



รายงานวิจัย

เรื่อง

แบบจำลองการทดลองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงจากสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนโดยการเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์เฟอร์ไรท์

EMPIRICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF COPPER REMOVAL FROM COPPER AMMINE COMPLEX BY SWITCHING TO CuFe_2O_4

นางสาว กนกพร สุพงษ์

MISS KANOKPORN SUPONG

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้
ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานวิจัย
เรื่อง

แบบจำลองการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงจาก
สารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนโดยการเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์เฟอร์ไรท์

EMPIRICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF COPPER REMOVAL
FROM COPPER AMMINE COMPLEX BY SWITCHING TO CuFe_2O_4

นางสาวกนกพร สุพงษ์

MISS KANOKPORN SUPONG

EResearch

เลขหมู่.....**148541**
เลขทะเบียน.....
รับเดือนปี **31 ต.ค. 2560**

b. 0.0265103
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้
ประเภทส่งเสริมนักวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2560
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่อง แบบจำลองการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงจากสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนโดยการเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์เฟอร์ไรท์ (Empirical model for optimization of copper removal from copper ammine complex by switching to CuFe_2O_4) งานวิจัยนี้เสนอการบำบัดทองแดงด้วยกระบวนการเฟอร์ไรท์ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมี พื้นที่ในการบำบัด และค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งช่วยให้การการจับเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพ เป็นการใช้ทรัพยากรในการทดลองคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษามีการเปลี่ยนแปลง ทางผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นทางเลือกหนึ่ง เพื่อป้องกันแก้ไขปัญหามลพิษ เป็นการรักษาคุณภาพชีวิตในสถานที่ทำงานและชุมชนอย่างปลอดภัยและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อม

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานผู้บริหารคณะวิทยาศาสตร์ ตลอดจนผู้ประสานงานวิจัยของส่วนงานวิชาการดังกล่าว คือ นางอาทิตา เสนีย์เดชกุลและ นางนิทรา ณ เรืองศรี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของงานวิจัย ผู้วิจัยขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่านและบิดาผู้ล่วงลับ

กนกพร สุพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title Empirical model for optimization of copper removal from copper ammine complex by switching to CuFe_2O_4
Researcher Miss Kanokporn supong
Faculty: Science
Department: Chemistry

ABSTRACT

This research studied empirical model for copper treatment in chelated copper synthetic wastewater by switching to CuFe_2O_4 . $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ synthetic of wastewater is used as a source of chelated copper synthetic wastewater. A central composite design (CCD) was effectively worked for batch experimental and copper concentrations were determined using Flame Atomic Absorption Spectrophotometer. In this study, effect of pH, reaction temperature and reaction time were examined. The full quadratic model terms with have $R^2 = 99.16$, $\text{Adj-R}^2 = 98.40$, $\text{Pred-R}^2 = 93.55$, $S = 0.81$ and $\text{PRESS} = 19485.8$ which were highly significant model term. An empirical model was developed and validated applying ANOVA analysis incorporating residual plots. Response surface methodology (RSM) showed the three dimensional plots which was used for estimation of operating variables. The optimum conditions calculated from MINITAB for 2 mg/L of residual copper concentrations which were identified as: pH10, reaction temperature 60 °C and reaction time 102 minutes using response optimizer. The experiment values for the residual copper was 2.77 ± 0.21 mg/L that were in close results with the predicted optimal. The results show the empirical model developed in this study that resulted in good agreement between actual and predicted responses for the copper treatment in chelated copper synthetic by switching to CuFe_2O_4 .

Keywords: empirical model, copper treatment, chelated copper, CuFe_2O_4

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย	ซ
บทที่1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 น้ำเสีย.....	5
2.2 ทองแดง.....	5
2.3 วิธีการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสีย.....	6
2.4 การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอไรท์.....	9
2.5 การออกแบบการทดลองแบบวิธีพื้นผิวตอบสนอง.....	12
2.6 มาตรฐานและข้อกำหนดของโลหะทองแดงที่ปนเปื้อนในน้ำ.....	16
2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	18
3.2 การเตรียมน้ำเสียและแผนทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิต.....	18
3.3 วิธีการทดลอง.....	20
บทที่4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	23
4.1 ผลศึกษาการกำจัดทองแดงตามแผนทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิต.....	23
4.2 ผลศึกษาการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดง.....	25
4.3 ผลศึกษาการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย.....	29
4.4 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	35
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
เอกสารอ้างอิง.....	37
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	42
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลงต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจัดเรียงตัวอิเล็กทรอนิกส์ของธาตุแทรนซิชันในคิวปรัสเพอร์ไรท์.....	11
2.2 ค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิต่อโมเลกุลของคิวปรัสเพอร์ไรท์.....	11
3.1 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์เครื่องอะตอมมิกรอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	19
3.2 ค่า coded value สำหรับตัวแปรของแผนการทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิต.....	19
3.3 แผนการทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิตประเภท 3 ระดับปัจจัย.....	19
4.1 ผลของแผนการทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิตกับความเข้มข้นทองแดงที่คงเหลือ.....	24
4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองสมการทำนาย.....	25
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากแบบจำลองสมการทำนาย.....	26
4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากแบบจำลองสมการ Full Quadratic.....	26
4.5 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย.....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

ภาพที่	หน้า
2.1 โลหะทองแดง.....	6
2.2 Spinal Structure.....	10
2.3 โมเดลแสดงการกระจายปัจจัยของแผนการทดลอง.....	13
4.1 ลักษณะของสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์แอมมีนสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษา.....	23
4.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของค่าพีเอช.....	27
4.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของอุณหภูมิ.....	28
4.4 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลระยะเวลาปฏิกิริยา.....	28
4.5 พื้นผิวผลตอบสนองของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ.....	29
4.6 พื้นผิวผลตอบสนองของพีเอชและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ.....	30
4.7 พื้นผิวผลตอบสนองของอุณหภูมิและเวลา ที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ.....	31
4.8 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดทองแดงของสารละลายเชิงซ้อนสังเคราะห์.....	32
4.9 สารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์แอมมีนหลังผ่านการกำจัดทองแดง.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามคำศัพท์

AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
aq.	aqueous
pH	Potential of Hydrogen ion
มก.	มิลลิกรัม
มล.	มิลลิลิตร
Kg.	กิโลกรัม
V.	voltage
A.	ampere
SD	Standard Deviation
% RSD	Relative Standard Diviation
g/mol	grams per mole
mol/L	mole / liter
ppm.	Part per million
กก.	กิโลกรัม
ชม.	ชั่วโมง
ตร.ชม.	ตารางเซนติเมตร
นน.	น้ำหนัก
มม.	มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

สารละลายเชิงซ้อนเทตระแอมมีนคอปเปอร์(II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีค่าคงตัวของกาเกิดสารละลายเชิงซ้อนสูง เท่ากับ 4.3×10^{12} (Hu *et al.*, 2012) ย่อมแสดงว่าสารละลายดังกล่าวมีความเสถียรสูง สารละลายเชิงซ้อนดังกล่าวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งจัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักที่สร้างมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ของประเทศไทย (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2558) นอกจากนี้สารละลายเชิงซ้อนเทตระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ถูกนำมาใช้ในการเรียนการสอนและงานวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากองค์ประกอบของสารละลายเชิงซ้อนดังกล่าว คือทองแดง ซึ่งเป็นโลหะหนักที่คงทนอยู่ในสิ่งแวดล้อม และมีความเป็นพิษแม้มีปริมาณน้อย เมื่อปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำแล้วอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งทางตรงและทางอ้อม (Jiang *et al.*, 2010) โดยตามมาตรฐานน้ำทิ้งของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) กำหนดให้มีค่าทองแดงไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่น้ำเสียจากอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการเคมีมักมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งหลายเท่า ดังนั้นหากไม่ทำการบำบัดทองแดงออกจากน้ำเสียดังกล่าวก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ย่อมส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ (Chen *et al.*, 2013)

กระบวนการที่นิยมใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสีย คือ กระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์หรือซัลไฟด์เพราะเป็นกระบวนการที่ง่ายและราคาถูก แต่ไม่สามารถนำไปใช้กับน้ำเสียที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทองแดง เนื่องจากพันธะของลิแกนด์-ไอออนทองแดงมีความเสถียรมากกว่าพันธะของไฮดรอกไซด์-ไอออนทองแดง (Manova *et al.*, 2011) นอกจากนี้สารละลายเชิงซ้อนเทตระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) มีค่าความเป็นเบส ทำให้การกำจัดทองแดงด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าย่อมมีประสิทธิภาพลดลง (Dermentzis *et al.*, 2009)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางในการกำจัดสารละลายเชิงซ้อนเทตระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต ($\text{Cu}(\text{NH}_3)_4\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) โดยการเติมไอออนของเหล็ก (II) ในน้ำเสียที่มีไอออนทองแดง (II) ในสถานะที่เป็นเบสจะได้ สารละลายไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) ของไอออนเหล็ก (II) และไอออนทองแดง (II) ซึ่งเป็นพวคนอนเฟอร์โรแมกเนติก เมื่อผ่านก๊าซออกซิเจนลงในสารละลายไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) ดังกล่าว ในสถานะที่เหมาะสมจะเกิดเป็นเฟอร์โรสิคคอมเพลก (Ferrosic complex) (Chaiyaraksa & Klaikeow, 2006) หลังจากนั้นเบสจะไปโพลิเมอร์ไรซ์เฟอร์โรสิคคอมเพลก ได้สารประกอบคิวปริสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) ซึ่งเป็นอนุภาคนาโนที่มีลักษณะละเอียด หนัก แยกตะกอนได้เร็ว เสถียรต่อการชะละลายของตัวทำละลายกรด-เบส และสามารถนำไปใช้เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาต่างๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาสังเคราะห์ α -aminonitriles (Gharib *et al.*, 2014) ปฏิกิริยาสังเคราะห์ Pyrimidine (Dandia *et*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

al., 2013) ปฏิกริยากำจัดสี้อมอินทรีย์ (Mahmoodi et al., 2013) และใช้ร่วมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ในการกำจัดดีเธอร์ (Hirunsit & Faungnawakij, 2013) ซึ่งจัดเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่ถูกกำหนดห้ามทิ้งในแหล่งน้ำเพราะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ถ้าหายใจสารอินทรีย์ดังกล่าวเข้าไปจะทำให้ปวดศีรษะ ไอ หายใจติดขัด หมดสติ ระบบหายใจล้มเหลว และกดระบบประสาทส่วนกลาง (ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตราย, 2558)

การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปริสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) มีข้อดีคือ ใช้สารเคมีน้อย พื้นที่ในการบำบัดน้อย ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำ สามารถนำไปใช้กับกรณีที่มีโลหะหนักปะปนอยู่หลายชนิด และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกริยาทางเคมี ดังนั้นการกำจัดโลหะทองแดงด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่ควรพิจารณา เพื่อประยุกต์ใช้ของเสียทางเคมีให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Rashad et al., 2012)

การกำจัดทองแดงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายปัจจัย เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกริยา เป็นต้น (Tu et al., 2012) การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ทำให้ต้องใช้จำนวนครั้งในการทดลองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อทำนายและอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาเหล่านั้น ซึ่งพบว่าหลายๆปัจจัยส่งผลพร้อมกันในเวลาเดียวกันทำให้จำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าการศึกษาที่ละปัจจัย (Moghaddam et al., 2015) การออกแบบการทดลองโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยให้การเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพ เป็นการใช้ทรัพยากรในการทดลองคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ) มีการเปลี่ยนแปลง (Yaghabi et al., 2012) ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการทดลองที่ละปัจจัย โดยรูปแบบของการทดลองมีหลากหลายรูปแบบ แต่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งก็คือ การออกแบบการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM (Mahmoodi et al., 2013)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปริสเฟอร์ไรท์ 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-เบสที่เหมาะสม จากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันว่าสภาวะเหมาะสมจากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อการกำจัดทองแดงในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4)
2. ศึกษาการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) โดยตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ
3. ศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อวิเคราะห์หาค่าของอุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมของการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงสุด
4. ศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากการนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) ไปใช้ในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงโดยกระบวนการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) และจากแบบจำลองสมการทำนาย
5. เพื่อนำผลการวิจัยที่ได้ไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ หรือตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาการออกแบบแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ โดยแปรค่าปัจจัยต่างๆ ได้แก่
 - 1.1 ค่าความเป็นเบสโดยมี 5 ระดับปัจจัย คือ 8, 9, 10, 11 และ 12
 - 1.2 อุณหภูมิที่ โดยมี 5 ระดับปัจจัย คือ 43, 50, 60 และ 77 องศาเซลเซียส
 - 1.3 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาโดยมี 5 ระดับปัจจัย คือ 40, 60, 90, 120 และ 140 นาที โดยวิเคราะห์ปริมาณของทองแดงก่อนและหลังกำจัดไอออนทองแดงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
2. ศึกษาการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ โดยตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ ได้แก่
 - 2.1. ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า Standard Deviation (Std. Dev.), R-Squared (R^2), Adjusted R-Squared (Adj- R^2) และ Predicted R-Squared (Pred- R^2)

2.2 ตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($B\beta$) มีการทดสอบของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน และทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($B\beta$) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยมีสมมติฐานว่า รูปแบบของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และ มีความแปรปรวนเท่ากัน

3. ศึกษาหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) สูงสุด จากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

4. ศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายโดยนำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) มาใช้ทดลองกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยกระบวนการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) และจากสมการทำนายของแบบจำลองที่เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนทองแดงสูงสุดออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดง โดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) จากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

2. ได้สมการทำนายความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนทองแดงหลังการกำจัดไอออนทองแดงจากการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์โดยใช้หลักการทางสถิติตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลอง

3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไอออนทองแดง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย

น้ำเสียคือ น้ำที่มีสิ่งเจือปนอยู่ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพในการนำไปใช้อุปโภคบริโภค หากปล่อยลงสู่ลำน้ำธรรมชาติย่อมทำให้คุณภาพของแหล่งน้ำเสียหายได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

น้ำเสียที่เป็นอันตราย (hazardous wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารเคมีต่างๆ ทั้งจากงานทางด้านเคมีและชีวภาพเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยสารเคมีบางประเภทหากทิ้งร่วมกับสารเคมีประเภทอื่นอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ โดยทั่วไปสามารถแยกประเภทของเสียที่ปนเปื้อนในน้ำเสียได้เป็นประเภทต่างๆ ได้แก่ ของเสียที่เป็นกรด ของเสียที่เป็นเบส ของเสียที่เป็นเกลือ ของเสียที่เป็นสารไวไฟ ของเสียที่เป็นสารเฮโลเจน ของเสียที่เป็นของเหลวอินทรีย์ที่ประกอบด้วยน้ำ ของเสียประเภทออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ ของเสียประเภทรีดิวซ์เชิงเอเจนต์ ของเสียที่เป็นไอออนของโลหะหนักอื่นๆ และของเสียที่มีจุลินทรีย์เป็นต้น (ศูนย์การจัดการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมความปลอดภัยและอาชีวอนามัย, 2546)

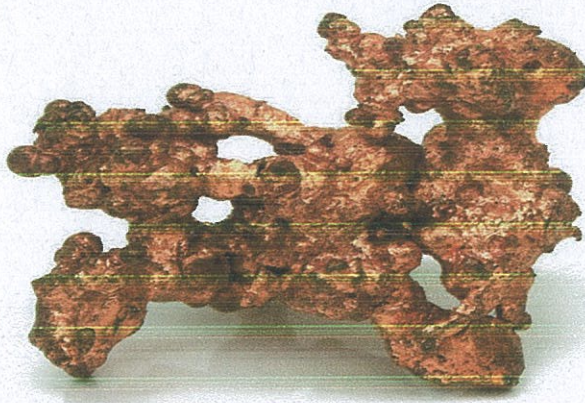
น้ำเสียประเภทนี้ควรแยกเก็บรวบรวม ตัดฉลากหรือแสดงรายละเอียดต่างๆ โดยมีรายละเอียดสำคัญต่างๆ ได้แก่ ประเภทของน้ำเสีย ความเป็นอันตรายของน้ำเสีย วันที่เริ่มและสิ้นสุดการบรรจุน้ำเสียในภาชนะที่บุคคลหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบ เป็นต้น โดยรวบรวมลงในภาชนะรองรับที่เหมาะสม ได้แก่ ถังโพลีเอทิลีน เป็นต้น สำหรับเตรียมนำไปบำบัดและกำจัด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

กระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้ 4 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการทางกายภาพ เคมี ชีววิทยา และฟิสิกส์เคมี งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีด้วยกระบวนการทางเคมี ดังนั้นจึงขอกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับโลหะทองแดงและการกำจัดโลหะทองแดงด้วยกระบวนการทางเคมี

2.2 ทองแดง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



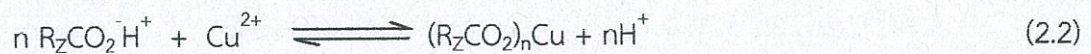
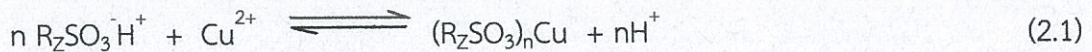
รูปที่ 2.1 โลหะทองแดง (สารานุกรมเสรี, 2556)

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) แต่เทคนิคนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการกำจัดไอออนทองแดงที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนได้ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน หรือซัลไฟด์ไอออนไม่สามารถแทนที่ลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนได้ เป็นไปตามอนุกรมสเปกโทรเคมี (พดาร์ตัน, 2558)

2.3.2 การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกำจัดทองแดงโดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดถูกดูดซับโดยเรซินที่มีประจุบวก เรียกว่า cation exchange resin ไม่เท่ากัน ถ้าเรซินเป็นกรดแก่จะมีหมู่ฟังก์ชันนัลในรูปของ sulfonic acid ($\text{R}_2\text{SO}_3\text{H}^+$) (ปฏิกิริยาที่ 2.1) ถ้าเป็นกรดอ่อนจะมีหมู่ฟังก์ชันนัลในรูปของ carboxylic acid (RCOOH) (ปฏิกิริยาที่ 2.2)



โดย $\text{R}_2 = \text{resin}$

แต่เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนทองแดงมีความเสถียรค่อนข้างสูง ดังนั้นเรซินที่ใช้มักจะต้องมีการเคลือบด้วยลิแกนด์ที่มีความสามารถในการจับกับไอออนทองแดงได้ดีกว่าลิแกนด์ที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อน ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีนเททระแอะซิเตท (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 รีเวอร์สออสโมซิส เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยใช้แรงดันอัดน้ำเสียผ่านเยื่อ Semi-permeable membrane จึงได้น้ำที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยพบว่าวิธีรีเวอร์สออสโมซิสสามารถบำบัดทองแดงที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ลดลงเหลือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 95 แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากต้องใช้พลังงานมาก และการอุดตันของเยื่อ Semi-permeable membrane จึงต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียขาเข้า (Zhang *et al.*, 2009)

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

2.3.6 การสร้างตะกอนรวมทางเคมี เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย โดยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะทองแดง โดยทำให้ประจุของคอลลอยด์เป็นกลางด้วยการเติม Coagulant ได้แก่ สารส้ม (Alum) เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) เฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) เป็นต้น หลังจากนั้นอนุภาคคอลลอยด์ทั้งหมดเสถียรภาพเคลื่อนที่มาสัมผัสและเกาะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เรียกว่า ฟล็อก (floc) จนมีน้ำหนักมากพอที่จะจมตัวลง หรืออาจมีการเติมสารพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลใหญ่ทำหน้าที่เป็นสะพานให้คอลลอยด์เกาะ ได้แก่ พอลิอลูมิเนียมคลอไรด์ (Polyaluminum chloride) พอลิเฟอร์ริกซัลเฟต (Polyferric sulfate) และพอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เป็นต้น (พรศักดิ์, 2557) ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาใช้โพลิเมอร์จากธรรมชาติ ได้แก่ แแทนนิน ($\text{C}_{75}\text{H}_{52}\text{O}_{46}$) 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 ด้วยการทำลายเสถียรภาพของอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะทองแดงในสถานะเบส ด้วยสารโคแอกกูแลนต์ในรูปของไอออนโลหะที่เกิดจากการละลายโลหะออกจากขั้วแอโนด (anode) ที่สามารถกัดกร่อนได้ เช่น อลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) กลายเป็นอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) เหล็ก (Fe^{3+}) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นสารโคแอกกูแลนต์รวมตัวกับคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น ส่วนที่ขั้วลบ (cathode) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 และฝักรวมเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของโลหะลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน เช่นเดียวกับวิธีการตกผลึกทางเคมี

2.3.8 การใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสีย ด้วยการเติมตัวรีดิวซ์เช่น เพอร์ซัลเฟต โซเดียมโบโรไฮไดรด์ เพื่อให้ไอออนของแอกไอออนทองแดงในสารละลาย กลายเป็นโลหะทองแดงตกตะกอนแยกออกจากสารละลาย โดยพบว่า การบำบัดไอออนทองแดงความเข้มข้น 4,651.17 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 วิธีโพเทนทิโอมิตรี วิธีโวลแทมเมตรี วิธีวัดปริมาณไฟฟ้าคูลอมบ์เมตริก วิธีคอนดัคโตเมตริกไตเตรชัน (อรุณี, 2552)

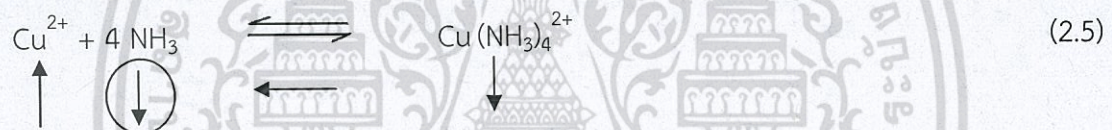
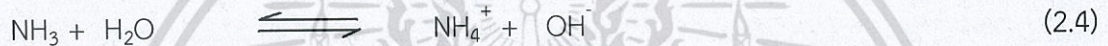
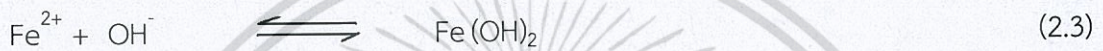
โดยพบว่าวิธีการใช้เทคนิคโวลแทมเมตริกแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้คงที่ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 3 โวลต์ พีเอช 2 ระยะห่างระหว่างขั้วโวลแทมเมตริก 1 เซนติเมตร และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 45 นาที สามารถบำบัดไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 4652.14 ± 2.9 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ลดลงเหลือ 842.61 ± 7.92 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือประมาณร้อยละ 81.89 ± 0.18 โดยได้กลับคืนทองแดงร้อยละ 80.62 ± 0.17 (กนกพร, 2558) แต่กระบวนการนี้มีข้อจำกัด เนื่องจากการควบคุมสภาวะในการแยกไอออนตัวหนึ่งๆ ออกจากไอออนอื่นๆนั้น เป็นเรื่องที่ต้องศึกษาหาวิธีการเฉพาะในการควบคุมสภาพของความเป็นกรด-เบสของสารละลาย และการแยกโลหะที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวค่อนข้างยุ่งยาก (รัชชัช และสมบุญ, 2547)

สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอการกำจัดไอออนทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็น CuFe_2O_4 nanocatalyst จึงขอกล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับการกำจัดโดยวิธีดังกล่าว

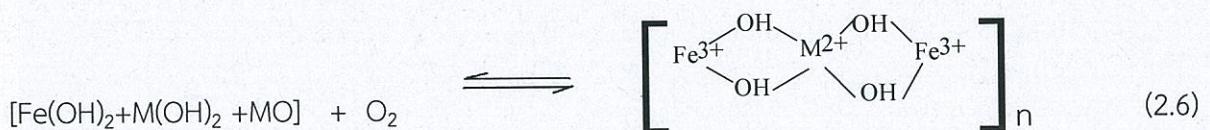
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe₂O₄)

