สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ฎ
บทที่
1 บทนำ..... 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... 5
1.3 ขอบเขตการวิจัย..... 5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 วิธีการสกัดโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากขยะแม่เหล็ก NdFeB โดยใช้กระบวนการสกัดโลหะทางความร้อน (Pyrometallurgical Process)..... 6
2.2 วิธีการสกัดโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากขยะแม่เหล็ก NdFeB โดยใช้กระบวนการสกัดโดยการใช้สารละลาย (Hydrometallurgical Process)..... 8
2.3 วิธีการสกัดโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากขยะแม่เหล็ก NdFeB โดยใช้กระบวนการสกัดโลหะทางไฟฟ้า (Electrometallurgical Process)..... 15
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 19
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย..... 19
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 19
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... 19
3.1.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย..... 21
3.2 เตรียมตัวอย่างแม่เหล็กนีโอดีเมียม..... 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.1 อบแม่เหล็กด้วยความร้อนเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก (Demagnetization)..... 23
3.2.2 บดเพื่อลดขนาดของแม่เหล็ก (Crushing)..... 23
3.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนผสมทางเคมีของแม่เหล็ก..... 23
3.3 สกัดโลหะนีโอดีเมียมจากซากแม่เหล็กนีโอดีเมียมด้วยการใช้สารละลาย... 24
3.3.1 ชะละลายแม่เหล็ก (Leaching)..... 24
3.3.2 ตกตะกอนของแข็ง (Precipitation)..... 25
3.3.3 การทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น..... 26
3.3.4 การทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตไปอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์..... 27
3.4 สกัดโลหะนีโอดีเมียมจากซากแม่เหล็กนีโอดีเมียมด้วยการใช้ความร้อน..... 28
3.5 การทดลองสกัดโลหะนีโอดีเมียมและทำให้สารชะละลายมีความบริสุทธิ์ขึ้นด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี..... 29
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล 31
4.1 ผลการเตรียมตัวอย่างแม่เหล็กนีโอดีเมียม การชะละลาย และการตกตะกอนของแข็ง..... 31
4.1.1 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและส่วนประกอบทางเคมีของแม่เหล็ก..... 31
4.1.2 การอบทางความร้อนเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก (Demagnitization) 34
4.1.3 บดเพื่อลดขนาดของแม่เหล็ก (Crushing)..... 34
4.1.4 การชะละลายแม่เหล็ก (Leaching)..... 36
4.1.5 การตกตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซัลเฟต (Nd-sulfate precipitation)..... 39
4.2 ผลการทดลองเผาตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ (Direct calcination)..... 46
4.3 ผลการทดลองเปลี่ยนตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ก่อนทำการเผาเพื่อให้อยู่ในรูป ของนีโอดีเมียมออกไซด์..... 49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการทดลองกำจัดเหล็กออกจากตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตก่อนทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์และเผาเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์..... 55

4.5 ผลการทดลองศึกษาการสกัดนีโอดีเมียมและโลหะหายากและการทำให้สารชะละลายมีความบริสุทธิ์ขึ้นด้วยกระบวนการทางไฟฟ้า..... 62

