บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย

น้ำเสียคือ น้ำที่มีสิ่งเจือปนอยู่ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพในการนำไปใช้อุปโภคบริโภค หากปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติย่อมทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำเสียหายได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

น้ำเสียที่เป็นอันตราย (hazardous wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารเคมีต่างๆ ทั้งจากงานทางด้านเคมีและชีวภาพเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยสารเคมีบางประเภทหากทิ้งรวมกับสารเคมีประเภทอื่นอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ โดยทั่วไปสามารถแยกประเภทของเสียที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้เป็นประเภทต่างๆ ได้แก่ ของเสียที่เป็นกรด ของเสียที่เป็นเบส ของเสียที่เป็นเกลือ ของเสียที่เป็นสารไวไฟ ของเสียที่เป็นสารเฮโลเจน ของเสียที่เป็นของเหลวอินทรีย์ที่ประกอบด้วยน้ำ ของเสียประเภทออกซิไดซ์ซิงเอเจนต์ ของเสียประเภทรีดิวซ์ซิงเอเจนต์ ของเสียที่เป็นไอออนของโลหะหนักอื่นๆ และของเสียที่มีจุลินทรีย์เป็นต้น (ศูนย์การจัดการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมความปลอดภัยและอาชีวอนามัย, 2546)

น้ำเสียประเภทนี้ควรแยกเก็บรวบรวม ติดฉลากหรือแสดงรายละเอียดต่างๆ โดยมีรายละเอียดสำคัญต่างๆ ได้แก่ ประเภทของน้ำเสีย ความเป็นอันตรายของน้ำเสีย วันที่เริ่มและสิ้นสุดการบรรจุน้ำเสียในภาชนะ ชื่อบุคคลหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบ เป็นต้น โดยรวบรวมลงในภาชนะรองรับที่เหมาะสม ได้แก่ ถังโพลีเอทิลีน เป็นต้น สำหรับเตรียมนำไปบำบัดและกำจัด ดังนั้นการจัดแยกน้ำเสียภายในห้องปฏิบัติการออกเป็นประเภทต่างๆ จึงเป็นสิ่งจำเป็น ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียของเสียแต่ละประเภทซึ่งแตกต่างกัน ถ้าหากขาดการจัดการที่เหมาะสมแล้ว ย่อมเกิดปัญหาที่ทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ สัตว์ พืช หรือสิ่งแวดล้อม (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้ 4 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการทางกายภาพ เคมี ชีววิทยา และฟิสิกส์เคมี งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีด้วยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นจึงขอกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับโลหะทองแดงและการกำจัดโลหะทองแดงด้วยกระบวนการทางเคมี

2.2 ทองแดง

ทองแดงจัดเป็นโลหะที่มีความสำคัญซึ่งนำมาใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเลคทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ในครัวเรือน อุปกรณ์ทำความเย็น และอุตสาหกรรมการผลิตทองเหลือง เป็นต้น ซึ่งปริมาณการใช้ทองแดงในประเทศไทยมากเป็นอันดับสามรองจากเหล็กและอะลูมิเนียม (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2556) ทองแดงจัดเป็นโลหะหนักที่คงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อม และมีความเป็นพิษแม้มีปริมาณน้อย

รูปที่ 2.1 โลหะทองแดง (สารานุกรมเสรี, 2556)

2.3 วิธีการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะทองแดงปนเปื้อนอยู่นั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาเลือกใช้วิธีการใดขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีบำบัดได้ดังนี้

2.3.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี เป็นกระบวนการกำจัดทองแดงโดยเติมสารเคมี ได้แก่ ไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ ลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับไอออนทองแดงได้สารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์หรือโลหะซัลไฟด์ในช่วงพีเอชที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าการละลายต่ำเกิดตะกอนแยกออกจากน้ำทิ้ง เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันเพราะเป็นวิธีที่ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่สูง (Huisman *et al.*, 2006) แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถนำมาใช้การกำจัดไอออนทองแดงที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนได้ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน หรือซัลไฟด์ไอออนไม่สามารถแทนที่ลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนได้ เป็นไปตามอนุกรมสเปกโทรเคมี (พดารัตน์, 2558)

