การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แบคทีเรีย

นางสาว ธนียา เหงี่ยมวิจาวัฒ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-639-951-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I18520571

BACTERIAL LEACHING OF NICKEL FROM NICKEL HYDROXIDE SLUDGE

Miss Thaneeya Ngeimvijawat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Acedemic Year 1998

ISBN 974-639-951-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แบคทีเรีย
โดย	ธนียา เหงี่ยมวิจาวัฒ
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษา(ร่วม)	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มันสิน ตัณฑุลเวศม์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา(ร่วม)
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ธนียา เหลี่ยมวิจาวัฒ : การสกัดนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้แบคทีเรีย (BACTERIAL LEACHING OF NICKEL FROM NICKEL HYDROXIDE SLUDGE) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ, 146 หน้า. ISBN 974-639-951-9

กากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากลานตากตะกอนของระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานชุบเคลือบโลหะ ซึ่งมีความเข้มข้นนิกเกิลประมาณ 43% และมีค่าพีเอชประมาณ 8

งานวิจัยนี้มี 2 ส่วน ซึ่งทำการทดลองทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์ ดังนี้ ส่วนที่ 1 ศึกษาการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยกรดซัลฟิวริก ผลการทดลองในระบบขวดเขย่าคือ เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ลงในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่แปรความเข้มข้น 0.01 0.05 0.1 0.15 0.5 1 และ 5 นอร์มัล ให้มีปริมาณนิกเกิลอิออน 10 กรัมต่อลิตร พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 1 และ 0.5 นอร์มัล สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 100% ภายในเวลา 24 48 และ 84 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งปริมาณการลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.5 นอร์มัล มีค่า 1.06 กรัมกรดซัลฟิวริก/กรัมกากตะกอน สำหรับการทดลองในคอลัมน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ที่บรรจุกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ 500 กรัม และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 นอร์มัล ไหลผ่านด้วยอัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. พบว่า สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 13.56% ภายใน 3.5 ชั่วโมง

ส่วนที่ 2 ศึกษาการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยเชื้อ *Thiobacillus ferrooxidans* และ *Thiobacillus thiooxidans* ทำการทดลองในระบบขวดเขย่าโดยเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ลงในสารอาหารผสมเชื้อแบคทีเรียที่แตกต่างกัน ให้มีปริมาณนิกเกิลอิออน 10 กรัมต่อลิตร พบว่า เชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพแล้วทั้งสองชนิดสามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 47% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับการลิชชิ่งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.15 นอร์มัล การลิชชิ่งนิกเกิลโดยเชื้อแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการลิชชิ่งโดยเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และการลิชชิ่งด้วยสารอาหารเพียงอย่างเดียวจะมีประสิทธิภาพต่ำสุด สำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนในคอลัมน์โดยเชื้อแบคทีเรียจะใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพในสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. ferrooxidans* หาได้จากการแปรค่าอัตราการไหลที่ 5 10 15 และ 20 มล./ตร.ซม.-ชม. ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10% และ 20%(v/v) ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 4 10 20 30 40 และ 50 กรัม/ลิตร และปริมาณกากตะกอน 250 และ 500 กรัม ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ การใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* 20%(v/v) ปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านกากตะกอน 250 กรัม ที่บรรจุในคอลัมน์ ด้วยอัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 30 กรัม/ลิตร และควบคุมพีเอชของสารละลาย 2.5-3.0 ซึ่งวันที่ 150 ของการทดลอง สามารถลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนได้ 32.90% สำหรับการลิชชิ่งโดยสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* 20%(v/v) ปริมาตร 1 ลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ซึ่งบรรจุกากตะกอน 250 กรัม ที่ผสมผงซัลเฟอร์ 0.2 กรัม/กรัมกากตะกอน ที่อัตราการไหล 15 มล./ตร.ซม.-ชม. และควบคุมพีเอชของสารละลาย 1.5-2.0 พบว่า สามารถลิชชิ่งนิกเกิลได้ 37.92% ภายใน 150 วัน

สำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนในระบบขวดเขย่า พบว่า การใช้กรดซัลฟิวริก การใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* และการใช้เชื้อ *T. thiooxidans* มีค่าใช้จ่าย 19 99 และ 160 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน ตามลำดับ นั่นคือเชื้อ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริก 5 และ 8 เท่า ตามลำดับ สำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนในคอลัมน์ พบว่า การใช้กรดซัลฟิวริก การใช้เชื้อ *T. ferrooxidans* และการใช้เชื้อ *T. thiooxidans* มีค่าใช้จ่าย 97 174 และ 163 บาท/กิโลกรัมกากตะกอน ตามลำดับ นั่นคือเชื้อ *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans* มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการลิชชิ่งด้วยกรดซัลฟิวริกประมาณ 2 เท่า

