



## การศึกษาด้านเอกสาร

### 2.1 เฟอร์ไรต์

เฟอร์ไรต์ (ferrite) คือชื่อเรียกกลุ่มสารประกอบแมกเนติกออกไซด์ (magnetic oxide) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) โครงสร้างเฟอร์ไรต์มี 3 แบบได้แก่ สปิเนลเฟอร์ไรต์ (Spinel ferrite) เฮกซาโกนอลเฟอร์ไรต์ (Hexagonal ferrite) และ แรเอิร์ทการ์เนต (Rare earth garnet)

1. สปิเนลเฟอร์ไรต์ (Spinel ferrite) เป็นเฟอร์ริแมกเนติกออกไซด์ที่มีสูตรทั่วไปเป็น  $\text{M}^{2+}\text{O} \cdot \text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3$  โดยที่เป็นโลหะที่มีประจุบวกสอง (divalent metallic ion) เช่น  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  เป็นต้น  $\text{M}^{2+}$  อาจเป็น nonmagnetic ion เช่น  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  แต่ Fe-ion ยังคงคุณสมบัติแม่เหล็กอยู่

หน่วยที่เล็กที่สุดของโครงสร้างผลึกประกอบด้วยหน่วยของสูตรโครงสร้าง  $\text{MFe}_2\text{O}_3$  8 หน่วย โครงสร้างสปิเนลเฟอร์ไรต์ในแต่ละหน่วยเซลล์ (unit cell) แบ่งได้ 8 เซลล์ย่อย (subunit cell) โครงสร้างผลึกแสดงในรูปที่ 2.1 ในโครงสร้างผลึกประกอบด้วยแคตไอออนประจุบวกสาม (trivalent cations) และแคตไอออนประจุบวกสอง (divalent cations) แคตไอออนประจุบวกสามอยู่ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล (octahedral) ถูกล้อมรอบไปด้วยออกซิเจนไอออน (oxygen ions) จำนวน 6 ไอออน และแคตไอออนที่มีประจุบวกสองอยู่ที่ตำแหน่งเตตระฮีดรอล (tetrahedral) ล้อมรอบไปด้วยออกซิเจนไอออนจำนวน 4 ไอออน แอนไอออนประจุลบสองของสปิเนลเฟอร์ไรต์นอกจากเป็นออกซิเจนอาจเป็นซัลเฟอร์ (sulfur) คลอรีน (chlorine)

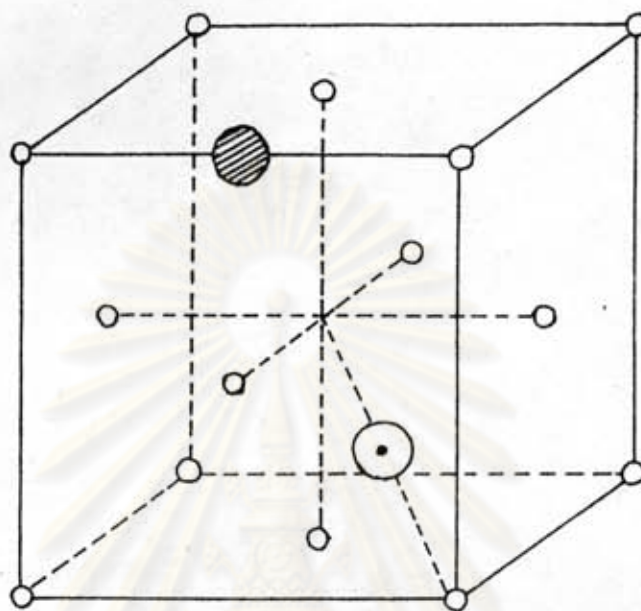
โครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์ในแต่ละหน่วยเซลล์ (unitcell) มี 64 เตตระฮีดรอลไซต์ (tetrahedral site) และมีเพียง 8 ตำแหน่งที่มีไอออนเข้าไปอยู่และมี 32 ออกตะฮีดรอลไซต์ (octahedral site) และมีเพียง 16 ตำแหน่งที่มีไอออนเข้าไปอยู่ สไปเนลเฟอร์ไรท์ที่รู้จักกันดีคือสารแมกนีไตต์ (magnetite) มีสูตรเป็น  $Fe_3O_4$  หรือ  $Fe^{2+}O \cdot Fe^{3+}_2O_3$  แมกนีไตต์เป็นเฟอร์ไรท์ที่รู้จักกันมานานที่สุดแต่ใช้น้อย เมื่อนำมาผสมกับโลหะหนักตัวอื่น จะทำให้ความเป็นแม่เหล็กมีเพิ่มขึ้นเช่น  $Mg_{1-x}Mn_xFe_2O_4$




## 2. เฮกซาโกนอลเฟอร์ไรท์ (Hexagonal ferrite) ได้แก่

แบเรียมเฟอร์ไรท์ (Barium ferrite) และ "M" compound โดยที่ "M" compound มีสูตรเป็น  $A^{2+}O \cdot 6B^{3+}_2O_3$  เช่น  $AB_{12}O_{19}$  โดยที่ A คือโลหะหนักที่มีประจุบวกสอง (divalent metallic ion) ได้แก่ Ba, Sr หรือ Pb B คือโลหะหนักที่มีประจุบวกสาม (trivalent metallic ion) ได้แก่ Al, Ga, Cr หรือ Fe ตัวอย่างเฮกซาโกนอลเฟอร์ไรท์ที่รู้จักกันดีคือแมกนีโตพลัมไบต์ (magnetoplumbite) มีสูตรเป็น  $PbFe_{12}O_{19}$  และแบเรียมเฟอร์ไรท์มีสูตรเป็น  $BaFe_{12}O_{19}$  องค์ประกอบหลักคือกลุ่มออกไซด์ของเฟอร์ไรต์แมกเนติก ( $Fe_2O_3$ ) กับโควาเลนท์ออกไซด์ ( $PbO$ ,  $BaO$  หรือออกไซด์ของโลหะทรานสิชันที่เป็นโควาเลนท์) เฮกซาโกนอลเฟอร์ไรท์ ถูกใช้เป็นแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2.2