น้ำเสียที่ปนเปื้อนไอออนของทองแดงซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันเทตระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต (Cu(NH₃)₄SO₄·H₂O) ที่มีความเสถียรสูง และค่าพีเอชของสารละลายเป็นเบส จึงต้องเติมไอออนเหล็ก (II) ลงไปในสารละลายเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชันเทตระแอมมีนคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต โมโนไฮเดรต (Cu(NH₃)₄SO₄·H₂O) เพื่อให้ไอออนเหล็ก (II) ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนลดลง จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลโดยทำให้เกิดการลดลงของแอมโมเนีย (NH₃) เพื่อให้เกิดไอออนแอมโมเนียม (NH₄⁺) มากขึ้น จึงทำให้เกิดการรบกวนสมดุลของสารประกอบเชิงซ้อน ทำให้มีการปลดปล่อยทองแดงไอออนออกมาสู่สารละลาย ดังแสดงในสมการที่ 2.3 - 2.5 ตามลำดับ



หลังจากนั้นไอออนทองแดง (II) ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน กลายเป็น Cu(OH)₂ ในสถานะที่อุณหภูมิสูงดังกล่าว ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) เมื่อผ่านออกซิเจนลงในสารละลาย ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซคอมเพลก (Hydroxo complex) ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์โรสิค (Ferrosic Complex) (ดังแสดงในสมการที่ 2.6) เบลจะไปโพลีเมอร์ไรซ์สารประกอบเชิงซ้อนเฟอร์โรสิค (Ferrosic Complex) ได้สารประกอบคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe₂O₄) เกิดขึ้น (ฉัตรพร, 2547)

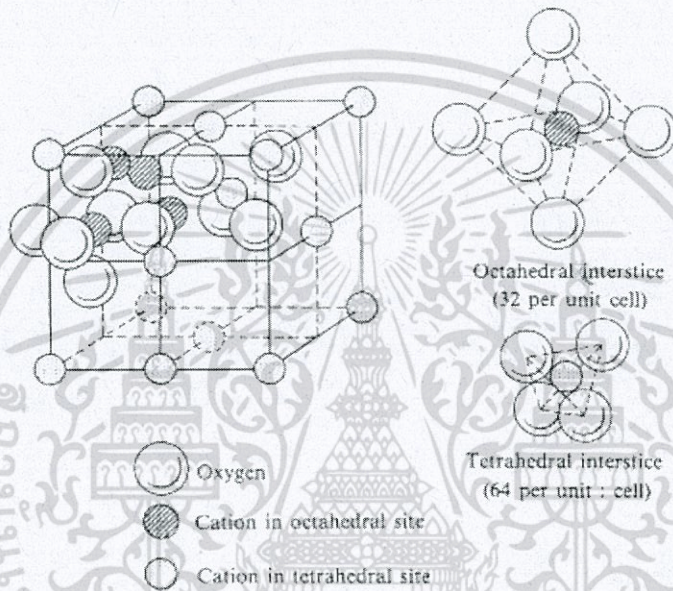


สารประกอบเชิงซ้อนไฮดรอกโซ

Ferrosic Complex

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) ซึ่งมีสูตรทั่วไปคือ $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ โดยที่ Cu เป็นไอออนโลหะที่มีประจุบวกสอง ซึ่งมีรัศมีไอออนิกประมาณ 0.06 ถึง 0.1 nm. ลักษณะของเซลล์หน่วยที่เล็กที่สุดมี CuFe_2O_4 8 โมเลกุลต่อ 1 เซลล์หน่วย การเรียงตัวของไอออนออกซิเจนในแลตทิซผลึกเป็นโครงสร้างแบบชิดที่สุด Cubic Close Packing ซึ่งมีช่องว่าง 2 แบบ และแคทไอออนจะเข้าไปอยู่ตามช่องว่างนี้ โดยช่องเตตระฮีดรัลจึงถูกขยายขนาดโดยการเคลื่อนที่ของไอออนออกซิเจนทั้ง 4 ไอออน ออกไปตามแนวเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ทำให้ช่องออกเตตระฮีดรัลมีขนาดลดลงไปเท่ากับที่ช่องเตตระฮีดรัลขยายขนาดขึ้น (Faungnawakij *et al.*, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Spinel Structure (John Wiley & Sons, 1954)

CuFe_2O_4 nanocatalyst แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กแบบซอเฟท์ เพราะค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิที่เกิดขึ้นใน 1 ซับเซลล์ของ $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_4$ ที่มีโครงสร้างแบบอินเวิร์ตสไปเนลสามารถพิจารณาได้ ดังนี้คือ เมื่ออะตอมของเหล็กถูกไอออนไนซ์ไปเป็นเหล็ก (II) ไอออนจะทำให้อิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล จำนวน 4 ตัว หลังจากสูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s ออร์บิทัล ไป 2 ตัวและเมื่อถูกไอออนไนซ์ไปเป็นเหล็ก (III) ไอออน จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล หลังจากสูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s ออร์บิทัล ไป 2 ตัว 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) ส่วนอะตอมของทองแดงถูกไอออนไนซ์ไปเป็นทองแดง (II) ไอออนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเดี่ยวใน 3d ออร์บิทัล จำนวน 1 ตัว หลังจากสูญเสียอิเล็กตรอนที่อยู่ใน 4s ออร์บิทัล ไป 2 ตัว ดังนั้นเมื่อนำวัสดุเฟอร์ไรต์วางในสนามแม่เหล็กแมกเนติกโมเมนต์ของไอออนที่อยู่ในออกเตตระฮีดรัลไซต์และเตตระฮีดรัลไซต์จะสวนทิศกันดังตารางที่ 2.1 (Veis *et al.*, 2013)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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	$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow$	5
Fe^{2+}	24	$\uparrow\downarrow \uparrow \uparrow \uparrow$	4
Cu^{2+}	27	$\uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow\downarrow \uparrow$	1

การกระจายไอออนโลหะของ CuFe_2O_4 เป็นแบบอินเวอร์สสไปแนลโดย Cu^{2+} 8 ไอออนเข้าอยู่ใน 8 ช่องออกตะระฮีดรัล ส่วน Fe^{3+} 16 ไอออน โดยมี 8 ไอออนอยู่ใน 8 ช่องเตตระฮีดรัล และอีก 8 ไอออนอยู่ใน 8 ช่องออกตะฮีดรัล ดังนั้นวัสดุเฟอร์ไรต์ คือ $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ทำให้แมกเนติกโมเมนต์ของทองแดง (II) ในออกตะฮีดรัลไซต์จะหักล้างกับเหล็ก (III) ในเตตระฮีดรัลไซต์ และออกตะฮีดรัลไซต์เท่ากับ 1 Bohr magneton ในซ็บเซลล์ หรือ $1 \times 8 = 8$ Bohr magneton ค่าโมเมนต์เกิดขึ้นเนื่องจากการหมุนของอิเล็กตรอนเดี่ยวที่อยู่ออร์บิทัลภายใน ในแต่ละซุดมีทิศทางตรงข้ามกันแต่ไม่หักล้างกันจนหมด ทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กแบบ Ferrimagnetism (สันทัด, 2552) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแมกเนติกโมเมนต์สุทธิต่อโมเลกุลใน Spinel CuFe_2O_4 nanocatalyst

Ferrite	Structure	Tetrahedral site occupied	Octahedral site occupied	Net magnetic moments
$\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	Inverse spinel	Fe^{3+} 5 ←	Cu^{2+} Fe^{3+} 1 5 → →	1

การกำจัดโลหะทองแดงด้วยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรต์ (CuFe_2O_4) มีข้อดีคือ ใช้สารเคมีน้อย พื้นที่ในการบำบัดน้อย ค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างต่ำ พันธะเคมีในตะกอนเฟอร์ไรต์มีความแข็งแรงจึงมีความเสถียรค่อนข้างสูง ตะกอนมีสมบัติเป็น Ferrimagnetism จึงสามารถแยกออกได้ง่ายจากสารละลายสามารถนำไปใช้กับกรณีที่มีโลหะหนักปะปนอยู่หลายชนิด และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้เป็นคะตะลิสต์ในปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นการกำจัดโลหะทองแดงด้วยวิธีดังกล่าวจึงเป็นทางเลือกที่ควรพิจารณา เพื่อประยุกต์ใช้ของเสียทางเคมีให้เกิดประโยชน์สูงสุด (Rashad et al., 2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

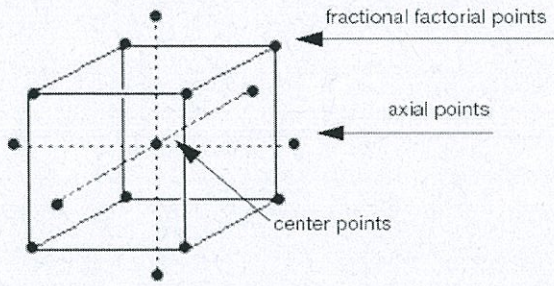
การกำจัดทองแดงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น (Yao et al., 2012) การศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ทำให้ต้องใช้จำนวนครั้งในการทดลองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือสมการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการออกแบบการทดลอง เพื่อทำนายและอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาเหล่านั้น ซึ่งพบว่าหลายๆปัจจัยส่งผลพร้อมกันในเวลาเดียวกันทำให้จำนวนครั้งในการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย (Yaghoobi et al., 2015) การออกแบบการทดลองโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยให้การเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพ เป็นการใช้ทรัพยากรในการทดลองคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพสูงสุด อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยที่ศึกษา (ตัวแปรอิสระ) มีการเปลี่ยนแปลง (Yaghoobi et al., 2012) ซึ่งการออกแบบการทดลองเป็นทางเลือกหนึ่งในการหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการทดลองทีละปัจจัย โดยรูปแบบของการทดลองมีหลากหลายรูปแบบ แต่จะขอกกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัย 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 (Aleboye et al., 2008 ; Ravikumar 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)

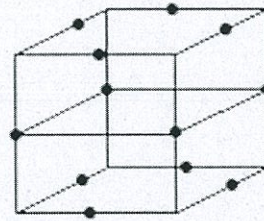
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Central Composite Design



ก.

