



## รายงานการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบ  
ของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอนจากขยะอิเล็กทรอนิกส์  
(Feasibility study on recycling of Nd-Fe-B high power magnetic  
materials from electronics waste)



ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบ  
ของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอนจากขยะอิเล็กทรอนิกส์  
(Feasibility study on recycling of Nd-Fe-B high power magnetic  
materials from electronics waste)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัญญา บัวสมบุรา

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

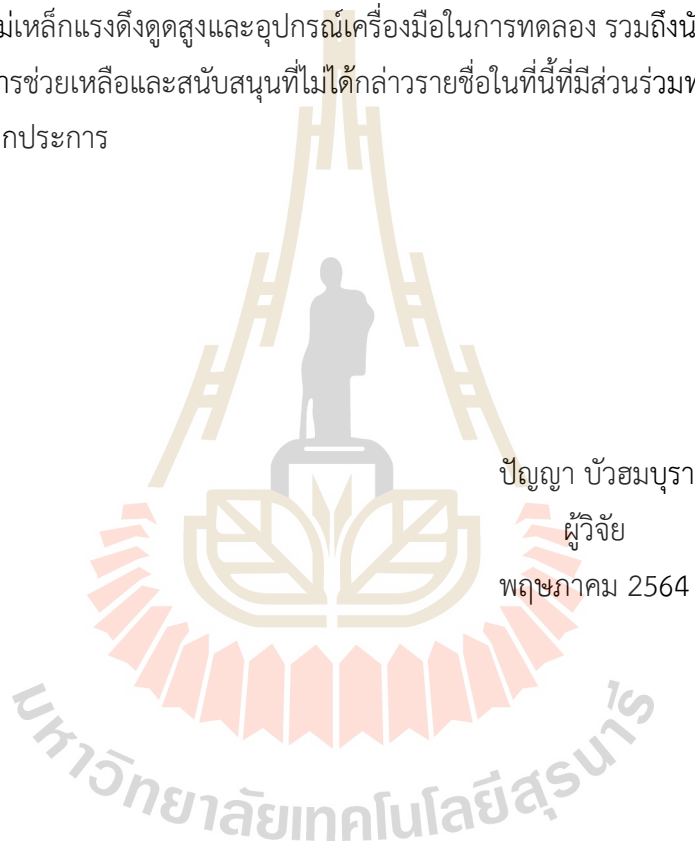
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 จากการสนับสนุนดังกล่าวนี้ ได้ทำให้ผู้วิจัยมีโอกาสได้ศึกษาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน จากขยะที่เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD) เพื่อทำการสกัดเอาโลหะหายาก (Rare Earth Metals, REMs) ออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อที่จะนำกลับไปใช้ใหม่ เพิ่มมูลค่า และทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดกับขยะหรือของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนให้ทุนวิจัย ผศ.ดร.สงบ คำค้อ ที่อนุเคราะห์วัดดูดิบขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงและอุปกรณ์เครื่องมือในการทดลอง รวมถึงนักศึกษา บัณฑิต ผู้ช่วยวิจัย ท่านอื่นๆ ที่ให้การช่วยเหลือและสนับสนุนที่ไม่ได้กล่าวรายชื่อในที่นี้ที่มีส่วนร่วมทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จจลุล่วงด้วยดีทุกประการ



## บทคัดย่อ

แม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) เป็นวัสดุที่มีความสำคัญในการขับเคลื่อนอุตสาหกรรมสมัยใหม่และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้า เครื่องมือและอุปกรณ์ไร้สาย ชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ชิ้นส่วนในเครื่องสแกน MRI ชิ้นส่วนในไมโครโฟนและหูฟัง ชิ้นส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม เป็นต้น ดังนั้นจึงทำให้แนวโน้มความต้องการใช้งานแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในปัจจุบันและอนาคตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันก็ส่งผลให้ปริมาณขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการใช้งานแล้วเหล่านี้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นการรีไซเคิลขยะแม่เหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อสกัดเอาโลหะหายากจากขยะเหล่านี้จะเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ต้นทุนการผลิต และความมั่นคงของแหล่งทรัพยากรอย่างยั่งยืน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการรีไซเคิลขยะแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอนจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลายร่วมกับกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อน โดยขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ประกอบด้วยนีโอดีเมียม 25.37% พราซีนีโอดีเมียม 6.53% โคบอลต์ 0.90% โบรอน 3.63% และเหล็ก 63.57% ขยะแม่เหล็กที่ผ่านการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็กและผ่านการบดเพื่อย่อยขนาดให้เล็กลงแล้ว ถูกนำไปชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่าแม่เหล็กสามารถละลายลงไปในสารละลายได้มากกว่า 90% คงเหลือตะกอนที่ไม่ละลายและโลหะนิกเกิลที่เคลือบผิวแม่เหล็ก นำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนของแข็งเพื่อแยกโลหะนีโอดีเมียมจากสารละลายโดยการปรับค่า pH ที่ pH เท่ากับ 0.6 เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนให้ได้ความบริสุทธิ์ของนีโอดีเมียมสูงและมีเหล็กเจือปนในปริมาณต่ำ โดยตะกอนที่ได้รับอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของ  $\text{Na.Nd(SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$  และ  $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})$  จากผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยวิธี WD-XRF พบว่าประกอบไปด้วยธาตุหลักๆ ได้แก่ นีโอดีเมียม 26.50% พราซีนีโอดีเมียม 8.46% และเหล็กเจือปนอยู่เพียง 1.19% ได้นำตะกอนซัลเฟตที่ได้รับไปชะละลายซ้ำด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก เพื่อให้ได้ซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงประกอบด้วย นีโอดีเมียม 26.36% พราซีนีโอดีเมียม 8.13% และเหล็กลดลงเหลือเพียง 0.14% ตะกอนของ  $\text{Na.Nd(SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$  จะถูกนำมาล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เปลี่ยนรูปของสารประกอบให้ไปอยู่ในรูปของสารประกอบ นีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์  $\text{Nd(OH)}_3$  จากนั้นจึงนำสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ได้นี้ไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำให้สารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 90.5% ผลที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลนี้สามารถทำการสกัดนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากขยะแม่เหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วให้อยู่ในรูปของออกไซด์ของโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลนี้สามารถที่จะนำไปพัฒนาใช้งานเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงทดแทนการใช้โลหะหายากจากแหล่งแร่ตามธรรมชาติได้ในอนาคต

## Abstract

Neodymium-iron-boron (Nd-Fe-B) magnet is important materials for driving modern industry and used in several applications such as electric vehicle motor, cordless tool, hard disk drive, magnetic resonance imaging (MRI) scanner, speaker and headphone, and generator for wind turbines. Then, Nd-Fe-B magnet demand is rapidly increasing in nowadays and future. Consequently, the end-of-life (EOL) of these electronic wastes are also drastically increasing. Therefore, recycling of EOL magnet scrap for extraction of rare-earth metals from these scraps are decrease the environment problems, production cost and sustainable resources supplying.

This research study the recycling of neodymium-iron-boron (Nd-Fe-B) magnet scrap from the EOL hard disk drives (HDDs) by using hydrometallurgical process combined with pyrometallurgical process. The composition of Nd-Fe-B magnet scrap was consisted of 25.37%Nd, 6.53%Pr, 0.90%Co, 3.63%B and 63.57%Fe. De-magnetized and crushed into proper size magnet scraps were directly leached by  $H_2SO_4$  solution. Magnet scraps more than 90% were dissolved into leached solution and remained the residuals and Ni-coated metal. The leached solution was precipitated to extract neodymium from the solution by adjusting pH at 0.6 which was the optimum condition to obtain high purity neodymium precipitates and low amount of iron contaminated. Solid Nd-precipitates was obtained in form of neodymium sulfate ( $Na.Nd(SO_4)_2.H_2O$ ) and iron sulfate ( $FeSO_4.H_2O$ ). Elemental analysis of Nd-precipitates by WD-XRF, the precipitates was contained of 26.50%Nd, 8.46%Pr and 1.19%Fe. Subsequently, Nd-precipitates was leached by using  $H_2SO_4$  solution to obtain high purity  $Na.Nd(SO_4)_2.(H_2O)$  compound which consisted of 26.36%Nd, 8.13%Pr with Fe as low as 0.14%Fe.  $Na.Nd(SO_4)_2.(H_2O)$  compound was rinsed by NaOH solution to transform into  $Nd(OH)_3$  compound. Later,  $Nd(OH)_3$  compound was calcinated at  $1,000\text{ }^\circ\text{C}$  for 2 hours to oxidize and yield as 90.5% purity neodymium oxide ( $Nd_2O_3$ ) product. As a result, this recycling process was achieved to extract neodymium and rare-earth metals from EOL magnet scrap to obtain high purity REMs oxide product. This recycling product was would be developed as raw materials to supply Nd-Fe-B magnet production process instead of rare-earth metals from the natural resources in further.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ค
สารบัญ .....	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย .....	4
บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B.....	5
2.2 แนวโน้มการผลิตและความต้องการใช้งานโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายาก.....	8
2.3 กระบวนการผลิตแม่เหล็กแม่เหล็ก Nd-Fe-B.....	13
2.4 เทคโนโลยีในการรีไซเคิลแม่เหล็กแม่เหล็ก Nd-Fe-B.....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	30
3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	32
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบและวิเคราะห์ผล .....	33
3.4 วิธีการทดลอง.....	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย	
4.1 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของขยะแม่เหล็ก.....	39
4.2 ผลการทดลองรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก.....	41
4.2.1 การเตรียมขยะแม่เหล็ก.....	41
4.2.2 การชะละลายขยะแม่เหล็ก.....	41
4.2.3 การตกตะกอนนีโอดีเมียมจากสารชะละลาย.....	43
4.2.4 การกำจัดเหล็กออกจากตกตะกอนนีโอดีเมียม.....	48
4.2.5 การล้างตะกอนของแข็งด้วยต่างเพื่อให้อยู่ในรูปของ สารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์.....	51
4.2.6 การเผาด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนสารประกอบนีโอดีเมียม ให้อยู่ในรูปนีโอดีเมียมออกไซด์.....	55

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัยสรุป .....	62
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
เอกสารอ้างอิง .....	64
ประวัติผู้วิจัย .....	67





# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในอุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีขั้นสูง (High technology components) โดยทั่วไปแล้วจะมีธาตุในกลุ่มโลหะที่หายาก (Rare earth metals: REMs) ซึ่งพบได้ในปริมาณค่อนข้างน้อยบนผิวโลก เป็นองค์ประกอบในชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์เหล่านี้ อย่างเช่น แม่เหล็ก และแบตเตอรี่ ซึ่งจะถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีนี้ส่งผลทำให้อุปกรณ์เหล่านี้มีขนาดเล็กลงและน้ำหนักเบาขึ้นอย่างที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งปริมาณของโลหะเหล่านี้ที่มีการผลิตและปริมาณที่เหลืออยู่ในแหล่งแร่ตามธรรมชาติจะเป็นตัวกำหนดช่วงเวลาของเทคโนโลยีดังกล่าว

แม่เหล็กที่มีสมรรถนะและมีสมบัติทางแม่เหล็กสูง (High performance magnets) ที่ใช้งานส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นแม่เหล็กที่มีนีโอดีเมียม (Neodymium, Nd) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งจัดว่าเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะหายาก ซึ่งอยู่ในรูปของแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบเป็น  $Nd_2Fe_{14}B$  หรือเรียกว่า Nd-Fe-B Magnet ซึ่งเป็นแม่เหล็กที่ให้สมบัติทางแม่เหล็กที่สูงที่สุด มีแรงดึงดูดสูงที่สุดในบรรดาแม่เหล็กชนิดต่างๆ ที่มีการใช้งานในปัจจุบัน ดังนั้นแม่เหล็กชนิดนี้จึงถูกนำไปใช้ทดแทนแม่เหล็กที่มีการใช้งานมาก่อนหน้านี้สำหรับการใช้งานที่ต้องการสมรรถนะและสมบัติทางแม่เหล็กที่สูง เช่น ใช้เป็นชิ้นส่วนในมอเตอร์รวมไปถึงมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle) เครื่องมือและอุปกรณ์ไร้สาย (Cordless tool) ใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ชิ้นส่วนในเครื่องสแกน MRI (Magnetic resonance imaging (MRI) scanner) ชิ้นส่วนในไมโครโฟนและหูฟัง (Speaker and headphone) ชิ้นส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (Generator for wind turbines) เป็นต้น องค์ประกอบทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B จะมีนีโอดีเมียมอยู่ในปริมาณสูงถึง 20-30% โดยน้ำหนักของแม่เหล็ก นอกจากนี้ยังมีโลหะหายากชนิดอื่นที่เป็นองค์ประกอบรองลงมาในส่วนผสมของแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงชนิดนี้ ได้แก่ พร้าเซออดีเมียม (Praseodymium, Pr) และไดสพรอเซียม (Dysprosium, Dy) เป็นต้น

Benecki และคณะ (2011) ได้มีการรายงานเกี่ยวกับปริมาณการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในปี ค.ศ. 2007 ว่ามีปริมาณการผลิตทั้งหมด 63,000 ตัน และจะเพิ่มขึ้นเป็น 120,000 ตันในปี ค.ศ. 2020 ที่มีการใช้งานทั่วโลก และในอนาคตความต้องการใช้งานวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กสูงนี้นับวันยิ่งจะเพิ่มสูงขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฮบริดในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้นี้ ในปัจจุบันประเทศจีนเป็นประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ที่ทำการผลิตโลหะหายาก (Rare earth elements) คิดเป็น 96% ของที่ผลิตได้ในโลก และยังเป็นผู้ผลิตแม่เหล็กรายใหญ่ของโลกอีกด้วยคิดเป็น 76% ของปริมาณการผลิตทั้งหมดในโลก ซึ่งในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นจำนวนทั้งสิ้น 50,000 ตัน และมีแนวโน้มเพิ่มเป็น 80,000 ตัน



ในปี ค.ศ. 2013 ซึ่งข้อมูลส่วนประกอบทางเคมีของแม่เหล็กนีโอดีเมียม (Nd-Fe-B magnet) และข้อมูลสมบัติทางแม่เหล็กเปรียบเทียบกับระหว่างแม่เหล็กแต่ละประเภทได้แสดงในตารางที่ 1.1 และตารางที่ 1.2 ดังนี้

**ตารางที่ 1.1** ส่วนผสมทางเคมีของขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B (D. Vobenkaul และคณะ, 2013)

Elements	Weight percentage (wt.%)
Fe	63.67
Nd	23.50
B	0.94
Pr	2.26
Dy	6.14
Co	2.98
Al	0.26

**ตารางที่ 1.2** การเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็กแต่ละประเภท  
([https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet))

Magnet	$B_r$ (T)	$H_{ci}$ (kA/m)	$BH_{max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_c$ (°C)
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B (sintered)	1.0-1.4	750-2000	200-400	310-400
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B (bonded)	0.6-0.7	600-1200	60-100	310-400
SmCo <sub>5</sub> (sintered)	0.8-1.1	600-2000	120-200	720
Sm(Co,Fe,Cu,Zr) <sub>7</sub> (sintered)	0.9-1.15	450-1300	150-240	800
Alnico (sintered)	0.6-1.4	275	10-88	700-860
Sr-ferrite (sintered)	0.2-0.4	100-300	10-40	450

\* $B_r$  : Remanence, เป็นค่าความแข็งแรงของสนามแม่เหล็ก (The strength of the magnetic field)

\* $H_{ci}$  : Coercivity, เป็นค่าความสามารถในการต้านทานการสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก (The material's resistance to becoming de-magnetized)

\* $BH_{max}$  : Energy product, เป็นค่าความหนาแน่นของพลังงานแม่เหล็ก (The density of magnetic energy)

\* $T_c$  : Curie temperature, เป็นอุณหภูมิที่จะสูญเสียความเป็นแม่เหล็ก (The temperature which material loses its magnetism)

จากการเปรียบเทียบสมบัติทางแม่เหล็กของแม่เหล็ก Nd-Fe-B กับแม่เหล็กประเภทอื่นนั้น พบว่ามีสมบัติทางแม่เหล็กที่สูงกว่าแม่เหล็กประเภทอื่น มีค่าความหนาแน่นของพลังงานสูงที่สุด มีค่าความแข็งแรงของสนามแม่เหล็กที่สูงกว่า มีความสามารถในการต้านทานการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กที่มากกว่า อีกทั้งมีความหนาแน่นหรือน้ำหนักที่เบากว่าซึ่งจะทำให้พลังงานแม่เหล็กต่อปริมาตรสูงกว่ามาก ซึ่งการใช้งานแม่เหล็ก Nd-Fe-B นี้จะทำให้สามารถที่จะพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดที่เล็กลงและน้ำหนักเบาขึ้นได้ ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนที่สำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา

และจากข้อมูลในตารางข้างบนจะเห็นได้ว่าปริมาณของธาตุนีโอติเมียมที่มีอยู่ในแม่เหล็ก Nd-Fe-B มีปริมาณที่สูงทั้งยังเป็นโลหะที่หายากและขาดแคลน อีกทั้งในปัจจุบันประเทศไทยถือเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ที่สำคัญอันดับต้นๆ ของโลกทั้งในแง่ของปริมาณการผลิตและการวิจัยผลิตภัณฑ์ โดยมีบริษัทผู้ประกอบการชั้นนำของโลกที่ทำการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หลายบริษัทได้ลงทุนและตั้งโรงงานเพื่อเป็นฐานการผลิตและทำการวิจัยในด้านนี้ ซึ่งในอุตสาหกรรมนี้มีการใช้งานแม่เหล็กที่มีสมรรถนะและมีสมบัติทางแม่เหล็กสูง เช่น แม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นส่วนประกอบในชิ้นส่วนและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ และจากข้อมูลการรายงานข่าวของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม เมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2563 โดยนายกอบชัย สังสิทธิสวัสดิ์ ปลัดกระทรวงอุตสาหกรรม ระบุว่า “จากการประเมินพบว่าการใช้เซลล์ขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นภายในประเทศประมาณ 500,000 ตันต่อปี โดยเปลี่ยนเป็นทรัพยากรที่มีค่าเพื่อเป็นวัตถุดิบทดแทนให้แก่ภาคอุตสาหกรรมไทย จะก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจในประเทศกว่า 30,000 ล้านบาทต่อปี” ดังนั้นองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่จะต้องใช้ในการจัดการและทำการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่เกิดจากความสูญเสียในระหว่างกระบวนการผลิตจากภาคอุตสาหกรรม และเกิดจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการใช้งานแล้วในภาคครัวเรือนที่อยู่ในรูปของขยะอิเล็กทรอนิกส์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการจัดการเพื่อนำขยะเหล่านี้กลับมาใช้งานหรือใช้ประโยชน์ได้ใหม่ ทั้งในแง่ของการนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตได้ใหม่ การสกัดเพื่อให้มีปริมาณความเข้มข้นหรือองค์ประกอบทางเคมีสูงขึ้นหรือการนำกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากขยะที่มีศักยภาพเหล่านี้โดยการสกัดเอาโลหะที่มีค่าและโลหะหายากจากขยะเหล่านี้ ซึ่งมีมูลค่าสูงและมีความขาดแคลนกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ ซึ่งจะก่อให้เกิดความยั่งยืนในการบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ส่งผลดีทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B จากขยะอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยการใช้กรรมวิธีการสกัดทางด้านโลหะ

1.2.2 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะนีโอติเมียมจากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B โดยประยุกต์ใช้กรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลายร่วมกับกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้ความร้อน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีนีโอติเมียมเป็นองค์ประกอบ (Nd-Fe-B magnet)

1.3.2 คัดแยกและเตรียมขยะแม่เหล็กในเชิงกายภาพ (Physical conditioning) ก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลด้วยกรรมวิธีทางโลหวิทยา โดยทำการสลายความเป็นแม่เหล็ก และย่อยขยะแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กกลง

1.3.3 ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะนีโอดีเนียมโดยกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย ได้แก่ การชะละลายขยะแม่เหล็ก การตกตะกอนของแข็งจากสารละลาย การล้างตะกอนของแข็งด้วยต่าง

1.3.4 ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดโลหะนีโอดีเนียมโดยกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้ความร้อน ได้แก่ การเผาตะกอนของแข็งด้วยความร้อน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ ก่อให้เกิดองค์ความรู้ในการนำเอาขยะอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการสูญเสียในการผลิตและจากการใช้งานในภาคครัวเรือนกลับมาผ่านกระบวนการรีไซเคิลเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตและนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ได้ใหม่

1.4.2 ด้านนโยบาย งานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศและนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติในหลายๆ ด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการบริหารจัดการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

1.4.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์ อุตสาหกรรม งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อนำขยะอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีโลหะหายากอยู่ในขยะดังกล่าว เพื่อนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตใหม่หรือใช้ประโยชน์ในการใช้งานด้านอื่นๆ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการผลิต และเป็นการสร้างมูลค่าให้กับขยะอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นี้โดยก่อให้เกิดอุตสาหกรรมและการประกอบการธุรกิจเกี่ยวกับการรีไซเคิลโดยใช้กระบวนการที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้เพื่อทำหน้าที่ในการบริหารจัดการขยะอุตสาหกรรมด้านนี้ ซึ่งก่อให้เกิดผลดีทั้งในด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม

1.4.4 ด้านสังคมและชุมชน เป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมให้กับสังคมและชุมชน

1.4.5 หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ภาคธุรกิจ/อุตสาหกรรม เช่น บริษัท โรงงาน ผู้ประกอบการ และภาครัฐ เช่น กระทรวงอุตสาหกรรม กระทรวงวิทยาศาสตร์ กระทรวงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม สถานศึกษาต่างๆ

## บทที่ 2

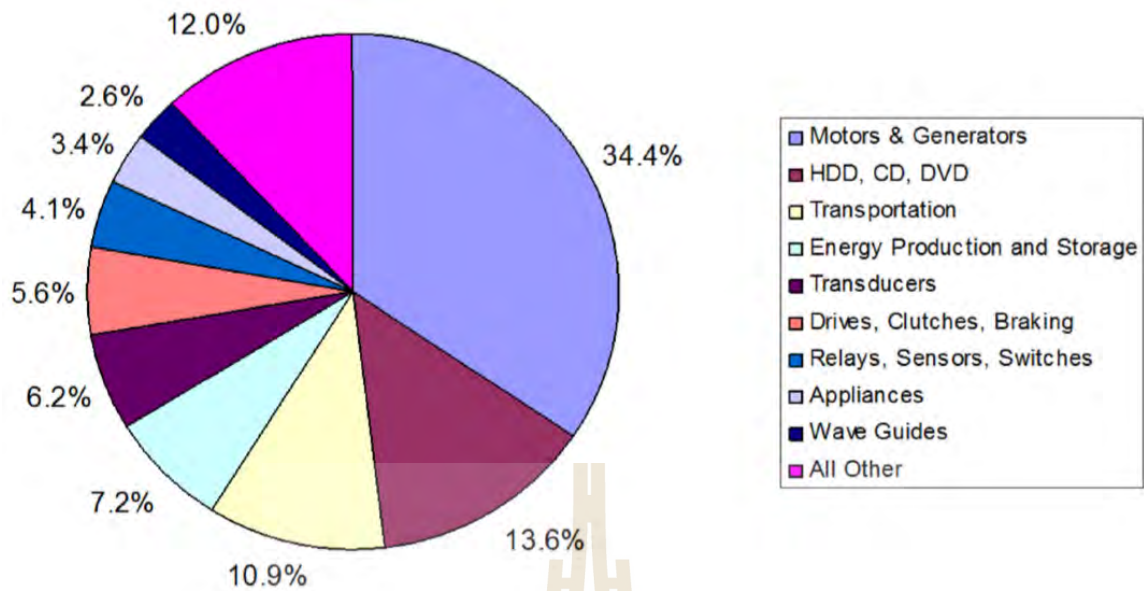
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet)

แม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) เป็นโลหะผสมที่มีเหล็ก (Iron, Fe) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีนีโอดีเมียม (Neodymium, Nd) และโลหะหายากตัวอื่น (Rare Earth Metals, REMs) ได้แก่ พร้าซีโอดีเมียม (Praseodymium, Pr) ไดสพรอเซียม (Dysprosium, Dy) เทอร์เบียม (Terbium, Tb) เป็นต้น รวมถึงโบรอน (Boron, B) เป็นธาตุผสม ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในรูปของ  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  จัดเป็นแม่เหล็กที่ให้สมบัติทางแม่เหล็กที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับแม่เหล็กประเภทอื่นๆ ที่ใช้งานในปัจจุบัน ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.1 แม่เหล็กชนิดนี้มีการนำไปใช้งานที่สำคัญในด้านต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น ใช้เป็นชิ้นส่วนในมอเตอร์รวมไปถึงมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนในรถยนต์ไฟฟ้า (Electric vehicle) เครื่องมือและอุปกรณ์ไร้สาย (Cordless tool) ใช้งานในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) ชิ้นส่วนในเครื่องสแกน MRI (Magnetic resonance imaging (MRI) scanner) ชิ้นส่วนในไมโครโฟนและหูฟัง (Speaker and headphone) ชิ้นส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานลม (Generator for wind turbines) เป็นต้น ข้อมูลการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการใช้งานมากที่สุดสองอันดับแรก คือ มอเตอร์ไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องจากแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของการผลิตและการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าที่ในปัจจุบันและในอนาคต เพื่อใช้งานแทนรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน สัดส่วนรองลงมาคืออุปกรณ์ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HDDs) เครื่องเล่นซีดี (CD) และเครื่องเล่นดีวีดี (DVD) ที่มีการผลิตและใช้งานมากในปัจจุบัน

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลเปรียบเทียบค่าพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กแต่ละประเภท (C.J. Ferron และคณะ, 2015)

Magnetic Materials	Average maximum energy product (MGOe)
Hard ferrite	3.5
NdFeB	35
SmCo	22
AlNiCo	8
Pt-Co	10



รูปที่ 2.1 ข้อมูลการนำแม่เหล็ก Nd-Fe-B ไปใช้งานในด้านต่างๆ ในปี ค.ศ. 2012

(Y. Yang และคณะ, 2017)

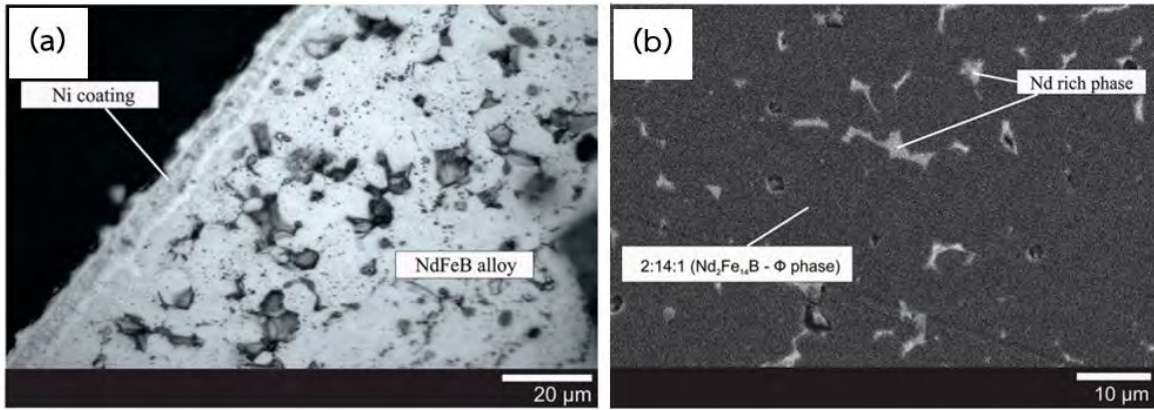
ตัวอย่างของชิ้นงานแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีการใช้งานเป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive, HDD) แสดงดังในรูปที่ 2.2 และลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ถ่ายด้วยกล้องกำลังขยายสูงแสดงดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งแม่เหล็กจะมีลักษณะโครงสร้างประกอบไปด้วยโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) เป็นโลหะผสมของเหล็ก-นีโอดีเมียม-โบรอน (NdFeB Alloy) อยู่ในรูปของสารประกอบ  $Nd_2Fe_{14}B$  ประมาณ 85% และสารประกอบ  $Nd_1Fe_4B_4$  ประมาณ 2-3% และยังมีเฟสที่มือนีโอดีเมียมอยู่ในปริมาณสูง (Nd rich phase) อยู่ตามขอบเกรนอีกประมาณ 12-13% โดยในการใช้งานแม่เหล็กจะมีการเคลือบผิวด้วยโลหะนิกเกิล (Ni coating) เพื่อป้องกันการกัดกร่อน (corrosion) ที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน



รูปที่ 2.2 ลักษณะชิ้นส่วนแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้งานในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

(D. Vobenkaul และคณะ, 2013)





รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้งานในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (a) และภาพโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ถ่ายกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมด SEM back-scattered (b) (M. Firdaus และคณะ, 2016)

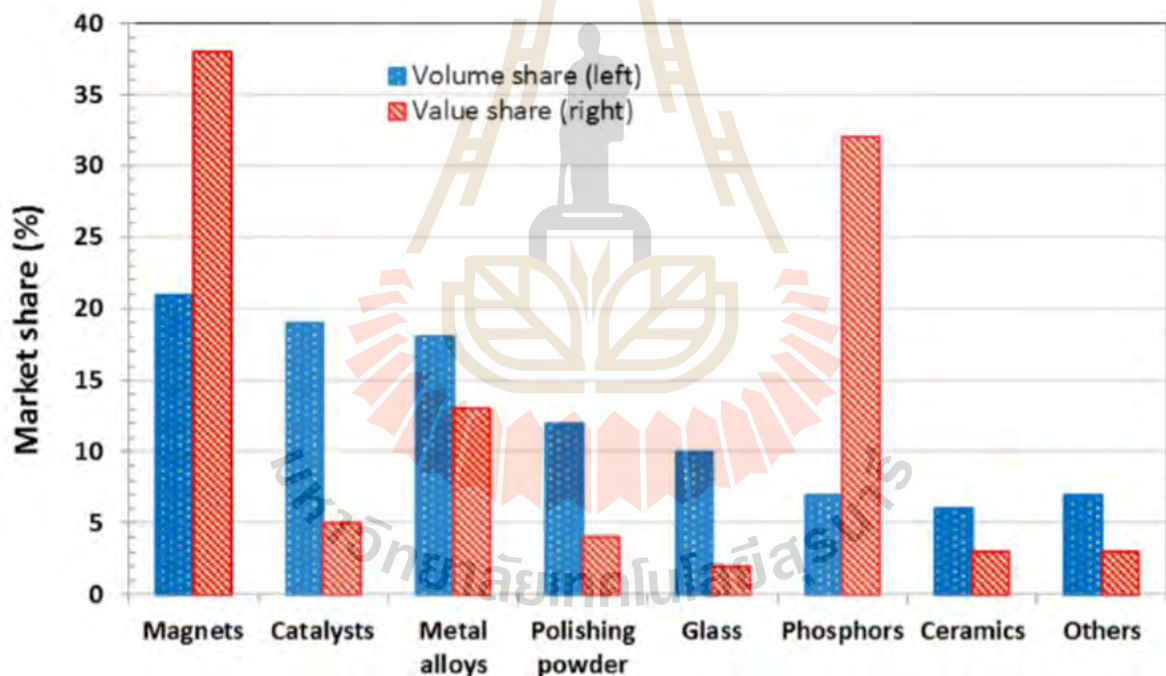
โดยองค์ประกอบทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ได้มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ แสดงดังข้อมูลในตารางที่ 2.2 ซึ่งจะมีเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ในช่วงประมาณ 60-70% โดยน้ำหนัก นีโอดีเมียม (Nd) อยู่ในช่วงประมาณ 20-30% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีโลหะหายากตัวอื่น เช่น พร้าซีโอดีเมียม (Pr) อยู่ในช่วงประมาณ 0-7% โดยน้ำหนัก ไดสพโรเซียม (Dy) อยู่ในช่วงประมาณ 1-5% โดยน้ำหนัก เป็นต้น อีกทั้งโบรอน (B) ประมาณ 1% โดยน้ำหนัก และโคบอลต์ (Co) อยู่ในช่วงประมาณ 0-4% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ในการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B เพื่อนำไปใช้งานในลักษณะต่างๆ นั้น อาจจะมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกันไปบ้างเล็กน้อยตามแต่ลักษณะการใช้งาน และวัตถุประสงค์ในการเติมธาตุผสมต่างๆ โดยเฉพาะโลหะในกลุ่มที่เป็นโลหะหายากเพื่อปรับปรุงสมบัติทางด้านแม่เหล็กเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานแต่ละประเภท แต่โดยรวมก็ถือว่ามีองค์ประกอบทางเคมีอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B