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต ธนียา เหลี่ยมวิจาวัฒ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2541	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวเพียงแผ่นเดียว

3970670621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORD: BACTERIAL LEACHING / *Thiobacillus ferrooxidans* / *Thiobacillus thiooxidans* / NICKEL HYDROXIDE SLUDGE / SULFURIC ACID / CHEMICAL LEACHING
THANEEYA NGEIMVIJAWAT : BACTERIAL LEACHING OF NICKEL FROM NICKEL HYDROXIDE SLUDGE. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. PAITIP THIRAVETYAN, Ph.D. 146 pp. ISBN 974-639-951-9

Nickel hydroxide sludge samples used in this research were obtained from a sand dring bed of chemical wastewater treatment plant for a nickel eletroplating process containing 43% nickel. Its pH was around 8.

This research consist of two parts which in both of shake flask and column. The first part of this research is to study the leaching efficiency of nickel hydroxide sludge by sulfuric acid. The experiment in shake flask was carried out using nickel hydroxide sludge which containing nickel ion at 10 g/L by varying the concentration sulfuric acid at 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.5, 1 and 5N. The result indicated that the concentration of sulfuric acid at 5, 1 and 0.5N can achieve 100% leaching efficiency within 24, 48 and 84 hours respectively. The concentration of sulfuric acid at 0.5 N can consume 1.06 g.H_2SO_4 per g. sludge. The experiment in column was carried out using 500 g. of nickel hydroxide sludge in a column 5 cm. in diameter with 50 cm. height by using 1N H_2SO_4 at flow rate of 15 ml/cm^2-hr. It can leach nickel at 13.56% within 3.5 hours.

The other part of this research is bacterial leaching of nickel from nickel hydroxide sludge by *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*. The experiment in shake flask was carried out using nickel hydroxide sludge which containing 10 g/L of nickel ion in different culture with bacteria. The adapted strain of both types of *Thiobacillus spp.* have 47% efficiency in leaching nickel which cooresponds to the sulfuric acid concentration of 0.15N and is higher than for nonadapted bacteria and the sterile control, respectively. The experiment in column was carried out nickel hydroxide sludge in the same size of column as the first experiment using an adapted strain of *T.ferrooxidans* and *T.thiooxidans* in 9K medium and thiomedium, respectively. The optimum condition for *T.ferrooxidans* was obtained by varying flow rate at 5, 10, 15 and 20 ml/cm^2-hr; the inoculum amount of *T.ferrooxidans* at 10% and 20%(v/v); ferrous iron in 9K medium at 4, 10, 20, 30, 40 and 50 g/L; and quantity of sludge at 250 and 500 g. per column. The result indicated that the optimum condition were at a flow rate of 15 ml/cm^2-hr, with 20%(v/v) innoculum and the concentration of ferrous iron at 30 g/L, under which *T.ferrooxidans* can leach nickel from nickel hydroxide sludge 250 g. per column at 32.90% whithin 150 days. The controlled pH of the aforemention step is between 2.5-3.0. The efficiency of nickel leaching from the sludge mixed with sulfer 0.2 g./g. sludge packed in column with *T.thiooxidans* was higher, with 37.92% leaching whithin 150 days at a flow rate of 15 ml/cm^2-hr, with 20%(v/v) innoculum, 250 g. sludge per column and a controlled pH of 1.5-2.0 at the column inlet.

The cost of bacterial leaching which in both of shake flask and column was found to be lower in chemical leaching by sulfuric acid. The cost of leaching nickel from nickel hydroxide sludge by sulfuric acid, *T.ferrooxidans* and *T.thiooxidans*. which in shake flask experiment were 19, 99 and 160 baht per kg. of sludge, respectively and which in column experiment were 97, 174 and 163 baht per kg. of sludge, respectively.

