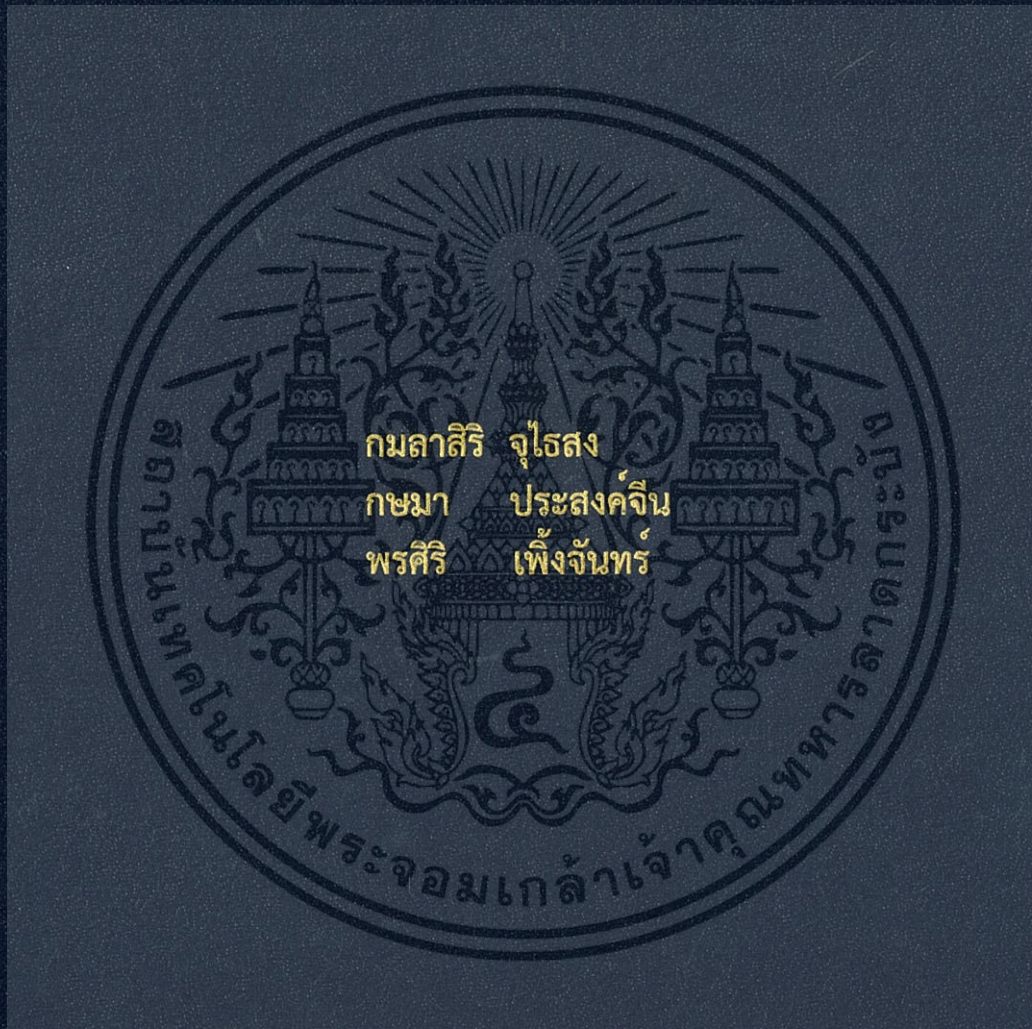


การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง  
ออกจากกากตะกอนโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด

OPTIMIZATION OF COPPER REMOVAL FROM SLUDGE  
BY ACID EXTRACTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง  
ออกจากกากตะกอนโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด

OPTIMIZATION OF COPPER REMOVAL FROM SLUDGE  
BY ACID EXTRACTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# OPTIMIZATION OF COPPER REMOVAL FROM SLUDGE BY ACID EXTRACTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หัวข้อโครงการพิเศษ	การหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงออกจากกากตะกอนโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกมลลลลลลล	จุไรสรุ	รหัสนักศึกษา 57050567
	นางสาวกษมา	ประสงค์จีน	รหัสนักศึกษา 57050568
	นางสาวพรศิริ	เพ็งจันทร์	รหัสนักศึกษา 57050623
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์		

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากกากตะกอนโดยการสกัดด้วยสารละลายกรด กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษาทำการเก็บรวบรวมจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ ทำการศึกษาชนิดของกรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอน ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ผลการศึกษาพบว่า กรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมากที่สุด จากนั้นทำการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียล ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์การถดถอย เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอน รวมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโดยใช้กรดซัลฟิวริก ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของกรด (A) อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน (B) และระยะเวลาการสกัด (C) ผลการศึกษาพบว่า อิทธิพลหลักทั้ง 3 ปัจจัย (A, B, C) และอิทธิพลร่วมของ BC มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่ประสิทธิภาพการสกัดเท่ากับ 97% คือ ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 0.8393 โมลาร์ อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน 100 มิลลิลิตร : 1 กรัม และระยะเวลาในการสกัดทองแดงเท่ากับ 80 นาที

คำสำคัญ : กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย การทดลองแบบแฟคทอเรียล  
การวิเคราะห์การถดถอย การสกัดด้วยสารละลายกรด

Title	Optimization of copper removal from sludge by acid extraction		
Students	Miss Kamalāsiri	Juthaisong	Student ID. 57050567
	Miss Kasama	Parsongjeen	Student ID. 57050568
	Miss Phonsiri	Phoengchan	Student ID. 57050623
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)		
Department	Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
Academic Year	2017		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Usarat Thawornchaisit		

### Abstract

This special project aims to find an optimum condition for removal of copper from sludge by acid extraction. Sludges used in this study were collected from wastewater treatment of printed circuit board production (PCB). Three types of acid including sulfuric acid, nitric acid and hydrochloric acid were investigated for their effect on the copper extraction efficiency from the sludge. Results showed that highest efficiency of copper extraction was achieved when sulfuric acid was used as an extracting agent. Experimental design by full factorial and statistical analysis by regression analysis was employed to investigate effects of independent variables as well as to find the optimum conditions for copper extraction from sludge using sulfuric acid. Selected independent variables were concentrations of acid (A), the ratio of acid volume (mL) to sludge weight (g) (B) and the extraction time (C). Results showed that all main effects (A, B, C) and the interaction term, BC had statistically significant effect on copper extraction from the sludge. The optimum conditions for 97% copper extraction from the PCB wastewater sludge were acid concentration of 0.8393 M, the ratio of acid volume to sludge weight of 100:1 and extraction time of 80 minutes.

**Keywords :** Wastewater Treatment Sludge, Factorial Experiment, Regression analysis, Acid extraction

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากกลุ่มผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนวทางแก้ปัญหา รวมทั้งตรวจโครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุวรรณี จรรยาพูน และ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ให้กับโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอภิชาติ รัตนพลแสน บริษัท ดร่าโก้ พีซีบี จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอน และให้ข้อมูลเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสีย

ขอขอบพระคุณศูนย์บริการเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของกากตะกอนด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ XRF Standardless method

ขอขอบพระคุณ คุณสปันนา นวลสะอาด ที่ได้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือ และอำนวยความสะดวก ในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้กลุ่มผู้วิจัย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุน ทำให้กลุ่มของผู้วิจัยสามารถทำโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งเพื่อนร่วมสาขาที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ คุณค่าและประโยชน์อันบังเกิดจากโครงการพิเศษฉบับนี้กลุ่มผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กมลასิริ จุไรสง  
กษมา ประสงค์จัน  
พรศิริ เพ็งจันทร์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>3</b>
2.1 แผ่นวงจรพิมพ์.....	3
2.1.1 กระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	4
2.1.2 การใช้น้ำในการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	5
2.1.3 น้ำเสียจากการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	6
2.1.4 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	6
2.2 การตกตะกอนโลหะหนัก.....	8
2.2.1 การตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์.....	8
2.2.2 การตกตะกอนโลหะทองแดง.....	9
2.3 ทองแดง.....	10
2.3.1 สมบัติทั่วไป.....	10
2.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า.....	10
2.3.3 ประโยชน์ของทองแดง.....	11
2.4 กระบวนการชะละลายทางเคมี.....	12
2.5 รูปแบบการทดลอง.....	14
2.5.1 การทดลองแบบที่ละปัจจัย.....	14
2.5.2 การออกแบบการทดลอง.....	14
2.5.3 การทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	22
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	22
3.1.1 อุปกรณ์ .....	22
3.1.2 สารเคมี.....	22
3.2 การเตรียมตัวอย่าง .....	23
3.3 การศึกษาสมบัติของกากตะกอน .....	23
3.4 การศึกษาชนิดของกรดที่ใช้ในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน .....	23
3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอน โดยการออกแบบการทดลองทางสถิติ .....	24
3.5.1 การออกแบบการทดลองวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Design) .....	24
3.5.2 วิธีการทดลอง .....	26
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 17.0 .....	27
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล .....	28
4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน.....	28
4.2 ชนิดของกรดที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน.....	29
4.3 ผลการศึกษาการสกัดทองแดงจากกากตะกอน โดยใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติ.....	30
4.3.1 แบบจำลองที่เหมาะสม .....	32
4.3.2 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา .....	34
4.3.3 ลักษณะพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพ การสกัดทองแดง .....	35
4.3.4 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม .....	39
4.3.5 การยืนยันความเหมาะสมของสมการ .....	40
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	41
เอกสารอ้างอิง .....	42

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก หลักการและวิธีการวิเคราะห์.....	45
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบที่เกี่ยวข้องกับผลการทดลอง .....	49
ภาคผนวก ค การคำนวณที่เกี่ยวข้อง .....	56
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม Minitab 17.0 ในการวิเคราะห์ .....	58
ภาคผนวก จ วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 17.0 ในการวิเคราะห์ .....	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 น้ำเสียจากการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB).....	6
2.2 ค่า Ksp ของโลหะไฮดรอกไซด์ .....	8
2.3 สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดง .....	10
2.4 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่ 25 °C ของทองแดง.....	11
3.1 สมบัติของกากตะกอนที่ทำการศึกษา.....	23
3.2 ตัวแปรที่ศึกษา ระดับของตัวแปร และค่าที่แท้จริงของแต่ละระดับ .....	24
3.3 แผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ โดยใช้โปรแกรมสถิติ Minitab 17.0 .....	24
4.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของกากตะกอน .....	28
4.2 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่สภาวะต่างๆ .....	30
4.3 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละแบบจำลอง .....	33
4.4 ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญของตัวแปรตามแบบจำลอง Linear + all interactions model.....	34
4.5 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงตามสภาวะที่เหมาะสม .....	40
ข-1 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอน.....	50
ข-2 ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในกากตะกอน .....	50
ข-3 ผลการศึกษาความสามารถของกรดซัลฟิวริกในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน.....	50
ข-4 ผลการศึกษาความสามารถของกรดไนตริกในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน.....	50
ข-5 ผลการศึกษาความสามารถของกรดไฮโดรคลอริกในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน .....	51
ข-6 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่สภาวะต่างๆ .....	52
ข-7 การยืนยันความเหมาะสมของสมการที่ได้.....	55
ง-1 ผลของการเปรียบเทียบชนิดของกรดในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน โดยวิธี One-way ANOVA.....	59
ง-2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear.....	59
ง-3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + 2-Way interactions.....	60
ง-4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + all interactions model .....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์.....	3
2.2 ขั้นตอนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการใช้น้ำ.....	5
2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์.....	7
2.4 การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อ pH เพิ่มขึ้น .....	9
2.5 กราฟโครงร่าง (Contour plot) .....	18
2.6 กราฟ Optimization plot .....	19
4.1 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนของกรด 3 ชนิด .....	29
4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญของตัวแปรทางสถิติ .....	35
4.3 กราฟโครงร่าง (Contour plot) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรด และอัตราส่วนปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนต่อประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน .....	36
4.4 กราฟโครงร่าง (Contour plot) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรด และระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน .....	37
4.5 กราฟโครงร่าง (Contour plot) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนปริมาตรกรด ต่อน้ำหนักกากตะกอนและระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน .....	38
4.6 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอน.....	39
ก-3 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานทองแดง.....	46
จ-1.1 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลในโปรแกรม Minitab 17.0.....	64
จ-1.2 การออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป .....	64
จ-1.3 การใส่จำนวนระดับ และจำนวนซ้ำที่จะศึกษาในแต่ละปัจจัย .....	65
จ-1.4 ตารางการทดลองใน work sheet .....	65
จ-2.1 การวิเคราะห์การถดถอย.....	66
จ-2.2 การเลือก Factor ที่ต้องการ .....	66
จ-2.3 การเลือก Responses ที่ต้องการ.....	67
จ-2.4 หน้าต่างแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย .....	67
จ-3.1 การสร้างกราฟ Contour Plot .....	68
จ-3.2 การเลือกแกน X และแกน Y ที่ต้องการ .....	68

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ-3.3 หน้าต่างแสดงกราฟ Contour Plot.....	69
จ-4.1 การหา Response Optimizer.....	69
จ-4.2 การใส่ค่า Target, Lower และ Upper ที่ต้องการ .....	70
จ-4.3 แสดงค่า และกราฟที่เหมาะสม .....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
°C	องศาเซลเซียส
E°	ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานของเซลล์
E° <sub>cell</sub>	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์
PCB	แผ่นวงจรพิมพ์
ลบ.ม.	ลูกบาศก์เมตร
K <sub>sp</sub>	ค่าคงที่สมดุลการละลาย
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
mL	มิลลิลิตร
mol/L	โมลต่อลิตร
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง
XRF	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
Abs	ค่าการดูดกลืนแสง
S	ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error)
R <sup>2</sup>	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Squared)
R <sup>2</sup> <sub>(adj)</sub>	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R-Squared Adjusted)
SE Coef	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอย (Standard Error for the Estimated Coefficient)
Coef	สัมประสิทธิ์การถดถอย (Coefficient)
F	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรปรวน
T	ตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ )
P	ความน่าจะเป็น
DF	องศาความเป็นอิสระ (Degrees of Freedom)
Adj SS	ผลบวกกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Sum of Square)
Adj MS	ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ปรับค่าแล้ว (Adjusted Mean Square)
H <sub>0</sub>	สมมติฐานหลัก
H <sub>1</sub>	สมมติฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สินแร่ทองแดงซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติประเภทใช้แล้วหมดไป จัดเป็นโลหะพื้นฐานชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญและใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) จากรายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมไตรมาสที่ 2 ปี พ.ศ. 2560 พบว่าการส่งออกสินค้าจำพวกเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 12.88 เมื่อเทียบกับไตรมาสก่อน (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2560) โดยแผ่นวงจรไฟฟ้าหรือแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board; PCB) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น กระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์จะมีการเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยโลหะทองแดง และมีการสกัดทองแดงออกให้เป็นเส้นวงจรไฟฟ้า (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ทำให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตที่มีทองแดงและโลหะอื่นๆปะปนเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำ

โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์นิยมใช้การตกตะกอนเคมีด้วยด่าง ทำให้กากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียมีทองแดงและโลหะหนักอื่นๆปนอยู่ (วิชัย, 2553) ซึ่งกากตะกอนดังกล่าวจัดเป็นของเสียอันตรายที่ต้องผ่านการบำบัดอย่างถูกวิธี การนำโลหะหนักออกจากกากตะกอนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการลดความเป็นอันตรายของของเสีย โดยเฉพาะทองแดงซึ่งเป็นโลหะที่มีมูลค่า และหากสามารถนำทองแดงที่อยู่ในกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ได้จะเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ลดค่าใช้จ่ายการจัดการของเสีย ลดการถลุงสินแร่ทองแดง ลดผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และลดการปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ การแยกทองแดงจากกากตะกอนทำได้หลายวิธี เช่น การแยกด้วยความร้อน และการแยกด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นต้น วิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแยกโลหะหนักชนิดต่างๆได้ดี แต่เป็นวิธีการที่ยุ่งยากเนื่องจากเครื่องมืออุปกรณ์มีราคาสูง และต้องอาศัยผู้ชำนาญในการปฏิบัติ (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552) จากข้อจำกัดดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโดยวิธีการชะละลายทางเคมี ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการปฏิบัติและมีค่าใช้จ่ายต่ำ ผลจากการศึกษาพบว่า การชะละลายด้วยกรด โดยเฉพาะกรดซัลฟิวริก จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน (Wu et al., 2009; Kuan et al., 2010; Stylianou et al., 2007; ปัทมาพร และคณะ, 2553) ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการสกัดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ชนิดกรด ความเข้มข้นของกรด ระยะเวลาการสกัด อุณหภูมิ ปริมาณโลหะ และปริมาณกรด เป็นต้น เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยใช้วิธีการทดลองแบบที่ละปัจจัย ทำให้ไม่ทราบถึงอิทธิพลร่วมของปัจจัย การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรแต่ละตัวต่อประสิทธิภาพการสกัดด้วยการออกแบบการทดลองทางสถิติ (Experimental Design) นั้นไม่เพียงช่วยให้เราทราบถึงระดับนัยสำคัญหรืออิทธิพลของตัวแปรหลักและอิทธิพลร่วมต่อตัวแปรตามที่ศึกษายังสามารถช่วยหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำการทดลองได้ทำให้สรุปผลได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น (สิทธิชัย, 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาชนิดของกรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดง จากกากตะกอน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดง และหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดง จากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Experimental Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาชนิดของกรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสีย โดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Experimental Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. กากตะกอนที่ใช้ศึกษา คือ กากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์
2. ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน ได้แก่ พีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณทองแดง และธาตุอื่นๆที่พบในกากตะกอน
3. ศึกษาชนิดของกรดที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอน ได้แก่ สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) สารละลายกรดไนตริก ( $HNO_3$ ) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) กำหนดให้ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 0.5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนเท่ากับ 100:1 และระยะเวลาในการสกัดทองแดง 45 นาที
4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอนและหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experimental Design) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis กำหนดชนิดของกรดที่ใช้ในการสกัดจากผลการศึกษาในข้อ 3
 

ตัวแปรต้นที่ทำการศึกษา ได้แก่

  - ความเข้มข้นของกรดแปรค่าดังนี้ 0.20, 0.60 และ 1.00 โมลต่อลิตร
  - อัตราส่วนปริมาตรของกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน แปรค่าดังนี้ 10:1, 60:1 และ 100:1
  - ระยะเวลาในการสกัด แปรค่าดังนี้ 5, 40 และ 80 นาที

ตัวแปรตาม ได้แก่ ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์
2. เพื่อเป็นแนวทางในการนำทองแดงกลับมาใช้ประโยชน์ รวมทั้งลดของเสียอันตราย และค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียอันตรายจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ

3. สามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แผ่นวงจรพิมพ์

แผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board : PCB) มีหน้าที่หลักในการยึดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน มีตัวนำซึ่งเป็นลายทองแดง ทำหน้าที่เป็นทางเดินของสัญญาณไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปสู่ตัวอื่นๆ ตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้ โดยการบัดกรีตะกั่วที่บริเวณขาของอุปกรณ์ที่จุดบัดกรีเพื่อเชื่อมต่อขาของอุปกรณ์เหล่านี้เข้ากับลายทองแดงของวงจรและเพื่อใช้ยึดอุปกรณ์เข้ากับ PCB แผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างลักษณะของแผ่นวงจรพิมพ์ (ศรีธวัช, 2559)

แผ่นวงจรพิมพ์สามารถจำแนกออกเป็น 3 แบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550) ดังนี้

1. แบบหน้าเดียว (Single - Side PCB) จะมีลายทองแดงเคลือบอยู่เพียงหน้าเดียว เหมาะสำหรับวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนจนเกินไป แผ่นวงจรพิมพ์แบบนี้จะราคาถูกและมีการใช้งานกว้างขวาง เพราะผู้ใช้สามารถกัดลายทองแดงเองได้ จึงมักนิยมใช้ในการทำโครงงานพื้นฐานต่างๆ
2. แบบ 2 หน้า (Double Side PCB) จะมีทองแดงเคลือบอยู่ทั้ง 2 ด้าน ส่วนใหญ่ด้านหนึ่งมักจะปล่อยให้กลายเป็นลายทองแดงเต็มแผ่นในลักษณะเป็นกราวนด์เพลน (Ground Plane) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดสัญญาณรบกวน มักใช้ในวงจรเครื่องรับหรือเครื่องส่งวิทยุ
3. แบบหลายชั้น (Multi Layer PCB) แผ่นวงจรพิมพ์ประเภทนี้จะมีความซับซ้อนมาก โดยจะมีลายทองแดงอยู่ด้านในด้วย และมีการเชื่อมต่อกันผ่านทางรูที่ทำพิเศษ แผ่นวงจรประเภทนี้ส่วนใหญ่ มักทำสำเร็จมาจากโรงงาน เพราะมีการสร้างที่ซับซ้อน และยุ่งยากมาก ผู้ใช้ทั่วไปไม่สามารถทำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