Materials	Elements (Wt%)					
	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe
NdFeB Magnet from HDD (D.Vobenkaul et. al., 2013)	23.50	2.26	6.14	2.98	0.94	63.67
NdFeB Magnet from Electric Drive Motors of EV (T. Elwert et. al., 2017)	REE; 28-35			0-4	1-2	60-70
NdFeB Magnet (C.J. Ferron et. al., 2015)	20-30	<7	1-2	4	1	50-60
NdFeB Magnet (M. Firdaus et. al., 2016)	23-31	0-7	1-5	0-1	0.9-1.2	65-70
NdFeB Magnet (Y.Y. Bian et. al., 2015)	30.73	4.39	1-5	-	0.96	61.60
NdFeB Magnet (M.A.R. Onal et. al., 2017)	26.1	0.68	2.68	2.99	0.73	63.5
NdFeB Magnet (M. Nakamoto et. al., 2012)	20.6	5.27	4.2	0.78	0.80	55.6

## 2.2 แนวโน้มการผลิตและความต้องการใช้งานโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายาก

Y. Yang และคณะ (2017) ได้รวบรวมข้อมูลและรายงานเกี่ยวกับการใช้งานออกไซด์ของโลหะหายาก (rare earth oxide, REO) ในปี ค.ศ. 2008 ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งปริมาณประมาณ 26,300 ตันของแร่ ออกไซด์ของโลหะหายากนี้จะถูกนำไปผลิตเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B ซึ่งเป็นจำนวนที่มากที่สุดในการ ใช้งานทั้งในแง่ของปริมาณที่สูงถึง 21% ของปริมาณการใช้งานทั้งหมด และในแง่ของมูลค่าที่สูงถึง 37% ของ มูลค่าโดยรวมทั้งหมด โดยออกไซด์ของโลหะหายากที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B นั้น ประกอบไปด้วยออกไซด์ของนีโอดีเมียม พราซีโอดีเมียม ไดสพรอเซียม กาโดลิเนียม และเทอร์เบียม และจาก ปริมาณออกไซด์ของโลหะหายากข้างต้น 26,300 ตัน ที่ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในปี ค.ศ. 2008 นั้น คิดเป็น 76% ของนีโอดีเมียมออกไซด์ทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อปี (18,200 ตัน จากทั้งหมด 23,900 ตัน) คิดเป็น 70% ของพราซีโอดีเมียมออกไซด์ทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อปี (6,140 ตัน จากทั้งหมด 8,740 ตัน) คิดเป็น 69% ของ กาโดลิเนียมออกไซด์ทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อปี (525 ตัน จากทั้งหมด 762 ตัน) และคิดเป็น 100% ของไดสพรอ เซียมออกไซด์ทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อปี (1,310 ตัน)

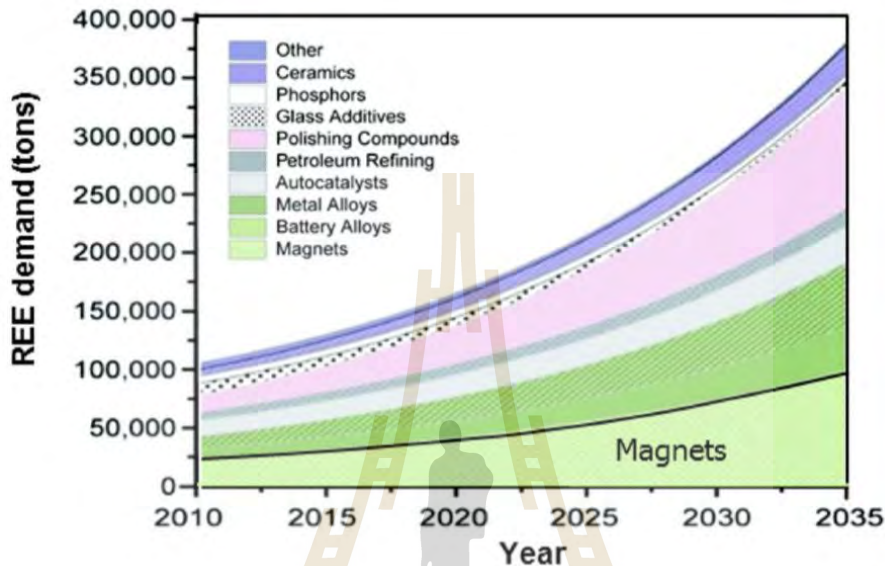


รูปที่ 2.4 ข้อมูลสัดส่วนการตลาดของการใช้โลหะหายากที่อยู่ในรูปของแร่ ออกไซด์ สำหรับนำไปผลิตใช้งานใน ด้านต่างๆ ในปี ค.ศ. 2008 (อ้างอิงจาก Y. Yang และคณะ, 2017)

นอกจากนี้ยังมีข้อมูลการทำนายถึงการเติบโตหรือการขยายตัวเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้งานโลหะหายากทั้งหมดที่มีการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยจะเห็นได้ว่าความต้องการโลหะหายากที่นำมาใช้ผลิตเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B เพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มการขยายตัวที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีพลังงานสะอาด เช่น การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม หรือรถยนต์ไฟฟ้าที่จะมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอนาคต จำเป็นต้องใช้แม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B เป็นชิ้นส่วนในการผลิตเป็นมอเตอร์

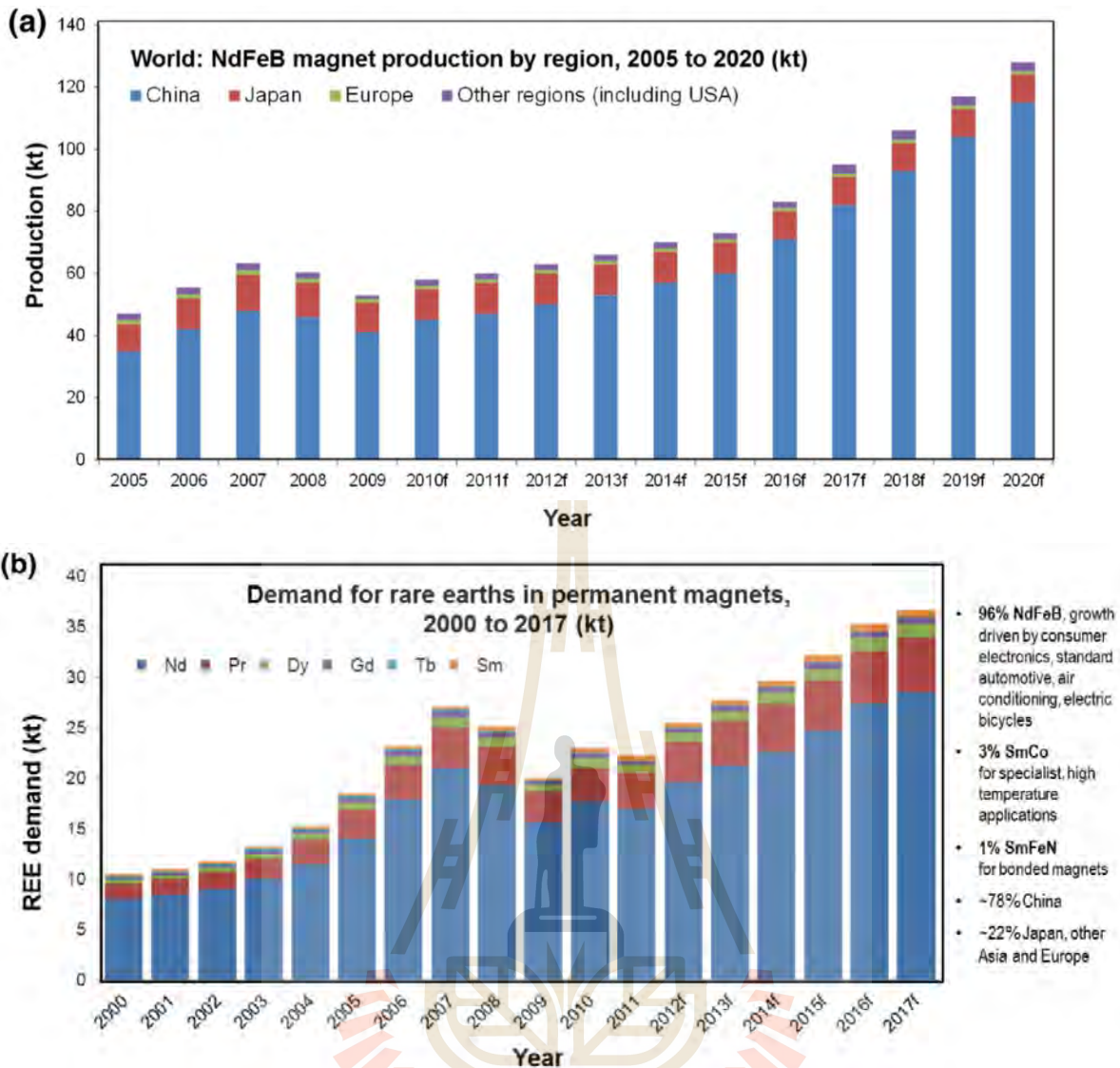


เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนของอุปกรณ์เหล่านี้ ซึ่งแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B จะต้องมีองค์ประกอบของโลหะหายากเป็นส่วนผสมอยู่ในปริมาณสูงถึงประมาณ 31-32% โดยน้ำหนัก โดยมีส่วนผสมหลัก ได้แก่ นีโอดีเมียม และพร้าซีโอดีเมียม (Nd+Pr) ประมาณ 21-31% โดยน้ำหนัก ไดสพรอเซียม (Dy) ประมาณ 1-10% โดยน้ำหนัก และกาลิโดเนียม (Gd) กับเทอเบียม (Tb) อีกในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งไดสพรอเซียมนั้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติของแม่เหล็กและส่งผลให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น อย่างเช่น การใช้งานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าซึ่งอาจจะเกิดความร้อนสูงในขณะใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ข้อมูลทำนายแนวโน้มการเติบโตของความต้องการใช้งานโลหะหายากระหว่างปี ค.ศ. 2010-2035 (อ้างอิงจาก Y. Yang และคณะ, 2017)

จากข้อมูลแสดงปริมาณการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ทั้งหมดทั่วโลก และการทำนายปริมาณการผลิตในระหว่างปี ค.ศ. 2005-2020 รวมถึงข้อมูลแสดงปริมาณความต้องการใช้งานโลหะหายากสำหรับผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B ดังข้อมูลแสดงในรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.3 นั้น จะเห็นได้ว่าปริมาณในการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ทั้งหมดทั่วโลกมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยประเทศผู้ผลิตรายใหญ่และเป็นผู้ผลิตหลักของโลก ได้แก่ จีน และญี่ปุ่น นอกจากนี้ Benecki และคณะ (2011) ยังได้มีการรายงานเกี่ยวกับปริมาณการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในปี ค.ศ. 2007 ว่ามีปริมาณการผลิตทั้งหมด 63,000 ตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 120,000 ตันในปี ค.ศ. 2020 ที่มีการใช้งานทั่วโลก ความต้องการใช้งานวัสดุที่มีสมบัติทางแม่เหล็กสูงนี้จะเพิ่มสูงขึ้นในอนาคตจากการเพิ่มขึ้นของการใช้งานสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ไฮบริด ในปัจจุบันประเทศจีนถือเป็นประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ที่ผลิตโลหะหายากคิดเป็น 96% ของที่ผลิตได้ในโลก และยังเป็นผู้ผลิตแม่เหล็กรายใหญ่ของโลกอีกด้วยคิดเป็น 80% ของปริมาณการผลิตทั้งหมดในโลก ซึ่งในปี ค.ศ. 2012 ได้มีการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B เป็นจำนวนทั้งสิ้น 50,000 ตัน จากทั้งหมด 63,000 ตัน และมีแนวโน้มที่ประเทศจีนจะผลิตแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 65,000 ตันในปี ค.ศ. 2015 ดังนั้นความต้องการใช้งานโลหะหายากก็จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณแม่เหล็กที่ต้องทำการผลิต จากปริมาณการใช้งานนีโอดีเมียม 19,500 ตัน ในปี ค.ศ. 2012 มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็น 24,200 ตัน ในปี ค.ศ. 2015



รูปที่ 2.6 ข้อมูลปริมาณการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ทั้งหมดทั่วโลก และการทำนายปริมาณการผลิตระหว่างปี ค.ศ. 2005-2020 (a) และข้อมูลปริมาณความต้องการใช้งานโลหะหายากสำหรับผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B (b) (อ้างอิงจาก Y. Yang และคณะ, 2017)

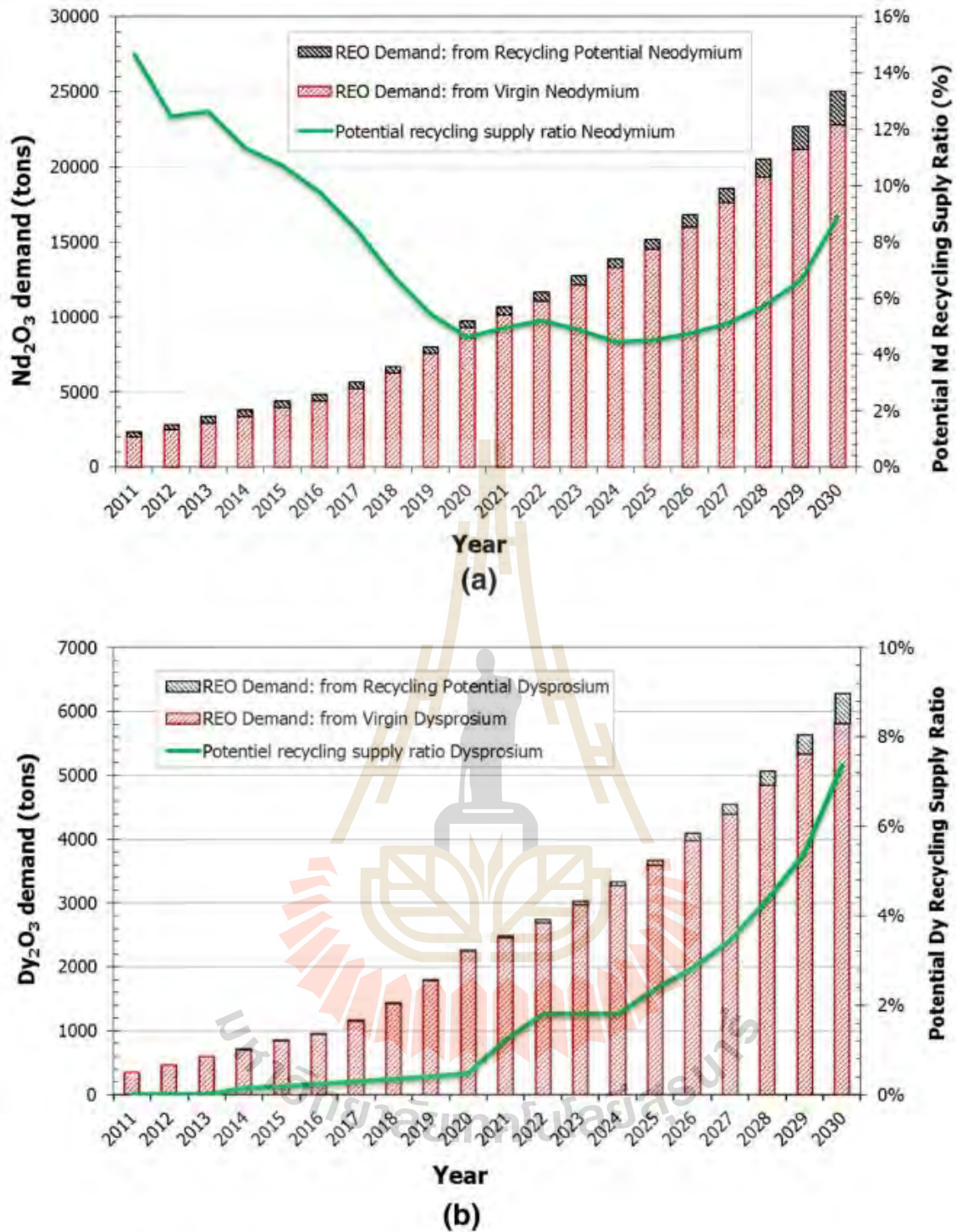
ตารางที่ 2.3 ข้อมูลปริมาณการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในปี ค.ศ. 2012 และทำนายปริมาณการผลิตในปี ค.ศ. 2015 (หน่วยเป็น 1,000 ตัน) (อ้างอิงจาก Y. Yang และคณะ, 2017)

Production by country/region	2012	2015 forecast
China	50	65
Japan	10	8
Europe	1	1
USA	0	2
All others	2	2
Total REE magnet	63	78
Total REE in magnet (31 wt%), estimates	19.5	24.2
Total REO equivalent (in terms of Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	22.8	28.2

จากข้อมูลการทำนายเกี่ยวกับการรีไซเคิลเพื่อนำนีโอดีเมียม (Nd) และไดสพรอเซียม (Dy) กลับมาใช้ใหม่จากขยะแม่เหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วในรูปที่ 2.7 พบว่าปริมาณการใช้นีโอดีเมียม และไดสพรอเซียมที่ได้จากการรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B นั้นยังมีปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมาก จากข้อมูลในปี ค.ศ. 2020 พบว่านีโอดีเมียมที่ได้จากการรีไซเคิลมีการนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแม่เหล็กในรูปของ  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  เป็นสัดส่วนเพียงแค่ 5% และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 9% ในปี ค.ศ. 2030 ส่วนในกรณีของไดสพรอเซียมที่ได้จากการรีไซเคิลมีการนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแม่เหล็กในรูปของ  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  เป็นสัดส่วนเพียงแค่ 0.5% ในปี ค.ศ. 2020 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 9% ในปี ค.ศ. 2030

จากข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญที่จะต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการในการรีไซเคิลเพื่อนำโลหะหายากที่อยู่ในชิ้นส่วนแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ผ่านการใช้งานหรือหมดอายุการใช้งานแล้ว โดยทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มสูงขึ้น หรือรีไซเคิลให้อยู่ในรูปของออกไซด์ของโลหะหายากสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง ซึ่งโลหะหายากเหล่านี้มีราคาสูง ปริมาณการผลิตต่อปีมีจำนวนค่อนข้างจำกัดและถือเป็นโลหะที่เกี่ยวข้องกับยุทธศาสตร์ความมั่นคงระหว่างประเทศ เสี่ยงต่อสถานะการขาดแคลนวัตถุดิบสำหรับผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมที่มีเทคโนโลยีขั้นสูงที่มีมูลค่าของสินค้าและมูลค่าของตลาดผลิตภัณฑ์มหาศาล ซึ่งจำเป็นจะต้องมีการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการรีไซเคิลโลหะหายากเหล่านี้เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่และมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์ สามารถแข่งขันราคาในท้องตลาดกับโลหะหายากที่ผลิตจากการทำเหมืองแร่ตามธรรมชาติได้ โดยจะส่งผลกระทบต่อทั้งทางด้านเศรษฐกิจและทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยมีการหมุนเวียนวัตถุดิบจากขยะแม่เหล็กที่ใช้งานแล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสีย และเป็นการลดการทำลายทรัพยากรธรรมชาติจากการทำเหมืองแร่ รวมถึงมีความยั่งยืนทางด้านทรัพยากรในอนาคตอีกด้วย





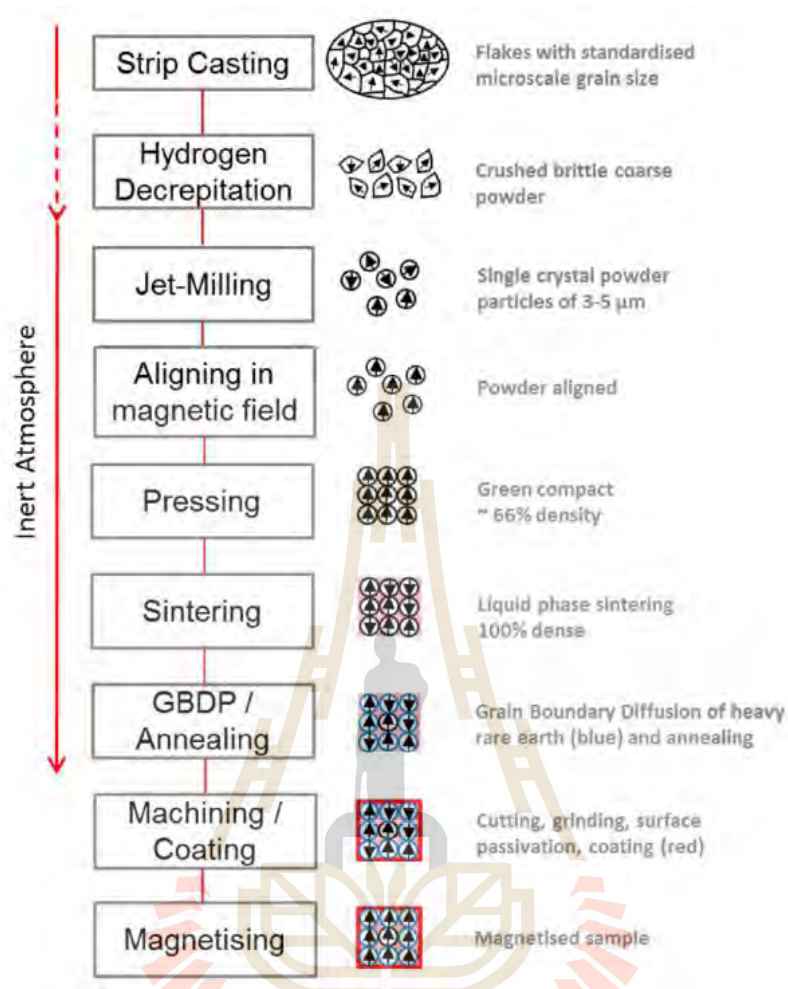
รูปที่ 2.7 ข้อมูลการทำนายเกี่ยวกับการรีไซเคิลเพื่อนำนีโอดีเมียม (Nd) และไดสพรอเซียม (Dy) กลับมาใช้ใหม่จากขยะแม่เหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว (End-of-Life (EOL) magnet) (a) ข้อมูลแสดงปริมาณความต้องการใช้ Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สำหรับการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B (b) ข้อมูลแสดงปริมาณความต้องการใช้ Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> สำหรับการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B (อ้างอิงจาก Y. Yang และคณะ, 2017)

## 2.3 กระบวนการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet)

หัวใจหลักในการขับเคลื่อนการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงในปัจจุบันนี้ เนื่องมาจากความต้องการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอุตสาหกรรมที่สำคัญต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมเกี่ยวกับมอเตอร์และระบบอัตโนมัติ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และอุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก อุตสาหกรรมเกี่ยวกับพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม เป็นต้น และจากสถานการณ์เกิดภาวะวิกฤติขาดแคลนโลหะหายากในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2010-2011 ผลักดันให้มีการวิจัยเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการลดปริมาณการใช้โลหะหายากหรือไม่ใช้โลหะหายากในการผลิตแม่เหล็กถาวรแรงดึงดูดสูง ซึ่งยังคงเป็นโจทย์ที่ท้าทายมาจนถึงปัจจุบัน

ในการผลิตแม่เหล็กถาวรที่มีแรงดึงดูดหรือพลังงานแม่เหล็กสูงนั้นประกอบด้วยหลักสำคัญ 2 ประการคือ ข้อแรกจะต้องเลือกใช้วัสดุหรือองค์ประกอบที่ดีที่สุดที่ถูกต้องในการผลิตแม่เหล็กเพื่อให้ได้สมบัติภายในต่างๆ ทางด้านแม่เหล็กที่ดีตามที่ต้องการ เช่น มีความหนาแน่นของพลังงานแม่เหล็กสูง มีอุณหภูมิในการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กอยู่ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ข้อที่สองเป็นการแปลงสมบัติภายในทางด้านแม่เหล็กให้มีหน้าที่หรือตอบสนองการใช้งานหรือมีสมบัติภายนอกตามที่ต้องการ เช่น มีค่าความแข็งแรงของสนามแม่เหล็กสูง มีความสามารถในการต้านทานการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กสูง เป็นต้น ซึ่งการทำให้มีสมบัติที่ดีทางด้านแม่เหล็กเหล่านี้สามารถทำได้โดยการควบคุมกรรมวิธีในการผลิตให้ได้ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็กที่เหมาะสม ดังแผนผังแสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงประเภท Sintered Nd-Fe-B magnet ที่แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ เริ่มจากโลหะผสมที่มีส่วนผสมของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B starting alloy) จะถูกหลอมและทำการหล่อในลักษณะที่ทำให้เกิดการแข็งตัวหรือเย็นตัวเร็ว (Strip casting) โดยการหล่อเครื่องหล่อที่มีลักษณะเป็นวงล้อ (Rotating wheel strip caster) ที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำเพื่อให้เกิดการเย็นตัวเร็ว ซึ่งจะส่งผลทำให้ลักษณะโครงสร้างที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูงไม่เกิดการแยกตัว และทำให้ได้เกรนหรือลักษณะโครงสร้างที่มีขนาดเล็กละเอียด จากนั้นในขั้นที่สองโลหะที่ได้จากการหล่อจะถูกพ่นด้วยไฮโดรเจนที่ความเร็วสูง (Pulverization) เพื่อทำให้เกรนขนาดเล็กเกิดการแตกแยกออกจากกัน (Hydrogen decrepitation) แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็กลง (Jet-milling) ในลักษณะเกรนที่มีผลึกเดี่ยวซึ่งจะมีขนาดประมาณ 3-5 ไมครอน ผงแม่เหล็กจะถูกทำให้เกิดการเรียงตัวของสนามแม่เหล็กไปในทิศทางเดียวกัน จากนั้นนำผงแม่เหล็กไปอัดขึ้นรูป (Pressing) และเผาผนึก (Sintering) โดยให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ผงแม่เหล็กเกิดการเชื่อมประสานเข้าด้วยกันจนเนื้อแน่นไม่มีช่องว่างหรือรูพรุน (Liquid phase sintering) นำแม่เหล็กที่ผ่านการเผาผนึกไปทำการอบอ่อน (Annealing) เพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านแม่เหล็ก โดยเฉพาะค่าความสามารถในการต้านทานการสูญเสียความเป็นแม่เหล็กให้สูงขึ้น โดยในขั้นนี้จะเกิดกลไกการแพร่ของอะตอมของโลหะหายากตามบริเวณขอบเกรน เกิดเป็นเฟสที่มีโลหะหายากในปริมาณสูงในลักษณะโครงสร้างยูเทคติกที่อยู่ตามขอบเกรน (REE rich, intergranular low-melting eutectic phases) ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการเพิ่มขึ้นของสมบัติแม่เหล็กดังกล่าว จากนั้นจะนำชิ้นงานแม่เหล็ก

ที่ผ่านการอบอ่อนแล้วไปทำการตัด ขัด และขึ้นรูปด้วยแรงทางกลให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ รวมไปถึงการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล และสุดท้ายชิ้นงานจะถูกนำไปทำให้เป็นแม่เหล็ก ก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกรรมวิธีการผลิตแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B (Y. Yang และคณะ, 2017)

## 2.4 เทคโนโลยีในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet)

กรรมวิธีในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) เพื่อนำเอาผลผลิตที่ได้จากกระบวนการมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้ใหม่นั้น สามารถทำได้หลายรูปแบบและวิธีการด้วยกัน ดังข้อมูลที่มีการรายงานเกี่ยวกับงานวิจัยไว้ในก่อนหน้านี้นี้ วิธีการในการสกัดโลหะจากแหล่งแร่ตามธรรมชาติหรือจากขยะของเสียที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว มี 3 วิธีหลัก ได้แก่ การสกัดโลหะโดยใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) การสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย (Hydrometallurgy) และการสกัดโลหะโดยใช้ไฟฟ้า (Electrometallurgy)

จากงานวิจัยที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้นี้ การสกัดหรือรีไซเคิลโลหะหายากจากแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของ Nd-Fe-B มี 2 กรรมวิธีหลักๆ ได้แก่ การสกัดโลหะโดยใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) และการใช้สารละลาย (Hydrometallurgy) หรือใช้ทั้งสองวิธีการร่วมกัน ซึ่งแต่ละกรรมวิธีก็จะมีลักษณะเฉพาะและข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน คือ ในกรณีของการสกัดโลหะโดยใช้ความร้อนนั้น มีข้อดีคือ สามารถที่จะทำการรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้ทุกชนิดโดยไม่จำกัดส่วนผสมทางเคมี มีขั้นตอนที่น้อยกว่ากรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดโลหะอาจอยู่ในรูปของสารประกอบโลหะ โลหะออกไซด์ โลหะและโลหะผสม ส่วนข้อเสียคือ เป็นวิธีการที่ใช้พลังงานสูงเพราะต้องให้ความร้อน และใช้อุณหภูมิสูง เครื่องมือและอุปกรณ์มีราคาแพง เกิดควันและมลภาวะที่เป็นแก๊ส ความสามารถในการแยกแยะหรือสกัดโลหะออกมาแต่ละตัวให้แยกจากกันทำได้ยาก ส่วนในกรณีของการสกัดโลหะด้วยสารละลายนั้น มีข้อดีคือ สามารถที่จะทำการรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้ทุกชนิด ทุกส่วนผสมทางเคมี ใช้พลังงานน้อยในการสกัดเนื่องจากสามารถทำการสกัดหรือรีไซเคิลได้ที่อุณหภูมิต่ำ ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์น้อยกว่าและมีราคาต่ำกว่าโดยจะใช้เทคนิคในการสกัดแทน มีความยืดหยุ่นหรือความสามารถในการแยกแยะหรือสกัดโลหะออกมาแต่ละตัวให้แยกจากกันทำได้ดีกว่าแบบแรก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดโลหะจะอยู่ในรูปของสารประกอบของโลหะ ส่วนข้อเสียคือ มีขั้นตอนในการสกัดมากกว่า ใช้สารเคมีปริมาณมากในการสกัด ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียและสารเคมีจากกระบวนการ

ตัวอย่างกรรมวิธีในการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ได้มีการศึกษาและรายงานไว้ก่อนหน้านี้นี้แสดงดังข้อมูลในตารางที่ 2.4 ซึ่งในแต่ละวิธีก็จะมี ความแตกต่างกันของกระบวนการ ไปจนถึงผลผลิตหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิล และการนำผลผลิตที่ได้เหล่านี้ไปใช้งานในทางอุตสาหกรรม