2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกำจัดทองแดงโดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดถูกดูดซับโดยเรซินที่มีประจุบวก เรียกว่า cation exchange resin ไม่เท่ากัน ถ้าเรซินเป็นกรดแก่จะมีหมู่ฟังก์ชันนัลในรูปของ sulfonic acid ($RSO_3^-H^+$) (ปฏิกิริยาที่ 2.1) ถ้าเป็นกรดอ่อนจะมีหมู่ฟังก์ชันนัลในรูปของ carboxylic acid (RCOOH) (ปฏิกิริยาที่ 2.2)

$$n\ R_ZSO_3^-H^+ + Cu^{2+} \rightleftharpoons (R_ZSO_3)_nCu + nH^+ \quad (2.1)$$

$$n\ R_ZCO_2^-H^+ + Cu^{2+} \rightleftharpoons (R_ZCO_2)_nCu + nH^+ \quad (2.2)$$

โดย R_Z = resin

แต่เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนทองแดงมีความเสถียรค่อนข้างสูง ดังนั้นเรซินที่ใช้มักจะต้องมีการเคลือบด้วยลิแกนด์ที่มีความสามารถในการจับกับไอออนทองแดงได้ดีกว่าลิแกนด์ที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อน ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีนเททระแอซิเตท (EDTA) เป็นต้น นอกจากนี้หลังการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วต้องใช้ตัวทำ-

ละลายเพื่อชะละลายไอออนทองแดงที่อยู่ในคอลัมน์ แล้วจึงกำจัดไอออนทองแดงด้วยวิธีการอื่นต่อไป เช่น เทคนิคเคมีไฟฟ้า เป็นต้น (Sultan, 2004)

2.3.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นการกำจัดทองแดงโดยไอออนทองแดงถูกจับไว้ในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ซึ่งมีรูพรุนมาก เป็นการเคลื่อนย้ายไอออนทองแดงไปเกาะติดอยู่บนผิวของตัวดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดเล็กของถ่านกัมมันต์ ทำให้ไอออนทองแดงไม่สามารถแพร่เข้า-ออกไปได้ง่าย วิธีนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะทองแดงได้สูง เป็นวิธีที่ง่าย แต่มีข้อจำกัดเนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูง และมีค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Revathi *et al*., 2012)

2.3.4 รีเวอร์สออสโมซีส เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยใช้แรงดันอัดน้ำเสียผ่านเยื่อ Semi-permeable membrane จึงได้น้ำที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยพบว่าวิธีรีเวอร์ส-ออสโมซีสสามารถบำบัดทองแดงที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ลดลงเหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 95 แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากต้องใช้พลังงานมาก และการอุดตันของเยื่อ Semi-permeable membrane จึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียขาเข้า (Zhang *et al*., 2009)

2.3.5 การระเหย เป็นการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้ความร้อนสูงในการระเหยน้ำออกไปกลายเป็นกากตะกอนทำให้ลดปริมาณของเสีย แต่เนื่องจากวิธีดังกล่าวต้องใช้พลังงานมาก นอกจากนี้ยังอาจเกิดไอของโลหะทองแดงทำให้เกิดความเป็นพิษต่ออากาศได้ ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมมลพิษที่เกิดจากการระเหย เช่น ระบบดักฝุ่นและก๊าซที่เกิดขึ้น จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายในส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

2.3.6 การสร้างตะกอนรวมทางเคมี เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย โดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะทองแดง โดยทำให้ประจุของคอลลอยด์เป็นกลางด้วยการเติม Coagulant ได้แก่ สารส้ม (Alum) เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$) เป็นต้น หลังจากนั้นอนุภาคคอลลอยด์ที่หมดเสถียรภาพเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า ฟล็อค (floc) จนมีน้ำหนักมากพอที่จะจมตัวลง หรืออาจมีการเติมสารพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ทำหน้าที่เป็นสะพานให้คอลลอยด์เกาะ ได้แก่ พอลิอลูมินัมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride) พอลิเฟอร์ริคซัลเฟต (Polyferric sulfate) และพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นต้น (พรศักดิ์, 2557) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาใช้โพลิเมอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ แทนนิน ($C_{75}H_{52}O_{46}$) จากเทคนิคการสร้างตะกอนรวมทางเคมี พบว่าที่พีเอช 6 สามารถบำบัดทองแดงที่ความเข้มข้น 20 mg/L ได้ 5 mg/L หรือประมาณร้อยละ 75 (Heredia and Martin, 2009) แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดเพราะต้องกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้นจึงต้องใช้ควบคู่กับเทคนิคการปรับเสถียร และฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินเหมือนกับวิธีการตกผลึกทางเคมี (พรรษวรรณ, 2558)