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต ธนียา เหงียมวิจวัฒน์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ และ ผศ.ดร. ไพทิพย์ ธีรเวชญาณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำและแนวทางอันเป็นประโยชน์ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้

ขอขอบพระคุณ คุณจันทวรรณ ตันเจริญ คุณวรรณธนา วงษ์สุด คุณอนันต์ วีระณรงค์ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิจัยต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณมานพ ติยะรัตนสมโภชน์ และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความรู้เกี่ยวกับเครื่องมือวิจัยต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณขวัญเรือน หลีสิน และคุณทองบรอนซ์ หอมทอง ที่กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มูลนิธิ ชิน โสภณพนิช และ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัย

ผู้วิจัยระลึกถึงเสมอว่า ความสำเร็จของงานวิจัยนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ.โอกาสนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญเรื่อง

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญเรื่อง..... ช
สารบัญตาราง..... ญ
สารบัญรูป..... ณ
บทที่
1. บทนำ..... 1
1.1 วัตถุประสงค์..... 2
1.2 ขอบเขตการวิจัย..... 2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
2. ทบทวนเอกสาร..... 4
2.1 นิกเกิลและบทบาทในอุตสาหกรรมฺชุบโลหะ..... 4
2.2 กระบวนการ Bacterial leaching..... 5
2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ Bacterial leaching..... 6
2.4 กลไกการเกิดกระบวนการ Bacterial leaching..... 11
2.5 ปัจจัยพื้นฐานที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการ Bacterial leaching..... 14
2.6 ผลการศึกษาที่ผ่านมา..... 24
3. แผนการดำเนินงานวิจัย..... 31
3.1 แผนการวิจัย..... 31
3.2 กากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทดลอง..... 31
3.3 แบคทีเรียและสารอาหาร..... 32
3.3.1 แบคทีเรียที่ใช้ในการทดลอง..... 32
3.3.2 สารอาหาร 9K medium..... 32
3.3.3 สารอาหาร thiomedium..... 33

หน้า

3.4 ขั้นตอนการวิจัย..... 34
3.4.1 การวิเคราะห์ค่าพีเอชเริ่มต้นของกากตะกอน..... 34
3.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นในกากตะกอน..... 34
3.4.3 กระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในระบบขวดเขย่า..... 35
3.4.4 กระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในคอลัมน์ 35
3.4.5 การเพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* ในสารอาหาร 9K medium 37
3.4.6 การเพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในสารอาหาร thiomedium..... 37
3.4.7 การปรับสภาพแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอน..... 37
3.4.8 กระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในระบบขวดเขย่าโดยแบคทีเรีย
ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ..... 38
3.4.9 กระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์ โดยแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ.. 38
3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล..... 41
3.5.1 วิธีวิเคราะห์ปริมาณแบคทีเรีย..... 41
3.5.2 วิธีวิเคราะห์ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส..... 43
3.5.3 วิธีวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิล 44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์..... 46
4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณนิกเกิลในกากตะกอน..... 46
4.2 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริก..... 47
4.2.1 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในระบบขวดเขย่า..... 47
4.2.2 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกในคอลัมน์..... 48
4.3 ผลการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย..... 50
4.3.1 ผลการเพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* ในสารอาหาร 9K medium..... 50
4.3.2 ผลการเพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในสารอาหาร thiomedium..... 51
4.4 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า 55
4.4.1 ผลการปรับสภาพ *T. ferrooxidans* ให้เคยชินกับกากตะกอน..... 55
4.4.2 ผลการปรับสภาพ *T. thiooxidans* ให้เคยชินกับกากตะกอน..... 59
4.4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. ferrooxidans*
และ *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ..... 61

หน้า

4.5 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์ โดยแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ..... 67
4.5.1 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. ferrooxidans*..... 67
4.5.2 ผลจากการเติมผงซัลเฟอร์ลงในกากตะกอนที่มีต่อกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดย T. thiooxidans..... 80
4.5.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการลิชชิ่งนิกเกิลโดย *T. ferrooxidans* และ *T. thiooxidans*..... 82
4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย..... 85
5. สรุปผลการทดลอง..... 88
5.1 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริก..... 88
5.2 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า..... 88
5.3 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบคอลัมน์..... 89
5.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลิชชิ่งโดยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย..... 90
6 ข้อเสนอแนะ..... 91
รายการอ้างอิง..... 92
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง..... 99
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวน..... 139
ภาคผนวก ค. การคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งโดยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย... 141
ประวัติผู้เขียน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์และคุณสมบัติเชิงกลของโลหะหนักนิกเกิล..... 4

ตารางที่ 2.2 ค่าพีเอชและการตกตะกอนของเกลือเฟอร์ริกในกระบวนการลิชชิ่ง โดยเชื้อ *T. ferrooxidans* WU-66 B..... 18