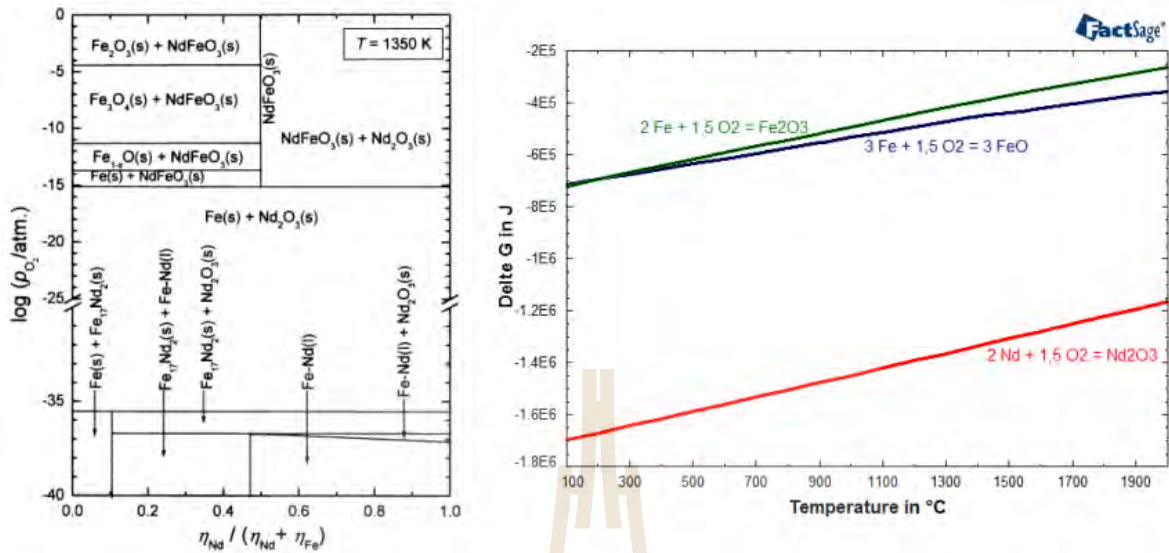


ตารางที่ 2.4 ข้อมูลรายงานเกี่ยวกับกรรมวิธีในการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ได้ศึกษาก่อนหน้านี้

กรรมวิธีในการรีไซเคิล	ผู้ศึกษาและวิจัย
การรีไซเคิลด้วยกระบวนการสกัดด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับกระบวนการสกัดด้วยการใช้สารละลาย	D. Vobenkaul และคณะ, 2013
การสกัดโลหะนีโอดีเมียมจากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย	C.H. Lee และคณะ, 2013
การสกัดนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากผงตะกอนแม่เหล็ก Nd-Fe-B (magnetic waste sludge) ที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตแม่เหล็กด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย	J.P. Rabatho และคณะ, 2013
การสกัดเอาโลหะนีโอดีเมียมจากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อนร่วมกับกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลาย	S.T. Abrahams และคณะ, 2015
การรีไซเคิลด้วยกระบวนการ Liquid Metal Extraction (LME)	O. Takada และคณะ, 2006 และ M. Sun และคณะ, 2015
การรีไซเคิลด้วยการกำจัดคาร์บอนและออกซิเจน	A. Saguchi และคณะ, 2006
การรีไซเคิลด้วยกระบวนการสกัดด้วยการใช้สารละลายที่ปราศจากการใช้สารละลายกรดและด่าง	C. Fredericci และคณะ, 2014
การรีไซเคิลด้วยวิธีการ Hydrothermal Treatment	T. Itakura และคณะ, 2006
การรีไซเคิลด้วยวิธีการ HD/Degassing Process	M. Zakotnik และคณะ, 2008
และการรีไซเคิลด้วยวิธีการนำกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	T. Horikawa และคณะ, 2006

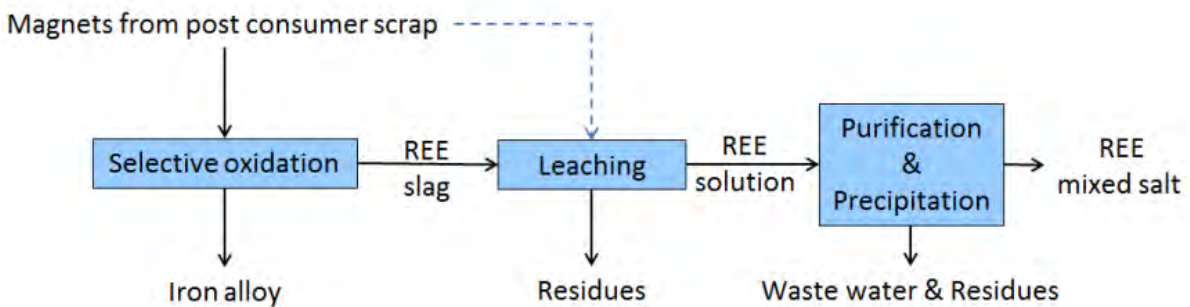
D. Vobenkaul และคณะ (2013) ได้ทำการทดลองสกัดเอาโลหะหายาก (rare earth elements, REEs) จากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่เป็นชิ้นส่วนในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้กรรมวิธีการสกัดด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับกรรมวิธีการสกัดด้วยการใช้สารละลายในการสกัดเอาโลหะหายาก ได้แก่ นีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีอยู่ในแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) ซึ่งจะมีปริมาณนีโอดีเมียมและโลหะหายากในส่วนผสมของแม่เหล็กมากกว่า 30% ซึ่งนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีส่วนผสมอยู่ในแม่เหล็กจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีกว่าเหล็กหรือมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs Free Energy) ที่ติดลบและมีค่าต่ำกว่ามาก ทำให้เกิดเป็นออกไซด์ได้ง่ายหรือเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพมากกว่าเหล็กในทุกช่วงอุณหภูมิ โดยนีโอดีเมียมจะถูกออกซิไดซ์ให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ ในขณะที่เหล็กจะถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของโลหะ ดังข้อมูลแสดงในรูปที่ 2.9 จากแนวคิดนี้จึงทำการเลือกสกัดหรือแยกเอานีโอดีเมียม (Nd) และโลหะหายากออกมาจากเหล็ก ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่มีออกซิเจนทำให้เกิดการออกซิไดซ์ของโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากให้อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ไซด์ ( $Nd_2O_3$ ) และเหล็กถูกรีดิวซ์ให้มาอยู่ในรูปของโลหะเหล็ก (Fe) ซึ่งจะทำให้เนโอดีเมียมและโลหะหายากเหล่านี้ไปอยู่ในรูป

ของตะกรันออกไซด์ (Oxide slag) ที่มีโลหะหายากอยู่ในปริมาณสูง โดยจะเรียกขั้นตอนการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อน (Pyrometallurgy) ในขั้นตอนนี้ว่า “Selective Oxidation หรือ Thermal Oxidation”



รูปที่ 2.9 แผนภูมิเฟสของระบบ Fe-Nd-O ที่อุณหภูมิ 1,077°C และแผนภูมิเอลลิงแฮม (Ellingham diagram) ของระบบออกไซด์เฟสระหว่าง Fe-Nd-O ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100°C – 2,000°C (D. Vobenkaul และคณะ, 2013)

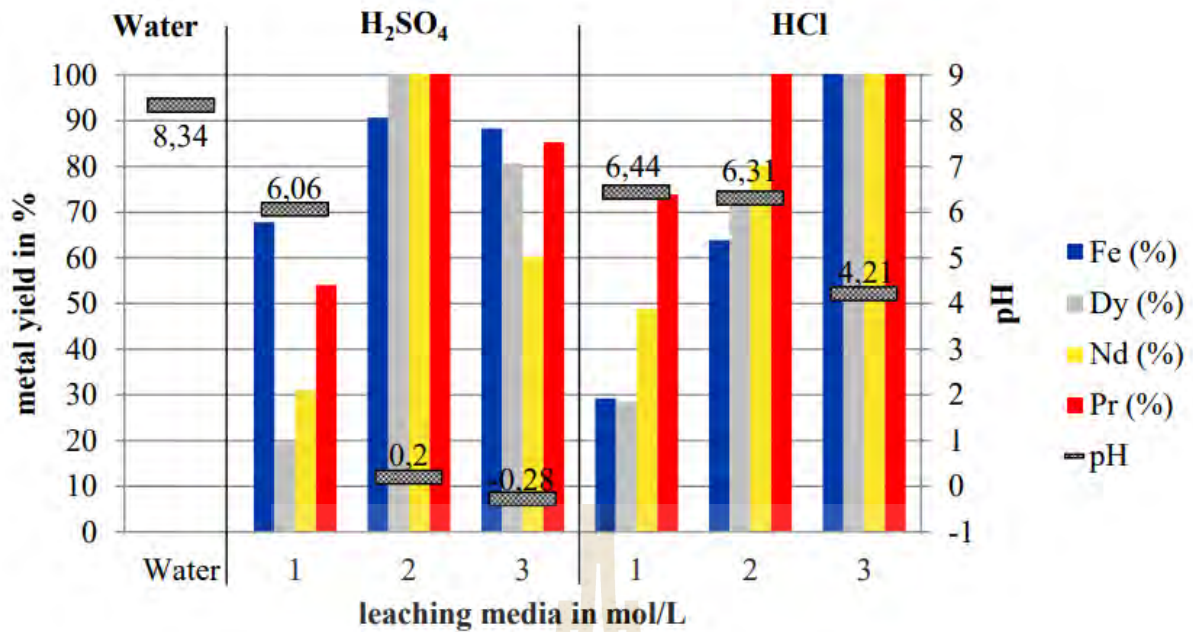
จากนั้นจะแยกเอานีโอดีเมียมหรือโลหะหายากออกมาจากตะกรันออกไซด์ที่มีปริมาณนีโอดีเมียมสูง โดยนำตะกรันที่ได้ไปผ่านวิธีการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย โดยการชะละลาย (Leaching) เอานีโอดีเมียมหรือโลหะหายากให้ละลายลงไปอยู่ในสารละลาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโลหะหายากจะสามารถละลายได้ในสารละลายกรด เช่น กรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นจะนำสารละลายที่มีนีโอดีเมียมหรือโลหะหายากละลายอยู่ไปผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ เพื่อที่จะแยกเอานีโอดีเมียมหรือโลหะหายากออกมาจากสารละลาย เช่น การแยกโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction) หรือการทำให้ตกตะกอนของแข็งออกมาจากสารละลาย เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบของเกลือที่มีองค์ประกอบของโลหะหายาก โดยวิธีการในการรีไซเคิลแม่เหล็กหรือการสกัดเอาโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกมาจากแม่เหล็กที่ Nd-Fe-B ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แผนผังขั้นตอนในการรีไซเคิลเพื่อสกัดเอาโลหะหายากออกมาจากแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยวิธีการสกัดโลหะด้วยการใช้ความร้อนร่วมกับวิธีการสกัดโลหะด้วยการใช้สารละลาย (D. Vobenkaul และคณะ, 2013)

รายละเอียดในการทดลองในขั้นตอนของการทำ Selective Oxidation เพื่อที่จะแยกนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกจากเหล็กนั้น แม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่จะนำมารีไซเคิลจะถูกหลอมในเตาไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยบรรยากาศที่ปกคลุมด้วยก๊าซอาร์กอน เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันจากออกซิเจนภายนอก ภายใต้ความดัน 700 มิลลิบาร์ (mBar) ในการใช้ออกซิเจนเพื่อเลือกออกซิไดซ์เอาเฉพาะนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกมานั้น อาจทำได้ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้ก๊าซออกซิเจนผสมในก๊าซอาร์กอน หรือการใช้เหล็กออกไซด์ ซึ่งเหล็กออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ในขณะที่นีโอดีเมียมและโลหะหายากจะออกซิไดซ์โดยทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีอยู่ ซึ่งอาจใช้ทั้งสองอย่างร่วมกันโดยจะพ่นก๊าซผสมลงไปในเตา หรือทำการป้อนเหล็กออกไซด์ลงไปแม่เหล็กหลอมเหลว และจากการทดลองนี้ยังพบปัญหาในการแยกเอาออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกจากเหล็กที่ถูกรีดิวซ์แล้ว อีกทั้งพบว่าการออกซิไดซ์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากจะเกิดขึ้นที่เฉพาะบริเวณผิวเป็นส่วนใหญ่ซึ่งไม่สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งหมด

จากนั้นขยะแม่เหล็กที่ผ่านขั้นตอน Selective Oxidation มาแล้วจะถูกนำมาชะละลายในกรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก ได้มีการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในการชะละลายนีโอดีเมียมและโลหะหายาก และอัตราส่วนของปริมาณระหว่างตะกั่วออกไซด์ที่อยู่ในรูปของแข็งต่อสารละลายที่มีสัดส่วน 1:10 โดยพบว่ากรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ที่มีความเข้มข้น 2 โมล/ลิตร หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้น 3 โมล/ลิตร สามารถที่จะละลายนีโอดีเมียมและโลหะหายากได้ทั้งหมด โดยถ้าความเข้มข้นมากกว่านี้จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิต (Yield) ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากลดลง และถ้าความเข้มข้นน้อยกว่านี้จะทำให้การชะละลายไม่สมบูรณ์ดังข้อมูลแสดงในรูปที่ 2.11 ธาตุมลทินจากสารละลาย เช่น เหล็ก จะถูกแยกออกมาโดยใช้วิธีการตกตะกอนของแข็ง โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ปรับค่า pH ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสกัดเอาโลหะหายากออกมาแล้วนั้นแสดงในตารางที่ 2.5 พบว่าวิธีการตกตะกอนของแข็งนั้นสามารถทำให้ได้สารประกอบของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่สกัดได้มีความเข้มข้นสูงกว่า 95% โดยน้ำหนัก ในช่วงค่า pH 2-3 ซึ่งมีปริมาณเหล็กเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากข้อมูลดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนของแข็งเพื่อแยกเอาโลหะหายากออกจากสารละลายจะให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าการตกตะกอนที่ค่า pH สูง ซึ่งจะทำให้มีปริมาณเหล็กเจือปนอยู่ในปริมาณสูง แต่ยังคงพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ผลผลิตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่ค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 2.11 ข้อมูลผลผลิต (Yield) จากการชะละลายโดยตรงแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (D. Vobenkaul และคณะ, 2013)

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของตะกอนภายหลังขั้นตอนการตกตะกอนของแข็งจากสารชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ที่มีความเข้มข้น 2 โมล/ลิตร (อัตราส่วนระหว่างตะกอนออกไซด์ที่อยู่ในรูปของแข็งต่อสารชะละลาย (solid/liquid ratio, 1/10) (D. Vobenkaul และคณะ, 2013)

pH	RE (purity) in wt.%	RE (yield) in wt.%	Contaminations in wt.%	
			Fe	rest
2	98.47	29.82	0.31	1.23
3	97.23	32.23	1.49	1.28
6	83.42	28.01	10.69	5.89
7	86.12	59.55	9.44	4.44

C.H. Lee และคณะ (2013) ได้ศึกษาวิธีการสกัดโลหะนีโอดีเมียมจากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลายด้วยวิธีการง่ายๆ เกี่ยวกับการชะละลายและเลือกตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับแยกหรือสกัดเอาโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายาก โดยสามารถที่จะสกัดเอานีโอดีเมียมออกมาจากแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้ทั้งหมด ซึ่งขั้นตอนหลักๆ ประกอบไปด้วย การเตรียมขยะแม่เหล็กเพื่อเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล และขั้นตอนการสกัดทางด้านโลหวิทยา โดยมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้คือ การสลายความเป็นแม่เหล็ก (demagnetization) การบด (grinding) การแยกขนาด (screening) การชะละลายแม่เหล็กให้ไปอยู่ในสารละลาย (leaching) และการตกตะกอนของแข็งเพื่อแยกเอาโลหะหายากออกมาจากสารละลาย



ในการศึกษาการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็กของขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่จะนำมารีไซเคิลนั้นจะทดลองที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 250-450°C และใช้เวลาตั้งแต่ 15-60 นาที พบว่าที่อุณหภูมิ 300°C ต้องใช้เวลาในการเผาให้ความร้อน 60 นาทีจึงสามารถที่จะสลายความเป็นแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์ ในขณะที่อุณหภูมิ 350°C และ 450°C สามารถทำการเผาชิ้นงานเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์ ในทุกช่วงเวลาที่ทำการทดลอง ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.6

ในการชะละลายขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้มีการทดลองใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) และกรดซัลฟิวริก (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เป็นต้น พบว่ากรดที่มีความเหมาะสมสำหรับการชะละลายขยะแม่เหล็ก คือ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟิวริก ดังข้อมูลแสดงผลของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการชะละลายในตารางที่ 2.7-2.10 โดยพิจารณาจากปัจจัยหรือตัวแปรด้านต่างๆ แล้ว เช่น เวลาในการชะละลาย (leaching time) ความเข้มข้นของสารที่ใช้ในการชะละลาย (concentration of leaching reagent) อุณหภูมิในการชะละลาย (temperature) และสัดส่วนของแข็งต่อของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย (solid/liquid ratio)

**ตารางที่ 2.6** เวลาและอุณหภูมิในการสลายความเป็นแม่เหล็กของแม่เหล็ก Nd-Fe-B

(C.H. Lee และคณะ, 2013)

Temperature [K (°C)]	Time (Min)		
	15	30	60
523 (250)	Not removal	Not removal	Not removal
573 (300)	Not removal	Partial removal	Total removal
623 (350)	Total removal	Total removal	Total removal
723 (450)	Total removal	Total removal	Total removal

**ตารางที่ 2.7** ข้อมูลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การละลายของนีโอดีเมียม เหล็ก และโบรอน ด้วยสารชะละลายที่อุณหภูมิ 27°C และ 70°C (C.H. Lee และคณะ, 2013)

Reagents	%Leaching Recovery at 27°C			%Leaching Recovery at 70°C		
	Nd	Fe	B	Nd	Fe	B
6N NaOH	0	0.84	44.44	0	0.84	57.94
6N HCl	100	100	91.27	100	100	94.44
6N HNO <sub>3</sub>	100	100	92.06	100	100	100
6N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	100	100	94.44	100	100	92.86

ตารางที่ 2.8 ข้อมูลการชะละลายนิกเกิลและโบรอน ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก

(C.H. Lee และคณะ, 2013)

Time (Min)	%Leaching Recovery with HCl			%Leaching Recovery with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	Nd	Fe	B	Nd	Fe	B
1	82.19	77.48	66.67	100	100	97.62
5	100	100	80.95	100	100	96.03
10	100	100	86.51	98.82	100	92.86
15	99.57	99.47	100	100	100	100
30	100	100	100	100	100	100
45	99.78	100	100	100	100	100
60	99.78	100	100	100	100	97.62
90	99.86	100	100	100	100	97.62
120	100	100	91.27	100	100	94.40

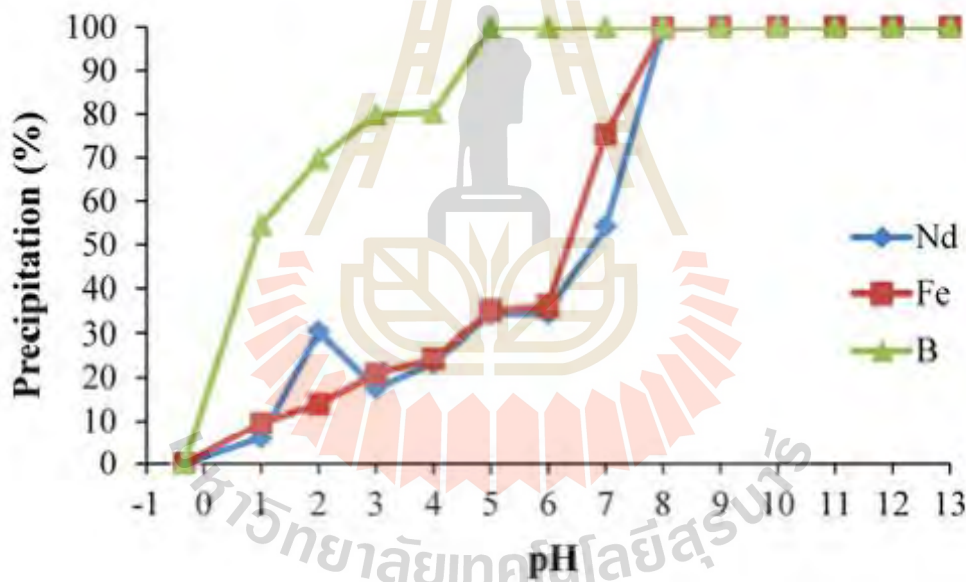
ตารางที่ 2.9 ผลของความเข้มข้นของสารชะละลายต่อปริมาณธาตุนิกเกิลและโบรอน ที่ได้จากการชะละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก (C.H. Lee และคณะ, 2013)

Concentration (M)	%Leaching Recovery with HCl			%Leaching Recovery with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	Nd	Fe	B	Nd	Fe	B
0.1	5.56	12.95	31.75	5.02	14.82	42.06
0.5	13.34	42.43	53.97	5.64	2.55	68.25
1	69.4	65.24	65.08	8.14	100	100
3	100	100	88.71	100	100	99.47
6	99.57	99.47	100	100	100	100

ตารางที่ 2.10 ผลของปริมาณสัดส่วนของแข็งต่อของเหลว (S/L) ในการชะละลายนิกเกิลและโบรอน ด้วยกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก (C.H. Lee และคณะ, 2013)

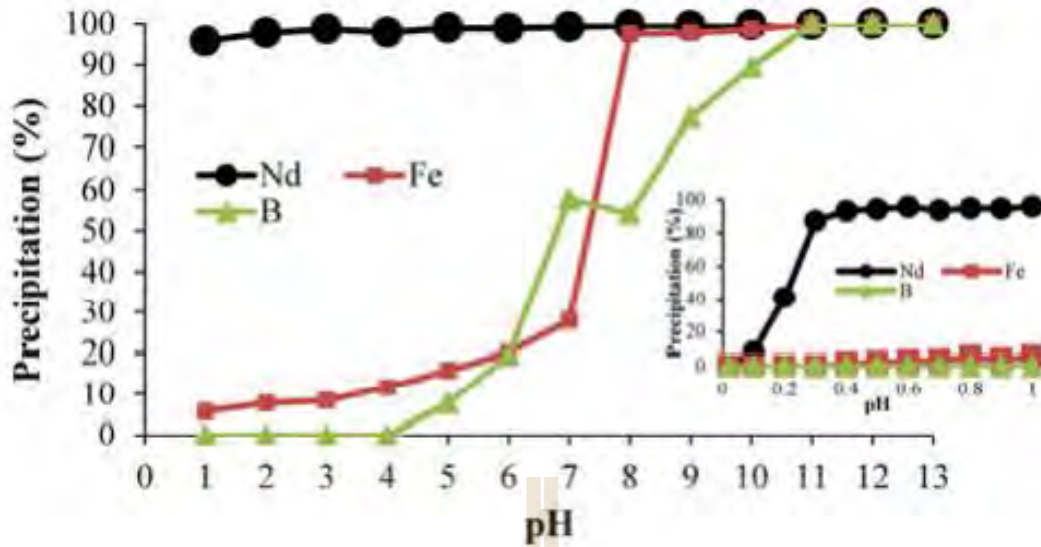
S/L Ratio (g/mL)	%Leaching Recovery with HCl			%Leaching Recovery with H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
	Nd	Fe	B	Nd	Fe	B
0.02 (1g/50mL)	100	100	88.71	100	100	99.47
0.04 (2g/50mL)	33.58	90.56	80.95	7.62	8.61	100
0.1 (5g/50mL)	33	85	77.78	9.47	100	100

เมื่อได้สารชะละลายที่มีปริมาณการละลายของโลหะต่างๆ ลงไปในสารละลายทั้งหมดหรือในปริมาณสูงแล้ว จะนำสารชะละลายดังกล่าวไปทำการตกตะกอนของแข็ง เอาโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายตกตะกอนแยกตัวออกมาอยู่ในรูปของแข็งในลักษณะของสารประกอบ S.R. Rao (2011) ระบุว่าใช้วิธีการตกตะกอนของแข็งด้วยการปรับค่า pH ของสารชะละลายด้วยสารละลายต่างๆที่เป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำได้ตะกอนของแข็งของนีโอดีเมียมตกตะกอนออกมาอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต โดยในการทดลองนี้สารชะละลายที่ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ pH -0.34 และสารชะละลายที่ละลายด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ pH 0.02 จะนำมาตกตะกอนของแข็งโดยทำการปรับค่า pH ด้วยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ค่า pH เท่ากับ -0.34 จนถึง 13 จากนั้นจะทำการวัดปริมาณความเข้มข้นของโลหะในสารละลาย ได้แก่ โลหะนีโอดีเมียม เหล็ก และโบรอน ด้วยเทคนิค ICP-AES โดยจะทำการคำนวณสัดส่วนที่หายไปจากสารชะละลายตอนเริ่มต้นก็จะสามารถบอกปริมาณเปอร์เซ็นต์ของโลหะที่ตกตะกอนออกมาจากสารชะละลายได้ ดังข้อมูลแสดงเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนของโลหะโลหะนีโอดีเมียม เหล็ก และโบรอน จากสารชะละลายของกรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ที่ค่า pH ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.12 ผลของค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอนของแข็งจากสารชะละลายที่ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl leached solution) (C.H. Lee และคณะ, 2013)

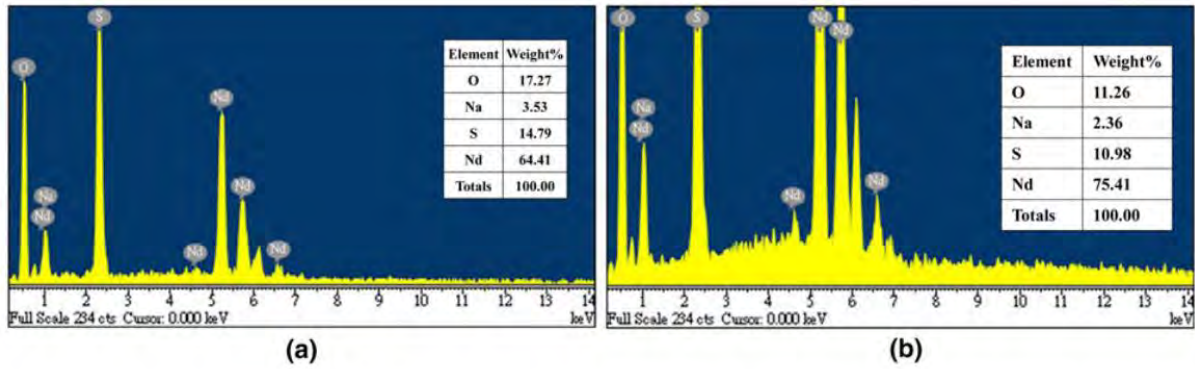




รูปที่ 2.13 ผลของค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอนของแข็งจากสารละลายที่ละลายด้วยกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$  leached solution) (C.H. Lee และคณะ, 2013)

การตกตะกอนของแข็งจากสารละลายกรดไฮดรอกลอริกดังแสดงในรูปที่ 2.12 พบว่าไม่สามารถที่จะทำการสกัดหรือแยกเอาโลหะนีโอดีเมียมออกจากเหล็กและโบรอนได้เลยตลอดช่วง pH ที่เกิดการตกตะกอนของแข็งทั้งหมด อีกทั้งเหล็กและนีโอดีเมียมยังเกิดการตกตะกอนออกมาพร้อมๆ กันในอัตราที่ต่ำในช่วง pH ตั้งแต่ค่า pH เริ่มต้นจนกระทั่งถึงค่า pH เท่ากับ 6 จากนั้นจะตกตะกอนออกมาจากสารละลายในอัตราที่สูงในช่วง pH 6-8 จนกระทั่งตกตะกอนโลหะออกจากสารละลายทั้งหมด 100% ที่ค่า pH เท่ากับ 8 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้โดย W. Xinchao และคณะ (2005) ได้มีการระบุว่าเหล็กจะเกิดการตกตะกอนออกมาจากสารละลายทั้งหมดที่ค่า pH เท่ากับ 8

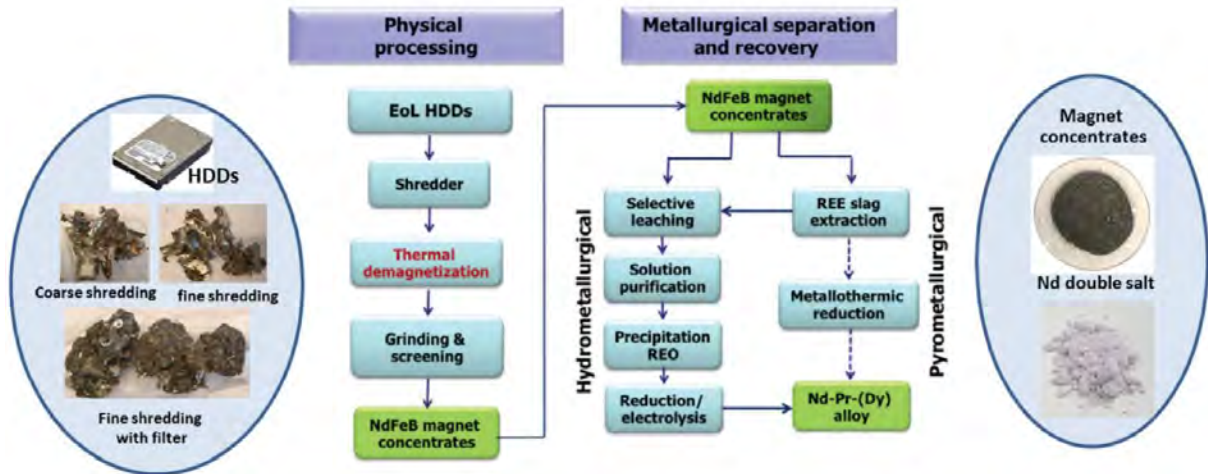
ส่วนในกรณีการตกตะกอนของแข็งจากสารละลายกรดซัลฟิวริกดังแสดงในรูปที่ 2.13 พบว่านีโอดีเมียมจะเริ่มตกตะกอนออกมาจากสารละลายตั้งแต่ค่า pH > 0.1 และตกตะกอนออกมาเกือบทั้งหมดที่ค่า pH เท่ากับ 0.6 ตามด้วยเหล็กที่เริ่มตกตะกอนที่ค่า pH > 0.4 โดยเหล็กจะตกตะกอนออกมาทั้งหมดที่ค่า pH เท่ากับ 8 ส่วนโบรอนจะเริ่มตกตะกอนที่ค่า pH เท่ากับ 4 และตกตะกอนออกมาทั้งหมดที่ค่า pH 11-12 ซึ่งจากข้อมูลนี้ทำให้สามารถที่จะทำการแยกสกัดเอาโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกจากเหล็กและโบรอนด้วยวิธีการตกตะกอนของแข็งจากสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ค่า pH เท่ากับ 0.6 ซึ่งจะได้นีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูงที่สุด โดยตะกอนของแข็งของนีโอดีเมียมที่ได้หลังจากนำไปตรวจสอบด้วย SEM-EDS แสดงผลดังในรูปที่ 2.14 พบว่ามีองค์ประกอบของธาตุนีโอดีเมียม ซัลเฟอร์ โซเดียม และออกซิเจน ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมโซเดียมซัลเฟต ไม่พบการเจือปนของเหล็กและโบรอน เมื่อล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดโซเดียมซัลเฟตออกไปจะทำให้ปริมาณความเข้มข้นของนีโอดีเมียมมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.14 (b)



รูปที่ 2.14 ผลวิเคราะห์ด้วย SEM-EDS ของตะกอนของแข็งของนีโอดีเมียมที่ได้จากการตกตะกอนจากสารละลายที่ละลายด้วยกรดซัลฟิวริก ก่อนและหลังการล้างด้วยน้ำร้อนเพื่อกำจัดโซเดียมซัลเฟตในตะกอนออกไป (C.H. Lee และคณะ, 2013)