Box-Behnken Design



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

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

- 2) Linear + interaction model

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

- 3) Linear +square model

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

- 4) Full quadratic model

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.) คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า หรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย

2) R-Squared (R^2) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของความแปรผันทั้งหมดใน Y อธิบายโดยความแปรผันใน X หรืออธิบายโดยความสัมพันธ์ระหว่าง X กับ Y ดังนั้นจึงเป็นค่าที่ใช้วัดว่าสมการที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลเพียงไร ถ้า R^2 มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณเหมาะสมกับข้อมูลมากขึ้น (Andersson, 2012)

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

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

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

1) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0: \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ 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) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัวในแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม 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 Histogram 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 สำหรับทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงหลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปริสเฟอไรท์ โดยประยุกต์ออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) เพื่อหาความสัมพันธ์ของ 3 ปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส โดยมี 5 ระดับปัจจัยของแต่ละตัวแปร จำนวน 20 สถานะการทดลอง 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-เบสที่เหมาะสมของการกำจัดทองแดงออกจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ต้องมีทองแดงไม่มากเกินไป 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 พบว่าสถานะที่เหมาะสมของอัตราส่วนของไอออนโลหะ : ไอออนเหล็ก (II) ของโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสี 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 และเมื่อนำสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวมาใช้ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ของโลหะผสมทองแดง-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 และทองแดง จากอุตสาหกรรมการชุบโลหะโดยปฏิกิริยาการให้ความร้อนโดยใช้ไอน้ำ(hydrothermal) ด้วยการเติมเหล็กจาก $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 ด้วยแอมโมเนีย ใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นตะกอนเฟอร์ไรต์ดังกล่าวมากำจัดไอออนทองแดง พบว่าสามารถกำจัดไอออนทองแดงได้ 76-84 % โดยน้ำหนัก และจากการทดสอบความเสถียรของตะกอนดังกล่าว พบว่าการชะละลายของโลหะที่ออกมามีค่าต่ำกว่ามา Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ย่อมแสดงว่าตะกอนดังกล่าวมีความเสถียรทางเคมี การใช้ขบวนการดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมในการนำของเสียทางเคมีกลับมาใช้ซ้ำเพื่อกำจัดของเสียทางเคมีจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ

Jiang S. *et.al.* (2010) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดง-เอทิลีนไดเอมีน เทตระแอซิดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาการแทนที่และตกตะกอนด้วยไอออนเหล็ก (II) โดยการออกซิไดส์ไอออนเหล็ก (II) ให้กลายเป็นไอออนเหล็ก (III) ได้ง่ายในสถานะที่มีออกซิเจน หลังจากนั้นไอออนเหล็ก (III) ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปทำสร้างพันธะกับเอทิลีนไดเอมีน เทตระแอซิด ไอออนปลดปล่อยไอออนทองแดง

(II) ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชต่ำกว่า 4 เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว ส่วนไอออนทองแดง (II) ที่ถูกปลดปล่อยจึงสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออนแล้วจึงตกตะกอนแยกออกจากสารละลาย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชระหว่าง 8-12 เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว โดยอัตราส่วนโมลที่เหมาะสมระหว่างไอออนเหล็ก (II) : ไอออนทองแดง > 12 สามารถกำจัดสารละลายความเข้มข้นของไอออนทองแดง จากความเข้มข้น 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 และ ทองแดง 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) ได้ทำการศึกษาศึกษาโดยการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาสไปเนลออกไซด์ของทองแดง-เหล็ก ในสารละลายกรดซัลฟูริกโดยการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่อุดมไปด้วยแก๊สไฮโดรเจน จึงทำให้มีพื้นผิวของไอออนทองแดง (I) จำนวนมาก เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาสไปเนลออกไซด์ของทองแดง-เหล็กไปใช้ร่วมกับอะลูมิเนียมออกไซด์ จึงสามารถกำจัดไดเมทิลอีเธอร์ให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์ซัลเฟต เพนทระไฮเดรต (Coppersulfate pentahydrate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Chemical ประเทศออสเตรเลีย
2. เฟอร์รัสซัลเฟต (Ferrous sulfate) $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Chemical ประเทศออสเตรเลีย
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Sulfuric acid, H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Chemical ประเทศออสเตรเลีย
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Ajax Chemical ประเทศออสเตรเลีย
5. สารละลายมาตรฐานทองแดง 1,000 ppm เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมนี

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบสยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827 บริษัท Metrohm ประเทศสวิสเซอร์แลนด์
2. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น SpectrAA-200 บริษัท Compaq Hewlett Packard ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AUX 220 บริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น
4. เครื่องแก้วต่าง ๆ

3.2 การเตรียมน้ำเสียและแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

3.2.1 การเตรียมน้ำเสียเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมโมเนียมสังเคราะห์

1. เตรียมน้ำเสียเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมโมเนียมสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นของคอปเปอร์ไอออน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นของไอออนทองแดงใกล้เคียงกับน้ำเสียที่เกิดจากการทดลอง เรื่อง สารประกอบเชิงซ้อนโคออร์ดิเนชัน วิชาปฏิบัติการเคมีทั่วไป จากห้องปฏิบัติการเคมี อาคารศูนย์เรียนรวม สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยอบไล่ น้ำ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่ง $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 7.8576 กรัม นำมาเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโมลของไอออนทองแดง : แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 : 4 ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนจนมีปริมาตร 1 ลิตร

2. วิเคราะห์ความเข้มข้นไอออนของโลหะทองแดง โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.1 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

พารามิเตอร์	Wavelength (nm)	Flame type	Background correction	Linear to (mg/L)	Sensitivity Check (mg/L)
ทองแดง	324.8	Air-acetylene	on	1.6	1.3

3.2.2 ออกแบบแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD)

1. กำหนดค่าของ Coded Value ของแต่ละปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยถูกแบ่งออกเป็น 5 ระดับ เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมตามวิธีการของ RSM เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ พีเอช (X_1) อุณหภูมิ (X_2) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (X_3) ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 5 ระดับ คือ $-\alpha$, -1, 0, +1 และ $+\alpha$ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า coded value สำหรับตัวแปรของแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

ปัจจัย	ตัวแปร	Coded Value				
		$-\alpha$	-1	0	1	α
พีเอช	X_1	8	9	10	11	12
อุณหภูมิ (องศาเซนเซียส)	X_2	43	50	60	70	77
เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (นาที)	X_3	40	60	90	120	140

2. ออกแบบแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) โดยใช้โปรแกรม Minitab จะได้แผนการทดลอง จำนวน 20 สภาวะการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตประเภท 3 ระดับปัจจัย

Std.	No.	พีเอช	อุณหภูมิ (C)	เวลาเกิดปฏิกิริยา (นาที)
19	1	10	60	90
10	2	12	60	90
3	3	9	70	60
5	4	9	50	120
9	5	8	60	90
4	6	11	70	60
14	7	10	60	140
12	8	10	77	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) แผนการทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิตประเภท 3 ระดับปัจจัย

Std.	No.	พีเอช	อุณหภูมิ (C)	เวลาเกิดปฏิกิริยา (นาที)
20	9	10	60	90
2	10	11	50	60
17	11	10	60	90
15	12	10	60	90
16	13	10	60	90
18	14	10	60	90
6	15	11	50	120
1	16	9	50	60
8	17	11	70	120
11	18	10	43	90
7	19	9	70	120
13	20	10	60	40

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 ศึกษาการกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$) ตามแผนการทดลองแบบเซนทรัลคอมโพสิต มีวิธีทดลองดังต่อไปนี้

1. ใส่ น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจาก 3.2.1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในรีแอกเตอร์ ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิปรับอุณหภูมิ และ ตรวจสอบอุณหภูมิภายในรีแอกเตอร์ด้วยเทอร์โมมิเตอร์
2. แปรค่าพีเอช ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือ กรดซัลฟูริก ให้ได้ค่าพีเอช ตามแผนการทดลอง โดยปิเปตสารละลายดังกล่าว 1 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
3. เติมเฟอร์รัสซัลเฟต ด้วยอัตราส่วนโดยโมลของทองแดง : เหล็ก เท่ากับ 1:2 ลงในรีแอกเตอร์ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ
4. ทำการเติมอากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา (นาที) ตามแผนการทดลอง จดบันทึกสีของตะกอนที่ได้
5. กรองตะกอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายส่วนใสมาวัดปริมาณของทองแดงที่เหลือโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
6. นำตะกอนล้างด้วยน้ำกลั่นทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง ตรวจสอบความเป็นเป็นสารแม่เหล็กอย่างคร่าวๆ โดยทดสอบกับแท่งแม่เหล็ก
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 1- 6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับ ข้อ 1- 7 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนแทนน้ำเสียสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงพาณิชย์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ทำการฉีกใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ศึกษาการสร้างความทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง หลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) ตามแผนการทดลอง Central Composite Design (CCD) ได้ 4 แบบ คือ Linear model, Linear + interaction model, Linear + square model และ Full quadratic model โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกแบบจำลองสมการ Quadratic Model จากตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า Standard Deviation (Std. Dev.), R-Squared (R^2), Adjusted R-Squared ($\text{Adj-}R^2$) และ Predicted R-Squared ($\text{Pred-}R^2$)
2. ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองสมการ Quadratic Model ที่เลือกกว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) โดยมีการทดสอบของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกันและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว
3. ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยใช้แผนภูมิควบคุมคุณภาพ จากสมมติฐานว่ารูปแบบของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ เป็นอิสระต่อกัน และ มีความแปรปรวนเท่ากัน
4. เปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงจากการทดลองตามแผนการทดลอง Central Composite Design (CCD) และ ค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่เลือก
5. คำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนของความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดงจากการทดลองกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองที่เลือก

3.3.3 วิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงสูงสุด โดยการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการประมวลหาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย ในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยกระบวนการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) โดยการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)
2. ทำการประมวลผลค่าแสดงความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยและผลตอบที่มีค่าความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) จากค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยโดยใช้ Response Optimizer

3.3.4 ทำการทดลองเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการสร้างพื้นผิวตอบสนองและจากสมการทำนายของแบบจำลอง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากข้อ 3.2.1 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในรีแอกเตอร์ ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ
2. ปรับอุณหภูมิ และ ตรวจสอบอุณหภูมิภายในรีแอกเตอร์ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ โดยใช้อุณหภูมิเหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) โยชน์ด้านการค้าไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แปรค่าพีเอชโดยใช้ค่าพีเอชเหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) โดยการปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือกรด ซัลฟูริกให้ได้ค่าพีเอชที่เหมาะสมโดยเปิดสารละลายดังกล่าว 1 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

4. เติมเฟอร์รัสซัลเฟตด้วยอัตราส่วนโดยโมลของทองแดง : เหล็ก เท่ากับ 2:1 ลงในรีแอกเตอร์ซึ่งจุ่มอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

5. ทำการเติมอากาศ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา (นาที) โดยใช้เวลาเหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) จดบันทึกสีของตะกอนที่ได้

6. กรองตะกอนด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วนำสารละลายส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณทองแดง ที่เหลือโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

7. นำตะกอนล้างด้วยน้ำกลั่น ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องตรวจสอบความเป็นเป็นสารแม่เหล็กอย่างคร่าวๆโดยทดสอบกับแท่งแม่เหล็ก

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับ ข้อ 1 - 7 อีก 9 ข้อ

9. ทำแบลงค์เช่นเดียวกับ ข้อ 1 - 8 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนแทนน้ำเสียสังเคราะห์

10. ประมวลผลค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลองดังกล่าว

11. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากการกำจัดทองแดงในสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยกระบวนการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) โดยใช้สมการการทำนายของแบบจำลองที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบและคำนวณร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและการใช้สมการทำนาย

สถานที่ทำการทดลอง

- ห้องปฏิบัติการเคมี อาคารศูนย์เรียนรวมสมเด็จพระเทพฯ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ห้องปฏิบัติการเคมี อาคารคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงไอออนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ โดยแบ่งการศึกษา ออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ คือ (1) ศึกษาการกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) ตามแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (2) ศึกษาการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง (3) การศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่อวิเคราะห์หาค่าของปัจจัยที่เหมาะสมของการกำจัดทองแดง (4) ผลการศึกษาเปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือจากการนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมจากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) และจากแบบจำลองสมการทำนายที่เหมาะสม ได้ผลการศึกษา ดังนี้

4.1 ผลศึกษาการกำจัดทองแดงตามแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

สารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมินสังเคราะห์ที่มีลักษณะที่น้ำเงินดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากทองแดงอยู่ในรูปสารละลายเชิงซ้อนของ $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ ซึ่งมีความเสถียรสูง เนื่องจากมีค่าคงที่การเกิดสารละลายเชิงซ้อนสูงเท่ากับ 4.3×10^{12}



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์แอมมินสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์สมบัติของสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาพบว่ามีความพีเอชเท่ากับ 9.78 มีปริมาณทองแดง 1934.4166 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่สามารถตรวจพบปริมาณของเหล็ก และจากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงไอออนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปริสเฟอไรท์ โดยแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) ได้ผลการทดลอง (ดังแสดงในตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 ผลของแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตกับความเข้มข้นทองแดงที่คงเหลือ