2.3.7 การสร้างตะกอนลอยด้วยไฟฟ้า (Electroflotation) เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย ด้วยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะทองแดงในสภาวะเบส ด้วยสารโคแอกกูแลนท์ในรูปของไอออนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากขั้วแอโนด (anode) ที่สามารถกัดกร่อนได้ เช่น อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) กลายเป็นอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) เหล็ก (Fe^{3+}) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นสารโคแอกกูแลนท์รวมตัวกับคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น ส่วนที่ขั้วลบ (cathode)

เกิดปฏิกิริยาการสลายของน้ำได้ผลิตภัณฑ์คือ ก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ (cathode) จะช่วยทำให้คอลลอยด์ที่รวมตัวเป็นตะกอนลอยตัวขึ้น และสามารถกำจัดออกด้วยการกวาดทิ้งจากผิวน้ำ โดยพบว่าวิธีการสร้างตะกอนลอยด้วยไฟฟ้าโดยใช้กระแสไฟฟ้า 0.3 แอมแปร์ พีเอช 6 สามารถบำบัดทองแดงที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ลดลงเหลือ 1-2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 98-99 (Khelifa *et al.*, 2005) แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัด เนื่องจากมีตะกอนเกิดขึ้นจึงต้องใช้ควบคู่กับเทคนิคการปรับเสถียร และฝังกลบเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน เช่นเดียวกับวิธีการตกผลึกทางเคมี

2.3.8 การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย ด้วยการเติมตัวรีดิวซ์เช่น เฟอรัสซัลเฟต โซเดียมโบโรไฮไดรด์ เพื่อให้อิเลคตรอนแก่ไอออนทองแดงในสารละลาย กลายเป็นโลหะทองแดงตกตะกอนแยกออกจากสารละลาย โดยพบว่าการบำบัดไอออนทองแดงความเข้มข้น 4,6517.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 2 ด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์โดยใช้โลหะแมกนีเซียมเป็นตัวรีดิวซ์ สามารถบำบัดไอออนทองแดงลดลงเหลือ 842.99 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 81.88 และได้โลหะทองแดงคืนกลับมา แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดเพราะการตกตะกอนร่วมของโลหะแมกนีเซียมและสารละลายหลังการบำบัดมีความเข้มข้นของไอออนแมกนีเซียมค่อนข้างสูง ทำให้ค่าการละลายของแข็งทั้งหมด (TDS) อาจเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (Supong and Junyapoon, 2014)

2.3.9 การใช้หลักการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย ด้วยการแยกสารที่สนใจจากปฏิกิริยารีดอกซ์โดยการสร้างเซลล์เคมีไฟฟ้า ที่สามารถวัดปริมาณค่าทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า ได้แก่ กระแส ศักย์ไฟฟ้า และความต้านทาน การสร้างเซลล์เคมีไฟฟ้าที่สามารถวัดค่าต่างๆเหล่านี้ได้ ทำให้เกิดเทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์หลายวิธีด้วยกัน เช่น วิธีโพเทนทิโอเมตริก วิธีอิเลคโทรกราวิเมตรี วิธีวัดปริมาณไฟฟ้าคูลอมบ์เมตริก วิธีคอนดัคโทรเมตริกไตเตรชัน (อรุณี, 2552)

โดยพบว่าวิธีการใช้เทคนิคอิเลคโตรกราวิเมตริกแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ พีเอช 2 ระยะห่างระหว่างขั้วอิเลคโทรด 1 เซนติเมตร และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที สามารถบำบัดไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 4652.14 ± 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ลดลงเหลือ 842.61 ± 7.92 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 81.89 ± 0.18 โดยได้กลับคืนทองแดงร้อยละ 80.62 ± 0.17 (กนกพร, 2558) แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัด เนื่องจากการควบคุมสภาวะในการแยกไอออนตัวหนึ่งๆ ออกจากไอออนอื่นๆนั้น เป็นเรื่องที่ต้องศึกษาหาวิธีการเฉพาะในการควบคุมสภาพของความเป็นกรด-เบสของสารละลาย และการแยกโลหะที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยาก (ธวัชชัย และสมบูรณ์, 2547)

สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดไอออนทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็น $CuFe_2O_4$ nanocatalyst จึงขอกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับการกำจัดโดยวิธีดังกล่าว

2.4 การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$)