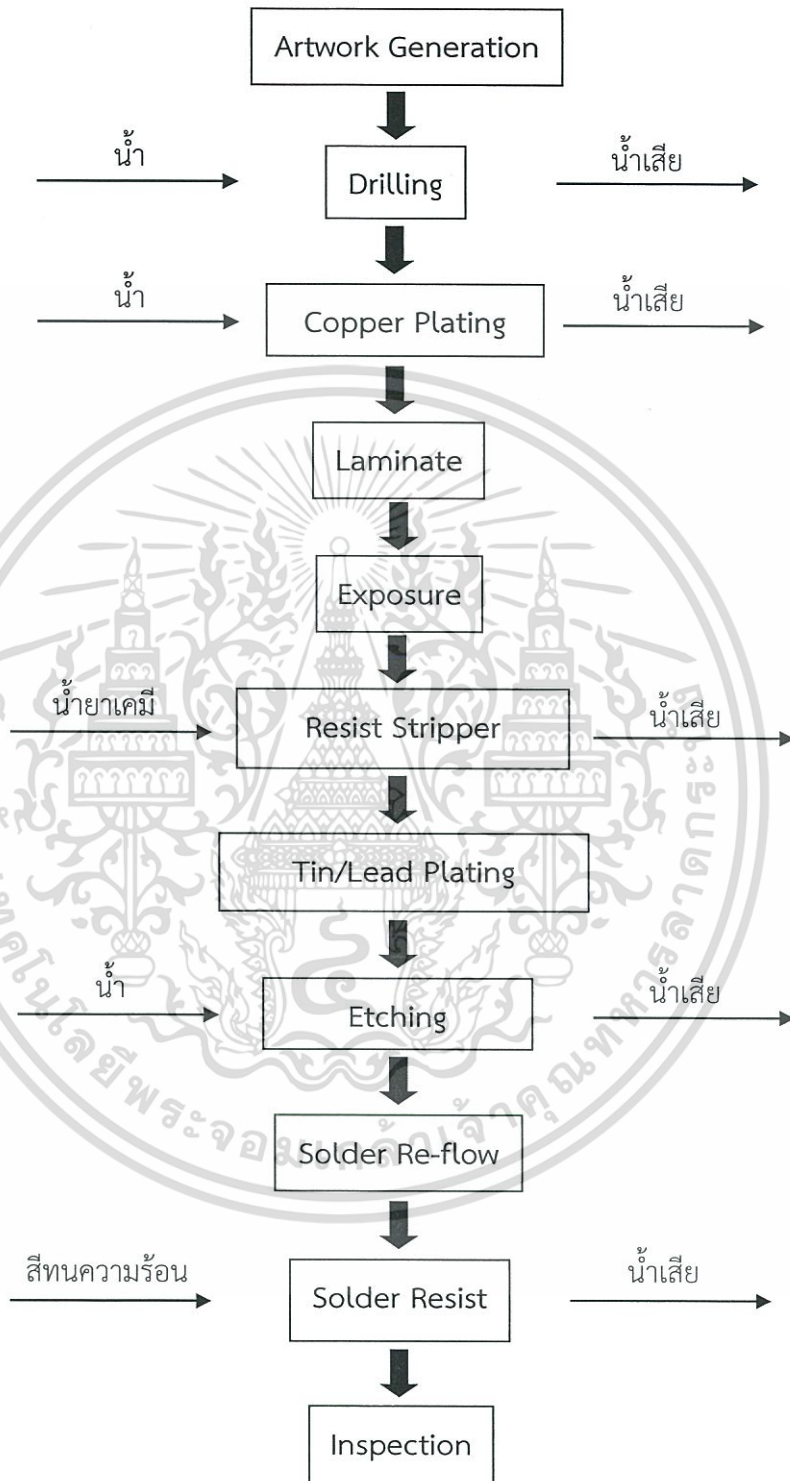
### 2.1.1 กระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์

กระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ ในปัจจุบันมีการพัฒนาไปมากจากสมัยก่อนที่จะเป็นแผ่นวงจรที่มีลายวงจรทองแดงเพียงด้านเดียว (Single-sided) พัฒนาเป็นลายวงจรที่มีลายเส้นเป็นทองแดงทั้งด้านบนและด้านล่าง (Double-sided) จนพัฒนามีลายทองแดงมากกว่า 2 ชั้น (Multi-layer) เช่น สี่ชั้น หกชั้น แปดชั้น สิบชั้นและสิบสองชั้น และมีแนวโน้มที่จะพัฒนาจำนวนชั้นให้มากขึ้นในอนาคตเพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติสูงขึ้นแต่ขนาดเล็กลงเรื่อยๆ ซึ่งขั้นตอนการสร้างชิ้นงานสามารถสรุปได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2550)

1. Artwork Generation: ทำอาร์ตเวิร์คด้วยคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า Electronic Computer Aided Design จะได้ไฟล์ที่ใช้ทำ PCB
2. Drilling: หลังจากได้มาสเตอร์อาร์ตเวิร์คแล้ว นำแผ่น PCB เปล่าชนิดสองหน้ามาเจาะรูด้วยเครื่องเจาะอัตโนมัติ และทำความสะอาดแผ่น PCB
3. Copper Plating: นำ PCB ที่ผ่านการเจาะและล้างทำความสะอาดแล้วมาชุบทองแดงด้วยเคมี จะได้ชั้นทองแดงบางๆเคลือบไว้ จากนั้นนำมาชุบทองแดงด้วยไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อเพิ่มความหนาของชั้นทองแดงที่เคลือบ และทำความสะอาดแผ่น PCB
4. Laminate: นำแผ่น PCB ที่ทำความสะอาดแล้ว มารีดประกบด้วยแผ่นฟิล์มไวแสง
5. Exposure: นำแผ่นฟิล์ม Artwork master มาประกบแผ่น PCB ทั้งสองด้านให้ตรงกับรูที่เจาะไว้ ถ่ายผ่านด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตในระยะเวลาที่กำหนด
6. Resist Stripper: นำ PCB ที่ได้จากการอัดแสง มาผ่านกระบวนการ Developing ซึ่งจะใช้น้ำยาเคมีทำให้เนื้อฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสงหลุดออกไป จะได้ PCB ที่มีฟิล์มชั้นลาย แต่ลายนี้กลับตรงข้ามกัน โดยด้านที่ต้องการจะถูกหุ้มด้วยฟิล์ม ส่วนด้านที่ต้องการจะไม่มีฟิล์มและเห็นเป็นทองแดงอย่างชัดเจน
7. Tin/Lead Plating: นำ PCB ที่มีลายฟิล์มเคลือบอยู่มาชุบตีบุกด้วยไฟฟ้า ซึ่งตีบุกก็จะติดเข้ากับส่วนที่นำไฟฟ้า
8. Etching: ล้างชั้นของลายเส้น Dry-Film ที่เคลือบ PCB อยู่ออก จะได้แผ่น PCB ที่มีเส้นตีบุกเคลือบอยู่ โดยส่วนที่ไม่ต้องการจะเป็นทองแดงอย่างเดิม ทำการกัดทองแดงออกด้วยวิธีการทางเคมี
9. Solder Re-flow: อบแผ่น PCB ด้วยไอน้ำมันร้อน
10. Solder Resist: ทำการพิมพ์ซิลิโคนบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผ่านกระบวนการ Solder Reflow มาแล้วด้วยสีพิเศษที่มีคุณสมบัติทนความร้อน เพื่อป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้า
11. Inspection: ขั้นตอนสุดท้ายที่สำคัญ คือ การตรวจสอบความบกพร่องของ PCB

## 2.1.2 การใช้น้ำในการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์

ในกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์จะมีขั้นตอนที่ใช้น้ำดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ที่มีการใช้น้ำ

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 น้ำเสียจากการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์

น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 2.2 จะต้องมีการบำบัดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 น้ำเสียจากการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB)

จุดกำเนิด	ลักษณะ	ปริมาณ (หน่วย/เวลา)	การบำบัด
1. กระบวนการเจาะรูแผ่นพีซีบี	น้ำเสียมีการปนเปื้อนฝุ่นผงจากการเจาะ	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี
2. กระบวนการชุบทองแดงด้วยเคมีและไฟฟ้า	น้ำเสียมีสมบัติเป็นกรดและมีทองแดงเจือปน	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี
3. กระบวนการล้างเนื้อฟิล์ม	น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของเนื้อฟิล์มและมีสมบัติเป็นกรด	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี
4. กระบวนการชุบดีบุก	น้ำเสียมีสมบัติเป็นกรดและมีดีบุกเจือปน	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี
5. กระบวนการกัดทองแดง	น้ำเสียมีสมบัติเป็นกรดและมีทองแดงเจือปน	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี
6. กระบวนการเคลือบผิวบอร์ดด้วยสี	น้ำเสียมีสมบัติเป็นกรด	3,600 ลบ.ม./วัน	รวบรวมเข้าระบบบำบัดน้ำเสียด้วยสารเคมี

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2550)

### 2.1.4 วิธีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์

มีขั้นตอนการบำบัดดังนี้

1. น้ำเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกรวบรวมและส่งไปบ่อรวมน้ำเสียซึ่งทำหน้าที่รวบรวมและปรับสภาพให้น้ำเสียมีคุณสมบัติค่อนข้างคงที่ น้ำถึงที่อยู่ใต้น้ำส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารอินทรีย์จำพวก photosensitive organic monomer โลหะต่างๆ และ chelating agent ในถึงปรับสภาพนี้ จะมีความเข้มข้นของน้ำเสียสูงสุด

2. หลังจากผ่านถึงปรับสภาพ น้ำเสียจะผ่านไปสู่อ่างปรับพีเอชด้วยกรด  $H_2SO_4$  ให้มีค่าพีเอชประมาณ 2-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชแล้วจะถูกส่งไปยังถังเติม  $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  เพื่อตกตะกอน Chelating agent ต่างๆที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียและมีการเติมอากาศ หลังจากการเติม  $\text{FeSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  แล้ว น้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนเพื่อแยกตะกอน  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  ออกไป โดยปล่อยให้ไหลล้นออกจากถังไปสู่ถังเติมต่าง

4. ถังเติมต่างเป็นถังสำหรับตกตะกอนโลหะหนักที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย โดยในถังนี้จะควบคุมพีเอชของน้ำเสียระหว่าง 9-10.5 ด้วยการเติมปูนขาว หลังจากมีค่าพีเอชคงที่แล้วโลหะที่ปะปนในน้ำเสียจะตกตะกอนอยู่ในรูปของแข็งแขวนลอย

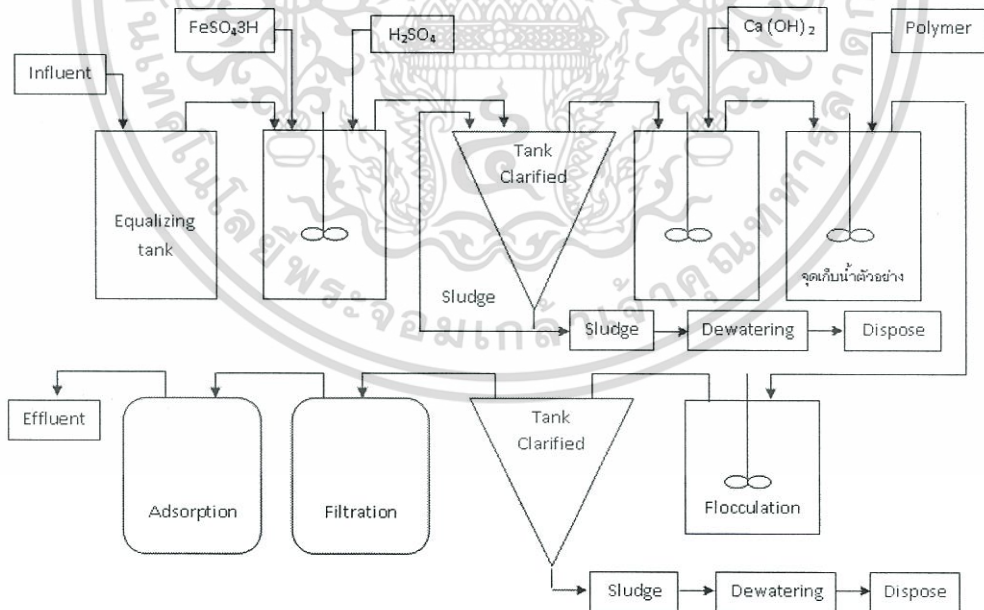
5. น้ำเสียที่มีตะกอนไฮดรอกไซด์แขวนลอยอยู่ จะถูกส่งไปยังถังเติมพอลิเมอร์เพื่อเพิ่มขนาดของตะกอนสำหรับจับตะกอนของไฮดรอกไซด์ โดยกระบวนการ Flocculation ซึ่งมีทั้งถังกวนเร็วและกวนช้า ทั้งไว้ให้ตะกอนจมตัวลงในถัง Thickener

6. หลังจากให้ตะกอนจมตัวลงแล้ว จะเกิดการแยกชั้นของน้ำใสและตะกอนจะตกอยู่ที่ก้นถัง น้ำส่วนใสที่ด้านบนจะไหลล้นไปสู่ถังกรอง

7. ถังกรองทำหน้าที่กรองของแข็งที่ยังแขวนลอยปะปนอยู่กับน้ำเสีย ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์เพื่อกำจัดโลหะที่ยังหลงเหลืออยู่ในสภาพไอออนต่อไป

8. ถังถ่านกัมมันต์จะทำหน้าที่กำจัดโลหะที่ยังอาจปะปนอยู่ในน้ำเสีย ด้วยกระบวนการดูดติดผิว (Adsorption) เมื่อน้ำเสียที่ผ่านออกจากถังถ่านกัมมันต์นี้ จะถูกตรวจสอบก่อนที่จะปล่อยออกไปสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ (Effluent)

9. ตะกอนในข้อ 6 จะผ่านเครื่องรีดน้ำเพื่อกำจัดน้ำออก จะได้ตะกอนที่มีโลหะปนเปื้อนจากกระบวนการบำบัดข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนผังขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ (วิชัย, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 การตกตะกอนโลหะหนัก

การตกตะกอนโลหะหนัก (Heavy Metal Precipitation) เป็นวิธีบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียอุตสาหกรรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย หลักการคือเติมสารเคมีที่สามารถรวมกับโลหะหนัก แล้วเกิดเกลือที่ละลายน้ำได้ไม่ดี ทำให้ไอออนรวมกันกลายเป็นของแข็ง (Precipitate) และแยกตัวออกมาจากน้ำเสีย โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

### 2.2.1 การตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากโลหะหลายชนิดสามารถรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ได้สารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีค่าการละลายต่ำ การบำบัดด้วยการปรับ pH ควบคุมการทำงานได้ง่าย โดยใช้ Automate pH control เบสที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) สามารถแสดงสมการเคมีการตกตะกอนของโลหะในรูปไฮดรอกไซด์ได้ดังสมการที่ (2.1) – (2.2)



โซเดียมไฮดรอกไซด์ละลายน้ำได้ดี สามารถปรับพีเอชให้มีค่าสูงได้ ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นไม่มาก ส่วนปูนขาวก็นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก เหมาะสำหรับน้ำเสียที่ไม่ต้องปรับพีเอชให้สูงมาก แต่อาจมีปัญหาเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำของแคลเซียม เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ทำให้ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นร่วมกับตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่ต้องนำไปกำจัดต่อมีปริมาณมาก ค่า  $K_{sp}$  ของโลหะไฮดรอกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 2.2

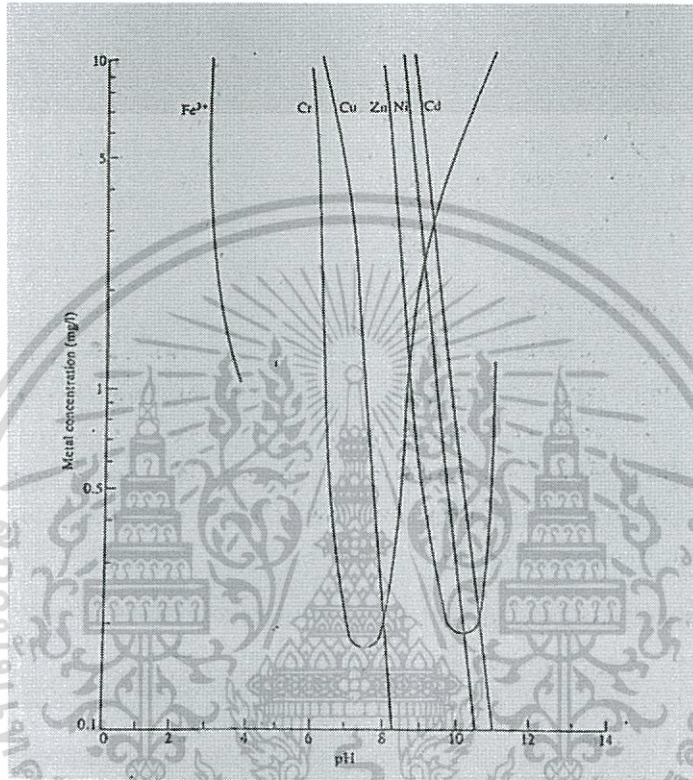
ตารางที่ 2.2 ค่า  $K_{sp}$  ของโลหะไฮดรอกไซด์

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าคงที่ผลคูณของการละลาย ( $K_{sp}$ )
$\text{Cd}(\text{OH})_2$	$2 \times 10^{-14}$
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	$2 \times 10^{-20}$
$\text{Co}(\text{OH})_2$	$1.6 \times 10^{-15}$
$\text{Cr}(\text{OH})_3$	$6.3 \times 10^{-31}$
$\text{Zn}(\text{OH})_2$	$1.2 \times 10^{-17}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$8 \times 10^{-16}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$6 \times 10^{-38}$
$\text{Pb}(\text{OH})_2$	$1.2 \times 10^{-15}$
$\text{Mn}(\text{OH})_2$	$2 \times 10^{-13}$
$\text{Mn}(\text{OH})_3$	$1 \times 10^{-36}$
$\text{Ni}(\text{OH})_2$	$3 \times 10^{-17}$

ที่มา: พรรษาธรรม (2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อปรับพีเอชให้กับน้ำเสีย ไอออนของโลหะจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) เกิดเป็นตะกอนแยกตัวกันออกมา เมื่อเติมเบสเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของไอออนโลหะจะค่อยๆ ลดลงจนตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จะเกิดมากขึ้นจนในที่สุดคงที่แม้ว่าจะเติมเบสต่อไป แต่มีโลหะบางชนิดถ้าเติมเบสมากเกินไปโลหะจะรวมกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่มากเกินไป เกิดเป็นไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ โลหะพวกนี้ได้แก่ สังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) แคดเมียม ( $\text{Cd}^{2+}$ ) คอปเปอร์ ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) และนิกเกิล ( $\text{Ni}^{2+}$ ) การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (พรุชวรณ, 2559)

### 2.2.2 การตกตะกอนโลหะทองแดง

ไอออนของทองแดงจะละลายน้ำได้ดีที่พีเอชต่ำกว่า 6.5 เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นมากกว่า 7.0 ค่าการละลายของไอออนจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ จนกระทั่งพีเอชประมาณ 8.2 จะมีค่าการละลายต่ำสุด เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจะไม่ทำให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของคอปเปอร์ละลายน้ำกลับเข้ามาเหมือนไฮดรอกไซด์ของโครเมียมและสังกะสี

เนื่องจากทองแดงเป็นโลหะที่มีราคาอาจนำตะกอนที่ได้จากการบำบัดกลับมาใช้ประโยชน์ได้ในน้ำเสียที่มีทองแดงเข้มข้นต่ำกว่า 200 mg/L อาจทำให้เข้มข้นขึ้นโดยวิธี Ion exchange หรือ ดูดซับด้วย Activated carbon ก่อนที่จะไปตกตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ ถ้าน้ำเสียมีซัลเฟตไอออนเข้มข้นมาก จะได้ตะกอนแคลเซียมซัลเฟตรวมอยู่กับตะกอนคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีมูลค่าลดลงแก้ไขได้โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชแทน ซึ่งจะมีราคาแพงกว่าปูนขาว แต่จะมีข้อดีคือละลายน้ำได้ดีและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นไม่มาก (พรุชวรณ, 2559)

