

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

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

4.1 ผลศึกษาการกำจัดทองแดงตามแผนทดลองแบบเซ็นทรัลคอมโพสิต

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



รูปที่ 4.1 ลักษณะของสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนสังเคราะห์ที่ใช้ศึกษา

จากการวิเคราะห์สมบัติของสารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์-แอมมีนสังเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษาพบว่ามีความพีเอชเท่ากับ 9.78 มีปริมาณทองแดง 1934.4166 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่สามารถตรวจพบปริมาณของเหล็ก และจากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงไอออนโดยการเปลี่ยนเป็นคิวปรัสเฟอร์ไรท์ 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

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 (Adj-R^2) และ Predicted R-Squared (Pred-R^2) ของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก)

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองสมการทำนาย

แบบจำลอง	S	R^2	Adj-R^2	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.) 0.806888, R-Squared (R^2) 99.16, Adjusted R-Squared (Adj-R^2) 98.40 และ Predicted R-Squared (Pred-R^2) 93.55 แสดงว่าแบบจำลอง Full quadratic model มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวแบบอธิบายผลการทดลอง

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ความเหมาะสมของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลอง โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) มีการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวและทดสอบของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน (ผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ก) มีการทดสอบ 2 ลักษณะ ดังนี้ (Minitab, 2010)

1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i) 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

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

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

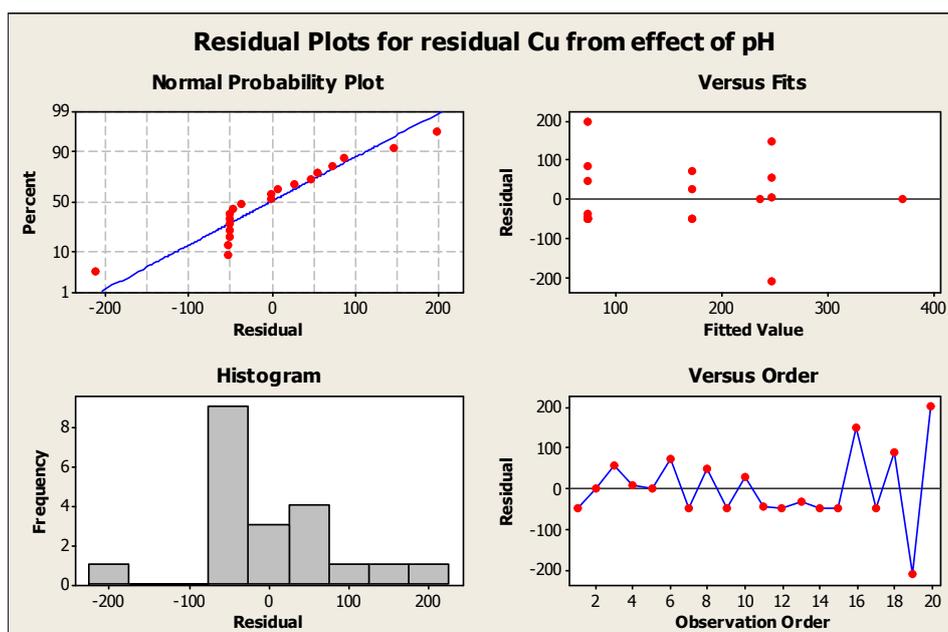
สมการทำนายความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Response Surface Methodology จากแบบจำลอง Full Quadratic ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (ค่าพีเอช, อุณหภูมิ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา) กับ ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย แสดงได้ดังสมการที่ 4.1

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

4.2.3 ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking)