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นต่ำสุดของโลหะหนักที่ยับยั้งการเจริญของ เชื้อ *T. ferrooxidans* 23

ตารางที่ 2.4 ประสิทธิภาพการลิชชิ่งโลหะหนักใน CSTR และ CSTRWR..... 25

ตารางที่ 2.5 การสกัดทองแดงออกจากแร่โคเวลไลต์ และแร่คาลโคไพไรต์..... 25

ตารางที่ 2.6 ผลการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบทีละเท เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน..... 28

ตารางที่ 3.1 การทดลองการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยแบคทีเรียที่ผ่านการปรับสภาพ..... 39

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องวิเคราะห์ผล..... 41

ตารางที่ 3.3 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนิกเกิลในสารละลายด้วยการวัดค่า ความดูดกลืนแสงโดยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดเปลวไฟ..... 45

ตารางที่ 4.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นและปริมาณนิกเกิลในกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์..... 47

ตารางที่ 4.2 ปริมาณเชื้อ *T.ferrooxidans* ที่กระจายตัวอยู่ในกากตะกอน ที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์..... 71

ตารางที่ 4.3 ค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน โดยใช้กรดซัลฟิวริก ทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์..... 85

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน นิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้กรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย..... 86

ตารางที่ ผ-1 พีเอชของการเจือจางกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ด้วยน้ำกลั่น..... 99

ตารางที่ ผ-2 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดย สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นต่างๆ ในระบบขวดเขย่า 100

ตารางที่ ผ-3 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายที่เพาะเลี้ยง เชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า..... 101

ตารางที่ ผ-4 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพ เชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติม กากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 1 กรัมต่อลิตร..... 102

หน้า

ตารางที่ ผ-5 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 2 กรัมต่อลิตร..... 103

ตารางที่ ผ-6 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 3 กรัมต่อลิตร..... 104

ตารางที่ ผ-7 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 4 กรัมต่อลิตร..... 105

ตารางที่ ผ-8 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 5 กรัมต่อลิตร..... 106

ตารางที่ ผ-9 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 6 กรัมต่อลิตร..... 107

ตารางที่ ผ-10 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 7 กรัมต่อลิตร..... 108

ตารางที่ ผ-11 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 8 กรัมต่อลิตร..... 109

ตารางที่ ผ-12 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆในสารละลายของการปรับสภาพเชื้อ *T.ferrooxidans* และเชื้อ *T.thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า เมื่อเติมกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 9 กรัมต่อลิตร..... 110

ตารางที่ ผ-13 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยเชื้อ *T.ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ในระบบขวดเขย่า 111

ตารางที่ ผ-14 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยเชื้อ *T.thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ ในระบบขวดเขย่า 112

ตารางที่ ผ-15 ค่าพีเอชของสารละลายในกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยแบคทีเรีย... 113

หน้า

ตารางที่ ผ-16 ค่าโออาร์พี(mV.)ของสารละลายในกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยแบคทีเรีย..... 117
ตารางที่ ผ-17 ปริมาณโปรตีน(มิลลิกรัม/ลิตร)ในสารละลายจากการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยใช้แบคทีเรีย..... 119
ตารางที่ ผ-18 ปริมาณเหล็กเฟอร์รัส(มิลลิกรัม/ลิตร)ที่คงเหลืออยู่ในสารละลายจากการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยใช้แบคทีเรีย..... 123
ตารางที่ ผ-19 เปอร์เซนต์เหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลืออยู่ในสารละลายจากการลิชชิ่งนิกเกิลในคอลัมน์โดยใช้แบคทีเรีย..... 126
ตารางที่ ผ-20 ปริมาณนิกเกิล(มิลลิกรัม/ลิตร)ที่ถูกลิชชิ่งออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์..... 129
ตารางที่ ผ-21 การลิชชิ่งนิกเกิล(%)ออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์..... 133
ตารางที่ ผ-22 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเชื้อ *T. ferrooxidans* โดยการวัดปริมาณโปรตีนและการนับจำนวนเซลล์ที่เจริญบนอาหารแข็ง FeTSB..... 138
ตารางที่ ผ-23 ตัวอย่างการคำนวนหาปริมาณโปรตีนในสารละลาย..... 139
ตารางที่ ผ-24 ตัวอย่างการคำนวนหาปริมาณเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลืออยู่ในสารละลาย..... 140
ตารางที่ ผ-25 ตัวอย่างการคำนวนหาปริมาณนิกเกิลที่ถูกลิชชิ่งออกจากกากตะกอน..... 140
ตารางที่ ผ-26 ราคาสารเคมีที่ใช้คำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกและแบคทีเรีย..... 141
ตารางที่ ผ-27 การคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยกรดซัลฟิวริกทั้งในระบบขวดเขย่าและคอลัมน์..... 142
ตารางที่ ผ-28 การคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในระบบขวดเขย่า..... 143
ตารางที่ ผ-29 การคำนวนค่าใช้จ่ายสำหรับการลิชชิ่งนิกเกิลโดยแบคทีเรียในคอลัมน์..... 144
ตารางที่ ผ-30 ค่าใช้จ่ายสำหรับการใช้บริการศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ..... 145