## 2.3 ทองแดง

โลหะทองแดงเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากที่สุดประเภทหนึ่ง ทองแดงมีสัญลักษณ์ทางเคมี คือ Cu แร่ทองแดงสามารถพบในสภาพบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ คือพบในสภาพที่เป็นโลหะ (Metallic state) หรือในสภาพทองแดงธรรมชาติ (Native copper) ทำให้รวบรวมและนำมาหลอมเป็นโลหะสำหรับใช้งานได้ง่าย (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2552)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อน มีเลขออกซิเดชัน +1, +2 และ +3 แต่โดยทั่วไปพบทองแดงที่มีเลขออกซิเดชัน +1 (cuprous ion) และ +2 (cupric ion) เท่านั้น ซึ่ง  $\text{Cu}^+$  มีความว่องไวออกซิเดชันและรีดักชันได้ง่ายกว่า แต่ความเสถียรของทั้ง  $\text{Cu}^+$  และ  $\text{Cu}^{2+}$  นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของไอออนลบหรือลิแกนด์ ค่าคงที่ในการละลาย และชนิดของอะตอมในผลึก ทองแดงละลายได้ดีในกรดซัลฟิวริก และกรดไนตริก โดย  $\text{Cu}^{2+}$  ส่วนใหญ่ละลายได้ในน้ำ หากในน้ำมีปริมาณทองแดงมากกว่า 0.1 ppm จะทำให้เกิดพิษต่อสัตว์น้ำได้ (สุภาวดี, 2539)

### 2.3.1 สมบัติทั่วไป

สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดงดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทั่วไปของโลหะทองแดง

โลหะทองแดง	คุณสมบัติทั่วไป
ชื่อ, สัญลักษณ์, เลขอะตอม	ทองแดง, Cu, 29
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
หมู่, คาบ, บล็อก	11, 4, d
มวลอะตอม	63.546(3) กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	$[\text{Ar}] 3d^{10} 4s^1$
อิเล็กตรอนต่อระดับพลังงาน	2, 8, 18, 1

ที่มา: วิกิพีเดีย (2558)

### 2.3.2 สมบัติทางไฟฟ้า

ความสามารถในการให้และรับอิเล็กตรอนของธาตุแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ธาตุที่มีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดี สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่รับอิเล็กตรอนได้ดี

ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานเป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการแย่งชิงอิเล็กตรอนสามารถนำมาคำนวณหาค่าศักย์ได้ โดยที่ครึ่งปฏิกิริยาที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันสูง สารนั้นจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนหรือถูกรีดิวซ์ได้ดี หรือเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ส่วนครึ่งปฏิกิริยาที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำ สารนั้นจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ไม่ดี แต่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่  $25^{\circ}\text{C}$  ของทองแดงแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานที่ 25°C ของทองแดง

Reduction	$E^0$ (Volts)
$\text{Cu}^{2+} + e^- \longrightarrow \text{Cu}^+$	+0.16
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \longrightarrow \text{Cu(s)}$	+0.34

ที่มา: พรชวรณ (2559)

ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของเซลล์ ( $E^0_{\text{cell}}$ ) คือ ผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของสารที่ถูกรีดิวซ์ และสารที่ถูกออกซิไดซ์ โดยศักย์ไฟฟ้ารีดักชันเป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอนจะมีเครื่องหมายเป็นบวก (ขั้ว Cathode) และศักย์ไฟฟ้ารีดักชันฝ่ายให้อิเล็กตรอน จะมีเครื่องหมายเป็นลบ (ขั้ว Anode) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$E^0_{\text{cell}} = E^0_{\text{cathode}} - E^0_{\text{anode}} \quad (2.3)$$

การใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันของครึ่งเซลล์มีประโยชน์ในการศึกษาปฏิกิริยาในเซลล์ไฟฟ้า เช่น บอกได้ว่าสารหรือไอออนใดเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีหรือเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดี ตลอดจนบอกได้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ (วิชย์, 2553)

### 2.3.3 ประโยชน์ของทองแดง

โลหะทองแดงมีคุณสมบัติเด่นมากมายโดยเฉพาะการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่สูง มีความต้านทานการกัดกร่อน สามารถแปรรูปด้วยวิธีต่างๆ ได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรง และมีความต้านทานสูง ดังนั้นโลหะทองแดงจึงมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางดังนี้ (ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่, 2552)

1. เนื่องจากทองแดงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีการใช้งานส่วนใหญ่จึงเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ใช้ทำสายไฟ เคเบิล มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไดนาโม พัดลม ระบบควบคุมในโรงงาน อุปกรณ์ไฟฟ้า ระบบจ่ายกำลัง เครื่องปรับอากาศ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
2. ด้วยคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนทองแดงจึงนำมาใช้ในการก่อสร้างหลายอย่าง เช่น ทำหลังคา ท่อน้ำและข้อต่อต่างๆ ระบบให้ความร้อน และระบบปรับอากาศ
3. ใช้ทำเครื่องจักรกล เครื่องใช้ในบ้าน เนื่องจากขึ้นรูปง่าย และเนื่องจากมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเลและมีการถ่ายเทความร้อนสูง จึงใช้ทำท่อ วาล์ว ข้อต่อในโรงกลั่น น้ำจากน้ำทะเล อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องมือกลอื่นๆ
4. ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ และชิ้นส่วนเครื่องบิน เรือเดินสมุทร หัวจักรรถไฟ อุปกรณ์สวิตช์ และสัญญาณต่างๆ
5. การใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ของทองแดง เช่น ใช้ผลิตยูทริกันท์ ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องวัดต่างๆ เครื่องประดับ เครื่องตกแต่ง เหริยญาษาปณ์ บรรจุภัณฑ์ และใช้ผลิตโลหะผสม เช่น ทองเหลือง และทองสัมฤทธิ์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กระบวนการชะละลายทางเคมี

กระบวนการชะละลายทางเคมี เป็นกระบวนการชะละลายโลหะด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการทางเคมี คือ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และสารละลายไฮดรอกไซด์ คือ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีของโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้ และสามารถละลายโลหะหนักได้เป็นส่วนมาก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการชะละลายโลหะชนิดต่างๆเป็นดังสมการที่ (2.4) - (2.7)



สำหรับสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เพื่อสกัดแยกทองแดงได้แก่กรดซัลฟิวริก กรดไนตริกและกรดกัดทอง โดยกรดเหล่านี้จะทำหน้าที่ในการทำละลายทองแดงซึ่งส่งผลให้ทองแดงในรูปของแข็งถูกชะละลายออกมากลายเป็นทองแดงในรูปของสารละลาย ตัวอย่างเช่นการใช้กรดไนตริกในการชะละลายทองแดงตามปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2.8) - (2.9)



สำหรับผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เกิดขึ้นอาจอยู่ในรูปของตะกอนของแข็งหรือสารละลายก็ได้ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์สุดท้ายของโลหะที่ต้องการ โดยหากผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นตะกอนของแข็งที่มีความบริสุทธิ์สูงเพียงพอแล้ว ก็สามารถใช้อธิกรองแยก หลังจากนั้นอาจใช้วิธีหลอมเป็นแท่งโลหะ แต่ถ้าหากตะกอนโลหะยังมีความบริสุทธิ์ไม่เพียงพออาจต้องใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีหรืออาจใช้การสกัดโดยกระบวนการสารละลายเคมีอีกครั้ง เพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของโลหะที่ต้องการจากตะกอนดังกล่าว (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

การศึกษากระบวนการชะละลาย มีปัจจัยหลายอย่างส่งผลต่อประสิทธิภาพการชะละลาย (ศุภกันส์, 2548) ได้แก่

#### 1. ชนิดของกรด

กรดที่ใช้ในการชะละลาย ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งกรดเหล่านี้เป็นกรดแก่ที่สามารถชะละลายโลหะหนักได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากกรดเหล่านี้เป็นกรดแก่ที่แตกตัวได้ร้อยละ 100 สามารถแสดงสมการการแตกตัวของกรดทั้งสามชนิดได้ตั้งสมการที่ (2.10) – (2.13) งานวิจัยของ Wu et al. (2009) ได้ศึกษาความสามารถในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนของโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก และกรดไฮโดรคลอริก และพบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงมากกว่าสารละลายกรดไนตริก และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก



#### 2. ค่าความเป็นกรด – เบส

ความสามารถในการชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด – เบสลดลง ค่าความเป็นกรด – เบสที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1-2

#### 3. เวลาในการชะละลาย

เวลาที่ใช้ในการชะละลายจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าความเป็นกรด – เบส ชนิดของโลหะ เป็นต้น

#### 4. ชนิดของโลหะ

โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการถูกชะละลายได้ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับว่าโลหะอยู่ในรูปของสารประกอบชนิดใด ซึ่งโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบไอออนิกที่เมื่ออยู่ในน้ำแล้วแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย

#### 5. อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาการชะละลายส่วนใหญ่ จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การชะละลายจะเพิ่มขึ้น

#### 6. ปริมาณโลหะ

ค่าการชะละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณโลหะเพิ่มขึ้น

#### 7. ปริมาณกรด

ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 8. ขนาดอนุภาคของตะกอนโลหะ

โลหะจะอยู่ในรูปของตะกอน ถ้าตะกอนที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับกรดน้อย ทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก

## 9. ความเข้มข้นของตะกอนโลหะ

ตะกอนโลหะที่มีความเข้มข้นน้อยๆ ทำให้อนุภาคภายในตะกอนอยู่ชิดติดกันมากขึ้น ทำให้ตะกอนโลหะมีความเสถียร ค่าการละลายจึงลดลง

กระบวนการชะละลายเคมีมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก มีความสามารถสกัดแยกโลหะที่ต้องการได้อย่างเจาะจงมาก โดยอาศัยการเลือกสารเคมีที่มีความเจาะจงกับโลหะชนิดนั้นๆ แต่ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ การเกิดขึ้นของของเสียหลังเสร็จสิ้นกระบวนการไม่ว่าจะเป็นน้ำเสียหรือกากตะกอนซึ่งจะต้องได้รับการจัดการอย่างถูกวิธี เนื่องจากสารเคมีบางชนิดที่ใช้ในกระบวนการเป็นสารอันตรายเช่นกรดไฮยาไนต์ เป็นต้น ดังนั้นการเลือกรูปแบบของกระบวนการจึงควรเลือกให้มีความเหมาะสมกับขนาดและแหล่งทรัพยากรที่มีของตนเอง (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

## 2.5 รูปแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยส่วนใหญ่คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตามหรือผลการตอบสนอง (Y) โดยมีเป้าหมายคือเพื่อนำไปใช้หาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ของตัวแปรอิสระที่ทำให้ตัวแปรตามมีค่าตรงตามที่กำหนด คือสูงสุด (Maximum) หรือต่ำสุด (Minimum) (เกศระวีและคณะ, 2554) รูปแบบการทดลองที่นิยมดำเนินการได้แก่ การทดลองแบบทีละปัจจัย (One-Variable-At-A-Time, OVAT) และการออกแบบการทดลอง (Designs of Experiments, DOEs)

### 2.5.1 การทดลองแบบทีละปัจจัย

รูปแบบการทดลองแบบนี้เป็นรูปแบบที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เพื่อหาผลของระดับต่างๆ ในแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา ทำการทดลองโดยวัดผลการตอบสนองที่เกิดจากการแปรผันระดับต่างๆ ของปัจจัยที่ศึกษา โดยกำหนดให้ปัจจัยอื่นมีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่นศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อปริมาณผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาคงที่ที่ 225 องศาเซลเซียส ข้อดีของรูปแบบนี้คือ สามารถประมวลผลการวิเคราะห์ได้รวดเร็วเนื่องจากมีประสิทธิภาพในการศึกษาผลของปัจจัยเพียงสภาวะหนึ่งเท่านั้น และข้อจำกัดคือ ไม่ทราบอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยต่อตัวแปรตาม ซึ่งอาจทำให้การพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมของการทดลองคลาดเคลื่อนได้

### 2.5.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Experimental design) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม ที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ (ปรเมศ, 2545) ความสำคัญของการออกแบบการทดลองคือเพื่อให้ดำเนินการทดลองได้ถูกต้องตามหลักวิชาการ เป็นการควบคุมตัวแปรที่มีอิทธิพลบางตัวที่ไม่ต้องการและทำให้การทดลองนั้นเป็นที่น่าเชื่อถือ อีกทั้งเพื่อใช้วิธีการทางสถิติวิเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกต้องและทำให้สรุปผลการทดลองหรือวิจัยได้อย่างถูกต้อง (นิตยา และคณะ, 2559) รูปแบบของการออกแบบการทดลองที่ใช้อยู่มีหลากหลายรูปแบบแต่จะขอกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยซึ่งก็คือการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

### 2.5.3 การทดลองแบบแฟคทอเรียล

การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) คือการทดลองที่ศึกษาการตอบสนองของตัวแปรตามที่มีค่าแปรผัน เนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป เช่น ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อผลผลิตของเมทิลเอสเทอร์ การทดลองแบบแฟคทอเรียลจะทำให้ทราบผลของการเปรียบเทียบระหว่างระดับในแต่ละปัจจัยที่ทำการศึกษา และสามารถวิเคราะห์ความสำคัญของความเกี่ยวข้องหรืออิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยได้

สัญลักษณ์ที่จำเป็นของแฟคทอเรียล

1. อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ เช่น A, B, C หมายถึงปัจจัย (factor)
2. อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์ใหญ่ที่เขียนรวมกัน (combination) เช่น AB, AC หมายถึงปฏิกิริยาสัมพันธ์ หรืออิทธิพลร่วม
3. อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กพร้อมตัวห้อยท้าย (subscript) เช่น  $a_i, b_j, c_k$  หมายถึงสมาชิกหรือระดับ (level) ของปัจจัยต่างๆ คือ  $a_i$  เป็นระดับต่างๆของปัจจัย A เป็นต้น โดยที่ตัวห้อยท้ายบ่งถึงระดับที่มีในปัจจัยนั้น หาก A มี 4 ระดับ  $i$  จะมีค่า 1, 2, 3 และ 4 หรือบางครั้งเริ่มจาก 0 คือ  $i = 0, 1, 2$  และ 3 โดย 0 ในที่นี้หมายถึงระดับต่ำสุดของปัจจัย
4. อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่เขียนรวมกัน เช่น  $a_i b_j c_k$  หมายถึงสิ่งทดลองซึ่งเกิดจากรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า treatment combination

ความหมายของเทอมที่สำคัญในแฟคทอเรียล

1. อิทธิพลหลัก (main effect) หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา
2. อิทธิพลร่วม (interaction) หมายถึงการแสดงออกของระดับต่างๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย
3. อิทธิพลแฟคทอเรียล (factorial effects) หมายถึงอิทธิพลต่างๆทั้งอิทธิพลหลัก และอิทธิพลร่วมทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีค่าเท่ากับ (จำนวนการรวมตัว - 1) หรือเท่ากับ d.f. ของสิ่งทดลอง (สุรพล, 2536)

ข้อดี

1. ในกรณีที่แต่ละปัจจัยเป็นอิสระต่อกัน (ไม่มีอิทธิพลร่วมกัน) ค่าของอิทธิพลเดี่ยว (Simple effect) จะเท่ากับค่าของอิทธิพลหลัก (Main effect) จึงใช้เฉพาะอิทธิพลหลักในการอธิบายบทบาทของปัจจัยนั้นได้และแม่นยำ (Precision) เท่ากันเสมือนผู้ทำการทดลองใช้แต่ละปัจจัยนั้นในการทำการทดลองเท่านั้น
2. ในกรณีที่แต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันก็จะสามารถศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆไปพร้อมๆกันและรู้ถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆเหล่านั้นด้วย ทำให้สรุปผลได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้นและกว้างขวางขึ้นเพราะถ้าทำการทดลองทีละปัจจัยอาจไม่ทราบถึงอิทธิพลร่วมทำให้การสรุปผลอาจผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสีย

1. เมื่อจำนวนปัจจัยเพิ่มมากขึ้นหรือระดับของแต่ละปัจจัยมากขึ้นจะทำให้ขนาดของการทดลองมีขนาดใหญ่ทำให้ความแปรปรวนในการทดลองมีมากขึ้น ความแม่นยำก็น้อยลงและการหาวัสดุทดลองที่ใกล้เคียงกันก็ยากขึ้น แม้จะมีการจัดบล็อกก็จะทำให้บล็อกมีขนาดใหญ่ขึ้น
2. การทดลองที่มีขนาดใหญ่จะแปลผลได้ยากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อแต่ละปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกัน

ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง สามารถสรุปได้ดังนี้ (สิทธิชัย, 2559)

1. ใช้ในการทดลองพื้นฐาน (Preliminary Experiment) เมื่อต้องการสำรวจปัจจัยต่างๆที่มีจำนวนมากเพื่อดูว่ามีปัจจัยใดบ้างที่สำคัญและปัจจัยใดไม่สำคัญ
2. ใช้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างปัจจัยต่างๆโดยเฉพาะเพื่อดูว่าปัจจัยต่างๆนั้นมีอิทธิพลร่วมกันหรือไม่อย่างไร
3. ใช้ในการทดลองที่ต้องการข้อเสนอแนะภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ซึ่งอาจใช้เงื่อนไขต่างๆนั้นเป็นปัจจัยได้เช่น ต้องการศึกษาวาควรปลูกกุหลาบที่อุณหภูมิระดับไหน ความชื้นเท่าไรจึงจะดี

การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

(ก) กำหนดตัวแปรอิสระ (X) ที่ต้องการศึกษา โดยระดับของตัวแปรอิสระที่ผันแปรต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาและข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X) ต้องมีความสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม (Y) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ได้

การคำนวณค่าที่แท้จริงในแผนการทดลอง สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (2.14)

$$X_i = (A_i - A_0) / \Delta A \quad (2.14)$$

โดยที่  $X_i$  คือ ระดับของปัจจัย ซึ่งแทนด้วย -1, 0, และ 1 (ระดับต่ำ, กลาง และสูง)  
 $A_i$  คือ ค่าที่แท้จริงของระดับ  
 $A_0$  คือ (ผลบวกระหว่างค่าที่แท้จริงของระดับสูงและระดับต่ำ) / 2  
 $\Delta A$  คือ (ผลต่างระหว่างค่าที่แท้จริงของระดับสูงและระดับต่ำ) / 2

ตัวอย่างการคำนวณค่าที่แท้จริงของระดับกลาง (0)

กำหนดให้ ค่าที่แท้จริงของระดับสูง = 1.0

ค่าที่แท้จริงของระดับต่ำ = 0.2

$X_i$  = 0

$$\text{จะได้ } 0 = \frac{[A_i - \left(\frac{1.0+0.2}{2}\right)]}{(1.0-0.2)/2}$$

$$0 = \frac{(A_i - 0.6)}{0.4}$$

$$A_i = 0.6$$

ดังนั้น ค่าที่แท้จริงของระดับกลาง (0) เท่ากับ 0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) กำหนดตัวแปรตาม (Y) ที่ต้องการศึกษา เช่น ผลผลิต ความหนืด ความแข็ง เป็นต้น

(ค) การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ที่เหมาะสมโดยปกติแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรอิสระ เช่น ถ้ามีตัวแปรอิสระ 2 ตัวแปร จะมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 แบบจำลอง

Linear model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i$$

Linear + 2-way interaction model

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij}$$

เมื่อ  $X_i, X_{ij}$  คือ ตัวแปรอิสระ

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลอง

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

การเลือกตัวแบบจำลองที่เหมาะสมจะพิจารณาจาก 2 ปัจจัยได้แก่

ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error of the Estimate; S) ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมมาก แต่ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่ามากแสดงว่าตัวแบบจำลองที่นำมาใช้มีความเหมาะสมน้อยมากและถ้าในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าเท่าศูนย์แสดงว่าตัวแบบจำลองมีความเหมาะสมดีมาก

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination;  $R^2$ ) เป็นค่าที่บอกถึงว่าชุดของตัวแปรต้น หรือตัวแปรอิสระ (X) สามารถอธิบายตัวแปรตาม (Y) ได้มากน้อยแค่ไหน ค่า  $R^2$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งตัวแบบจำลองที่ดีควรจะได้ค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่อยู่ในตัวแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี เมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่างนิยมเลือก  $R^2$  (adj) มาใช้ในการวิเคราะห์มากกว่า ซึ่งค่า  $R^2$  (adj) จะมีค่าที่ต่ำกว่า  $R^2$  เล็กน้อยโดยค่า  $R^2$  (adj) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (สิทธิชัย, 2559)

(ง) เมื่อได้แบบจำลองที่มีความเหมาะสมแล้วจึงนำไปทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ซึ่งเป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในแบบจำลองสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) มีการทดสอบ 2 ลักษณะ (พันธกานต์, 2558) ดังนี้

1. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกันโดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = \beta_j = \beta_k = \dots = \beta_k = 0$  หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1 : \beta_i \neq 0$  หรือมีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัวที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F- test หรือสามารถดูจากค่า  $p$  value ได้โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) มาก่อนถ้า  $p$  value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) จึงตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  นั่นคือตัวแปรอิสระทุกตัวในแบบจำลองไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า  $p$  value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) จะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  (หรือยอมรับสมมติฐาน  $H_1$ ) นั่นคือตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัวสามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

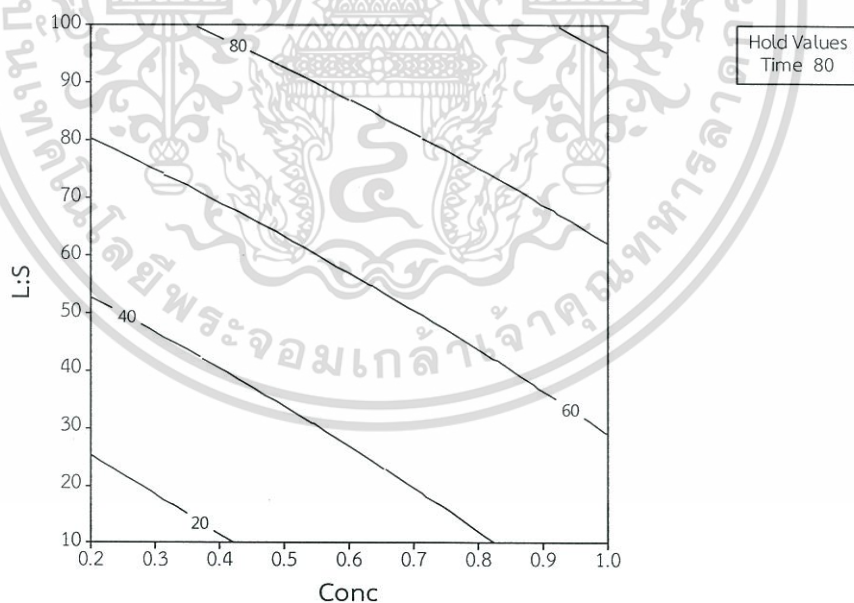
2. การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $\beta_i$ ) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัวโดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0: \beta_i = 0$  หรือตัวแปรอิสระที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

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

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ t - test หรือสามารถพิจารณาจากค่า  $p$  value ก็ได้โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ถ้า  $p$  value ของตัวแปรที่  $i$  มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญดังนั้นตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน  $H_0$  แสดงว่าตัวแปรอิสระที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า  $p$  value ของตัวแปรที่  $i$  มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญดังนั้นจะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  (หรือยอมรับสมมติฐาน  $H_1$ ) นั่นแสดงว่าตัวแปรอิสระที่  $i$  มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

(จ) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการสร้างกราฟสองมิติที่เรียกว่ากราฟโครงร่าง (Contour plot) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

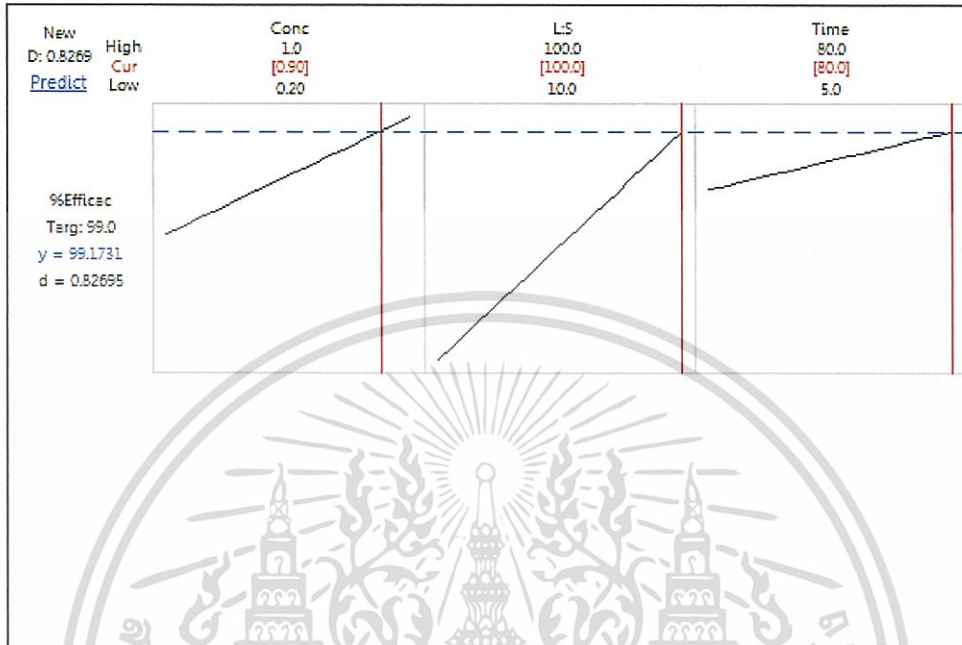


รูปที่ 2.5 กราฟโครงร่าง (Contour plot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(จ) หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัย (Response optimizer)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมจะถูกนำไปใช้เพื่อหาสถานะที่เหมาะสม (Optimization) ของตัวแปรอิสระที่ทำให้ตัวแปรตามมีค่าตรงตามที่กำหนด คือสูงสุด (Maximum) หรือต่ำสุด (Minimum) ซึ่งจะแสดงในกราฟ Optimization plot ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟ Optimization plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจัย (2553) ศึกษาการนำโลหะทองแดงออกจากกากตะกอนของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ โดยการสกัดด้วยสารละลายอีดีทีเอ และตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายสกัด โดยกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงออกจากกากตะกอนคือ ใช้สารละลายอีดีทีเอเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร จำนวน 20 มิลลิลิตร ที่พีเอช 8 ในการสกัดกากตะกอน 0.5 กรัม เป็นเวลา 9 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากกากตะกอนมากกว่า 90% และสภาวะที่เหมาะสมในการแยกทองแดงจากสารละลาย Cu-EDTA คือ ปรับพีเอชเป็น 2 อัตราส่วนโดยโมลผงเหล็กต่อทองแดงที่ใช้เท่ากับ 6 : 1 และเวลาในการตกตะกอนคือ 30 นาที ซึ่งสามารถนำสารละลายอีดีทีเอกลับมาใช้ในการสกัดทองแดงได้มากกว่า 5 ครั้ง โดยมีประสิทธิภาพการสกัดทองแดงมากกว่า 90%

ปัทมาพร และคณะ (2553) ศึกษาการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการใช้อัตราโซนิค จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงคือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร สกัดส่วนกากตะกอนต่อปริมาณกรดซัลฟิวริก 33 กรัมต่อลิตร สกัดด้วยเครื่องอัตราโซนิคกำลัง 600 วัตต์เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 60.62%

Kuan et al. (2010) ศึกษาการนำโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก โลหะหนักที่ศึกษาได้แก่ เหล็ก ทองแดง สังกะสี นิกเกิล โครเมียม และแคดเมียม จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนคือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร สกัดส่วนกากตะกอนต่อปริมาณกรด 5 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 99.97% และจากการศึกษาพบว่าโลหะหนักที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว ได้แก่ ทองแดง, สังกะสี, นิกเกิล และแคดเมียม สามารถสกัดออกจากกากตะกอนได้ง่ายกว่าโลหะหนักที่มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ เหล็ก และโครเมียม

Stylianou et al. (2007) ศึกษาการใช้กรดกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โลหะหนักที่ศึกษาได้แก่ นิกเกิล ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว และสังกะสี จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนคือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20% อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน คือ นิกเกิล 74%, ทองแดง 86%, โครเมียม 99%, ตะกั่ว 11% และสังกะสี 72%

Jandova et al. (2000) ศึกษาการนำทองแดงจากกากตะกอนกลับมาใช้ใหม่ โดยมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกสกัดทองแดงจากกากตะกอนร่วมกับการตกตะกอนทองแดงออกจากสารละลายสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ขั้นตอนที่ 2 การเผา  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 โดยการเผาแบบใช้อากาศเพื่อให้ได้  $\text{CuO}$  และขั้นตอนที่ 3 การสกัด  $\text{CuO}$  ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกร่วมกับการตกตะกอนทองแดงจากสารละลายสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 1 คือใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:10 พีเอช 0.1-1.2 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% พีเอช 6 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 2 คือ การเผา  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 3 คือใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% พีเอช 6 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเท่ากับ 85%

Ndiritu et al. (2017) ศึกษาการใช้พื้นผิวผลตอบในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนักจากกากตะกอน (สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว และนิกเกิล) โดยการใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล ปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ ค่าพีเอช, ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเวลาในการสกัด จากการศึกษาพบว่า เวลาในการสกัดส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดมากที่สุด ตามด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอิทธิพลร่วมของเวลาในการสกัดและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะหนักคือ ค่าพีเอชเท่ากับ 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร และเวลาในการสกัดเท่ากับ 10 วัน ประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนัก คือ สังกะสี 98.4%, ทองแดง 98.2%, ตะกั่ว 98.8% และนิกเกิล 98.6%

Wu et al. (2009) ศึกษาการนำทองแดงออกจากกากตะกอนของโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ โดยการใช้สารละลายกรด ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ จากการศึกษาชนิดของกรดที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนพบว่า ที่ความเข้มข้นกรด 1 นอร์มอล อัตราส่วนกากตะกอนต่อปริมาณกรด 1 ต่อ 20 และเวลาในการสกัด 18 ชั่วโมง พบว่า สารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงมากกว่าสารละลายกรดไนตริก และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งประสิทธิภาพในการสกัดเท่ากับ 94%, 90% และ 80% ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดง โดยการใช้สารละลายกรด ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟ คือ ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มอล กำลังเครื่องไมโครเวฟ 800 วัตต์ อัตราส่วนกากตะกอนต่อปริมาณกรด 1 ต่อ 20 เป็นเวลา 20 นาที ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีค่าเท่ากับ 90%

Li et al. (2010) ศึกษาการชะละลายโลหะหนักจากกากตะกอนที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยการใช้อัตราไซนิก ร่วมกับการชะละลายด้วยกรด 2 ขั้นตอน มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกโลหะที่มีค่าน้อย ได้แก่ เหล็ก และโครเมียม ออกจากโลหะที่มีค่ามากกว่า ได้แก่ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ซึ่งเหล็ก และโครเมียมจะถูกแยกออกในรูปของแข็งโดยกระบวนการชะละลาย จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 1 คือ ใช้พีเอช 3.2, กำลังเครื่องอัตราไซนิก 200 วัตต์ และเวลาการสกัด 60 นาที ประสิทธิภาพในการสกัด คือ ทองแดง 96.72%, นิกเกิล 97.77%, สังกะสี 98.00%, โครเมียม 53.03% และเหล็ก 0.44% สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนที่ 2 คือ ใช้พีเอช 4.0, กำลังเครื่องอัตราไซนิก 200 วัตต์และเวลาในการสกัด 100 นาที ประสิทธิภาพในการสกัด คือ ทองแดง 75.03%, นิกเกิล 81.05%, สังกะสี 81.39%, โครเมียม 1.02% และเหล็ก 0%

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) รุ่น AAnalyst200 บริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกา
2. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท Denver Instrument ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity meter) รุ่น C860 บริษัท Consort bvba ประเทศเบลเยียม
4. ตู้อบให้ความร้อน (Oven) รุ่น UN55 บริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
5. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (Incubator shaker) รุ่น JSSI-100C บริษัท JS Research Inc. ประเทศเกาหลีใต้
6. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204 บริษัท Mettler Toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์
7. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Vacuum Filtration Apparatus) รุ่น A-1000s บริษัท EYELA ประเทศจีน
8. เครื่องปั่นเหวี่ยงตะกอน (Centrifuge)
9. เดซิเคเตอร์ (Desiccator)
10. ตะแกรงร่อน ขนาด 10 mesh
11. ไมโครปิเปตรุ่น Nichipet EX บริษัท Nichiryo ประเทศญี่ปุ่น
12. กระดาษกรอง Whatman No. 42
13. Syringe Filter Nylon membrane 0.45  $\mu\text{m}$
14. บริภัณฑ์พลาสติก

#### 3.1.2 สารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
2. กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid,  $\text{HCl}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Fisher Chemical ประเทศอังกฤษ
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
5. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba ประเทศอิตาลี
6. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์ (Phenolphthalein)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

### 3.2 การเตรียมตัวอย่าง

กากตะกอนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เป็นกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแผ่นวงจรพิมพ์และเคลือบแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยทองแดง ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ในการเก็บรวบรวมกากตะกอนจากบริษัท ดาร์โก้ พีซีบี จำกัด (มหาชน) กากตะกอนที่ได้จะนำมาผึ่งแดดจนแห้งจากนั้นนำมาบดด้วยครก คัดแยกขนาด โดยร่อนด้วยตะแกรงขนาด 10 mesh และนำกากตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงอ้างอิงวิธีการตามงานวิจัยของวิชัย (2553) เก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกแบบปิด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3 การศึกษาสมบัติของกากตะกอน

สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของกากตะกอนที่ทำการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของกากตะกอนที่ทำการศึกษา

พารามิเตอร์	วิธีการหรือเครื่องมือ
1. ค่าพีเอช	เครื่องวัดค่าพีเอช ใช้อัตราส่วนกากตะกอนต่อน้ำเท่ากับ 1:5
2. ค่าการนำไฟฟ้า	เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ใช้อัตราส่วนกากตะกอนต่อน้ำ เท่ากับ 1:5
3. ความเข้มข้นทั้งหมดของทองแดง	ย่อยกากตะกอนด้วยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ในอัตราส่วน 1:1 แล้ววิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการย่อยด้วยเครื่อง AAS (APHA et al., 2012)
4. ชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (XRF)

### 3.4 การศึกษาชนิดของกรดที่ใช้ในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

1. ชั่งกากตะกอนที่ได้จากข้อ 3.2 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรกำหนดให้อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายกรด (mL) ต่อน้ำหนักกากตะกอน (g) มีค่าเท่ากับ 100:1
3. นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที
4. นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด กรองส่วนใสด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42
5. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
6. ทำแบบลงค์เช่นเดียวกับข้อ 1-5 แต่ไม่ใส่กากตะกอน
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 ซ้ำอีก 4 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-7 แต่เปลี่ยนชนิดของสารละลายกรดเป็นกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกตามลำดับ

### 3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโดยการออกแบบการทดลองทางสถิติ

#### 3.5.1 การออกแบบการทดลองวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Design)

ชนิดของกรดที่ใช้ในการศึกษาจะเลือกจากผลการทดลองในข้อ 3.4 ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด (A) อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักตะกอน (B) และระยะเวลาในการสกัดทองแดง (C) ในแต่ละปัจจัยจะทำการศึกษา 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+1) และระดับต่ำ (-1) สำหรับค่าที่แท้จริงของระดับกลาง (0) จะคำนวณโดยใช้สมการ (3.1) ค่าที่แท้จริงของตัวแปรทั้ง 3 ระดับแสดงดังตารางที่ 3.2

$$X_i = (A_i - A_0) / \Delta A \quad (3.1)$$

โดยที่  $X_i$  คือ ระดับของปัจจัย ซึ่งแทนด้วย -1, 0, และ +1 (ระดับต่ำ, กลาง และสูง)  
 $A_i$  คือ ค่าที่แท้จริงของระดับ  
 $A_0$  คือ (ผลบวกระหว่างค่าที่แท้จริงของระดับสูงและระดับต่ำ) / 2  
 $\Delta A$  คือ (ผลต่างระหว่างค่าที่แท้จริงของระดับสูงและระดับต่ำ) / 2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ศึกษา ระดับของตัวแปร และค่าที่แท้จริงของแต่ละระดับ

ตัวแปร	สัญลักษณ์	-1	0	1
ความเข้มข้นของกรด (โมลต่อลิตร)	A	0.2	0.6	1.0
อัตราส่วนของปริมาตรกรด (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักตะกอน (กรัม)	B	10:1	60:1	100:1
ระยะเวลาในการสกัดทองแดง (นาที)	C	5	40	80

เมื่อนำไปออกแบบการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full Factorial Design) ด้วยการทดลอง 2 ซ้ำ จะได้แผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แผนการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป โดยใช้โปรแกรมสถิติ Minitab 17.0

ลำดับการทดลอง	A		B		C	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
1	-1	0.2	0	60:1	0	40
2	-1	0.2	-1	10:1	0	40
3	-1	0.2	-1	10:1	1	80
4	1	1	-1	10:1	1	80
5	0	0.6	-1	10:1	0	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ลำดับ การทดลอง	A		B		C	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
6	0	0.6	0	60:1	-1	5
7	1	1	-1	10:1	0	40
8	-1	0.2	1	100:1	-1	5
9	1	1	1	100:1	1	80
10	1	1	0	60:1	-1	5
11	1	1	0	60:1	0	40
12	-1	0.2	1	100:1	0	40
13	0	0.6	-1	10:1	-1	5
14	1	1	-1	10:1	-1	5
15	-1	0.2	0	60:1	-1	5
16	0	0.6	0	60:1	0	40
17	-1	0.2	-1	10:1	-1	5
18	-1	0.2	0	60:1	1	80
19	1	1	1	100:1	-1	5
20	0	0.6	-1	10:1	1	80
21	1	1	1	100:1	0	40
22	1	1	0	60:1	1	80
23	0	0.6	1	100:1	1	80
24	-1	0.2	1	100:1	1	80
25	0	0.6	1	100:1	-1	5
26	0	0.6	1	100:1	0	40
27	0	0.6	0	60:1	1	80
28	-1	0.2	0	60:1	0	40
29	-1	0.2	-1	10:1	0	40
30	-1	0.2	-1	10:1	1	80
31	1	1	-1	10:1	1	80
32	0	0.6	-1	10:1	0	40
33	0	0.6	0	60:1	-1	5
34	1	1	-1	10:1	0	40
35	-1	0.2	1	100:1	-1	5
36	1	1	1	100:1	1	80
37	1	1	0	60:1	-1	5
38	1	1	0	60:1	0	40
39	-1	0.2	1	100:1	0	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ลำดับ การทดลอง	A		B		C	
	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded	Coded	Uncoded
40	0	0.6	-1	10:1	-1	5
41	1	1	-1	10:1	-1	5
42	-1	0.2	0	60:1	-1	5
43	0	0.6	0	60:1	0	40
44	-1	0.2	-1	10:1	-1	5
45	-1	0.2	0	60:1	1	80
46	1	1	1	100:1	-1	5
47	0	0.6	-1	10:1	1	80
48	1	1	1	100:1	0	40
49	1	1	0	60:1	1	80
50	0	0.6	1	100:1	1	80
51	-1	0.2	1	100:1	1	80
52	0	0.6	1	100:1	-1	5
53	0	0.6	1	100:1	0	40
54	0	0.6	0	60:1	1	80

### 3.5.2 วิธีการทดลอง

การทดลองจะดำเนินการตามลำดับในตารางที่ 3.3 มีรายละเอียดของวิธีการสกัดที่ใช้ดังนี้

1. ชั่งกากตะกอนที่ได้จากข้อ 3.2 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายกรดที่มีความเข้มข้น (A) และอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อกากตะกอน (B) ตามสภาวะที่ระบุ (Uncoded) ในแต่ละลำดับการทดลอง
3. นำไปเขย่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่ระบุ (Uncoded) ในลำดับการทดลองนั้นๆ
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นกรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman No. 42
5. นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) และนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนในแต่ละลำดับการทดลองโดยใช้สมการ (3.2)

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัด (\%)} = \frac{\text{Cu ที่ได้}}{\text{Cu ทั้งหมด}} \times 100\% \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab 17.0

นำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงทั้ง 54 การทดลอง มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อหาอิทธิพลหลัก (Main effects) ของตัวแปรอิสระ และอิทธิพลร่วม (Interaction effects) ระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดง รวมทั้งหาแบบจำลองที่ทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร จากนั้นทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรมสถิติ Minitab 17.0 (รายละเอียดวิธีการใช้ฟังก์ชันแสดงในภาคผนวก จ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ โดยใช้สารละลายกรด พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงด้วยวิธีการออกแบบทางสถิติแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design) ร่วมกับวิธีการวิเคราะห์ Regression Analysis ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายกรด อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน และระยะเวลาในการสกัด ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

#### 4.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการเคลือบทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.1 (ดูรายละเอียดข้อมูลที่เกี่ยวข้องในภาคผนวก ข)

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพ และเคมีของกากตะกอน

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ค่าพีเอช	8.37 $\pm$ 0.07
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	1.72 $\pm$ 0.06
ความเข้มข้นทองแดงทั้งหมดในกากตะกอน (mg/g) <sup>+</sup>	643 $\pm$ 2
ปริมาณธาตุ (%) <sup>‡</sup>	
CuO	86.68
MnO	2.56
SiO <sub>2</sub>	3.12
SO <sub>3</sub>	3.45
CaO	1.19
MgO	0.79
Cl	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55
SnO <sub>2</sub>	0.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.23
ZnO	0.15
TiO <sub>2</sub>	0.11
NiO	0.02
Br	0.01