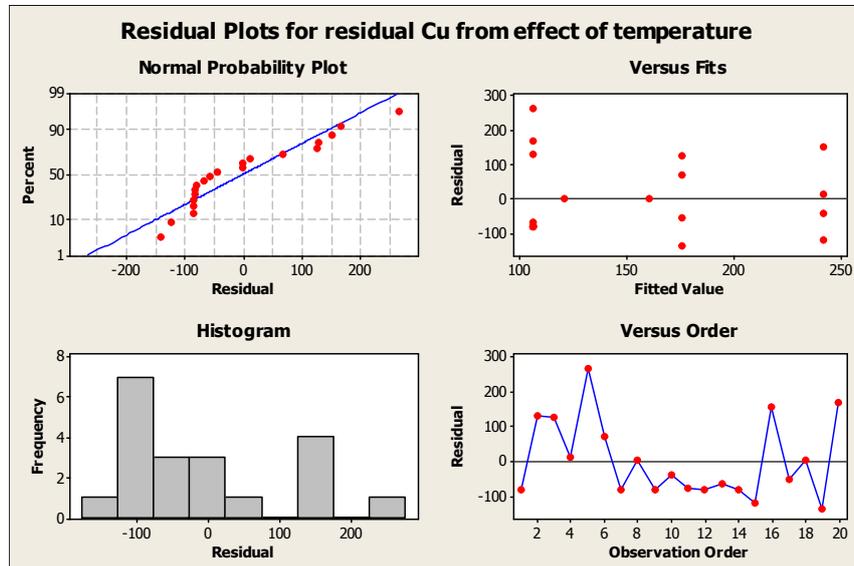
เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) โดยใช้แผนภูมิควบคุมคุณภาพ ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability)

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



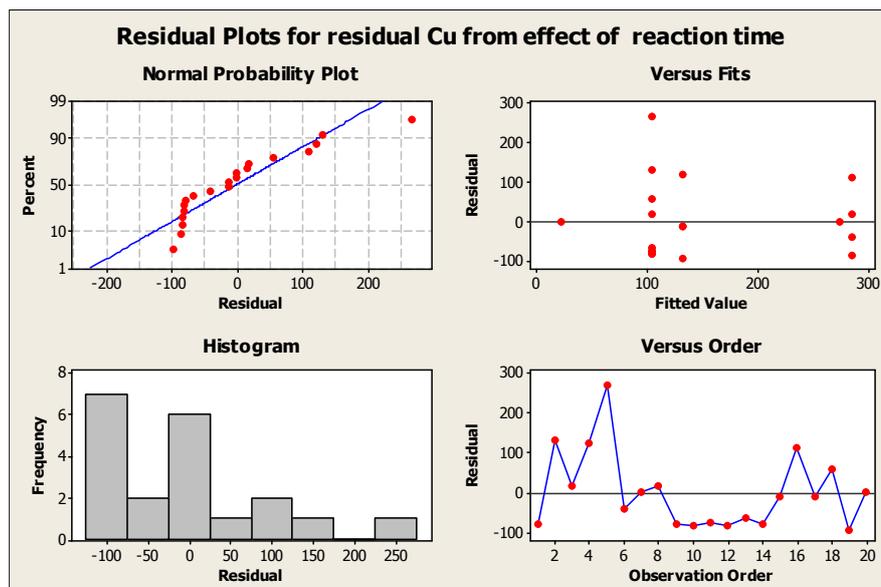
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของค่าพีเอช

ส่วนการวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากอิทธิพลของอุณหภูมิ ผลการทดสอบมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลาง การกระจายตัวของข้อมูลมีความสม่ำเสมอ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของอุณหภูมิ

นอกจากนี้พบว่า การวิเคราะห์ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายจากอิทธิพลของอุณหภูมิ พบว่าผลการทดสอบมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) ค่าเฉลี่ยส่วนใหญ่อยู่ตรงกลาง การกระจายตัวของข้อมูลมีความสม่ำเสมอ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4



