

การกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก



นายสมบุญ ประถมศรีเมฆ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0125-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14 ส.ค. 2547

I 19841206

REMOVAL OF NICKEL FROM SYNTHETIC WASTEWATER
USING AN IRON-WASTE COLUMN

Mr. Somboon Pratomsrimake

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2000


ISBN 974-13-0125-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก
โดย นายสมบูรณ์ ประถมศรีเมฆ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล

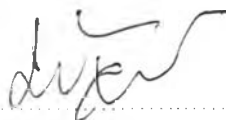
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

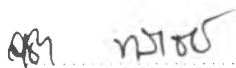
 คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุร ชวเรียร)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน)

 กรรมการ
(ดร. สุรา ชวเรียร)

สมบุญ ประถมศรีเมฆ : การกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก
(Removal of Nickel from Synthetic Wastewater Using an Iron-Waste Column)

อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ; 128 หน้า. ISBN 974-13-0125-1

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้คอลัมน์เศษเหล็ก โดยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือการศึกษาโดยใช้คอลัมน์แบบต่อเนื่องและการศึกษาโดยใช้การทดลองแบบแบตช์ การทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่องใช้ในการศึกษาผลของความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็ก และ ผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล ส่วนการทดลองแบบแบตช์ ใช้ในการศึกษาผลของพีเอช ผลของออกซิเจนละลาย ผลของอิออนประจุลบโดยใช้อิออนของซัลเฟตและคลอไรด์ในการทดลอง และ ผลของอิออนประจุบวกโดยใช้อิออนของสังกะสีและทองแดงในการทดลอง

จากการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า การเปลี่ยนแปลงความสูงชั้นตัวกลางเศษเหล็กมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล โดยเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นตัวกลางจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้น แต่ถ้าคอลัมน์มีความสูงของชั้นตัวกลางมากเกินไปอาจเกิดปัญหาการอุดตันในระบบได้ง่าย ในส่วนผลของอัตราไหลพบว่า การเพิ่มอัตราไหลมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลลดลง โดยที่อัตราการป้อนนิกเกิลความเข้มข้นเฉลี่ยเข้าสู่ระบบที่ 11.14 มก./ล. จะได้นิกเกิลความเข้มข้นเฉลี่ยออกจากระบบที่ 0.30, 0.77, 1.90 และ 2.94 มก./ล./วัน หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดได้เท่ากับ 97.3%, 93.1%, 82.9% และ 73.6% ที่อัตราไหล 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 BV/Hr ตามลำดับ ภายใต้การทดลองทั้งสิ้น 91 วัน

จากการทดลองแบบแบตช์พบว่า พีเอชเป็นตัวแปรที่มีบทบาทอย่างสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล โดยความสามารถในการกำจัดจะแปรเปลี่ยนอย่างรวดเร็วในช่วงพีเอชแคบๆ จากประสิทธิภาพการกำจัดที่น้อยกว่า 10% ที่พีเอชต่ำกว่า 4 ไปเป็นมากกว่า 90% ที่พีเอชมากกว่า 8 ส่วนปริมาณออกซิเจนละลายก็มีผลต่ออัตราการกำจัดนิกเกิลเช่นกัน โดยอัตราการกำจัดจะแปรผันตรงต่อปริมาณออกซิเจนละลาย ในสภาวะที่มีการเติมอากาศที่มีค่าออกซิเจนละลายเข้าใกล้จุดอิ่มตัวจะมีอัตราการกำจัดที่ดีที่สุด ในส่วนผลของอิออนประจุลบ คือ ซัลเฟตอิออนและคลอไรด์อิออนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และสุดท้ายได้แก่ ผลของอิออนประจุบวก คือ อิออนของทองแดงและสังกะสีแทบจะไม่มีผลอย่างไรต่อการกำจัดนิกเกิล คาดว่ากลไกในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็กในการทดลองนี้คือการดูดติดผิว

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมลายมือชื่อนิติศ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2543ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070449821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

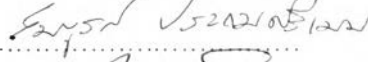
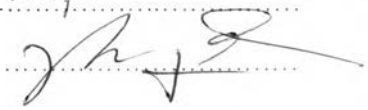
KEY WORD: ADSORPTION / IRON-WASTE / NICKEL