หมายเหตุ + จากวิธีการย่อย และวิเคราะห์ตัวอย่างที่ย่อยด้วย AAS

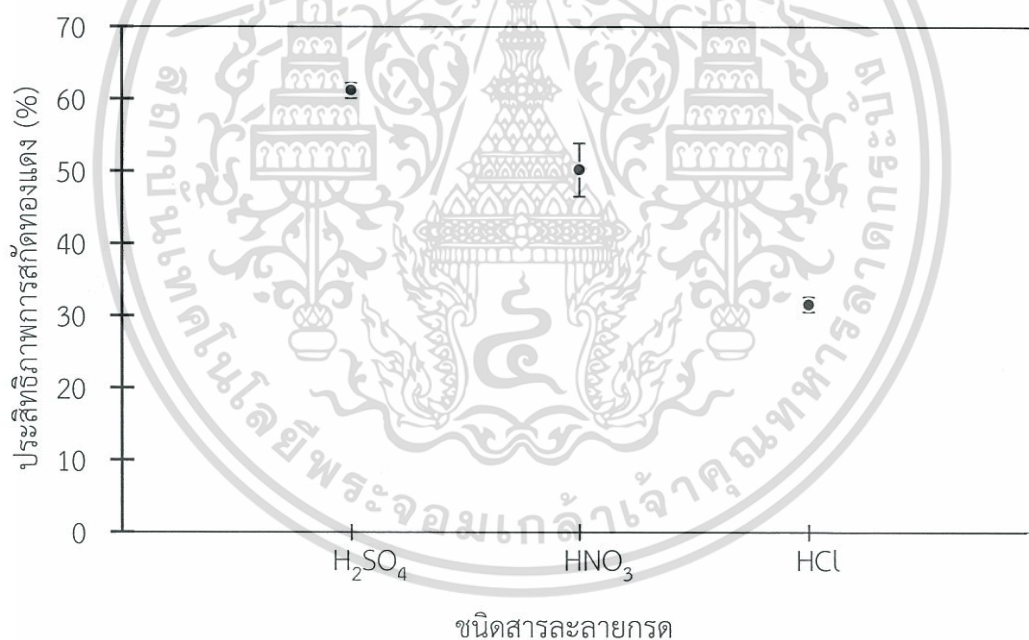
‡ จากการศึกษาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนมีค่าพีเอชเป็นด่าง ( $8.37 \pm 0.07$ ) เป็นผลจากการใช้ แคลเซียมออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอน ค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอนเท่ากับ  $1.72 \pm 0.06$  ms/cm แสดงว่ากากตะกอนมีปริมาณไอออนของธาตุที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ ปริมาณ ทองแดงในกากตะกอนหาได้จากวิธีการย่อยด้วยกรดร่วมกับเทคนิค AAS พบว่าน้ำหนักกากตะกอนแห้ง 1 กรัม มีปริมาณทองแดงเท่ากับ  $643 \pm 2$  มิลลิกรัม จัดว่ากากตะกอนมีปริมาณทองแดง ค่อนข้างสูง สามารถใช้เป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมต่อการนำทองแดงออกจากกากตะกอนเพื่อนำกลับมาใช้ ใหม่ จากการศึกษาปริมาณและสัดส่วนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกากตะกอนด้วยเทคนิค XRF พบว่ากากตะกอนที่นำมาศึกษามีออกไซด์ของทองแดงมากที่สุดคือ 86.68% รองลงมาคือ ซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์ 3.45% ออกไซด์ของซิลิกอน 3.12% ออกไซด์ของแมงกานีส 2.56% และออกไซด์ของ แคลเซียม 1.19% ตามลำดับ

#### 4.2 ชนิดของกรดที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

ผลการศึกษาชนิดของกรดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน ทำได้ โดยการแช่กากตะกอนในสารละลายกรด 3 ชนิดที่มีความเข้มข้นเท่ากันคือ 0.5 โมลต่อลิตร นาน 45 นาที กำหนดอัตราส่วนปริมาตรกรดต่อน้ำหนักของกากตะกอนเท่ากับ 100:1 ผลดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนของกรด 3 ชนิด

จากรูปที่ 4.1 พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกาก ตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ได้ดีที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพในการ สกัดเท่ากับ  $61.17 \pm 1.07$  % รองลงมาคือ สารละลายกรดไนตริก  $50.20 \pm 3.68$  % และสารละลาย กรดไฮโดรคลอริก  $31.57 \pm 1.02$  % ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2009) ที่ พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงมากกว่าสารละลายกรดไนตริก และ สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นผลมาจากปริมาณสารสัมพันธ์ของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาระหว่างคอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์ กับโปรตอนดังแสดงในสมการที่ (4.1) (Kuan et al., 2010) ซึ่งสารละลายกรดซัลฟิวริก 1 โมล สามารถแตกตัวให้จำนวนโมลของโปรตอนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับคอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์ 1 โมล ในขณะที่การใช้กรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกเป็นสารสกัดนั้น จะต้องใช้จำนวนโมลของสารดังกล่าวถึง 2 โมล จึงจะแตกตัวให้จำนวนโปรตอนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับคอปเปอร์ (II) ไฮดรอกไซด์ 1 โมล เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการสกัดระหว่างกรดไนตริกและกรดไฮโดรคลอริกพบว่า กรดไนตริกมีประสิทธิภาพการสกัดทองแดงสูงกว่า ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถเป็นตัวออกซิไดซ์ของกรดไนตริก ประกอบกับกากตะกอนอาจจะยังมีโลหะทองแดงปะปนอยู่ ส่งผลให้ปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.2) เกิดขึ้นได้ (Getafix, 2016) และอาจเป็นผลมาจากกรดไฮโดรคลอริกเกิดการระเหยเป็นไอของกรดเหนือของแข็ง ส่งผลให้ความสามารถในการสกัดน้อยลง



เมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการสกัดทองแดงของกรดทั้งสามชนิดไปวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยใช้ Fisher's Pairwise Comparisons พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริก สารละลายกรดไนตริก และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ง ตารางที่ ง-1) ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกสำหรับการศึกษาตามแผนการทดลองขั้นต่อไป

#### 4.3 ผลการศึกษาการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโดยใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติ

ประสิทธิภาพการสกัดทองแดง (Y, %) ดำเนินการทดลองตามลำดับที่ได้จากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป (Full factorial design) โดยมีปัจจัยที่ศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของกรด (A) อัตราส่วนปริมาตรเป็นมิลลิลิตรของกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนเป็นกรัม (B) และระยะเวลาที่ใช้สกัดเป็นนาที (C) ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	A	B	C	Y (%)
1	0.2	60:1	40	55.09
2	0.2	10:1	40	4.47
3	0.2	10:1	80	5.09
4	1.0	10:1	80	51.79
5	0.6	10:1	40	34.63
6	0.6	60:1	5	65.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

การทดลองที่	A	B	C	Y (%)
7	1.0	10:1	40	47.51
8	0.2	100:1	5	12.64
9	1.0	100:1	80	92.72
10	1.0	60:1	5	82.60
11	1.0	60:1	40	88.96
12	0.2	100:1	40	65.39
13	0.6	10:1	5	29.00
14	1.0	10:1	5	44.79
15	0.2	60:1	5	11.50
16	0.6	60:1	40	79.71
17	0.2	10:1	5	4.16
18	0.2	60:1	80	55.94
19	1.0	100:1	5	85.38
20	0.6	10:1	80	35.93
21	1.0	100:1	40	86.27
22	1.0	60:1	80	89.23
23	0.6	100:1	80	90.54
24	0.2	100:1	80	72.93
25	0.6	100:1	5	75.51
26	0.6	100:1	40	85.72
27	0.6	60:1	80	82.65
28	0.2	60:1	40	35.86
29	0.2	10:1	40	5.74
30	0.2	10:1	80	5.76
31	1.0	10:1	80	35.62
32	0.6	10:1	40	7.35
33	0.6	60:1	5	53.61
34	1.0	10:1	40	32.39
35	0.2	100:1	5	9.08
36	1.0	100:1	80	97.14
37	1.0	60:1	5	69.60
38	1.0	60:1	40	71.80
39	0.2	100:1	40	44.18
40	0.6	10:1	5	7.31
41	1.0	10:1	5	29.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

การทดลองที่	A	B	C	Y (%)
42	0.2	60:1	5	6.42
43	0.6	60:1	40	54.43
44	0.2	10:1	5	5.60
45	0.2	60:1	80	43.28
46	1.0	100:1	5	77.80
47	0.6	10:1	80	10.71
48	1.0	100:1	40	86.80
49	1.0	60:1	80	96.11
50	0.6	100:1	80	78.49
51	0.2	100:1	80	49.56
52	0.6	100:1	5	61.34
53	0.6	100:1	40	72.87
54	0.6	60:1	80	57.67

#### 4.3.1 แบบจำลองที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ความเหมาะสมของแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Minitab Version 17.0 ซึ่งมีตัวแปรอิสระ คือ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก (A), อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน (B) และระยะเวลาในการสกัด (C) มีแบบจำลองที่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนอยู่ 3 แบบจำลอง ได้แก่ 1) Linear model 2) Linear + 2-Way interactions model และ 3) Linear + all interactions model ซึ่งมีสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

1) Linear model:

$$Y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C \quad (4.3)$$

2) Linear + 2-Way interactions model:

$$Y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC \quad (4.4)$$

3) Linear + all interactions model:

$$Y = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_{12}AB + b_{13}AC + b_{23}BC + b_{123}ABC \quad (4.5)$$

เมื่อ Y คือ ประสิทธิภาพการสกัดทองแดง (%)

$b_0$  คือ ค่าเฉลี่ยรวม

$b_i$  คือ สัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรงของตัวแปรหลัก เมื่อ i เท่ากับ 1 ถึง 3

$b_{ij}$  คือ สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วมสองตัวแปร เมื่อ i เท่ากับ 1 ถึง 3

เมื่อ j เท่ากับ 1 ถึง 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$b_{ijk}$  คือ สัมประสิทธิ์ของความสัมพันธ์ร่วมสามตัวแปร เมื่อ  $i$  เท่ากับ 1 ถึง 3  
 เมื่อ  $j$  เท่ากับ 1 ถึง 3  
 เมื่อ  $k$  เท่ากับ 1 ถึง 3

เมื่อใช้โปรแกรม Minitab ประมวลผลด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมกับ Regression Analysis ได้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 4.3 (รายละเอียดผลการวิเคราะห์แต่ละแบบจำลองแสดงในภาคผนวก: ตารางที่ ง-2, ง-3 และ ง-4 ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแต่ละแบบจำลอง

แบบจำลอง	S	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> (adj) (%)
Linear	13.8424	80.76	79.61
Linear + 2-Way interactions	13.1765	83.61	81.52
Linear + all interactions	12.9424	84.53	82.17

จากตารางที่ 4.3 พบว่าแบบจำลอง Linear + all interactions model มีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (S) น้อยที่สุดคือ 12.9424 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R<sup>2</sup> -adj) มากที่สุดคือ 82.17% แสดงว่าแบบจำลอง Linear + all interactions model มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นตัวแทนอธิบายผลการทดลอง โดยสมการสำหรับทำนายประสิทธิภาพการสกัดทองแดง จากแบบจำลองดังกล่าวแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัดทองแดง (\%)} = -4.6 + 38.9A + 0.107B - 0.046C + 0.478AB + 0.151AC + 0.00808BC - 0.00788ABC \quad (4.6)$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก  
 B = อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน  
 C = ระยะเวลาในการสกัด

อย่างไรก็ตาม พบว่า R<sup>2</sup> ที่ได้จากแบบจำลองที่เหมาะสมยังมีค่าน้อยกว่า 90% แสดงว่าตัวแปรต้นบางตัวในสมการอาจมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงกับตัวแปรตาม ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

#### 4.3.2 อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญของตัวแปร มีสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$H_0 : \beta_i = 0$  หรือตัวแปรอิสระที่  $i$  ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

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

จากการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coef.) และค่าสถิติจากสมการที่ (4.6) แสดงดังตารางที่ 4.4

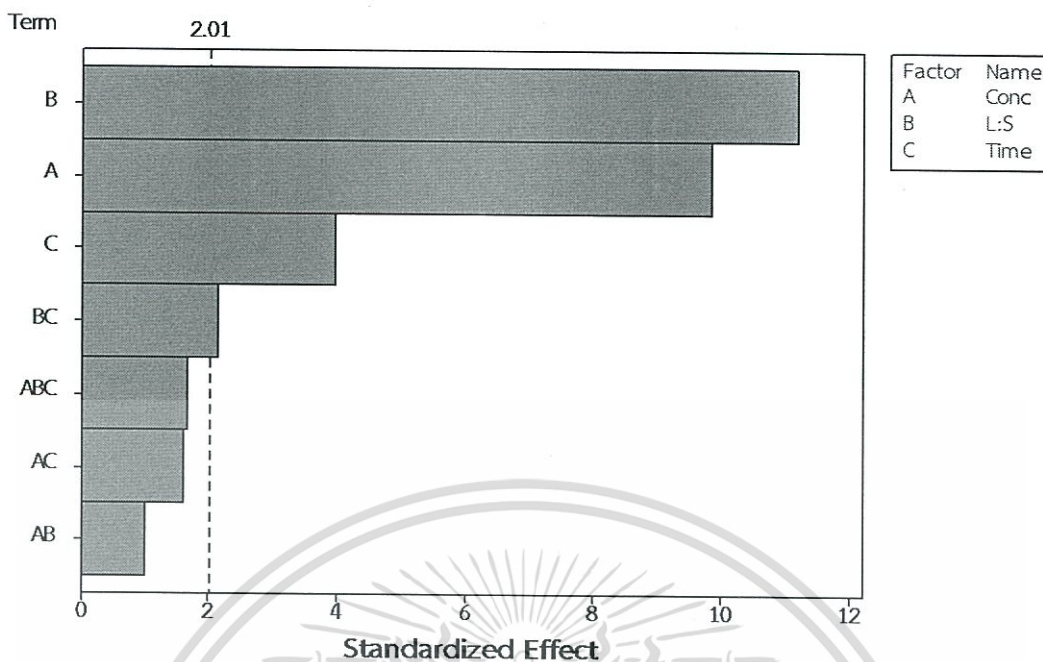
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญของตัวแปรตามแบบจำลอง Linear + all interactions model

Term	Coef	SE Coef	t-Value	p-Value
Constant	50.08	1.76	28.39	0.000
A	21.29	2.16	9.85	0.000*
B	24.13	2.15	11.21	0.000*
C	8.57	2.16	3.97	0.000*
AB	2.59	2.64	0.98	0.332
AC	-4.24	2.64	-1.60	0.116
BC	5.66	2.63	2.15	0.037*
ABC	-5.32	3.23	-1.65	0.106

หมายเหตุ \* คือ มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

$$S = 12.9424 \quad R^2 = 84.53\% \quad R^2 (\text{adj}) = 82.17\%$$

จากตารางที่ 4.4 พบว่าอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ศึกษา (Main effects) ทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของกรด (A), อัตราส่วนของปริมาตรกรดเป็นมิลลิลิตรต่อน้ำหนักกากตะกอนเป็นกรัม (B) และระยะเวลาในการสกัดเป็นนาที (C) มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจาก  $p$ -value ของทั้ง 3 ปัจจัยมีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญทางสถิติที่กำหนด ( $\alpha = 0.05$ ) แสดงว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรดังกล่าว จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดง โดย B มีอิทธิพลมากที่สุด รองลงไปคือ A และ C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.2



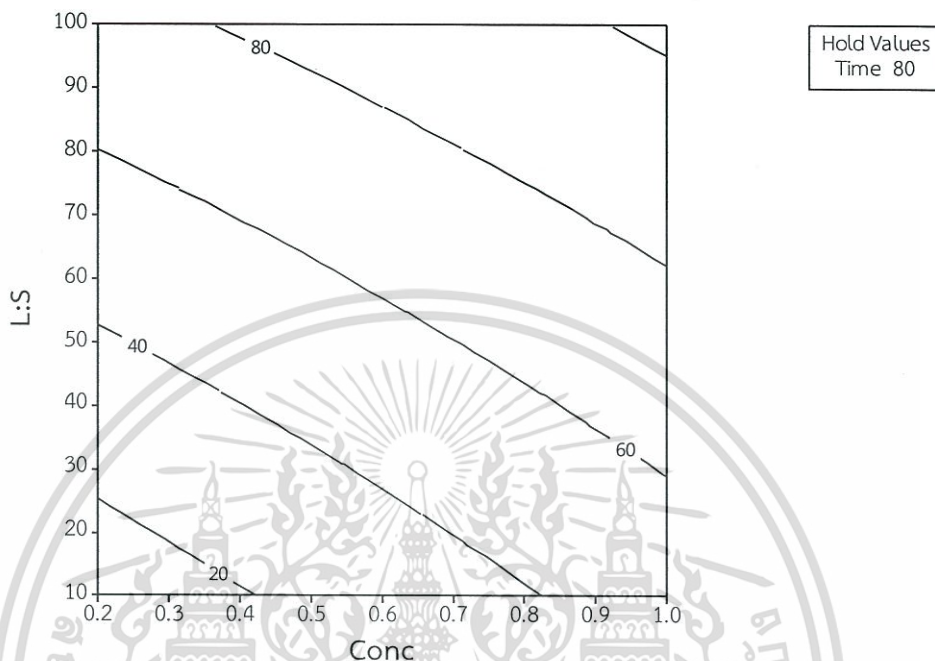
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ระดับนัยสำคัญของตัวแปรทางสถิติ

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลร่วมของปัจจัย (Interaction effect) พบว่าอิทธิพลร่วมของ BC มีค่า  $p$ -Value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha = 0.05$ ) แสดงว่าอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนกับระยะเวลาในการสกัดมีผลร่วมกันต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดง ในขณะที่อิทธิพลร่วมที่เหลือได้แก่ AB, AC และ ABC ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า  $p$ -Value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ( $\alpha = 0.05$ )

#### 4.3.3 ลักษณะพื้นผิวตอบสนองระหว่างตัวแปรอิสระกับประสิทธิภาพการสกัดทองแดง

พื้นผิวผลตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ของระหว่างตัวแปรอิสระต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง โดยใช้แบบจำลอง Linear + all interactions model ได้ผลดังรูปที่ 4.3 – 4.5

1. อิทธิพลของความเข้มข้นของกรด และอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน  
 พื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของความเข้มข้น และอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกาก  
 ตะกอนต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาในการสกัด  
 ทองแดงมีค่าคงที่ที่ 80 นาที แสดงดังรูปที่ 4.3

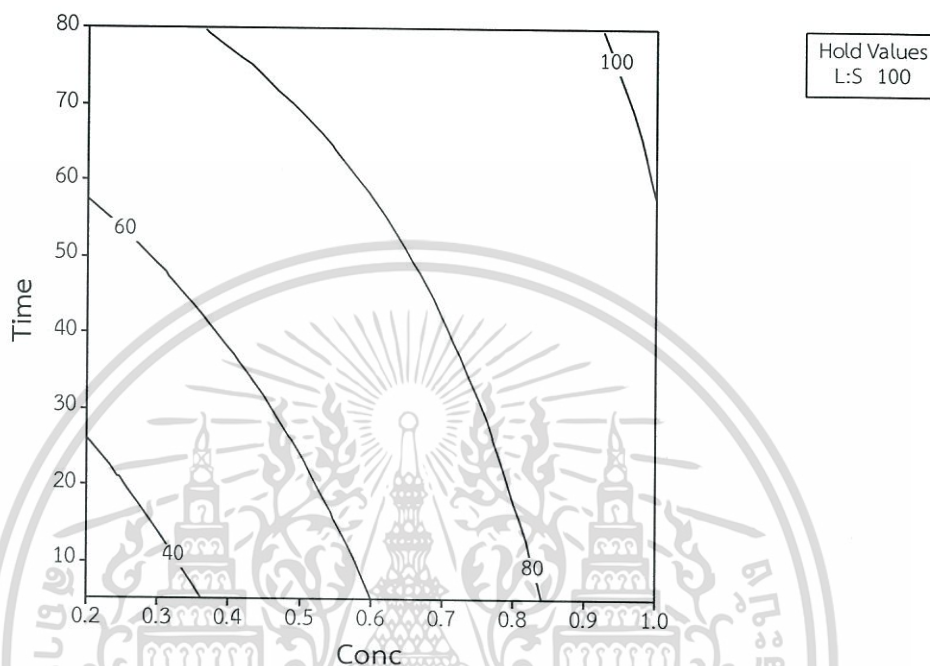


รูปที่ 4.3 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดและ  
 อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนต่อประสิทธิภาพในการสกัด  
 ทองแดงจากกากตะกอน