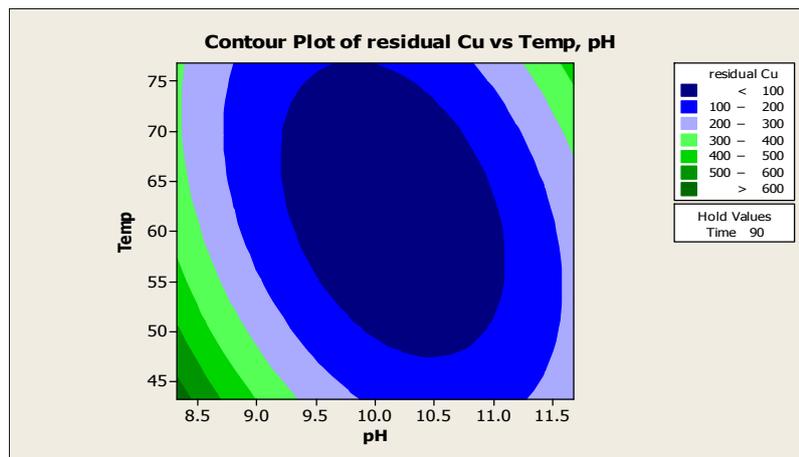
รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของการกำจัดไอออนทองแดงจากอิทธิพลของระยะเวลาการทำปฏิกิริยา

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

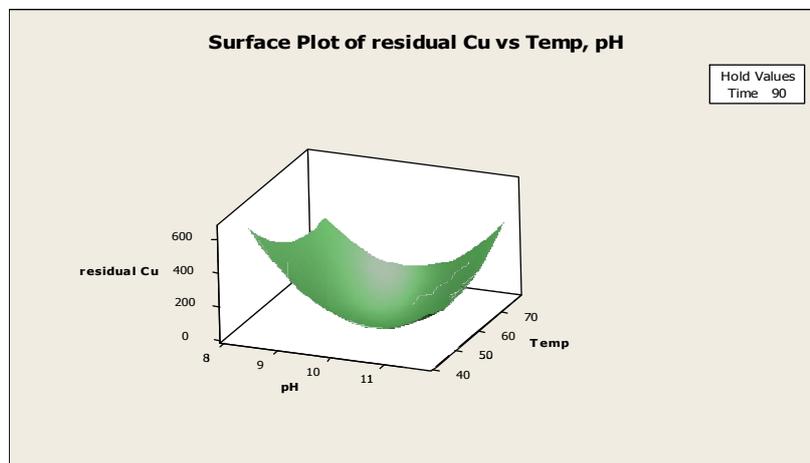
4.3.1 ผลการศึกษาการสร้างพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงจากแผนการทดลองเซ็นทรัลคอมโพสิต

4.3.1.1. อิทธิพลของค่าพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อกำหนดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 90 นาที (ดังแสดงในรูปที่ 4.5)

(ก)



(ข)



รูปที่ 4.5 พื้นผิวผลตอบสนองของอุณหภูมิและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ

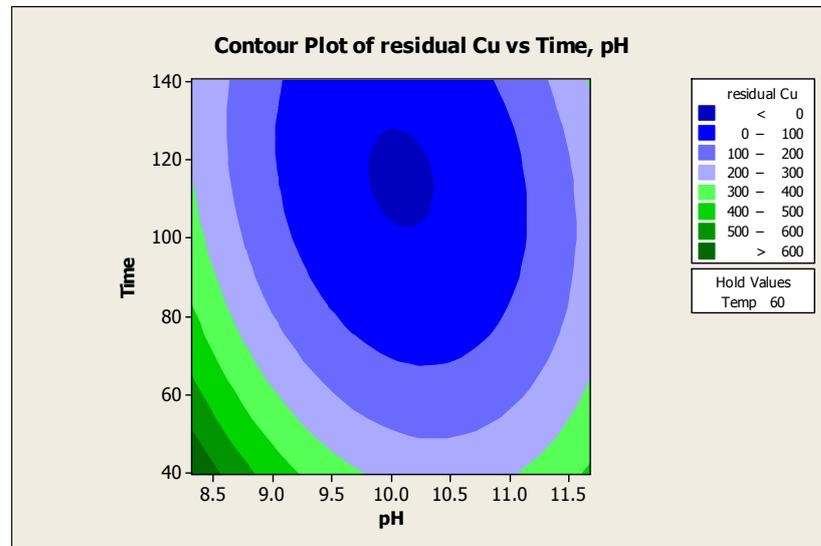
(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