SOMBOON PRATOMSRIMAKE : REMOVAL OF NICKEL FROM SYNTHETIC
WASTEWATER USING AN IRON-WASTE COLUMN : ASSIST.PROF.CHAVALIT
RATANATAMSKUL. Ph.D. 128 pp. ISBN 974-13-0125-1

This research investigated the removal of nickel from synthetic wastewater using an Iron-Waste column. The experiment was divided into two parts. The first one was continuous column experiment and the others was batch experiment. The continuous column was used to study effect of Iron-Waste height and effect of flow to removal efficiency. The batch experiment was used to study effect of pH, dissolve oxygen, anion which was used sulfate and chloride ions to study and cation which was used zinc and copper ions to study

For continuous column, it was found that the height of Iron-Waste had related to nickel removal efficiency. When the height was increased the removal efficiency would be increased too but if the height was too high it would have clogging problem very easily. For the effect of flow, it was found that the increasing of flow was reduced removal efficiency. When the nickel was added to the system with concentration of 11.14 mg/l, the average effluent concentration was 0.30, 0.77, 1.90 and 2.94 mg/l or be calculated in percentage was 97.3%, 93.1%, 82.9% and 73.6% at the flow of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 BV/Hr respectively for 91 days operation.

For batch experiment, it was found that pH was the very important parameter to removal efficiency. The efficiency was varied rapidly in narrow pH range. It was changed from less than 10% at pH below 4 to be more than 90% at pH over 8. For dissolve oxygen it was also effected to the removal efficiency by the removal rate was depend on concentration of dissolve oxygen. In the aerated status, when dissolve oxygen concentration was nearly to saturated point it would be the highest removal rate in this experiment. For the effected of anion, sulfate and chloride ions was increased the efficiency a little bit. And the last one for the cation, zinc and copper was almost no effect with the efficiency. From the experiment, the mechanism to remove nickel may be adsorption.

Department Environmental Engineering Student's signature 
Field of study Environmental Engineering Advisor's signature 
Academic year 2000 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างสูงสำหรับอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ สุรี ชาวเธียร อาจารย์ บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์ และดร.สุธา ชาวเธียร ที่ตรวจสอบ และให้คำแนะนำที่ดีซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ ให้ความอนุเคราะห์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ทางวิชาการต่างๆ สู่วิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพนิชที่ให้ทุนอุดหนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเครื่องมือ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณกาญจนา วรญา เบกพล ปรีชาวิทย์ อภิรดี ธนินทร์ อนุตร สุวิทย์ พิศณุพล และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือเป็นกำลังใจรวมทั้งคอยผลักดัน ซึ่งมีส่วนอย่างมากที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ และน้อง ๆ ทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน จนผู้วิจัยสามารถผ่านพ้นอุปสรรคต่าง ๆ ได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและแนวความคิด	3
2.1 เคมีของนิกเกิล	3
2.2 การดูดติดผิว	6
2.3 ทฤษฎีออกไซด์ของโลหะไฮดรอล	13
2.3.1 บทนำ	13
2.3.2 รูปแบบของหมู่ไฮดรอกซิล ที่ผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำ	14
2.3.3 ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์	14
2.3.4 คุณสมบัติของไฮดรอลเฟอริกออกไซด์	16
2.3.4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ	16
2.3.4.2 พื้นผิวของไฮดรอลเฟอริกออกไซด์	17
2.3.5 ความสามารถในการละลายของเหล็ก	19
2.3.6 การดูดติดผิวของอิออนที่ผิวสัมผัสของโลหะไฮดรอลออกไซด์ ในน้ำ	20
2.3.6.1 การดูดติดผิวของประจุบวก	21
2.3.7 Surface Complexation Model	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 การชุบโลหะและผลกระทบของโลหะหนักในน้ำเสีย.....	27
2.4.1 หลักการเบื้องต้นของการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	27
2.4.2 ขั้นตอนในการชุบโลหะ.....	28
2.4.3 การชุบนิกเกิล.....	29
2.4.4 ผลกระทบของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	30
2.5 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่ใช้กันในปัจจุบัน.....	31
2.5.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ.....	31
2.5.2 ตัวอย่างกระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีตกผลึก.....	33
2.6 สารละลายบัฟเฟอร์.....	34
2.6.1 ทฤษฎี.....	34
2.6.2 ตัวอย่างการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์.....	36
2.7 ผลงานวิจัยที่ผ่านมา.....	38
บทที่ 3 แผนงานและการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1 แผนการทดลอง.....	41
3.2 การเตรียมการทดลอง.....	42
3.2.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	42
3.2.2 การเตรียมตัวกลางเศษเหล็ก.....	42
3.3 วิธีการทดลอง.....	44
3.3.1 การทดลองโดยใช้คอลัมน์แบบต่อเนื่อง.....	44
3.3.1.1 ผลของความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพ การกำจัดนิกเกิล.....	45
3.3.1.2 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่อัตราไหลต่างๆ.....	47
3.3.2 การทดลองแบบแบตช์.....	49
3.3.2.1 Adsorption Isotherm ของปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและ เศษเหล็ก.....	50
3.3.2.2 ศึกษาลักษณะของเศษเหล็กก่อนและหลังการทำปฏิกิริยากับ นิกเกิลด้วยเครื่อง x-ray diffraction.....	51