Std.	No.	พีเอช	อุณหภูมิ (C)	เวลาเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้นทองแดงไอออนที่เหลือ (mg/L)
19	1	10	60	90	23.5494
10	2	12	60	90	236.0875
3	3	9	70	60	302.7778
5	4	9	50	120	254.0959
9	5	8	60	90	371.8428
4	6	11	70	60	244.3991
14	7	10	60	140	21.9662
12	8	10	77	90	120.9132
20	9	10	60	90	23.9452
2	10	11	50	60	199.2793
17	11	10	60	90	26.9136
15	12	10	60	90	21.9662
16	13	10	60	90	38.1935
18	14	10	60	90	22.7578
6	15	11	50	120	120.7153
1	16	9	50	60	395.3922
8	17	11	70	120	120.1217
11	18	10	43	90	160.6899
7	19	9	70	120	35.6209
13	20	10	60	40	274.2811

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รายงานวิจัยฉบับประมัตินเงินรายได้ 2560 ทััดแปลงเนื้อหา แะ 24 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลศึกษาการสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดง จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ หลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) โดยตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16.0 ได้แก่

4.2.1. ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง

จากผลการทดลองตามแผนการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต เพื่อทำนายความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16.0 สามารถจำลองสมการแบบการทดลอง Quadratic Model ได้ 4 แบบ ได้แก่ 1) Linear model 2) Linear + interaction model 3) Linear + square model และ 4) Full quadratic model ได้ค่า Standard Deviation (Std. Dev.), R-Squared (R^2), Adjusted R-Squared ($\text{Adj-}R^2$) และ Predicted R-Squared ($\text{Pred-}R^2$) ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองสมการทำนาย

แบบจำลอง	S	R^2	$\text{Adj-}R^2$	$\text{Pred-}R^2$
Linear model	110.317	35.54	23.46	3.83
Linear + interaction model	45.8440	90.96	86.78	80.50
Linear + square model	114.336	43.74	17.78	0.00
Full quadratic model	0.806888	99.16	98.40	93.55

จากตารางที่ 4.2 พบว่าแบบจำลอง Full quadratic model มีค่า Standard Deviation (Std. Dev.) 0.80688, R-Squared (R^2) 99.16, Adjusted R-Squared ($\text{Adj-}R^2$) 98.40 และ Predicted R-Squared ($\text{Pred-}R^2$) 93.55 แสดงว่าแบบจำลอง Full quadratic model มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวแทนอธิบายผลการทดลอง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลอง โดยทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) มีการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวและทดสอบของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก) มีการทดสอบ 2 ลักษณะ ดังนี้ (Minitab, 2010)

1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value ของตัวแปร รวมถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ พบว่า พีเอช อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าจะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (Montgomery, 2008) แสดงว่าตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อ การกำจัดทองแดงอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า วิทยานิพนธ์หรือประจักษ์นัยรายได้ 2560 25

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนจากแบบจำลองสมการทำนาย

Term	p-value
Model	0.000
pH	0.000
Temperature	0.000
Time	0.000
pH x pH	0.000
Temperature x Temperature	0.000
Time x Time	0.000
pH x Temperature	0.000
pH x Time	0.001
Temperature x Time	0.003

หมายเหตุ S = 15.9678, $R^2 = 99.16$ และ R^2 (adj) = 98.40

2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน จากค่าความแปรปรวน (Analysis of variance (ANOVA) จากตารางที่ 4.4 พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่า p-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัวในแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์แปรปรวนจากแบบจำลองสมการ Full Quadratic

Source	p-value
Linear	0.000
Square	0.000
Interaction	0.000

จากตารางที่ 4.4 พบว่าในส่วนของ Linear terms (pH, Temp และ Time) พบว่า ความแปรปรวนของ Linear terms มี p-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.4 พบว่าในส่วนของอิทธิพลหลักอันดับที่สอง (Square terms) ซึ่งได้แก่ pH x pH (pH^2), Temp x Temp ($Temp^2$) และ Time x Time ($Time^2$) และส่วนของอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction terms) ซึ่งได้แก่ pH x Temp , pH x Time และ Temp x Time พบว่า ความแปรปรวนของ Square terms และ Interaction terms มี p-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รายงานวิจัยฉบับประมัตน์เงินรายได้ 2560 ที่ดัดแปลงเนื้อหา แล 26 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้พบว่า Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.007 แสดงว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเพียงพอในการนำมาใช้ทำนายผลการทดลองได้ เมื่อพิจารณาค่า R-Squared (R^2) มีค่าเท่ากับ 99.16 หมายความว่า สามารถใช้สมการดังกล่าวอธิบายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายได้ร้อยละ 99.16

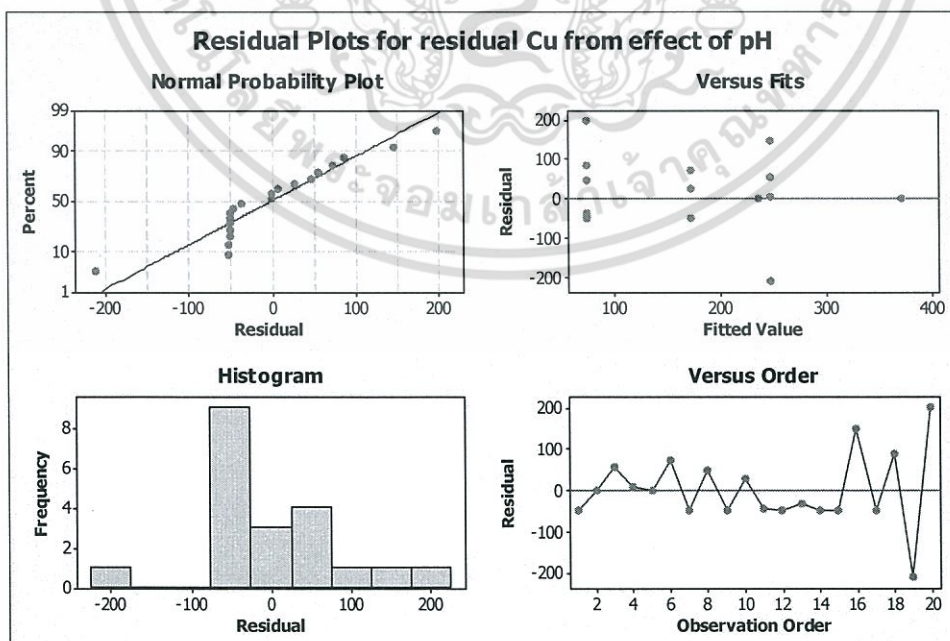
สมการทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology จากแบบจำลอง Full Quadratic ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ค่าพีเอช, อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา) กับ ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย แสดงได้ดังสมการที่ 4.1

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} \\ = 15538.9 - 2351 \text{ pH} - 89.3 \text{ Temp.} - 15.5 \text{ Time} + 98.4 \text{ pH}^2 + 0.4 \text{ Temp}^2 + \\ 4.4 \text{ pH} \times \text{Temp} + 0.9 \text{ pH} \times \text{Time} - 0.1 \text{ Temp} \times \text{Time} \end{aligned} \quad (4.1)$$

4.2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยใช้แผนภูมิควบคุมคุณภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability)

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากอิทธิพลของค่าพีเอช ผลการทดสอบมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลาง การกระจายตัวของข้อมูลมีความสม่ำเสมอ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



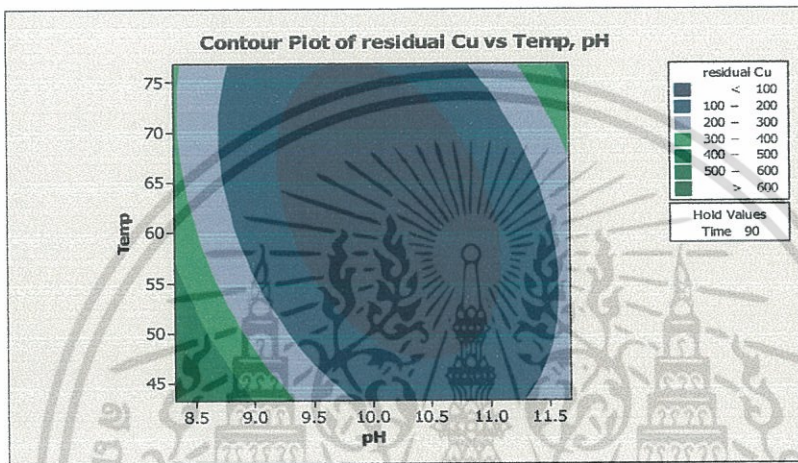
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของค่าพีเอช

4.3 ผลศึกษาการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) สูงสุด จากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM)

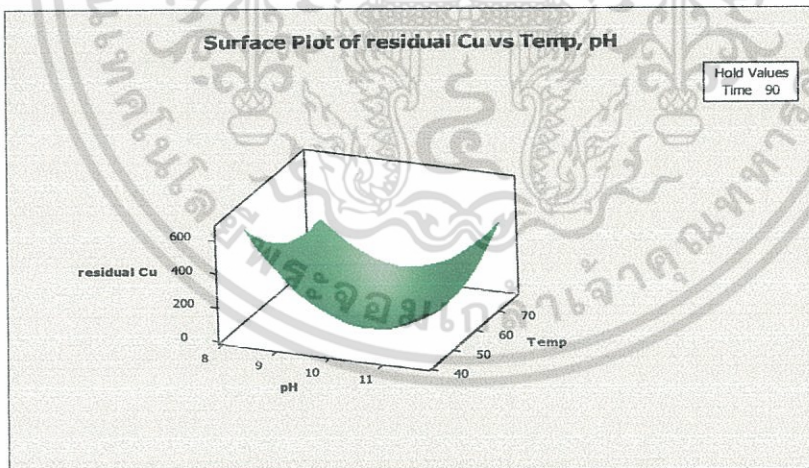
4.3.1 ผลการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจากแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

4.3.1.1. อิทธิพลของค่าพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อกำหนดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 90 นาที (ดังแสดงในรูปที่ 4.5)

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.5 พื้นผิวผลตอบสนองของอุณหภูมิและค่าพีเอชที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ

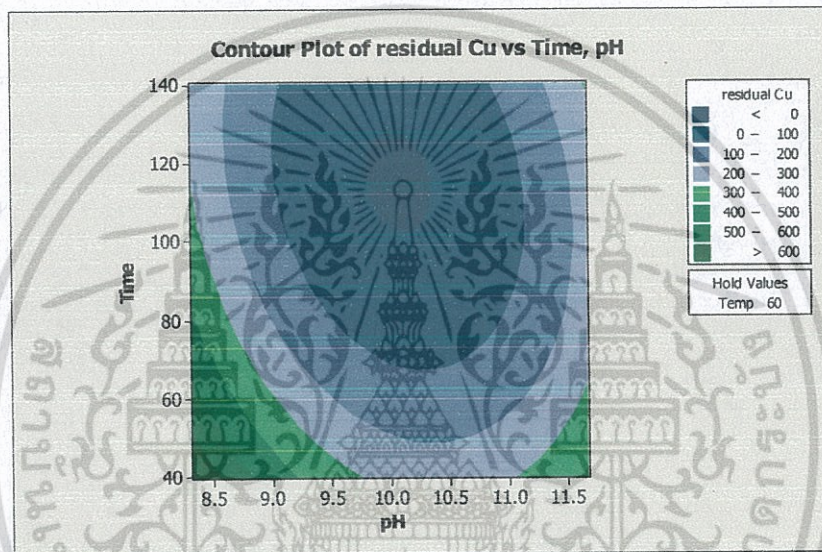
(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

จากรูปที่ 4.5 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นมีค่า 8.5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 45 องศาเซลเซียสเป็น 75 องศาเซลเซียสทำให้การกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 2560 mg/L เป็น 2900 mg/L ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นมีค่า 8.5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 45 องศาเซลเซียสเป็น 75 องศาเซลเซียสทำให้การกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 2560 mg/L เป็น 2900 mg/L