จากรูปที่ 4.5 เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นมีค่า 8.5 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจาก 45

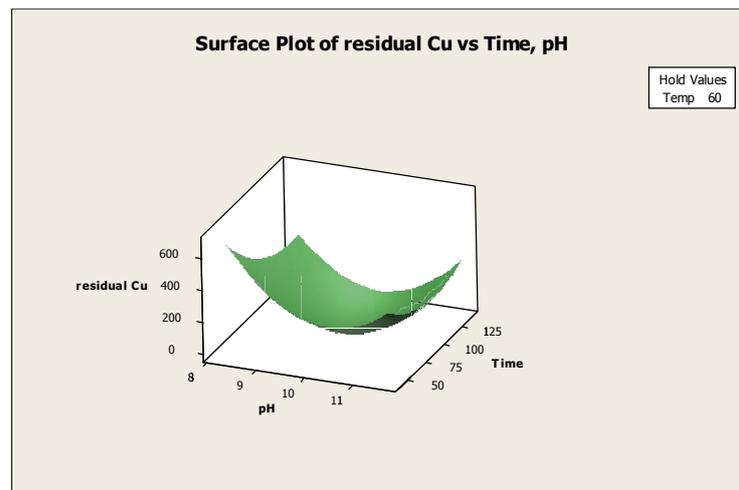
เป็น 55 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง โดยทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่มากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ลดลงเหลืออยู่ในช่วง 200-300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มค่าพีเอช ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นย่อมแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่าพีเอชที่เริ่มต้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการเกิดปฏิ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

4.3.1.2. อิทธิพลของค่าพีเอชและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลาย เมื่อกำหนดอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส (ดังแสดงในรูปที่ 4.6)

(ก)



(ข)



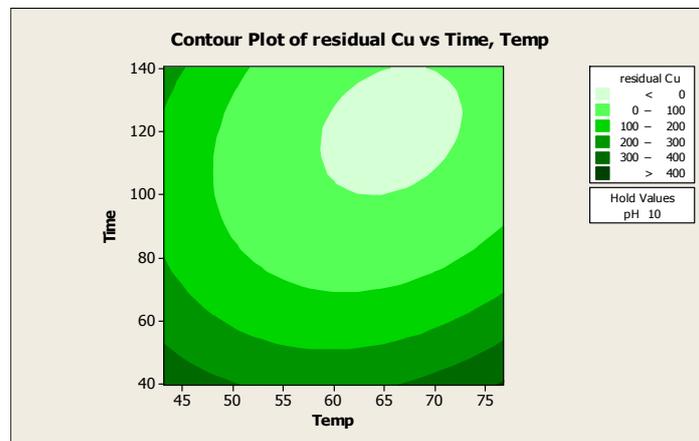
รูปที่ 4.6 พื้นผิวผลตอบสนองของพีเอชและเวลาที่มีต่อความเข้มข้นของไอออนทองแดงที่เหลือ

(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

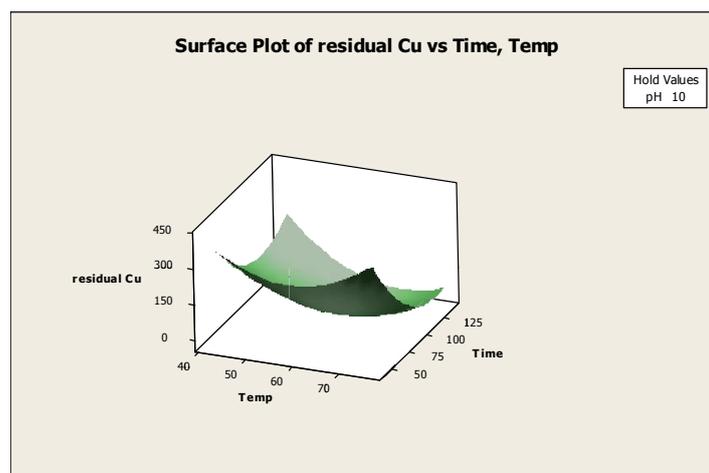
จากรูปที่ 4.6 เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่ค่าพีเอชของสารละลายเริ่มต้นมีค่า 8.5 การเพิ่มขึ้นของเวลาจาก 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