น้ำเสียที่ปนเปื้อนไอออนของทองแดงซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันเททระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต ($Cu(NH_3)_4SO_4.H_2O$) ที่มีความเสถียรสูง และค่าพีเอชของสารละลายเป็นเบส จึงต้องเติมไอออนเหล็ก (II) ลงไปในสารละลายเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันเททระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต ($Cu(NH_3)_4SO_4.H_2O$) เพื่อให้ไอออนเหล็ก (II) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลโดยทำให้เกิดการลดลงของแอมโมเนีย (NH_3) เพื่อให้เกิดไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) มากขึ้น จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลของสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้มีการปลดปล่อยทองแดงไอออนออกมาสู่สารละลาย ดังแสดงในสมการที่ 2.3 - 2.5 ตามลำดับ

$$Fe^{2+} + OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_2 \qquad (2.3)$$

$$NH_3 + H_2O \rightleftharpoons NH_4^+ + OH^- \qquad (2.4)$$

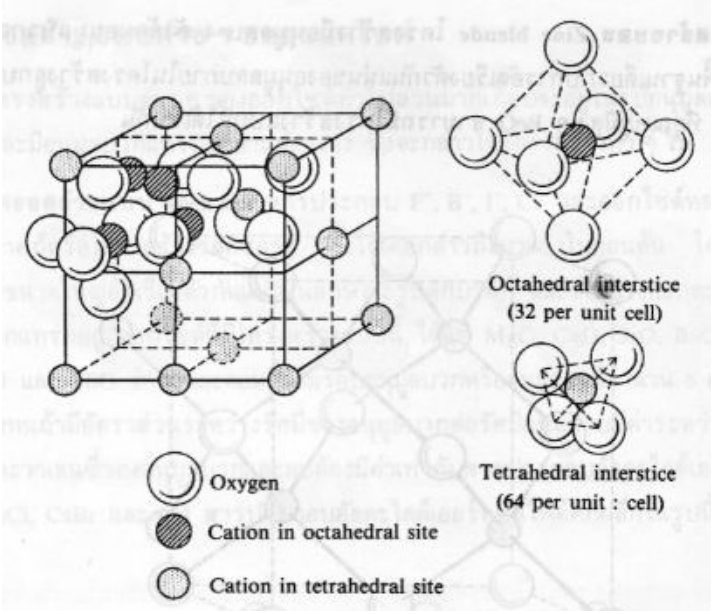
$$Cu^{2+} + 4\,NH_3 \rightleftharpoons Cu(NH_3)_4^{2+} \qquad (2.5)$$

หลังจากนั้นไอออนทองแดง (II) ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน กลายเป็น $Cu(OH)_2$ ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงดังกล่าว ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) เมื่อผ่านออกซิเจนลงในสารละลาย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฟอโรสิค (Ferrosic Complex) (ดังแสดงในสมการที่ 2.6)เบสจะไปโพลีเมอร์ไรซ์สารประกอบเชิงซ้อนเฟอโรสิค (Ferrosic Complex) ได้สารประกอบคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$) เกิดขึ้น (ฉัตรพร, 2547)

$$[Fe(OH)_2 + M(OH)_2 + MO] + O_2 \rightleftharpoons \left[Fe^{3+}(OH)_2 M^{2+}(OH)_2 Fe^{3+} \right]_n \qquad (2.6)$$

สารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซ Ferrosic Complex

สารประกอบคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$) ซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ $CuO.Fe_2O_3$ โดยที่ Cu เป็นไอออนโลหะที่มีประจุบวกสอง ซึ่งมีรัศมีไอออนิกประมาณ 0.06 ถึง 0.1 nm. ลักษณะของเซลล์หน่วยที่เล็กที่สุด มี $CuFe_2O_4$ 8 โมเลกุลต่อ 1 เซลล์หน่วย การเรียงตัวของไอออนออกซิเจนในแลตทิซผลึกเป็นโครงสร้างแบบชิดที่สุด Cubic Close Packing ซึ่งมีช่องว่าง 2 แบบ และแคทไอออนจะเข้าไปอยู่ตามช่องว่างนี้ โดยช่องเตตระฮีดรัลจึงถูกขยายขนาดโดยการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนทั้ง 4 ไอออน ออกไปตามแนวเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทำให้ช่องออกตระฮีดรัลมีขนาดลดลงไปเท่ากับที่ช่องเตตระฮีดรัลขยายขนาดขึ้น (Faungnawakij *et al.*, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Spinal Structurer (John Wiley & Sons, 1954)