J.P. Rabatho และคณะ (2013) ได้ศึกษาวิธีการสกัดนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากผงตะกอนแม่เหล็ก Nd-Fe-B (magnetic waste sludge) ที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิตแม่เหล็ก ด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะโดยใช้สารละลาย โดยการใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) สำหรับการชะละลายผงแม่เหล็กพร้อมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ช่วยสำหรับทำให้เกิดการละลายของโลหะได้ดียิ่งขึ้น สารละลาย HNO<sub>3</sub> ที่มีความเข้มข้น 1 M ร่วมกับ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่มีความเข้มข้น 0.3 M สามารถชะละลายนีโอดีเมียมลงไปอยู่ในสารละลายได้ถึง 98% และไดสพรอเซียมละลายลงไปในการละลายได้ถึง 81% ในขณะที่เหล็กละลายลงไปได้เพียง 15% ในเวลา 15 นาที และในขั้นตอนการตกตะกอนของแข็งนั้น โลหะเหล็กสามารถตกตะกอนออกมาได้ทั้งหมดที่ค่า pH เท่ากับ 3 ในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)<sub>3</sub>) ตามด้วยการตกตะกอนของนีโอดีเมียมและไดสพรอเซียม การตกตะกอนด้วยกรดออกซาลิก (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) สามารถตกตะกอนเอาโลหะนีโอดีเมียมและไดสพรอเซียมออกมาจากสารละลายได้ถึง 91.5% และ 81.8% ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำตะกอนของแข็งของนีโอดีเมียมและไดสพรอเซียมไปทำการเผา (calcination) ที่อุณหภูมิ 800°C ให้ได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบที่อยู่ในรูปออกไซด์ (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่มีความบริสุทธิ์ถึง 68%

S.T. Abrahami และคณะ (2015) ได้ศึกษาวิธีการสกัดโลหะนีโอดีเมียมจากขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่เป็นชิ้นส่วนอุปกรณ์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในงานวิจัยนี้มีการใช้วิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อนร่วมกับวิธีการสกัดด้วยสารละลาย (Pyro-Hydro Metallurgical Process) ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการรีไซเคิลดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กระบวนการในการสกัดโลหะหายากจากขยะแม่เหล็กที่ใช้งานแล้วในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (S.T. Abrahami และคณะ, 2015)

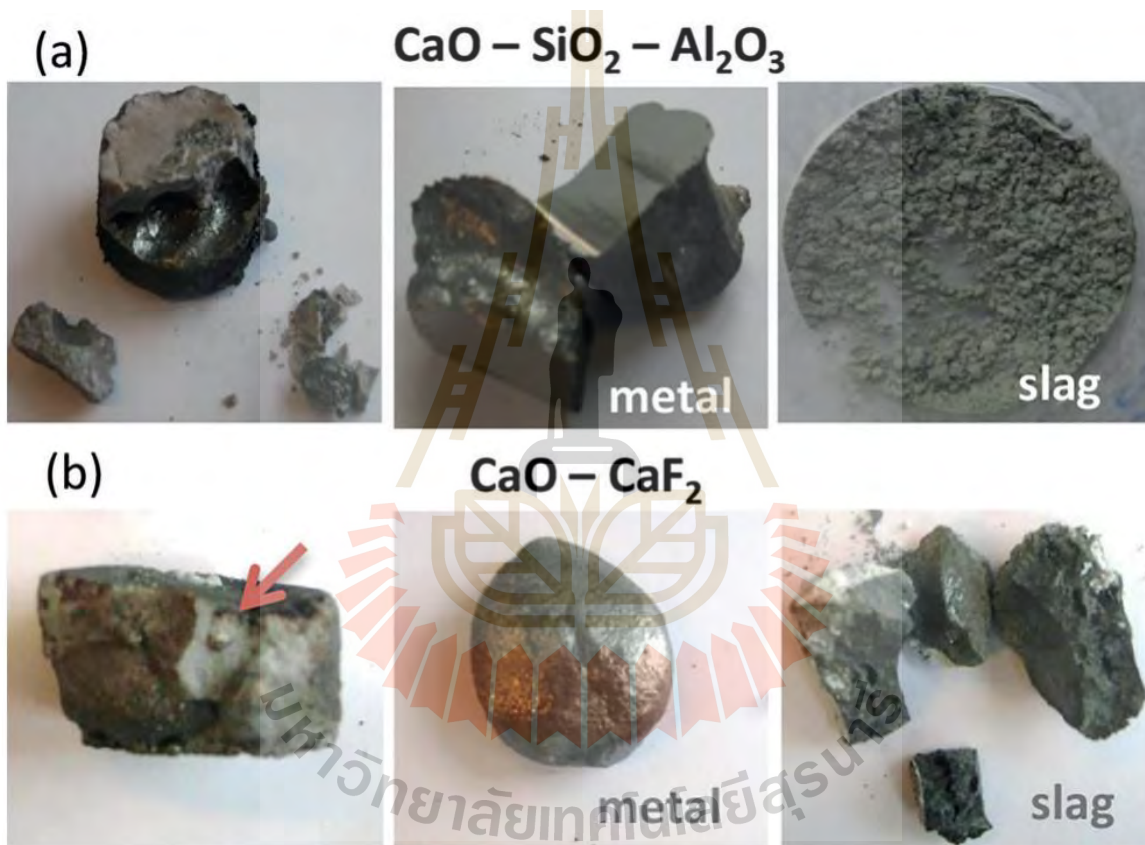
โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการสกัดอยู่ 2 แนวทางด้วยกัน คือ แนวทางแรกจะเป็นการหลอมโดยใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้สแลกเกิดการหลอมละลายและสกัดเอาโลหะหายากที่อยู่ในแม่เหล็กให้มาอยู่ในรูปของออกไซด์หรือสแลก จากนั้นนำออกไซด์ของโลหะหายากไปทำการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก วิธีนี้พบว่าระบบสแลกที่ใช้ในการหลอมทั้ง 2 ระบบ ได้แก่  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CaO-CaF}_2$  สามารถสกัดโลหะหายากให้มาอยู่ในสแลกได้สูงถึง 99% ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 2.11 และรูปที่ 2.16 แต่ไม่สามารถที่จะชะละลายเพื่อแยกเอาโลหะหายากออกจากออกไซด์สแลกไปอยู่ในรูปของสารละลายได้ ส่วนแนวทางที่สองจะนำขยะแม่เหล็กที่ผ่านการคัดแยกและการเตรียมขยะ เพื่อให้มีความเข้มข้นหรือมีเปอร์เซ็นต์ของโลหะหายากเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการสกัดทางด้านโลหะ จากนั้นนำไปชะละลายโดยตรง โดยที่ไม่ต้องผ่านการเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง พบว่าสามารถที่จะชะละลายโลหะหายากลงไปอยู่ในสารละลายได้สูงถึง 97.5% แล้วจึงนำไปทำให้บริสุทธิ์ด้วยการตกตะกอนของแข็งให้อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตหรือเกลือของโลหะหายาก ดังผลแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ( $\text{R}_2\text{O}_3$ ) หรือสารประกอบฟลูออไรด์ ( $\text{RF}_3$ ) ที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้นในการผลิตเป็นแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง ดังแผนผังแสดงในรูปที่ 2.18



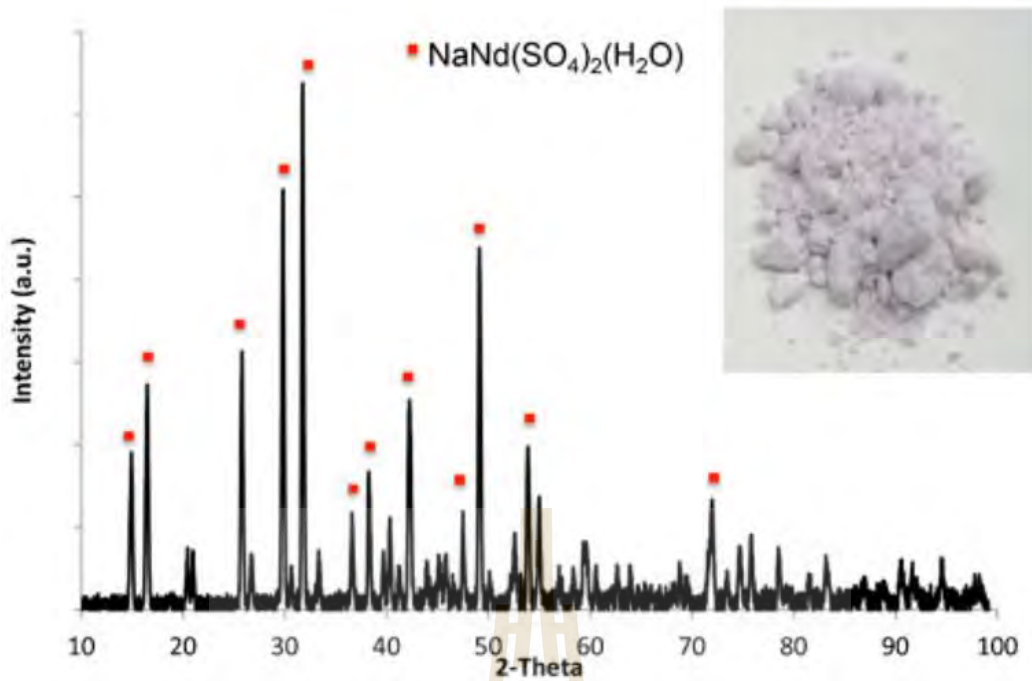
ตารางที่ 2.11 ความแตกต่างของการทดลองสกัดโลหะด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,500°C เพื่อสกัดโลหะหายากให้ไปอยู่ในสแลก (S.T. Abrahami และคณะ, 2015)

Slag	Test No.	Scrap	S/M ratio		Slag composition (wt-%)						Metal composition (wt-%)							
			Before	After	Nd	Pr	Tb	Ca	Si	Al	Fe	Fe	Ni	Co	Si	Cr	Mn	Nd
CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1*	Upgraded, (339.4 g)	0.2	0.6	34.0	4.4	0.2	19.8	10.2	17.0	5.4	93.0	2.4	1.1	1.1	1.0	0.3	0.0
	2	As-received, (30.4 g)	0.4	0.8	25.3	4.4	0.1	21.5	11.6	9.6	0.6	92.6	1.8	1.4	1.6	1.0	0.4	-
CaO-CaF <sub>2</sub>	3	Upgraded, (454.4 g)	0.2	0.8	35.5	4.1	0.3	27.6	1.5	1.6	4.1	89.7	3.4	0.8	0.3	0.5	0.4	0.0
	4	As-received, (30.4 g)	0.4	0.7	23.6	3.1	0.1	51.1	0.7	0.5	0.5	94.5	1.9	1.1	0.2	0.7	0.3	-

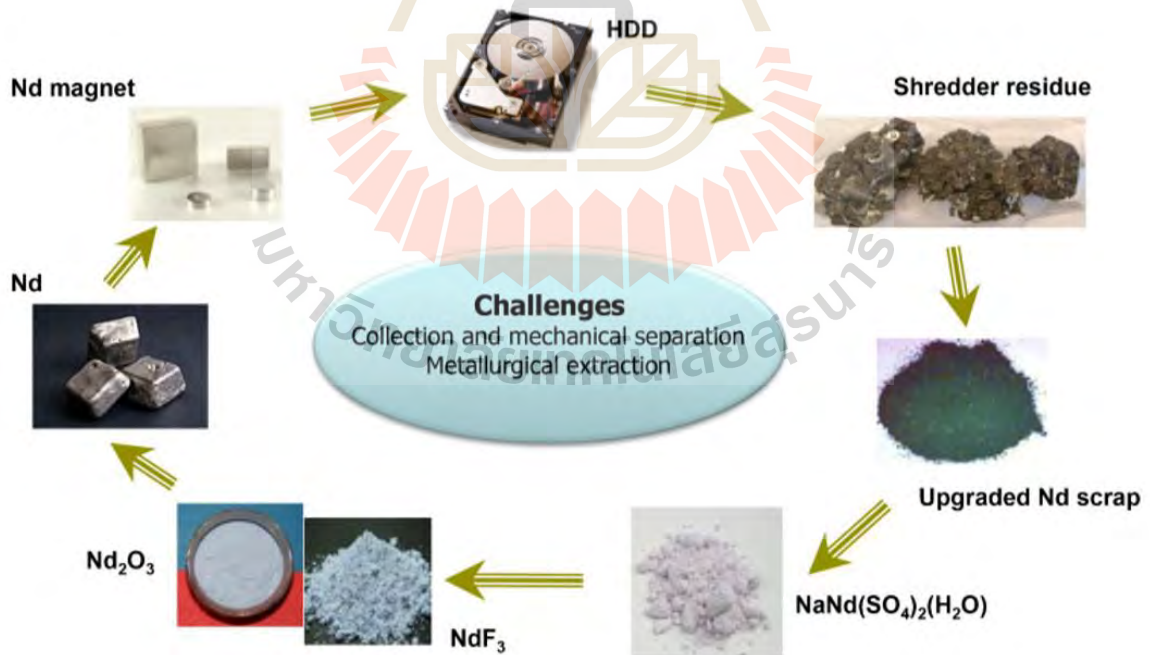
\*Alumina crucible was used instead of graphite.



รูปที่ 2.16 โลหะและสแลกที่ได้จากการทดลองสกัดโลหะด้วยความร้อน (a) กรณีการทดลองที่ 2 (Test No. 2) และ (b) กรณีการทดลองที่ 3 (Test No. 3) ดังข้อมูลในตารางที่ 2.11 (S.T. Abrahami และคณะ, 2015)



รูปที่ 2.17 ผลวิเคราะห์ XRD ของตะกอนนีโอดีเมียมที่ได้จากการตกตะกอนของแข็ง ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมซัลเฟต (Nd-double salt sulfate) (S.T. Abrahami และคณะ, 2015)

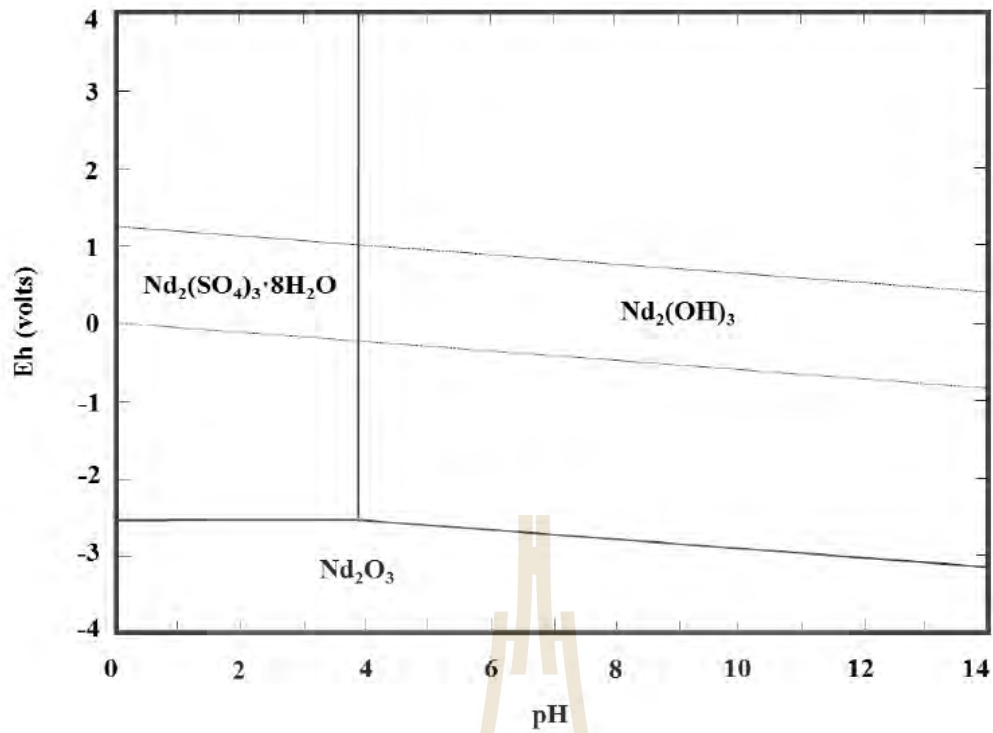


รูปที่ 2.18 วงจรการนำโลหะนีโอดีเมียมจากชิ้นส่วนแม่เหล็กที่ใช้งานแล้วในอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาใช้งานใหม่เพื่อผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B (S.T. Abrahami และคณะ, 2015)

อีกทั้งจากข้อมูลการรายงานของ H.S. Yoon และคณะ (2014) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 พบว่ามีความเป็นไปได้ในการเปลี่ยนสารประกอบนีโอดีเมียมซัลเฟตให้ไปอยู่ในรูปของนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ด้วยการปรับค่า pH ไปที่ค่ามากกว่า 4 หรือไปยังค่าที่มีความเป็นด่างสูงก่อน จากนั้นค่อยเปลี่ยนให้สารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ไปอยู่ในรูปของนีโอดีเมียมออกไซด์ในขั้นสุดท้าย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลเพื่อนำขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B กลับมาใช้งานใหม่นั้น พบว่าสามารถใช้เทคนิคและวิธีการที่หลากหลาย และแต่ละวิธีการก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน อีกทั้งยังมีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลที่หลากหลายแตกต่างกัน ซึ่งวิธีการที่มีความเป็นไปได้และใช้ในการศึกษาเพื่อรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B อย่างแพร่หลาย ได้แก่ กรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อน และกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลาย หรืออาจใช้ทั้งสองกรรมวิธีร่วมกันในการสกัดโลหะในหลายๆ งานวิจัย เพื่อนำข้อดีของแต่ละวิธีมาประยุกต์ใช้สำหรับการรีไซเคิลให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

อีกทั้งจากข้อมูลปริทรรศน์วรรณกรรมข้างต้น พบว่าปริมาณหรือสัดส่วนการนำเอาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลหรือการสกัดโลหะหายากจากขยะแม่เหล็กให้มีศักยภาพเพื่อนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแม่เหล็กในทางการค้าในปัจจุบันยังถือว่ามีความปริมาณและสัดส่วนค่อนข้างต่ำ และจากรายงานพบว่าในปี ค.ศ. 2020 มีปริมาณไม่ถึง 5% (Y. Yang และคณะ, 2017) จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันและอนาคตยังมีความต้องการศึกษาเกี่ยวกับการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B เพื่อนำโลหะหายากที่อยู่ในขยะแม่เหล็กกลับไปใช้งานใหม่ จากข้อมูลงานวิจัยที่ได้ศึกษาข้างต้น มีความจำเป็นในการวิจัยเพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลกลับไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B โดยประเด็นที่น่าสนใจคือ การออกแบบกระบวนการเพื่อการพัฒนาหรือปรับปรุงให้ดีขึ้น ได้แก่ การชะละลายด้วยกรด การตกตะกอนของแข็งร่วมกับการใช้ความร้อน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีความบริสุทธิ์สูง ซึ่งจะถูกใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในทางอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดให้มีการนำไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมหรือทางการตลาด ดังวงจรที่แสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งจะเป็นการวิจัยที่ตอบโจทย์ภาวะความต้องการและการขาดแคลนโลหะหายากในตลาดโลก โดยการใช้แหล่งทรัพยากรโลหะหายากที่เป็นขยะของเสียจากการใช้งานในอุตสาหกรรมและครัวเรือนทดแทนการใช้แหล่งทรัพยากรจากธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการบริหารจัดการเกี่ยวกับการใช้ทรัพยากรที่ขาดแคลนและหายากเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและมีความยั่งยืนต่อไปในอนาคต ดังนั้นความสำคัญของงานวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนในครั้งนี้จึงเป็นการสร้างองค์ความรู้ภายในประเทศ ในการรีไซเคิลขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B ภายในประเทศที่หมดอายุหรือผ่านการใช้งานแล้วที่มีอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งในภาคครัวเรือนและอุตสาหกรรมให้ในการเพิ่มมูลค่าและนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ทั้งในด้านการศึกษา ด้านการพัฒนาและดราวิจัย ด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมอีกด้วย



รูปที่ 2.19 แผนภูมิ Eh-pH ของระบบ Nd-S-H<sub>2</sub>O ที่อุณหภูมิ 30 °C (H.S. Yoon และคณะ, 2014)



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในกระบวนการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูง Nd-Fe-B จากขยะอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การเตรียมการขยะแม่เหล็ก และกรรมวิธีการสกัดทางโลหะวิทยา

โดยในส่วนของการเตรียมขยะแม่เหล็กนั้น จะเป็นการเตรียมขยะให้มีความเหมาะสมต่อกรรมวิธีการสกัดทางโลหะวิทยาในขั้นถัดไป ได้แก่ การสลายความเป็นแม่เหล็ก และการย่อยขนาดแม่เหล็ก และในส่วน of กรรมวิธีการสกัดทางโลหะวิทยานั้นจะมีการประยุกต์ใช้วิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลายและวิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อน ได้แก่ การชะละลายแม่เหล็ก การตกตะกอนของแข็งโลหะจากสารละลาย การล้างตะกอนด้วยต่าง และการเผาตะกอนด้วยความร้อน ดังรายละเอียดกระบวนการรีไซเคิลและแผนผังกระบวนการรีไซเคิลที่แสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

**3.1.1. การเตรียมการขยะแม่เหล็ก (Magnet scrap preparation/Physical condition)** ศึกษาวิธีการคัดแยกและเตรียมขยะแม่เหล็กในเชิงกายภาพ โดยการคัดกรองขยะซึ่งจะทำการแยกเอาแม่เหล็ก Nd-Fe-B ออกจากชิ้นส่วนขยะอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากนั้นจะนำขยะแม่เหล็กมาทำการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก และทำการบดเพื่อลดขนาดให้เล็กลง

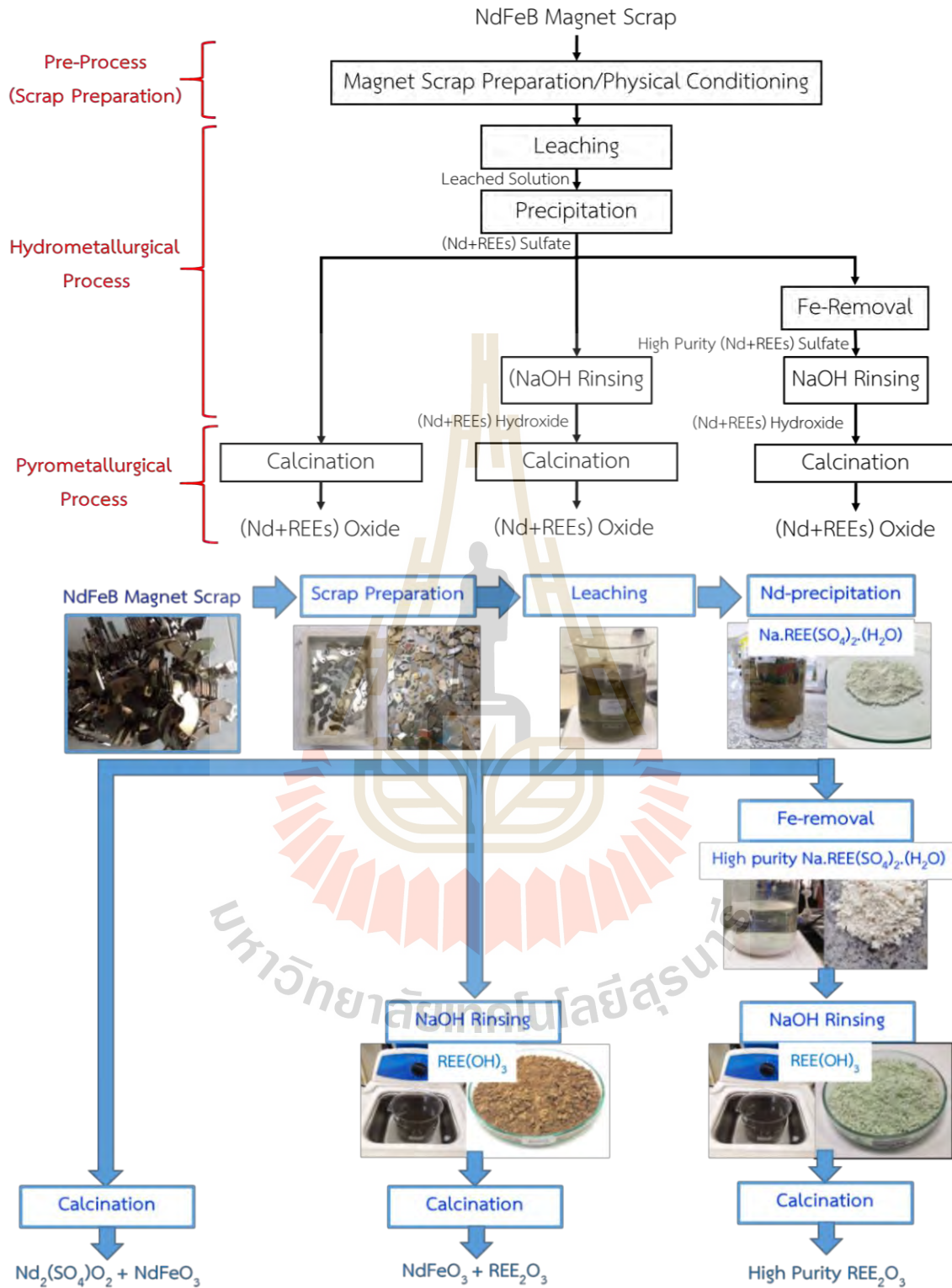
**3.1.2 กรรมวิธีการสกัดทางโลหะวิทยา (Metallurgical processing)** จะเป็นการสกัดโลหะนีโอดีเนียมโดยกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลาย ร่วมกับกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยความร้อน

3.1.2.1 ทำการชะละลายขยะแม่เหล็กด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ให้โลหะที่อยู่ในขยะแม่เหล็กลงไปอยู่ในสารละลาย

3.1.2.2 ทำการตกตะกอนของแข็งโลหะที่อยู่ในสารละลายด้วยการปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าที่เหมาะสมที่จะแยกตกตะกอนนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกมาจากสารละลาย โดยตะกอนของแข็งที่ได้จะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก

3.1.2.3 ล้างตะกอนของแข็งด้วยต่างเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ โดยทำการแช่และกวนด้วยเครื่องกวนแล้วทำการเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเพื่อให้สารประกอบไปอยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก

3.1.2.4 เผาตะกอนด้วยความร้อนเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์



รูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดกระบวนการ (Process route) และขั้นตอนในการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยกรรมวิธีการสกัดโลหะด้วยสารละลายร่วมกับกรรมวิธีการสกัดด้วยความร้อน

### 3.2 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีนีโอติเมียมเป็นองค์ประกอบจากชิ้นส่วนอุปกรณ์ฮาร์ดดิสไดรฟ์
2. กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ )
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วที่ใช้กับสารเคมี
5. ตู้ดูดควัน
6. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
7. เครื่องกวนด้วยแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
8. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH Meter)
9. เครื่องกรองและกระดาษกรอง
10. เตาอบให้ความร้อน (Muffle Furnace) ที่ให้อุณหภูมิสูงสุดได้ถึง  $1,200\text{ }^{\circ}C$
11. ภาอลูมินาสำหรับใส่ผงตะกอนของแข็งจากการทดลองเพื่อเผาที่อุณหภูมิสูง
12. อุปกรณ์ป้องกันเกี่ยวกับความปลอดภัยต่างๆ เช่น ถุงมือ หน้ากาก แวนตา ฯลฯ



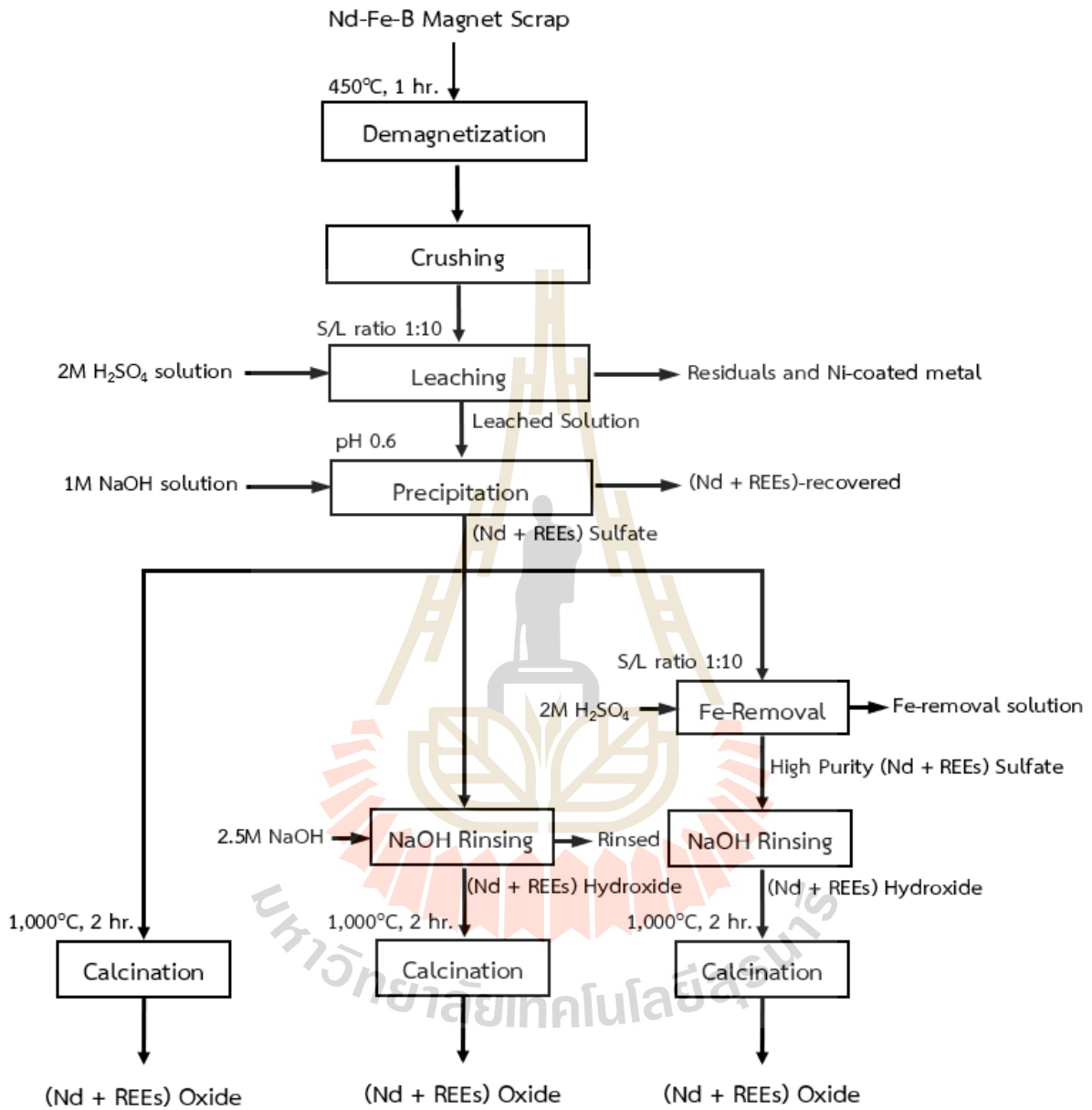
### 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ และข้อมูลผลการวิเคราะห์ที่ได้ในงานวิจัยนี้