4.5.1 การทดลองอิเล็กโตรวินนิ่งโดยใช้ความต่างศักย์เซลล์ 3 โวลต์..... 63

4.5.2 การทดลองอิเล็กโตรวินนิ่งโดยใช้ความต่างศักย์เซลล์ 4 โวลต์..... 65

4.5.3 การทดลองอิเล็กโตรวินนิ่งโดยใช้ความต่างศักย์เซลล์ 6 โวลต์..... 67

5 สรุปผลการทดลอง 71

รายการอ้างอิง..... 74

ภาคผนวก..... 75

ประวัติผู้เขียน..... 81

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 เปรียบเทียบสมบัติทางด้านแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรแต่ละประเภท..... 2
1.2 ส่วนผสมทางเคมีของขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง..... 3
2.1 ผลของเวลาและอุณภูมิต่อสภาพความเป็นแม่เหล็ก..... 11
2.2 ผลของชนิดตัวทำละลายที่มีต่อปริมาณเปอร์เซนต์การละลายของนีโอดีเมียม เหล็ก และโบรอน..... 11
2.3 ผลของความเข้มข้นของกรดต่อเปอร์เซนต์การละลายของนีโอดีเมียม เหล็ก และโบรอน..... 11
2.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง ICP และ XRF ของตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก 2 M (S/L ratio 1:10) ที่ค่า pH ต่างกัน..... 14
2.5 ข้อมูลสรุปเงื่อนไขการรีไซเคิลด้วยกระบวนการโลหวิทยาสารละลายโดยสังเขป..... 15
2.6 ข้อมูลสรุปกระบวนการที่ใช้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงด้วยวิธีการต่างๆ..... 18
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแม่เหล็กนีโอดีเมียมที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค (WD-XRF)..... 34
4.2 ความเข้มข้นของนีโอดีเมียมและเหล็กในสารชะละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร 2 โมลต่อลิตร และ 3 โมลต่อลิตรที่อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว (S/L ratio) เท่ากับ 1 g/ 50 mL, 2 g/ 50 mL, 3 g/ 50 mL, 4 g/ 50 mL และ 5 g/ 50 mL..... 37
4.3 ปริมาณแม่เหล็กที่ละลายลงในสารชะละลายและปริมาณตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายจากการละลายแม่เหล็กด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว (S/L ratio) เท่ากับ 100 g/L..... 39
4.4 ความเข้มข้นของโลหะที่เป็นองค์ประกอบในสารชะละลายที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ICP-OES..... 39
4.5 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค WD-XRF..... 39
4.6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH ต่างๆ ด้วยเทคนิค WD-XRF..... 40
4.7 แสดงความเข้มข้นของธาตุที่อยู่ในสารชะละลายเริ่มต้น และสารชะละลายภายหลังการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 pH 3 และ pH 8 ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ICP-OES..... 42

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.8 ความเข้มข้นของปริมาณธาตุก่อนและหลังการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค ICP-OES..... 44

4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งจากการตกตะกอนที่ pH 0.6 (NdpH 0.6) ด้วยเทคนิค WD-XRF..... 45

4.10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณและรูปแบบของสารประกอบที่ได้จากการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 (NdpH0.6) ด้วยเทคนิค XRD..... 45

4.11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS ของตะกอนของแข็งที่ได้จากการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 ที่ตำแหน่งต่างๆ..... 46

4.12 ผลองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่ผ่านการเผาโดยตรงเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ (NdpH0.6-Oxide) ด้วยเทคนิค WD-XRF..... 51

4.13 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟต (NdpH0.6) ที่ผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-R) และการเผาเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-R-oxide) ด้วยเทคนิค WD-XRF..... 50

4.14 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเริ่มต้น (NdpH0.6) ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหลว(NdpH0.6-L) ผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-LR) และการเผาเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียม-ออกไซด์(NdpH0.6-LR-oxide) ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค WD-XRF..... 56