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การออกซิไดส์เฟอร์รัสอิออนโดย *T. ferrooxidans*..... 7

รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการออกซิเดชั่นสารประกอบซัลเฟอร์โดยแบคทีเรียกลุ่ม Thiobacillus..... 9

รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชและค่าโออาร์พีในกระบวนการลิชชิ่งโดย
เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans*..... 17

รูปที่ 2.4 ผลจากความเข้มข้นของเหล็กเฟอร์รัสอิออนในการสกัดแร่ยูแรเนียมโดย
ใช้แบคทีเรียที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และ 5% pulp dunsity..... 19

รูปที่ 2.5 วัฏจักรซัลเฟอร์ในธรรมชาติ..... 20

รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของแมงกานีสที่สกัดได้เมื่อแปรค่าความเข้มข้นของซัลเฟอร์ต่างๆกัน... 21

รูปที่ 2.7 ความเข้มข้นของทองแดงที่ถูกสกัดเมื่อขนาดอนุภาคกากตะกอนต่างกัน..... 22

รูปที่ 2.8 ปริมาณ Fe^{2+} P_2O_5 และ SO_4^{2-} (กรัม/ลิตร) เมื่อ
Pyritiferrous : Phosphate rock เท่ากับ 1 : 1 26

รูปที่ 2.9 กราฟแสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการสกัดสังกะสีเมื่อเกิดปฏิกิริยาแบบ
Direct method และ Indirect method..... 27

รูปที่ 2.10 ปริมาณทองแดงที่ละลายออกมาเมื่อมีการเติม Xanthate floatation reagents..... 29

รูปที่ 2.11 ปริมาณเซลล์แบคทีเรียในการปรับปรุงสายพันธุ์..... 30

รูปที่ 3.1 กากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ขนาดเล็กกว่า 80 mesh
สำหรับการทดลองในระบบขวดเขย่า (ซ้าย) และขนาด
20-40 mesh สำหรับการทดลองในคอลัมน์(ขวา)..... 32

รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน
นิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยใช้กรดซัลฟิวริก..... 36

รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน
นิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยเชื้อแบคทีเรีย..... 40

รูปที่ 4.1 สารละลายจากกระบวนการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอน
นิกเกิลไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความ
เข้มข้นต่างๆกันในระบบขวดเขย่า..... 47

รูปที่ 4.2 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยสารละลาย
กรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นต่างๆกันในระบบขวดเขย่า..... 48

หน้า

รูปที่ 4.3 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 1 นอร์มัล..... 49

รูปที่ 4.4 วันที่ 1 ของการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า..... 52

รูปที่ 4.5 วันที่ 6 ของการเพาะเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และเชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า..... 52

รูปที่ 4.6 ค่าพีเอชของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า..... 53

รูปที่ 4.7 ค่าโออาร์พีของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า..... 53

รูปที่ 4.8 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T.ferrooxidans* และสารละลาย thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ในระบบขวดเขย่า..... 54

รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* เปรียบเทียบกับสารละลาย 9K medium ในระบบขวดเขย่า..... 54

รูปที่ 4.10 พีเอชของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 57

รูปที่ 4.11 ค่าโออาร์พีของสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 57

รูปที่ 4.12 เปอร์เซนต์เหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ผสม *T. ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 58

รูปที่ 4.13 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลาย 9K medium ผสม *T. ferrooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 58

หน้า

รูปที่ 4.14 พีเอชของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 60

รูปที่ 4.15 ค่าโออาร์พีของสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 60