จากรูปที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจาก  
 กากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 1 โมลต่อลิตร จะส่งผล  
 ให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่า  
 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนพบว่า  
 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อ  
 น้ำหนักกากตะกอนเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 100 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกาก  
 ตะกอนเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 80 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับผลการ  
 วิเคราะห์หระดับนัยสำคัญทางสถิติในรูปที่ 4.2 ซึ่งระบุว่าอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกาก  
 ตะกอน มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมากกว่าผลของความเข้มข้น

## 2. อิทธิพลของความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

พื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของความเข้มข้น และระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน เมื่อกำหนดให้อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนมีค่าคงที่ที่ 100:1 แสดงดังรูปที่ 4.4

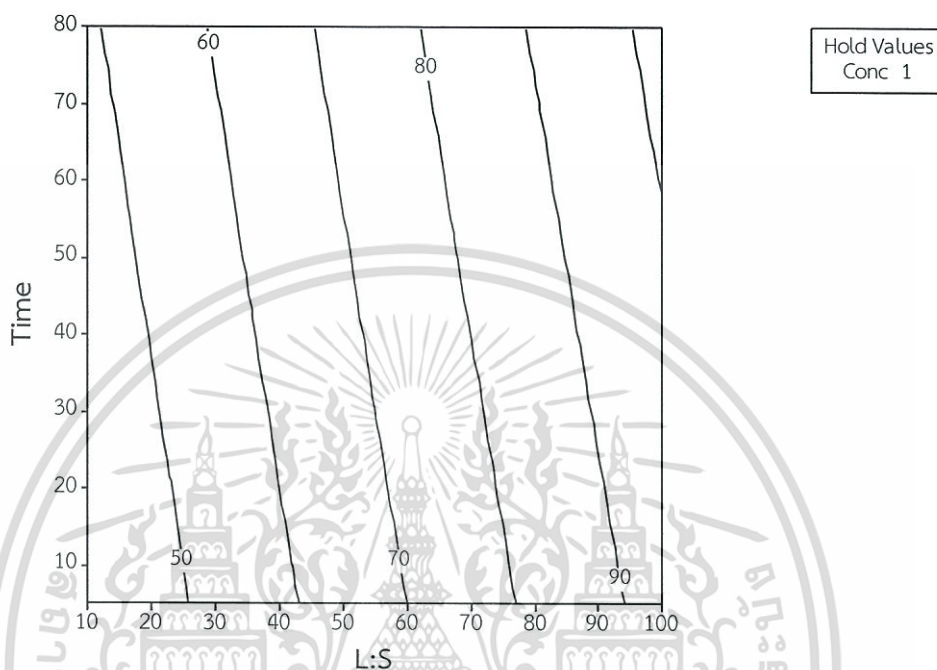


รูปที่ 4.4 กราฟโครงร่าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดและระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

จากรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 1 โมลต่อลิตร จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาระยะเวลาในการสกัดทองแดงพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการสกัดทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 80 นาที จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 80 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนทองแดงมากกว่าระยะเวลาในการสกัดทองแดง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อแปรค่าทั้งสองปัจจัยร่วมกันสามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงสูงกว่า เมื่อเทียบกับการแปรค่าผลของความเข้มข้นกับอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน (รูปที่ 4.3)

3. อิทธิพลของอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน และระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

พื้นผิวตอบสนองแสดงอิทธิพลของอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน และระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน เมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของกรดมีค่าคงที่ที่ 1.0 โมลต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟโครงสร้าง (Contour Plot) แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนและระยะเวลาในการสกัดทองแดงต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

จากรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนพบว่า ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 100 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเปลี่ยนแปลงจากน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ให้มีค่าถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และพิจารณาระยะเวลาในการสกัดทองแดงที่เปลี่ยนแปลงจาก 10 เป็น 80 นาที พบว่าจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนทองแดงขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน

#### 4.3.4 การวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม

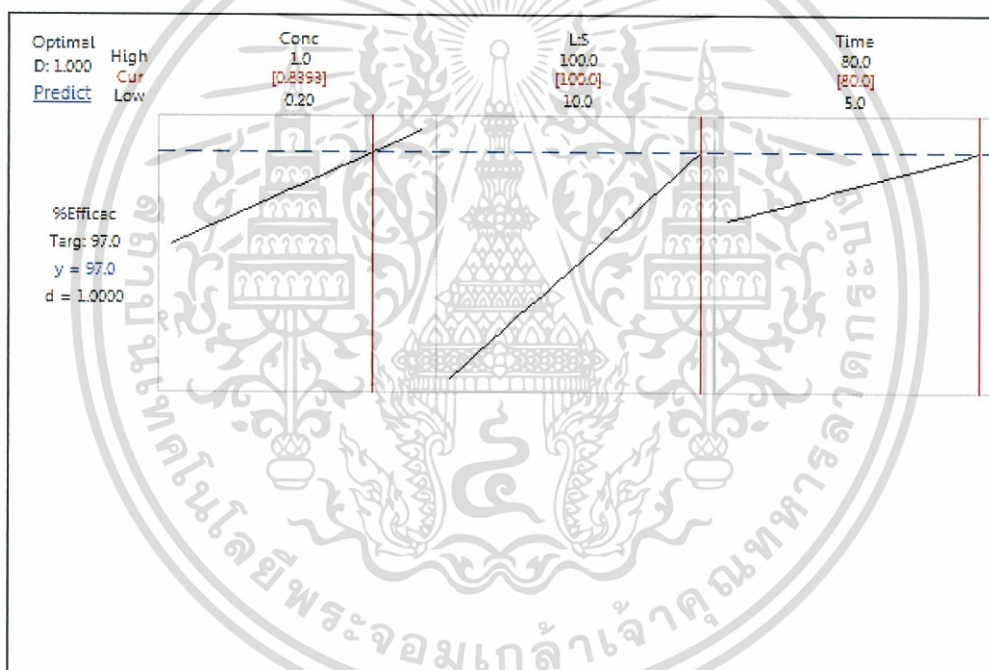
ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดทองแดงจากสมการที่ (4.6) โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 กำหนดค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

- ค่าขอบเขตบน (Upper Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) มากที่สุดหรือที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตบนเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์

- ค่าเป้าหมาย (Target) คือค่ามาตรฐานหรือค่าเป้าหมายของผลตอบ งานวิจัยนี้กำหนดเป้าหมายเท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลอง

- ค่าขอบเขตล่าง (Lower Limit) คือค่าของผลตอบ (ตัวแปรตาม) ที่มีค่าน้อยที่สุดหรือที่ยอมรับได้ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ในปฏิกิริยา และในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตล่างเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์

ผลจากการศึกษาได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดทองแดงจากกากตะกอน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง 97 เปอร์เซ็นต์ ได้ผลดังรูปที่ 4.6 เป็นดังนี้ คือความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.8393 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนเท่ากับ 100:1 และระยะเวลาในการสกัดทองแดงเท่ากับ 80 นาที



รูปที่ 4.6 สภาวะที่เหมาะสมต่อการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.5 การยืนยันความเหมาะสมของสมการ

ผลการนำภาคตะกอนมาสกัดด้วยกรดซัลฟิวริกจำนวน 10 ครั้ง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลจากฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab Version 17.0 ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงตามสภาวะที่เหมาะสม

การทดลองที่	ประสิทธิภาพ (%)
1	97.15
2	96.95
3	97.14
4	96.60
5	97.04
6	65.52 <sup>*</sup>
7	96.69
8	96.99
9	97.08
10	95.76
เฉลี่ย 96.82 <sup>†</sup> ± 0.44	

หมายเหตุ : \* คือ ค่าผิดปกติ (outlier) จากการทดสอบด้วยวิธี Q-test  
 † คือ เฉลี่ยโดยไม่รวม outlier  
 ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 0.8367 โมลต่อลิตร (รายละเอียดวิธีการเตรียม และการหาความเข้มข้นที่แน่นอนแสดงในภาคผนวก ก)

จากตารางที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากภาคตะกอนโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลอง Linear + all interactions model (สมการ 4.6) มีค่าเท่ากับ 96.82% เมื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยที่ได้กับค่าที่ทำนายได้จากสมการ (Predicted value) เท่ากับ 97% (รูปที่ 4.6) โดยใช้ independent t-test พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองมีความเหมาะสมนำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่สภาวะต่างๆ ได้

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาประสิทธิภาพของสารละลายกรดในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของกระบวนการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. สารละลายกรดซัลฟิวริกมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียของการผลิตแผ่นวงจรพิมพ์ได้ดีที่สุดคือ 61.17 % รองลงมาคือ สารละลายกรดไนตริก 50.20 % และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 31.57 %

2. การออกแบบการทดลองด้วยวิธี Full factorial design พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 17.0 พบว่า

2.1 แบบจำลอง Linear + all interactions model มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาใช้เป็นสมการอธิบายผลการทดลอง

2.2 อิทธิพลหลักของปัจจัยที่ศึกษาทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของกรด, อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอน และระยะเวลาในการสกัด และมีเพียงอิทธิพลร่วมระหว่างอัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนกับระยะเวลาในการสกัด ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

2.3 สภาพที่เหมาะสมสำหรับการสกัดทองแดงจากกากตะกอน คือความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 0.8393 โมลต่อลิตร อัตราส่วนของปริมาตรกรดต่อน้ำหนักกากตะกอนเท่ากับ 100:1 และระยะเวลาในการสกัดทองแดงเท่ากับ 80 นาที และเมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายจากแบบจำลองพบว่าประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนเท่ากับ 96.82% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่กำหนดเป็นค่าเป้าหมาย (97%)

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติวิธีอื่นเพิ่มเติม เช่น วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Response Surface Methodology เพื่อหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดในการอธิบายประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

2. ควรวิเคราะห์กากตะกอนก่อนและหลังกระบวนการสกัดกากตะกอนด้วยสารละลายกรด โดยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) เพื่อหาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกากตะกอน

3. ควรเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายกรด เพื่อลดระยะเวลาในการสกัดทองแดง

4. ควรศึกษาวิธีการทำให้สารละลายทองแดงบริสุทธิ์ เพื่อนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่ และลดการใช้ทรัพยากร

## เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรธรณี. 2550. ทองแดง. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
[http://www.dmr.go.th/ewt\\_news.php?nid=574](http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=574).
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2550. อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์. [Online]. เข้าถึงได้จาก :  
[http://www2.diw.go.th/l\\_Standard/Web/pane\\_files/Industry25.asp](http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry25.asp).
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2552. การนำโลหะจากเศษซากอิเล็กทรอนิกส์กลับมาใช้ใหม่. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.dpim.go.th/recycling/article?%20catid=228&articleid=3498>.
- เกศระวี ปานทับ, สุทธิมา ลิมหลัก และณพพร โกไศยกานนท์. 2554. การใช้ประโยชน์ของไขมันโคเจียวเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิตยา ทองแพง, สมลักษณ์ คุชิตา และสุภสิทธิ์ แก้วสะอาด. 2559. การกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียจากโรงพิมพ์ระบบเฟล็กโซกราฟีหมึกพิมพ์ฐานน้ำด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ปรเมศ ชุตินา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปัทมาพร มณีจันทร์, พรธัญญา สมจิตต์ และภูวดล ทิพย์ปราณี. 2553. การนำทองแดงจากสลัดจ์โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่โดยการชะด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ร่วมกับการใช้อัลตราโซนิก. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พรรษวรรณ ศรีนาค. 2559. การควบคุมมลพิษทางน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พันธกานต์ ยนต์ฉิมพลี. 2558. การบำบัดสีของน้ำยาโบรอนที่ใช้ซ้ำในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ยางพาราด้วยกระบวนการโอโซนเข้มข้น. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วิกิพีเดีย. 2558. ทองแดง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87>.
- วิชัย ชันดี. 2553. การนำทองแดงจากสลัดจ์ของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้ากลับมาใช้ใหม่ด้วยสารละลายอีทีทีเอและกระบวนการซีเมนเตชันด้วยผงเหล็ก. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศรีธวัช กำเนิดทอง. 2559. สารอันตรายในซากเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์. [Online]. เข้าถึงได้จาก : [http://region4.prd.go.th/ewt\\_news.php?nid=79853&filename=index](http://region4.prd.go.th/ewt_news.php?nid=79853&filename=index)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ศุภกันต์ สกุดตั้ง. 2548. การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. 2552. ทองแดง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://lc.dpim.go.th/kb/1077>.
- สิทธิชัย เจริญเศรษฐศิลป์. 2559. การวางแผนการทดลอง Experimental Design. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุภาวดี หุ่นสวัสดิ์. 2539. ความเป็นพิษของทองแดง. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.siamchemi.com/%E0%B8%97%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%81%E0%B8%94%E0%B8%87/>.
- สุรพล อุติสสกุล. 2536. สถิติการวางแผนการทดลอง. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2560. รายงานภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมรายไตรมาส ไตรมาส 2 ปี 2560. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.oie.go.th/academic>.
- American Public Health Association (APHA), American Water Work Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF). 2012. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington DC : American Public Health Association.
- Getafix. 2016. Why is Nitric Acid more reactive and caustic than Sulfuric or Hydrochloric?. [Online]. Available : <https://chemistry.stackexchange.com/questions/65249/why-is-nitric-acid-%20more-reactive-and-caustic-than-sulfuric-%20or-hydrochloric>.
- Stylianou, M.A. Kollia, D. Haralambous, K.J. Inglezakis, V.J. Moustakas, K.G. and Loizidou, M.D. 2007. "Effect of acid treatment on the removal of heavy metals from sewage sludge." *Desalination*. 215 : 73-81.
- Jandova, J. Stefanova, T and Niemczykova, R. 2000. "Recovery of Cu-concentrates from waste galvanic copper sludges." *Hydrometallurgy*. 57 : 77-84.
- Kuan, Y.C. Lee, I.H. and Chern, J.M. 2010. "Heavy metal extraction from PCB wastewater treatment sludge by sulfuric acid." *Journal of Hazardous Materials*. 177 : 881-886.
- Li, C. Xie, F. Ma, Y. Cai, T. Li, H. Huang, Z. and Yuan, G. 2010. "Multiple heavy metals extraction and recovery from hazardous electroplating sludge waste via ultrasonically enhanced two-stage acid leaching." *Journal of Hazardous Materials*. 178 : 823-833.

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Ndiritu, S.W. Nzila, C. and Namango, S. 2017. "Optimizing Chemical Extraction of Heavy Metals from Anaerobically Digested Sewage Sludge Using Response Surface Methodology." *International Journal of Novel Research in Engineering and Science*. 4(1) : 17-26.
- Wu, C.H. Kuo, C.Y. and Lo, S.L. 2009. "From Waste to Resource: A case study of heavy-metal sludge by microwave treatment." *J. Environ. Eng. Manage*. 19(3) : 119-125.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



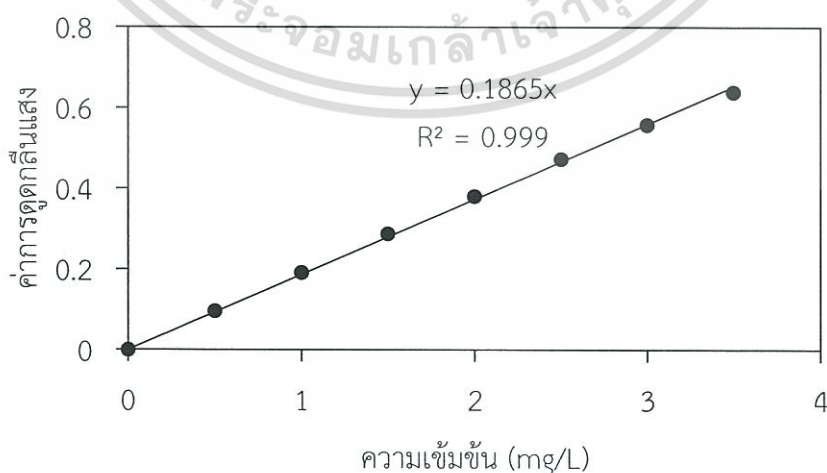
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก-1 การวัดค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า

1. ชั่งกากตะกอน 10 กรัม ลงในบีกเกอร์พลาสติก เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
2. กวนให้เข้ากันเป็นระยะๆ 30 นาที และตั้งทิ้งไว้ 30 นาที
3. ขณะตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้ทำการปรับเทียบเครื่องมือวัดค่าพีเอช ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 และปรับเทียบเครื่องมือวัดค่าการนำไฟฟ้า ด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.01 M KCl (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้เครื่องมือ)
4. วัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า โดยการจุ่มโพรบลงในสารละลายที่อยู่เหนือตะกอน
5. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย

### ก-2 การหาความเข้มข้นของทองแดงในกากตะกอน (APHA, et al., 2012)

1. ชั่งกากตะกอนแห้ง 1 กรัม ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมนกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตรและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร
3. ปิดด้วยกระจกนาฬิกา แล้วนำไปย่อยบน Hot plate ให้เดือดเบาๆ
4. ย่อยจนสารละลายใส (ถ้าไม่ใสให้เติมนกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร) ห้ามให้ตัวอย่างแห้ง
5. ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
6. กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman 42
7. นำส่วนใสที่ได้ไปปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดวัดปริมาตรพลาสติกขนาด 100 มิลลิลิตร
8. นำส่วนใสที่ปรับปริมาตรแล้วมากรองผ่าน Syringe Filter Nylon membrane 0.45  $\mu\text{m}$
9. นำส่วนใสที่ได้ในข้อ 8 ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
10. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง
11. ทำแปลงค์ตามขั้นตอนที่ผ่านมาแต่ไม่ใส่กากตะกอน



รูปที่ ก-3 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในกากตะกอน

$$\text{Total Cu (g/kg)} = \frac{\left[ A - B \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \right] \times C \text{ (mL)} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}}}{W \text{ (g)}}$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในตัวอย่างไม่ได้จากกราฟมาตรฐาน (mg/L)  
 B = ความเข้มข้นของทองแดงในแบลนด์ (mg/L)  
 C = ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่าง (mL)  
 W = น้ำหนักของกากตะกอน (g)

### ก-3 การเตรียมและการหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.8393 โมลต่อลิตร

กรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 98 % by mass มีความหนาแน่น เท่ากับ 1.84 g/mL แสดงว่า สารละลายกรด 1 มิลลิลิตร จะมีน้ำหนักกรด เท่ากับ 1.84 กรัม

สารละลายกรด 1,000 มิลลิลิตร (1ลิตร) จะมีน้ำหนักกรด เท่ากับ 1840 กรัม

จากกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 98 % by mass มีน้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 98 กรัมต่อโมล แสดงว่า ในน้ำหนักกรด 100 กรัม จะมีกรดซัลฟิวริก 98 กรัม ซึ่งคิดเป็นจำนวนโมล

$$= \frac{98 \text{ g}}{98 \text{ g/mol}} = 1 \text{ โมล}$$

จากน้ำหนักกรด 100 กรัม มีกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1 โมล

ดังนั้น น้ำหนักกรด 1840 กรัม (ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 1 ลิตร)

$$\text{มีกรดซัลฟิวริก เท่ากับ } \frac{1840 \text{ g} \times 1 \text{ mol}}{100 \text{ g}}$$

เท่ากับ 18.4 โมล

เพราะฉะนั้นกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 98 % by mass จะมีความเข้มข้นในหน่วยโมลาร์ เท่ากับ 18.4 โมลต่อลิตร

การเตรียมกรดซัลฟิวริก 0.8393 โมลต่อลิตร

จากสูตร  $C_1V_1 = C_2V_2$

โดยที่  $C_1$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดซัลฟิวริก (mol/L)  
 $C_2$  = ความเข้มข้นที่ต้องการของกรดซัลฟิวริก (mol/L)  
 $V_1$  = ปริมาตรเริ่มต้นของกรดซัลฟิวริก (mL)  
 $V_2$  = ปริมาตรสุดท้ายของกรดซัลฟิวริก (mL)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } C_1 &= 18.4 \text{ mol/L} \\ C_2 &= 0.8393 \text{ mol/L} \\ V_2 &= 250 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (18.4 \text{ mol/L}) V_1 &= (0.8393 \text{ mol/L})(250 \text{ mL}) \\ V_1 &= 11.404 \text{ mL} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นปิเปตกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เข้มข้น 98 % by mass มา 11.404 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 250 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.8393 โมลต่อลิตร

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.8393 โมลต่อลิตร

1. บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรลงในบิวเรต (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ต้องไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนกับสารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต) บันทึกระดับของสารละลายบนสเกลก่อนการไทเทรต

2. ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริก 0.8393 โมลต่อลิตร มา 10 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร แล้วเติม 2-3 หยด สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอินดิเคเตอร์ลงไป ไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมทั้งเขย่าสารละลาย จนปรากฏสีชมพูอ่อนเกิดขึ้นนานอย่างน้อย 20 วินาที บันทึกระดับของสารละลายบนสเกลของบิวเรตอีกครั้ง และหาปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป

3. ทำการไทเทรตซ้ำอีก 2 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไป นำไปคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก

การคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก

$$\text{จากสูตร} \quad C_1 V_1 = C_2 V_2$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } C_1 &= \text{ความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก (mol/L)} \\ C_2 &= \text{ความเข้มข้นที่แน่นอนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (mol/L)} \\ V_1 &= \text{ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ (mL)} \\ V_2 &= \text{ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (mL)} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอน

ครั้งที่	น้ำหนักกากตะกอน(กรัม)	ค่าพีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า(ms/cm)
1	10.0207	8.37	1.68
2	10.0054	8.39	1.69
3	10.0026	8.50	1.79

ตารางที่ ข-2 ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในกากตะกอน

การทดลองที่	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง <sup>†</sup>	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
1	1.0239	100	10,000	0.123	0.660	6600	0.082	645
2	1.0244	100	10,000	0.123	0.660	6600	0.082	644
3	1.0126	100	10,000	0.121	0.649	6490	0.082	641

หมายเหตุ: † คือ กราฟมาตรฐานทองแดงมีสมการเส้นตรงคือ  $y = 0.1885x$

ตารางที่ ข-3 ผลการศึกษาความสามารถของกรดซัลฟิวริกในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

การทดลองที่	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0.1023	100	1,000	0.073	0.391	391	0.023	382.19	59.41
2	0.1010	100	1,000	0.074	0.397	397	0.023	393.05	61.10
3	0.1011	100	1,000	0.075	0.402	402	0.023	397.60	61.81
4	0.1019	100	1,000	0.075	0.402	402	0.023	394.48	61.33
5	0.1020	100	1,000	0.076	0.408	408	0.023	399.98	62.18

ตารางที่ ข-4 ผลการศึกษาความสามารถของกรดไนตริกในการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

การทดลองที่	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0.1018	100	1,000	0.059	0.316	316	0.014	310.40	48.25
2	0.1018	100	1,000	0.06	0.322	322	0.014	316.29	49.17
3	0.1042	100	1,000	0.057	0.306	306	0.014	293.65	45.65
4	0.1029	100	1,000	0.066	0.354	354	0.014	344.01	53.48
5	0.1011	100	1,000	0.066	0.354	354	0.014	350.13	54.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ผลการศึกษาความสามารถของกรดไฮโดรคลอริกในการสกัดทองแดงจาก  
กากตะกอน

การ ทดลอง ที่	กาก ตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือ จาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)	ประสิทธิภาพ (%)
1	0.1018	100	1,000	0.037	0.198	198	0.024	194.48	30.23
2	0.1024	100	1,000	0.038	0.204	204	0.024	199.20	30.97
3	0.1027	100	1,000	0.039	0.209	209	0.024	203.48	31.63
4	0.1009	100	1,000	0.039	0.209	209	0.024	207.11	32.20
5	0.1013	100	1,000	0.040	0.214	214	0.024	211.23	32.84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอนที่สภาวะต่างๆ

การทดลองที่	A (M)	B	C (นาที)	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
1	0.2	60:1	40	0.1030	100	1000	0.068	0.365	365	0.016	354.35
2	0.2	10:1	40	0.1008	100	10	0.542	2.906	29.06	0.086	28.74
3	0.2	10:1	80	0.1008	100	10	0.615	3.298	32.98	0.005	32.71
4	1.0	10:1	80	0.1029	100	1000	0.064	0.343	343	0.172	333.17
5	0.6	10:1	40	0.1010	100	1000	0.042	0.225	225	0.032	222.74
6	0.6	60:1	5	0.1020	100	200	0.402	2.155	431	0.027	422.52
7	1.0	10:1	40	0.1034	100	1000	0.059	0.316	316	0.005	305.6
8	0.2	100:1	5	0.1015	100	200	0.077	0.413	82.6	0.086	81.29
9	1.0	100:1	80	0.1016	100	1000	0.113	0.606	606	0.021	596.44
10	1.0	60:1	5	0.1020	100	1000	0.101	0.542	542	0.016	531.36
11	1.0	60:1	40	0.1031	100	1000	0.110	0.590	590	0.032	572.23
12	0.2	100:1	40	0.1008	100	1000	0.079	0.424	424	0.005	420.63
13	0.6	10:1	5	0.1029	100	200	0.179	0.960	192	0.043	186.55
14	1.0	10:1	5	0.1041	100	1000	0.056	0.300	300	0.064	288.12
15	0.2	60:1	5	0.1030	100	200	0.071	0.381	76.20	0.027	73.95
16	0.6	60:1	40	0.1014	100	1000	0.097	0.520	520	0.059	512.76
17	0.2	10:1	5	0.1075	100	10	0.537	2.879	28.79	0.011	26.77

ตารางที่ ข-6 (ต่อ)

การ ทดลองที่	A (M)	B	C (นาที)	กาก ตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
18	0.2	60:1	80	0.1017	100	1000	0.068	0.366	366	0.032	359.85
19	1.0	100:1	5	0.1016	100	1000	0.104	0.558	558	0.011	549.20
20	0.6	10:1	80	0.1021	100	1000	0.044	0.236	236	0.016	231.13
21	1.0	100:1	40	0.1083	100	1000	0.112	0.601	601	0.011	554.93
22	1.0	60:1	80	0.1000	100	1000	0.107	0.574	574	0.054	573.95
23	0.6	100:1	80	0.1013	100	1000	0.110	0.590	590	0.043	582.39
24	0.2	100:1	80	0.1006	100	1000	0.088	0.472	472	0.021	469.16
25	0.6	100:1	5	0.1015	100	1000	0.092	0.493	493	0.016	485.70
26	0.6	100:1	40	0.1021	100	1000	0.105	0.563	563	0.011	551.41
27	0.6	60:1	80	0.1008	100	1000	0.100	0.536	536	0.070	531.68
28	0.2	60:1	40	0.1026	100	1000	0.039	0.209	209	0.021	203.68
29	0.2	10:1	40	0.1001	100	50	0.138	0.740	37	0.027	36.94
30	0.2	10:1	80	0.1005	100	50	0.139	0.745	37.25	0.021	37.04
31	1.0	10:1	80	0.1008	100	1000	0.043	0.231	231	0.005	229.16
32	0.6	10:1	40	0.1015	100	1000	0.009	0.048	48	0.016	47.27
33	0.6	60:1	5	0.1012	100	1000	0.065	0.349	349	0.038	344.82
34	1.0	10:1	40	0.1027	100	1000	0.040	0.214	214	0.011	208.36

ตารางที่ ข-6 (ต่อ)

การ ทดลองที่	A (M)	B	C (นาที)	กาก ตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แปลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
35	0.2	100:1	5	0.1027	100	200	0.056	0.300	60	0.027	58.40
36	1.0	100:1	80	0.1013	100	1000	0.118	0.633	633	0.016	624.86
37	1.0	60:1	5	0.1005	100	1000	0.084	0.450	450	0.021	447.74
38	1.0	60:1	40	0.1009	100	1000	0.087	0.466	466	0.016	461.83
39	0.2	100:1	40	0.1038	100	1000	0.055	0.295	295	0.027	284.17
40	0.6	10:1	5	0.1020	100	1000	0.009	0.048	48	0.011	47.05
41	1.0	10:1	5	0.1017	100	1000	0.036	0.193	193	0.011	189.76
42	0.2	60:1	5	0.1035	100	200	0.040	0.214	42.80	0.048	41.31
43	0.6	60:1	40	0.1011	100	1000	0.066	0.354	354	0.000	350.15
44	0.2	10:1	5	0.1004	100	50	0.134	0.718	35.90	0.000	35.76
45	0.2	60:1	80	0.1020	100	1000	0.053	0.284	284	0.005	278.43
46	1.0	100:1	5	0.1017	100	1000	0.095	0.509	509	0.027	500.47
47	0.6	10:1	80	0.1016	100	1000	0.013	0.070	70	0.016	68.88
48	1.0	100:1	40	0.1037	100	1000	0.108	0.579	579	0.005	558.34
49	1.0	60:1	80	0.1006	100	1000	0.116	0.622	622	0.027	618.26
50	0.6	100:1	80	0.1020	100	1000	0.096	0.515	515	0.021	504.88
51	0.2	100:1	80	0.1010	100	1000	0.060	0.322	322	0.021	318.79

ตารางที่ ข-6 (ต่อ)

การทดลองที่	A (M)	B	C (นาที่)	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
52	0.6	100:1	5	0.1034	100	1000	0.076	0.408	408	0.021	394.56
53	0.6	100:1	40	0.1041	100	1000	0.091	0.488	488	0.016	468.76
54	0.6	60:1	80	0.1027	100	1000	0.071	0.381	381	0.016	370.97

ตารางที่ ข-7 การยืนยันความเหมาะสมของสมการที่ได้

การทดลองที่	A (M)	B	C (นาที่)	กากตะกอน (กรัม)	ปริมาตร (มิลลิลิตร)	เจือจาง (เท่า)	Abs ตัวอย่าง	Cu (mg/L)	Total Cu (mg/L)	แบลงค์ (mg/L)	Total Cu (g/kg)
1	0.8367	100:1	80	0.1024	100	1000	0.120	0.643	643	0.013	624.92
2	0.8367	100:1	80	0.1023	100	1000	0.119	0.638	638	0.013	623.64
3	0.8367	100:1	80	0.1029	100	1000	0.120	0.643	643	0.013	624.87
4	0.8367	100:1	80	0.1009	100	1000	0.117	0.627	627	0.013	621.39
5	0.8367	100:1	80	0.1022	100	1000	0.119	0.638	638	0.013	624.25
6	0.8367	100:1	80	0.1006	100	1000	0.079	0.424	424	0.013	421.46
7	0.8367	100:1	80	0.1000	100	1000	0.116	0.622	622	0.013	621.99
8	0.8367	100:1	80	0.1005	100	1000	0.117	0.627	627	0.013	623.87
9	0.8367	100:1	80	0.1004	100	1000	0.117	0.627	627	0.013	624.49
10	0.8367	100:1	80	0.1000	100	1000	0.115	0.617	616	0.013	615.99



ภาคผนวก ค  
การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-1 การหาความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดที่สกัดได้

$$\text{Total Cu (g/kg)} = \frac{\left[ A - B \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \right] \times C \text{ (mL)} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}}{W \text{ (g)}}$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นของทองแดงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน (mg/L)  
 B = ความเข้มข้นของทองแดงในแบลงค์ (mg/L)  
 C = ปริมาตรสุดท้ายของตัวอย่าง (mL)  
 W = น้ำหนักของกากตะกอน (g)

สมมติ A = 365 mg/L  
 B = 0.016 mg/L  
 C = 100 mL  
 W = 0.1030 g

$$\begin{aligned} \text{Total Cu (g/kg)} &= \frac{\left[ 365 - 0.016 \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) \right] \times 100 \text{ (mL)} \times \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}}}{0.1030 \text{ (g)}} \\ &= 354.35 \text{ mg/g} \\ &= 354.35 \text{ g/kg} \end{aligned}$$

ค-2 การหาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงจากกากตะกอน

$$\text{ประสิทธิภาพการสกัด(\%)} = \frac{\text{Cu ที่ได้}}{\text{Cu ทั้งหมด}} \times 100\%$$

โดยที่ Cu ที่ได้ = ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดที่สกัดได้ (g/kg)  
 Cu ทั้งหมด = ความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดในกากตะกอน (g/kg)

สมมติ Cu ที่ได้ = 354.35 g/kg  
 Cu ทั้งหมด = 643.26 g/kg

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการสกัด(\%)} &= \frac{354.35}{643.26} \times 100\% \\ &= 55.09 \text{ \%} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง  
ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ  
โดยใช้โปรแกรม Minitab 17.0 ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-1 ผลของการเปรียบเทียบชนิดของกรดในการสกัดทองแดงจากกากตะกอนโดยวิธี  
One - way ANOVA

## Factor Information

Factor	Levels	Values
Acid	3	Sulfuric, Nitric, Hydrochloric

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Acid	2	92612	46306.1	213.53	0.000
Error	12	2602	216.9		
Total	14	95214			

ผลของการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดที่สกัดได้ที่ชนิดกรดต่างกันโดยวิธี Fisher Pairwise Comparisons

## Grouping Information Using the Fisher LSD Method and 95% Confidence

Acid	N	Mean	Grouping
Sulfuric	5	393.46	A
Nitric	5	322.90	B
Hydrochloric	5	203.10	C

## ตารางที่ ง-2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear

Factorial Regression: %Efficacy versus Conc, L:S, Time

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	40221	13406.9	69.97	0.000
Linear	3	40221	13406.9	69.97	0.000
Conc	1	16612	16611.8	86.69	0.000
L:S	1	20828	20828.2	108.70	0.000
Time	1	2781	2780.6	14.51	0.000
Error	50	9581	191.6		
Lack-of-Fit	23	6255	272.0	2.21	0.025
Pure Error	27	3326	123.2		
Total	53	49801			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
13.8424	80.76%	79.61%	77.58%

## Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		50.08	1.89	26.55	0.000	
Conc	42.96	21.48	2.31	9.31	0.000	1.00
L:S	48.01	24.00	2.30	10.43	0.000	1.00
Time	17.56	8.78	2.31	3.81	0.000	1.00

## Regression Equation in Uncoded Units

$$\%Efficacy = -21.43 + 53.70 \text{ Conc} + 0.5334 \text{ L:S} + 0.2342 \text{ Time}$$

## ตารางที่ ง-3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + 2-Way interactions

Factorial Regression: %Efficacy versus Conc, L:S, Time

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	41641.1	6940.2	39.97	0.000
Linear	3	39954.4	13318.1	76.71	0.000
Conc	1	16260.6	16260.6	93.66	0.000
L:S	1	21031.3	21031.3	121.13	0.000
Time	1	2644.2	2644.2	15.23	0.000
2-Way Interactions	3	1420.5	473.5	2.73	0.055
Conc*L:S	1	176.2	176.2	1.01	0.319
Conc*Time	1	472.5	472.5	2.72	0.106
L:S*Time	1	771.9	771.9	4.45	0.040
Error	47	8160.1	173.6		
Lack-of-Fit	20	4834.5	241.7	1.96	0.051
Pure Error	27	3325.6	123.2		
Total	53	49801.2			

## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
13.1765	83.61%	81.52%	78.53%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		50.08	1.80	27.89	0.000	
Conc	42.56	21.28	2.20	9.68	0.000	1.00
L:S	48.26	24.13	2.19	11.01	0.000	1.00
Time	17.15	8.57	2.20	3.90	0.000	1.00
Conc*L:S	5.41	2.70	2.68	1.01	0.319	1.00
Conc*Time	-8.87	-4.43	2.69	-1.65	0.106	1.00
L:S*Time	11.31	5.66	2.68	2.11	0.040	1.00

## Regression Equation in Uncoded Units

$$\%Efficacy = -15.80 + 57.5 \text{ Conc} + 0.304 \text{ L:S} + 0.222 \text{ Time} + 0.150 \text{ Conc*L:S} - 0.296 \text{ Conc*Time} + 0.00335 \text{ L:S*Time}$$

## ตารางที่ ง-4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Linear + all interactions model

Factorial Regression: %Efficacy versus Conc, L:S, Time

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	42095.9	6013.7	35.90	0.000
Linear	3	39961.1	13320.4	79.52	0.000
Conc	1	16267.2	16267.2	97.11	0.000
L:S	1	21031.3	21031.3	125.56	0.000
Time	1	2644.2	2644.2	15.79	0.000
2-Way Interactions	3	1362.8	454.3	2.71	0.056
Conc*L:S	1	161.0	161.0	0.96	0.332
Conc*Time	1	430.6	430.6	2.57	0.116
L:S*Time	1	771.9	771.9	4.61	0.037
3-Way Interactions	1	454.8	454.8	2.72	0.106
Conc*L:S*Time	1	454.8	454.8	2.72	0.106
Error	46	7705.3	167.5		
Lack-of-Fit	19	4379.7	230.5	1.87	0.066
Pure Error	27	3325.6	123.2		
Total	53	49801.2			

## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
12.9424	84.53%	82.17%	78.98%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		50.08	1.76	28.39	0.000	
Conc	42.57	21.29	2.16	9.85	0.000	1.00
L:S	48.26	24.13	2.15	11.21	0.000	1.00
Time	17.15	8.57	2.16	3.97	0.000	1.00
Conc*L:S	5.17	2.59	2.64	0.98	0.332	1.00
Conc*Time	-8.47	-4.24	2.64	-1.60	0.116	1.00
L:S*Time	11.31	5.66	2.63	2.15	0.037	1.00
Conc*L:S*Time	-10.63	-5.32	3.23	-1.65	0.106	1.00

## Regression Equation in Uncoded Units

$$\%Efficacy = -4.6 + 38.9 \text{ Conc} + 0.107 \text{ L:S} - 0.046 \text{ Time} + 0.478 \text{ Conc*L:S} \\ + 0.151 \text{ Conc*Time} + 0.00808 \text{ L:S*Time} - 0.00788 \text{ Conc*L:S*Time}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



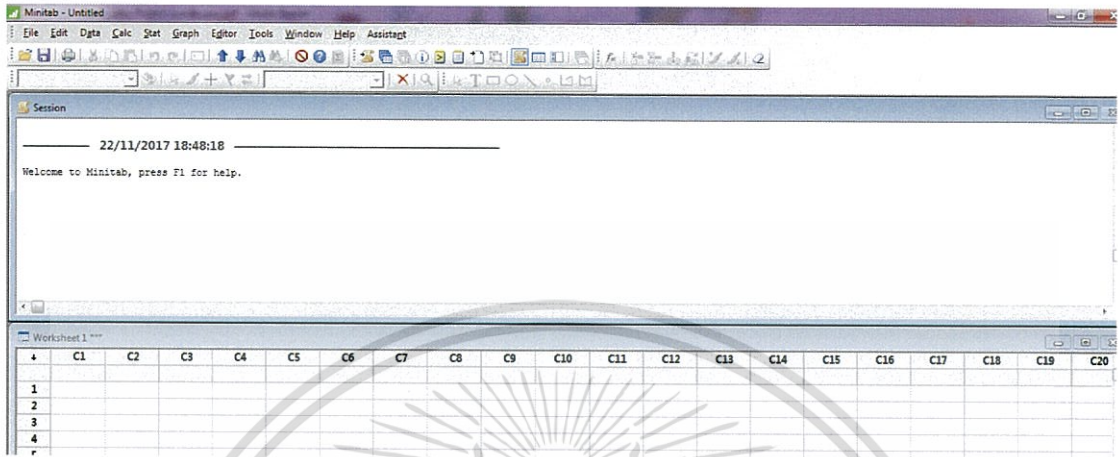
ภาคผนวก จ  
วิธีการใช้โปรแกรม Minitab 17.0 ในการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## จ-1 วิธีการออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียล (Full Factorial Design) ด้วย โปรแกรม Minitab 17.0

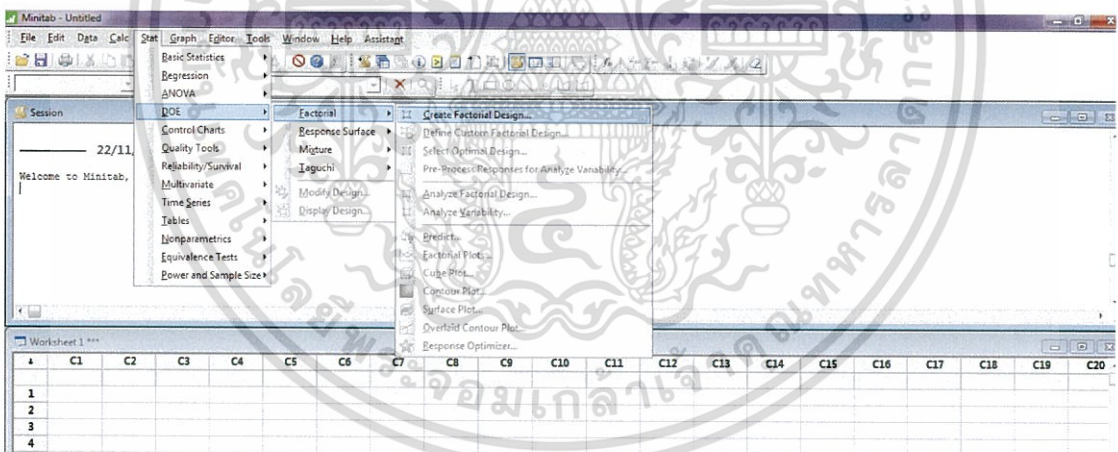
มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม Minitab 17.0 จะพบหน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลดังรูปที่ จ-1.1