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 สัดส่วนการใช้งานโลหะนีโอดีเมียมในด้านต่างๆ..... 1
1.2 สัดส่วนการใช้งานแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีนีโอดีเมียมเป็นองค์ประกอบ..... 2
1.3 การคาดการณ์แนวโน้มความต้องการใช้งานโลหะหายากสำหรับผลิตเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงและการใช้งานในด้านอื่น..... 3
1.4 ข้อมูลการนำเข้าโลหะหายากของประเทศสหรัฐอเมริกาและแหล่งแร่สำรองของแต่ละประเทศที่ส่งออกโลหะหายาก..... 4
2.1 แผนภูมิเฟสในระบบ Fe-Nd-O ที่อุณหภูมิ 1077 °C (b) Ellingham diagram ของระบบ Fe-Nd-O ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 2000 °C..... 7
2.2 ภาพแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย SEM/EDX ของแม่เหล็กที่ผ่านการออกซิไดซ์..... 7
2.3 ขั้นตอนการรีไซเคิลแม่เหล็ก NdFeB..... 9
2.4 แสดงเปอร์เซนต์การตกตะกอนของนีโอดีเมียมและเหล็กที่ค่า pH ต่างๆ..... 10
2.5 ผลของค่า pH ต่อเปอร์เซนต์การตกตะกอนของโลหะจากสารชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก..... 12
2.6 ผลของค่า pH ต่อเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนของโลหะจากสารชะละลายด้วยกรดไฮโดร-คลอริก..... 13
2.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการชะละลายของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ที่ความเข้มข้นต่างกัน..... 14
2.8 กระบวนการสกัดโลหะทางไฟฟ้าที่ใช้ในการรีไซเคิลโลหะหายาก..... 17
3.1 แผนภูมิ ขั้นตอนการทดลองและดำเนินการวิจัย..... 22
3.2 ขั้นตอนการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก..... 23
3.3 ขั้นตอนการชะละลายแม่เหล็กด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก..... 24
3.4 ขั้นตอนการกรองแยกตะกอนของแข็งที่ไม่ละลาย (Residual) และชั้นเคลือบโลหะนิกเกิลออกจากสารชะละลาย (Leaching Solution)..... 25
3.5 การตกตะกอนของแข็งจากสารชะละลายที่ค่า pH ต่างๆ (a) pH 0.6, (b) pH 3 และ (c) pH 8..... 26
3.6 ตัวอย่างการกรองแยกตะกอนนีโอดีเมียมออกจากสารชะละลาย..... 26
3.7 การทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมมีความบริสุทธิ์ขึ้น..... 27
3.8 ขั้นตอนการทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตไปอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์โดยการล้างตะกอนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์..... 27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.9 ขั้นตอนการเผาตะกอนของแข็ง a, b วางเบ้าเซรามิกในเตาเผา c, d ติดตั้งชุดเทอร์โมคัปเปิล..... 29
3.10 เซลล์อิเล็กโตรวินนิ่ง..... 30
3.11 ชั่งน้ำหนักแผ่นแคโทด แอโนด และตะตกอนที่เกิดขึ้นในระบบหลังกระบวนการอิเล็กโตรวินนิ่ง..... 30
4.1 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแม่เหล็ก a. ชั้นเคลือบนิกเกิลกับโครงสร้างพื้นของแม่เหล็ก b. บริเวณโครงสร้างพื้นของแม่เหล็ก (OM)..... 33
4.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแม่เหล็ก a. ชั้นเคลือบนิกเกิลกับโครงสร้างพื้นของแม่เหล็ก b. บริเวณโครงสร้างพื้นของแม่เหล็ก (SEM)..... 33
4.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมของโครงสร้างแม่เหล็กด้วยเทคนิค SEM-EDS..... 33
4.4 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของชิ้นงานแม่เหล็กนีโอดีเมียม..... 34
4.5 ผลการอบสลายความเป็นแม่เหล็กของชิ้นงานแม่เหล็กนีโอดีเมียม..... 35
4.6 แม่เหล็กที่ไม่สามารถชะละลายได้หมดก่อนที่จะทำการบดเพื่อลดขนาด..... 36
4.7 แสดงการบดย่อยเพื่อลดขนาดแม่เหล็กและทำลายชั้นเคลือบนิกเกิล..... 36
4.8 ปริมาณความเข้มข้นของนีโอดีเมียมที่ละลายอยู่ในสารชะละลายกรดซัลฟิวริก..... 37
4.9 ปริมาณความเข้มข้นของเหล็กที่ละลายอยู่ในสารชะละลายกรดซัลฟิวริก..... 38
4.10 การตกตะกอนของแข็งด้วยการปรับค่า pH ด้วยสารละลายด้วย NaOH 1 M ที่ค่า pH ต่างๆ a. pH 0.6 b. pH 3 และ c. pH 8..... 40
4.11 กราฟเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนที่ค่า pH 0.6, pH 3 และ pH 8..... 41
4.12 กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของนีโอดีเมียมและเหล็กในตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 pH 3 และ pH 8..... 41
4.13 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของธาตุที่อยู่ในสารชะละลายเริ่มต้นและสาระชะละลายภายหลังการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 pH 3 และ pH 8..... 43
4.14 กราฟเปรียบเทียบความเข้มข้นของของนีโอดีเมียมและเหล็ก ที่คงเหลือในสารชะละลายภายหลังการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 pH 3 และ pH 8..... 43
4.15 การตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 และลักษณะตะกอนที่ได้ a. การตกตะกอนของแข็งโดยการปรับค่า pH ด้วยสารละลาย NaOH 1 M b. และ c. ลักษณะตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนแยกตัวออกจากสารชะละลาย..... 44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.16 ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของตัวอย่างตะกอนของแข็งจากการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 เทียบกับสารมาตรฐาน Sodium Neodymium Bis (Sulfate(VI)) Hydrate (NaNd(SO4)2 (H2O)) และ Szomolnokite (FeSO4 (H2O))..... 45

4.17 ลักษณะรูปร่างตะกอนของแข็งที่ได้จากการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM- EDS..... 46

4.18 ข้อมูลเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตก่อนเผาและตะกอนที่ผ่านการเผาโดยตรง (NdpH0.6-Oxide)..... 48

4.19 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการเผาโดยตรงเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ (NdpH0.6-Oxide) เทียบกับสารมาตรฐาน $Na2(SO_4)O_2$, $NdFeO_3$ และ $Na2(SO_4)$..... 48