## 3. แรเอิร์ทการ์เนท (Rare earth garnet) สูตรโครงสร้างหลักคือ

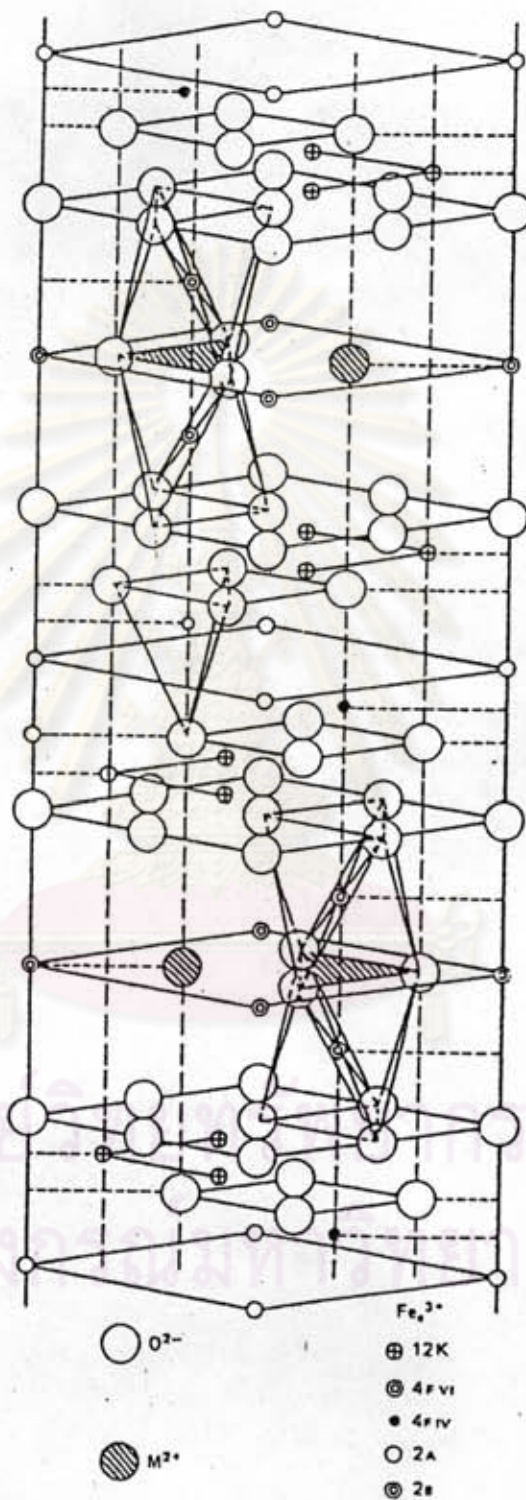
$M_3^{2+}Fe_2^{3+}Fe_3^{3+}O_{12}$  สามารถเขียนใหม่เป็น  $(3M_2O_3)^{2+}(2Fe_2O_3)^{3+}(3Fe_2O_3)^{3+}$  โดย M คือ rare earth metal ion หรือ yttrium ion c,a,d หมายถึง lattice site ออานโลหะทุกตัวในผลึกการ์เนทมีประจุบวกสาม all trivalent การ์เนทที่พบบ่อยคือ  $Ca_3^{2+}Fe_2^{3+}Si_3^{4+}O_{12}$  โครงสร้างผลึก 1 หน่วยเซลล์ประกอบด้วย 160 อะตอมพบ  $M_3Fe_2Fe_3O_{12}$  8 โมเลกุล หรือ 8 เซลล์ย่อย (subunit) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 a-ion อยู่ที่ body cubic center c และ d อยู่ที่ cube face เฟอร์ไรท์ชนิดนี้ไม่ได้กล่าวถึงการนำไปใช้



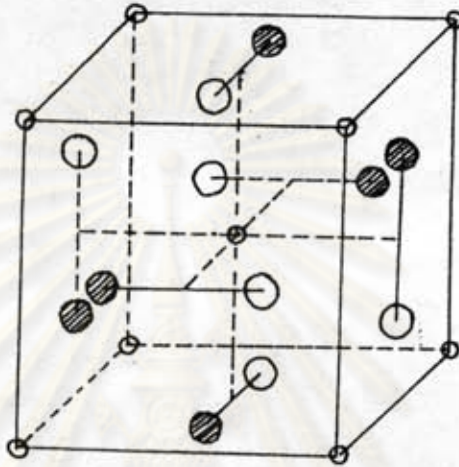
-  Octahedral B site
-  Tetrahedral A site
-  Oxygen ions

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
รูปที่ 2.1 โครงสร้างสไปเนลของเพอร์ไรท์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





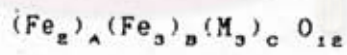
รูปที่ 2.2 โครงสร้างเฮกซาโกนาล เพอร์ไรท์



○ a ions

○ c ions

● d ions



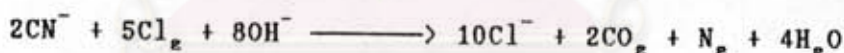
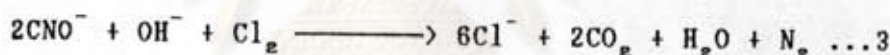
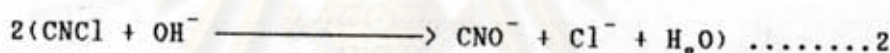
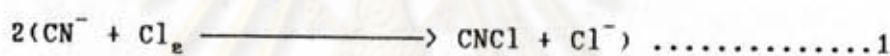
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ 2.3 โครงสร้างแร่ฮีทการ์เนท

## 2.2 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม บางขุนเทียน

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะถูกแยกบำบัดตามชนิดของสารปนเปื้อนที่มีอยู่ในน้ำเสียนั้น เช่น ไซยาไนต์ โครเมียม และโลหะหนักอื่นๆ ดังต่อไปนี้ (สุภี โรจน์อารสานนท์, 2535)

### 1. น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยไซยาไนต์

ไซยาไนต์ในน้ำเสียจะถูกทำลายโดยกระบวนการ Alkali Chlorination ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป และค่อนข้างถูกกว่าวิธีอื่นๆ ในกระบวนการดังกล่าว คลอรีน (ในรูปโซเดียมไฮโปคลอไรต์) จะถูกเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 11.0-11.5 โดยการเติมปูนขาว คลอรีนจะทำปฏิกิริยากับไซยาไนต์อย่างสมบูรณ์ที่ค่า redox potential ประมาณ - 220 mV ดังสมการต่อไปนี้



จากสมการข้างบนจะเห็นว่า สารพิษไซยาไนต์จะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่เป็นอันตราย โดยที่ปฏิกิริยา 1 เกิดขึ้นรวดเร็วมากและไม่ขึ้นกับ pH ส่วนปฏิกิริยาที่ 2 เกิดที่ pH สูงๆ และปฏิกิริยาที่ 3 จะเกิดเร็วที่ pH ปานกลาง

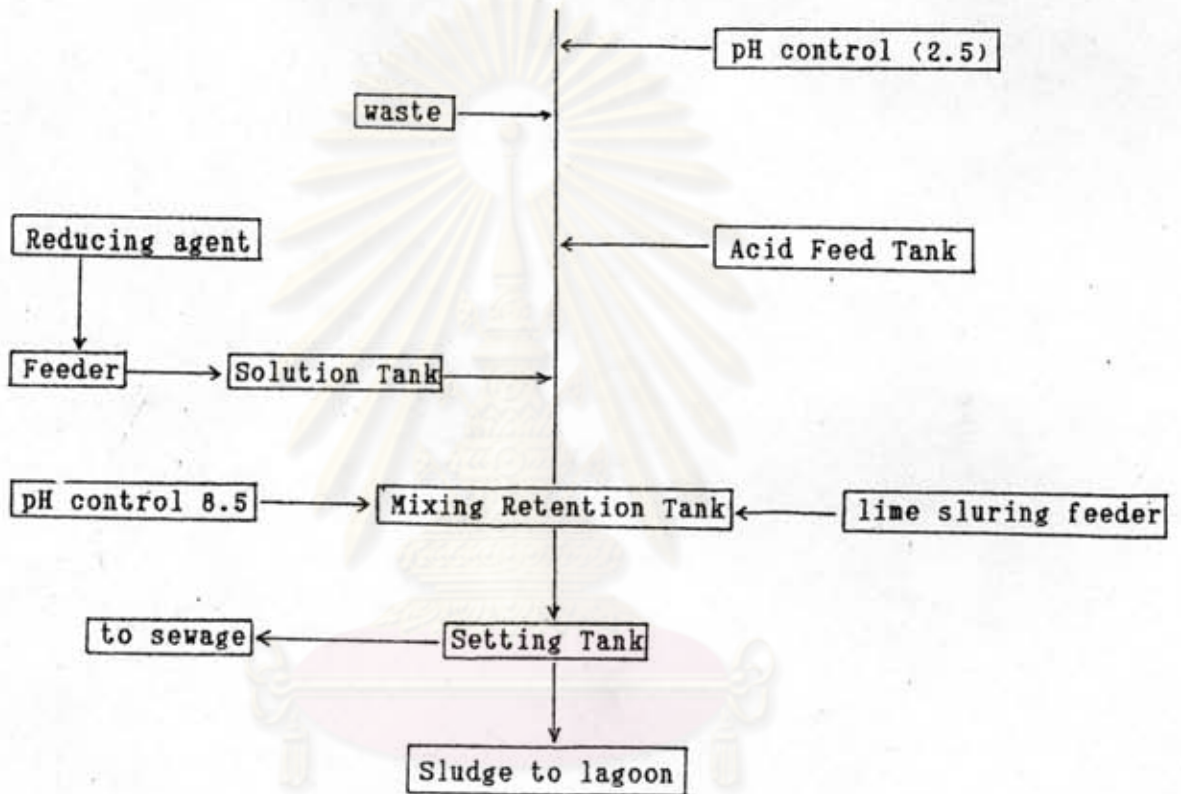
### 2. น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียม

โครเมียมในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของโครเมียม (+6) จะถูกรีดิวซ์เปลี่ยนเป็นโครเมียม (+3) ที่ไม่เป็นอันตราย โดยเติมโซเดียมเมตาซัลไฟต์ในน้ำเสียที่ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 2-2.5 ด้วยกรดกำมะถันปฏิกิริยาจะสมบูรณ์ที่ค่า redox potential -280 mV ดังสมการต่อไปนี้



หลังจากนั้นโครเมียม (+3) ที่ได้จะถูกทำให้ตกตะกอนในสภาพที่เป็นด่าง (pH 10)

ด้วยการเติมปูนขาว



รูปที่ 2.4 แผนผังของระบบกำจัดโลหะหนักสำหรับโรงงานกำหนดโดยกรมโรงงาน



### 3. น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักอื่นๆ นอกเหนือจากโครเมียมและไซยาไนด์

น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักอื่นๆ เช่น สังกะสี นิเกิล และทองแดง จะถูกบำบัดด้วยกระบวนการตกตะกอนโดยการปรับ pH ของน้ำเสียให้อยู่ในช่วงประมาณ 10 ด้วยปูนขาว นอกจากนี้อาจมีการเติมสารโพลีเอเลคโตรไลต์เพื่อช่วยในการตกตะกอน

แต่อย่างไรก็ตามโลหะหนักที่บำบัดด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะต้องนำไปฝังแบบ sanitary landfill ซึ่งจากการศึกษาพบว่า จังหวัดราชบุรีเป็นบริเวณที่มีคุณสมบัติทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมคือบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่เขา มีชั้นดินและหินแข็งที่สามารถรับน้ำหนักจากที่ฝังและไม่มีปัญหาของน้ำใต้ดินที่จะเกิดจากการฝังกากดังกล่าว

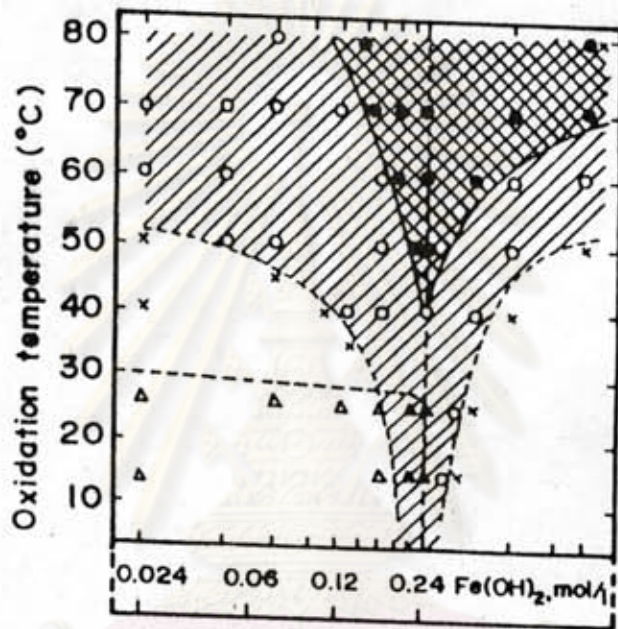
ที่กล่าวมานี้คือ กระบวนการกำจัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักที่ กรมโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรมได้ดำเนินการอยู่ อันที่จริงแล้ว ก็ยังมีเทคโนโลยีในการกำจัดโลหะหนักต่าง ๆ โดยใช้กระบวนการ ที่สามารถเปลี่ยนสภาพของสารพิษโลหะหนัก ให้กลายเป็นสภาพที่ไร้พิษ นอกจากนั้นยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก โดยไม่ต้องหาที่ฝังดิน อันอาจจะทำให้เกิดปัญหาทางสังคมกับประชาชนในท้องถิ่นตามมา สำหรับเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ใช้ได้ดีในประเทศญี่ปุ่น ได้แก่ กระบวนการเฟอร์ไรต์ สารโลหะหนักเมื่อผ่านกระบวนการเฟอร์ไรต์แล้ว จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทุติยภูมิ (secondary pollution) ตลอดจนปัญหาสังคมกับประชาชนในท้องถิ่น โครงการนี้สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากตะกอนเฟอร์ไรต์เป็นตะกอนที่มีความเสถียรสูง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางสารแม่เหล็กได้อีกด้วยจึงแก้ปัญหาในการหาที่ฝังกากตะกอนไปได้

### 2.3 การเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์

สุรภี โรจน์อารยานนท์ (2530) กล่าวจาก Kiyama (1973) Kiyama ได้เป็นผู้เริ่มศึกษาการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรต์โดยทำการศึกษาการเกิดสารแมกเนไต์ ( $Fe_3O_4$ ) จากการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเฟอร์รัสซัลเฟต จะได้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_2$ ) จากนั้นจึงทำการออกซิไดส์ต่อด้วยอากาศ โดยเงื่อนไขที่ใช้ทดลองพีเอช 2.6-12.0, อุณหภูมิ 10-80°C.



นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาคสมบัติของตะกอนที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องเอกเรย์ดิฟแฟรคชัน (x-ray diffraction) และอิเล็กตรอน ไมโครสโคปิก (electron microscopic) พบว่า ตะกอนที่ได้คือ  $Fe_3O_4$ ,  $\alpha-FeOOH$ ,  $\gamma-FeOOH$  โดยอาจจะเกิดเป็นสารเดี่ยวๆ หรือสารผสม โดยโอกาสที่จะเกิดสารดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการทดลอง



- :  $Fe_3O_4$ , X :  $\alpha-FeOOH$
- : A mixture of  $Fe_3O_4$  and  $\alpha-FeOOH$
- ▲ : A mixture of  $Fe_3O_4$ ,  $\alpha-FeOOH$  and  $\gamma-FeOOH$
- △ : A mixture of  $\alpha-FeOOH$  and  $\gamma-FeOOH$

รูปที่ 2.5 เงื่อนไขการออกซิไดซ์ของการเกิด  $Fe_3O_4$

จากรูปที่ 2.5 Kiyama (1973) ได้ปรับถึงอุณหภูมิและพีเอชที่จะเกิด  $Fe_3O_4$  ได้มากที่สุดคือ อุณหภูมิ 55 ถึง 75°ซ. และพีเอช 9 ถึง 11