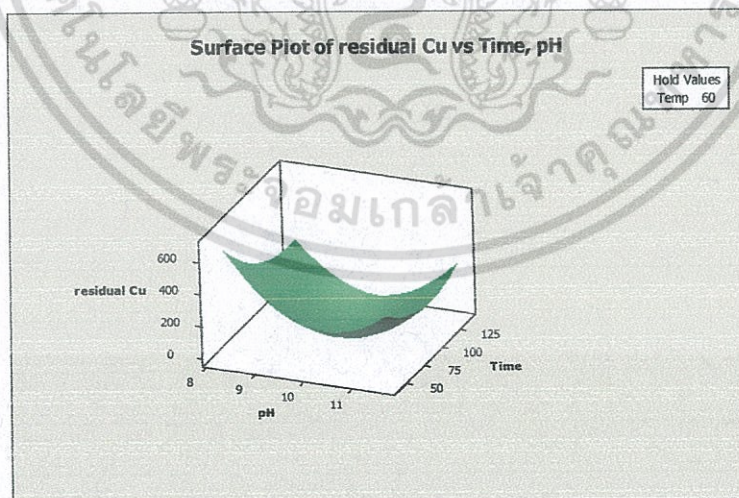
เป็น 55 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง โดยทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 200-300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มค่าพีเอช ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นย่อมแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่าพีเอชที่เริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา โดยพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50 องศาเซลเซียส จะทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังการบำบัดน้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.1.2. อิทธิพลของค่าพีเอชและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย เมื่อกำหนดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส (ดังแสดงในรูปที่ 4.6)

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.6 พื้นผิวผลตอบสนองของพีเอชและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ

(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

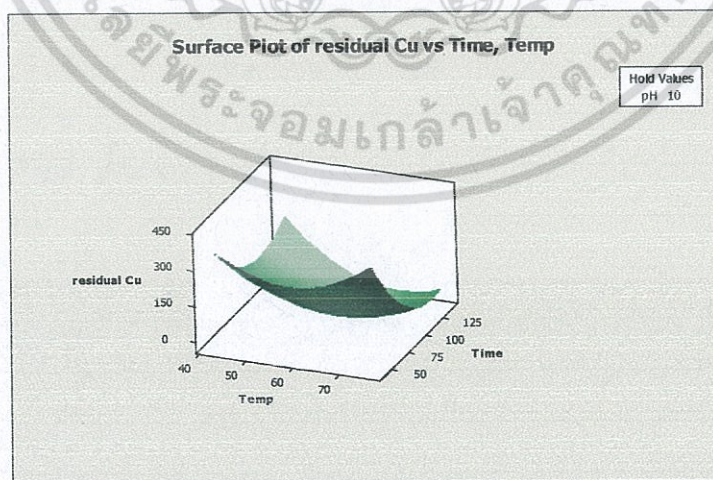
จากรูปที่ 4.6 เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นมีค่า 8.5 การเพิ่มขึ้นของเวลาจาก 40 เป็น 60 นาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง โดยทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้อยู่ในช่วง 400 - 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบำบัด ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นย่อมแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่าพีเอชที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา โดยพบว่าระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 70 นาที จะทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังการบำบัดอยู่ในช่วง 0 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.1.3 อิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย เมื่อกำหนดค่าพีเอช 10 (ดังแสดงในรูปที่ 4.7)

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.7 พื้นผิวผลตอบสนองของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ

(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า รายงานวิจัยปีงบประมาณนี้เงินรายได้ 2560 หักตัดแปลงเนื้อหา 31 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

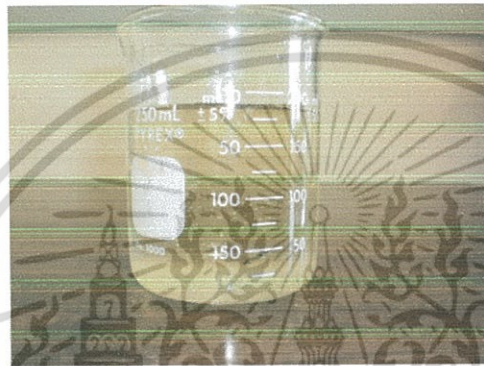
4.4 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย

เพื่อทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงเพื่อให้เหลือความเข้มข้นของแดงน้อยสุดจากสมการที่ 4.1 จึงได้ทำการทดลองกำจัดทองแดงตามสภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 การทดลอง เพื่อทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยโดย

ตารางที่ 4.5 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย

ลำดับ ภาพทดลอง	pH เริ่มต้น	อุณหภูมิ (° C)	เวลา ปฏิกิริยา (min)	ปริมาณไอออนทองแดง (ppm)		% ความ คลาดเคลื่อน
				การทดลอง	การทำนาย	
1	10	60	90	23.5494	26.188	11.20453
2	12	60	90	236.0875	239.067	1.262032
3	9	70	60	302.7778	301.686	-0.36059
4	9	50	120	254.0959	236.355	-6.98197
5	8	60	90	371.8428	370.017	-0.49101
6	11	70	60	244.3991	261.323	6.924698
7	10	60	140	21.9662	21.166	-3.64287
8	10	77	90	120.9132	100.314	-17.0364
9	10	60	90	23.9452	26.188	9.366387
10	11	50	60	199.2793	178.360	-10.4975
11	10	60	90	26.9136	26.188	-2.69603
12	10	60	90	21.9662	26.188	19.21953
13	10	60	90	38.1935	26.188	-31.4334
14	10	60	90	22.7578	26.188	15.07263
15	11	50	120	120.7153	120.991	0.228389
16	9	50	60	395.3922	396.530	0.287765
17	11	70	120	120.1217	118.167	-1.62727
18	10	43	90	160.6899	182.443	13.53732
19	9	70	120	35.6209	55.724	56.43625
20	10	60	40	274.2811	276.232	0.711278
สภาวะเหมาะสม	10	60	102	2.77 ± 0.21	2.00	-27.7978

จากตารางที่ 4.4 พบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายมีค่าเท่ากับ 2.77 ± 0.21 โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 27.80 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ที่กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความถูกต้องในการทำนายสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดทองแดง ซึ่งจากผลการทดลองเปรียบเทียบลักษณะสีของสารละลายคอปเปอร์-แอมมีนสังเคราะห์เริ่มต้นและหลังผ่านการกำจัดทองแดงที่สภาวะเหมาะสม มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์แอมมีนสังเคราะห์หลังผ่านการกำจัดทองแดง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษากำจัดทองแดงไอออนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปริคเฟอร์ไรท์โดยออกแบบแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต (Central Composite Design: CCD) โดยผลการศึกษาก่อสร้างสมการทำนายความเข้มข้นทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเชิงซ้อนของทองแดง หลังกำจัดทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปริคเฟอร์ไรท์ (CuFe_2O_4) โดยตรวจสอบความเหมาะสมของสมการทำนายและรูปแบบการทดลองโดยใช้หลักการทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 16.0 ได้แก่

5.1.1. ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลอง

จำลองสมการแบบการทดลอง Quadratic Model ได้ 4 แบบ ได้แก่ 1) Linear model 2) Linear + interaction model 3) Linear + square model และ 4) Full quadratic model โดยวิเคราะห์จากค่า Standard Deviation (Std. Dev.), R-Squared (R^2), Adjusted R-Squared (Adj- R^2) และ Predicted R-Squared (Pred- R^2)

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลอง โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกันและทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก) มีการทดสอบ 2 ลักษณะดังนี้ (Minitab, 2010)

1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว โดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติตั้งนี้จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่า P-value ของตัวแปร รวมถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ พบว่า พีเอช อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าจะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม (Montgomery, 2008) แสดงว่าตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวมีความสำคัญและส่งผลกระทบต่อ การกำจัดทองแดงอย่างมีนัยสำคัญ

2) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน จากค่าความแปรปรวน (Analysis of variance (ANOVA) จากตารางที่ 4.3 พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (หรือยอมรับสมมติฐาน H_1) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัวในแบบจำลองสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

นอกจากนี้พบว่าสมการทำนายที่เลือก คือ มีค่า Lack of Fit (ภาคผนวก ก) เท่ากับ 0.007 แสดงว่า สมการทำนายมีความเหมาะสมในการทำนายผลการทดลอง เพราะจากการพิจารณาค่า R-Squared (R^2) มีค่าเท่ากับ 0.9916 หมายความว่า สามารถใช้สมการดังกล่าวอธิบายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายได้ร้อยละ 99.16 เมื่อค่า R^2 เข้าใกล้ 1 จะหมายถึงสมการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมในการใช้อธิบายความสัมพันธ์ของผลตอบสนองกับตัวแปร

3) ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

ผลการทดสอบค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ โดยจากกราฟฮิสโตแกรมมีการกระจายตัวเป็นรูปทรงปกติ เพราะค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลาง ความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability) ของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งพบว่ากราฟไม่มีลักษณะลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล และการตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของค่าส่วนตกค้าง พบว่าการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบและไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน

5.1.3 ผลการศึกษาหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยคือ อุณหภูมิ เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงออกจากสารละลายเชิงซ้อนทองแดงโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ ($CuFe_2O_4$) สูงสุด จากการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)

1) ผลการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจากแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต สามารถนำมาสร้างพื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ได้ผลดังในรูปที่ 4.3-4.5

2) ผลการศึกษาหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง จากสมการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง ที่ได้จากแบบจำลอง Full Quadratic สามารถนำมาวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม โดยฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 16.0 สำหรับคำนวณหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ ในการประมวลผล

5.1.4 ผลการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณทองแดงที่เหลือจากการทดลองกับจากการทำนายของแบบจำลอง จากการใช้สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองการทดลองเพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายไอออนทองแดงเหลืออยู่ เท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายมีค่าเท่ากับ 2.77 โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 27.80 (ตารางที่ 4.4) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ที่กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย ดังนั้นแบบจำลองจึงมีความเหมาะสมในระดับดี ในการทำนายความเข้มข้นของทองแดงไอออนที่เหลืออยู่ โดยลักษณะสีของสารละลายคอปเปอร์แอมมีนสังเคราะห์เริ่มต้นและหลังผ่านการกำจัดทองแดงที่สภาวะเหมาะสม มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการใช้สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองการทดลองเพื่อให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายไอออนทองแดงเหลืออยู่ เท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่มีค่าเท่ากับ 2.77 โดยมีร้อยละความคลาดเคลื่อน 27.80 ซึ่งจัดว่ามีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง อาจจะเป็นเนื่องจากการกำหนดเป้าหมายและค่าขอบเขตล่างไม่ได้อยู่ในช่วงที่ได้จากผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิตที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า หรือนำไปวิจัยใบประมัตถ์เงินรายได้ 2560

เอกสารอ้างอิง

- กนกพร สุพงษ์. 2557. การกำจัดทองแดงไอออนในน้ำเสียห้องปฏิบัติการด้วยปฏิกิริยารีดอกซ์ ร่วมกับบิโলেคโตรกราวิเมตรี. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2548. แนวทางการจัดการของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- ฉัตรพร คล้ายแก้ว. 2547. การกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสีออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธวัชชัย ศรีวิบูลย์ และสมบุรณ์ แก้วปิ่นทอง. 2547. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2. พิมพ์ครั้งที่ 7. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- พนารัตน์ นิลเจียรนัย. 2558. เคมีอินทรีย์ 2. สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม.
- พรชวรณ ศรีนาค. 2556. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรศักดิ์ สมรไกรสรกิจ. 2557. กระบวนการโคแอกกูเลชัน (Coagulation) และฟล็อกคูเลชัน (Flocculation). กองจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษ การประปานครหลวง
- ศูนย์การจัดการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมความปลอดภัยและอาชีวอนามัย. 2546. คู่มือการจัดแยกประเภท และจัดเก็บของเสียภายในห้องปฏิบัติการ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. 2556. ความเป็นพิษของทองแดง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.Atsda.cdc.gov/tfacts/132.html>. Copper: 10 กันยายน 2556.
- ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตราย. 2558. ทองแดง. สำนักควบคุมวัตถุอันตราย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2556. รายงานภาวะอุตสาหกรรมทองแดง 2555. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อรุณี คงศักดิ์ไพศาล. 2552. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2558. รายงานภาวะอุตสาหกรรมทองแดง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