อุปกรณ์	ตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์	ผลที่ได้จากการวิเคราะห์
Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy (WD-XRF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ขยะแม่เหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลอง</li> <li>-ตะกอนของแข็งที่เกิดจากการตกตะกอนจากสารละลาย</li> <li>-ตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายในสารละลาย</li> <li>-ตะกอนที่ล้างด้วยต่าง</li> <li>-ตะกอนของแข็งได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง</li> </ul>	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่อยู่ในรูปของแข็ง
X-ray Diffractometer (XRD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ตะกอนของแข็งที่เกิดจากการตกตะกอนจากสารละลาย</li> <li>-ตะกอนที่ล้างด้วยต่าง</li> <li>-ตะกอนของแข็งได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง</li> </ul>	รูปแบบของสารประกอบ และปริมาณของสารประกอบของตัวอย่างของแข็งที่ได้จากการทดลอง
Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-สารละลายแม่เหล็ก</li> <li>-สารละลายที่ผ่านการตกตะกอนของแข็ง</li> <li>-สารละลายที่ชะละลายซ้ำเพื่อกำจัดเหล็กลงไปนสารละลาย</li> </ul>	ปริมาณและองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในสารละลาย
Scanning Electron Microscope (SEM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ตะกอนของแข็งที่เกิดจากการตกตะกอนจากสารละลาย</li> <li>-ตะกอนที่ล้างด้วยต่าง</li> <li>-ตะกอนของแข็งได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง</li> </ul>	ภาพแสดงลักษณะรูปร่างตัวอย่างของแข็งที่กำลังขยายสูง (Morphology)
Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-ตะกอนของแข็งที่เกิดจากการตกตะกอนจากสารละลาย</li> <li>-ตะกอนที่ล้างด้วยต่าง</li> <li>-ตะกอนของแข็งได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูง</li> </ul>	องค์ประกอบทางเคมีเฉพาะบริเวณของตัวอย่างของแข็ง

### 3.4 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนและกระบวนการรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังแผนผังในรูปที่ 3.2 และมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 รายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนและกระบวนการในการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในงานวิจัยนี้

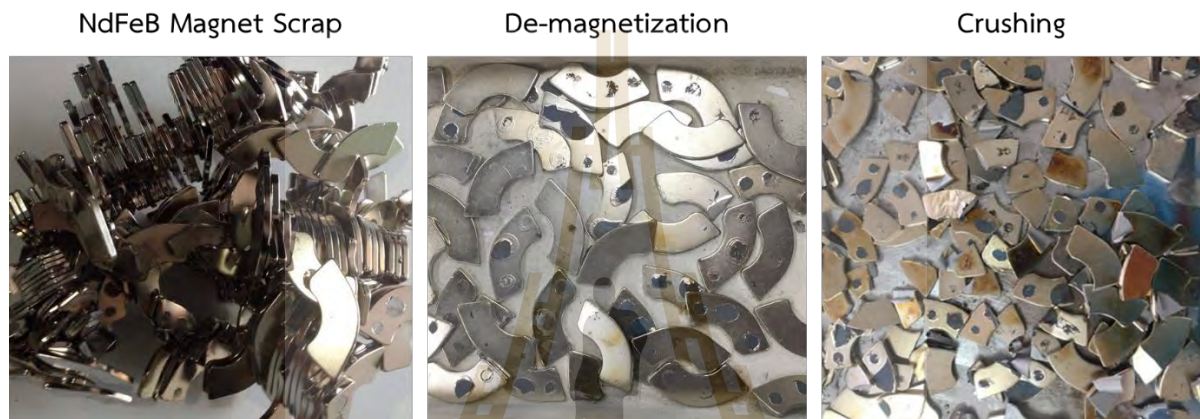


### 3.4.1 การอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก

จะนำขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B จากชิ้นส่วนอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปทำการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็กในเตาอบให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานคลายความเป็นแม่เหล็กและแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเป็นการสะดวกต่อการทำงานในขั้นตอนถัดไป

### 3.4.2 การย่อยและลดขนาดแม่เหล็ก

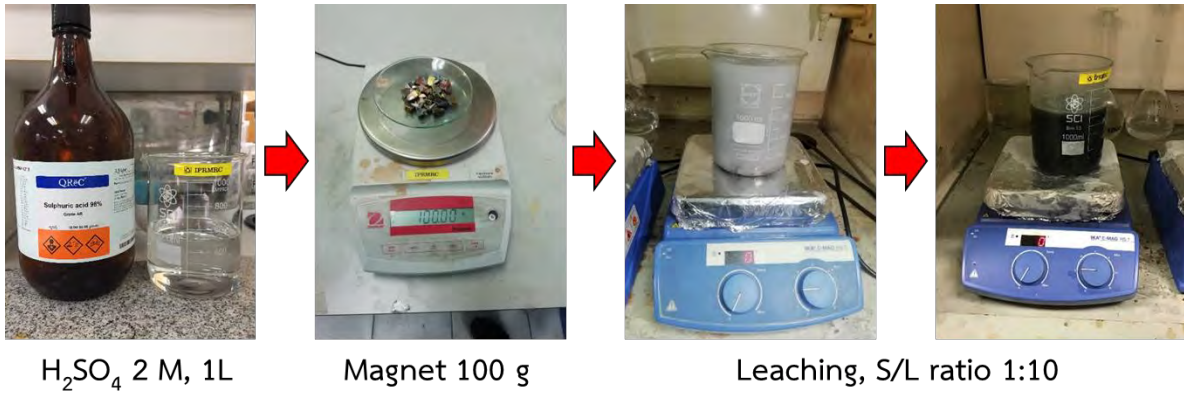
ชิ้นงานแม่เหล็กที่ผ่านการอบสลายความเป็นแม่เหล็กแล้วจะถูกนำไปย่อยและลดขนาดให้มีขนาดเล็กลง และทำให้ชิ้นแม่เหล็กแตกแยกออกจากกันเป็นหลายส่วน และทำให้ชิ้นเคลือบนิกเกิลที่ผิวเปิดออก ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะทำให้แม่เหล็กที่อยู่ใต้ชั้นเคลือบนี้ง่ายต่อการชะละลายด้วยกรดในขั้นตอนต่อไป



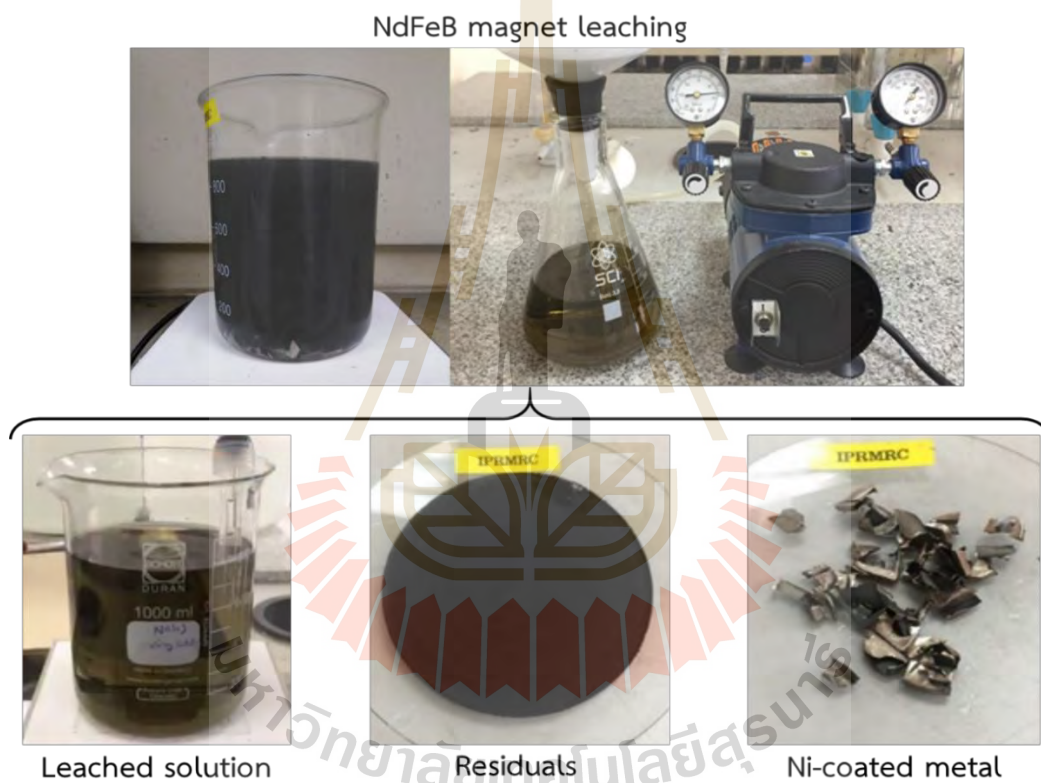
รูปที่ 3.3 การอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก และการย่อยหรือลดขนาดขยะแม่เหล็ก

### 3.4.3 การชะละลายแม่เหล็ก

ขยะแม่เหล็กที่ผ่านการย่อยลดขนาดและเปิดผิวชั้นเคลือบนิกเกิลแล้ว จะถูกนำไปชะละลายด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) ที่มีความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยในการชะละลายจะใช้อัตราส่วนปริมาณของแข็งที่เป็นขยะแม่เหล็กต่อปริมาณของเหลวที่เป็นสารละลายกรดซัลฟิวริก (Solid/Liquid ratio) ที่อัตราส่วนแม่เหล็ก 100 กรัมต่อสารละลายกรดปริมาตร 1 ลิตร หรือ S/L ratio เท่ากับ 1/10 ใช้เวลา 24 ชั่วโมงจนแม่เหล็กละลายลงไปอยู่ในสารละลายจนหมด ดังรูปที่ 3.4 จากนั้นนำไปกรองแยกเอาสารละลายที่เกิดจากการชะละลายเอาโลหะต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของแม่เหล็กที่ลงไปอยู่ในรูปของสารละลาย ออกจากตะกอนที่ไม่ละลาย ดังรูปที่ 3.5 โดยสารละลายที่มีโลหะต่างๆ ละลายลงไปนี้จะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของโลหะที่อยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค ICP-OES และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายด้วยเทคนิค XRF



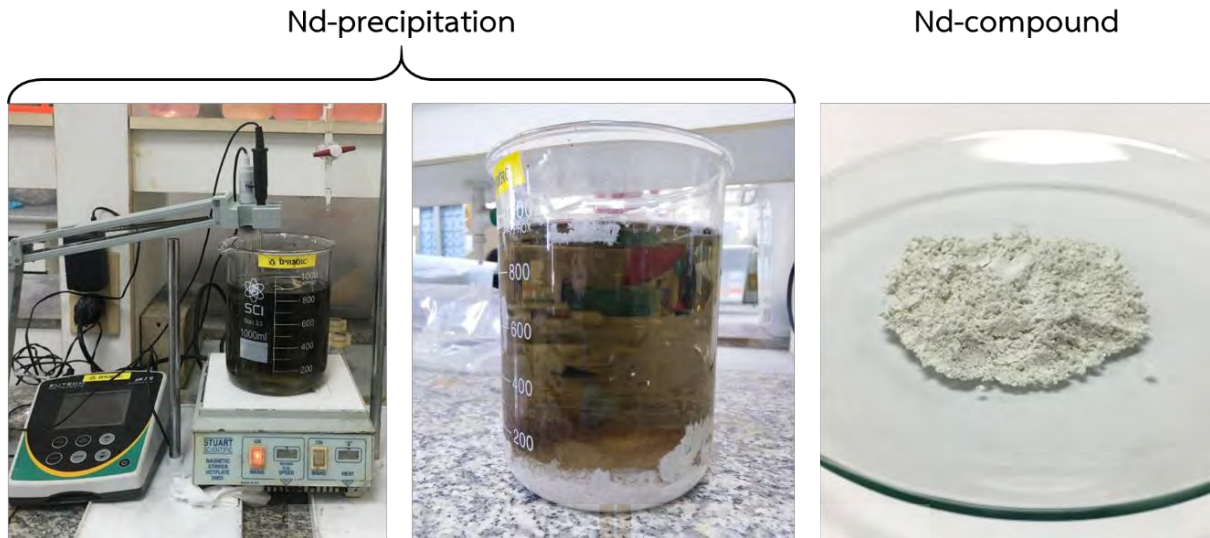
รูปที่ 3.4 การชะละลายแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว (S/L ratio) เท่ากับ 1:10



รูปที่ 3.5 สารชะละลาย (leached solution) ตะกอนที่ไม่ละลาย (residuals) และโลหะนิกเกิล ที่ได้จากการกรองแยกสารละลายในขั้นตอนของการชะละลายแม่เหล็ก Nd-Fe-B

#### 3.4.4 การตกตะกอนของแข็งจากสารชะละลาย

สารชะละลายแม่เหล็กซึ่งนำไปสกัดหรือทำให้บริสุทธิ์โดยการตกตะกอนของแข็ง ด้วยการปรับค่า pH ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ดังรูปที่ 3.6 ที่ค่า pH 0.6 pH 3 และ pH 8 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อทำการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป เมื่อตกตะกอนเสร็จสิ้นแล้วได้ทำการแยกตะกอนออกจากสารชะละลาย ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์เพื่อหาชนิดของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD สารชะละลายที่ผ่านการกรองแยกตะกอนออกไป จะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES



รูปที่ 3.6 การตกตะกอนของแข็งจากสารละลายด้วยวิธีการปรับค่า pH

### 3.4.5 การชะละลายเพื่อกำจัดเหล็กออกจะตะกอนของแข็ง

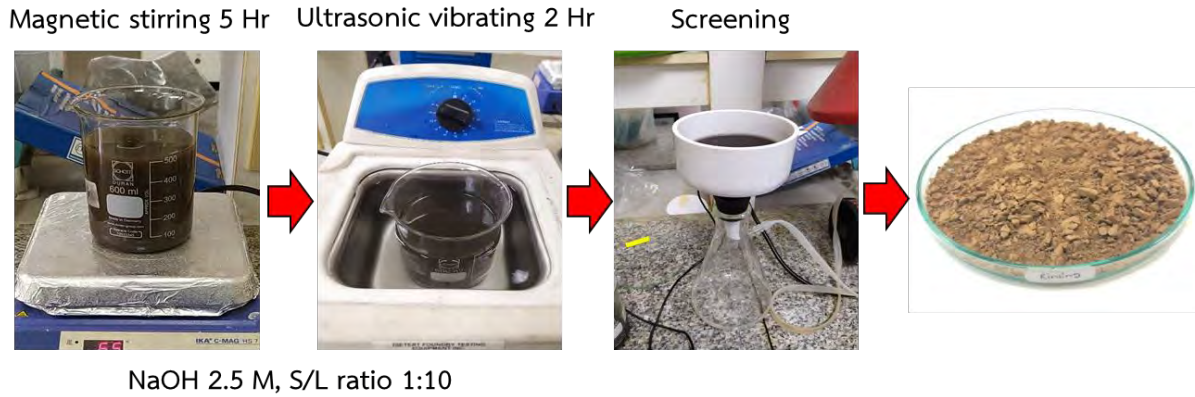
ขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยการกำจัดเหล็กที่อาจตกตะกอนเจือปนมาในปริมาณเล็กน้อยออกไป ทำการชะละลายตะกอนของแข็งด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ที่มีความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนปริมาณตะกอนของแข็งต่อปริมาตรสารละลายกรดซัลฟิวริก (Solid/Liquid ratio) เท่ากับ 1/10 (อัตราส่วนแม่เหล็ก 100 กรัมต่อสารละลายกรดปริมาตร 1 ลิตร) ทำการกรองแยกเอาตะกอน นำตะกอนของแข็งไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์เพื่อหารูปฟอร์มของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ส่วนสารละลายที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกไปจะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES

### 3.4.6 การล้างตะกอนของแข็งด้วยต่าง

เพื่อให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของโซเดียมนีโอดีเมียมซัลเฟต ( $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ที่ได้จากการตกตะกอนแยกเอานีโอดีเมียมจากสารละลายที่ pH 0.6 ให้ไปอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์สุดท้ายในกระบวนการรีไซเคิลในงานวิจัยนี้ที่ต้องการให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ) ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตจะถูกล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ ก่อนที่จะทำการเผาให้กลายเป็นสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ในขั้นตอนต่อไป

ในขั้นตอนนี้ตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ pH 0.6 และตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กออกไปแล้ว จะถูกนำมาล้างด้วยต่างหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 2.5 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของแข็งกับสารละลาย (S/L ratio) เท่ากับ 1/10 (ตะกอน 100 กรัม ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ลิตร) ทำการกวนสารละลายด้วยแม่เหล็กเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นเขย่าและล้างตะกอนด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.7





รูปที่ 3.7 การล้างตะกอนซิลเฟตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH rinsing) ความเข้มข้น 2.5 M และใช้ S/L Ratio เท่ากับ 1:10 เพื่อให้สารประกอบซิลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์

ทำการกรองแยกเอาตะกอนและสารละลายออกจากกัน โดยตะกอนของแข็งที่ล้างด้วยต่างแล้วจะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF และวิเคราะห์เพื่อหารูปฟอร์มของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ส่วนสารละลายจะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค ICP-OES

#### 3.4.7 การเผาด้วยความร้อน

ตะกอนของแข็งจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในเตาอบให้ความร้อน (Muffle furnace) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ ((Nd+REE)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยจะมีกระบวนการอยู่ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ

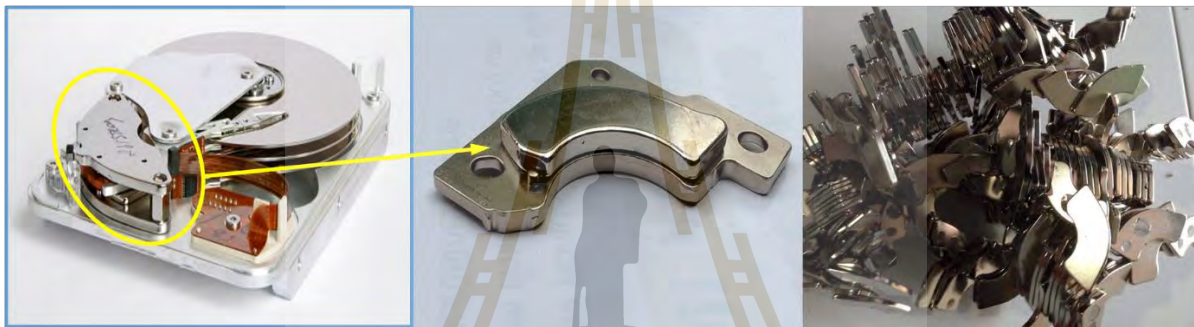
- (1) ทำการเผาตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซิลเฟต ที่ได้จากขั้นตอนตกตะกอนของแข็งโดยตรง
- (2) ทำการเผาตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซิลเฟต ที่ได้จากขั้นตอนตกตะกอนของแข็ง และผ่านกระบวนการล้างด้วยต่าง
- (3) ทำการเผาตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซิลเฟต ที่ผ่านขั้นตอนตกตะกอนของแข็ง การกำจัดเหล็ก และการล้างด้วยต่าง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของขั้วแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้วแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน (Nd-Fe-B magnet) จากชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่มีการรวบรวมจากขยะที่ใช้งานภายในประเทศจากแหล่งรวบรวมรายใหญ่โดยบริษัท วงษ์พาณิชย์ จำกัด สาขาจังหวัดอยุธยา มาทำการคัดแยกเอาเฉพาะชิ้นส่วนแม่เหล็ก Nd-Fe-B เพื่อนำมาใช้สำหรับการรีไซเคิล ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 4.1 และลักษณะโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 4.2

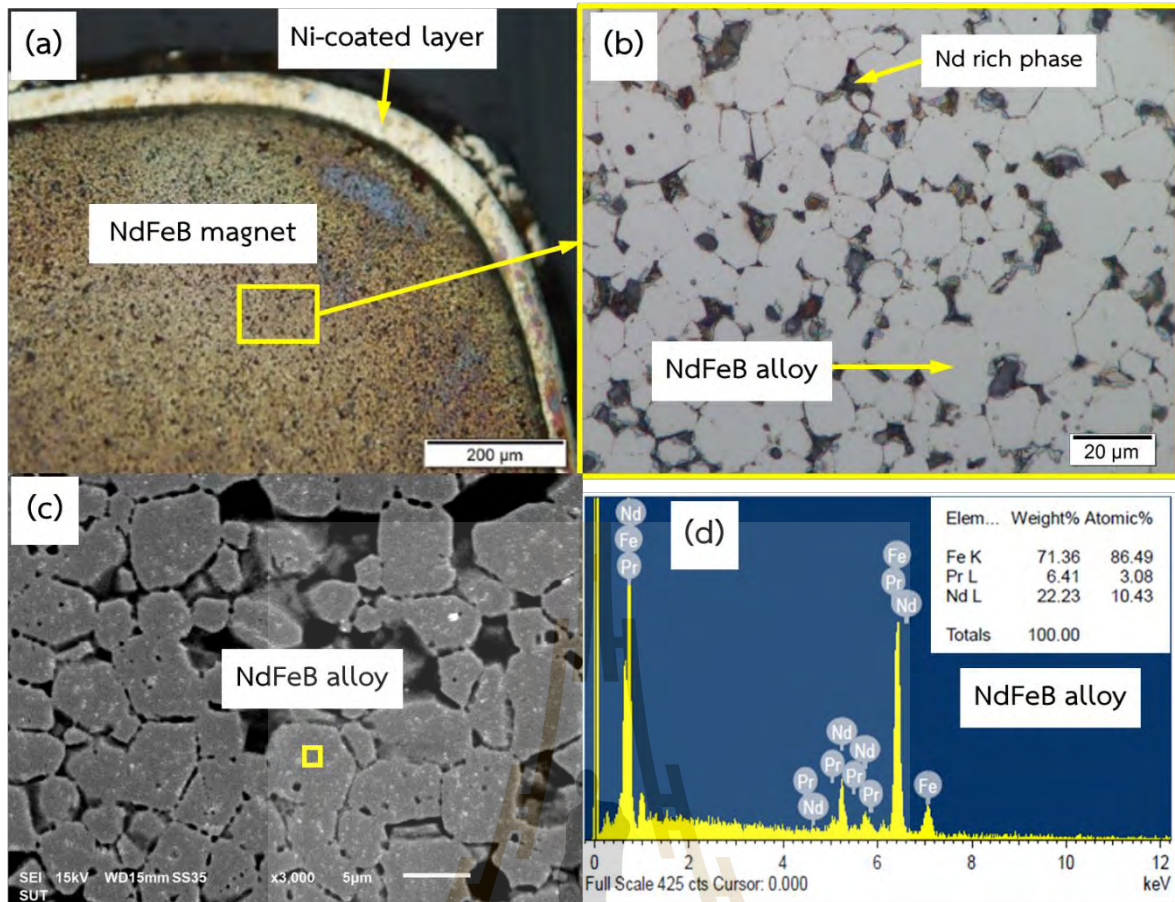


รูปที่ 4.1 ลักษณะชิ้นส่วนขั้วแม่เหล็ก Nd-Fe-B จากอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการวิจัยนี้

โครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ประกอบไปด้วยเฟสโลหะผสมของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน และเฟสที่มีปริมาณนีโอดีเมียมอยู่สูงตามบริเวณขอบเกรน ผิวภายนอกของขั้วแม่เหล็กถูกเคลือบด้วยโลหะนิกเกิล ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ M. Firdaus และคณะ (2016) จากผลการวิเคราะห์ด้วย SEM-EDS ในบริเวณเฟสของ Nd-Fe-B alloy พบว่าประกอบด้วยปริมาณเหล็ก 71.36% โดยน้ำหนัก มีปริมาณนีโอดีเมียม 22.23% โดยน้ำหนัก และพราซีโอดีเมียม 6.41% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลส่วนผสมทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เทียบกับงานวิจัยอื่น พบว่าส่วนผสมหลักของขั้วแม่เหล็กประกอบไปด้วยเหล็ก 63.57% โดยน้ำหนัก มีปริมาณนีโอดีเมียม 25.37% โดยน้ำหนัก พราซีโอดีเมียม 6.53% โดยน้ำหนัก โคบอลต์ 0.90% โดยน้ำหนัก และโบรอน 3.63% โดยน้ำหนัก ซึ่งส่วนผสมทางเคมีของขั้วแม่เหล็กในงานวิจัยนี้ มีส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นๆ





รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นส่วนแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (a, b) แสดงภาพโครงสร้างจุลภาคของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (c) และผลการวิเคราะห์ด้วย SEM-EDS บริเวณที่เป็นเฟสของ NdFeB alloy (d)

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

Materials	Elements	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe
NdFeB Magnet Scrap (In this study)	Wt%	25.37	6.53	-	0.90	3.63	63.57
NdFeB Magnet from Electronic Waste (D.Vobenkaul et. al., 2013)	Wt%	23.50	2.26	6.14	2.98	0.94	63.67
NdFeB Magnet (C.J. Ferron et. al., 2015)	Wt%	20-30	<7	1-2	4	1	50-60
NdFeB Magnet (M. Firdaus et. al., 2016)	Wt%	23-31	0-7	1-5	0-1	0.9-1.2	65-70

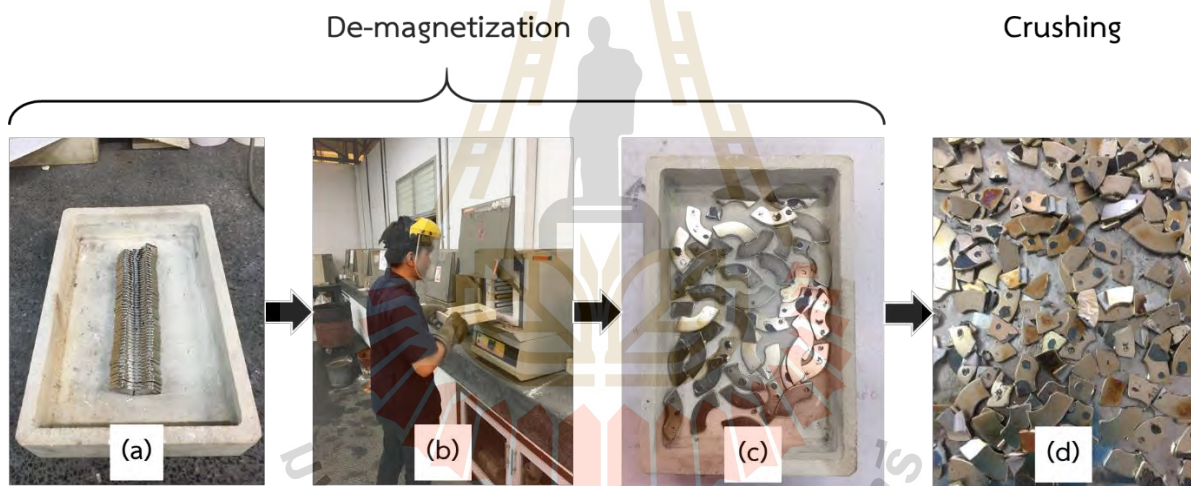
## 4.2 ผลการทดลองรีไซเคิลขยะแม่เหล็กที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน

### 4.2.1 การเตรียมขยะแม่เหล็ก

ได้ทำการเตรียมขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในเชิงกายภาพก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการสกัดนีโอดีเมียมและโลหะหายากออกจากเหล็กด้วยกรรมวิธีทางด้านโลหะ ขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วยการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก และทำการบดเพื่อลดขยะแม่เหล็กให้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ในการอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็กให้ขยะแม่เหล็กนั้น ในงานวิจัยได้ทำการอบไปที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการทดสอบการดึงดูดแม่เหล็ก พบว่าแม่เหล็กไม่สามารถดูดติดได้ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าจะสามารถที่จะสลายความเป็นแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์ โดยจะเห็นได้จากการที่แม่เหล็กแต่ละชิ้นแยกออกจากกันโดยสิ้นเชิง

ขยะแม่เหล็กที่ผ่านการอบสลายความเป็นแม่เหล็กแล้วจะถูกนำไปย่อยและลดขนาดให้มีขนาดเล็กลง ทำให้ชั้นเคลือบนิเกิลที่ผิวแม่เหล็กแตกออก ซึ่งจะช่วยให้แม่เหล็กที่อยู่ใต้ชั้นเคลือบนี้ถูกชะละลายด้วยสารละลายกรดได้ง่ายขึ้นในขั้นตอนต่อไป



**รูปที่ 4.3** การอบเพื่อสลายความเป็นแม่เหล็ก (demagnetization) และการย่อยหรือลดขนาดของแม่เหล็ก (crushing) (a) ขยะแม่เหล็กเริ่มต้นที่ดึงดูดกัน (b) อบสลายความเป็นแม่เหล็กอุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (c) ขยะแม่เหล็กไม่ดูดติดกันหลังจากอบสลายความเป็นแม่เหล็ก (d) แม่เหล็กที่ถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลง

### 4.2.2 การชะละลายขยะแม่เหล็ก

ผลจากการชะละลายพบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และ S/L ration เท่ากับ 1/10 แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าสามารถที่จะละลายขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B มากกว่า 90% โดยมีตะกอนที่ไม่ละลายหลงเหลือเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการชะละลายแม่เหล็ก Nd-Fe-B ประกอบไปด้วยแม่เหล็กที่ลงไปอยู่ในรูปของสารละลาย 90.29% โดยน้ำหนัก ตะกอนที่ไม่ละลาย 4.65% โดยน้ำหนัก และโลหะนิเกิลที่เป็นชั้นเคลือบผิวแม่เหล็ก 5.06% โดยน้ำหนัก ส่วนสารชะ

ละลายจะถูกนำไปวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของโลหะที่อยู่ในสารละลายด้วยเทคนิค ICP-OES และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายด้วยเทคนิค XRF ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 จากผลในตารางที่ 4.3 พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของโลหะในสารละลายสอดคล้องกับส่วนผสมทางเคมีเริ่มต้นของแม่เหล็ก Nd-Fe-B โดยเฉพาะเมื่อคำนวณย้อนกลับเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ที่มีอยู่ในสารละลายแล้วมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีปริมาณความเข้มข้นของนีโอดีเมียมในสารละลาย 22,490 mg/L (23.02%) พราซีโอดีเมียม 5,300 mg/L (5.43%) ไตสพรอเซียม 22.28 mg/L (0.02%) โคบอลต์ 808.7 mg/L (0.83%) โบรอน 683.4 mg/L (0.70%) และเหล็ก 68,390 mg/L (70.00%) ส่วนตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ข้อมูลในตารางที่ 4.4 พบว่ามีองค์ประกอบหลักๆ ประกอบไปด้วยนีโอดีเมียม 19.96% พราซีโอดีเมียม 5.85% โบรอน 4.49% เหล็ก 3.65% ซัลเฟอร์ 10.24% และออกซิเจน 45.03% โดยน้ำหนัก ซึ่งตะกอนที่ไม่ละลายในการละลายนี้อาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของโลหะเนื่องจากมีปริมาณองค์ประกอบของซัลเฟอร์และออกซิเจนในสัดส่วนที่สูง

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนปริมาณองค์ประกอบที่ได้จากขั้นตอนการละลายแม่เหล็ก Nd-Fe-B ด้วยกรดซัลฟิวริก

Leaching Products	Wt%
Ni-coated metal	5.06
Residuals	4.65
NdFeB Magnet dissolved	90.29
Total NdFeB Magnet scrap	100.00

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของโลหะในสารละลายด้วยเทคนิค ICP-OES

Data	Elements	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe
Leached Solution	mg/L (ICP-OES)	22,490	5,300	22.28	808.7	683.4	68,390
Leached Solution	Convert to %	23.02	5.43	0.02	0.83	0.70	70.00

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ไม่ละลายด้วยเทคนิค XRF และองค์ประกอบทางเคมีของขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B เริ่มต้น