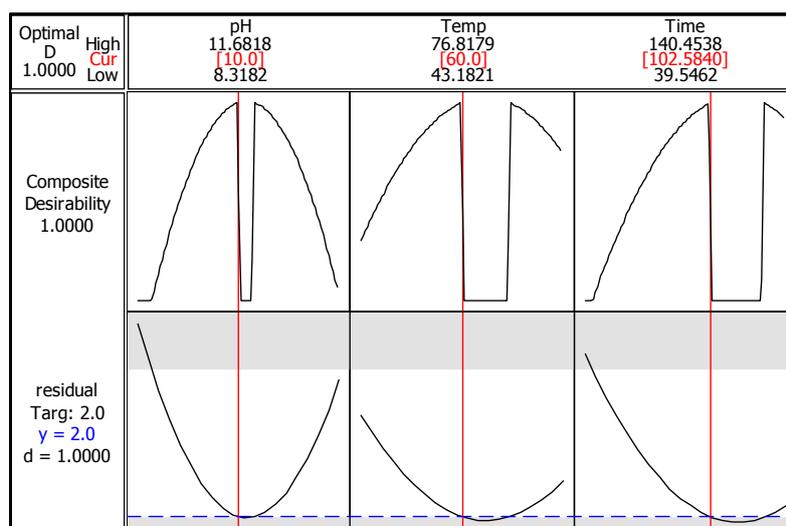
(ก) กราฟโครงร่าง (ข) พื้นผิวผลตอบ

จากรูปที่ 4.7 เมื่อค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้การกำจัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับ งานวิจัยของ Tu et al. (2012) โดยพบว่าในขณะที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของเวลาจาก 40 เป็น 80 นาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดทองแดง โดยทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ใน สารละลายมากกว่า 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้อยู่ในช่วง 200 - 300 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นย่อมแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้อุณหภูมิส่งผลต่อ ประสิทธิภาพการบำบัดทองแดงเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา โดยพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น มากกว่า 70 นาที จะทำให้ความเข้มข้นของทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังการบำบัดอยู่ในช่วง 0 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3.2 ผลการศึกษาหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง จากสมการทำนาย การประมวลผลเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ มีค่าที่ต้องกำหนดดังนี้

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือ ค่าของตัวแปรตาม/ผลตอบที่สนใจศึกษา (Y) ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ กำหนดค่าเป้าหมายเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือ ค่าของตัวแปรตามมากที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ ในปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าขอบเขตบนเท่ากับ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร
- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือ ค่าของตัวแปรตามที่มีค่าน้อยที่สุดที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถ เกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้กำหนดค่าขอบเขตล่างเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดทองแดงที่ได้จากแบบจำลองเพื่อให้มีประสิทธิภาพการกำจัด ทองแดง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (ค่าเป้าหมาย) แสดงดังรูปที่ 4.8 คือ ค่าพีเอช เท่ากับ 10 อุณหภูมิ เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 103 นาที



รูปที่ 4.8 สภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดทองแดงของสารละลายคอปเปอร์แอมมีนสังเคราะห์

4.4 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย

เพื่อทำการยืนยันสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงเพื่อให้เหลือความเข้มข้นของแดงน้อยสุดจากสมการที่ 4.1 จึงได้ทำการทดลองกำจัดทองแดงตามสภาวะที่เหมาะสมซ้ำจำนวน 3 การทดลอง เพื่อทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยโดย

ตารางที่ 4.5 ผลศึกษาการเปรียบเทียบค่าของการทดลองกับการทำนาย

ลำดับ การทดลอง	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-แอมมินสังเคราะห์เริ่มต้นและหลังผ่านการกำจัดทองแดงที่สภาวะเหมาะสม มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สารละลายเชิงซ้อนคอปเปอร์แอมมินสังเคราะห์หลังผ่านการกำจัดทองแดง