รูปที่ จ-1.1 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลในโปรแกรม Minitab 17.0

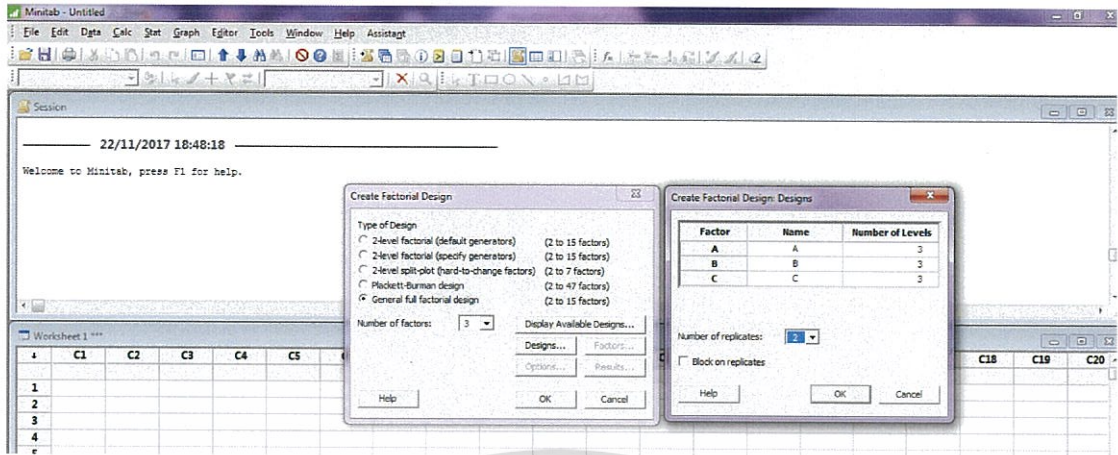
2. เข้าเมนู Stat > DOE > Factorial > Create Factorial Design ดังรูปที่ จ-1.2



รูปที่ จ-1.2 การออกแบบการทดลองโดยวิธีแฟคทอเรียลแบบเต็มรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เลือก Designs... > ใส่จำนวนระดับ และจำนวนซ้ำที่จะศึกษาในแต่ละปัจจัย > OK ดังรูปที่ จ-1.3



รูปที่ จ-1.3 การใส่จำนวนระดับ และจำนวนซ้ำที่จะศึกษาในแต่ละปัจจัย

4. จากข้อที่ 3. จะปรากฏตารางการทดลองใน work sheet ดังรูปที่ จ-1.4

Multilevel Factorial Design

Factors: 3      Replicates: 2  
 Base runs: 27      Total runs: 54  
 Base blocks: 1      Total blocks: 1

Number of levels: 3, 3, 3

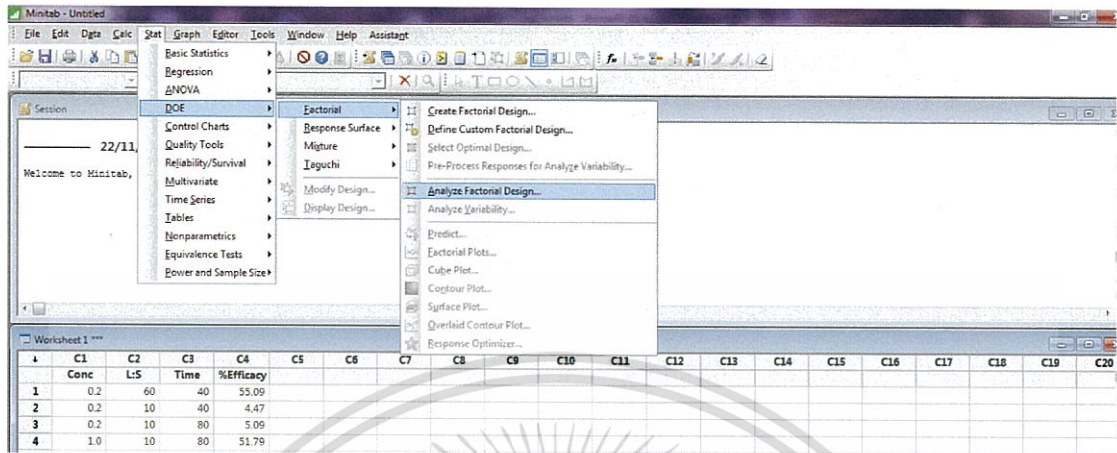
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C
1	40	1	1	0	0	1
2	15	2	1	1	0	0
3	49	3	1	1	1	0
4	45	4	1	1	0	1

รูปที่ จ-1.4 ตารางการทดลองใน work sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

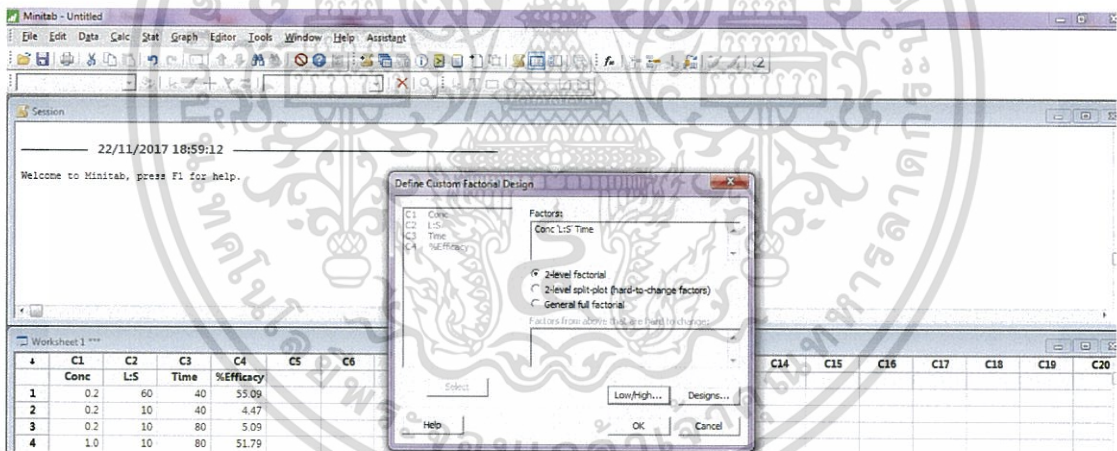
## จ-2 วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรม Minitab 17.0 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เข้าเมนู Stat > DOE > Factorial > Analyze Factorial Design ดังรูปที่ จ-2.1



รูปที่ จ-2.1 การวิเคราะห์การถดถอย

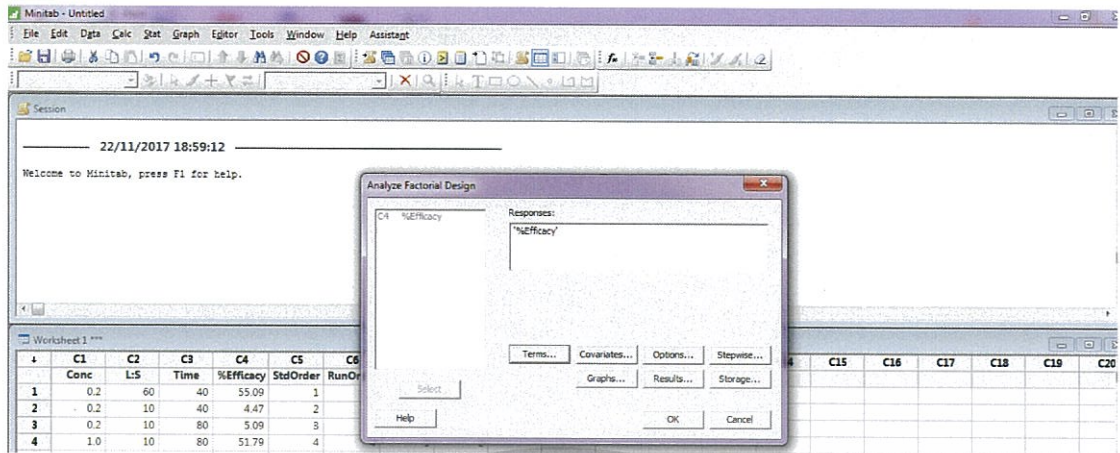
2. เลือก Factor ที่ต้องการ > OK ดังรูปที่ จ-2.2



รูปที่ จ-2.2 การเลือก Factor ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. เลือก Responses ที่ต้องการ > OK ดังรูปที่ จ-2.3



รูปที่ จ-2.3 การเลือก Responses ที่ต้องการ

### 4. จากข้อที่ 3. จะแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย ดังรูปที่ จ-2.4

The screenshot shows the 'Analysis of Variance' table in Minitab. The table is as follows:

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	42095.9	6013.7	85.90	0.000
Linear	3	39861.1	13320.4	79.52	0.000
Conc	1	16267.2	16267.2	97.11	0.000
L5	1	21011.9	21011.9	125.96	0.000
Time	1	2644.2	2644.2	15.79	0.000
2-Way Interactions	3	1362.8	454.3	2.71	0.056
Conc*L5	1	161.0	161.0	0.96	0.332
Conc*Time	1	438.6	438.6	2.57	0.116

The background worksheet shows the following data:

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20
	Conc	L5	Time	%Efficacy	StdOrder	RunOrder	Blocks	CenterPt												
1	0.2	60	40	55.09	1	1	1	1												
2	0.2	10	40	4.47	2	2	1	1												
3	0.2	10	80	5.09	3	3	1	1												
4	1.0	10	80	51.79	4	4	1	1												

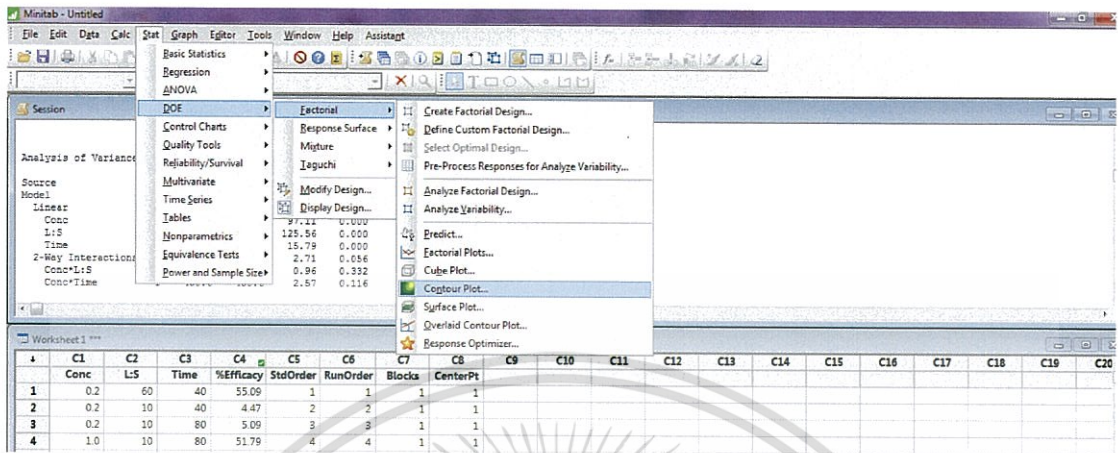
รูปที่ จ-2.4 หน้าต่างแสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จ-3 การสร้างกราฟ Contour Plot

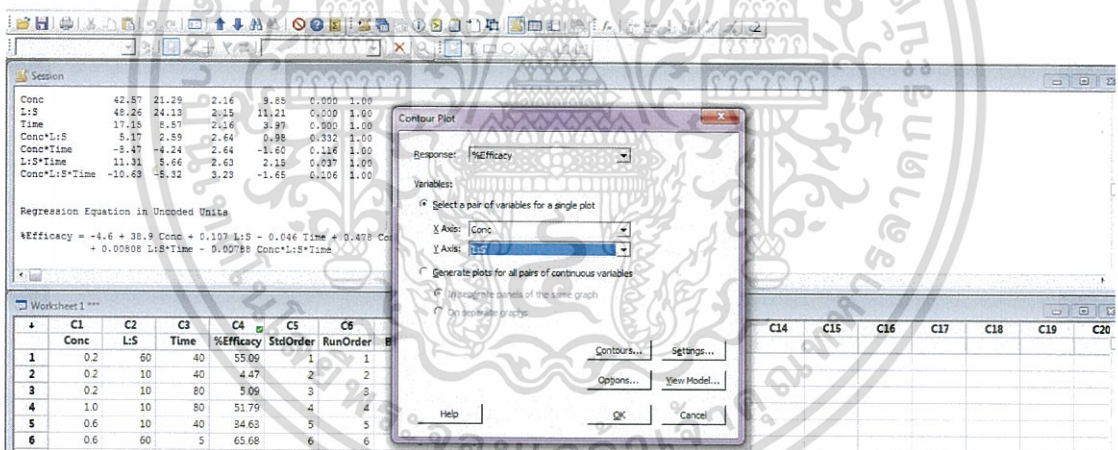
มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เข้าเมนู Stat > DOE > Factorial > Contour Plot ดังรูปที่ จ-3.1



รูปที่ จ-3.1 การสร้างกราฟ Contour Plot

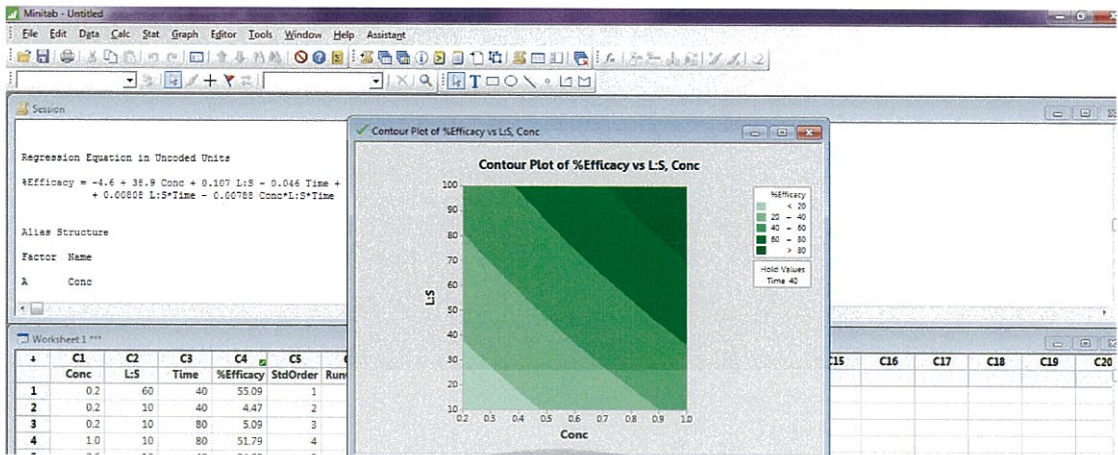
2. เลือกแกน X และแกน Y ที่ต้องการ > OK ดังรูปที่ จ-3.2



รูปที่ จ-3.2 การเลือกแกน X และแกน Y ที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากข้อ 2 จะได้กราฟ Contour Plot ดังรูปที่ จ-3.3

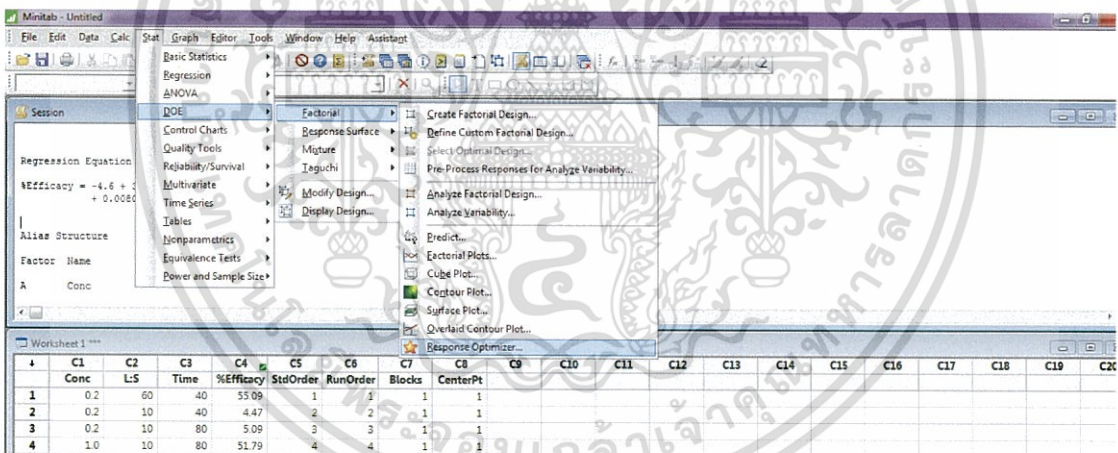


รูปที่ จ-3.3 หน้าต่างแสดงกราฟ Contour Plot

#### จ-4 การหา Response Optimizer

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

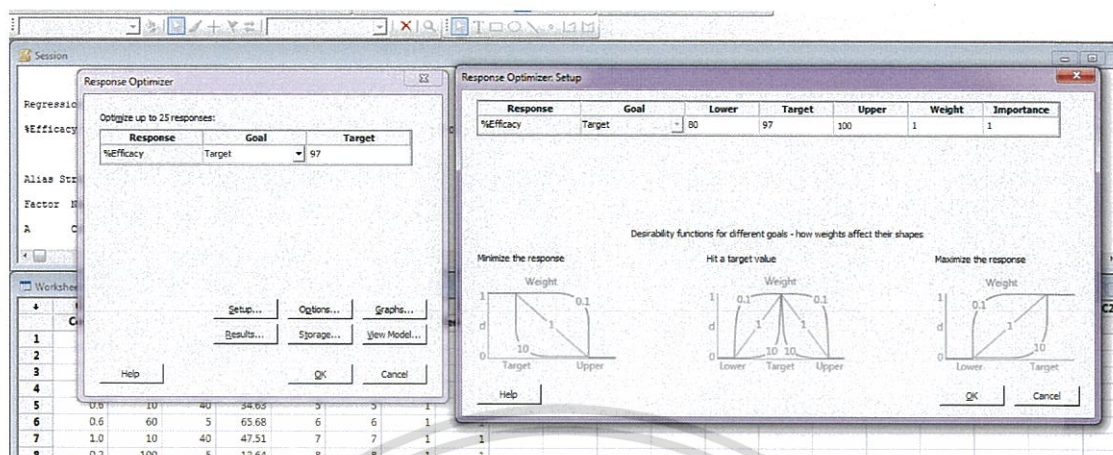
1. เข้าเมนู Stat > DOE > Factorial > Response Optimizer ดังรูปที่ จ-4.1



รูปที่ จ-4.1 การหา Response Optimizer

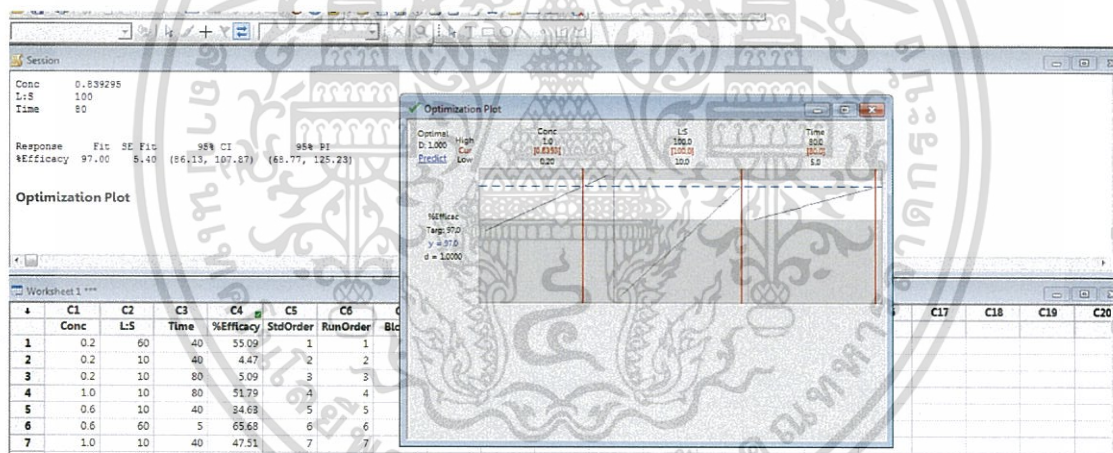
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใส่ค่า Target ที่ต้องการ > Setup... > ใส่ค่า Lower และ Upper ที่ต้องการ > OK  
 ดังรูปที่ จ-4.2



รูปที่ จ-4.2 การใส่ค่า Target, Lower และ Upper ที่ต้องการ

3. จากข้อที่ 2 จะได้ค่า และกราฟที่เหมาะสม ดังรูปที่ จ-4.3



รูปที่ จ-4.3 แสดงค่าและกราฟที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้