Materials	Elements	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe	S	O
NdFeB Magnet Scrap	Wt%	25.37	6.53	-	0.90	3.63	63.57	-	-
Residuals	Wt%	19.96	5.85	-	0.17	4.49	3.65	10.24	45.03



#### 4.2.3 การตกตะกอนนีโอดีเมียมและโลหะหายากจากสารชะละลาย

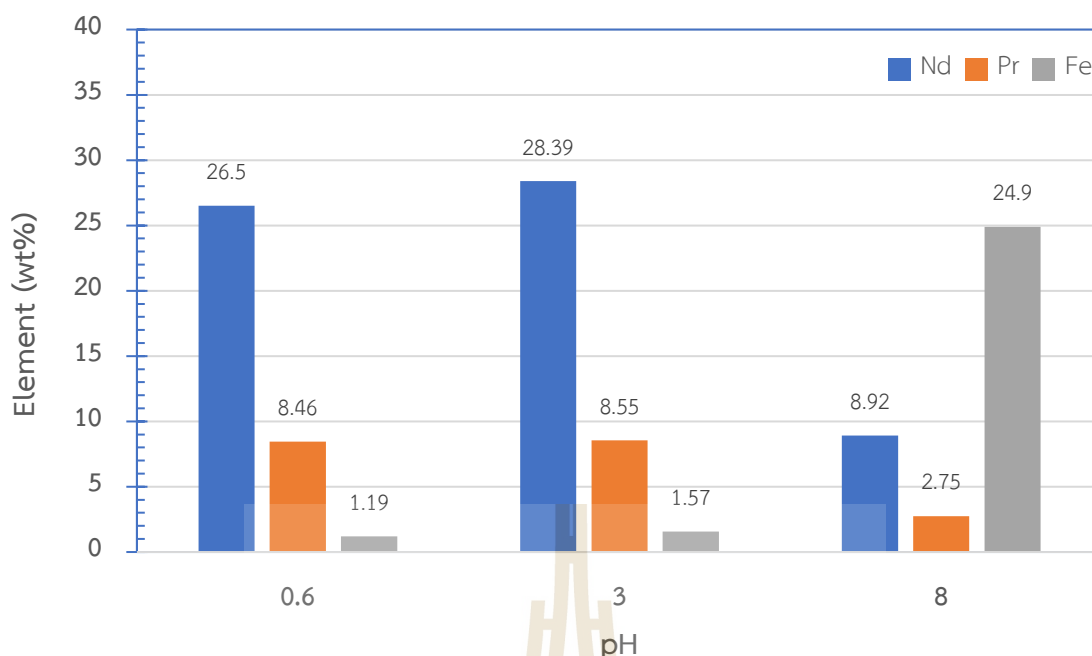
องค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ของตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนที่ค่า pH ต่างๆ ในรูปที่ 4.4 แสดงผลในตารางที่ 4.5 และกราฟเปรียบเทียบปริมาณนีโอดีเมียม พราซีโอดีเมียม และเหล็กในตะกอนของแข็งดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 การตกตะกอนของแข็งจากสารชะละลายที่ค่า pH 0.6 ค่า pH 3 และค่า pH 8

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารชะละลาย (precipitates) ที่ค่า pH แตกต่างกัน ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

pH	Element (Wt%)						
	Nd	Pr	Co	Fe	Na	S	O
0.6	26.50	8.46	-	1.19	4.09	14.16	38.29
3	28.39	8.55	-	1.57	5.69	16.13	38.60
8	8.92	2.75	0.36	24.90	7.06	10.46	43.55



**รูปที่ 4.5** ปริมาณนีโอดีเมียม พราซีโอดีเมียม และเหล็กในตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารละลายที่ค่า pH 0.6 ค่า pH 3 และค่า pH 8

พบว่า การตกตะกอนที่ค่า pH เท่ากับ 0.6 มีปริมาณของเหล็กเจือปนในตะกอนของแข็งต่ำที่สุด และทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมมีความบริสุทธิ์สูงสุด ซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าที่เหมาะสมในการเลือกสกัดเอานีโอดีเมียม และโลหะหายากออกจากเหล็กที่ละลายอยู่ในสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ C.H. Lee และคณะ (2013) ของแข็งที่ตกตะกอนที่ pH 0.6 ประกอบด้วย นีโอดีเมียม 26.58% พราซีโอดีเมียม 8.46% โดยมีเหล็กเจือปนเพียงแค่ 1.19% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของโซเดียม ซัลเฟต และออกซิเจนร่วมด้วย ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลังจากนี้พบว่าอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต ( $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

ผลของการตกตะกอนที่ pH เท่ากับ 3 มีปริมาณเหล็กเจือปนในตะกอนของแข็งที่สูงกว่าการตกตะกอนที่ pH เท่ากับ 0.6 เล็กน้อย โดยที่ยังคงมีปริมาณของนีโอดีเมียมและพราซีโอดีเมียมอยู่ในปริมาณสูง สอดคล้องกับข้อมูลรายงานในรูปที่ 2.13 โดยของแข็งที่ตกตะกอนที่ pH 3 ประกอบด้วย นีโอดีเมียม 28.39% พราซีโอดีเมียม 8.55% โดยมีเหล็กเจือปนอยู่ 1.57% โดยน้ำหนัก และยังมีโซเดียม ซัลเฟต และออกซิเจนด้วย

ที่ค่า pH เท่ากับ 8 พบว่าตะกอนมีปริมาณเหล็กเจือปนในตะกอนของแข็งสูงที่สุด และปริมาณนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่อยู่ในสารประกอบต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าไม่สามารถที่จะสกัดเอานีโอดีเมียมและโลหะหายากแยกออกจากเหล็กจากสารละลายได้ ซึ่งของแข็งที่ตกตะกอนที่ pH 8 ประกอบด้วย นีโอดีเมียม 8.92% พราซีโอดีเมียม 2.75% โดยมีเหล็กเจือปนอยู่สูงถึง 24.90% โดยน้ำหนัก และยังมีโซเดียม ซัลเฟต และออกซิเจนด้วย ซึ่งสารประกอบที่ได้จากการตกตะกอนในกรณีนี้อาจจะอยู่ในรูปของเหล็กซัลเฟตที่มีปริมาณและสัดส่วนขององค์ประกอบมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ C.H. Lee และคณะ (2013) และ W. Xinchao และคณะ (2005)



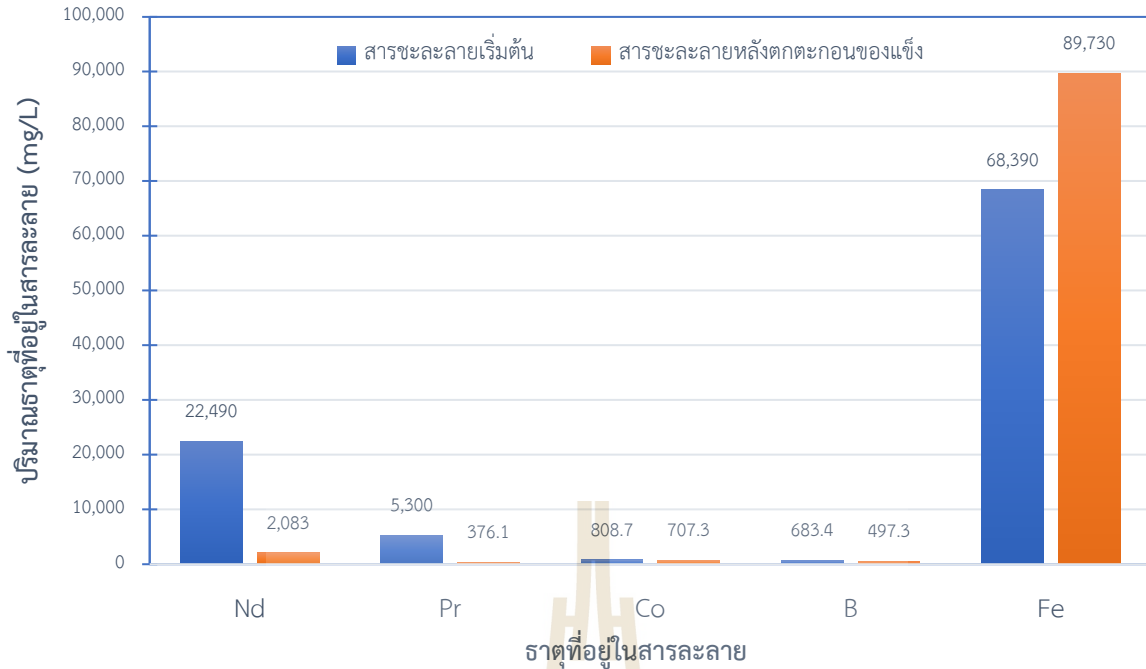
จากผลของค่า pH ต่อการตกตะกอนของแข็งที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนที่ค่า pH เท่ากับ 0.6 และมีองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะในสารละลายทั้งก่อนและหลังการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH เท่ากับ 0.6 ด้วยเทคนิค ICP-OES ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.6 พบว่าสารละลายภายหลังจากการตกตะกอนแยกเอานีโอดีเมียมและโลหะหายากออกไปแล้วนั้น มีปริมาณโลหะนีโอดีเมียมลดลงจากสารละลายเริ่มต้น จากปริมาณ 22,490 mg/L ลดลงเหลือเพียง 2,083 mg/L และพราซีนีโอดีเมียม ลดลงจากสารละลายเริ่มต้นจากปริมาณ 5,300 mg/L ลดลงเหลือเพียง 376.10 mg/L โดยที่เหล็ก โคบอลต์ และโบรอน ยังคงมีปริมาณใกล้เคียงกับสารละลายเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนที่ pH 0.6 นี้จะมีเพียงนีโอดีเมียมและโลหะหายากเท่านั้นที่ตกตะกอนแยกออกมาจากสารละลาย ทำให้ได้ตะกอนของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูง

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารละลายที่ค่า pH 0.6

Condition	Elements	Nd	Pr	Co	B	Fe	Na	S	O
ของแข็งที่ตกตะกอนที่ค่า pH 0.6	wt%	26.50	8.46	-	4.18	1.19	4.09	14.16	38.29

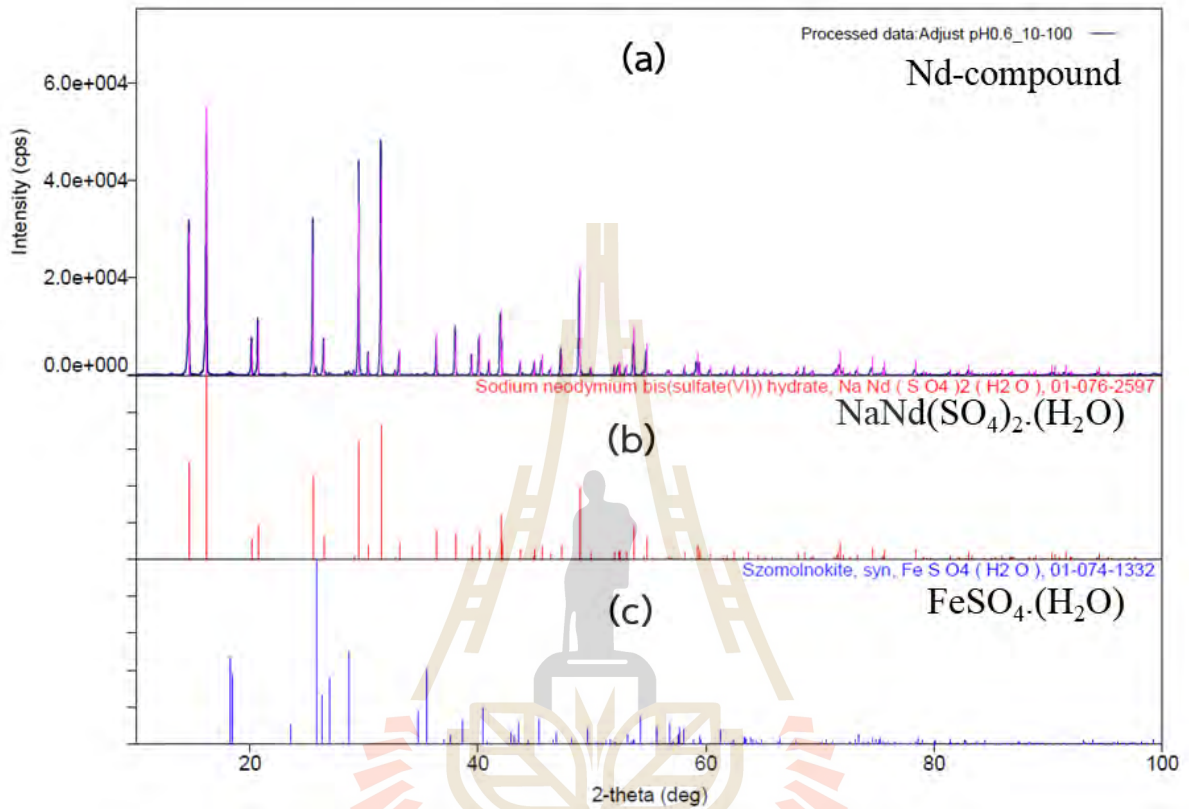
ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของโลหะในสารละลายเริ่มต้น และสารละลายหลังตกตะกอนนีโอดีเมียมที่ค่า pH 0.6

Condition	Elements	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe
สารละลายเริ่มต้น	mg/L	22,490	5,300	22.28	808.70	683.40	68,390
สารละลายหลังตกตะกอน	mg/L	2,083	376.10	36.80	707.30	497.30	89,730



**รูปที่ 4.6** ปริมาณของโลหะในสารละลายทั้งก่อนและหลังการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6

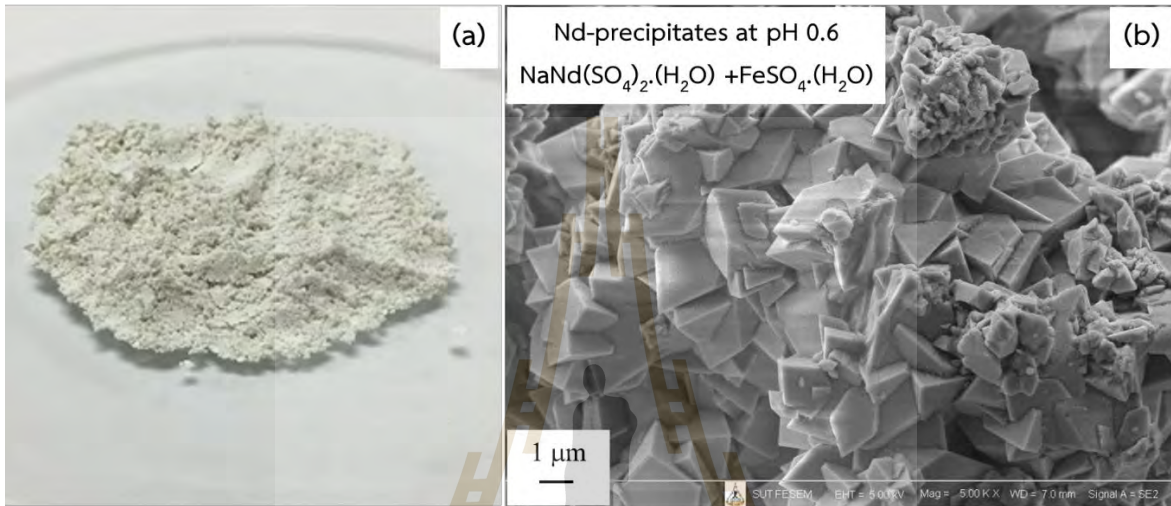
ตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารละลายที่ค่า pH 0.6 ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหารูปฟอร์มของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD พบว่าตะกอนของแข็งที่ได้จากขั้นตอนการตกตะกอนของแข็งจากสารละลายที่เป็นกรดซัลฟิวริกนั้นอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของนีโอดีเมียม ( $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) และสารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 97.81% และ 1.91% ตามลำดับ ดังผลวิเคราะห์ที่แสดงในรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.8 และภาพถ่ายลักษณะของตะกอนที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้นี้ถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีไซเคิลแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีความบริสุทธิ์สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งจากสารละลายที่ pH 0.6 (a) เทียบกับสารมาตรฐานที่อยู่ในรูปของ  $\text{NaNd(SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$  (b) และสารมาตรฐานที่อยู่ในรูปของ  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (c)

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารละลายที่ค่า pH 0.6

Compound	%
$\text{Na}\cdot\text{REE}(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	97.81
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.91
Unknown	0.29



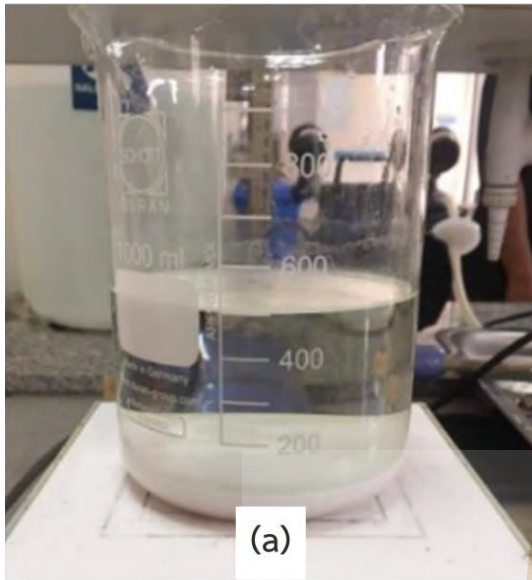
รูปที่ 4.8 ลักษณะรูปร่างของตกตะกอนของแข็งจากสารละลายที่ pH 0.6 (a) ภาพถ่ายมหภาค (b) ภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

#### 4.2.4 การกำจัดเหล็กออกจากตะกอนนีโอดีเมียมและโลหะหายาก

ในขั้นตอนนี้จะทำให้ตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยการกำจัดเหล็กที่อาจตกตะกอนเจือปนมาในรูปของเหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ในปริมาณเล็กน้อยออกไป โดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งเหล็กที่เจือปนอยู่ในตะกอนในรูปของเหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) จะละลายลงไปในสารละลายกรดซัลฟิวริกในขณะที่ซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากซึ่งละลายได้ยากในสารละลายกรดซัลฟิวริกยังคงอยู่ในสถานะของแข็งในรูปของ  $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$

จากนั้นนำไปกรองเพื่อแยกเอาตะกอนของสารประกอบซัลเฟตที่ละลายเพื่อกำจัดเหล็กออกไปแล้ว ซึ่งจะได้เป็นสารประกอบซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากมีความบริสุทธิ์สูง (High purity (Nd+REE)-sulfate) ออกจากสารละลายที่กำจัดเหล็กออกไป (Fe-removal solution) ตะกอนของแข็งที่มีนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูงที่กำจัดเหล็กออกไปแล้วดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.9 ส่วนสารละลายที่ใช้ในการกำจัดเหล็กออกไปจะนำไปตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโลหะในสารละลายด้วยเทคนิค ICP-OES ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.10 และทำการวิเคราะห์เพื่อหารูปฟอร์มของสารประกอบที่ได้ด้วยเทคนิค XRD ดังข้อมูลแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 ตามลำดับ

Eliminated-Fe from Nd-precipitates



Nd-compound after Fe-removal



รูปที่ 4.9 การกำจัดเหล็กจากตกตะกอนของแข็งจากการตกตะกอนที่ pH 0.6 ด้วยการใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 โมลาร์ ในการละลายเหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ให้ลงไปอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก (a) และตะกอนนีโอดีเมียมที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็ก (b)

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนของแข็งที่ตกตะกอนจากสารละลายที่ค่า pH 0.6 เปรียบเทียบกับตะกอนหลังจากผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็ก

Condition	Elements	Nd	Pr	Co	B	Fe	Na	S	O
ตะกอนนีโอดีเมียมตกตะกอนที่ค่า pH 0.6	wt%	26.50	8.46	-	4.18	1.19	4.09	14.16	38.29
ตะกอนนีโอดีเมียมที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็ก	wt%	26.36	8.13	-	5.00	0.14	4.36	14.62	38.29

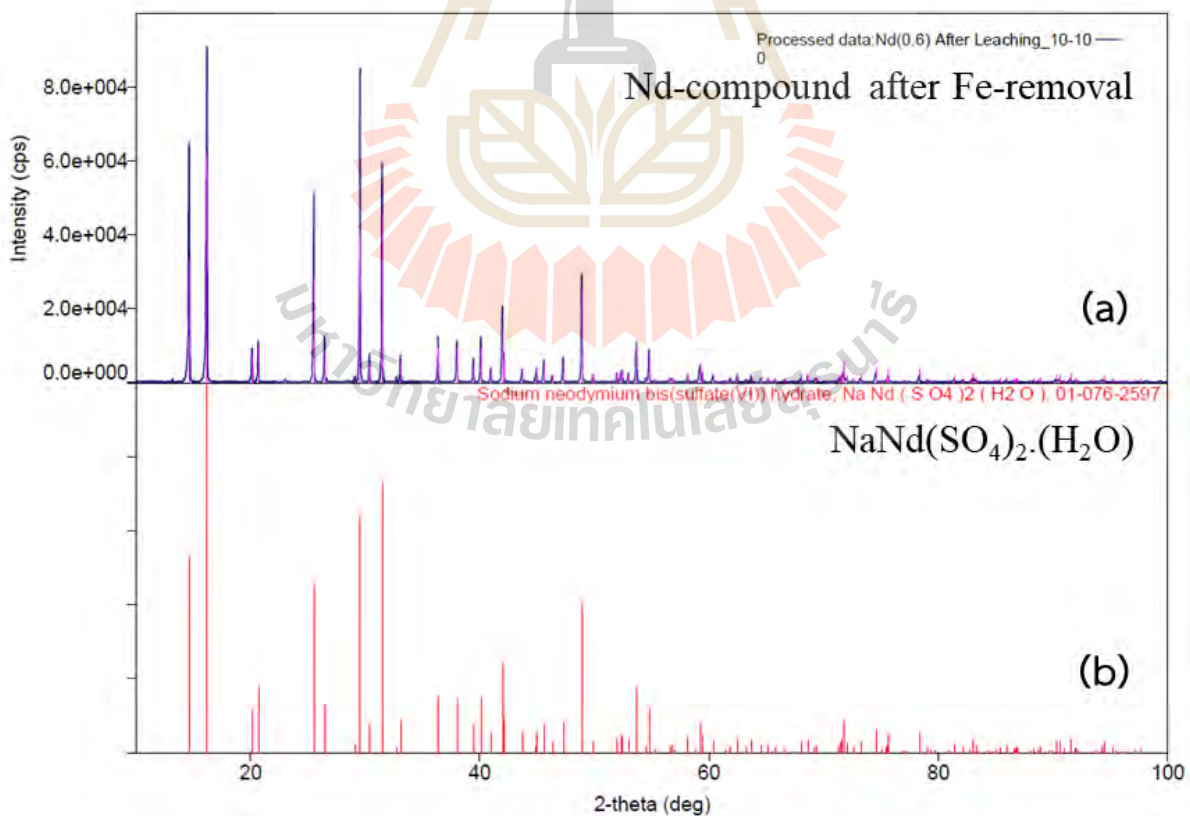
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณของโลหะของสารละลายกรดซัลฟิวริก หลังจากผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็ก (Fe-removal solution) ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-OES

Condition	Elements	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe
สารละลายหลังผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็ก	mg/L	751	178.70	3.80	19	15.92	1,297



ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กออกไปแล้ว (High purity Nd-sulfate) เปรียบเทียบกับตะกอนซัลเฟตก่อนที่จะกำจัดเหล็กพบว่า ภายหลังจากขั้นตอนการกำจัดเหล็กออกจากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าปริมาณเหล็กในตะกอนซัลเฟตลดลงจาก 1.19% เหลือเพียง 0.14% และเมื่อองค์ประกอบทางเคมีของโลหะในสารละลายที่ทำการกำจัดเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่ามีปริมาณเหล็กละลายลงในสารละลายปริมาณถึง 1,297 mg/L จากที่ไม่มีในตอนที่เริ่มต้นที่เป็นสารละลายกรดซัลฟิวริก แสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถที่จะกำจัดเหล็กออกไปจากตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตได้โดยการละลายเหล็กซัลเฟตที่เจือปนมาให้ไปอยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริก และทำให้ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ค้นพบใหม่ที่ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

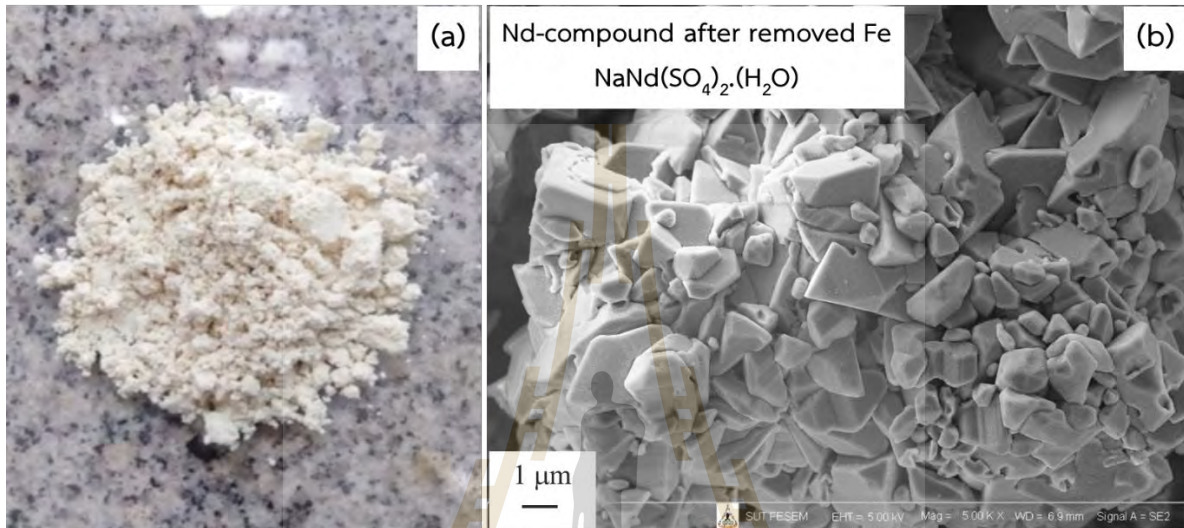
เมื่อทำการวิเคราะห์รูปฟอร์มของสารประกอบของตะกอนที่ผ่านการกำจัดเหล็กด้วยเทคนิค XRD ดังข้อมูลแสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.11 พบว่ามีเพียงสารประกอบที่อยู่ในรูปของนีโอดีเมียมซัลเฟต ( $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) โดยที่สารประกอบของเหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ที่เจือปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยก่อนหน้านี้ได้ถูกกำจัดออกไป ทำให้ได้นีโอดีเมียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.85% จากที่มีความบริสุทธิ์เริ่มต้นก่อนขั้นตอนขั้นตอนนี้ที่ 97.81% และลักษณะรูปร่างของตกตะกอนของแข็งที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กที่ทำการถ่ายภาพที่กำลังขยายสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงให้เห็นลักษณะและรูปร่างของตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงดังรูปที่ 4.11



**รูปที่ 4.10** ผลการวิเคราะห์รูปฟอร์มของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กโดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก ด้วยเทคนิค XRD (a) รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตะกอนนีโอดีเมียมที่ผ่านการกำจัดเหล็กเทียบกับ (b) สารมาตรฐานที่อยู่ในรูปของ  $\text{NaNd}(\text{SO}_4)_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$

ตารางที่ 4.11 ผลวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบในตะกอนของแข็งหลังจากผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กออกไปแล้ว ด้วยเทคนิค XRD

Compound	%
Na.REE(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .(H <sub>2</sub> O)	99.85
Unknown	0.15



รูปที่ 4.11 ลักษณะรูปร่างของตกตะกอนของแข็งที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กโดยการใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก (a) ภาพถ่ายมหภาค (b) ภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

#### 4.2.5 การล้างตะกอนของแข็งด้วยต่างเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์

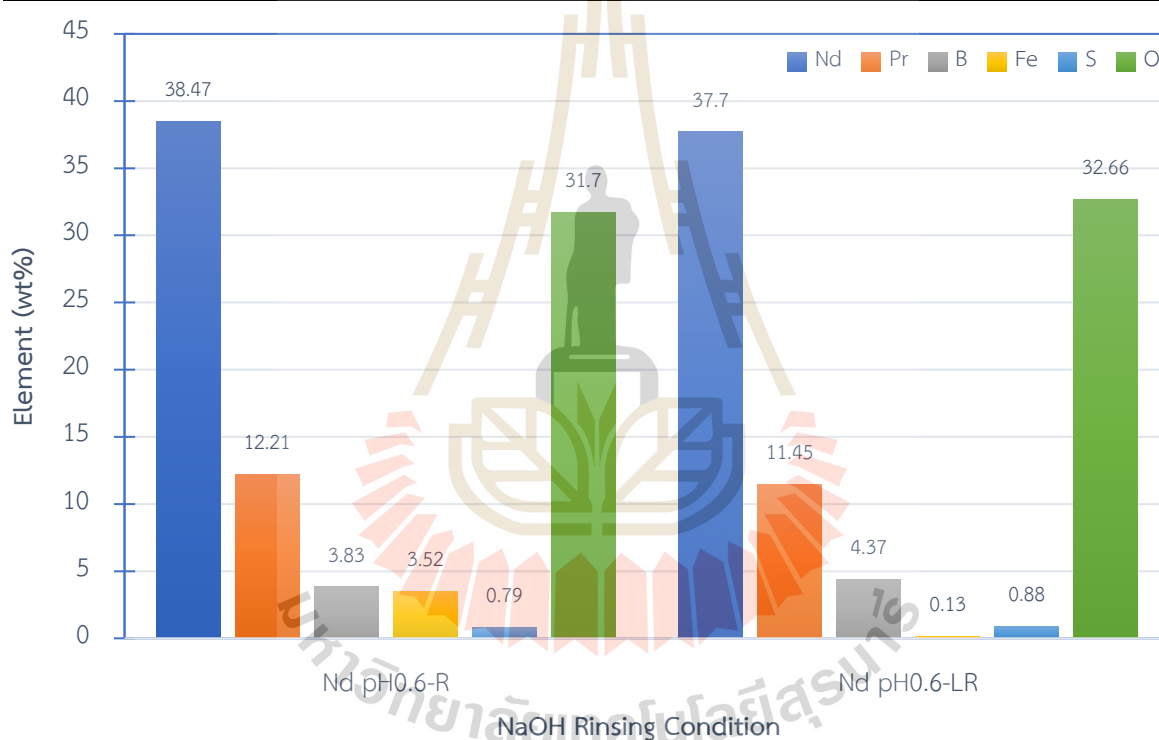
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ pH 0.6 แล้วผ่านการล้างด้วยต่าง (Nd pH0.6-R) และตะกอนซัลเฟตของนีโอดีเมียมที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กและผ่านการล้างด้วยต่าง (Nd pH0.6-LR) แสดงในตารางที่ 4.12 และในรูปที่ 12 พบว่าตะกอนที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กก่อนที่จะมาผ่านขั้นตอนการล้างด้วยต่าง มีปริมาณของเหล็กเจือปนในสารประกอบต่ำกว่า และจะมีปริมาณซัลเฟอร์ในองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบที่ผ่านการล้างด้วยต่างต่ำลงมาก โดยมีเพียง 0.79-0.88% โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่ากระบวนการล้างตะกอนซัลเฟตด้วยต่างสามารถทำให้สารประกอบซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่แสดงในตารางที่ 4.13 และในรูปที่ 4.13-4.14 อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก (REE(OH)<sub>3</sub>) ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า 99% (99.64% ในกรณีที่ผ่านมากระบวนการ Nd pH0.6-R และมีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.98% ในกรณีที่ผ่านมากระบวนการ Nd pH0.6-LR) โดยมีสารที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ (unknown) เจือปนเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตคงเหลือที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ได้ทั้งหมด ดังข้อมูล