4.20 ผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนที่ผ่านการเผาโดยตรง (NdpH0.6-Oxide) ด้วยเทคนิค XRD..... 49

4.21 ลักษณะรูปร่างตะกอนของแข็งที่ผ่านการเผาโดยตรง (NdpH0.6-Oxide) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 49

4.22 ข้อมูลเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟต (NdpH0.6) ที่ผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-R) และการเผาเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-R-oxide)..... 51

4.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยด่างเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-R) เทียบกับสารมาตรฐานNeodymium Hydroxide $Nd(OH)_3$ และ Praseodymium Hydroxide $Pr(OH)_3$..... 52

4.24 ผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยด่างเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-R) ด้วยเทคนิค XRD..... 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.25 ลักษณะรูปร่างตะกอนของแข็งที่ผ่านการล้างด้วยด่างเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-R) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 53

4.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างตะกอนที่ผ่านการเผา (NdpH0.6-R-Oxide) เทียบกับสารมาตรฐาน REE2O3, REE2 (OH)3 และ $NdFeO_3$..... 54

4.27 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และผ่านการเผาเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ (NdpH0.6-R-Oxide) กับ ตะกอนที่ผ่านการเผาโดยตรง (Direct calcination, NdpH0.6 -Oxide) ด้วยเทคนิค XRD..... 54

4.28 ลักษณะรูปร่างตะกอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และผ่านการเผาเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ (NdpH0.6-R-Oxide) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 55

4.29 ข้อมูลเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเริ่มต้น (NdpH0.6) ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) ผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-LR) และการเผาเพื่อให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-LR-oxide) ที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค WD-XRF..... 56

4.30 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) เทียบกับสารมาตรฐาน Sodium Neodymium Bis(Sulfate (VI)) Hydrate (NaNd(SO4)2 (H2O))..... 57

4.31 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเริ่มต้น (NdpH0.6) ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) ด้วยเทคนิค XRD..... 57

4.32 ลักษณะรูปร่างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 58

4.33 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวอย่างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) และผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-LR) เทียบกับสารมาตรฐาน Neodymium Hydroxide Nd(OH)3 และ Praseodymium Hydroxide $Nd(OH)_3$..... 59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.34 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเริ่มต้น (NdpH0.6) ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็ก (NdpH0.6-L) และผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-LR) ด้วยเทคนิค XRD..... 59

4.35 ลักษณะรูปร่างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กและผ่านขั้นตอนการทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (NdpH0.6-LR) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 60

4.36 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กรวมถึงทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ และเผาให้อยู่รูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-LR-Oxide)..... 61

4.37 ผลการวิเคราะห์รูปแบบและปริมาณของสารประกอบของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กรวมถึงทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์และเผาให้อยู่รูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-LR-Oxide) ด้วยเทคนิค XRD..... 61

4.38 ลักษณะรูปร่างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กรวมถึงทำให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ และเผาให้อยู่รูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ (NdpH0.6-LR-Oxide) ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 62

4.39 เปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของสารชะละลายเริ่มต้นที่ใช้เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังอิเล็กโตรวินิ่ง 3 โวลต์ 4 โวลต์ และ 6 โวลต์ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES..... 63

4.40 การทดลองอิเล็กโตรวินิ่งที่ความต่างศักย์ 3 โวลต์ a. สารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังการทดลอง b. แผ่นแคโทดหลังการทดลอง c. แผ่นแอโนดหลังการทดลอง..... 64

4.41 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินิ่งที่ความต่างศักย์ 3 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 64

4.42 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินิ่งที่ความต่างศักย์ 3 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.43 การทดลองอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ a. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ หลังการทดลอง b. แผ่นแคโทดหลังการทดลอง c. แผ่นแอโนดหลังการทดลอง..... 66

4.44 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 66

4.45 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 4 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 67

4.46 การทดลองอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ a. สารละลายอิเล็กโทรไลต์หลังการทดลอง b. แผ่นแคโทดหลังการทดลอง c. แผ่นแอโนดหลังการทดลอง d. ตะกอนที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลอง..... 69

4.47 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)..... 69

4.48 ลักษณะรูปร่างอนุภาคที่เกาะแผ่นแคโทดภายหลังอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 70

4.49 ลักษณะรูปร่างของตะกอนที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กโตรวินนิ่งที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย SEM-EDS..... 71