบำบัดจะได้ตะกอนของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) จำนวนมาก แต่จะไม่มีปัญหาต่อสภาวะแวดล้อม เนื่องจากเหล็กเฟอร์ริกอยู่ในรูปที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายได้ (Casarett และ Doull's, 1996) นอกจากนั้นสามารถนำตะกอนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์มาเปลี่ยนรูปให้อยู่ในรูปสารประกอบที่มีผลทางการค้าได้ เช่น เปลี่ยนให้อยู่ในรูปเฟอร์ไรต์ หรือ Fe_2O_3 (Tamura, และคณะ, 1981) หรือนำกลับมาเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) ได้ใช้เป็นสารช่วยให้ตะกอนจมตัวได้ สำหรับค่าความเป็นเบส และความกระด้างที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ตัวช่วยตกตะกอนที่เป็นสารละลายเบสอาจมีผลต่อการระบายน้ำลงสู่แหล่งน้ำด้วย แต่สามารถแก้ไขได้โดยนำน้ำที่ผ่านการกำจัดเหล็กแล้วผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแคทไอออน (cation exchange resin)

และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดแอนไอออน (anion exchange resin) เพื่อจะลดค่าความเป็นเบส และความกระด้างลงได้ (McGhee, 1975) การใช้ตัวออกซิไดซ์ที่เป็น โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต หรือ คลอรีน จำเป็นที่จะต้องควบคุมปริมาณที่เหลือในน้ำทิ้งด้วย