เอกสารอ้างอิง

- Aleboye, A., Daneshvar, N., and Kasiri, M. B. 2008. Optimization of C.I. Acid Red 14 azo dye removal by electrocoagulation batch process with response surface methodology. Chemical Engineering and Processing, Vol. 47: 827–832.
- Chaiyaraksa C. and Klaikeow C., 2006. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by ferritisation. KMITL Science Technology Journal. Vol. 6 (2) : 46-50.
- Chen D., Zhong Y., Zhu H.J., Liu Z.Z., Xu Y.F., Liu Q. and Qian G.R., 2008. Ferrite process of electroplating sludge and enrichment of copper by hydrothermal reaction. Separation and Purification Technology. Vol. 62 : 297-303.
- Chen T.C., Priambodo R., Huang R.L. and Huang Y.H., 2013. The effective electrolytic recovery of dilute copper from industrial wastewater. Journal of Waste Management. Vol. 2013: 1-6.
- Dandia A., Jain A.K. and Sharma S. 2013. CuFe₂O₄ nanoparticles as a highly efficient and magnetically recoverable catalys for the synthesis of medicinally privileged spiropyrimidine scaffolds. Journal of Electronic Supplementary Material (ESI) for RSC Advances. Vol. 2013: 1-11.
- Dermentzis K., Davidis A., Papadopoulou D., Christoforidis A. and Ouzounis K. 2009. Copper removal from industrial wastewaters by means of electrostatic shielding driven electrodeionization. Journal of Engineering Science and Technology. Vol.1: 131-136.
- Doncaster C.P. and Andrew J.H.D. 2007. Analysis of Variance and Covariance: How to Choose and Construct Models for the Life Sciences, Cambridge University Press. 2007: 1-14.
- Gharib A., Pesyan N.N., Fard L.V. and Roshani1 M. 2014. Catalysis Synthesis of α -aminonitriles Using Nano Copper Ferrite (CuFe₂O₄) under Green Conditions. Journal of Hindawi Publish Corporation Organic Chemistry International. Vol. 2014: 1- 8.
- Heredia, J.B. and Martin, J.S., 2009. Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent. Journal of Hazardous Materials. 165, 1215-1218.

เอกสารอ้างอิง

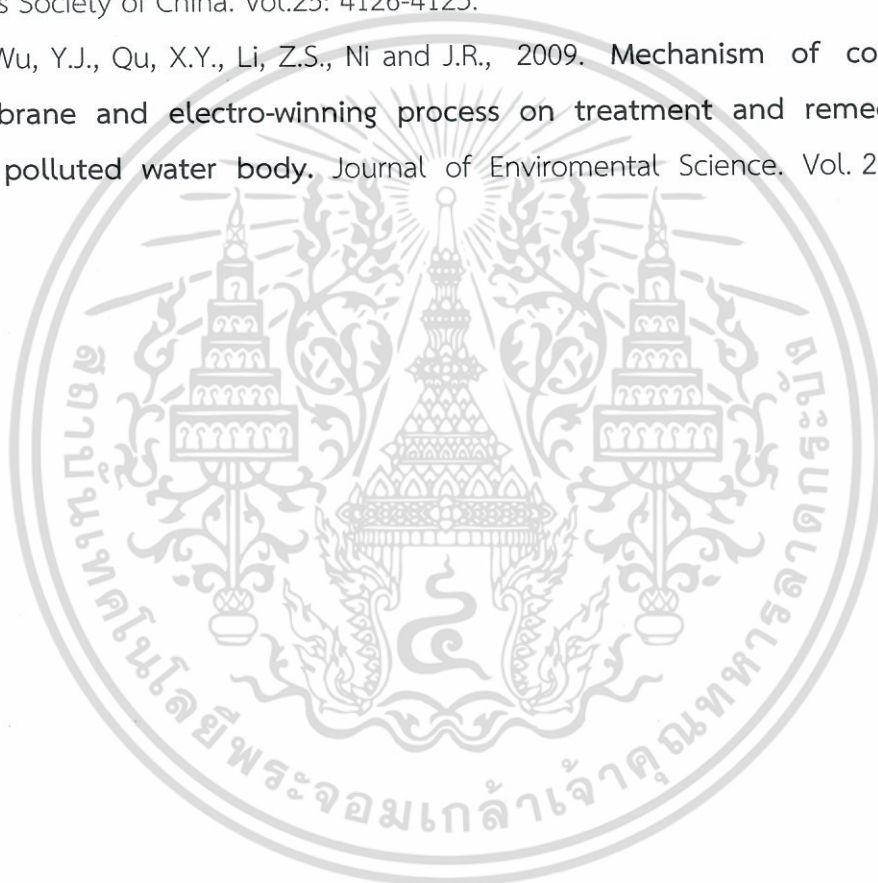
- Hirunsit P. and Faungnawakij K. 2013. Cu-Cr, Cu-Mn and Cu-Fe Spinel-Oxide-Type Catalysts for Reforming of Oxygenated Hydrocarbons. The journal of Physical Chemistry. Vol. 117: 23757-23765.
- Hu j., Chen Q., Hu H., Chen X., Ma Q. and Yin Z. 2012. Extraction behavior and mechanism of Cu (II) in ammoniacal sulfate solution with β -diketone. Journal of Hydrometallurgy. Vol. 127: 54-61.
- Huisman, J.L., Schouten, G. and Schuitz, C., 2006. Biologically produced sulphide for purification of process streams, effluent treatment and recovery of metals in the metal and mining industry. Hydrometallurgy 83, 106-113.
- Jiang S., Qu J. and Xiong Y., 2010. Removal of chelated copper from wastewaters by Fe^{2+} -based replacement-precipitation. Environmental Chemistry Letters. Vol.8 : 339-342.
- Kanokporn Supong and Suwannee Junyapoon. 2014. Removal of Copper from synthetic wastewater by Mg-based replacement reaction. Burapha University, Thailand.
- Mahmoodi N.M., Gordefamarazi S.S. and Kiakhani M.S., 2013. Dye removal using modified copper ferrite nanoparticle and RSM analysis. Environmental Monitoring and Assessment. Vol. 185: 10235-10248.
- Manova E., Tsoncheva T., Paneva D., Popova M., Velinov N., Kunev B., Tenchev K. and Mitov I., 2011. Nanosized copper ferrite materials: Mechanochemical synthesis and characterization. Journal of Hazardous Materials Vol. 184: 1153-1158.
- Marcin D., Mario D. and Terese L. 2015. Application of a Central Composite Design for the Study of NO_x Emission Performance of a Low NO_x Burner. Journal of Energies. Vol. 8: 3606-3627.
- Ming Z. and Xiaojun W., 2011. Treating Wastewater Containing Nickel, Chromium, Zinc and Copper by Ferrite Process. Advancing Technology for Humanity Journals & Magazines. Vol. 11 : 3744-3747.
- Minitab Version 16. 2010. Statistical Software, Minitab inc. State College, PA., USA.

เอกสารอ้างอิง

- Moghaddam, M. Y., Shafaei, S. Z., Noaparast, M., Doulati, A. F., Abdollahi, H., Ranjbar, M., . . . Schaffie, M. (2015). Empirical model for bio-extraction of copper from low grade ore using response surface methodology. *Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25, 4123-4126.
- Montgomery D.C. 2008. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Sons.
- Myers R.H, Montgomery D.C and Anderson C.M. 2009. **Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments**. New York: John Wiley & Sons.
- Rajendran R, Kanimozhi B, Prabhavathi P, Dinesh Kumar S, Santhanam P, Abirami M, Karthik Sundaram S and Manikandan A. 2015. **A Method of Central Composite Design (CCD) For Optimization of Biodiesel Production from Chlorella vulgaris**. *Petroleum & Environmental Biotechnology*.vol 6(3) : 219.
- Rashad M, Mohamed R, Ibrahim M, Ismail L and Abdel-Aal E. 2012. **Magnetic and catalytic properties of cubic copper ferrite nanopowders synthesized from secondary resources**. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 23: 315-323.
- Ravikumar, K., Krishnan, S., Ramalingam, S. and Balu, K. 2007. **Optimization of process variables by the application of response surface methodology for dye removal using a novel adsorbent**. *Dyes and Pigments*, Vol. 72: 66-74.
- Revath M., Saravanan M., Chiya A.B., and Velan M., 2012. **Removal of Copper, Nickel and Zinc Ions from Electroplating Rinse Water**. *Clean-Soil, Air, Water*. Vol. 40(1): 66-79.
- Tu, Y. J., Chang, C. K., You, C. F., & Wang, S. L. (2012). **Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process**. *Journal of Hazardous Materials*, 209, 379-384.
- Veis, M., Antor, R., Visnovsky, S., Kulkarni, P., Venkataramani, N., Prasad, S. and Krishnan, R. 2013. **Complete Permittivity Tensor in Sputtered CuFe₂O₄ Thin Films at Photon Energies between 2 and 5 Ev**. *Journal of materials science and engineering* 6, 4096-4108.
- Yao T, Chien K, Chen Y and Shan W. 2012. **Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process**. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 209: 379-384.

เอกสารอ้างอิง

- Yaghobi M M., Ranjbar M., Manafi Z., Schaffie M, and Jahani M. 2012. **Modeling and optimizing bacterial leaching process parameters to increase copper extraction from a low-grade ore.** Journal of Minerals Engineering. Vol. 32: 5-7.
- Yaghobi M M., Shafaei S.Z., Noaparast M., Doulati A.F., Abdollahi H. Ranjbar M., Manafi Z., and Schaffie M. 2015. **Empirical model for bio-extraction of copper from low grade ore using response surface methodology.** Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol.25: 4126-4123.
- Zhang, L.N., Wu, Y.J., Qu, X.Y., Li, Z.S., Ni and J.R., 2009. **Mechanism of combination membrane and electro-winning process on treatment and remediation of Cu^{2+} polluted water body.** Journal of Environmental Science. Vol. 21:764-769.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนการทดลองแบบ CCD

ภาคผนวก ก

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	StdOr	RunC	PtTyp	Block	pH	Temp	Time	residual Cu	StdC	RunC	Block	PtType
1	19	1	0	1	10	60	90	23.5494	1	1	1	1
2	10	2	-1	1	12	60	90	236.0875	2	2	1	1
3	3	3	1	1	9	70	60	302.7778	3	3	1	1
4	5	4	1	1	9	50	120	254.0959	4	4	1	1
5	9	5	-1	1	8	60	90	371.8428	5	5	1	1
6	4	6	1	1	11	70	60	244.3991	6	6	1	1
7	14	7	-1	1	10	60	140	21.9662	7	7	1	1
8	12	8	-1	1	10	77	90	120.9132	8	8	1	1
9	20	9	0	1	10	60	90	23.9452	9	9	1	1
10	2	10	1	1	11	50	60	199.2793	10	10	1	1
11	17	11	0	1	10	60	90	26.9136	11	11	1	1
12	15	12	0	1	10	60	90	21.9662	12	12	1	1
13	16	13	0	1	10	60	90	38.1935	13	13	1	1
14	18	14	0	1	10	60	90	22.7578	14	14	1	1
15	6	15	1	1	11	50	120	120.7153	15	15	1	1
16	1	16	1	1	9	50	60	395.3922	16	16	1	1
17	8	17	1	1	11	70	120	120.1217	17	17	1	1
18	11	18	-1	1	10	43	90	160.6899	18	18	1	1
19	7	19	1	1	9	70	120	35.6209	19	19	1	1
20	13	20	-1	1	10	60	40	274.2811	20	20	1	1



รูปแบบจำลองสมการทำนายแบบ Linear model

Response Surface Regression: residual Cu versus pH, Temp, Time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for residual Cu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	914.092	360.305	2.537	0.022
pH	-38.932	29.851	-1.304	0.211
Temp	-2.442	2.985	-0.818	0.425
Time	-2.528	0.995	-2.540	0.022

S = 110.317 PRESS = 290519
 R-Sq = 35.54% R-Sq(pred) = 3.83% R-Sq(adj) = 23.46%

Analysis of Variance for residual Cu

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	107376	107376	35792.1	2.94	0.065
Linear	3	107376	107376	35792.1	2.94	0.065
pH	1	20699	20699	20699.3	1.70	0.211
Temp	1	8142	8142	8142.1	0.67	0.425
Time	1	78535	78535	78535.0	6.45	0.022
Residual Error	16	194716	194716	12169.8		
Lack-of-Fit	11	194530	194530	17684.5	474.79	0.000
Pure Error	5	186	186	37.2		
Total	19	302093				

รูปแบบจำลองสมการแบบ Linear + interaction model

Response Surface Regression: residual Cu versus pH, Temp, Time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for residual Cu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12486.8	1336.76	9.341	0.000
pH	-2007.2	241.84	-8.300	0.000
Temp	-51.3	14.54	-3.528	0.004
Time	-11.2	2.45	-4.567	0.001
pH*pH	98.4	12.08	8.149	0.000
Temp*Temp	0.4	0.12	3.372	0.005
Time*Time	0.0	0.01	3.587	0.003

S = 45.8440 PRESS = 58917.9
 R-Sq = 90.96% R-Sq(pred) = 80.50% R-Sq(adj) = 86.78%

Analysis of Variance for residual Cu

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	274771	274771	45795	21.79	0.000
Linear	3	107376	186766	62255	29.62	0.000
pH	1	20699	144770	144770	68.88	0.000
Temp	1	8142	26159	26159	12.45	0.004
Time	1	78535	43834	43834	20.86	0.001
Square	3	167394	167394	55798	26.55	0.000
pH*pH	1	121045	139576	139576	66.41	0.000
Temp*Temp	1	19311	23903	23903	11.37	0.005
Time*Time	1	27038	27038	27038	12.87	0.003
Residual Error	13	27322	27322	2102		

Lack-of-Fit	8	27136	27136	3392	91.07	0.000
Pure Error	5	186	186	37		
Total	19	302093				

รูปแบบจำลองสมการแบบ Linear + square model

Response Surface Regression: residual Cu versus pH, Temp, Time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for residual Cu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3966.21	2832.36	1.400	0.185
pH	-382.75	272.93	-1.402	0.184
Temp	-40.46	42.32	-0.956	0.356
Time	-6.81	15.75	-0.432	0.673
pH*Temp	4.45	4.04	1.100	0.291
pH*Time	0.86	1.35	0.636	0.536
Temp*Time	-0.07	0.13	-0.531	0.605

S = 114.336 PRESS = 417068
R-Sq = 43.74% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 17.78%

Analysis of Variance for residual Cu

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	132148	132148	22024.7	1.68	0.202
Linear	3	107376	29362	9787.2	0.75	0.542
pH	1	20699	25709	25709.0	1.97	0.184
Temp	1	8142	11950	11950.3	0.91	0.356
Time	1	78535	2441	2441.5	0.19	0.673
Interaction	3	24772	24772	8257.3	0.63	0.608
pH*Temp	1	15808	15808	15807.8	1.21	0.291
pH*Time	1	5285	5285	5284.5	0.40	0.536
Temp*Time	1	3680	3680	3679.7	0.28	0.605
Residual Error	13	169944	169944	13072.6		
Lack-of-Fit	8	169758	169758	21219.7	569.70	0.000
Pure Error	5	186	186	37.2		
Total	19	302093				

รูปแบบจำลองสมการแบบ Full quadratic model

Response Surface Regression: residual Cu versus pH, Temp, Time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for residual Cu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	15538.9	608.716	25.527	0.000
pH	-2351.0	92.357	-25.456	0.000
Temp	-89.3	7.772	-11.494	0.000
Time	-15.5	2.355	-6.569	0.000
pH*pH	98.4	4.206	23.397	0.000
Temp*Temp	0.4	0.042	9.682	0.000
Time*Time	0.0	0.005	10.298	0.000
pH*Temp	4.4	0.565	7.874	0.000
pH*Time	0.9	0.188	4.553	0.001
Temp*Time	-0.1	0.019	-3.799	0.003

S = 15.9678 PRESS = 19485.8
R-Sq = 99.16% R-Sq(pred) = 93.55% R-Sq(adj) = 98.40%

การทดสอบความแปรปรวนและค่าที่ได้จากสมการทำนายรูปแบบ Full quadratic model

Response Surface Regression: residual Cu versus pH, Temp, Time

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for residual Cu

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	15538.9	608.716	25.527	0.000
pH	-2351.0	92.357	-25.456	0.000
Temp	-89.3	7.772	-11.494	0.000
Time	-15.5	2.355	-6.569	0.000
pH*pH	98.4	4.206	23.397	0.000
Temp*Temp	0.4	0.042	9.682	0.000
Time*Time	0.0	0.005	10.298	0.000
pH*Temp	4.4	0.565	7.874	0.000
pH*Time	0.9	0.188	4.553	0.001
Temp*Time	-0.1	0.019	-3.799	0.003

S = 15.9678 PRESS = 19485.8
R-Sq = 99.16% R-Sq(pred) = 93.55% R-Sq(adj) = 98.40%

Analysis of Variance for residual Cu

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	299543	299543	33283	130.53	0.000
Linear	3	107376	168996	56332	220.93	0.000
pH	1	20699	165218	165218	647.99	0.000
Temp	1	8142	33685	33685	132.11	0.000
Time	1	78535	11003	11003	43.15	0.000
Square	3	167394	167394	55798	218.84	0.000
pH*pH	1	121045	139576	139576	547.42	0.000
Temp*Temp	1	19311	23903	23903	93.75	0.000
Time*Time	1	27038	27038	27038	106.04	0.000
Interaction	3	24772	24772	8257	32.39	0.000
pH*Temp	1	15808	15808	15808	62.00	0.000
pH*Time	1	5285	5285	5285	20.73	0.001
Temp*Time	1	3680	3680	3680	14.43	0.003
Residual Error	10	2550	2550	255		
Lack-of-Fit	5	2363	2363	473	12.69	0.007
Pure Error	5	186	186	37		
Total	19	302093				

Predicted Response for New Design Points Using Model for residual Cu

Point	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
1	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
2	239.067	12.4437	(211.341, 266.794)	(193.961, 284.174)
3	301.686	13.0680	(272.568, 330.803)	(255.711, 347.660)
4	236.355	13.0680	(207.238, 265.473)	(190.381, 282.330)
5	370.017	12.4437	(342.291, 397.744)	(324.911, 415.124)
6	261.323	13.0680	(232.206, 290.441)	(215.349, 307.298)
7	21.166	12.4437	(-6.560, 48.892)	(-23.940, 66.272)
8	100.314	12.4437	(72.588, 128.041)	(55.208, 145.421)
9	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
10	178.360	13.0680	(149.243, 207.477)	(132.386, 224.334)
11	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
12	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
13	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
14	26.188	6.5125	(11.677, 40.699)	(-12.236, 64.612)
15	120.991	13.0680	(91.874, 150.108)	(75.017, 166.965)
16	396.530	13.0680	(367.413, 425.647)	(350.556, 442.504)
17	118.167	13.0680	(89.050, 147.285)	(72.193, 164.142)
18	182.443	12.4437	(154.717, 210.169)	(137.337, 227.549)

19	55.724	13.0680	(26.607,	84.841)	(9.749,	101.698)
20	276.236	12.4437	(248.510,	303.962)	(231.129,	321.342)

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
residual Cu	Target	1	2	250	1	1

Global Solution

pH = 10
 Temp = 60
 Time = 102.584

Predicted Responses

residual Cu = 2.00000 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000

Optimization Plot



ภาคผนวก ข

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัยประจำปีงบประมาณ 2560 (เงินรายได้)

โครงการวิจัย เรื่อง แบบจำลองการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง-

จากสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์

สาขาวิชา..เคมี.. ประเภทการวิจัยประยุกต์

หัวหน้าโครงการวิจัย นางสาวกนกพร สุพงษ์

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 - 30 กันยายน 2560

งบประมาณที่ได้รับ...40,000... บาท

ไตรมาสที่	ว.ด.ป.	รายการ	ค่าใช้จ่าย	ค่าวัสดุ	คงเหลือ
		งบที่ได้รับ	10,000.00	30,000.00	40,000.00
1	พ.ย.	ค่าจ้างเหมาเก็บรวบรวม	1,500.00		38,500.00
		ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์		6,000.00	32,500.00
	ธ.ค.	ค่าจ้างเหมาเก็บรวบรวม	1,500.00		31,000.00
		ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์		6,000.00	25,000.00
2	ม.ค.	ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์		9,000.00	16,000.00
	ก.พ.	ค่าวัสดุวิทยาศาสตร์		4,000.00	12,000.00
	มี.ค.	ค่าวัสดุสำนักงาน		500.00	11,500.00
3	เม.ย.	ค่าประมวลผลทางสถิติ	2,000.00		9,500.00
		ค่าวัสดุสำนักงาน		500.00	9,000.00
	พ.ค.	ค่าประมวลผลทางสถิติ	2,000.00		7,000.00
		ค่าวัสดุสำนักงาน		500.00	6,500.00
		ค่าวัสดุคอมพิวเตอร์	3,000.00		3,500.00
	มิ.ย.	ค่าวัสดุสำนักงาน		500.00	3,000.00
4	ก.ค.	ค่าพิมพ์รูปเล่ม		2,000.00	1,000.00
	ส.ค.	ค่าถ่ายเอกสารและทำรูปเล่ม		1,000.00	0.00
		รวมรายจ่าย	10,000.00	30,000.00	40,000.00
		ยอดคงเหลือ	0.00	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 48 ารศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาว กนกพร สุพงษ์
ชื่อ นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss Kanokporn Supong
- ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์
- หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทรศัพท์ 02-7373000 ต่อ 3747
โทรสาร 02-3264415
E-mail: kungsupong2537@gmail.com

4. ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญาและชื่อเต็ม	สาขาวิชา	ชื่อสถาบัน	ประเทศ
2557	ปริญญาโท	(วท.ม.), วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต	เคมีสิ่งแวดล้อม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ สาขาวิทยาศาสตร์เคมีและเภสัช

6. ประสบการณ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง การจัดการของเสียอันตรายจากการเรียนวิชาปฏิบัติการเคมีอินทรีย์ (Waste Management From Organic Chemistry Laboratory) โดยได้รับทุนประเภทส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2554 สัดส่วนที่ทำการวิจัย 100 %
- หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยใช้เคมีไฟฟ้า (removal of copper from laboratorial wastewater by electrochemistry) โดยได้รับทุนประเภทส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2555 สัดส่วนที่ทำการวิจัย 100 %
- หัวหน้าโครงการวิจัย เรื่อง แบบจำลองการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงจากสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ โดยได้รับทุนประเภทส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2560 สัดส่วนที่ทำการวิจัย 100 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รายงานวิจัยฉบับประมัตินเงินรายได้ ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา แลหน้า 49อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ผลงานตีพิมพ์

พ.ศ. 2555

- บทความเรื่อง Waste Management From Organic Chemistry Laboratory เสนอในการประชุมวิชาการ ณ. มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

พ.ศ. 2556

- บทความเรื่อง Recovery of copper from laboratorial wastewater by Electrochemistry ตีพิมพ์ในวารสารราชภัฏตะวันตก ซึ่งเป็นวารสารที่ผ่านการรับรองคุณภาพของTCI (จนถึง 31 ธันวาคม 2562) และจะถูกพิจารณาคัดเลือกเข้าสู่ฐานข้อมูล ASEAN Citation Index (ACI) ต่อไป

พ.ศ.2560

- บทความเรื่อง Empirical model for copper treatment in chelated copper synthetic by switching to $CuFe_2O_4$ เสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 ในหัวข้องาน “Creative RMUT and Sustainable Innovation for Thailand 4.0” ระหว่างวันที่ 7 – 9 สิงหาคม 2560 ณ ศูนย์แสดงสินค้าและการประชุม อิมแพ็ค เมืองทองธานี



รายงานวิจัยมีประมาณเงินรายได้ 2560 ทรัพยากรใช้หน้า 50 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้