องค์ประกอบของซัลเฟอร์ที่เหลืออยู่ที่แสดงในตารางที่ 4.12 และมีลักษณะรูปร่างของตกตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ผ่านกระบวนการ Nd pH0.6-R และผ่านกระบวนการ Nd pH0.6-LR ดังแสดงในรูปที่ 4.15

**ตารางที่ 4.12** องค์ประกอบทางเคมีตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ตกตะกอนของแข็งที่ pH 0.6 แล้วผ่านการล้างด้วยด่าง (Nd pH0.6-R) และตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กและผ่านการล้างด้วยด่าง (Nd pH0.6-LR) เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

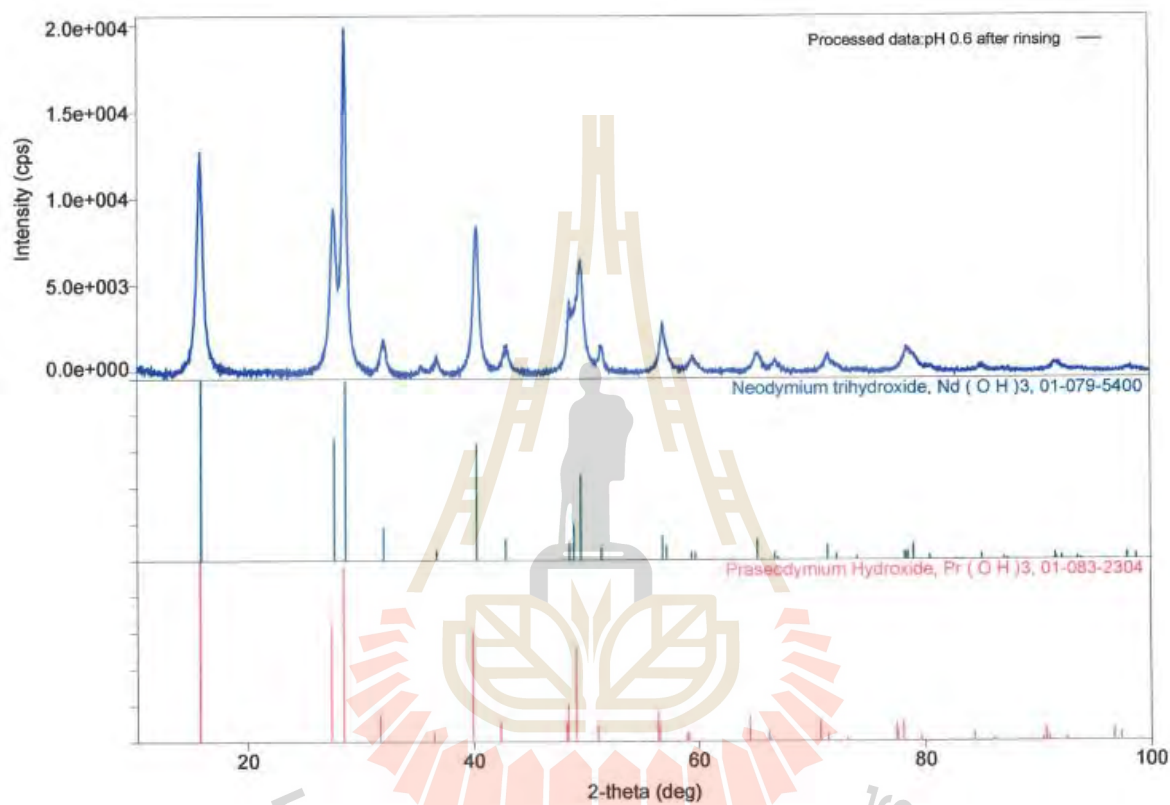
NaOH Rinsing Condition	Element	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe	S	O
Nd pH0.6-R	Wt%	38.47	12.21	0.00	0.00	3.83	3.52	0.79	31.70
Nd pH0.6-LR	Wt%	37.70	11.45	0.00	0.00	4.37	0.13	0.88	32.66



**รูปที่ 4.12** ปริมาณธาตุในตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการล้างด้วยด่าง (Nd pH0.6-R) และตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กและผ่านการล้างด้วยด่าง (Nd pH0.6-LR)

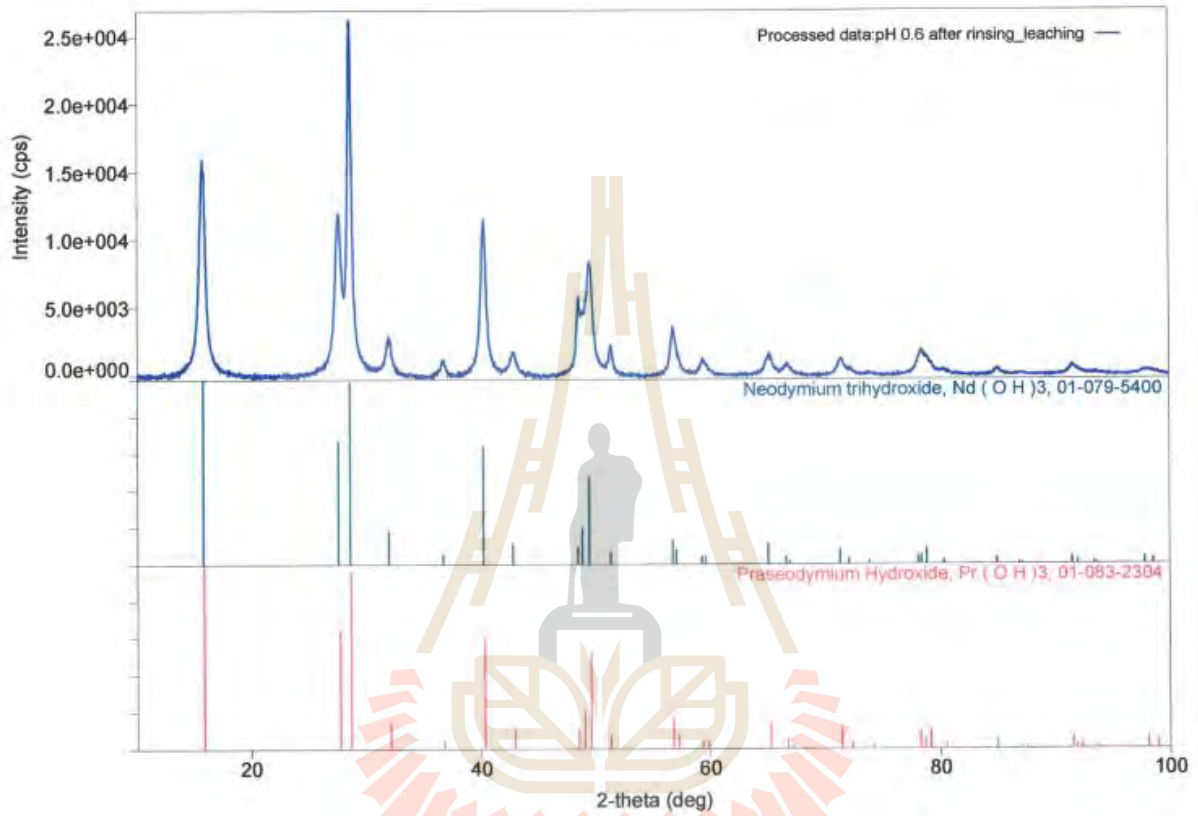
**ตารางที่ 4.13** ปริมาณของสารประกอบของตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยด่างเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ โดยวิธีการ Nd pH0.6-R และ Nd pH0.6-LR ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

NaOH Rinsing Condition	REE(OH) <sub>3</sub>	Unknown
Nd pH0.6-R	99.64	0.36
Nd pH0.6-LR	99.98	0.02

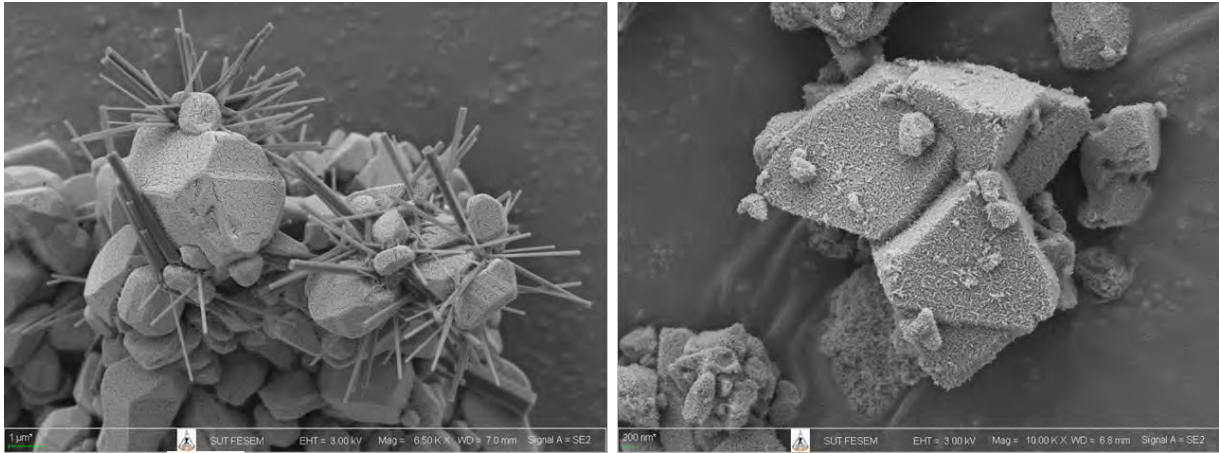


รูปที่ 4.13 รูปฟอร์มของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการล้างด้วยด่างเพื่อให้สารประกอบซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Nd pH0.6-R)





รูปที่ 4.14 รูปฟอร์มของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กและการล้างด้วยด่างเพื่อให้สารประกอบ ซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (Nd pH0.6-LR)



(a) Nd pH0.6-R

(b) Nd pH0.6-LR

**รูปที่ 4.15** ลักษณะรูปร่างของตกตะกอนของแข็งที่ผ่านขั้นตอนการล้างด้วยต่างเพื่อให้สารประกอบซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ (a) ผ่านกระบวนการ Nd pH0.6-R และ (b) ผ่านกระบวนการ Nd pH0.6-LR

#### 4.2.6 การเผาด้วยความร้อนเพื่อเปลี่ยนสารประกอบนีโอดีเมียมให้อยู่ในรูปนีโอดีเมียมออกไซด์

ในขั้นตอนนี้ตะกอนของแข็งซึ่งมีองค์ประกอบของนีโอดีเมียมและโลหะหายากอยู่ในปริมาณสูงที่อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตที่ได้จากการตกตะกอนที่ค่า pH 0.6 ตะกอนที่ผ่านการกำจัดเหล็ก และตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยต่างให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ ตะกอนเหล่านี้จะถูกลำเลียงไปเผาให้เกิดการออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์ ((Nd+REE)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยในขั้นตอนนี้จะทำการเผาในเตาอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งการเผาเพื่อเปลี่ยนสารประกอบให้อยู่ในรูปออกไซด์นี้จะทำอยู่ 3 รูปแบบด้วยกัน คือ

วิธีที่ 1 (Nd pH0.6+1000°C 2 hr) จะเป็นการนำตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซัลเฟต (Na.Nd(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) ที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 นำไปเผาโดยตรง เพื่อศึกษาการเปลี่ยนรูปแบบของสารประกอบเป็นนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

วิธีที่ 2 (Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr) จะเป็นการนำตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซัลเฟต (Na.Nd(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) ที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 ไปผ่านกระบวนการล้างด้วยต่างให้อยู่ในรูปนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (Nd(OH)<sub>3</sub>) ก่อน แล้วจึงค่อยเผาเพื่อให้เป็นนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

วิธีที่ 3 (Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr) จะเป็นการนำตะกอนของแข็งนีโอดีเมียมซัลเฟต (Na.Nd(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O) ที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งที่ pH 0.6 ไปผ่านขั้นตอนการกำจัดเหล็กออกไปจากตะกอนก่อนเพื่อทำให้ได้สารประกอบนีโอดีเมียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น จากนั้นจึงทำการล้างด้วยต่างให้อยู่ในรูปนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ (Nd(OH)<sub>3</sub>) แล้วค่อยเผาเพื่อให้เป็นนีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

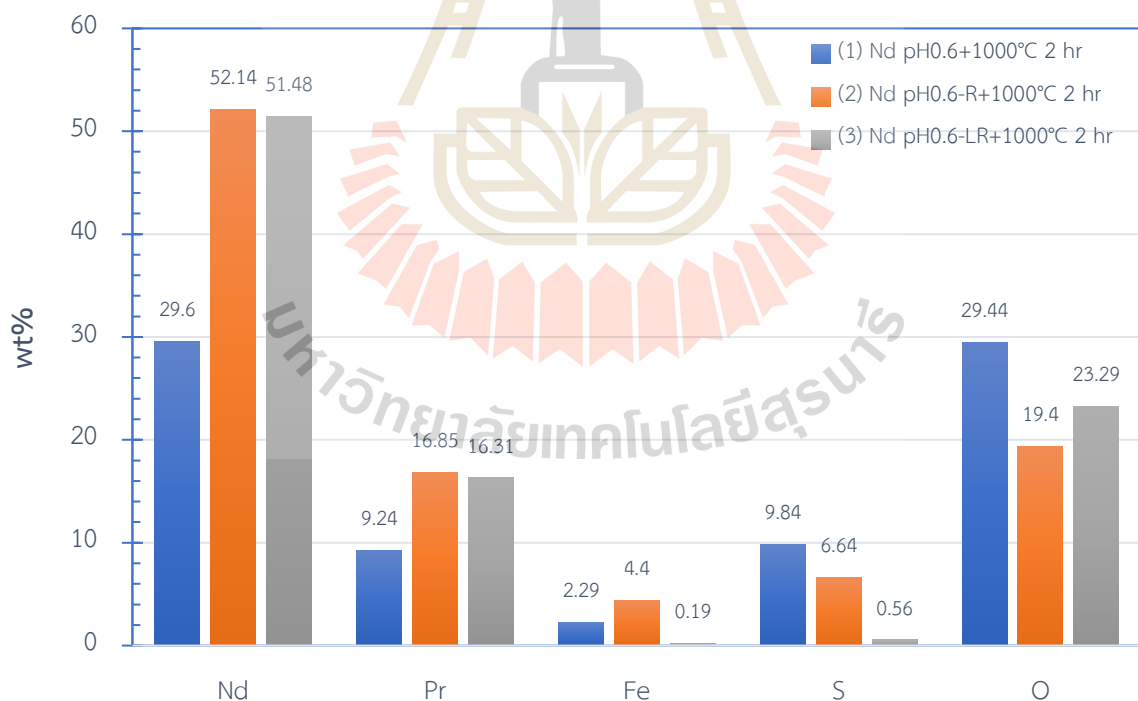
จากวิธีการที่กำหนดนี้จะทำให้ทราบสถานะหรือกระบวนการที่เหมาะสมในการรีไซเคิลหรือสกัดเอา นีโอดีเมียมและโลหะหายากจากขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอน ให้ได้

ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูง เพื่อนำไปพัฒนาต่อยอดใช้งานเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตแม่เหล็กแรงดีดุดสูง Nd-Fe-B ต่อไป

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ดังแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 และผลการวิเคราะห์รูปแบบของสารประกอบด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และในรูปที่ 4.17-4.19 ของตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อที่จะเปลี่ยนให้ไปอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของแต่ละวิธีการ

**ตารางที่ 4.14** ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตะกอนที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์

Calcination Condition	Element	Nd	Pr	Dy	Co	B	Fe	S	O
(1) Nd pH0.6+1000°C 2 hr	Wt%	29.60	9.24	0.00	0.00	4.56	2.29	9.84	29.44
(2) Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr	Wt%	52.14	16.85	0.00	0.00	3.26	4.40	6.64	19.40
(3) Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr	Wt%	51.48	16.31	0.00	0.00	3.03	0.19	0.56	23.29



**รูปที่ 4.16** ปริมาณธาตุของตะกอนที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์

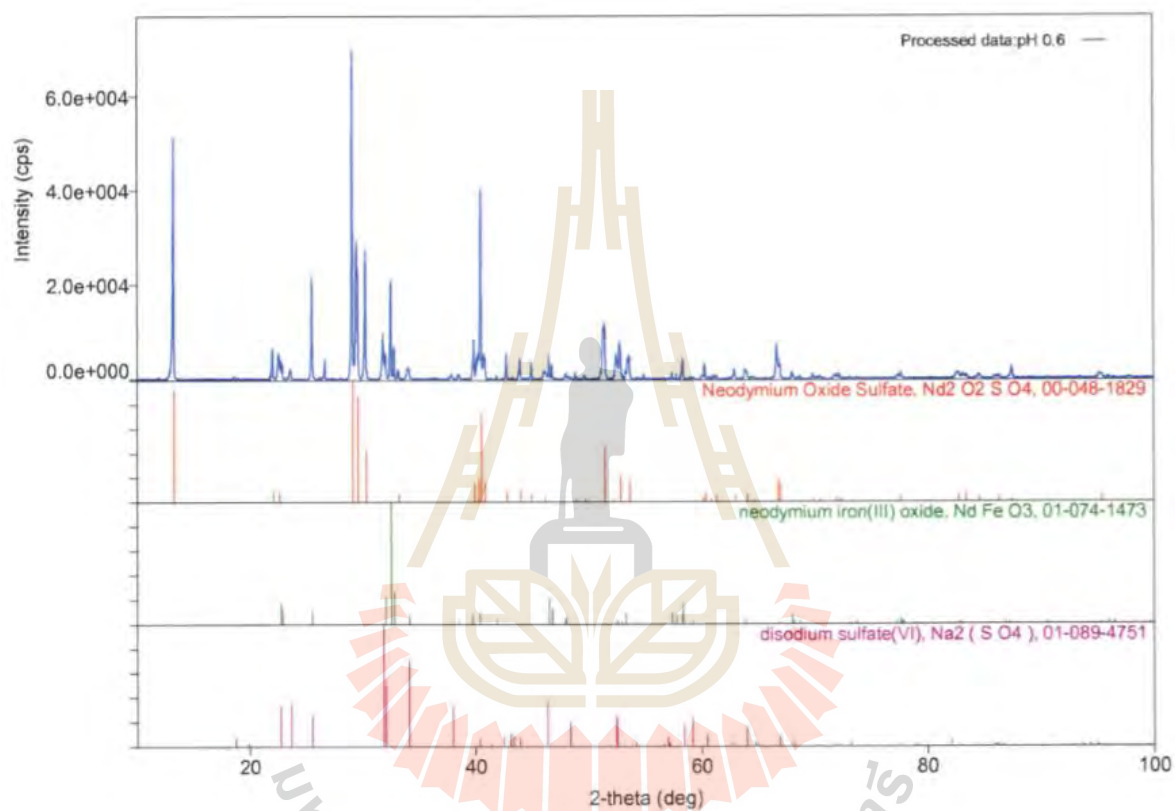
ตารางที่ 4.15 ผลวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบในตะกอนของแข็งที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์

Conditions	Compound	Nd <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )O <sub>2</sub>	NdFeO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )	REE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	REE(OH) <sub>3</sub>	NdFeO <sub>3</sub>	Unknown
<b>(1) Nd pH0.6</b>								
+1000°C 2 hr	%	65.42	20.89	9.3	0	0	0	4.38
<b>(2) Nd pH0.6-R</b>								
+1000°C 2 hr	%	0	0	0	79.76	2.11	17.75	0.38
<b>(3) Nd pH0.6-LR</b>								
+1000°C 2 hr	%	0	0	0	90.5	8.54	0	0.96

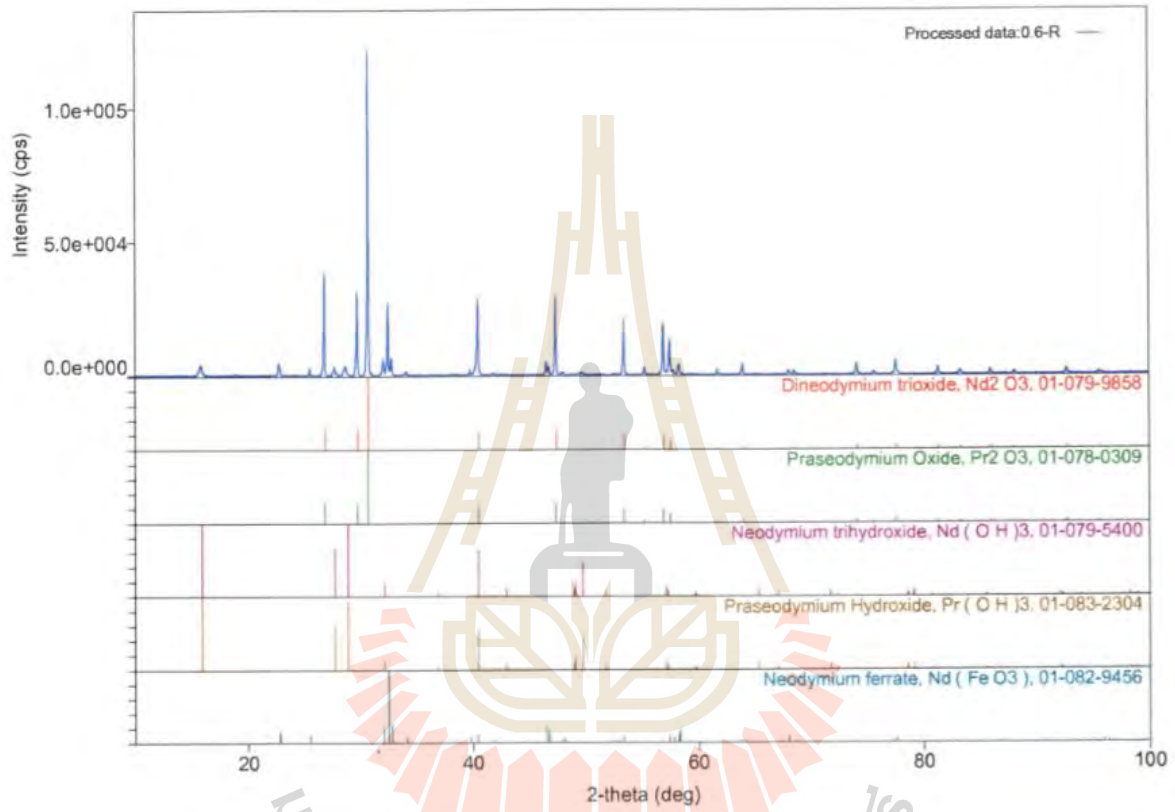
วิธีการที่ 1 (Nd pH0.6+1000°C 2 hr) ที่นำตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตไปเผาโดยตรงเพื่อที่จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์นั้น มีปริมาณนีโอดีเมียม 29.60% และพราซีโอดีเมียม 9.24% ในสารประกอบปริมาณต่ำที่สุด และมีซัลเฟอร์ปริมาณ 9.84% และออกซิเจน 29.44% อยู่ในสารประกอบที่ผ่านการเผาซึ่งสูงที่สุดจากทั้ง 3 วิธีการ ดังข้อมูลในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบดังข้อมูลในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.17 พบว่าสารประกอบที่ผ่านการเผาไม่สามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูงได้โดยตรง ดังจะเห็นได้จากชนิดของสารประกอบที่ประกอบไปด้วย Nd<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)O<sub>2</sub> 65.42% NdFeO<sub>3</sub> 20.89% และ Na<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>) 9.3% ซึ่งสารประกอบส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปของซัลเฟต ดังข้อมูลแสดงองค์ประกอบทางเคมีที่มีปริมาณซัลเฟอร์และออกซิเจนในปริมาณสูง ดังนั้นวิธีการเผาด้วยความร้อนเพื่อให้นีโอดีเมียมซัลเฟตเปลี่ยนไปเป็นนีโอดีเมียมออกไซด์โดยตรงทั้งหมดนั้นจึงไม่สามารถที่จะทำได้

วิธีการที่ 2 (Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr) ที่นำตะกอนซัลเฟตไปล้างด้วยน้ำเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ก่อนแล้วจึงทำการเผาเพื่อให้เปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์นั้น พบว่าในสารประกอบที่ผ่านการเผามีปริมาณนีโอดีเมียม 52.14% และพราซีโอดีเมียม 16.85% ซึ่งมีปริมาณที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวิธีการแรก โดยมีซัลเฟอร์และออกซิเจนลดลงเหลือเพียง 6.64% และ 19.40% ตามลำดับ และมีเหล็กเจือปนอยู่ 4.40% ดังข้อมูลในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบดังข้อมูลในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.18 พบว่าสารประกอบที่ผ่านการเผาส่วนใหญ่สามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก ประกอบไปด้วยออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก (REE<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) สูงถึง 79.76% และยังมีสารประกอบไฮดรอกไซด์ (REE(OH)<sub>3</sub>) คงเหลืออยู่ 2.11% อีกทั้งได้สารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและเหล็ก (NdFeO<sub>3</sub>) อีก 17.75% ซึ่งจากการที่มีปริมาณเหล็กเจือปนอยู่จึงสามารถที่จะเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ร่วมกันระหว่างนีโอดีเมียมและเหล็ก ถึงแม้ว่าวิธีการนี้สามารถรีไซเคิลขยะแม่เหล็กให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ในเปอร์เซ็นต์ที่ค่อนข้างสูงถึง 79.76% ซึ่งสูงกว่าวิธีการที่ 1 แต่ความบริสุทธิ์ของนีโอดีเมียมออกไซด์ที่ได้ยังไม่สูงพอที่จะสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในทางอุตสาหกรรมเพื่อผลิตเป็นแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้

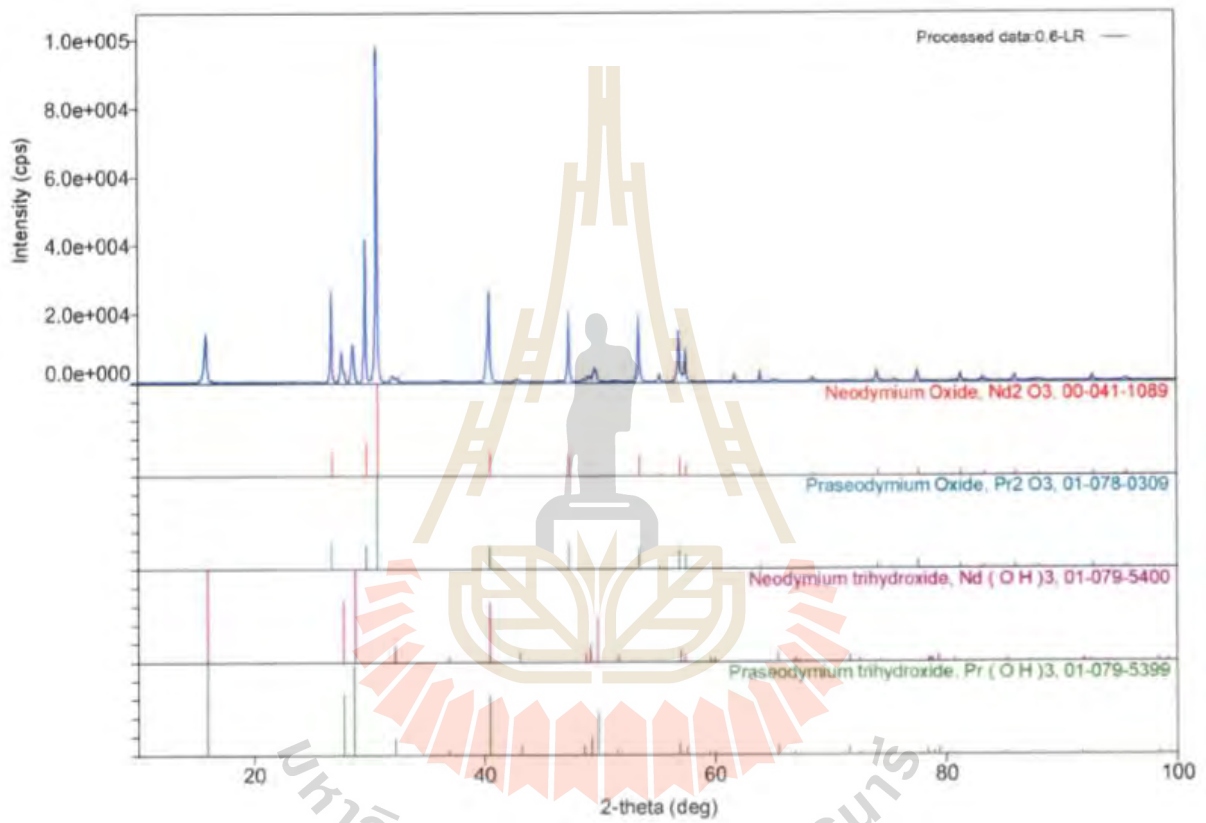




รูปที่ 4.17 ผลวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์  
วิธีที่ (1) Nd pH0.6+1000°C 2 hr



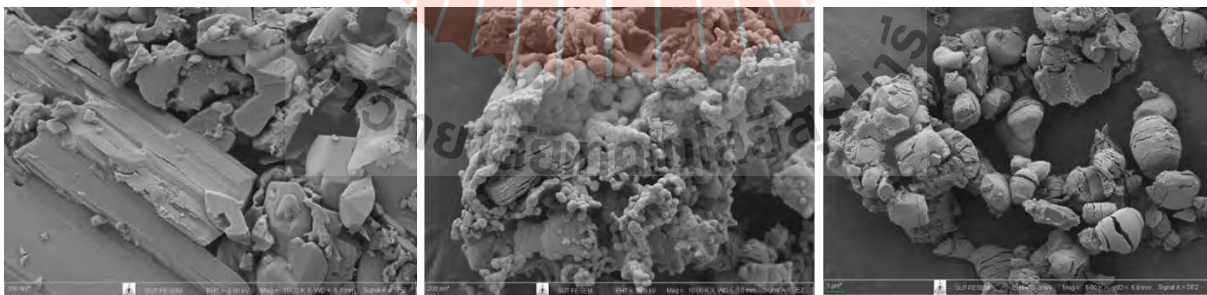
รูปที่ 4.18 ผลวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์  
วิธีที่ (2) Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr



รูปที่ 4.19 ผลวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์  
วิธีที่ (3) Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr

วิธีที่ 3 (Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr) ที่นำตะกอนซัลเฟตไปกำจัดเหล็กออกไปเพื่อให้ได้นีโอดีเมียมซัลเฟตที่มีความความบริสุทธิ์สูงก่อน จากนั้นค่อนนำไปล้างด้วยต่างเพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ แล้วทำการเผาเพื่อให้เปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์นั้น พบว่ามีปริมาณนีโอดีเมียม 51.48% และพราซีโอดีเมียม 16.31% ในสารประกอบที่ผ่านการเผาซึ่งเป็นปริมาณที่สูง ยิ่งไปกว่านั้นยังพบว่ามีปริมาณของเหล็กและซัลเฟอร์เจือปนอยู่เพียง 0.19% และ 0.56% ตามลำดับ โดยมีปริมาณธาตุเจือปนที่ต่ำกว่าทั้งสองวิธีการก่อนหน้านี้ดังข้อมูลในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.16 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบดังข้อมูลในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.19 พบว่าสารประกอบที่ผ่านการเผาสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากเกือบทั้งหมด ประกอบไปด้วยออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก ( $RE_2O_3$ ) สูงถึง 90.5% และมีสารประกอบไฮดรอกไซด์ ( $RE(OH)_3$ ) หลงเหลืออยู่ 8.54% โดยที่ไม่มีสารประกอบออกไซด์ร่วมของนีโอดีเมียมและเหล็ก ( $NdFeO_3$ ) หรือสารประกอบซัลเฟตเจือปนอยู่ เนื่องจากมีปริมาณเหล็กและซัลเฟอร์เจือปนต่ำ และมีการกำจัดเหล็กออกไปจากตะกอนของแข็งก่อนที่จะนำมาล้างด้วยต่างทำให้ได้ตะกอนนีโอดีเมียมที่มีความบริสุทธิ์สูงในตอนเริ่มต้นก่อนที่จะทำการเผาด้วยความร้อน ดังนั้นจากวิธีการดังกล่าวนี้สามารถที่จะทำการรีไซเคิลขยะแม่เหล็ก Nd-Fe-B ให้ได้ออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ และสามารถที่จะพัฒนาและปรับปรุงให้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ในอุตสาหกรรมได้ โดยอาจจะต้องทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มอุณหภูมิในการเผาหรือเพิ่มระยะเวลาในการเผาเพื่อที่จะทำให้สารประกอบไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อยสามารถที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ได้ทั้งหมด