รูปที่ 4.16 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยสารละลาย thiomedium ผสม *T. thiooxidans* ในขั้นตอนการปรับสภาพเชื้อแบคทีเรียให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในระบบขวดเขย่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนอย่างสม่ำเสมอ..... 61

รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพในระบบขวดเขย่า..... 62

รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพในระบบขวดเขย่า..... 62

รูปที่ 4.19 ค่าพีเอชของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า..... 64

รูปที่ 4.20 ค่าโออาร์พีของสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ในระบบขวดเขย่า..... 64

รูปที่ 4.21 ปริมาณโปรตีนในสารอาหาร 9K medium ที่เพาะเลี้ยง *T.ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ที่เพาะเลี้ยง *T. thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในระบบขวดเขย่า..... 65

รูปที่ 4.22 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ที่เพาะเลี้ยงเชื้อ *T.ferrooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพให้เคยชินกับกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium ในระบบขวดเขย่า..... 65

รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T.ferrooxidans* และ*T.thiooxidans* ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ.... 66

หน้า

รูปที่ 4.24 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้เชื้อแบคทีเรีย *T.ferrooxidans* และ*T. thiooxidans* ที่ผ่านการปรับสภาพ..... 68

รูปที่ 4.25 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์..... 70

รูปที่ 4.26 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์โดยเชื้อ *T.ferrooxidans*..... 70

รูปที่ 4.27 เชื้อ *T.ferrooxidans* ที่เจริญบนอาหารแข็ง FeTSB..... 71

รูปที่ 4.28 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่อัตราการไหลต่างๆ และสารอาหาร 9K medium ที่อัตราการไหล 5 มล./ตร.ซม./ชม..... 72

รูปที่ 4.29 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ปริมาณเชื้อเริ่มต้นต่างกัน..... 74

รูปที่ 4.30 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ปริมาณเหล็กเฟอร์รัสในสารอาหารต่างกัน..... 75

รูปที่ 4.31 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* และสารอาหาร 9K *medium* เมื่อปริมาณกากตะกอนในคอลัมน์ต่างกัน..... 77

รูปที่ 4.32 ปริมาณโปรตีนในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยทำการเปลี่ยนสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T.ferrooxidans* ทุก 30 วัน มาลิชชิ่งกากตะกอนในคอลัมน์เดิม..... 78

รูปที่ 4.33 เปอร์เซนต์ของเหล็กเฟอร์รัสที่คงเหลือในสารละลาย 9K medium ผสมเชื้อแบคทีเรีย *T. ferrooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 30 วัน มาลิชชิ่งกากตะกอนในคอลัมน์เดิม..... 78

หน้า

รูปที่ 4.34 การลิชชิ่งนิกเกิลโดยเปลี่ยนสารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* มาลิชชิ่งกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ 500 กรัม ในคอลัมน์เดิม ทุก 30 วัน ที่อัตราการไหล 20 มล./ตร.ซม./ชม. ใช้ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 10%(v/v) และปริมาณเหล็กเฟอร์รัส 4 กรัม/ลิตร..... 79

รูปที่ 4.35 ปริมาณโปรตีนในสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* ที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ผสมและไม่ผสมซัลเฟอร์ ในกระบวนการลิชชิ่งในคอลัมน์..... 81

รูปที่ 4.36 ผลการลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ผสมและไม่ผสมซัลเฟอร์ในคอลัมน์ โดยสารละลาย thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารละลาย thiomedium..... 81

รูปที่ 4.37 ปริมาณโปรตีนในสารละลายที่ไหลผ่านกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ในคอลัมน์โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* 83

รูปที่ 4.38 การลิชชิ่งนิกเกิลออกจากกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ในคอลัมน์ โดยใช้สารอาหาร 9K medium ผสมเชื้อ *T. ferrooxidans* และสารอาหาร thiomedium ผสมเชื้อ *T. thiooxidans* เปรียบเทียบกับสารอาหาร 9K medium และสารอาหาร thiomedium ตามลำดับ..... 83

รูปที่ ผ-1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเจือจางกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์โดยน้ำกลั่นและพีเอช..... 99

รูปที่ ผ-2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในกากตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่ผ่านกระบวนการลิชชิ่งโดยเชื้อ *T. ferrooxidans* ในคอลัมน์ ด้วยวิธี X-Ray Diffraction..... 137

รูปที่ ผ-3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโปรตีน (มิลลิกรัม/ลิตร) และจำนวนเซลล์แบคทีเรีย *T. ferrooxidans* (เซลล์/มิลลิลิตร)..... 138