Kiyama (1973) ทดลองผสมโลหะหนักที่เป็นไอวาเลนที่ปนกับเฟอร์รัสซัลเฟต ซึ่งโลหะหนักชนิดที่ทดลองได้แก่  $Mg^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$  และ  $Co^{2+}$  พบว่าจะได้ตะกอนที่เป็น ฟูวไรแมกเนติกมีสูตร  $M_xFe_{3-x}O_4$  และจากผลการทดลองนี้ยังสรุปต่ออีกว่าเงื่อนไขการเกิดสาร ฟูวไรแมกเนติก ซึ่งเป็นสารประกอบเฟอร์ไรท์ที่มีเงื่อนไขการเกิดคือ พีเอช และ อุณหภูมิ เช่นเดียวกับการเกิดสารแมกเนไตต์

สารประกอบเฟอร์ไรท์ที่เกิดจากการกำจัดโลหะหนักในสารละลายที่มีไอออนเหล็ก  $Fe^{2+}$  กับไอออนโลหะหนัก ปรับพีเอชเป็นค่างและออกซิไดส์ในเงื่อนไขที่เหมาะสม (พีเอช, อุณหภูมิ) ได้สารคอมเพล็กซ์ซึ่งเป็นตะกอนเฟอร์ไรท์ ขั้นตอนการเกิดในรูปที่ 2.6

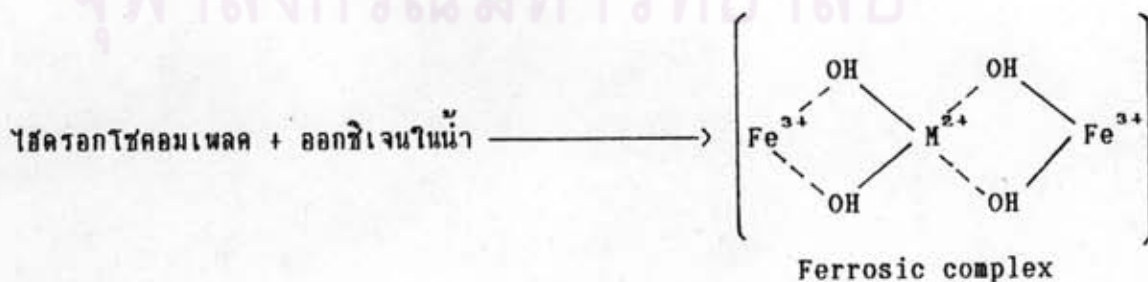
สุรภี วรรณอารยธรรม (2530) กล่าวจาก Hayashi (1975) ได้กล่าวถึงกลไกการเกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ที่คาดว่าจะจะเป็นไปได้มี 3 ขั้นตอนคือ

1. เมื่อผสมค่าในสารผสมที่มีไอออนเหล็ก  $Fe^{2+}$  กับไอออนโลหะหนัก  $M^{2+}$  ในสารละลายปรากฏตะกอนสีฟ้าปนขาวซึ่งเป็นพวกนอนเฟอร์โรแมกเนติก (nonferromagnetic) ในสารละลายนี้ ไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ (hydroxo complex) ของ  $Fe^{2+}$  และ  $M^{2+}$  จะถูกละลายได้บางส่วนโดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้

ไฮดรอกไซด์ของโลหะหนัก + ไฮดรอกไซด์ของเหล็ก(II) + น้ำ  $\longrightarrow$  ไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์

ส่วนของตะกอนนี้จะประกอบด้วยผลึกของสารที่มีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้าง  $CdI_2$  ได้แก่ MO (เช่น  $ZnO$ ,  $CuO$ ) ละลายอยู่ใน solid solution ของ  $Fe(OH)_2$ ,  $M(OH)_2$ , หรือ  $Fe_{2-x}M_x(OH)_2$  หรือไฮดรอกไซด์  $M^{2+}$

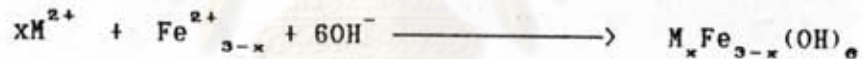
2. เมื่อผ่านแก๊สซึ่งมีออกซิเจนลงในสารละลายซึ่งมี  $M^{2+}$  และ  $Fe^{2+}$  ไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ ออกซิเจนจะละลายในสารละลาย เมื่อออกซิเจนละลายในน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์คอมเพล็กซ์ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมเกิดเป็นเฟอร์ริคคอมเพล็กซ์ ปฏิกิริยาเกิดดังนี้



3. เฟอโรสิดคอมเพล็กซ์จะถูกโพลิเมอไรซ์ (Polymerized) ด้วยค่าที่เกิดเป็นสารประกอบเฟอร์ไรท์



สำหรับกลไกที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายพอสังเขปได้ว่า เมื่อผสม  $\text{Fe}^{2+}$  และโลหะหนักอื่นที่ไม่ใช่เหล็กซึ่งเป็นไอวาเลนซ์ ( $\text{M}^{2+}$ ) ในสารละลายภายหลังที่ใส่ค่าปริมาณที่เหมาะสมจะเกิดสารผสมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีสีเขียวดังสมการต่อไปนี้



เมื่อออกไซด์ต่อภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม จะเกิดสารประกอบสีดำและมีลักษณะเป็นตะกอนหนัก และถูกดูดด้วยอำนาจแม่เหล็กได้ เรียกว่า เฟอร์ไรท์