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.2.3 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	52
3.3.2.4 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	54
3.3.2.5 ผลของประจุลบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	56
3.3.2.6 ผลของประจุบวกที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	58
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	60
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์	61
4.1 การดำเนินการทดลอง.....	61
4.1.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	61
4.1.2 การเตรียมตัวกลางเศษเหล็ก.....	61
4.1.3 ระยะเวลาการทำวิจัย.....	62
4.2 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบคอลัมน์ต่อเนื่อง.....	63
4.2.1 ผลของความสูงชันตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	63
4.2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่อัตราไหลต่างๆ.....	68
4.3 ผลการทดลองและการวิจารณ์การทดลองแบบแบตช์.....	77
4.3.1 Adsorption Isotherm ของปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและเศษเหล็ก.....	77
4.3.2 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กก่อนและหลังการทำปฏิกิริยากับ นิกเกิลด้วยเครื่อง x-ray diffraction.....	79
4.3.3 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	81
4.3.4 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	85
4.3.5 ผลของประจุลบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	88
4.3.6 ผลของประจุบวกที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	90
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง	97
ภาคผนวก	99

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก กำหนดคุณสมบัติน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	100
ภาคผนวก ข ลักษณะน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 80 โรงงาน ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (พ.ศ.2537-2541).....	102
ภาคผนวก ค ผลของความสูงชั้นตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	108
ภาคผนวก ง ผลของการกำจัดนิกเกิลที่อัตราไหลต่างๆ.....	111
ภาคผนวก จ ผลของ Adsorption Isotherm ของปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและ เศษเหล็ก.....	114
ภาคผนวก ฉ ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	117
ภาคผนวก ช ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	119
ภาคผนวก ซ ผลของประจุลบที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	121
ภาคผนวก ฌ ผลของประจุบวกที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	123
ภาคผนวก ฎ สารละลายบัฟเฟอร์.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	128

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์.....	16
2.2 ขนาดพื้นที่ผิวจำเพาะของไฮดรอกไซด์.....	18
2.3 สมการสมดุลการดูดติดผิวของ Surface Complex.....	26
4.1 ระยะเวลาการทำวิจัย.....	62
4.2 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1.....	64
4.3 สมดุลมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็กจากการทดลอง.....	67
4.4 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2.....	70
4.5 อัตราการกำจัดนิกเกิล (มก./ล./วัน) จากการทดลอง.....	74
4.6 ความสามารถในการกำจัดนิกเกิล (มก./ก./วัน) จากการทดลอง.....	74
4.7 สมดุลมวลของการกำจัดนิกเกิลโดยเศษเหล็กจากการทดลอง.....	76
4.8 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1.....	77
4.9 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.2.....	79
4.10 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.3.....	83
4.11 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.4.....	85
4.12 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.5.....	88
4.13 สรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆ จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.6.....	90