$CuFe_2O_4$ nanocatalyst แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบซอฟท์ เพราะค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิที่เกิดขึ้นใน 1 ซับเซลล์ของ $CuO.Fe_2O_4$ ที่มีโครงสร้างแบบอินเวิร์ดสไปเนลสามารถพิจารณาได้ดังนี้คือ เมื่ออะตอมของเหล็กถูกไอออไนซ์ไปเป็นเหล็ก (II) ไอออนจะทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล จำนวน 4 ตัว หลังจากที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s ออร์บิทัล ไป 2 ตัวและเมื่อถูกไอออไนซ์ไปเป็นเหล็ก (III) ไอออน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล หลังจากที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน4s ออร์บิทัลไป 2ตัว และ 3d ออร์บิทัลไป 1 ตัว อิเล็กตรอนเดี่ยวหนึ่งตัวจะมีค่าแมกเนติกโมเมนต์เท่ากับ 1 Bohr magneton ดังนั้นเหล็ก (II) ไอออนจึงมี 4 Bohr magneton และเหล็ก (III) ไอออนจึงมี 5 Bohr magneton (Chaiyaraksa and Klaikeow, 2006) ส่วนอะตอมของทองแดงถูกไอออไนซ์ไปเป็นทองแดง (II) ไอออนจะทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล จำนวน 1 ตัว หลังจากที่สูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s ออร์บิทัล ไป 2 ตัว ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเฟอร์ไรต์วางในสนามแม่เหล็กแมกเนติกโมเมนต์ของไอออนที่อยู่ในออกตะฮีดรัลไซท์และเตตระฮีดรอลไซท์จะสวนทิศกันดังตารางที่ 2.1 (Veis *et al.*, 2013)

ตารางที่ 2.1 การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนของธาตุแทรนซิชันใน Spinel $CuFe_2O_4$ nanocatalyst

Ion	Number of electrons	Electron configuration 3d orbitals	Ionic magnetic moment (Bohr magnetons)
Fe^{3+}	23	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	5
Fe^{2+}	24	↑↓ ↑ ↑ ↑ ↑	4
Cu^{2+}	27	↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑↓ ↑	1

การกระจายไอออนโลหะของ $CuFe_2O_4$ เป็นแบบอินเวอร์สสไปแนลโดย Cu^{2+} 8 ไอออนเข้าอยู่ใน 8 ช่องออกตระฮีดรัล ส่วน Fe^{3+} 16 ไอออน โดยมี 8 ไอออนอยู่ใน 8 ช่องเตตระฮีดรัล และอีก 8 ไอออนอยู่ใน 8 ช่องออกตะฮีดรัล ดังนั้นวัสดุเฟอร์ไรต์ คือ $CuO.Fe_2O_3$ ทำให้แมกเนติกโมเมนต์ของทองแดง (II) ในออกตะฮีดรัลไซท์จะหักล้างกับเหล็ก (III) ในเตตระฮีดรอลไซท์ และออกตะฮีดรัลไซท์เท่ากับ 1 Bohr magneton ในซับเซลล์ หรือ 1 x 8 = 8 Bohr magneton ค่าโมเมนต์เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ออร์บิทัลภายใน ในแต่ละชุดมีทิศทางตรงข้ามกันแต่ไม่หักล้างกันจนหมด ทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferrimagnetism (สันทัด, 2552) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิต่อโมเลกุลใน Spinel $CuFe_2O_4$ nanocatalyst

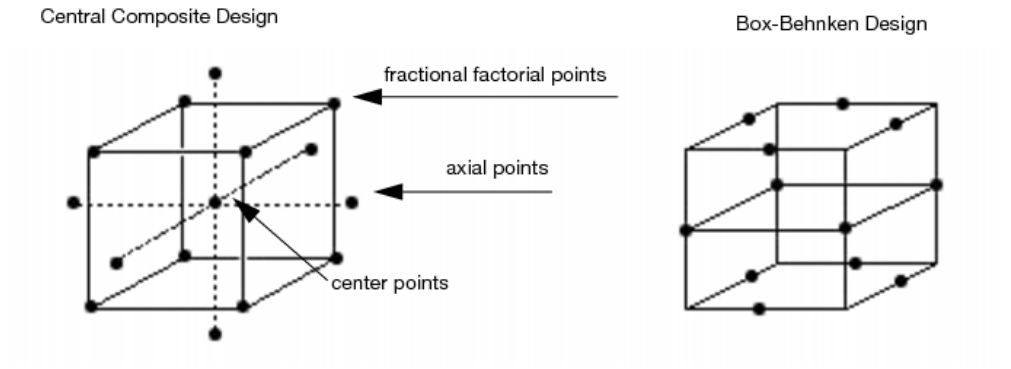
Ferrite	Structure	Tetrahedral site occupled	Octahedral site occupled	Net magnetic moments
$CuO.Fe_2O_3$	Inverse spinel	Fe^{3+} 5 ←	Cu^{2+} 1 → Fe^{3+} 5 →	1

การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$) มีข้อดีคือ ใช้สารเคมีน้อย พื้นที่ในการบำบัดน้อย ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำ พันธะเคมีในตะกอนเฟอร์ไรต์มีความแข็งแรงจึงมีความเสถียรค่อนข้างสูง ตะกอนมีสมบัติเป็น Ferrimagnetism จึงสามารถแยกออกได้ง่ายจากสารละลาย สามารถนำไปใช้กับกรณีที่มีโลหะหนักปะปนอยู่หลายชนิด และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการกำจัดโลหะทองแดงด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่ควรพิจารณา เพื่อประยุกต์ใช้ของเสียทางเคมีให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Rashad et al., 2012)

การกำจัดทองแดงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น (Yao et al., 2012) การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ทำให้ต้องใช้จำนวนครั้งในการทดลองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อทำนายและอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาเหล่านั้น ซึ่งพบว่าหลายๆปัจจัยส่งผลพร้อมกันในเวลาเดียวกันทำให้จำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย (Yaghobi et al., 2015) การออกแบบการทดลองโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยให้การเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพ เป็นการใช้ทรัพยากรในการทดลองคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ) มีการเปลี่ยนแปลง (Yaghobi et al., 2012) ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการทดลองที่ละปัจจัย โดยรูปแบบของการทดลองมีหลากหลายรูปแบบ แต่จะขอกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งก็คือ การออกแบบการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM (Mahmoodi et.al., 2013)

2.5 การออกแบบการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

RSM คิดค้นโดย Box ในปีค.ศ.1984 เป็นวิธีการรวบรวมเทคนิคทางคณิตศาสตร์ร่วมกับสถิติประยุกต์ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่าตอบสนองที่สนใจสำหรับหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) จากความสัมพันธ์ของปัจจัยเหล่านั้น โดยต้องมีการวางแผน และออกแบบการทดลองให้เหมาะสมกับลักษณะของข้อมูลด้วย (Aleboyeh et al., 2008 ; Raviknmar et al., 2007) โดยรูปแบบที่นิยมออกแบบเพื่อให้สามารถสร้างพื้นที่ผิวผลตอบสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) 2 วิธี คือ Central Composite Design (CCD) และ Box-Behnken Design (BBD) โดยใช้การกระจายระดับของข้อมูลออกจากศูนย์กลาง เพื่อศึกษาระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองสูงสุด ลักษณะการวางตำแหน่งและการกระจายระดับของปัจจัย ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองแบบ BBD จะเน้นที่จุดรอบๆค่ากลาง โดยไม่รวมค่าการกระจายในระดับแกน (axial point) และค่าที่มุม (factorial point) ทำให้ค่าคงที่ได้ไม่ครอบคลุมปลายสุดของระดับปัจจัย ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบ CCD จึงได้รับความนิยมมากกว่า (Rajendran et al., 2015)



ก. ข.

รูปที่ 2.3 โมเดลแสดงการกระจายของปัจจัยด้วยแผนการทดลอง
ก. Central Composite Design (CCD)
ข. Box-Behnken Design (BBD)

จากผลการทดลองตามแผนการทดลอง Central Composite Design (CCD) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองที่ศึกษา (ตัวแปร Y) สามารถจำลองสมการแบบการทดลอง Quadratic Model ได้ 4 แบบ (Doncaster, 2007) ดังแสดงในสมการที่ 2.7 – 2.10

1) Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i x_i \qquad (2.7)$$

2) Linear + interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} \beta_{ij} x_{ij} \qquad (2.8)$$

3) Linear +square model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{4} \beta_{ii} x_i^2 \qquad (2.9)$$

4) Full quadratic model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{4} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{4} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{3} \sum_{j=i+1}^{4} \beta_{ij} x_{ij} \qquad (2.10)$$

เมื่อ x_i, x_{ij} คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

$\beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระในแบบจำลอง

โดยมีหลักการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางสถิติ พิจารณาจากค่าดังต่อไปนี้

2.5.1 วิธีการพิจารณาความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่าต่างๆ ดังนี้

1) Standard Deviation (Std. Dev.) คือความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย

2) R-Squared (R^2) คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไรถ้า R^2 มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น (Andersson, 2012)

3) Adjusted R-Squared (Adj-R^2) คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าวัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไรโดยการนำ Degree of freedom มาพิจารณาด้วย