ในส่วนของคุณลักษณะรูปร่างของตะกอนที่ผ่านการเผาจากวิธีการทั้งสามวิธี ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จะเห็นได้ว่ารูปร่างของตะกอนจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 4.20



(1) Nd pH0.6+1000°C 2 hr

(2) Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr

(3) Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr

**รูปที่ 4.20** ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) แสดงลักษณะรูปร่างของตะกอนของแข็งที่ผ่านขั้นตอนการเผาเพื่อให้เป็นสารประกอบออกไซด์ (1) Nd pH0.6+1000°C 2 hr (2) Nd pH0.6-R+1000°C 2 hr (3) Nd pH0.6-LR+1000°C 2 hr



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประสบผลสำเร็จในการทดลองรีไซเคิลขยะแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอไดเมียม-เหล็ก-โบรอนจากขยะแม่เหล็กที่ใช้งานในชิ้นส่วนอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของนีโอไดเมียมและโลหะหายากที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 90.5%

ปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการรีไซเคิลแม่เหล็ก ได้แก่ ค่า pH ในการตกตะกอนของแข็งเพื่อสกัดเอาโลหะนีโอไดเมียมออกจากสารละลาย การกำจัดเหล็กออกจากตะกอนนีโอไดเมียมซัลเฟตเพื่อให้ได้นีโอไดเมียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูง การล้างตะกอนซัลเฟตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเปลี่ยนรูปของสารประกอบซัลเฟตให้ไปอยู่ในรูปของสารประกอบไฮดรอกไซด์ และการเผาด้วยความร้อนเพื่อให้ได้สารประกอบออกไซด์ของนีโอไดเมียมและโลหะหายาก โดยสามารถสรุปผลของปัจจัยต่างๆ ต่อกระบวนการรีไซเคิลแม่เหล็กได้ดังนี้

##### 5.1.1 ค่า pH ในการตกตะกอนของแข็งนีโอไดเมียมและโลหะหายาก

ค่า pH ส่งผลโดยตรงกับการตกตะกอนของแข็งของโลหะจากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 จะทำให้ได้สารประกอบซัลเฟตที่มีธาตุมลทินเจือปนต่ำกว่าที่ค่า pH เท่ากับ 3 และค่า pH เท่ากับ 8 โดยมีปริมาณนีโอไดเมียม 26.50% พราซีนีโอไดเมียม 8.46% และมีเหล็กตกตะกอนเจือปนเพียง 1.19% ทำให้ได้สารประกอบที่อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของโลหะหายาก ( $\text{Na} \cdot \text{REE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 97.81% และมีสารประกอบซัลเฟตของเหล็ก ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เจือปนเพียง 1.91% เนื่องจากโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนออกมาจากสารละลายที่ค่า pH ที่แตกต่างกัน โดยที่นีโอไดเมียมและโลหะหายากจะตกตะกอนออกมาจากสารละลายของกรดซัลฟิวริกเกือบทั้งหมดที่ค่า pH ต่ำกว่า 1 ขณะที่เหล็กจะเริ่มตกตะกอนออกมาจากสารละลายในช่วง pH ตั้งแต่ 1-3 และตกตะกอนเพิ่มขึ้นที่ค่า pH 3-7 จากนั้นจะตกตะกอนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่า pH 7-8 และตกตะกอนออกมาจากสารละลายเกือบทั้งหมดที่ค่า pH เท่ากับ 8 ดังนั้นด้วยกลไกนี้พบว่าการตกตะกอนของแข็งที่ค่า pH 0.6 ทำให้สามารถที่จะเลือกสกัดนีโอไดเมียมและโลหะหายากออกมาจากสารละลายโดยที่มีเหล็กตกตะกอนเจือปนอยู่ในสารประกอบซัลเฟตในปริมาณต่ำ

##### 5.1.2 การกำจัดเหล็กออกจากตะกอนนีโอไดเมียมซัลเฟต

การใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกในการชะละลายตะกอนซัลเฟตที่ได้จากขั้นตอนการตกตะกอนของแข็งสามารถกำจัดเหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) ที่เจือปนมากับสารประกอบซัลเฟตของนีโอไดเมียมและโลหะหายาก ( $\text{Na} \cdot \text{REE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ให้ลงไปอยู่ในสารละลายได้ ทำให้ได้ตะกอนนีโอไดเมียมซัลเฟตที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น โดยปริมาณเหล็กในตะกอนซัลเฟตลดลงจาก 1.19% เหลือเพียง 0.14% ซึ่งจะส่งผลทำให้ได้สารประกอบซัลเฟต

ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นจาก 97.81% เป็น 99.85% เนื่องจากเมื่อปริมาณเหล็กในตะกอนของแข็งลดลงจึงส่งผลให้สารประกอบของเหล็กซัลเฟตที่เจือปนมีปริมาณลดลงไปด้วย จึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่จะส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย

### 5.1.3 การล้างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการเผาด้วยความร้อน เพื่อให้ได้สารประกอบนีโอดีเมียมออกไซด์

การเผาให้ความร้อนโดยตรง (Direct calcination) ไม่สามารถทำการเปลี่ยนสารประกอบซัลเฟตของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก ( $\text{Na} \cdot \text{REE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ที่ได้จากการตกตะกอนของแข็งให้ไปอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากได้ ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) ได้ โดยได้สารประกอบอยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟตของนีโอดีเมียม ( $\text{Nd}_2(\text{SO}_4)_2$ ) 65.42% โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 9.3% และสารประกอบออกไซด์ร่วมระหว่างเหล็กและนีโอดีเมียม ( $\text{NdFeO}_3$ ) 20.89%

การล้างตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{REE}(\text{OH}_3)$ ) ก่อนการเผาด้วยความร้อน สามารถทำให้สารประกอบหลังผ่านการเผาอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากได้ ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) ได้ โดยตะกอนนีโอดีเมียมซัลเฟตที่ผ่านการกำจัดเหล็กและการล้างด้วยด่าง เมื่อผ่านการเผาแล้วจะได้สารประกอบที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากได้ ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) สูงถึง 90.5% โดยที่มีสารประกอบนีโอดีเมียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{REE}(\text{OH}_3)$ ) ที่อาจเกิดจากการเผาที่ไม่สมบูรณ์คงเหลืออยู่เพียง 8.54% เนื่องจากตะกอนของแข็งที่ผ่านการกำจัดเหล็กจะทำให้มีปริมาณธาตุมลทินเจือปนต่ำจึงไม่มีสารประกอบของเหล็กเจือปนอยู่เหมือนกรณีการเผาให้ความร้อนโดยตรงและกรณีที่ไม่ได้ผ่านการกำจัดเหล็ก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนี้ยังมีประเด็นที่สามารถจะพัฒนาและปรับปรุงวิธีการรีไซเคิลให้มีความบริสุทธิ์สูงกว่านี้ได้ เช่น การปรับปรุงขั้นตอนการเผาเพื่อให้สารประกอบอยู่ในรูปของออกไซด์ (calcination) ให้สามารถที่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ได้ทั้งหมด โดยอาจศึกษาตัวแปรในการเผาให้ความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิในการเผา ระยะเวลาในการเผา และบรรยากาศที่ใช้ในการเผา อีกทั้งการทดลองชะละลายและตกตะกอนของแข็งด้วยสารละลายชนิดอื่น เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หรือทำการทดลองเพื่อที่จะเปลี่ยนสารประกอบออกไซด์ของนีโอดีเมียมและโลหะหายากไปอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นโลหะของนีโอดีเมียมและโลหะหายาก เพื่อพัฒนาต่อยอดสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแม่เหล็ก Nd-Fe-B ได้โดยตรง ซึ่งอาจจะต้องพบปัญหาว่าโลหะนีโอดีเมียมและโลหะหายากนั้นสามารถที่จะเกิดการออกซิไดซ์ในบรรยากาศทั่วไปหรือบรรยากาศที่มีออกซิเจนได้ง่าย เนื่องจากมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์ในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนให้อยู่ในรูปของออกไซด์ที่มีค่าติดลบค่อนข้างมาก หรือเป็นออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง ซึ่งต้องมีการควบคุมบรรยากาศของกระบวนการที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนเพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- D. Voßenkaul, S. Kruse and H.C. B. Friedrich, (2013). Recovery of rare earth elements from small scale consumer scrap magnets. Proceedings of EMC.
- C.J. Ferron and P. Henry, (2015). A review of the recycling of rare earth metals. Canadian Metallurgical Quarterly. Vol. 5. No. 4. 388-394.
- Y. Yang, A. Walton, R. Sheridan, K. Gu'th, R. Gauß, O. Gutfleisch, M. Buchert, B.M. Steenari, T.V. Gerven, P.T. Jones, K. Binnemans, (2017). REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. J. Sustain. Metall. 3:122–149. DOI 10.1007/s40831-016-0090-4.
- M. Firdaus, M.A. Rhamdhani, Y. Durandet, W.J. Rankin, K. McGregor, (2016). Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste. J. Sustain. Metall. 2:276–295. DOI 10.1007/s40831-016-0045-9.
- Y.Y. Bian, S.Q. Guo, Y.L. Xu, K. Tang, X.G. Lu and W.Z. Ding, (2015). Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process. J. Rare. Met. DOI 10.1007/s12598-015-0554-x.
- M.A.R. Onal, C.R. Borra, M. Guo, B. Blanpain and T.V. Gerven, (2017). Hydrometallurgical recycling of NdFeB magnets: Complete leaching, iron removal and electrolysis. Journal of Rare Earth. Vol. 35. No. 5. 574-584.
- M. Nakamoto, K. Kubo, Y. Katayama, T. Tanaka and T. Yamamoto, (2012). Extraction of Rare Earth Elements as Oxides from a Neodymium Magnetic Sludge. Metallurgical and Materials Transaction B. Vol. 43A. 468-476.
- C.H. Lee, Y.J. Chen, C.H. Liao, S.R. Popuri, S.L. Tsai and C.E. Hung, (2013). Selective Leaching Process for Neodymium Recovery from Scrap Nd-Fe-B Magnet. Metallurgical and Materials Transaction A. Vol. 44A. 5825-5833.
- J.P. Rabatho, W. Tongamp, Y. Takasaki, K. Haga and A. Shibayama, (2013). Recovery of Nd and Dy from rare earth magnetic waste sludge by hydrometallurgical process. J. Mater. Cycles Waste Manag. 15: 171-178.

S.T. Abrahami, Y. Xiao and Y. Yang, (2015). Rare-earth elements recovery from post-consumer hard-disc drives. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C)*. Vol. 124. No. 2. 106-115.

O. Takeda, T.H. Okabe and Y. Umetsu, (2006). Recovery of neodymium from mixture of magnet scrap and other scrap. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 408-412. 387-390.

A. Saguchi, K. Asabe, T. Fukuda, W. Takahashi and R.O. Suzuki, (2006). Recycling of rare earth magnet scraps: Carbon and oxygen removal from Nd magnet scraps. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 408-412. 1377-1381.

M. Sun, X. Hu, L. Peng, P. Fu, W. Ding and Y. Peng, (2015). On the production of Mg-Nd master alloy from NdFeB magnet scraps. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 218. 57-61.

C. Fredericci, M.F. de Campos, A.P.V. Braga, D.J. Nazarre, R.V. Martin, F.J.G. Landgraf and E.A. Perigo, (2014). Nd-enriched particles prepared from NdFeB magnets: A potential separation route. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 615. 410-414.

T. Itakura, R. Sasai and H. Itoh, (2006). Resource recovery from NdFeB sintered magnets by hydrothermal treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 408-412. 1382-1385.

M. Zakotnik, I.R. Harris and A.J. Williams, (2008). Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 450. 525-531.

M. Itoh, K. Nishiyama, F. Shogano, T. Murota, K. Yamamoto, M. Sasada and K. Machida, (2008). Recycle of rare earth sintered magnet powder scraps as electromagnetic wave absorbers in gigahertz range. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 451. 507-509.

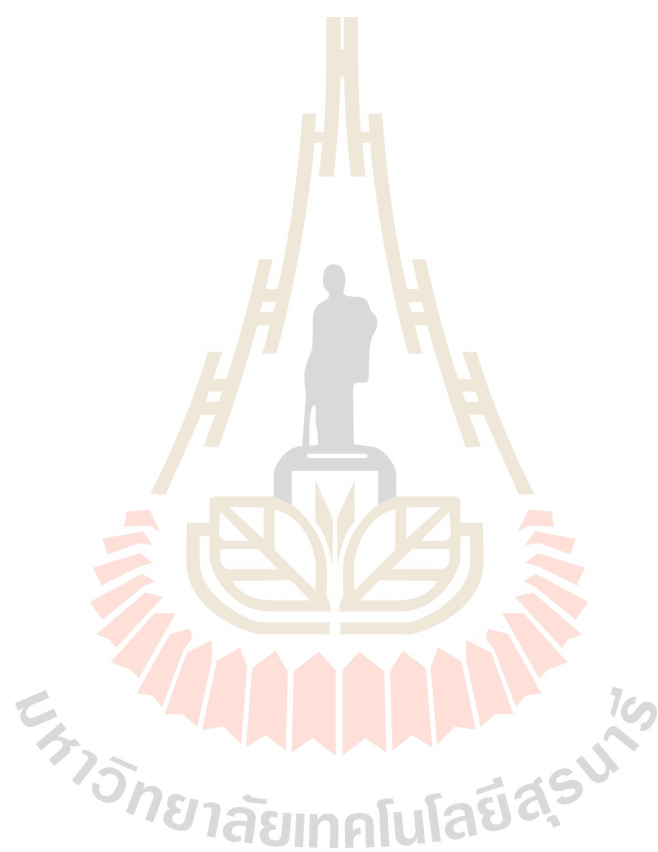
T. Horikawa, K. Miura, M. Itoh and K. Machida, (2006). Effective recycling for Nd-Fe-B sintered magnet scraps. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 408-412. 1386-1390.

S.R. Rao, (2011). *Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes*. Waste Management Series 7. Elsevier. Amsterdam. 256.

W. Xinchao, C. Roger, J. Viadero, and M. Karen, (2005). *Environ. Eng. Sci.* Vol. 22. 745-755.

H.S. Yoon, C.J. Kim, K.W. Chung, J.Y. Lee, S.M. Shin, S.J. Lee, A.R. Joe, S.I. Lee and S.J. Yoo, (2014). Leaching kinetics of neodymium in sulfuric acid of rare earth elements (REE) slag concentrated by pyrometallurgy from magnetite ore. Korean J. Chem. Eng. Vol. 31. 1766-1772.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium\\_magnet](https://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet).





## แบบประวัติส่วนตัว

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

โทรศัพท์: 0 4422 4522, 081 8730050 โทรสาร: 0 4422 4482



### ชื่อ-นามสกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญา บัวฮอมบुरา

Assistance Professor Dr. Panya Buahombura

### ตำแหน่งปัจจุบัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ

### สถานที่ติดต่อ (ที่ทำงาน)

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

### โทรศัพท์/โทรสาร

โทรศัพท์: 0-4422-4522, 081-8730050 โทรสาร: 0-4422-4481

### E-mail

[panya\\_b@sut.ac.th](mailto:panya_b@sut.ac.th)

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2556

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วัสดุศาสตร์)

มหาวิทยาลัยแห่งเมืองนางาโอกะ ประเทศญี่ปุ่น

พ.ศ. 2548

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2542

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโลหการ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2551 – ปัจจุบัน

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2549 – 2551

นักโลหวิทยา แผนกพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิต ฝ่ายเทคนิค  
บริษัท นครไทยสตรีปมีลล์ จำกัด (มหาชน)

พ.ศ. 2542 – 2545

ผู้จัดการฝ่ายผลิต บริษัท บุรพาเหล็กกล้า จำกัด

## ผลงานวิจัย

- การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอติเมียม-เหล็ก-โบรอนจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ – หัวหน้าโครงการ
- โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดนครราชสีมา) ร่วมกับ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม – ผู้ร่วมวิจัย
- โครงการจัดทำแผนแม่บทการจัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ : เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) ((ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการบริหารการจัดการขยะ) (บูรณาการ)) ร่วมกับ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม – ผู้ร่วมวิจัย
- โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดพระนครศรีอยุธยา) ร่วมกับ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม – ผู้ร่วมวิจัย
- โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดฉะเชิงเทรา) ร่วมกับ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม – ผู้ร่วมวิจัย
- โครงการส่งเสริมและต่อยอดเทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และสนับสนุนการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศในพื้นที่ EEC (จังหวัดระยอง ชลบุรี และปราจีนบุรี) ร่วมกับ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม – ผู้ร่วมวิจัย

## สาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง

- Fatigue Properties and Fatigue Crack Growth of Materials
- Analysis of Metallurgical Failures
- Mechanical Behaviors and Materials Testing
- Metals and Materials Recycling
- Friction Stir Welding
- Structures and Properties of Alloy Steels
- Iron and Steel Making
- Physical Metallurgy of Steels

## ภาระงานในปัจจุบัน

### 1. งานประจำ

- อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 2. งานวิจัยที่รับผิดชอบในปัจจุบัน

- การศึกษาความเป็นไปได้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กแรงดึงดูดสูงที่มีองค์ประกอบของนีโอดีเมียม-เหล็ก-โบรอนจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ – หัวหน้าโครงการ
- ความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการเตรียม โครงสร้างจุลภาค และสมบัติของลวดโลหะผสมทองแดงเงิน เซอร์โคเนียม – ผู้วิจัยร่วม

### 3. ผลงานอื่นๆ เช่น ตำรา บทความ สิทธิบัตร ฯลฯ

#### 3.1 ผลงานวิชาการ

- **PANYA Buahombura**, PIYA Kaewnopparat, MAWIN Surpradist Na Ayudhaya, SUVANCHAI Pongsukitwat and Takateru UMEDA, “Numerical Analysis of Heat Transfer and Solidification Behaviors of a Wheel/Belt Type Continuous Caster of Aluminum”, Proceedings of the 9<sup>th</sup> Asian Foundry Congress, Hanoi, Vietnam, 2005, pp. 479-486.
- **PANYA Buahombura**, PIYA Kaewnopparat, MAWIN Surpradist Na Ayudhaya, SUVANCHAI Pongsukitwat and Takateru UMEDA, “Numerical Analysis of Near Net Shape Continuous Casting of Aluminum”, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT), Bangkok, Thailand, 2006, M12.
- **Panya BUAHOMBURA**, Yukio MIYASHITA, Yoshiharu MUTOH and Seo NOBUSHIRO, “Fatigue Crack Growth Behavior of FSWed Joint in Different Aluminum Alloys”, Japan Society of Mechanical Engineers Materials and Processing Division 20<sup>th</sup> Machine Materials and Materials Processing Technology Lecture (M&P2012), Osaka, Japan (November 30-December 2, 2012).
- **Panya BUAHOMBURA**, Yukio MIYASHITA, Yuichi OTSUKA, Yoshiharu MUTOH and Seo NOBUSHIRO, “Fatigue Crack Growth Behavior of FSWed Joint Joined with a Bobbin Type Tool in Different Aluminum Alloys”, Applied Mechanics and Materials, Vol. 446-447 (2014), pp. 32-39.
- **Panya BUAHOMBURA**, Yukio MIYASHITA, Yuichi OTSUKA, Yoshiharu MUTOH and Seo NOBUSHIRO, “Fatigue crack growth behavior in weld nugget zone of FSWed similar and dissimilar aluminum alloys joints”, IJS-JW Friction Based Welding and Processing, ISBN: 978-1-78242-163-4, Woodhead Publishing (2013) pp. 225-230.
- Waraporn Piyawit and **Panya Buahombura**, “Observation of Ag precipitate in CuAgZr alloy during In- Situ high temperature TEM”, 2016 International Conference on Functional Materials and Steel (ICFMS 2016), Hong Kong (December 4-6, 2016).
- Loeslakkhana Srikhang, Sakhob Khumkoa, **Panya Buahombura** and Narong Akkarapattanagoon, “A Study on Recycling of Tin Metal from Solder Wire Scrap by

Electrorefining” 2017 ICEAI: The 7th International Congress on Engineering and Information, Kyoto, Japan (May 9-11, 2017).

- Thumrongsak Witchnantakul, **Panya Buahombura**, Sarum Boonmee, and Narong Akkarapattanagoon, “ Effects of Copper on Microstructure and Mechanical Properties of Compacted Graphite Irons in As-cast Condition” , The 3<sup>rd</sup> Thailand Metallurgy Conference, Bangkok, Thailand, 2009.
- W. Piyawit, **P. Buahombura**, “Microstructural Investigation of CuAgZr alloy processed by severe plastic deformation” , 11<sup>th</sup> Asia-Pacific Microscopy Conference, Phuket, Thailand, 2016.
- Waraporn Piyawit, Niwat Chuangsang, Yuttana Prompisarn, Pimsiri Rattanasopa, Natthapol Chomsaeng and **Panya Buahombura**, “ Effects of Ag Precipitate on the stress-strain behaviour of CuAgZr wires” , Proceedings of the 34<sup>th</sup> MST Annual Conference, Bangkok, Thailand (May 31<sup>st</sup> – June 2<sup>nd</sup>, 2017).
- W. Piyawit, P. Rattanasopa, K. Prompipattanaporn, and **P. Buahombura**, “Contributions of Self-Align Ag Precipitates to Hardening Effects of CuAgZr”, Regional Conference on Materials & ASEAN Microscopy Conference 2017 (RCM & AMC 2017), Penang, Malaysia (December, 2017).
- W. Piyawit, **P. Buahombura**, “Observation of Ag precipitate in CuAgZr alloy during In-Situ high temperature TEM”, Solid State Phenomena, Vol. 263 (2017), pp. 50-54.
- W. Piyawit, **P. Buahombura**, “The Effect of Ag Precipitates on Strength and Ductility of CuAgZr Alloy”, Suranaree Journal of Science and Technology (SJST), 24(3):291-299, 2017.
- Tawatchai Intaing, **Panya Buahombura** and Rattana Borrisutthekul, Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy and Polyethylene, The 13<sup>rd</sup> International Conference on Ecomaterials (ICEM13), Bangkok, Thailand (November 19-23, 2017).
- ธวัชชัย อินทรีย์, **ปัญญา บัวฮอมบورا** และ รัตน์ บริสุทธิ์กุล. การศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียม 6063. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31. จังหวัดนครนายก ประเทศไทย. 4-7 กรกฎาคม 2560.
- Waraporn Piyawit, Pisit Sawananusorn, Loeslakhana Srikhang, **Panya Buahombura**, Narong Akkarapattanagoon, Tapanee Patcharawit and Sakhob Khumkoa, Selective Extraction and Recovery of Rare Earth Metals (REMs) from NdFeB Magnet Grinding Sludge, The Minerals, Metals & Materials Society 2018, B. Davis et al. (eds.), Extraction

2018, The Minerals, Metals & Materials Series, [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8\\_202](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_202), pp. 2399-2407.

- Tawatchai Intaing, **Panya Buahombura** and Rattana Borrissutthekul, “The Study of A6063-T831 Friction Stir Welding”, KMUTT Research and Development Journal, Vol. 41, No. 3, July-September 2018, pp. 282-297.
- Kareram A., Muktawat K., Lueangsod C., Patcharawit T., Khumkoa S., Piyawit W. and **Buahombura P.**, “Recycling of Spent Li-ion Battery by applying Hydro-and-Electrometallurgical Process”, The 11<sup>th</sup> Thailand Metallurgy Conference (TMETC11), Pattaya Thailand (November 15 – 16, 2018).
- Piyawit W., Limsiri P., Chanapote P., Thonthai N. and **Buahombura P.**, “Microstructural Investigation of AlCrFeNiCu Quinary Alloy”, The 11<sup>th</sup> Thailand Metallurgy Conference (TMETC11), Pattaya Thailand (November 15 – 16, 2018).
- เปี่ยมศักดิ์ เหล่าเคน, สงบ คำค้อ, **ปัญญา บัวชมบุรา**, อนุทัย คณะรัมย์, วรนิษฐา กริตสาริกัน และ อรทัย เบ็ญพาด, “การรีไซเคิลน้ำยาชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าเชื่อมสภาพด้วยวิธีอิเล็กโตรวินนิ่ง”, The 11<sup>th</sup> Thailand Metallurgy Conference (TMETC11), Pattaya Thailand (November 15 – 16, 2018).
- เลิศลักษณ์ ศรีคัง, สงบ คำค้อ และ **ปัญญา บัวชมบุรา**, “การรีไซเคิลโลหะตีบุกจากเศษบัดกรีโดยวิธีอิเล็กโตรรีไฟนิ่ง”, The 11<sup>th</sup> Thailand Metallurgy Conference (TMETC11), Pattaya Thailand (November 15 – 16, 2018).
- Pimsiri Rattanasopa , **Panya Buahombura**, Waraporn Piyawit, “Deformation-Induced Martensite in Surface Modified 316L Stainless Steel”, Proceedings of the 36<sup>th</sup> MST International Conference, Bangkok, Thailand (26 – 29 March 2019).
- P. Rattanasopa, **P. Buahombura**, W. Piyawit, “Combination Effects of Deformation and Precipitation Hardening on Morphology of CuAgZr Alloy” Proceedings of the 10th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing, (2019), 769-775.
- Palod Limsiri\*, Pongsakorn Chanapote, Nuttamon Thonthai, **Panya Buahombura** and Waraporn Piyawit, Feasibility Study of High Entropy Alloy (HEA) Production Containing Al-Cr-Cu-Fe-Ni by Using Direct Electric-Arced Method, Journal of Vongchavalitkul University, Vol. 32 No. 2 July - December 2019, pp. 71-79.



- Sarum Boonmee\*, Kittirat Worakhut, Phanuphong Phaetphain and **Panya Buahombura**, “Prediction of Chill Formation in Gray Irons by Thermal Analysis”, *Key Engineering Materials*, 845 (2020). 87-93.
- **Panya Buahombura\***, Anuthai Kareram, Waraporn Piyawit and Sarum Boonmee, “Hydrometallurgical Process for Selective Extraction of Nd and Rare-earth Metals from End-of-Life Hard Disk Drives NdFeB Magnet Scrap”, *Key Engineering Materials*, 845 (2020). 81-86.

### 3.2 งานบริการวิชาการ

#### วิทยาการพิเศษ

- “Failure Analysis of Iron Casting” จัดโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เดือนมิถุนายน 2557 โรงแรมเอวานา บางนา กรุงเทพมหานคร
- “โลหะวิทยาของเหล็กกล้าผสม” จัดโดย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้า วันที่ 6 มิถุนายน 2557 ณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้า กรุงเทพมหานคร
- “การปรับปรุงสมบัติของเหล็กกล้าโดยกรรมวิธีทางความร้อน” จัดโดย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้า วันที่ 6 มีนาคม 2558 ณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้า กรุงเทพมหานคร
- “การเชื่อมโลหะในสถานะของแข็งด้วยกระบวนการเชื่อมด้วยแรงเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) และการประยุกต์ใช้งาน” วันศุกร์ที่ 6 มกราคม 2560 ณ ณ สรุสมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลแม่เหล็กกำลังสูงที่ไม่ใช่แล้วที่มีนีโอดีเมียม (Nd) เป็นองค์ประกอบ” การสัมมนาและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดเทคโนโลยีรีไซเคิล โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดนครราชสีมา) วันที่ 2 มิถุนายน 2559 ณ สรุสมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลซากแบตเตอรี่รถยนต์ไฮบริดจ์และเทคโนโลยีรีไซเคิลซากแบตเตอรี่โทรศัพท์มือถือชนิดที่มีลิเทียม (Li) เป็นองค์ประกอบ” การสัมมนาและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดเทคโนโลยีรีไซเคิล โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดนครราชสีมา) วันที่ 2 มิถุนายน 2559 ณ สรุสมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
- “การฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดเทคโนโลยีรีไซเคิลเศษลวดบัดกรี โดยการผลิตเป็นดีบุกบริสุทธิ์และเงินผสม” การสัมมนาและฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการถ่ายทอดเทคโนโลยีรีไซเคิล โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน

และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดนครราชสีมา) วันที่ 3 มิถุนายน 2559 ณ สุ  
รสัมมนาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

- “การสกัดเอาโลหะเงินจากซากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ใช้แล้ว” โครงการจัดทำแผนแม่บทการ  
จัดการซากผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ : เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) ((ภายใต้ค่าใช้จ่ายในการ  
บริหารการจัดการขยะ) (บูรณาการ)) วันเสาร์ที่ 12 พฤศจิกายน 2559 ณ ห้องวิชณุกรม 1  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน โดยการผลิตเป็นลิเทียมคาร์บอนเนต” โครงการ  
ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากรทดแทน และการ  
พัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดพระนครศรีอยุธยา) วันพฤหัสบดีที่ 12 ตุลาคม  
2560 ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลแม่เหล็กกำลังสูงที่มีนีโอติเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยการผลิตเป็น  
นีโอติเมียมออกไซด์” โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็น  
แหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดพระนครศรีอยุธยา)  
วันพฤหัสบดีที่ 11 ตุลาคม 2560 ณ โรงแรมกรุงศรีริเวอร์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลแม่เหล็กกำลังสูงที่มีนีโอติเมียมเป็นองค์ประกอบ โดยการผลิตเป็น  
โลหะทองแดงบริสุทธิ์” โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็น  
แหล่งทรัพยากรทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดฉะเชิงเทรา) วัน  
พฤหัสบดีที่ 30 สิงหาคม 2561 ณ โรงแรมเดอะไทด์ รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี
- “เทคโนโลยีรีไซเคิลน้ำยาชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าเสื่อมสภาพ โดยการผลิตเป็นโลหะนิเกิล  
บริสุทธิ์” โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีรีไซเคิลเพื่อการพัฒนาของเสียเป็นแหล่งทรัพยากร  
ทดแทน และการพัฒนาเมืองอุตสาหกรรมเชิงนิเวศ (จังหวัดฉะเชิงเทรา) วันพฤหัสบดีที่ 30  
สิงหาคม 2561 ณ โรงแรมเดอะไทด์ รีสอร์ท จังหวัดชลบุรี

#### 4. การศึกษาดูงาน/การฝึกอบรม/การเผยแพร่ผลงานวิชาการ

- พ.ศ. 2561 ศึกษาดูงานด้านกระบวนการรีไซเคิลโลหะมีค่า ณ บริษัท Agosi (Part of UMICORE)  
ประเทศเยอรมนี
- พ.ศ. 2560 ศึกษาดูงานด้านกระบวนการรีไซเคิลโลหะจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ ณ บริษัท ยูมิคอร์  
(UMICORE) ประเทศเบลเยียม
- พ.ศ. 2558 ศึกษาดูงานเกี่ยวกับการทดสอบทางกลและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบโลหะ ณ  
ประเทศเยอรมนี