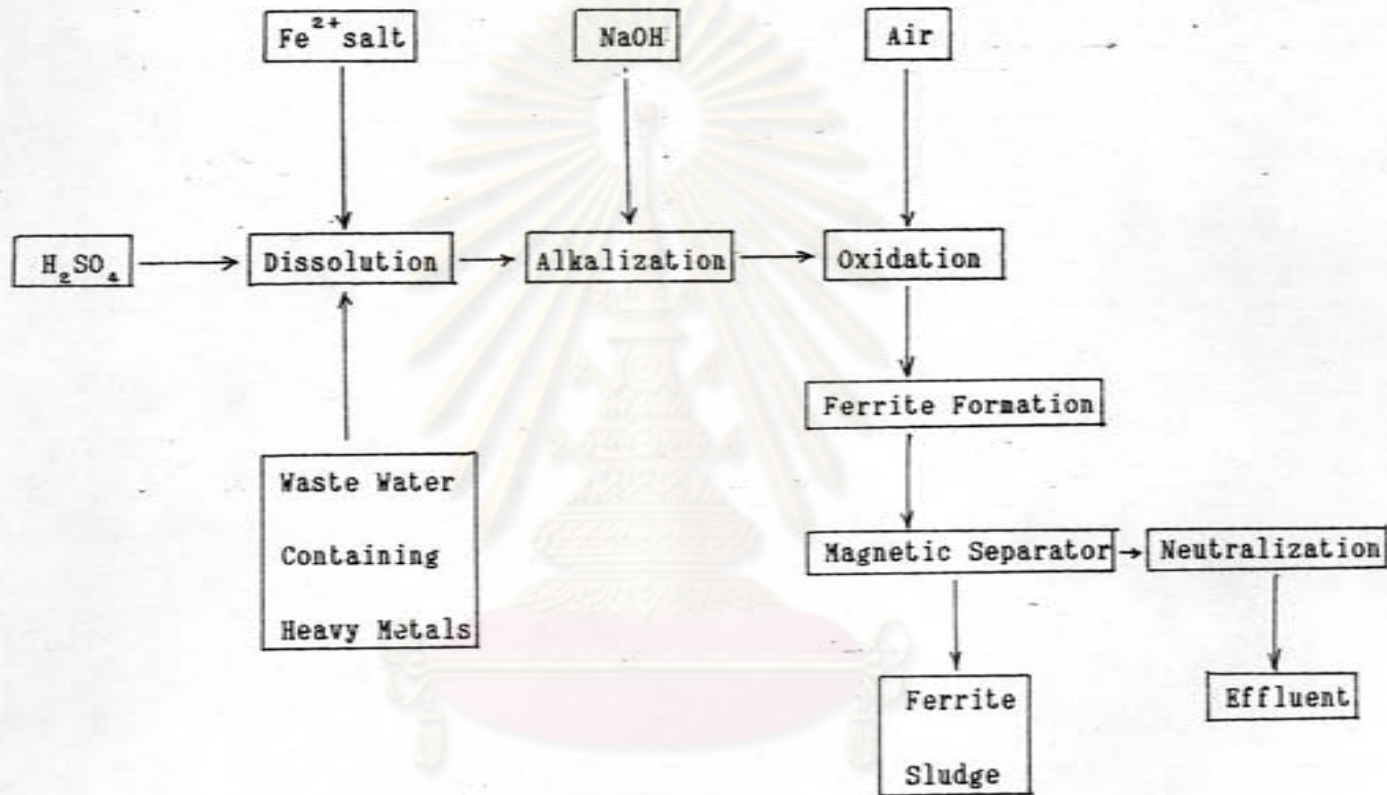


#### 2.4 คุณสมบัติเด่นของกระบวนการเฟอร์ไรท์

กระบวนการเฟอร์ไรท์ ได้ถูกนำไปใช้กำจัดโลหะหนักซึ่งมีในน้ำเสียหลาย ๆ แห่ง เนื่องจากมีลักษณะเด่นที่ดีกว่าวิธีอื่น ๆ (สุภวิ วรรณอารชานนท์, 2530)

1. สามารถกำจัดโลหะหนักที่ปนกันอยู่หลายชนิดในน้ำเสียได้พร้อม ๆ กัน ในการทดลองกำจัดด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์
2. ปริมาณของโลหะหนักจะลดลงได้มากเมื่อใช้กระบวนการนี้ กล่าวคือกระบวนการนี้ให้ประสิทธิภาพในการทดลองกำจัดโลหะหนักสูง





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงขั้นตอนทดลองกำจัดโลหะหนักโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์



3. ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ได้จะมีสีดำ, หนัก และไม่ละลายในน้ำ สามารถกรองแยกจากสารละลายได้ง่าย อีกทั้งยังสามารถแยกออกได้ง่ายจากสารละลายด้วยเครื่องแยกแบบแม่เหล็ก (Magnetic Separator)

4. ของแข็งที่แขวนลอย (Suspended Solid) สามารถจะถูกกำจัดออกได้ด้วยในขณะเดียวกันกับการกำจัดโลหะหนัก

5. สาร  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้กำจัดโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรท์ เป็นสารที่มีราคาถูก และเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

6. ตะกอนเฟอร์ไรท์ที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้อีก โดยอาจจะใช้เป็นไมโครเวฟแอบซอร์เบอร์, วัสดุที่ใช้ในการสื่อสาร เป็นต้น

## 2.5 การตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรภี ทรจน์อารยานนท์ (2530) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย โดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ที่ พีเอช 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในขณะที่เงื่อนไขที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม คือ ที่พีเอช 9 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 55 ถึง 70 องศาเซลเซียส ในกรณีที่ต้องการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมพร้อมๆ กัน เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ พีเอช 9 อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโมลของ  $\text{Pb}^{2+}/\text{Iron}_{0.001}$  และ  $\text{Cd}^{2+}/\text{Iron}_{0.001}$  ในสารละลายตั้งต้น เป็น  $7.45 \times 10^{-3}$  และ  $13.73 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ

Nakashima (1977) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้สารละลาย  $\text{Fe}^{3+}-\text{Fe}^{2+}$  ( $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = 2$ ) ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 6-12 เพื่อให้เกิดเฟอร์ไรท์ และแยกตะกอนออกจากส่วนใสด้วยแม่เหล็ก โดยทำการทดลองกับน้ำเสีย (pH 7) ในอัตรา 1 L/min เติม 10%  $\text{FeCl}_2$  ในอัตรา 3.5  $\text{cm}^3/\text{min}$  และ 10%  $\text{FeCl}_3$  ในอัตรา 9.6  $\text{cm}^3/\text{min}$  และเติม 30% NaOH ในอัตรา 50  $\text{cm}^3/\text{min}$  เพื่อปรับ pH เป็น 11 ได้ตะกอนเฟอร์ไรท์ 6000 ppm (มีขนาดอนุภาค 100  $\text{A}^\circ$ ) ความเข้มข้นของ Zn, Mn และ Cu ก่อนบำบัดมีค่า 1000 ppm เมื่อบำบัดแล้ววัดได้ 0.01, 0.06, 0.08 ตามลำดับ

Goto, Nakura และ Okazuki (1978) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารละลายเกลือเฟอร์ริกและเฟอร์รัสในสารละลายต่าง ผลการศึกษาได้ active ferrite เฟอร์ไรท์ที่ได้มีคุณสมบัติแม่เหล็กสูง จับโลหะหนักได้ดี ทำการทดลองโดยใช้  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  10 Kg ละลายในน้ำ 100 ลิตร และ  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  10 Kg ละลายในน้ำ 100 ลิตร นำสารละลายมาผสมกัน ใช้ 10% NaOH ปรับ pH 8 เกิดตะกอนเฟอร์ไรท์ นำตะกอนมาล้างด้วยน้ำ ตามด้วยกรดไฮโดรคลอริกเจือจาง (pH 1.5) ล้างด้วยน้ำอีกครั้ง ได้ตะกอน active ferrite (สีดำ) 4 Kg เมื่อทำการทดลองกับน้ำเสียที่ประกอบด้วย  $\text{Cr}^{6+}$  70 ppm ปริมาตร 1500 ลิตร ได้เฟอร์ไรท์ 1 Kg สารละลายส่วนใส่หลังบำบัด (ปริมาตร 1400 ลิตร) ประกอบด้วย  $\text{Cr}^{6+}$  0.1 ppm

Tojo และ Nagata (1978) ศึกษาการใช้น้ำจับฝุ่นที่มีโลหะหนัก และบำบัดโดยใช้กระบวนการเฟอร์ไรท์ เช่นบำบัดสารละลายฝุ่น 10% ในน้ำ มีโลหะหนัก Cd 20.8, Zn 2400, Pb 4.28, Mn 7.80, Fe 0.05, Cu 0.04, Hg <0.0005 ppm หลังจากผ่านกระบวนการเฟอร์ไรท์ แล้วนำส่วนใส่ไปวิเคราะห์พบ Cd 0.02, Zn 0.015 ppm และไม่พบโลหะหนักตัวอื่น

Tsai และคณะ (1980) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม, สังกะสี, นิกเกิล, โคบอลต์ และทองแดง ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยใช้  $\text{FeSO}_4$  กำจัด Cr, Zn, Ni, Co, Cu ในน้ำทั้งจากการชะเคลือบโลหะและจากการทำปฏิกิริยา โดยเป่าอากาศที่อุณหภูมิ 60-70°C ได้สไปเนลเฟอร์ไรท์ ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) อัตราการเป่าอากาศมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ  $\text{Cr}^{6+}$  ในน้ำเสียดังนี้  $\text{Cr}^{6+}$  ที่มีความเข้มข้น 10, 50, 100, 200 ppm ควรเป่าอากาศในอัตรา 0.6-2.4, 1-2.8, 1.2-6, 2.4-12.8 ลิตรอากาศ/ลิตรน้ำเสีย ตามลำดับ

Nippon Electric Co., Ltd. (1981) ทดลองกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ โดยทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $\text{Fe}^{2+}$  ด้วยอากาศ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำเสีย 1 ลิตร ประกอบด้วย  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  อย่างละ 200 ppm ผสมกับ 0.1 โมล  $\text{FeSO}_4$  ปรับ pH เป็น 9.5 โดยใช้ NaOH เป่าอากาศ 3 บรรยากาศ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ตะกอนเฟอร์ไรท์



Kondo; Nakashima; Hirasava (1982) ศึกษาการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยทำการออกซิไดซ์  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ใน pH ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  การหาอัตราการเกิด  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  สามารถคำนวณจาก  $\text{Fe}^{2+}$  ในสารละลายและ Fe-ion ที่แขวนลอยในสารละลาย pH ที่เหมาะสมในการเกิด  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  คือ pH 11.5-12.5 ที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  หรือต่ำกว่า  $40^\circ\text{C}$  และ pH 11.5-13.0 ที่อุณหภูมิ  $40^\circ\text{C}$  ที่ pH ค่าเกิด  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ได้เร็วกว่าที่ pH สูง

Nippon Electric Co., Ltd. (1984) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์และแยกตะกอนเฟอร์ไรต์ออกจากน้ำทิ้ง ในการศึกษารังนี้เติม  $\text{FeSO}_4$  ลงในน้ำเสียให้มีความเข้มข้นของ  $\text{FeSO}_4$  เป็น 0.1 โมล/ลิตร น้ำเสียที่บำบัดประกอบด้วยโลหะหนักต่างๆ เช่น Cu 160, Ni 60, Mn 30, Pb 20, As 10 ppm ปรับ pH ให้เป็น 12 ด้วย NaOH ทำการเป่าอากาศที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำการแยกตะกอนเฟอร์ไรต์ออกจากส่วนใส นำส่วนใสไปวิเคราะห์หาโลหะหนัก พบโลหะหนักดังนี้ Cu 0.5, Ni 0.3, Mn 0.2, Pb 0.15, As 0.01 ppm

Kondo และ Suzuki (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีปรอทโดยใช้กระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยใช้การเป่าอากาศที่ pH 10-12 ในการศึกษารังนี้ใช้  $\text{FeSO}_4$  0.05 mol/l ในน้ำเสียที่มี Hg 14.9 ppm ปริมาตร 1 ลิตร การสร้างเฟอร์ไรต์เกิดที่ pH 12  $60^\circ\text{C}$  อัตราการเป่าอากาศ 0.5 ลิตร/นาที หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา นำส่วนใสไปหา Hg พบว่ามี Hg อยู่ 3.7 ppb ถ้าเติม 1 mg/L ascorbic acid พบว่าส่วนใสมี Hg อยู่ 0.29 ppb

Sano และ Nakama (1986) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วยโลหะหนักโดยใช้เกลือเฟอร์รัสที่มีสัดส่วน 2-100 เท่า เมื่อเทียบกับโมลโลหะหนักทุกตัวในน้ำเสีย ใช้สารละลายต่างปรับให้ได้ pH 8-12 ทำการออกซิไดซ์เฟอร์รัสไอออนต่างๆ จะได้ตะกอนแม่เหล็ก ในการศึกษารังนี้ใช้น้ำเสีย 2 ลิตร ที่มี  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  อย่างละ 50 ppm ผสมกับ  $\text{FeSO}_4$  0.2 โมล ปรับ pH 10 ทำการกวน 4 ชั่วโมง พร้อมกับการเติมออกซิเจนในอัตรา 17 ml/min ทำการแยกตะกอนเฟอร์ไรต์ออกมาและนำส่วนใสไปวิเคราะห์หาโลหะหนัก พบ Cu 0.05, Zn 0.03, Pb 0.1 ppm

Akasaki (1987) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานคอนกรีต ประกอบด้วย  $\text{Cr}^{6+}$  และ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  โดยใช้  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ในการบำบัดไม่ต้องปรับ pH เนื่องจากในน้ำทิ้งมีสารละลายอิมิตัว  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  การศึกษาครั้งนี้ใช้  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  400 ppm บำบัด  $\text{Cr}^{6+}$  5 ppm ตกตะกอนเฟอร์ไรต์ แล้วนำส่วนใสไปวิเคราะห์ พบ  $\text{Cr} < 0.1$  ppm (สามารถบำบัดได้ >98%)

Wen, Li และ Liu (1987) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะและน้ำจาก Cation-exchange โดยใช้วิธี Ferrosipinel น้ำที่บำบัดแล้วมีสารละลายโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐาน ทำการศึกษาโดยละลายผงเหล็กลงใน acid cation exchanger จะได้  $\text{Fe}^{2+}$  คลอรีนจะเปลี่ยน  $\text{Fe}^{2+}$  เป็น  $\text{Fe}^{3+}$  เติมสารละลาย  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  2:1 ลงในน้ำเสียจากการชุบเคลือบโลหะหนัก โลหะหนักในน้ำเสียดตกตะกอนเป็นตะกอนเฟอร์ไรต์สไปเนล (มีสีดำ) และตกตะกอนได้ที่ pH 7-9 ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและใช้พลังงานน้อย

Chen และคณะ (1988) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ประกอบด้วย  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) ปรับ pH ของน้ำทิ้งให้อยู่ในช่วง 1.5-2.5 และผสมผงเหล็กให้มี pH >5.4 (2) ออกซิโดซ์กับ O หรืออากาศในภาชนะปิดเป็นเวลา 3-10 นาที แล้วเติมสารละลายด่างเพื่อเพิ่ม pH ให้อยู่ในช่วง 8-9 (3) ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา >10 นาที แล้วกรองส่วนใส การทดลองครั้งนี้ทำกับน้ำเสียที่มี  $\text{Cr}^{6+}$  50 mg/l ใช้  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ปรับ pH 2.4 ผสมกับผงเหล็กนาน 10 นาที ทำให้ pH เพิ่มขึ้นเป็น 5.4 เป่าอากาศ 3-10 นาที ใช้ 10% NaOH ปรับ pH 8-9 กรองส่วนใสไปวิเคราะห์ พบว่าไม่มี  $\text{Cr}^{6+}$  และมี  $\text{Cr}^{3+}$  0.006 mg/l

Kim, Byung Kwang. และคณะ (1988) ศึกษาการตกตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียที่มี  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$  ในกระบวนการเฟอร์ไรต์โดยใช้ X-ray diffraction พบการตกตะกอนที่มีโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรต์จากการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักความเข้มข้นต่ำๆ ทดลองใช้สารละลาย  $\text{FeSO}_4$  0.1 mol/l บำบัดน้ำทิ้งที่มี  $\text{Ni}^{2+}$  ต่ำกว่า 3000 ppm ได้โครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรต์ เมื่อสัดส่วน Ni/Fe = 0.51 ได้  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  อย่างเดียว ถ้าสัดส่วนมากกว่า 0.51 เกิด  $\text{Na}_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2$  กับ  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$