4) Predicted R-Squared (Pred-R^2) คือค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปรอิสระX มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย (Marcin et al., 2015)

2.5.2 วิธีการทดสอบสมมติฐานที่เกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิการถดถอย (β_i) โดยการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว ที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบ 2 ลักษณะดังนี้ (Minitab, 2010)

1) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \ldots\ldots\ldots = \beta_k = 0$ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือสามารถดูจากค่า *p* value ได้ ถ้า *p* value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า *p* value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย1 ตัวในแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

2) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$ หรือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ t-test หรือสามารถดูจากค่า *p* value ได้ ถ้า *p* value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 นั่นคือตัวแปรอิสระที่ i มามีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า *p* value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ (α) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (Montgomery, 2008)

2.5.3 วิธีการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการทดลอง โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้างที่ได้จากข้อมูลการทดลองต้องมีลักษณะดังนี้ คือ

1) ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติและค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (Normality Assumption) โดยกราฟ Normal Probability Plot มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และกราฟ Histrogram มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั้งทางบวกและลบ แสดงว่าข้อมูลที่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ

2) ค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีความแปรปรวนคงที่ (Constant Variance Assumption) ซึ่งเป็นการพล็อต ค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าประมาณของการทดลองที่ระดับใดๆ โดยรูปกราฟจากการพล็อต ควรมีแนวโน้มการกระจายแบบสุ่ม หรือไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แต่ถ้ามีรูปร่างที่ผิดปกติไป เช่น ลักษณะเหมือนลำโพง แสดงว่าความแปรปรวนไม่คงที่

3) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independently Distributed) ซึ่งเป็นการพล็อตส่วนที่ตกค้างตามลำดับเวลา โดยหากข้อมูลมีความเป็นอิสระ กราฟที่พล็อตได้จะไม่มีลักษณะเป็นจุดต่อเนื่อง แนวโน้ม และวัฏจักร (Myers et al., 2009)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ โดยประยุกต์ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส โดยมี 5 ระดับปัจจัยของแต่ละตัวแปร จำนวน 20 สภาวะการทดลอง ประกอบด้วย Factorial Points จำนวน 8 จุด Axial Points จำนวน 6 จุด และ Central point จำนวน 6 จุด จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สร้างสมการทำนาย (Rajendran et al., 2015) ความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง แล้วตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อวิเคราะห์หาค่าของอุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมของการกำจัดทองแดงออกจาก

สารละลายเชิงซ้อนทองแดงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงสุด จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลองว่า เมื่อนำระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถนำไปใช้ได้จริง

2.6 มาตรฐานและข้อกำหนดของโลหะทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำ

ในประเทศไทยมีการกำหนดมาตรฐานความเข้มข้นของทองแดงในแหล่งน้ำประเภทต่างๆ ได้แก่ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 พ.ศ.2539 ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 กำหนดให้น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน มีโลหะทองแดงไม่มากกว่า 2 mg/L และพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ กำหนดคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดินประเภทที่ 2 เพื่อการอนุรักษ์สัตว์น้ำ เพื่อการประมงกิจกรรมและกีฬาทางน้ำ ต้องมีทองแดงไม่มากเกิน 0.1 mg/L

2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

Chaiyaraksa and Klaikeow (2006) ได้ศึกษาวิจัยการกำจัดโลหะหนักของทองแดง นิกเกิล และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนของไอออนโลหะ : ไอออนเหล็ก (II), อัตราการเติมก๊าซออกซิเจน, ค่าพีเอช และอุณหภูมิ จากผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของอัตราส่วนของไอออนโลหะ : ไอออนเหล็ก (II) ของโลหะทองแดง นิกเกิล และ สังกะสี มีค่าเท่ากับ 1:2, 1:5 และ 1:10 ตามลำดับ โดยมีร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะดังกล่าวเท่ากับ 99.80, 99.88 และ 99.99 ตามลำดับ อัตราการเติมก๊าซออกซิเจน 100 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอช 10 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะผสมทองแดง-นิกเกิล, ทองแดง-สังกะสี, นิกเกิล-สังกะสี และทองแดง-นิกเกิล-สังกะสี ความเข้มข้น 800, 1,400, 1,600 และ 1,400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าต้องเพิ่มปริมาณของไอออนเหล็ก (II) ประมาณ 100-200 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อให้ร้อยละประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะผสมดังกล่าวเท่ากับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะชนิดเดียว

Chen *et al.* (2008) ได้สังเคราะห์ตะกอนเฟอร์ไรต์ของโลหะหนักได้แก่ นิกเกิล โครเมียม สังกะสี และ ทองแดง จากอุตสาหกรรมการชุบโลหะโดยปฏิกิริยาการให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำ(hydrothermal) ด้วยการเติมเหล็กจาก $FeCl_3 6H_2O$ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ด้วยแอมโมเนีย ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส หลังจากนำตะกอนเฟอร์ไรท์ดังกล่าวมากำจัดไอออนทองแดง พบว่าสามารถกำจัดไอออนทองแดงได้ 76-84 % โดยน้ำหนัก และจากการทดสอบความเสถียรของตะกอนดังกล่าว พบว่าการชะละลายของโลหะที่ออกมามีค่าต่ำกว่ามา Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ย่อมแสดงว่าตะกอนดังกล่าวมีความเสถียรทางเคมี การใช้ขบวนการดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมในการนำของเสียทางเคมีกลับมาใช้ซ้ำเพื่อกำจัดของเสียทางเคมีจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ

Jiang S. *et.al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดง-เอทิลีนไดเอมีนเททระแอซิเตทออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการแทนที่และตกตะกอนด้วยไอออนเหล็ก (II) โดยการออกซิไดส์ไอออนเหล็ก (II) ให้กลายเป็นไอออนเหล็ก (III) ได้ง่ายในสภาวะที่มีออกซิเจน หลังจากนั้นไอออนเหล็ก (III) ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำสร้างพันธะกับเอทิลีนไดเอมีนเททระแอซิเตทไอออนปลดปล่อยไอออนทองแดง

(II) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชต่ำกว่า 4 เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ส่วนไอออนทองแดง (II) ที่ถูกปลดปล่อยจึงสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออนแล้วจึงตกตะกอนแยกออกจากสารละลาย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชระหว่าง 8-12 เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว โดยอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมระหว่างไอออนเหล็ก (II) : ไอออนทองแดง 〉 12 สามารถกำจัดสารละลายความเข้มข้นของไอออนทองแดงจากความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตรลดลงเหลือต่ำกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร

Ming Z. (2011) ได้ทำการวิจัยในการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะที่ประกอบด้วยโลหะหนักต่างๆ ได้แก่ นิกเกิล สังกะสี โครเมียม และ ทองแดง โดยใช้ Fe_2SO_4 เป็นตัวรีดิวซ์เพื่อให้เกิดสารประกอบเฟอร์ไรท์ของโลหะหนักดังกล่าว โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ พีเอช และ อัตราส่วนโดยโมลของ Fe^{2+}: โลหะ จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก คือ นิกเกิล สังกะสี โครเมียม และทองแดง ได้แก่ ค่าพีเอช 9.8, 9, 10 และ 10 ตามลำดับ, อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเหล็ก (II) : ไอออนโลหะ คือ นิกเกิล สังกะสี และ ทองแดง เท่ากับ 2 แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของเหล็ก (II) : ไอออนโลหะ 〉 2-8 สามารถกำจัดไอออนของโลหะหนักดังกล่าวได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วนอัตราส่วนที่เหมาะสมโดยโมลของเหล็ก (II) : ไอออนของโครเมียม 〉 16 ทั้งนี้เพราะไอออนของเหล็ก(II) ส่วนหนึ่งต้องนำมาใช้ในการออกซิไดส์ไอออนโครเมียม (VI) ให้กลายเป็นไอออนโครเมียม (III) ส่วนพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล โครเมียม สังกะสี และ ทองแดง เท่ากับ 9.8, 9, 10 และ 10 ตามลำดับ นอกจากนี้ตะกอนที่ได้จากเฟอร์ไรท์มีความเสถียรมากกว่าตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนโดยเคมี และการกำจัดด้วยวิธีดังกล่าวสามารถกำจัดโลหะหนักได้ถึง 99% ค่าใช้จ่ายถูก ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก เหมาะที่จะนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

Hirunsit P. and Faungnawakij K. (2013) ได้ทำการศึกษาโดยการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาสไปเนลออกไซด์ของทองแดง-เหล็ก ในสารละลายกรดซีตริกโดยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่อุดมไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน จึงทำให้มีพื้นผิวของไอออนทองแดง (I) จำนวนมาก เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาสไปเนลออกไซด์ของทองแดง-เหล็กไปใช้ร่วมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ จึงสามารถกำจัดไดเมทิลอีเธอร์ให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด