

การได้มาซึ่งธาตุหายากและการนำไปใช้ประโยชน์

ดร. ดุษฎี รัตนพระ

ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีนิวเคลียร์

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)



Rare Earth แร่ธาตุหายาก ไฟต์ที่จีนจะใช้ต่อรองกับสหรัฐฯ

จากสงครามการค้ายกระดับเป็นสงครามเทคโนโลยี และมีปัจจัยสำคัญอย่างแร่ธาตุเข้ามาเป็นตัวแปร ดูเหมือนงานนี้ทั้งสหรัฐฯ และจีนจะมีเรื่องให้ต้องเจรจันงันหรือกันอีกยาวพอสมควร

แหล่งที่มา: <https://thestandard.co/rare-earth/>

สหรัฐฯ หาวิธีผลิตแร่หายาก 17 ชนิดเอง เตรียมตัวไม่ง้อจีน

สหรัฐอเมริกามีเพียงเหมืองเดียวที่อยู่รัฐแคลิฟอร์เนียที่ดำเนินการผลิตแร่หายาก แต่บริษัท MP Material เจ้าของเหมืองต้องส่งแร่หายากเข้มข้นราว 50,000 ตันไปเข้าสู่กระบวนการอื่นๆ ต่อที่ประเทศจีนทุกปี มีอย่างน้อย 3 บริษัทที่มีโรงงานผลิตแร่หายากและอยู่ระหว่างการก่อสร้างโรงงาน คาดว่า 2 โรงงานจะเปิดได้อย่างเร็วที่สุดในปี 2022

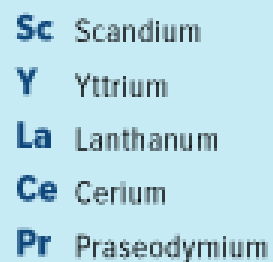
แหล่งที่มา: <https://themomentum.co/china-pentagon-sends-report-on-rare-earth-minerals-to-congress/>



จีนเร่งพัฒนาแหล่งแร่หายาก หวังมีชัยเหนือสงครามการค้ากับสหรัฐฯ

สหรัฐฯ ต้องพึ่งพาแหล่งแร่จากต่างประเทศรวมถึงจีน ตั้งแต่แผงโซลาร์เซลล์และกังหันลม ไปจนถึงแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้า หรือแม้แต่เครื่องบินขับไล่ ขณะที่ สงครามการค้าในปี 2018 ทำให้สหรัฐฯ กังวลอย่างยิ่งว่า จีนจะควบคุมแร่ธาตุหายาก เพื่อวัตถุประสงค์เชิงยุทธศาสตร์ นับตั้งแต่นั้นมา สหรัฐฯ จึงพยายามเพิ่มห่วงโซ่อุปทานจากประเทศอื่น

แหล่งที่มา: <https://www.tnnthailand.com/news/world/100994/>



Nd	Neodymium
Pm	Promethium
Sm	Samarium
Eu	Europium

Gd	Gadolinium
Tb	Terbium
Dy	Dysprosium
Ho	Holmium

Er	Erbium
Tm	Thulium
Yb	Ytterbium
Lu	Lutetium

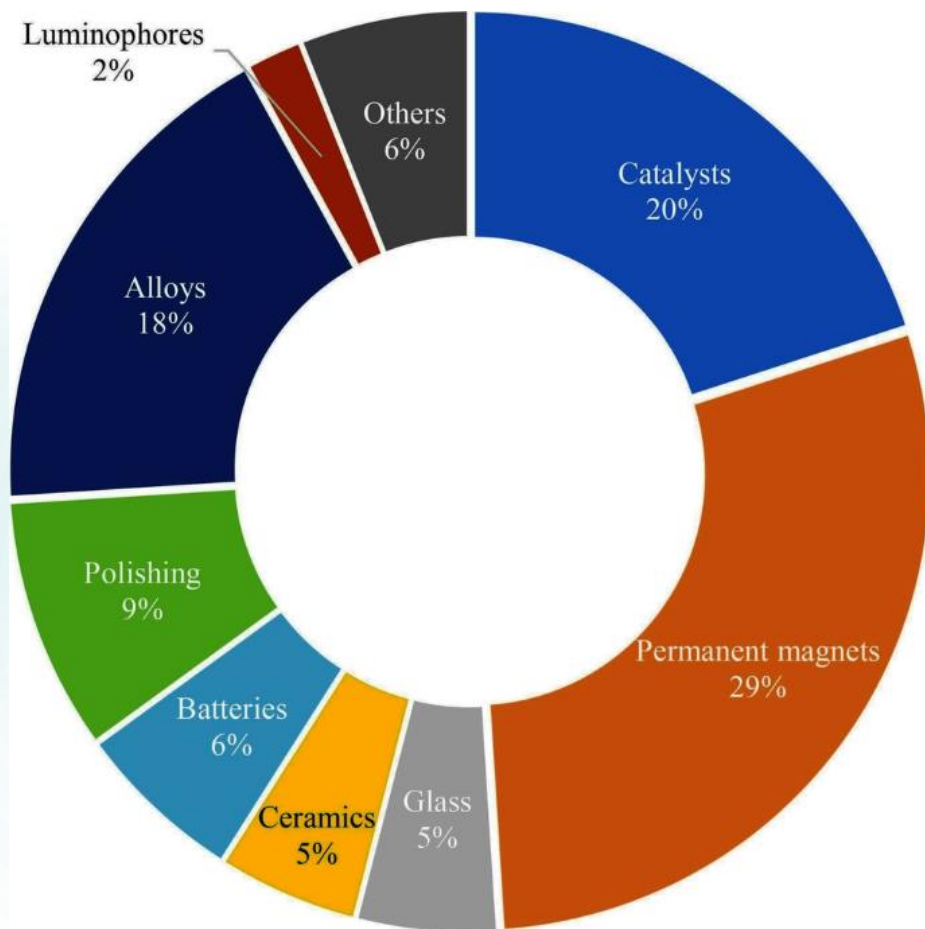
ธาตุหายากและการใช้ประโยชน์

4

การนำไปใช้ประโยชน์	ธาตุหายาก
แม่เหล็กถาวร (Permanent magnets) - เป็นแม่เหล็กที่แข็งแรง ไม่เสียสภาพความเป็นแม่เหล็กที่อุณหภูมิสูงในและน้ำหนักเบา - ใช้เป็นมอเตอร์ในรถยนต์ไฟฟ้าและรถยนต์ hybrid - ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมและน้ำ (Turbine and hydro power generator) - ใช้เป็นแม่เหล็กในเครื่อง MRI เพื่อผลิตสนามแม่เหล็ก - Speaker ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ - disc drives ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจำทำให้น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก และมอเตอร์มีพลังงานสูง	Nd, Pr, Dy, Gd, Tb, Sm
Ni metal hydride batteries (NiMH) ใช้เป็นแบตเตอรี่ในรถยนต์ไฟฟ้า รถยนต์ hybrid ระบบไฟฟ้าของเครื่องบิน ระบบการระบุตำแหน่งของดาวเทียม เนื่องจากธาตุหายากมีคุณสมบัติในการกักเก็บไฮโดรเจนได้อย่างเหมาะสม อีกทั้งมีความสามารถในการปลดปล่อยและดูดซับกลับไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถชาร์จไฟได้อย่างรวดเร็วและมีพลังงานสูง ทำให้แบตเตอรี่มีอายุการใช้งานที่นานและไม่ต้องซ่อมแซม	La, Ce, Pr, Sm, Nd
สารเรืองแสง (phosphors) - หลอดไฟ LED - หน้าจอ smartphone และทีวี	Eu, Tb, Y, La, Ce, Gd
ผงขัดเงาเลนส์และกระจกและสารเคลือบเลนส์ - ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการขัดเลนส์ให้แม่นยำ ปรับปรุงภาพให้คมชัด และขัดเลนส์ได้เร็วขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ทำให้เกิดแรงบดมาก - เพิ่มความคงทนของสีเคลือบและป้องกันการเปลี่ยนสีของเลนส์ เนื่องจากมีคุณสมบัติการดูดซับแสง UV ที่ต่ำ	Ce, La, Nd
ตัวลดมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์ (three-way catalytic convertor) ทำหน้าที่เปลี่ยนแก๊สเสีย ได้แก่ NO₂, CO และ hydrocarbon ให้กลายเป็นแก๊ส N₂, CO₂ และ น้ำ ตามลำดับ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวกักเก็บและปลดปล่อยออกซิเจนที่ดี	Ce
ตัวเร่งปฏิกิริยาโรงกลั่นน้ำมัน ช่วยเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันดิบ	La, Ce, Pr, Nd
ยูทโรปรณ์ทางการทหาร - เป็นวัสดุในส่วนของตัวลำเครื่องบินรบ เรือดำน้ำ รถถังให้ความแข็งแรง - ใช้ในระบบความแม่นยำของดาวเทียม - ระบบไฟฟ้าและมอเตอร์ในเครื่องบินรบ - ระบบการยิงด้วยเลเซอร์ในอาวุธสงคราม	Nd, Pr, Sm, Dy, Tb, Y

ธาตุหายากและการใช้ประโยชน์

สัดส่วนการใช้ประโยชน์ธาตุหายากในด้านต่างๆ



ปริมาณธาตุหายากที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ

Mobile phone	0.0005 kg
Air conditioner	0.12 kg
Toyota Prius	15 kg REE per unit
Lockheed-Martin F-35	416 kg
Navy surface ships	1818 kg
Navy submarines	3636 kg

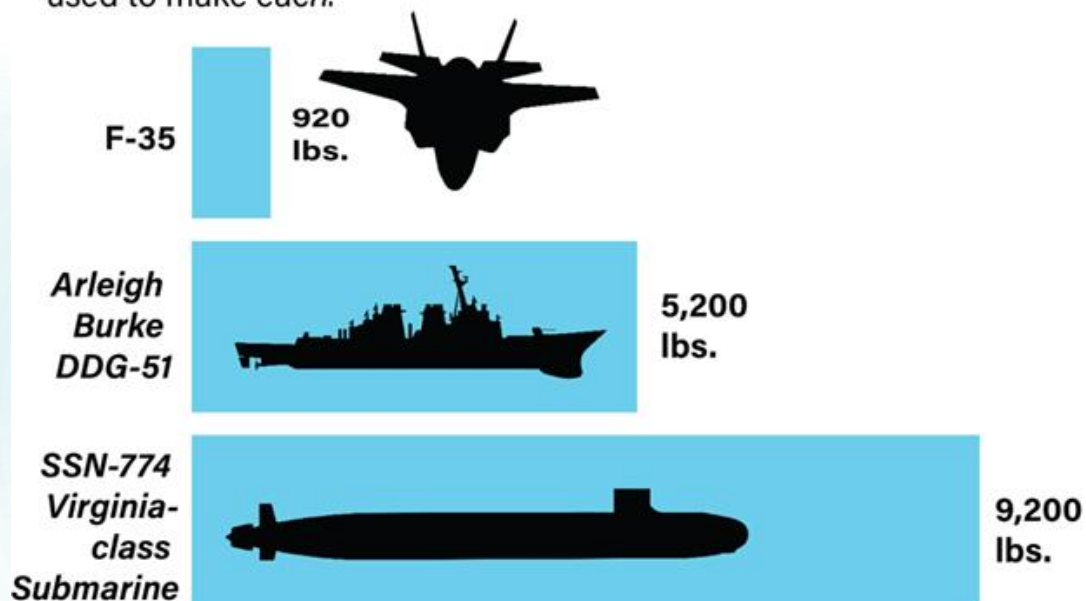
ธาตุหายากและการใช้ประโยชน์

6

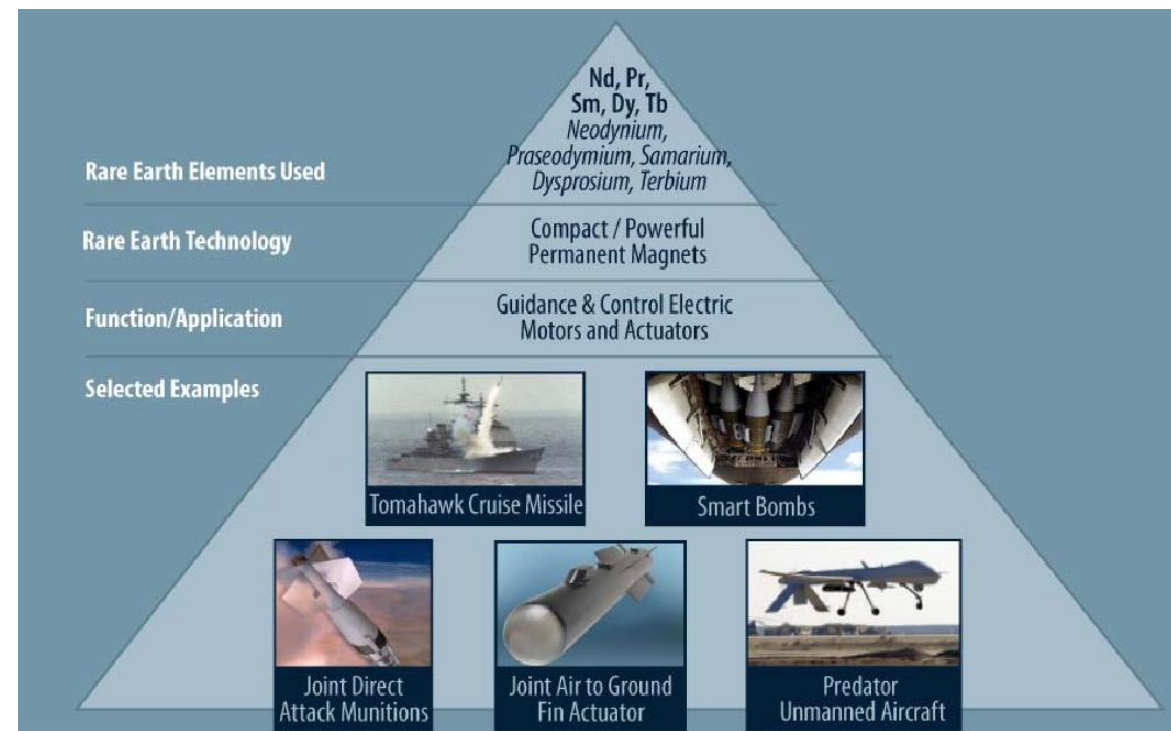
การใช้ประโยชน์ธาตุหายากและปริมาณการใช้ในการผลิตยุทธโปกรณ์ทางการทหาร

Rare Ingredients

Here is the breakdown of rare-earth materials used to make each.



Source: Congressional Research Service

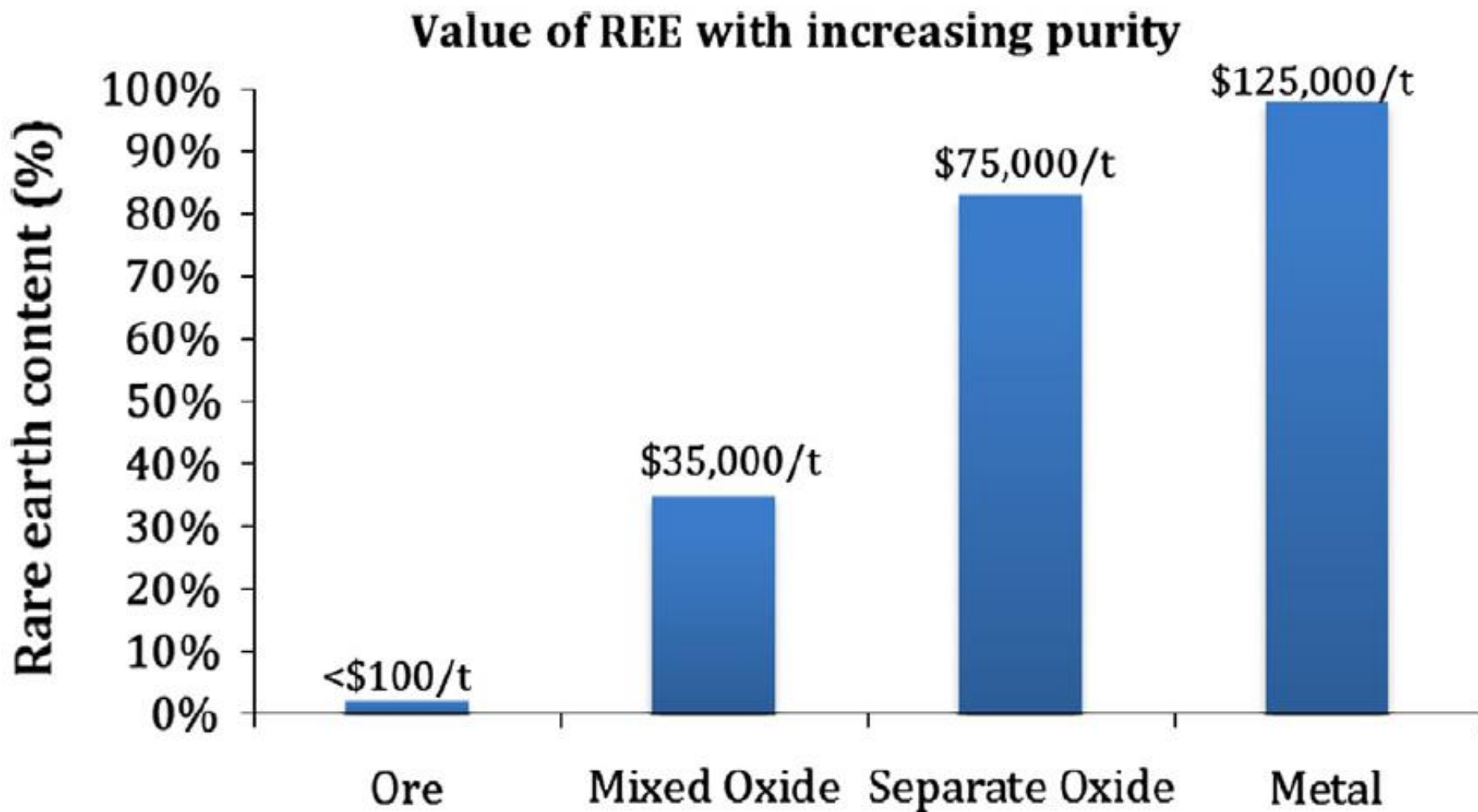


ราคาธาตุหายาก

7

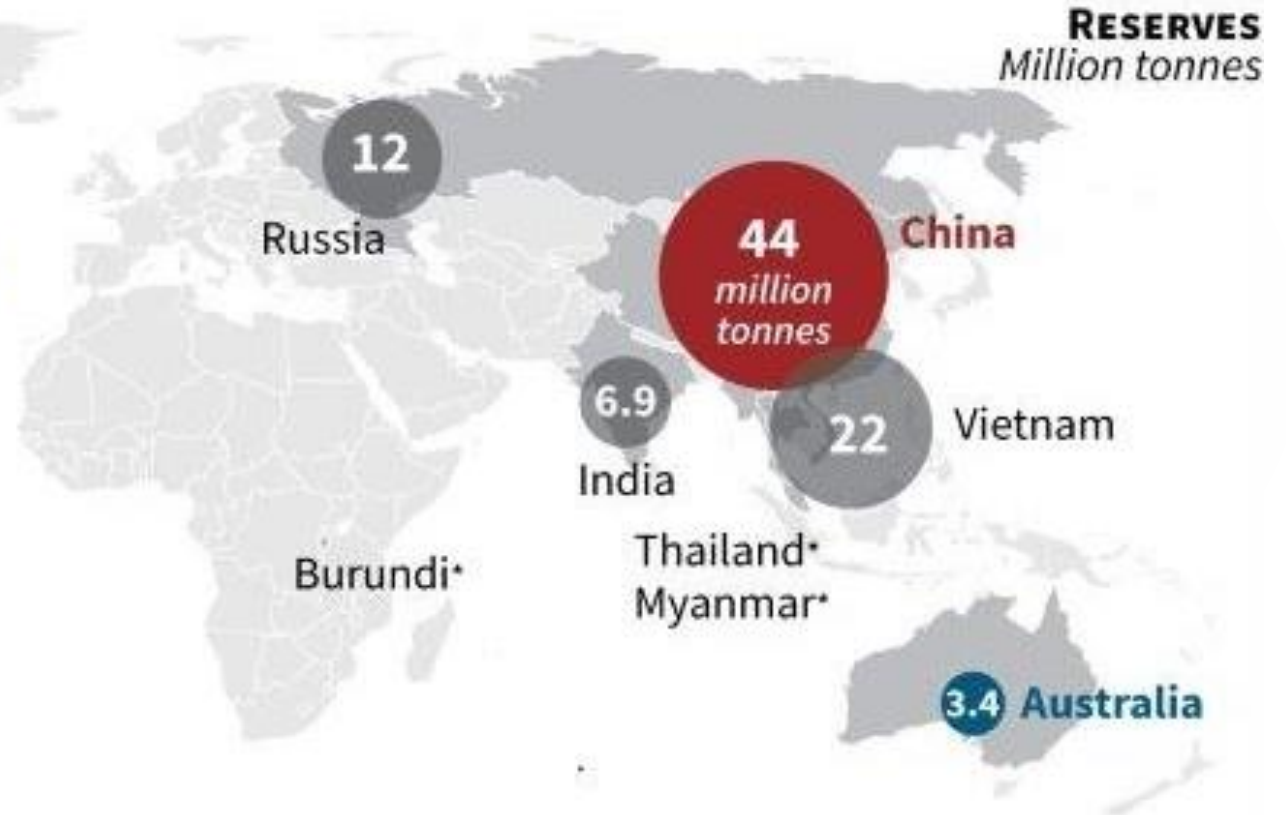
ชนิดธาตุหายากออกไซด์	ความบริสุทธิ์	ราคา (บาท/ตัน)
เทอร์เบียมออกไซด์ (Tb_2O_3)	99.9-99.99%	68,228,358 – 69,286,162
ดิสโพรเซียมออกไซด์ (Dy_2O_3)	99.5-99.9%	13,645,671 – 13,910,122
เพรซีโอดิเมียมออกไซด์ (Pr_6O_{11})	Pr_6O_{11} /TREO 99.0-99.5%	4,813,008 – 4,918,788
นีโอดิเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3)	Nd_2O_3 /TREO 99.0-99.9%	5,024,569 – 5,130,349
ยูโรเพียมออกไซด์ (Eu_2O_3)	Eu_2O_3 /TREO 99.9-99.99%	1,004,913 – 1,057,804
เออร์เบียมออกไซด์ (Er_2O_3)	99.5-99.9%	1,877,602 – 1,930,492
แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3)	99.5-99.9%	2,432,949 – 2,538,730
อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	Y_2O_3 /TREO 99.99-99.999%	465,433 – 470,722
แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3)	La_2O_3 /TREO 99.0-99.9%	43,370 – 44,957
ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)	CeO_2 /TREO 99.0-99.5%	45,486 – 47,072
ซาแมเรียมออกไซด์ (Sm_2O_3)	$\geq 99.5\%$	121,647 – 132,225

Source: <http://www.metal.com/Rare-Earth-Oxides>; 15 April, 2022



2018 PRODUCTION Tonnes

RESERVES Million tonnes



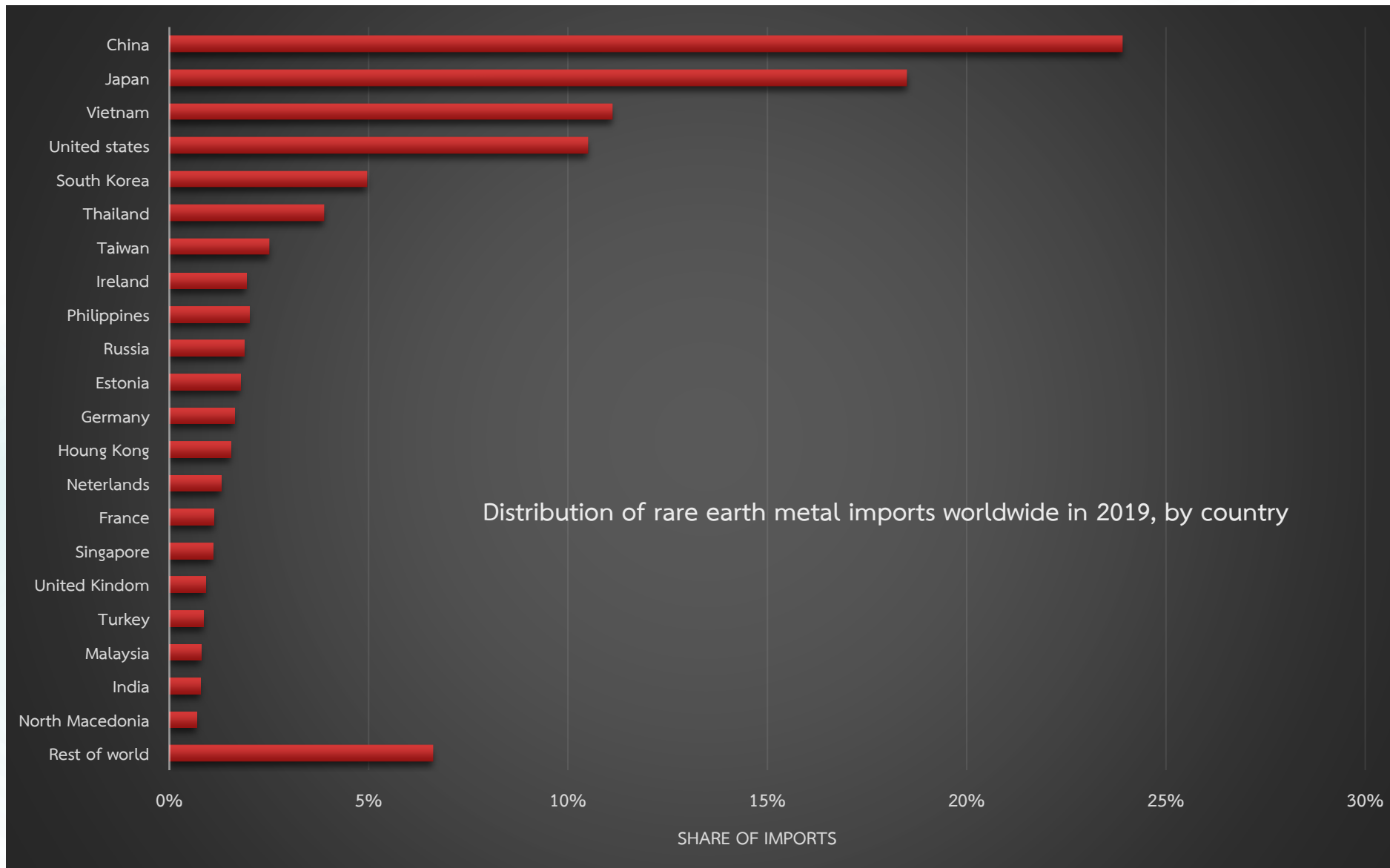
Source: USGS

*Data not available

© AFP

ความต้องการธาตุหายากในประเทศและทั่วโลก

10



แหล่งที่มาธาตุหายาก

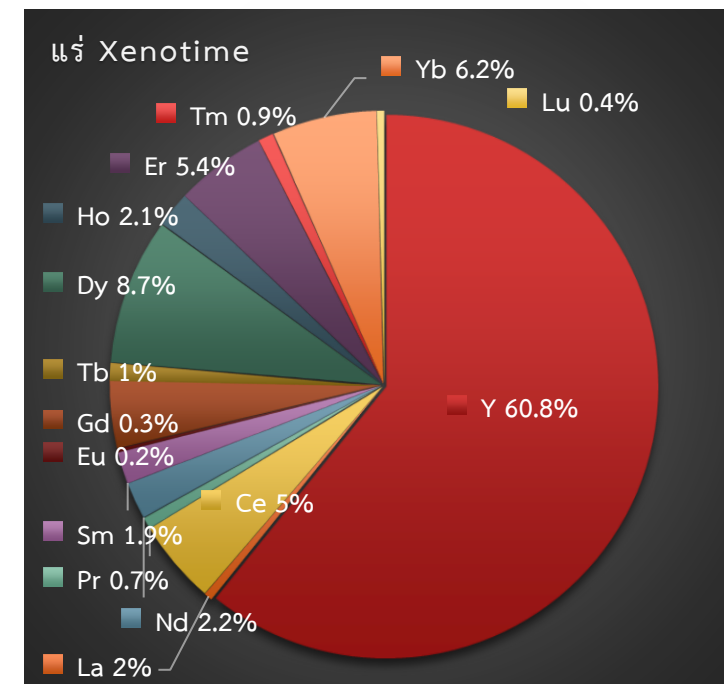
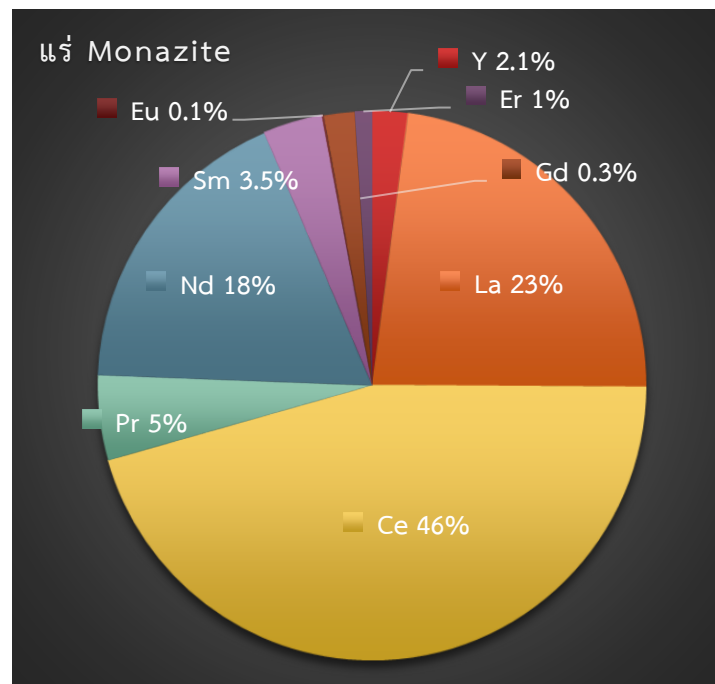
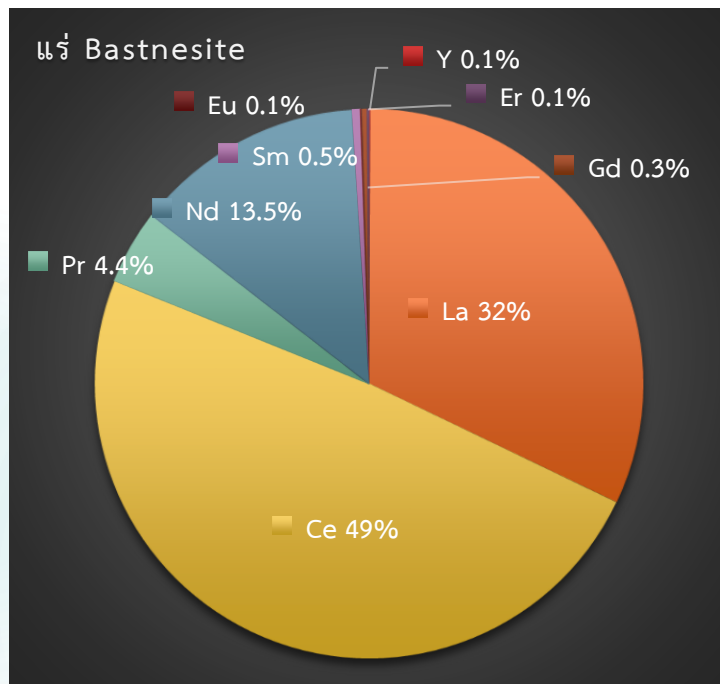
11

1. Primary sources

Composition of selected rare-earth minerals		
name	idealized composition	primary rare-earth content
allanite	$(\text{Ca}, \text{Fe}^{2+})(\text{R}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3\text{Si}_3\text{O}_{13}\text{H}$	R = light lanthanoids
apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	R = light lanthanoids
bastnasite	RCO_3F	R = light lanthanoids (60–70%)
euxenite	$\text{R}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{TiO}_6 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	R = heavy lanthanoids plus Y (15–43%)
fluorite	CaF_2	R = heavy lanthanoids plus Y
gadolinite	$\text{R}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Be})_3\text{Si}_2\text{O}_{10}$	R = heavy lanthanoids plus Y (34–65%)
laterite clays	$\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	R = heavy lanthanoids plus Y
loparite	$(\text{R}, \text{Na}, \text{Sr}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Fe}^{3+})\text{O}_3$	R = light lanthanoids (32–34%)
monazite	RPO_4	R = light lanthanoids (50–78%)
perovskite	CaTiO_3	R = light lanthanoids
sphene	$\text{CaTiSiO}_4\text{X}_2$ (X = $\frac{1}{2}\text{O}^{2-}$, OH^- , or F^-)	R = light lanthanoids
xenotime	RPO_4	R = heavy lanthanoids plus Y (54–65%)
zircon	ZrSiO_2	R = both light and heavy lanthanoids plus Y

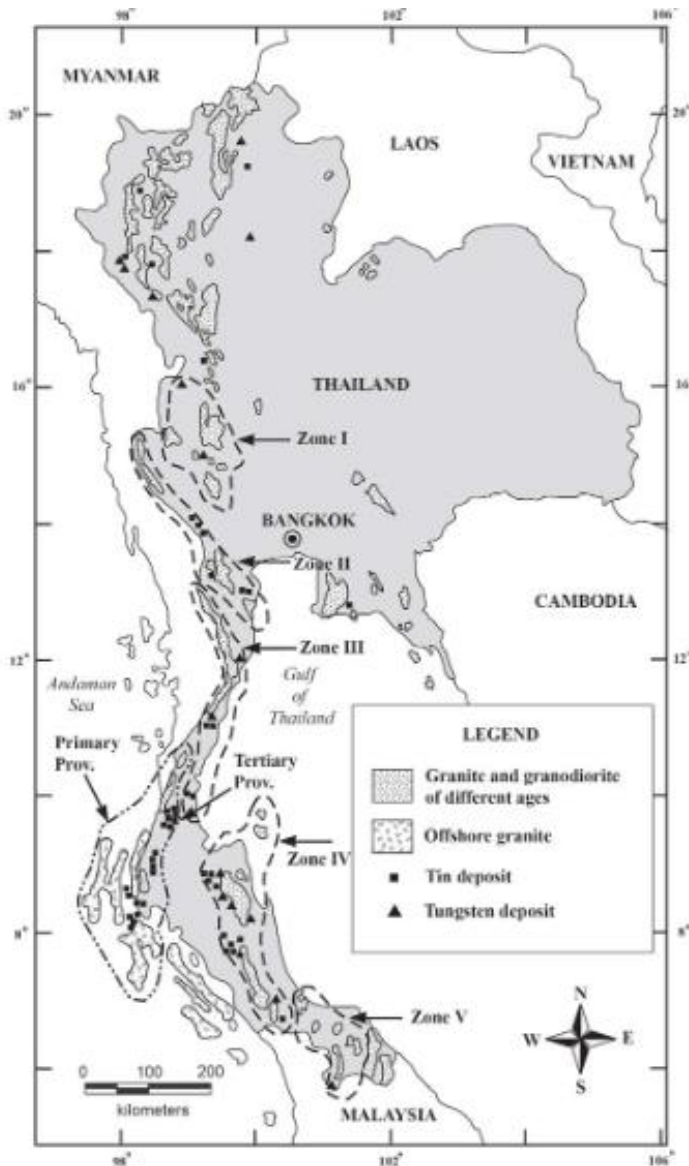
แหล่งที่มาธาตุหายาก

1. Primary sources



แหล่งแร่ธาตุหายากในประเทศไทย

13



- แหล่งแร่ธาตุหายากที่มีศักยภาพในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่ได้มาจากแร่โมนาไซต์ (monazite) ซึ่งเป็นแร่พลอยได้ปะปนอยู่กับแร่ดีบุก
- ในช่วงประมาณปี 2537 ราคาแร่ดีบุกตกต่ำลง จึงทำให้ไม่ได้มีการผลิตแร่ธาตุหายากในไทย เนื่องจากเหมืองดีบุกกว่า 60% ปิดตัวลง
- พื้นที่ที่มีศักยภาพเป็นแหล่งแร่ธาตุหายากได้แก่ จังหวัดภูเก็ต พังงา ระนอง กาญจนบุรี ราชบุรี สุพรรณบุรี ตาก และอุทัยธานี เชียงใหม่
- จากการสำรวจแหล่งแร่ธาตุหายากในประเทศไทยพบว่าทางภาคเหนือ 17 จังหวัด มีแร่โมนาไซต์อยู่ประมาณ 613 ตัน (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

แหล่งที่มาธาตุหายาก

14

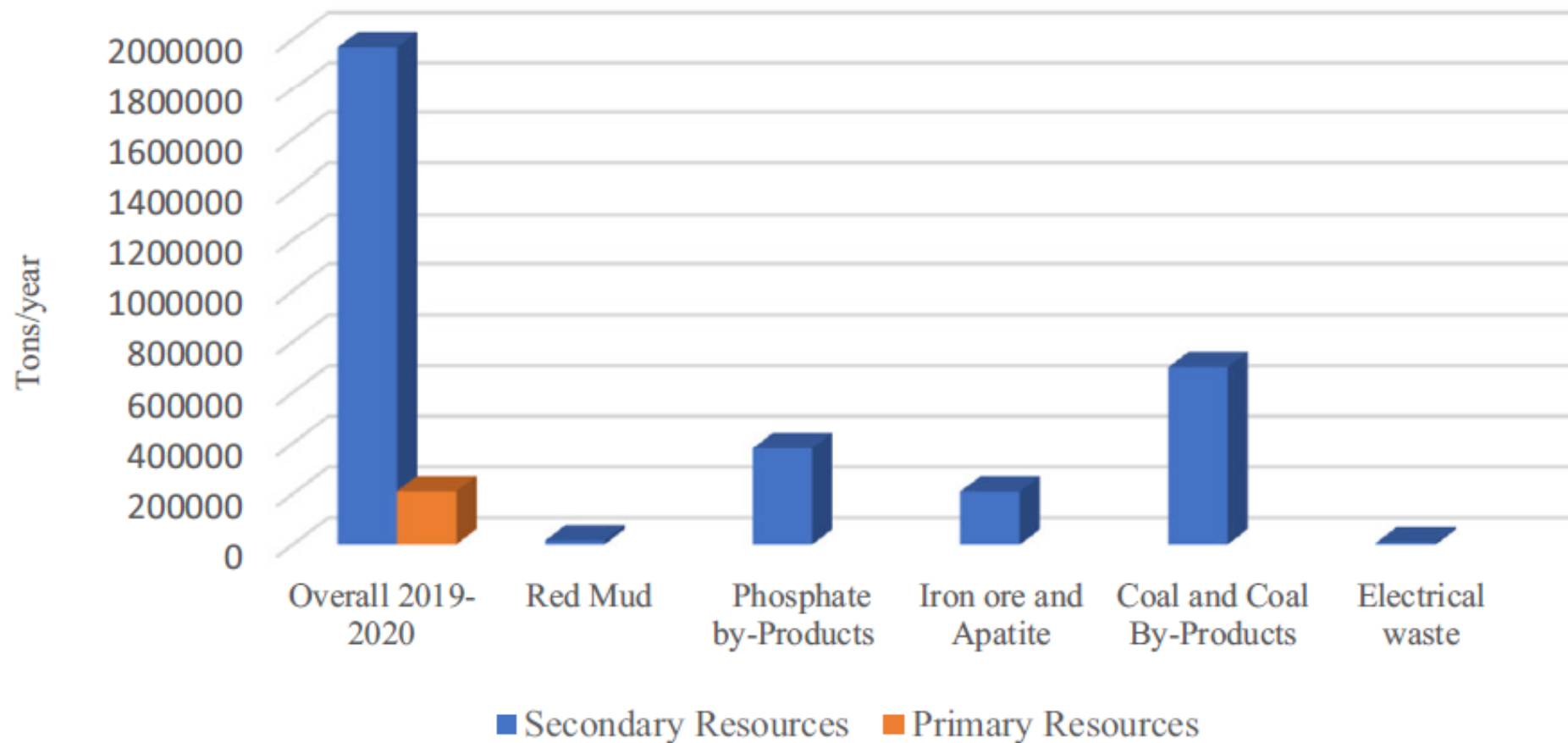
2. Secondary sources

Raw materials	Rare earth
Coal and coal by products	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Y
Phosphate by products	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Sc, Y
Nickel-metal hydride, (Ni-MH) rechargeable	La, Ce, Pr, Sm,
Fluorescent lamps, lasers, electronic display screens	Ce, Eu, Gd, La, Tb, Y
Industrial waste water	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Sc, Y, Lu
Deep sea nodule	Y, La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu, Th,
Nickel-metal hydride batteries	La, Ce, Pr, Nd
Metallurgical slag	Nd
Cracking catalysts	La, Ce
Nd-Fe-B magnets	Nd, Pr, Gd, Dy, Ho
Hard disk drives, magnets	Nd, La
Phosphor powder from waste lamp	Y, Eu, La, Ce, Pr, Tb, Sr

แหล่งที่มาธาตุหายาก

15

Cumulative REEs in mine tailings and recycled waste generated in 2019 were compared with the extracted REEs from primary sources in 2019 and the individual secondary sources of REEs in mine tailings and recycled waste generated in 2019



1. Physical separation

- **Magnetic separation:** ใช้คุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของธาตุหายากในการสกัดแยกและเพิ่มความเข้มข้นร่วมกับหลักการ gravity สามารถสกัดแยกธาตุหายากจากแร่บาสนาไซต์และแร่โมนาไซต์ได้ความเข้มข้นมากถึง 55% และ 58% ตามลำดับ (ต้องมีการควบคุมความแรงแม่เหล็กให้เหมาะสม)
- **Electrostatic separation:** มีประสิทธิภาพสูงในการสกัดแร่ซีโนไทม์ ซึ่งโดยปกติจะมีแร่โอลิเมนไต์ปนเนื่องจากแร่ทั้ง 2 ชนิด มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กและ gravity ใกล้เคียงกันทำให้ใช้วิธีการ magnetic separation แยกออกได้ยาก จึงใช้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของแร่โอลิเมนไต์ในการแยกแร่ซีโนไทม์ซึ่งมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้าออกมา (สภาวะการแยกต้องแห้ง มีต้นทุนในการผลิตส่วนนี้เพิ่มเข้ามา)
- **Gravity separation:** ธาตุหายากมีความถ่วงจำเพาะค่อนข้างสูงประมาณ 4-7 สูงกว่าแร่อื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เหมาะสำหรับแยกธาตุหายากในแหล่งแร่ที่เป็นทรายตามชายหาด

2. Froth Flotation (วิธีการลอยแร่)

- เหมาะสำหรับใช้สกัดแยกธาตุหายากทางการค้าในแร่จำพวก แร่บาสนาไซต์ แร่โมนาไซต์ และแร่ซีโนไทม์

3. Hydrometallurgy Methods

- **Leaching:** นิยมใช้สกัดธาตุหายากจากทั้งแร่ low-grade และ high grade เช่น แร่บาสนาไซต์ แร่โมนาไซต์ และแร่ซีโนไทม์ โดยใช้กรดชนิดต่างๆ ได้แก่ sulfuric acid (H_2SO_4), hydrochloric acid (HCl), nitric acid (HNO_3)
 - **Sulfuric Acid Baking:** ใช้อุณหภูมิสูง 200-500 องศาเซลเซียส, ราคาถูก, แต่เกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ต้องกำจัด, เกิดของเสียมาก เช่น gypsum หลังตกตะกอนด้วย carbonate, $\text{Th}(\text{PO}_3)_4$ and ThP_2O_7 ที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียรและไม่ละลายในน้ำหรือกรดแก่ ทำให้เกิดเป็น radioactive waste
 - **Roast Hydrochloric Acid Leaching:** leaching ด้วย HCl ที่ 600-700 องศาเซลเซียส, ซีเรียมที่สกัดได้จะปนเปื้อนด้วยทอเรียมซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสี รวมถึงไม่สามารถสกัดแยก REE fluorides ได้

3. Hydrometallurgy Methods

➤ Leaching:

- **Caustic Soda Leaching:** ใช้ NaOH ที่อุณหภูมิ 120-130 องศาเซลเซียส ตามด้วยการ leaching ด้วย HCl, กระบวนการนี้ทอเรียมและเรเดียม ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีสามารถถูกกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการ solvent extraction และตกตะกอนด้วย barium chloride และ sodium sulfate, มีของเสียที่เกิดในกระบวนการน้อย, ไม่เกิดแก๊สเสียอย่าง HF, byproduct ที่เกิดขึ้นได้แก่ sodium phosphate และ ทอเรียม สามารถบริหารจัดการได้ง่าย, ของเสียที่เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการมีน้อย
- **Sodium Carbonate Roasting:** เป็นวิธีการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้อุณหภูมิที่ 500-700 องศาเซลเซียส แล้วตามด้วยการ leaching ด้วยกรด สามารถย่อยสลาย silicate ได้ดี และขนาดของอนุภาคไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการสกัด

➤ Extraction:

- เป็นวิธีการที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ให้ผลผลิตและผลได้ที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)
- อุปกรณ์ที่นิยมใช้คือ mixer settler และ solvent ที่ใช้ในการสกัดได้แก่ TBP, HDEHP versatic acid

Major REE mining companies and beneficiation techniques employed based on REO feed grade

Mine	Location	Technique	REO Feed grade, wt.%	REO Concentrate, wt.%
Lynas	Western Australia	Flotation	15	40
Moly corp	Califonia USA	Flotation	3-6	60
Bayan Obo	Mongolia, China	Magnetic-Flotation	6	65
Sichuan Minning	Sichuan, China	Gravity-Magnetic-Flotation	3-6	60
Shandong Weishan	Weishan, China	Magnetic-Flotation	3	60

Various methods for extraction of REEs from phosphoric acid solutions

Methods	Reagents or condition	Advantages	Disadvantages
Crystallization	Evaporation at 200 °C for 2 h	• REE recovery around 98%	• High energy consumption • Pressure-resistant apparatus
	CePO ₄ and CeF ₃	• Relatively high purity around 54 wt% REO • Using cycle leaching to concentrate REEs	• Passivation of seeds • Expensive seeds • Low REE recovery around 50%
Precipitation	Ammonia neutralization NaOH pH = 2.0–3.0 Fluorides: partial neutralization (20%) Using 15.4 g/L F ⁻ in WPA	• Simple process • Relatively high REE recovery almost 90% • Fe, Al removal simultaneously occur • High REE recovery almost 99.8% • Removal of U	• Required high dosage of chemicals • Low REE purity around 2.5 wt% REO • Impurity issue because of fluorine more than 15 g/L F ⁻ left in WPA
	Double sulfates: 10–15 wt% H ₂ SO ₄ , 23–35 g/L Na ₂ SO ₄ , or NaCl	• Relatively high REEs recovery around 91% • Low cost and availability of chemicals	• Impurity issue because of H ₂ SO ₄ in WPA more than 10 wt% • Low REE purity around 5 wt% REO
Solvent extraction	MEHPA D2EHPA D2EHAP + TBP/TOPO	• Mature technology for U • Recovery of U and HREEs simultaneously occur	• Insufficient for LREEs • Needed extra process to separate REEs from U (green cake)
	DOPPA DNPPA + TOPO DOPPA + TOPO	• Recovery of U, HREEs, and LREEs at the same time with high efficiency • Good extraction performance	• Needed extra process to separate REEs from U
Ion exchange	Tulsion CH-90, 93, 96, and T-PAR DOWEX-50WX4, 8	• Simple process	• Low recovery for REEs less than 60%

Summary of leaching technologies in primary rare earth elements production

MINERAL	PROCESS/STEPS	REE YEILD	REMARKS	STATUS
BASTNAESITE	I. Hydrochlorid acid (HCl) leaching to remove non REE carbonate II. Calcination of esidue to form rare earth oxide	85-90%	• The oldest way to producte bastnaesite concentrates.	Outdated
	I. Digestion with nitric acid (HNO ₃) or sulphiric acid (H ₂ SO ₄)	98%	• Acid choice depends on further processing: solvent extraction to nitric acid (HNO ₃) precipitation to sulphiric acid (H ₂ SO ₄)	Outdated
	I. Roast at 620°C to drive of carbon dioxide (CO ₂) II. 30% HCl leach	-	• Cerium+III oxidises to cerium+IV during roasting → will not leach REE fluorides • Residue is marketable	Outdated
	I. Alkine conversion rare-earth metal-fluoride RE ₃ F ₃ to rare-earth hydroxide RE(OH) ₃ II. 30% HCL leach	-	• Process can be preceded with hydrochlorid acid leach to extract REE carbonates before alkaline conversion.	In use
	I. Sulphiric acid roast II. Sodium chloride solution leach III. Precipitation as sodium double sulphates	-	• Precipitates are converted to chlorides for further purification with solvent extraction.	In use

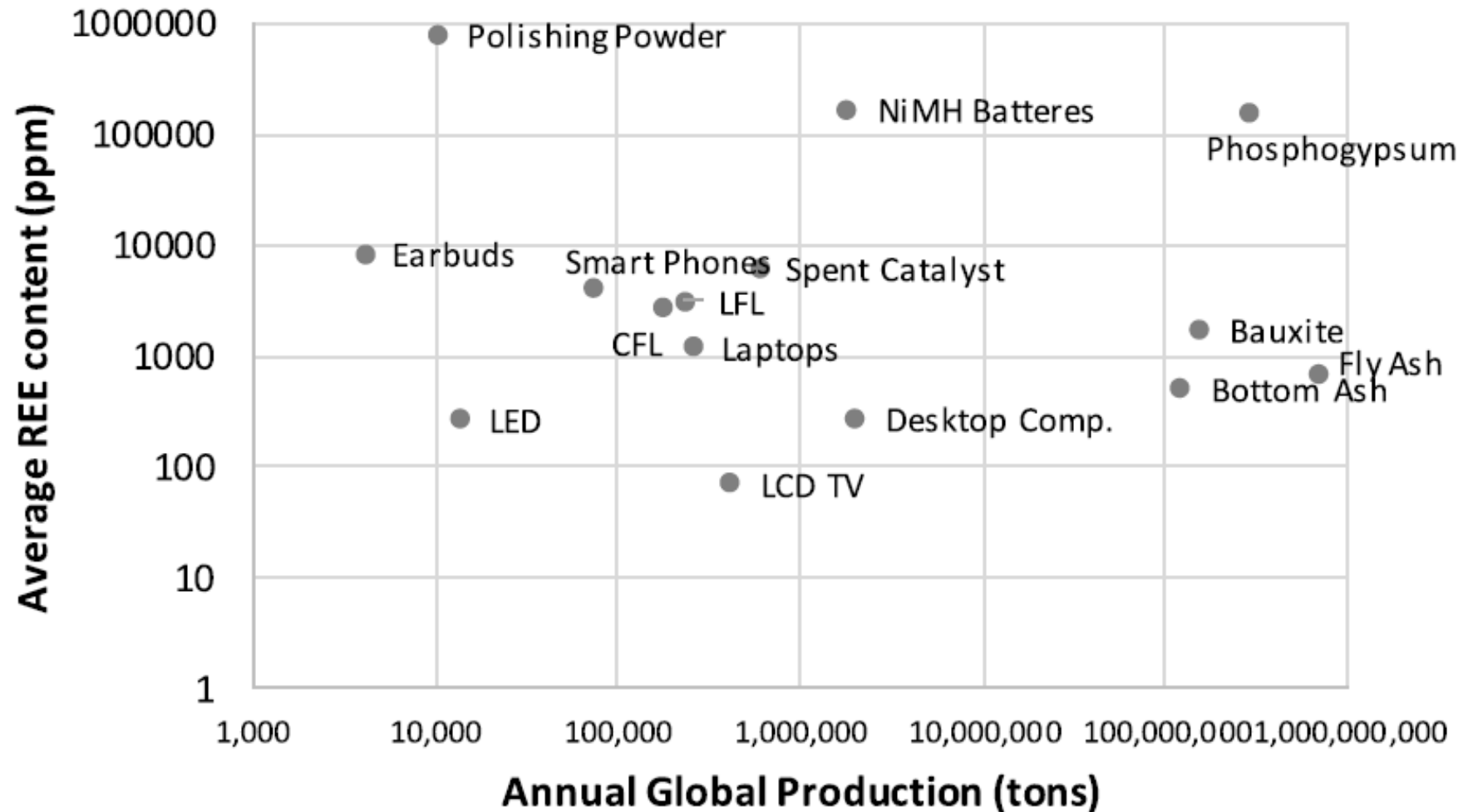
Summary of leaching technologies in primary rare earth elements production

MINERAL	PROCESS/STEPS	REE YEILD	REMARKS	STATUS
MONAZITE	I. Digestion in hot sulphuric acid (H_2SO_4)	-	Process conditions determine what is leached: only light REE or light + heavy REE + thorium	Outdated
	I. Digestion in hot 60-70% sodium hydroxide II. Washing residue with hot water III. Leach with mineral acid of choice	98%	- Cerium cannot be leached if manganese is present - Thorium is leached together with REE - Trisodium phosphate (Na_3PO_4) is marketable by-product	In use
	I. Heat under reducing and sulphidising atmosphere with calcium chloride (CaCl_2) and calcium carbonate (CaCO_3) II. Leach with 3% HCl	89%	- Requires no fine grinding - Thorium does not leach, remains in residue as thorium dioxide (ThO_2) - No manganese problem	In use
IRON CLAY	I. Salt leach with ammonium sulphate ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	80-90%	Targets physisorbed REE through cation exchange	In use
	I. Leach with saltwater	40%	Inefficient but cheap process	Research & development
	I. Acid leach with strong acid ($\text{pH} < 1$)	100%	- Dissolves entire clay - Incurs significant additional costs	Not used

กระบวนการสกัดธาตุหายากจาก secondary sources

23

Average Rare Earth Element (REE) concentration and total global flow for a variety of industrial and consumer waste streams



The concentration of REEs in different waste materials/waste streams

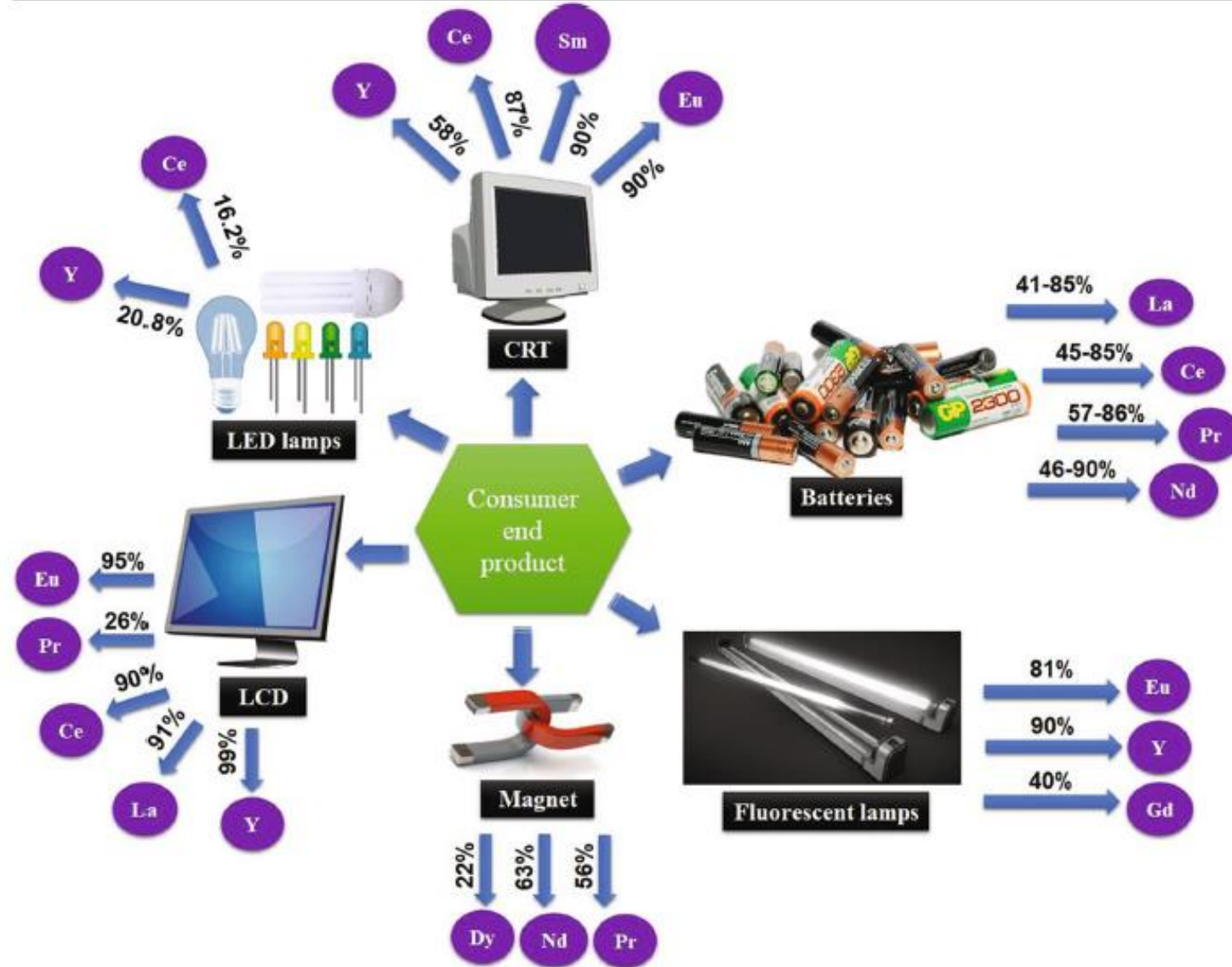
Sources	Elements (PPM)																References
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Sc	
Phosphogypsum	1450	2310	235	899	163	34.9	98.7	7.4	45.5	7.4	15.7	1.4	5.6	0.6	180	1.21	[11]
Red mud	114	368	28	98.6	21.3	5	22	3.5	16.7	4.3	13.5	1.9	14	2.4	75.7	121	[186]
Fly ash	91.4	195.6	23.5	88.6	18.2	3.4	16.4	2.5	12.7	2.8	6.9	1.2	6.5	1	62.1	NM	[187]
Mine tailings	903	2047	239	906	148	19.1	138	16.2	101	17.3	54.1	5.3	38.3	4.00	664	NM	[46]
Acid mine drainage (Xingren coalfield, Guizhou, China)	0.01–0.9	0.07–0.09	0.006–0.03	0.02–0.1	0.006–0.06	0.001–0.02	0.008–0.1	0.001–0.02	0.005–0.07	0.001–0.01	0.002–0.03	0.0002–0.002	0.001–0.01	0.0002–0.002	NM	NM	[59]
NdFeB Magnets	NM	NM	3.4	259.5	NM	NM	NM	NM	42.1	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	[66]
NiMH batteries	237	67	NM	36	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	NM	[69]
Phosphor	3.8	4.9	NM	NM	NM	4.4	2.5	2.7	NM	NM	NM	NM	NM	NM	112.1	NM	[78]

NM = not mentioned.

กระบวนการสกัดธาตุหายากจาก secondary sources

25

The recoverable REEs as % (w/w) from LED lamps , CRTs, batteries, fluorescent powders, magnets and LCDs



Coal and coal byproducts:

- ความเข้มข้นเฉลี่ยของธาตุหายากในถ่านหินและผลิตภัณฑ์พลอยได้จากถ่านหินทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 445 ppm ยกเว้นในแถบ Western Siberia, Inner Mongolia, Kentucky USA มีความเข้มข้น REE สูงกว่าค่าเฉลี่ย
- ความเข้มข้นของ REE ใน coal ash พบว่ามีค่าสูงกว่าใน coal และผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นๆ ซึ่งเกิดจากเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง
- วิธีการ Combined low-intensity and high intensity magnetic separation มีรายงานว่าสามารถแยกธาตุหายากจาก coal fly ash ให้ได้ความเข้มข้นของ REE สูงสุดถึง 1611.4 ppm
- Leaching ด้วย HCl ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ให้ประสิทธิภาพการสกัด REE จาก coal fly ash สูงถึง 80-90%
- Leaching ด้วย HNO_3 ตามด้วย solvent extraction สามารถสกัด LREE และ HREE จาก coal fly ash ได้สูงสุด 90 และ 94% ตามลำดับ
- Cyanex 572 และ D2EHPA สามารถเพิ่มอัตราการสกัด REE จาก coal fly ash ได้เข้าใกล้ 99%
- Alkali fusion และ acid leaching สามารถสกัด REE จาก coal fly ash ได้ 72.7%

กระบวนการสกัดธาตุหายากจาก secondary sources

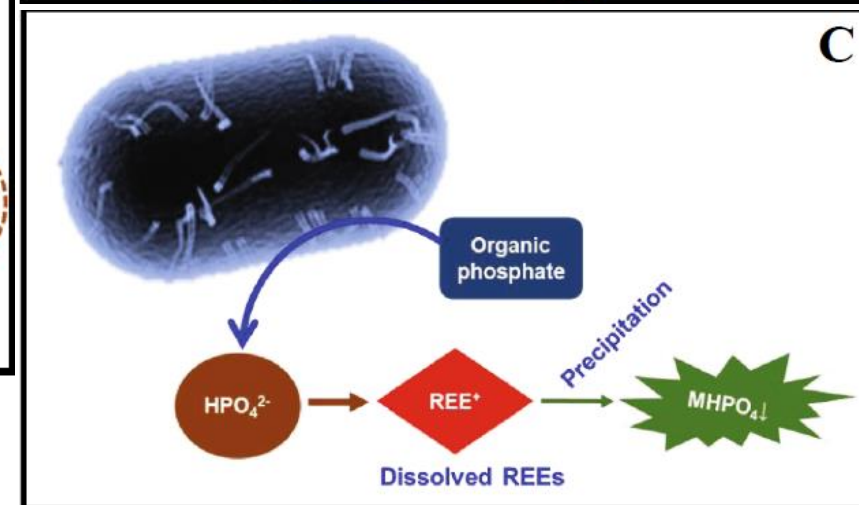
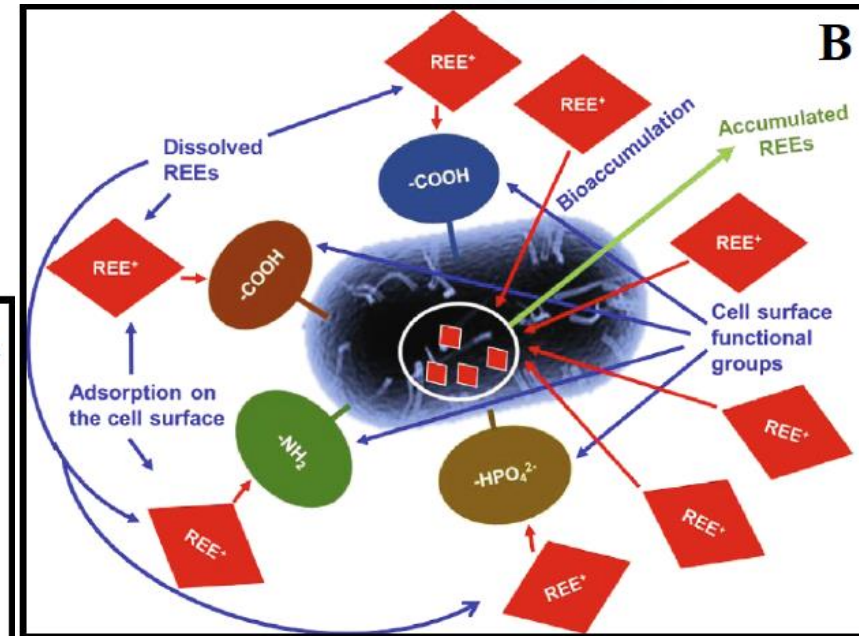
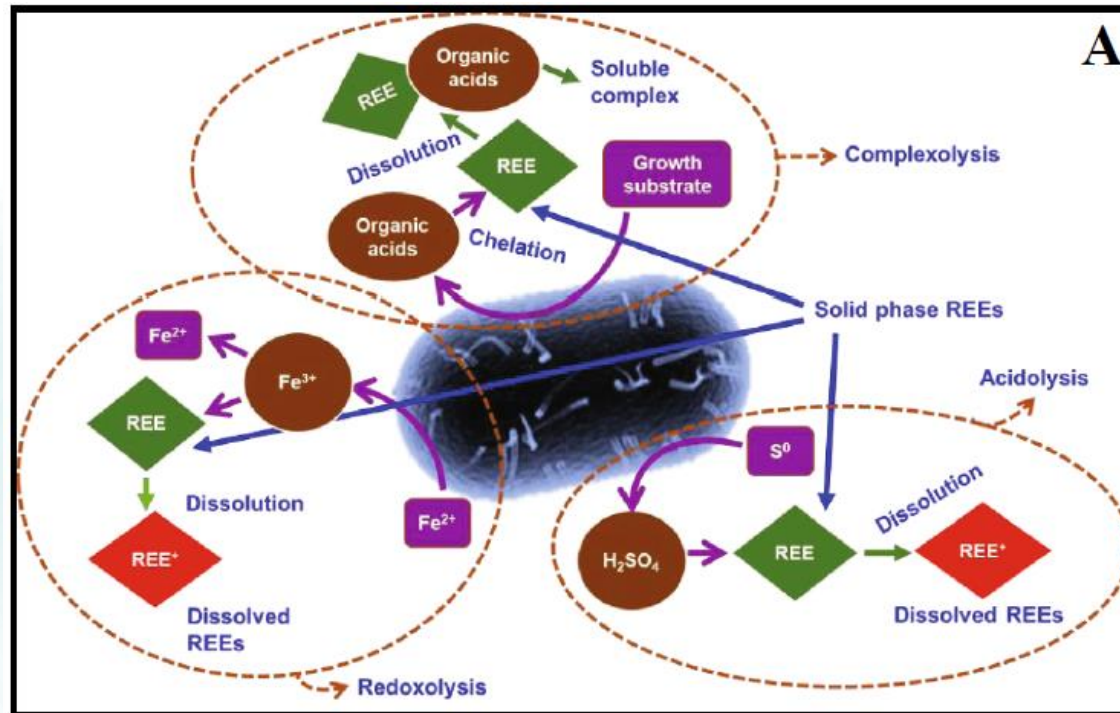
27

Recycled materials:

Raw material	REEs	Recovery process	Recovery performance
Cracking catalysts	La, Ce	Leaching, solvent extraction	90% lanthanum and 82% cerium
Nd-Fe-B magnets	Nd, Pr, Gd, Dy, and Ho	Pretreatment and pressure leaching, REEs oxalate precipitation	> 99% of REEs
Hard disk drives, magnets	Nd, La	Slag extraction, leaching, solvent extraction, solid sorbent	Up to 98% of REEs using leaching in H_2SO_4
Phosphor powder from waste lamp	Y, Eu, La, Ce, Pr, Tb	Leaching (using H_2SO_4 and HNO_3), solid-liquid separation, liquid-liquid extraction	The separation of REEs and Fe, Al, and Zn occurred effectively.
Industrial waste water	La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Sc, Y, Lu	Leaching using nano- $Mg(OH)_2$	The uptake rare of REE can reach 99%
Nickel-metal hydride (Ni-MH) rechargeable	La, Ce, Pr, Sm	Leaching using H_2SO_4 , solvent extraction with 25% bis(2-ethylhexyl) phosphoric acid in kerosene, precipitation with oxalic acid, calcination	mixed REO of about 99.8% total yield of REEs about 93.6%

REE biorecovery

The mechanism of REE-microorganism interaction involving REE biorecovery: (A) mobilization of REE, (B) biosorption and bioaccumulation, (C) bioreduction, (D) bioprecipitation.



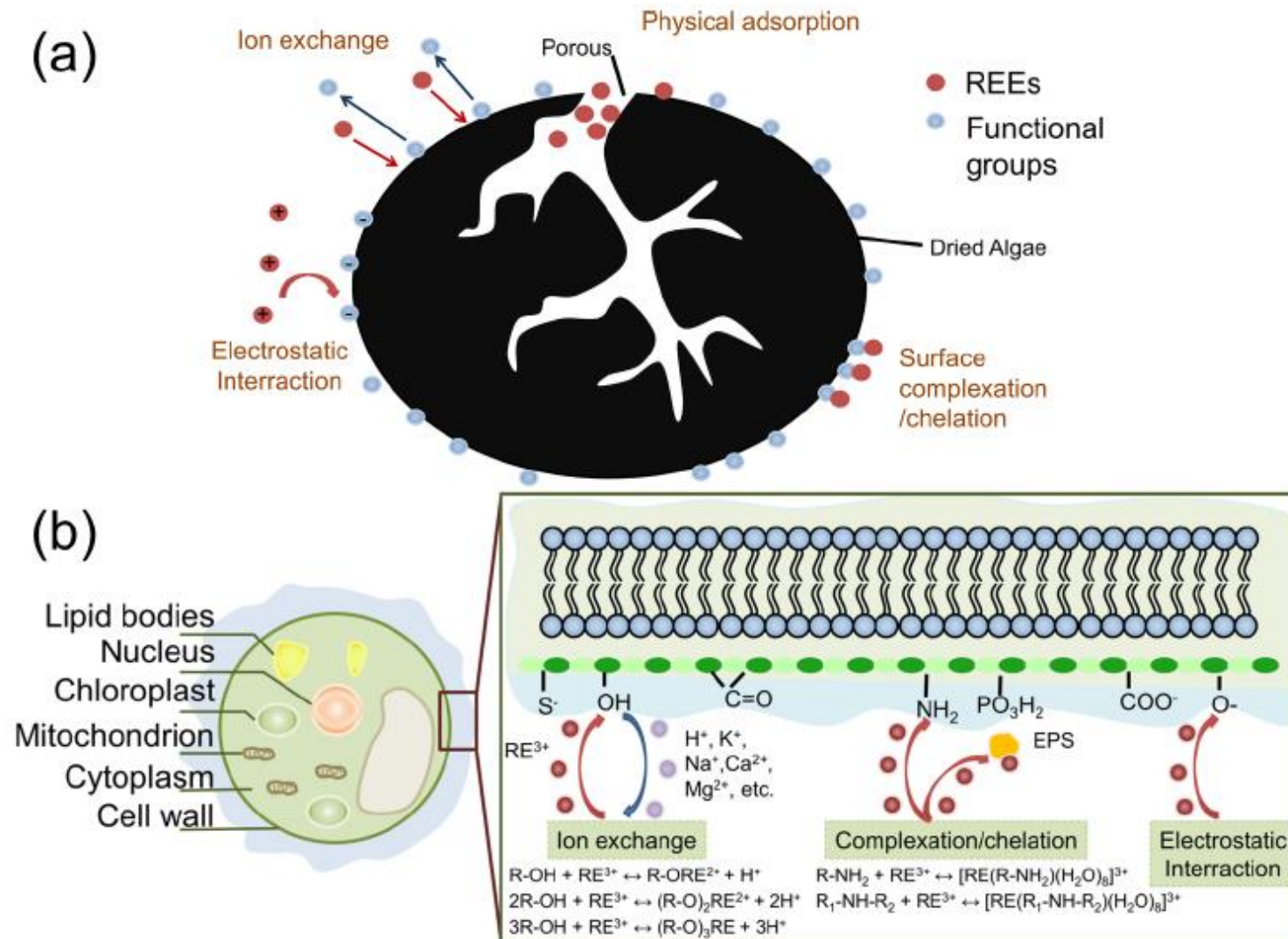
Microorganisms involved in the dissolution of REE from different sources

Source	Organism	Substrate	REE dissolution agent	Process	Temperature	pH	Mechanism	REE	Leaching efficiency (%)
Monazite	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> , <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>		Fe ³⁺	Batch	30 °C	1.8	Redoxolysis	Ce	2
			H ₂ SO ₄				Acidolysis	La	1
									Ce
Waste electrical and electronic equipment (WEEE)	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	NM	H ₂ SO ₄	Batch	30 °C	1.2–1.5	Acidolysis	La	5
								Ce, Eu, Nd	> 99
Magnets	<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> <i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	NM	H ₂ SO ₄ Fe ³⁺ H ₂ SO ₄		25 °C	1.8 3.2 3.2	Acidolysis/redoxolysis	La, y	80
								Pr	100
								Nd	86.4
Synthetic phosphogypsum	<i>Gluconobacter oxydans</i> NRRL B85	Glucose	Gluconate	Batch	25 °C	2.1	Complexolysis	Pr	100
								Y	91.2
								Ce	36.7
								Nd	42.8
								Sm	73.2
								Eu	50
								Yb	83.7
Coal fly ash	<i>Candida bombicola</i>	Glucose	Sophorolipid	Batch	28 °C	3.3–3.5	Complexolysis/ acidolysis	Yb	67.7
								Er	64.6
Fluid catalytic cracking (FCC) catalyst, phosphor powder	<i>Gluconobacter oxydans</i>	Tryptone	Gluconate	Batch	30 °C	3.3	Complexolysis/ acidolysis	SC	63
								Tb, Eu, Ce,	49
Red mud	<i>Penicillium tricolor</i>	Sucrose	Oxalate, Citrate, Gluconate	Batch	30 °C	9–10.4	Complexolysis	La, Y	
								Y	78
								Sc	75
								Lu	67
								Yb	66
								Tm	65
								Er	63
								Ho	65
Dy	57								

Recovery of REE from wastewater

30

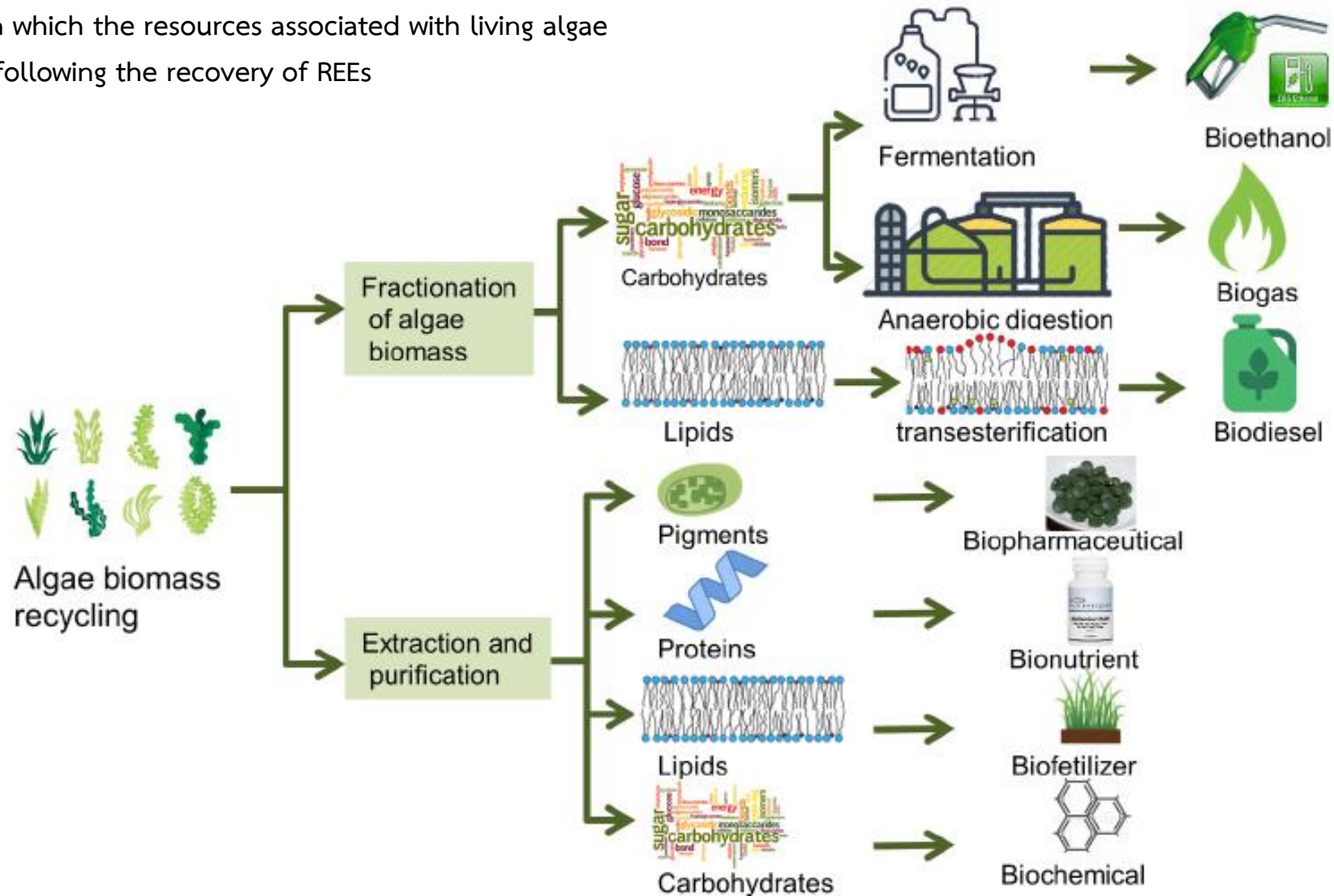
The possible adsorption mechanisms of REEs by algae: a) dried algae and b) living algae



Recovery of REE from wastewater

31

Possible ways in which the resources associated with living algae could be used following the recovery of REEs





- จัดตั้งโรงงานแปรรูปแร่โมนาไซต์ ขนาดปีละ 300 ตันแร่ ขึ้นตามมติรัฐมนตรี ภายใต้การกำกับดูแลของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (พ.ศ.2530) เพื่อแปรรูปแร่โมนาไซต์ให้ได้ธาตุหายากที่มีมูลค่าสูงสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ
- โครงการศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากถูกโอนภาระกิจมายังสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ในปี พ.ศ 2549
- สถานการณ์น้ำท่วมปี 2554 ทำให้เครื่องมือ อุปกรณ์ชำรุดทรุดโทรมมาก
- ปัจจุบันได้มีการดำเนินโครงการวิจัยเกี่ยวกับการสกัดธาตุหายากและการนำไปใช้ประโยชน์

กระบวนการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

33

Monazite concentrate

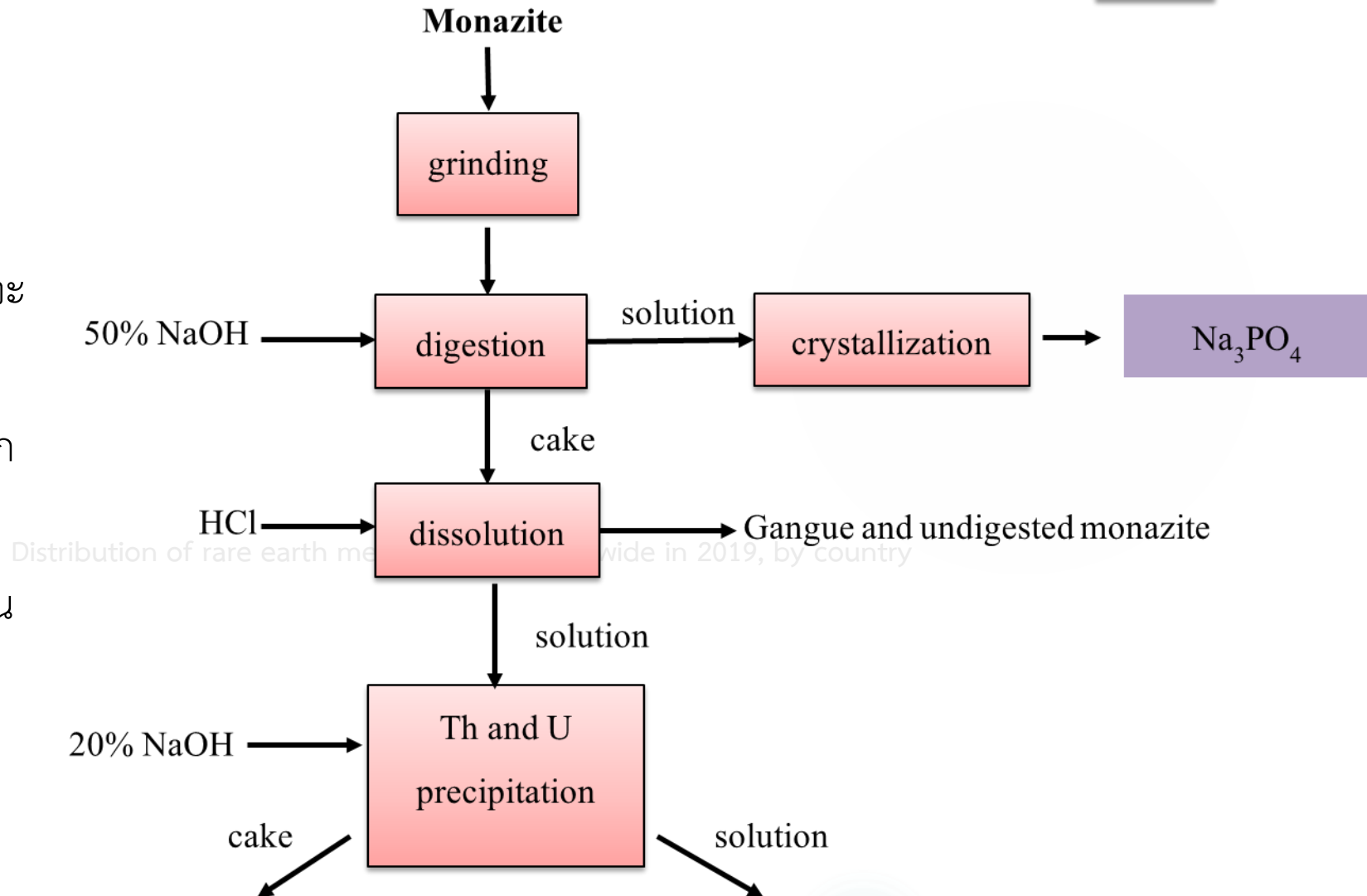


Chemical compositions of monazite concentrate

Element	Rare earth content (%)
Phosphorus (P_2O_5)	21.32
Cerium (CeO_2)	30.33
Lanthanum (La_2O_3)	10.93
Neodymium (Nd_2O_3)	10.51
Yttrium (Y_2O_3)	2.74
Praseodymium (Pr_6O_{11})	1.93
Gadolinium (Gd_2O_3)	1.10
Dysprosium (Dy_2O_3)	0.50
Erbium (Er_2O_3)	0.14
Uranium (UO_2)	0.50
Thorium (ThO_2)	8.27
Other elements and associated minerals	9.80

ขั้นที่ 1: การบดและย่อยแร่โมนาไซต์

- ทำการบดแร่โมนาไซต์ให้ได้ขนาดที่เหมาะสม (325 เมช)
- ย่อยด้วยด่างเข้มข้น 50% ในขั้นตอนนี้จะได้ไตรโซเดียมฟอสเฟตเป็นผลพลอยได้ (Na_3PO_4) สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ซักล้างหรือปุ๋ยได้
- ทำการทำละลายด้วยกรดและตกตะกอนด้วยด่างเข้มข้น 20% เพื่อแยกธาตุกัมมันตรังสี (ยูเรเนียมและทอเรียม) ออกไป

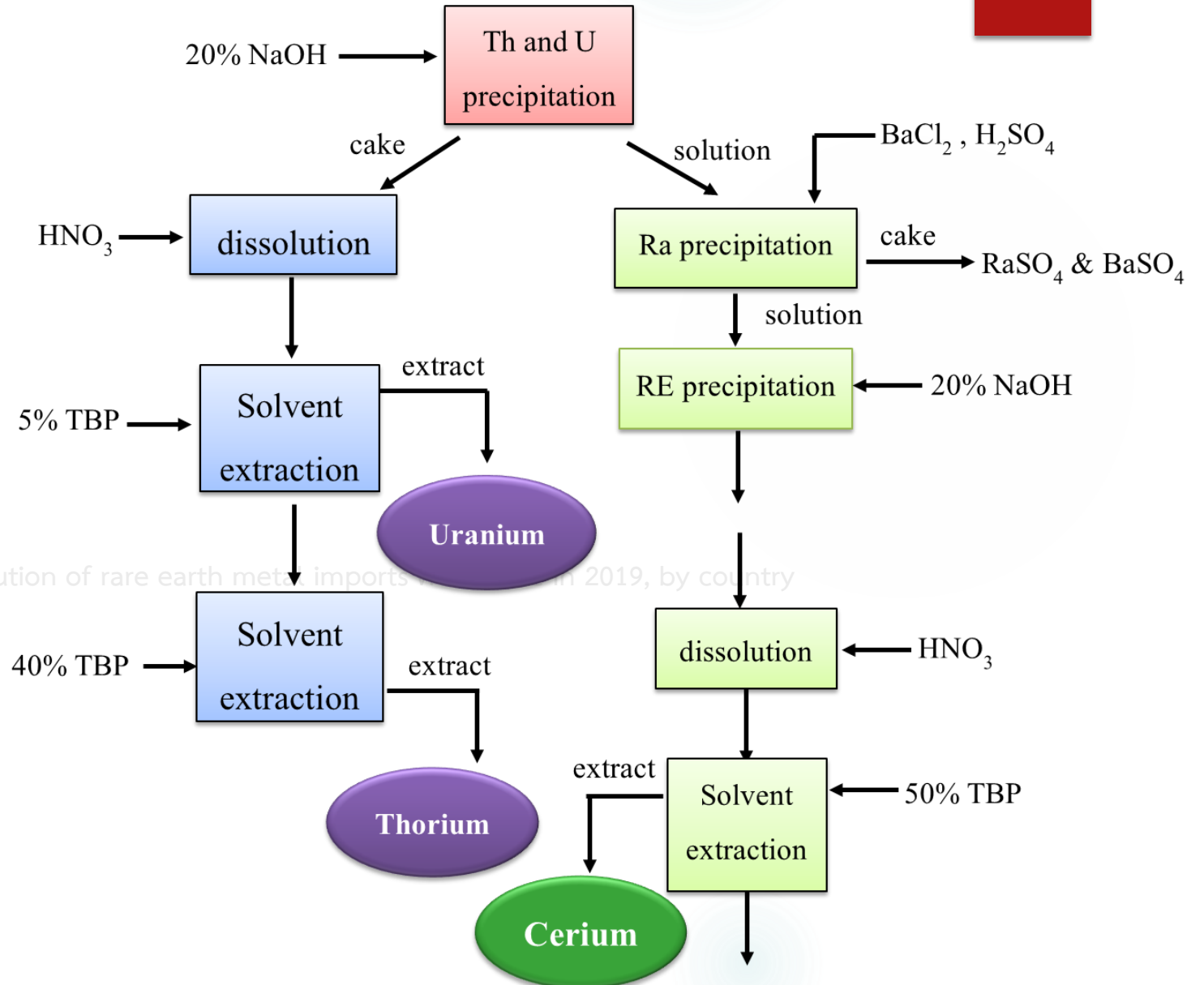


ขั้นตอนการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

35

ขั้นที่ 2: การแยกธาตุกัมมันตรังสีออกจากธาตุหายากผสม

- ทำการแยกธาตุกัมมันตรังสีออกจากธาตุหายากผสม
- ส่วนของ cake ที่มียูเรเนียมและทอเรียมเป็นองค์ประกอบนำไปสกัดแยกยูเรเนียมและทอเรียมให้มีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเค้กเหลือง yellow cake (U_3O_8) และทอเรียมออกไซด์ (ThO_2)
- ในส่วนของสารละลายนำไปตกตะกอนด้วยแบเรียมคลอไรด์เพื่อกำจัดเรเดียมซึ่งเป็นลูกของยูเรเนียมออก ก่อนนำไปตกตะกอนด้วยต่างและสกัดแยกซีเรียมออกมา

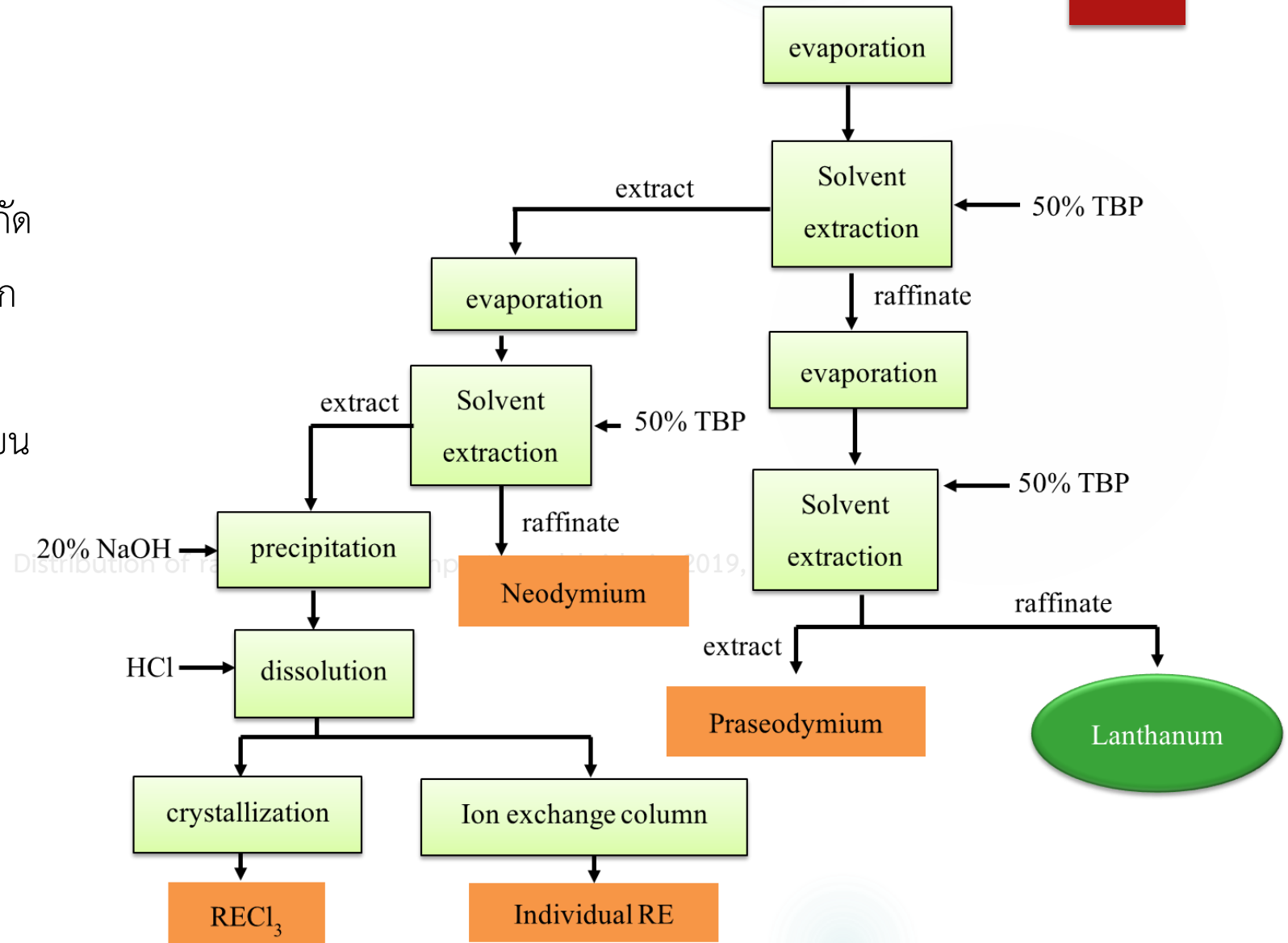


ขั้นตอนการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

36

ขั้นที่ 3: การสกัดแยกธาตุหายากเฉพาะตัว และการทำบริสุทธิ์

- หลังจากแยกซีเรียมออกไปแล้ว ทำการสกัดแยกธาตุหายากกลุ่มหนักและกลุ่มเบาออกจากกัน
- จากนั้นนำไปทำบริสุทธิ์ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

37

Mixed rare earth (enriched cerium)



Chemical compositions of mixed rare earth (enrich-cerium)

Element	Content (%)
CeO_2	65.22
Nd_2O_3	15.18
La_2O_3	6.14
Y_2O_3	5.35
Pr_6O_{11}	2.44
Dy_2O_3	0.92
Cl	1.53
Na_2O	1.04
CaO	0.23

Distribution of rare earth

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

38

Yellow cake (U_3O_8)



Distribution

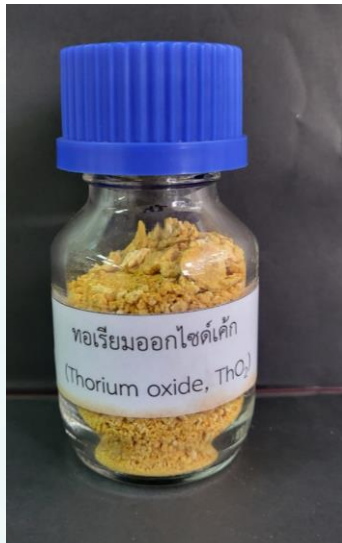
Chemical compositions of yellow cake (U_3O_8)

Element	Content (%)
UO_2	87.56
ThO_2	6.33
Na_2O	0.61
P_2O_5	-
SiO_2	-
Fe_2O_3	-
CaO	-
NiO	-
CuO	-
Pd	-
I	-
Ru	-
Rh	4.96

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

39

Thorium oxide (ThO₂)



Distribution

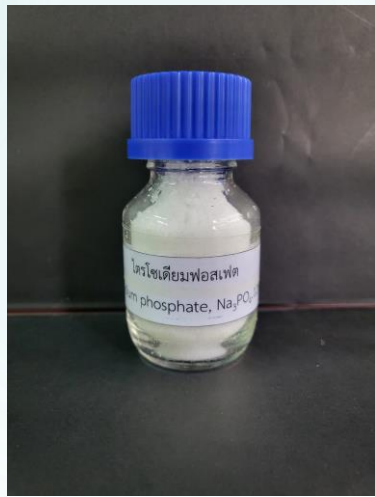
Chemical compositions of thorium oxide (ThO₂)

Element	Content (%)
UO ₂	0.58
ThO ₂	87.00
Na ₂ O	11.53
P ₂ O ₅	-
SiO ₂	-
Fe ₂ O ₃	-
CaO	0.26
NiO	-
CuO	-
Pd	-
I	-
Ru	-
Rh	-

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

40

Tri-sodium phosphate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)



Chemical compositions of tri-sodium phosphate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)

Element	Content (%)
UO ₂	0.09
ThO ₂	-
Na ₂ O	61.66
P ₂ O ₅	37.13
SiO ₂	0.44
Fe ₂ O ₃	0.07
CaO	-
NiO	0.02
CuO	0.02
Pd	0.09
I	0.42
Ru	0.07
Rh	-

ขั้นตอนการทำบริสุทธิ์ธาตุหายากด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน

41



country

ผลิตภัณฑ์ธาตุหายากบริสุทธิ์ที่ได้จากเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน



La₂O₃



CeO₂



Nd₂O₃

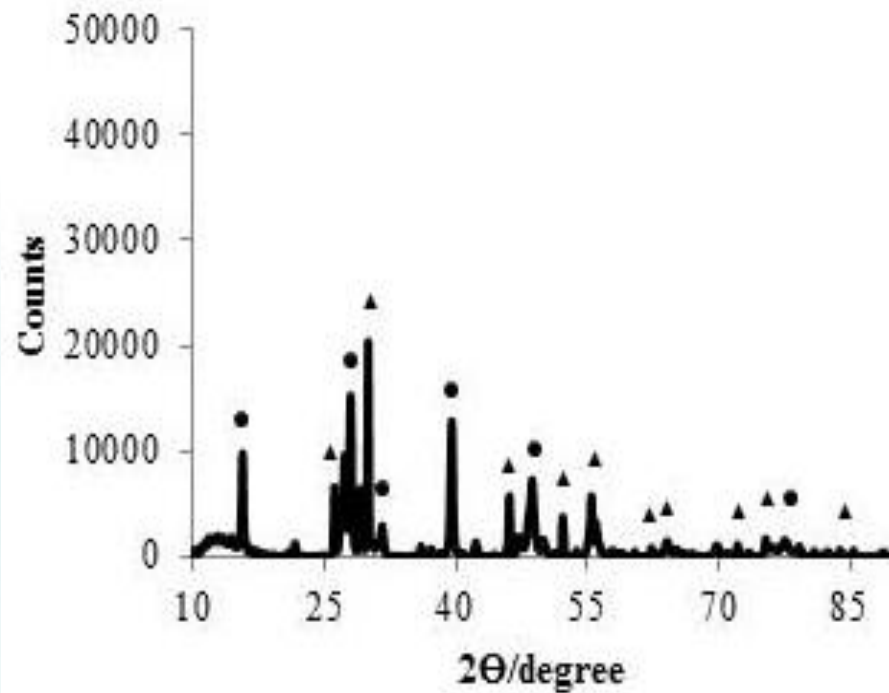
Distribution of rare earth elements

Compound	Element content (%)		
	La ₂ O ₃	CeO ₂	Nd ₂ O ₃
Cl	0.01	<0.01	0.01
Al ₂ O ₃	<0.01	-	-
CuO	0.01	<0.01	0.01
SO ₃	<0.01	-	-
WO ₃	0.01	<0.01	0.01
La ₂ O ₃	98.68	1.05	0.14
CeO ₂	1.28	98.76	0.05
Nd ₂ O ₃	-	<0.01	94.92
Pr ₂ O ₃	-	-	4.53
Sm ₂ O ₃	-	-	0.3
Y ₂ O ₃	-	-	0.01

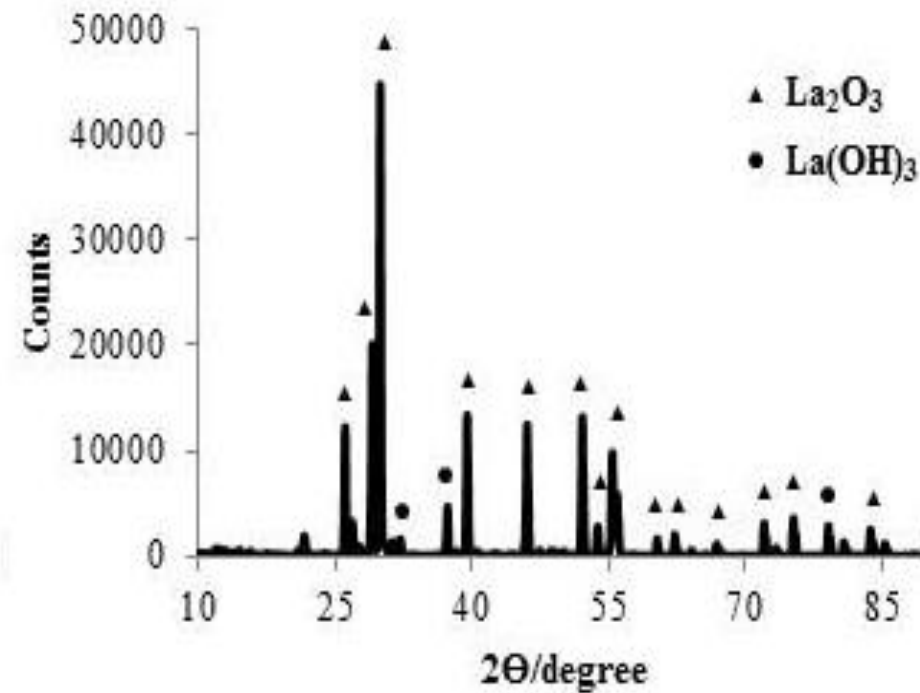
คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

43

XRD patterns of synthesized and commercial La_2O_3



Commercial La_2O_3

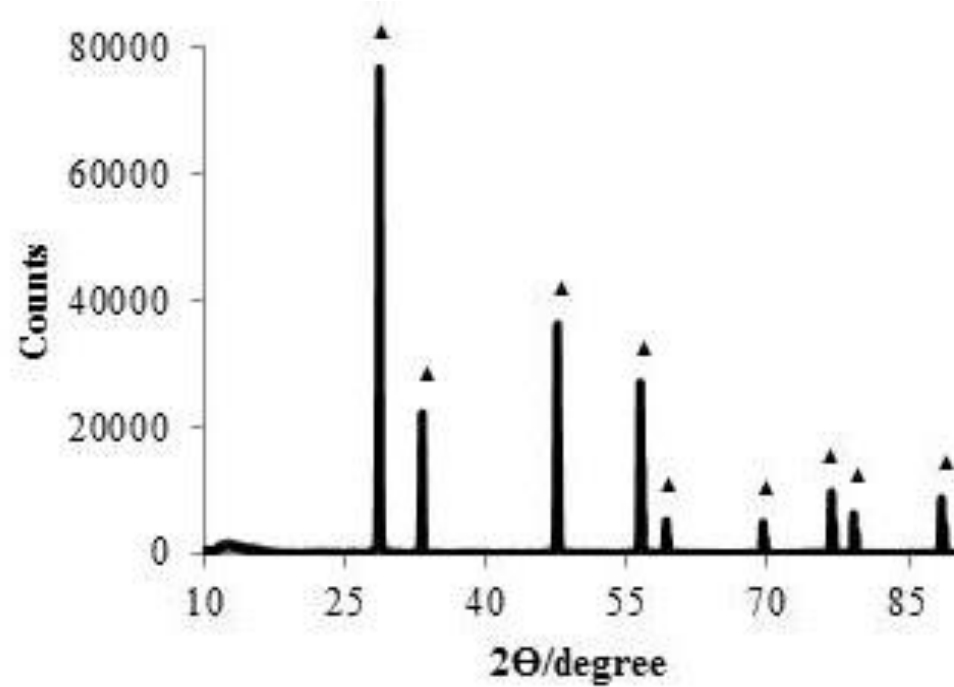


Synthesized La_2O_3

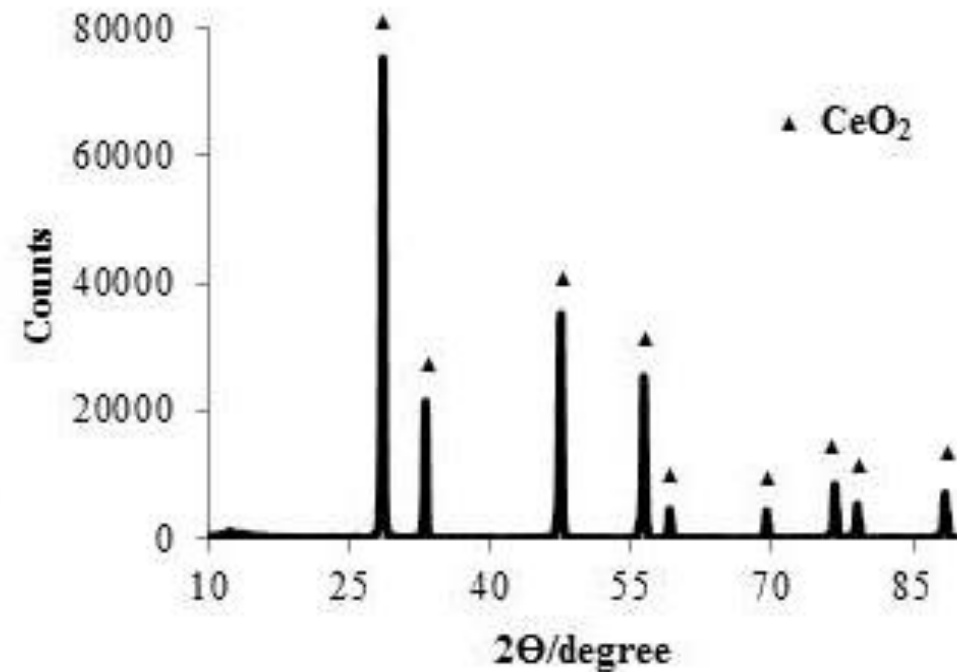
คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

44

XRD patterns of synthesized and commercial CeO_2



Commercial CeO_2

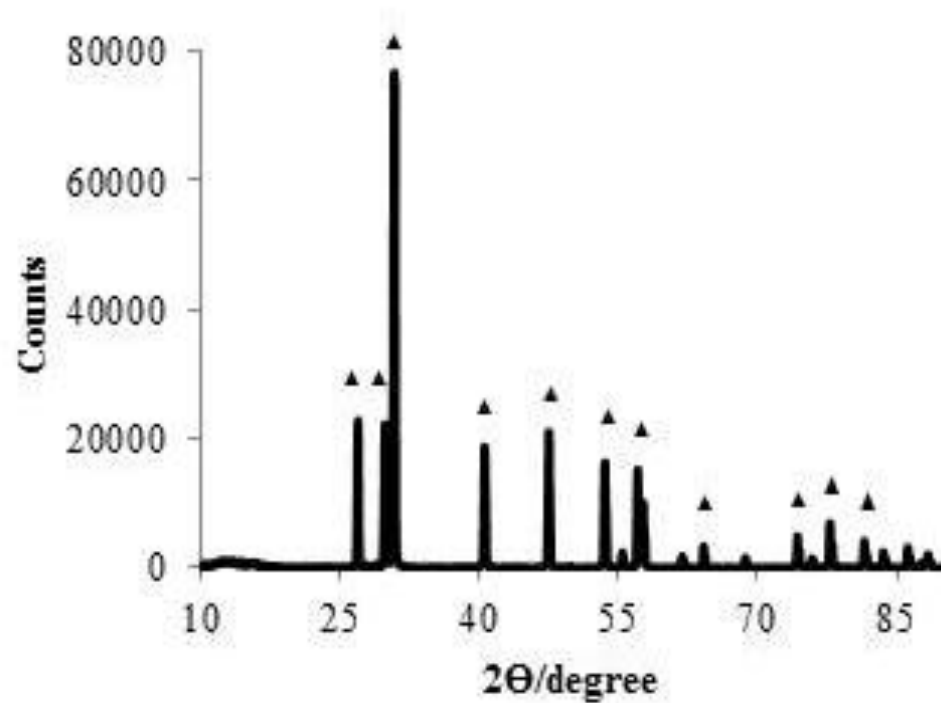


Synthesized CeO_2

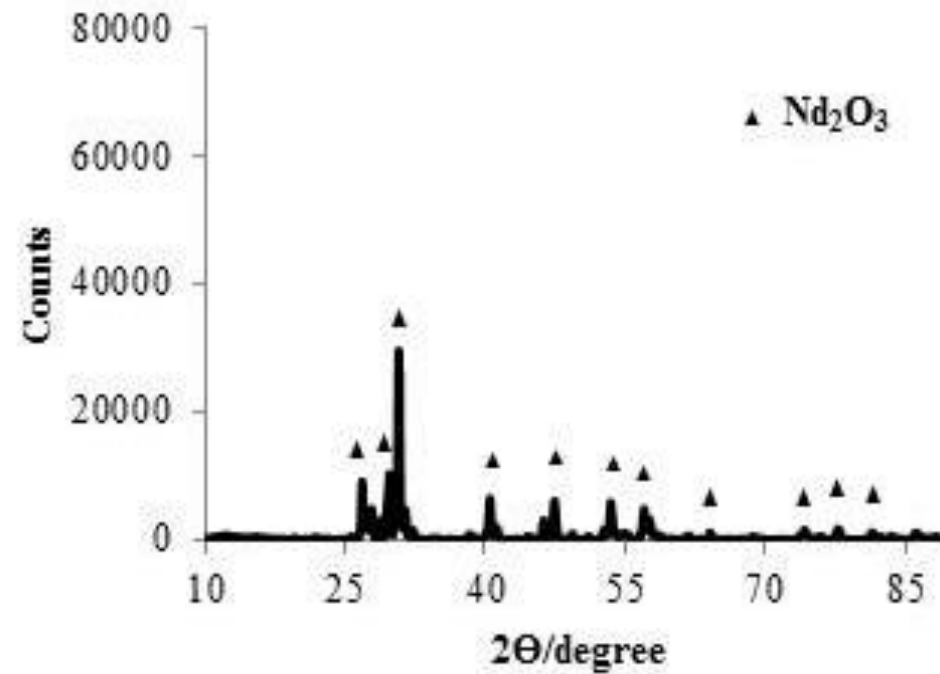
คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

45

XRD patterns of synthesized and commercial Nd_2O_3



Commercial Nd_2O_3



Synthesized Nd_2O_3

คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

46

BET surface area, total pore volume and average pore diameter of synthesized and commercial rare earth oxides

Rare earth oxide	BET surface area (m ² /g)	Total pore volume (cm ³ /g)	Average pore diameter (nm)
La ₂ O ₃	5.146	0.014	10.97
La ₂ O ₃ – C*	3.855	0.014	15.28
CeO ₂	5.287	0.034	25.95
CeO ₂ – C*	0.714	0.005	29.08
Nd ₂ O ₃	3.166	0.028	35.17
Nd ₂ O ₃ – C*	4.989	0.013	10.64

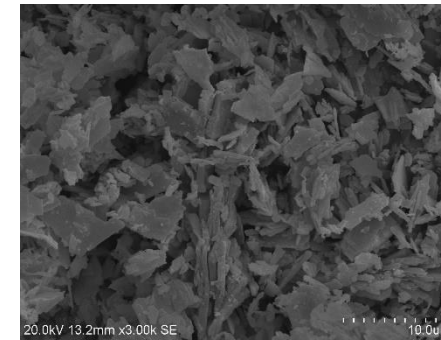
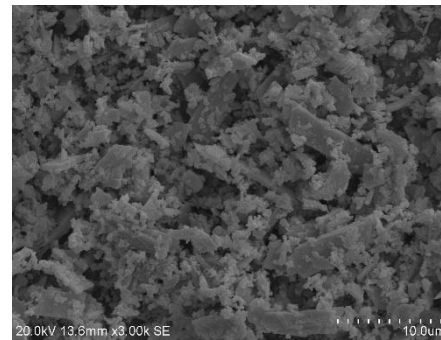
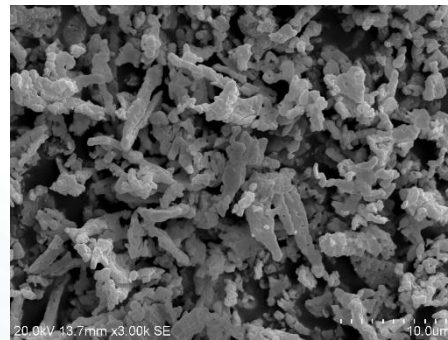
คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

47

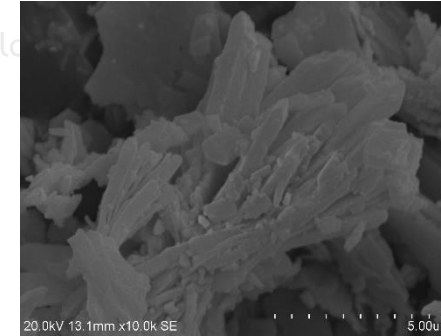
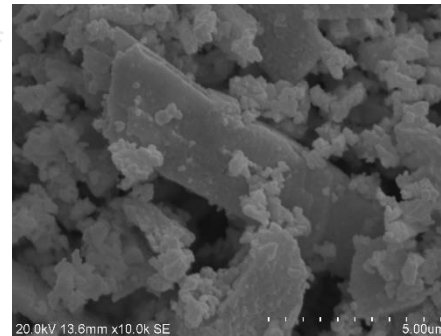
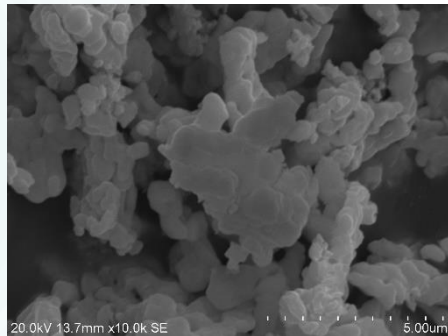
SEM images of synthesized rare earth oxides

Magnification

3,000



10,000



La_2O_3

Nd_2O_3

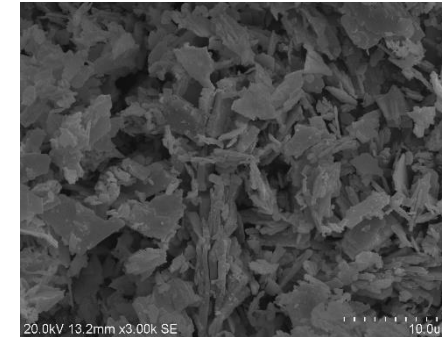
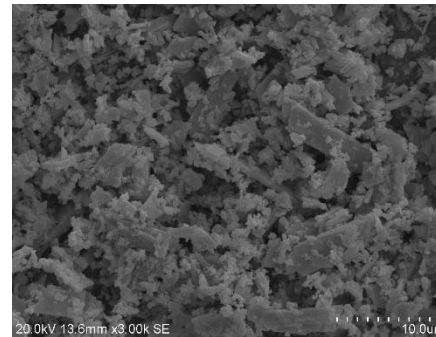
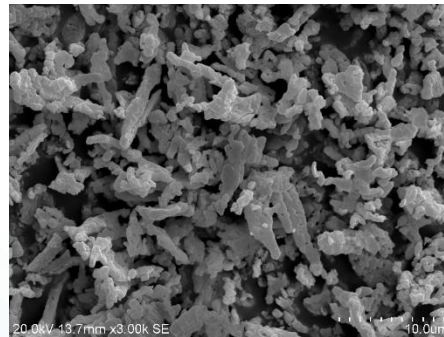
CeO_2

คุณลักษณะเฉพาะของธาตุหายากที่สกัดได้

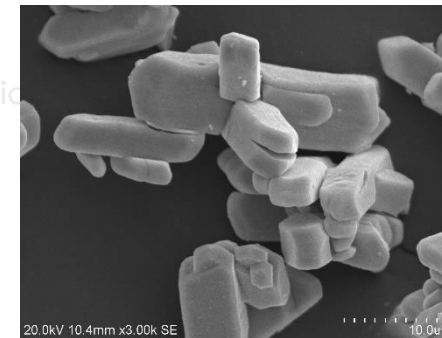
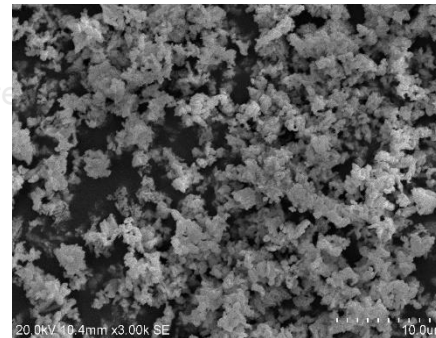
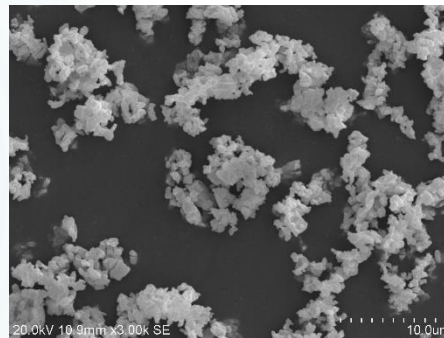
48

SEM images of synthesized and commercial rare earth oxides

Synthesized
REE oxides



Commercial
REE oxides



La_2O_3

Nd_2O_3

CeO_2

งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

49

ปีที่ทำวิจัย	ชื่อโครงการวิจัย	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน	หน่วยงานที่ร่วมมือ
2555-2556	โครงการการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแรเอิร์ทเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล (Synthesis of rare earth catalysts for biodiesel production)	2,124,700	งบประมาณแผ่นดิน	-
2557-2558	โครงการการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแรเอิร์ทแบบเนื้อผสมชนิดกรดเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้ว (Development of rare earth heterogeneous acid catalysts for biodiesel production from waste cooking oil)	1,066,800	งบประมาณแผ่นดิน	-
2559	โครงการการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมของการสกัดแยกธาตุหายากจากแร่โมนาไซต์ (Environmental impacts assessment of separation of rare earths from monazite ore)	500,000	เงินสนับสนุนจากทุนสนับสนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2562	Fellowship on Radioactive Minerals Production, Waste Management and Environmental Remediation after Uranium Mining Operation (RAS2019)	81,624.31	(RAS2019) IAEA	Malaysian Nuclear Agency

งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

50

ปีที่ทำวิจัย	ชื่อโครงการวิจัย	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน	หน่วยงานที่ร่วมมือ
2559-2561	แผนการวิจัยการวิจัยและการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก (Research and application of rare earth) ■ โครงการการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุหายากในตัวอย่างหินและดิน (Development of analytical method for determination of rare earth elements in rock and soil samples) ■ โครงการการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแรเอิร์ทผสมเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระสูง (Development of mixed rare earth catalyst for biodiesel production from high free fatty acid oil) ■ การประยุกต์ใช้เทคนิคทางนิวไคลด์กัมมันตรังสีและการวิเคราะห์เชิงธรณีเคมีหลายตัวแปร ในการสำรวจและประเมินศักยภาพแหล่งแร่ธาตุหายากในแอ่งสะสมตะกอนบริเวณพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย (The application radionuclide techniques and geochemistry multivariate analysis on the exploration and assessment of rare-earth elements bearing sedimentary deposit in the southern part of Thailand)	13,449,700	งบประมาณแผ่นดิน	■ กรมทรัพยากรธรณี ■ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

51

ปีที่ทำวิจัย	ชื่อโครงการวิจัย	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน	หน่วยงานที่ร่วมมือ
2562-2563	แผนงานวิจัยการวิจัยและการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก เฟส 2 (Phase II: Research and application of rare earth) - โครงการการวิจัยการประเมินความเข้มข้นธาตุหายากในตัวอย่างเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย (Assessment of rare earth elements concentration in coal ash from coal-fired power plant in Thailand) - โครงการการวิจัยการปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหินด้วยธาตุหายากในประเทศสำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล (Improvement of coal ash from coal fired power plant by rare earth elements derived from domestic resources as catalyst for biodiesel production) - โครงการการวิจัยการใช้ธาตุหายากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวหอมมะลิ 105 (The use of rare earth elements fertilizer for improving growth and yield of Thai Hom Mali 105) - โครงการการวิจัยการประยุกต์ใช้ธาตุหายากเป็นตัวติดตามการชะล้างพังทลายของดินบริเวณพื้นที่ภาคเหนือของไทย (The Application of Rare Earth Elements as Tracers to Assess Soil Erosion in Northern of Thailand)	18,220,600	งบประมาณแผ่นดิน	- กรมทรัพยากรธรณี - สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

52

ปีที่ทำวิจัย	ชื่อโครงการวิจัย	งบประมาณ (บาท)	แหล่งทุน	หน่วยงานที่ร่วมมือ
2564	โครงการความร่วมมือการตรวจสอบคุณลักษณะและการกักเก็บคืนธาตุหายากในหางแร่ดีบุกเก่า เฟส 1	500,000	ทุนวิจัยภายใต้โครงการเสริมสร้างศักยภาพและขับเคลื่อนความร่วมมือเชิงยุทธศาสตร์ระหว่างประเทศระดับทวิภาคีและพหุภาคี (สป.อว.)	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2564	โครงการความร่วมมือการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาทำจากดินเบาและธาตุหายากจากแหล่งในประเทศไทยสำหรับการผลิตไบโอดีเซล ได้รับทุนสนับสนุนจาก สป.อว. ประจำปี 2564	200,000	ทุนวิจัยความร่วมมือเพื่อการเป็นประชาคมแห่งนวัตกรรมอาเซียนปี 2564 (สป.อว.)	ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2563-2564	โครงการการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาธาตุหายากในประเทศ	155,000	ทุนวิจัยรายได้ ม.ศ.ว. ประจำปี 2563	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2564	โครงการจัดหาแหล่งวัตถุดิบเพื่อรองรับการพัฒนาอุตสาหกรรมศักยภาพ ประจำปี 2564	1,082,000	ทุนสนับสนุนจากกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

53

วิธีการตรวจสอบปริมาณธาตุหายาก ยูเรเนียมและทอเรียม

Geological,
rock and soil
sample

Ce, La, Nd, Pr,
Sm, Eu, Er, Dy,
Gd, Tb, Y, Yb,
Tm, Ho, Lu, Sc,
U and Th



Microwave digestion system



WD-XRF

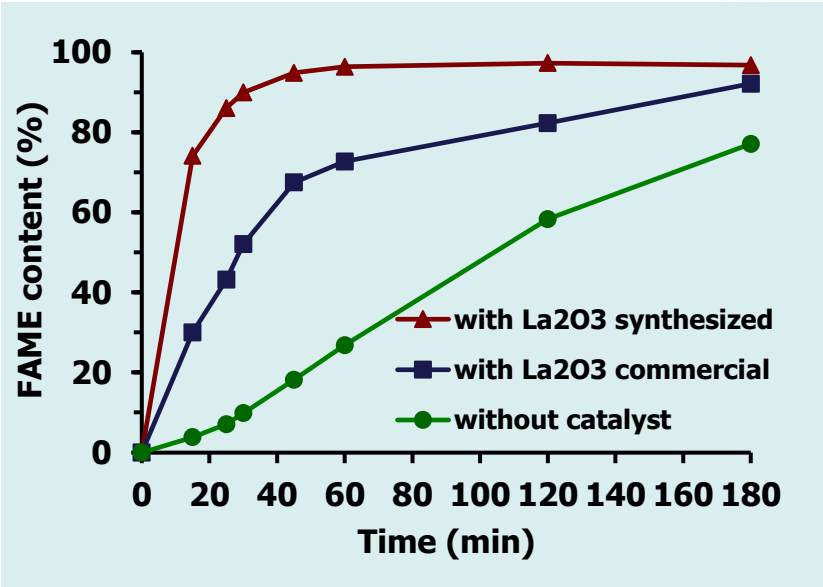
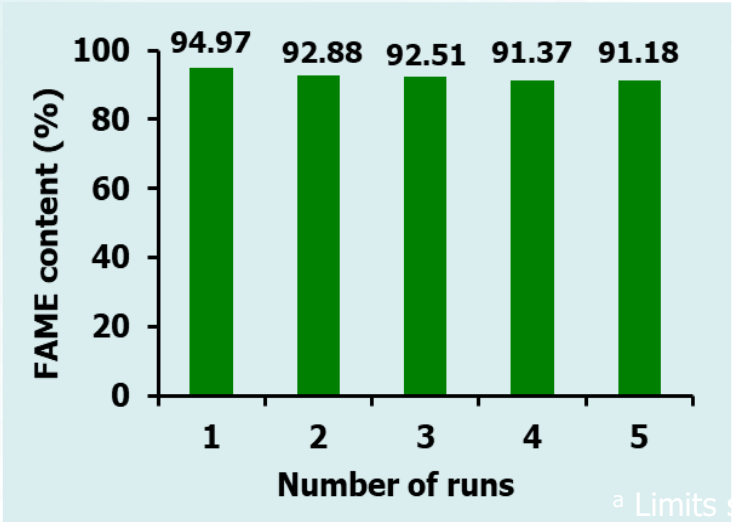
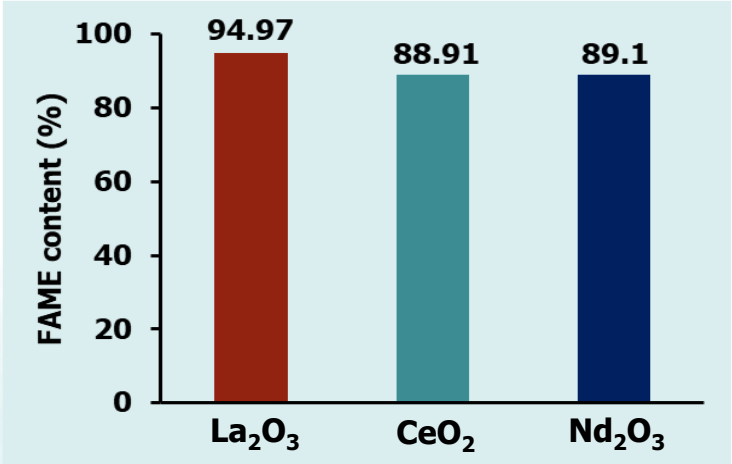


ICP-MS



งานวิจัยการใช้ประโยชน์ธาตุหายาก

ตัวเร่งปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซล

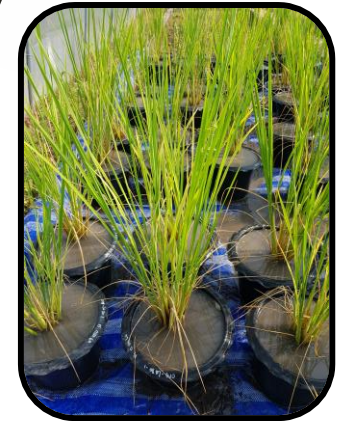
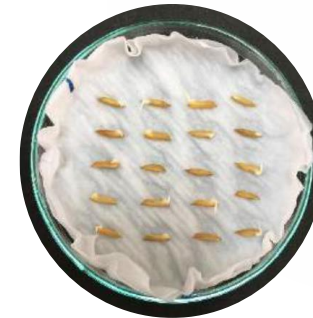


Physicochemical properties	Test method	ASTM D 6751 and EN14214 limits	Experiment value
Ester content (% wt)	EN14103	96.5 ^a	95 ± 0.62
Density 15 °C (kg/m ³)	ASTM D 1298	860-900 ^b	880 ± 0.13
Kinematic viscosity, 40 °C (mm ² /s)	ASTM D 445	1.9-6.0 ^b	5.01 ± 0.01
Oxidative stability, 110 °C (h)	EN 14112	Min. 6 ^a	15.56 ± 0.01
Water content (%vol.)	ASTM D 2709	Max. 0.05 ^b	0.01 ± 0.01

^a Limits specified in EN 14214
^b Limits specified in ASTM D 6751

การใช้ธาตุหายากเป็นสารเร่งการเจริญเติบโตของพืชผัก

- La (10-100 ppm) และ ปุ๋ยอินทรีย์ช่วยเพิ่มความสูง ความอวบและจำนวนใบ และปริมาณคลอโรฟิลล์ ให้กับผักบุ้งจีนเทียบเท่ากับการใส่ปุ๋ยเคมี
- La ช่วยเพิ่มร้อยละการงอกของข้าวหอมมะลิ
- La ช่วยเร่งให้เกิดการออกรวงของข้าวหอมปทุมธานีเร็วขึ้นและจำนวนรวงเพิ่มขึ้น
- ธาตุหายากส่วนใหญ่จะไปสะสมอยู่ที่รากและลำต้น
- การเติมธาตุหายากในปริมาณที่เหมาะสมช่วยการเร่งการเจริญเติบโตของพืชและมีความปลอดภัยในการบริโภค



ขอบคุณค่ะ