ในการบำบัดน้ำเสียที่มี  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  ความเข้มข้นสูงสุดของ  $\text{Cr}^{3+}$  และ  $\text{Cr}^{6+}$  ที่ได้ตะกอนเฟอร์ไรท์คือ 1500 และ 1000 ppm สัดส่วน  $\text{Cr}/\text{Fe} = 0.29$  และ  $0.91$  ตามลำดับ สไปเนลเฟอร์ไรท์ที่ได้มีสูตร  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_{1.33}\text{Cr}^{3+}_{0.67}\text{O}_4$  และ  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_{1.5}\text{Cr}^{3+}_{0.5}\text{O}_4$  น้ำเสียที่มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{3+}$  ก่อนบำบัด 1500-4000 ppm เมื่อบำบัดแล้วพบ  $\text{Cr}^{3+}$  ในตะกอนเฟอร์ไรท์ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์โดย X-ray diffraction น้ำเสียที่มีความเข้มข้น  $\text{Cr}^{6+}$  ก่อนบำบัด 1000-4000 ppm เมื่อบำบัดแล้วได้ตะกอนสไปเนลเฟอร์ไรท์พบ  $\text{Cr}^{6+}$  ที่เหลือจากการจับกับ Fe ในโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรท์ ปรากฏอยู่ในสารละลายส่วนใส

Nugmanov, Kovalenko และ Firsova (1988) ศึกษาปริมาณการใช้ด่างในปฏิกิริยาออกซิเดชันเหล็ก  $\text{Fe}^{2+}$  เพื่อตกตะกอนโครเมียม  $\text{Cr}^{6+}$  จากการศึกษาพบว่าปริมาณการใช้ NaOH มีความสัมพันธ์กับการกำจัด  $\text{Cr}^{6+}$  ออกจากน้ำทั้งจากการขุ่นเคลือบโลหะหนัก เมื่อเพิ่ม NaOH พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ไปเป็น  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นสไปเนลเฟอร์ไรท์

Nakazawa, Sato และ Hasebe (1989) ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการบำบัด  $\text{As}^{3+}$  หรือ  $\text{As}^{5+}$  ระหว่างกระบวนการเฟอร์ไรท์  $\text{FeSO}_4$  กับวิธีตกตะกอนโดยใช้สารละลาย  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  และให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่ pH และอุณหภูมิคงที่ แล้วนำผลมาเปรียบเทียบกัน พบว่ากระบวนการเฟอร์ไรท์บำบัด  $\text{As}^{3+}$  ที่  $90^\circ\text{C}$  ได้ดีกว่าวิธีตกตะกอนในส่วนน้ำมี  $\text{Fe-ion} < 0.05 \text{ mg/l}$  แมกนีไซต์ที่เกิดจากกระบวนการเฟอร์ไรท์มี As ปนอยู่ด้วย สามารถแยกโดยวิธีผ่านรางแม่เหล็กในอัตรา 200 ลิตรต่อชั่วโมง

Shin, Cho และ Oh (1989) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก โดยศึกษาการเกิด Ferrosferric oxide ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันสารละลาย Ferrous hydroxide ( $\text{FeOH}_2$ ) ในน้ำเสียที่มีโลหะหนักผลการศึกษาพบว่าปริมาณ NaOH ที่เติมลงในปฏิกิริยามีความสัมพันธ์กับการเกิด  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมคือ  $R = 2\text{NaOH}/\text{FeSO}_4 = 1$  เมื่อเพิ่มค่า R พบว่า  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เกิดน้อยลง สภาวะที่เหมาะสมในการเกิด  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  คือที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เวลาในการออกซิเดชันสารละลาย ( $\text{FeOH}_2$ ) คือ 60 นาที อัตราการเป่าอากาศ 1 ลิตร/นาที ถ้าอัตราการเป่าอากาศมากกว่า 1 ลิตร/นาที ทำให้  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  เกิดได้น้อยลง เมื่อนำ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ไปทดสอบสมบัติความเป็นแม่เหล็กโดยใช้ X-ray diffraction พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับ X-ray main peak intensity



Shin, Cho และ Oh (1989) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโดยศึกษาการเกิด Copper ferrite และคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ Copper ferrite การศึกษาครั้งนี้เป็นการดึง Cu-ion ออกจากน้ำเสีย สภาวะในการเกิด Cu-ferrite คือ  $60^{\circ}\text{C}$  เวลาในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน 70 นาที ค่าความเป็นแม่เหล็กของภาคตะกอนเฟอร์ไรต์มีค่าลดลงเมื่อค่า R เพิ่มขึ้น ค่า  $R = 2(\text{OH}^-)/(\text{SO}_4^{2-})$  ค่า R ในช่วง 1.0-1.5 ได้ผลิตภัณฑ์ CuO อัตราส่วนไอออน  $\text{Cu}^{2+}/\text{Fe}_{0.066}$  ในสารละลายเริ่มต้นที่เหมาะสม ควรมีค่าน้อยกว่า 0.2 ทำให้ Cu-ion ในสารละลายสามารถเข้าไปอยู่ในโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรต์ได้หมด ถ้าอัตราส่วนไอออน  $\text{Cu}^{2+}/\text{Fe}_{0.066}$  ในสารละลายเริ่มต้นมีค่าสูงกว่า 0.2 พบว่า Cu-ion ในสารละลายที่มากเกินไปจะถูกออกซิไดซ์เป็น CuO

Zonglei, Wuran และ Fangzhi (1989) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียมพบว่ากระบวนการเฟอร์ไรต์เป็นวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและไม่ก่อให้เกิด secondary pollution กับสิ่งแวดล้อม สภาวะที่ใช้คือควบคุม pH ที่ 4 เพื่อให้  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ทำปฏิกิริยากับ  $\text{Fe}^{2+}$  และควบคุม pH ที่ 7 เพื่อตกตะกอน  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  ในการศึกษาครั้งนี้ใช้  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  16 เท่าของความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายเริ่มต้น

Kim, Ji Hwan; Kang และ Oh (1990) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโดยใช้ออกซิเจนทำปฏิกิริยาออกซิเดชันโคบอลต์ไฮดรอกไซด์และนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในสารละลาย ปฏิกิริยาออกซิเดชัน Co-Ni hydroxide มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน Ni/Co, ค่า  $R = 2(\text{OH}^-)/(\text{SO}_4^{2-})$  และอุณหภูมิ เมื่อทดลองเพิ่มค่า R ผลคือ เวลาในการทำปฏิกิริยาและขนาดอนุภาคผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ Co-Ni ferrite เมื่อทดลองเพิ่มค่า R และเพิ่มอุณหภูมิพบว่า Co เข้าไปอยู่ในโครงสร้างสไปเนลได้มากขึ้นในขณะที่ Ni เข้าไปอยู่ในโครงสร้างได้น้อยลง สูตรของสารประกอบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันคือ  $\text{Co}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_{3-(x+y)}\text{O}_4$  ค่า  $x+y$  อยู่ในช่วง 0.6-0.7 เมื่อทำการทดลองโดยใช้เงื่อนไขดังนี้ ค่า  $R = 1.5$ , อุณหภูมิ  $70^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{Co}^{2+} + \text{Ni}^{2+}/\text{Fe}^{2+} = 0.5$ ,  $\text{Ni}^{2+}/\text{Co}^{2+} = 2.0$  ในสารละลายเริ่มต้น ผลิตภัณฑ์หลังสิ้นสุดปฏิกิริยามีสูตรเป็น  $\text{Co}_{0.29}\text{Ni}_{0.29}\text{Fe}_{2.41}\text{O}_4$  แสดงว่า Co และ Ni เข้าไปอยู่ในโครงสร้างสไปเนลเฟอร์ไรต์ในปริมาณเท่ากัน