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกระจายของสารประกอบนิกเกิล.....	5
2.2 การดูดติดผิวของก๊าซบนถ่าน(Charcoal)ที่อุณหภูมิคงที่.....	7
2.3 การดูดติดผิวของสารละลายบนถ่าน (Charcoal) ที่อุณหภูมิและความดันคงที่.....	8
2.4 การเขียนกราฟแบบลอกการทิมของการดูดติดผิวของสารละลาย บนถ่าน (Charcoal) ที่อุณหภูมิและความดันคงที่.....	9
2.5 กราฟเส้นตรงที่แสดงรูปแบบของ Langmuir isotherm	10
2.6 กราฟที่แสดงรูปแบบของ BET isotherm.....	11
2.7 รูปตัดพื้นผิวออกไซด์โลหะ : อีออนโลหะ ● ; อีออนออกไซด์○	13
2.8 รูปแบบที่แตกต่างกันของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวไฮดรอกไซด์.....	15
2.9 แบบของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว Geothite(α -FeOOH) และ การดูดติดผิวของฟอสเฟตกับแบบA ที่พื้นผิว Geothite	15
2.10 pH และ Eh ของขอบเขตการคงตัวของเหล็ก.....	20
2.11 ผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวโลหะประจุบวกโดยวัสดุหลายชนิด.....	22
2.12 ผลของพีเอชและความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรท.....	23
2.13 รูปจินตนาการที่ชี้ให้เห็นถึงการลดลงของศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบกับระยะทางที่ห่างจาก พื้นผิวใน triple layer model	24
2.14 Surface complex ของอีออนบนพื้นผิวไฮดรอกไซด์และ แบบจำลองพื้นผิวไฮดรอกไซด์แสดงรูปแบบการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ที่พื้นผิว inner-sphere complexes, outer-sphere complex, และ diffuse layer.....	25
2.15 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	27
2.16 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย.....	28
2.17 ระบบกำจัดโลหะหนักออกจากรน้ำเสียด้วยวิธีการตกผลึก.....	33
3.1 เศษเหล็กที่ได้จากโรงกลึง.....	42
3.2 เศษเหล็กที่ถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ.....	43
3.3 เศษเหล็กที่อยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์.....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของความสูงชันตัวกลาง ที่มีต่อการกำจัดนิกเกิล.....	46
3.5 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล ที่อัตราการไหลต่างๆ.....	48
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลความสูงชันตัวกลางที่มีต่อประสิทธิภาพ การกำจัดนิกเกิล.....	63
4.2 ผลของความสูงชันตัวกลางเศษเหล็กที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	65
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงชันเหล็กกับอัตราการกำจัดนิกเกิล.....	66
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงชันเศษเหล็ก และความสามารถในการกำจัดนิกเกิล.....	67
4.5 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	69
4.6 ผลของอัตราไหล 0.5 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	71
4.7 ผลของอัตราไหล 1.0 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	71
4.8 ผลของอัตราไหล 1.5 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	72
4.9 ผลของอัตราไหล 2.0 BV ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	72
4.10 เปรียบเทียบผลของอัตราไหลของ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 BV	73
4.11 ล็อกการิทึม ของ Freundlich Isotherm สำหรับการดูดติดผิวนิกเกิลโดยเศษเหล็ก ที่เวลา 24 ชั่วโมง.....	78
4.12 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กก่อนการทำปฏิกิริยากับนิกเกิลด้วยเครื่อง x-ray diffraction.....	80
4.13 การตรวจสอบลักษณะของเศษเหล็กหลังการทำปฏิกิริยากับนิกเกิลด้วยเครื่อง x-ray diffraction.....	80
4.14 เวลาสมดุลของการทำปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลและเศษเหล็ก.....	82
4.15 ผลความเข้มข้นของนิกเกิลที่ พีเอชต่างๆ โดยไม่มีการเติมเศษเหล็ก.....	83
4.16 ผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เศษเหล็ก.....	83
4.17 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	86
4.18 ผลของออกซิเจนละลายที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในรูปแบบ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง.....	87
4.19 ผลของซัลเฟตไอออน ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	89

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ผลของคลอไรด์อิออนที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	89
4.21 ผลของอิออนทองแดงที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	91
4.22 ผลของอิออนสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	91
4.23 ผลของอิออนทองแดงและสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล.....	92
4.24 ผลของอิออนนิกเกิลและสังกะสีที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง.....	92
4.25 ผลของอิออนนิกเกิลและทองแดงที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี.....	93