Kim, Tae Hoon; Kang และ Oh (1990) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  โดยศึกษาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยาออกซิเดชันมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วน  $\text{Cu}/\text{Fe}$ , ค่า  $R$  ( $2\text{OH}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ) และอุณหภูมิ นั่นคือศึกษาจากอัตราส่วนโมล  $\text{Cu}/\text{Fe}$  เพิ่มขึ้น, pH เริ่มต้นปฏิกิริยาลดลง, pH สิ้นสุดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ในการศึกษาดังนี้ใช้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันติดตามปฏิกิริยาออกซิเดชัน ผลการศึกษาที่อุณหภูมิ  $50-80^\circ$ , ค่า  $R = 1.0-1.4$  ไม่เกิด  $\text{Cu-ferrite}$  สามารถอธิบายได้คือ ช่วงแรกเป็นการออกซิไดซ์  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ไปเป็น  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ช่วงหลังเป็นการออกซิไดซ์  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ไปเป็น  $\text{CuO}$  ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  และ  $\text{CuO}$  ถ้าทำการทดลองที่อุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$ ,  $\text{Cu}/\text{Fe} = 0.5$ , และ  $R = 1.1$  ได้ผลิตภัณฑ์  $\text{CuO}$  และ  $\text{Cu-ferrite}$  สารประกอบเฟอร์ไรต์ที่มีสูตรเป็น  $\text{Cu}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$  และมีความเป็นแม่เหล็ก  $28 \text{ emu/g}$

Lin, Zhao และ Yuan (1990) ศึกษาปฏิกิริยาในการบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม พบว่าความเข้มข้นของ  $\text{Cr}^{6+}$  ขึ้นกับ pH กล่าวคือในตัวกลางที่เป็นด่าง  $\text{Cr}^{6+}$  อยู่ในรูป  $\text{CrO}_4^{2-}$  ในการตกตะกอน  $\text{Cr}^{6+}$  ควรทำให้ตัวกลางมี pH มากกว่า 8 เพราะว่า  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  มีความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันสูงกว่า  $\text{CrO}_4^{2-}$  ปฏิกิริยาเปลี่ยน  $\text{Cr}^{6+}$  ไปเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  เกิดในตัวกลางที่เป็นกรดซึ่งพบสารหลายตัวสามารถเปลี่ยน  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  ไปเป็น  $\text{Cr}^{3+}$  ในการศึกษาดังนี้ใช้  $\text{Fe}^{2+}$  ตกตะกอนกับ  $\text{Cr}^{3+}$  ที่ pH 6.7 ซึ่งเป็น pH ที่เหมาะสมคือสามารถกำจัด  $\text{Cr}^{3+}$  ออกจากน้ำเสียได้มากที่สุด

Kitamura, Honda และ Takasaki (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีอออนโลหะ ด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยศึกษาความเข้มข้นของฟอสเฟตอออนต่อการเกิดเฟอร์ไรต์, ศึกษาค่าความเป็นแม่เหล็ก ( $\sigma$ ) ของกากตะกอนเฟอร์ไรต์จากน้ำเสียที่ประกอบด้วยอออนโลหะหนักและผลจากความเข้มข้นของฟอสเฟตในความเข้มข้นต่างๆ กัน ( $f$ ) ในน้ำเสียดังกล่าวปฏิกิริยาออกซิเดชันในกระบวนการเฟอร์ไรต์ กราฟ ( $\sigma-f$ ) ของโลหะหนักหลายชนิดและฟอสเฟตอออนพบว่าลักษณะเหมือนกัน กราฟที่ได้แบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกมี slope 1.0 ช่วงหลังมี slope 2.6 ค่าความเป็นแม่เหล็กมีค่า  $= 92 \text{ emu/g Fe}_3\text{O}_4$  ค่า  $\sigma$  เพิ่มขึ้นเมื่อค่า  $f$  เพิ่มขึ้น การที่ค่า  $\sigma$  ลดลงเมื่อ  $f$  ลดลงเกิดจากการรวมตัวระหว่างฟอสเฟตอออนและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเฟอร์ไรต์ ถ้าค่า  $\sigma = 60 \text{ emu/g}$  สามารถแยกตะกอนออกจากส่วนใสโดยใช้แม่เหล็กได้ง่าย กากตะกอนเฟอร์ไรต์ที่แยกออกมา สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางอุตสาหกรรม



Tamura, Katsura และคณะ (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ สามารถอธิบายกระบวนการเฟอร์ไรต์ได้ดังนี้ อีออนโลหะหนักถูกจับอยู่ที่โครงสร้างผลึกรูปร่างสไปเนล ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน Fe(II) การเกิดเฟอร์ไรต์มี 2 วิธีคือ วิธีที่หนึ่งเกิดตะกอนสีเขียว (pH 7-10) วิธีที่สองเกิด FeO(OH) (pH 10.5-11) กระบวนการเฟอร์ไรต์เหมาะในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ, น้ำเสียจากการชุบโลหะ, น้ำชำระล้างเหมืองแร่ หากตะกอนเฟอร์ไรต์ที่ได้มีความเป็นแม่เหล็กสูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรม

Tamura, Tu และคณะ (1991) ศึกษาความเสถียรของ  $Fe_3O_4$  ที่เคลือบบนอีออนโลหะหนักในกระบวนการเฟอร์ไรต์ ปฏิกิริยาการเกิดเฟอร์ไรต์ในสารละลายเกิดจากการจับอีออนโลหะหนักและการออกซิไดซ์อีออนเหล็ก(II) ที่อยู่รอบๆ อีออนโลหะหนักเกิดเป็นอนุภาคเฟอร์ไรต์ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาได้  $Fe_3O_4$  เคลือบอยู่บนอนุภาคโลหะหนัก การเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ (1) การเติมสารละลายเหล็ก ลงในน้ำเสีย (2) การเป่าอากาศเพื่อให้เกิดการออกซิเดชัน ได้สารประกอบ  $Fe_3O_4$  เคลือบอยู่บนอีออนโลหะหนัก วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่ประกอบด้วย อีออนฟลูออไรด์ หรือดินที่มีอีออนแคลเซียม หลังบำบัดแล้วได้เฟอร์ไรต์ที่เสถียรมาก เนื่องจากในสภาพธรรมชาติ ไม่สามารถชะล้างอีออนโลหะหนักออกมาจากตะกอนเฟอร์ไรต์

Topkin และคณะ (1991) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักโดยกระบวนการเฟอร์ไรต์ พบว่าสามารถกำจัด  $Cr^{6+}$ , Cd และ Zn ในน้ำทิ้งจากการชุบเคลือบโลหะหนักด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารผสม  $FeSO_4-FeCl_3$  หรือ  $Fe(OH)_2$  การใช้  $Fe(OH)_2$  สามารถบำบัด  $Cr^{6+}$  ได้ดีกว่าการใช้  $FeSO_4-FeCl_3$  หากตะกอนที่ได้มีโครงสร้างเป็นสไปเนลเฟอร์ไรต์ และมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็ก สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงวิศวกรรม