ธาตุหายาก

(Rare Earth Elements)

การกำกับดูแลทางนิวเคลียร์และรังสี

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ฉบับที่ 1 (พฤศจิกายน 2568)

บรรณาธิการและผู้นิพนธ์

บรรณาธิการที่ปรึกษา

1. ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล
2. นพ. รุ่งเรือง กิจผาติ
3. นางเพ็ญนภา กัญชนะ

บรรณาธิการบริหาร

นางสาวอัมพิกา อภิชัยบุคคล

คณะผู้นิพนธ์

1. นายภานุพงศ์ พินกฤษ
2. ดร.ไชยยศ สุนทราภา
3. ดร.หริเนตร มุ่งพยาบาล
4. นางรัตนาภรณ์ ชอบเพราะ
5. ดร.อารีรักษ์ เรือนเงิน
6. นางสาวนุชจรีย์ สัจจา
7. นางสาวปัณฑา ชนะชู
8. ดร.อภิสิทธิ์ ศรีประดิษฐ์
9. นางสาวภัทรา ทองสะอาด

บทสรุปผู้บริหาร

ธาตุหายาก (Rare Earth Elements: REEs) เป็นทรัพยากรยุทธศาสตร์ที่มีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและความมั่นคงของประเทศในศตวรรษที่ 21 เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของเทคโนโลยีสมัยใหม่ อาทิ รถยนต์ไฟฟ้า กังหันลม แบตเตอรี่ความจุสูง อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง และระบบป้องกันประเทศสมัยใหม่ จึงได้รับการขนานนามว่าเป็น “เมล็ดพันธุ์แห่งเทคโนโลยี” และ “ทองคำอุตสาหกรรม” อุตสาหกรรมธาตุหายากจึงมีความเชื่อมโยงโดยตรงกับการขับเคลื่อนเศรษฐกิจยุคใหม่ที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรม และการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาดในระดับโลก

สาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นประเทศที่มีศักยภาพสูงสุดในด้านการผลิตและการแปรรูปธาตุหายาก ครอบครองส่วนแบ่งตลาดในขั้นตอนการกลั่นแร่บริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 90 ส่งผลให้ประเทศต่าง ๆ ต้องเร่งกระจายแหล่งผลิตและพัฒนาห่วงโซ่อุปทานเพื่อความมั่นคงทางทรัพยากร ประเทศมหาอำนาจ เช่น สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และสหภาพยุโรป ได้ลงทุนอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างขีดความสามารถในการผลิตและแปรรูปธาตุหายากของตนเองเพื่อลดการพึ่งพาจีน ขณะที่ความต้องการธาตุหายากของโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยคาดว่าจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าภายในปี พ.ศ. 2573 ทำให้ธาตุหายากกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการแข่งขันทางเทคโนโลยีและภูมิรัฐศาสตร์ระหว่างประเทศ

สำหรับประเทศไทย สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติเคยจัดตั้งศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากขึ้น ณ ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ในปี พ.ศ. 2530 โดยในขณะนั้น ประเทศไทยมีการทำเหมืองแร่ดีบุกมากกว่า 300 แห่ง ทำให้เกิดหางแร่ดีบุกขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะถูกกองหรือทิ้งลงทะเล โดยหางแร่ดีบุกดังกล่าว สามารถนำมาเข้ากระบวนการแต่งแร่ เพื่อให้ได้แร่โมนาไซต์และแร่ซีโนไทม์ออกมา ซึ่งแร่ทั้งสองมีธาตุหายากรวมไปถึงยูเรเนียมและทอเรียมเป็นส่วนประกอบ ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติสามารถนำแร่โมนาไซต์และแร่ซีโนไทม์มาแยกธาตุหายากรวมถึงยูเรเนียมและทอเรียมออกมาได้ประสบความสำเร็จ

ปัจจุบันสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ มีความพร้อมในการกำกับดูแลผลพลอยได้จากกระบวนการแต่งแร่ภายในประเทศ ซึ่งมียูเรเนียมและทอเรียมเป็นส่วนประกอบในระดับต่ำ และจัดเป็น “วัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ” (Naturally Occurring Radioactive Materials: NORMs) โดยที่ผ่านมาสำนักงานฯ รวมกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อาทิ กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ ได้ดำเนินการลงพื้นที่ตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง การเก็บตัวอย่าง การให้ความรู้ เพื่อให้สถานประกอบการและประชาชนมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับวัสดุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่ถูกต้อง เพื่อให้การดำเนินการปรับสภาพแร่ เช่น การแต่งแร่ มีความปลอดภัย และสร้างศักยภาพของประเทศทั้งในเชิงเศรษฐกิจและสังคมเกี่ยวกับอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายาก

ในเชิงนโยบาย ปส. มุ่งพัฒนากรอบการกำกับดูแลธาตุหายากแบบบูรณาการ “One Regulation – Multi Agency” เพื่อเชื่อมโยงด้านรังสี สิ่งแวดล้อม และอุตสาหกรรมให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เสริมสร้างศักยภาพบุคลากรและห้องปฏิบัติการตรวจวิเคราะห์ให้มีขีดความสามารถระดับนานาชาติ รวมถึงการสร้างความร่วมมือในระดับภูมิภาค เพื่อยกระดับประเทศไทยสู่การเป็นศูนย์กลางการกำกับดูแลธาตุหายากอย่างปลอดภัยในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

โดยสรุป ธาตุหายากเป็นทรัพยากรเชิงยุทธศาสตร์ที่มีบทบาททั้งด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยี และความมั่นคงของประเทศ การกำกับดูแลโดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติจึงมีความสำคัญต่อการสร้างสมดุลระหว่างการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจและการคุ้มครองความปลอดภัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมธาตุหายากของประเทศไทยให้เติบโตอย่างยั่งยืน และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

สารบัญ

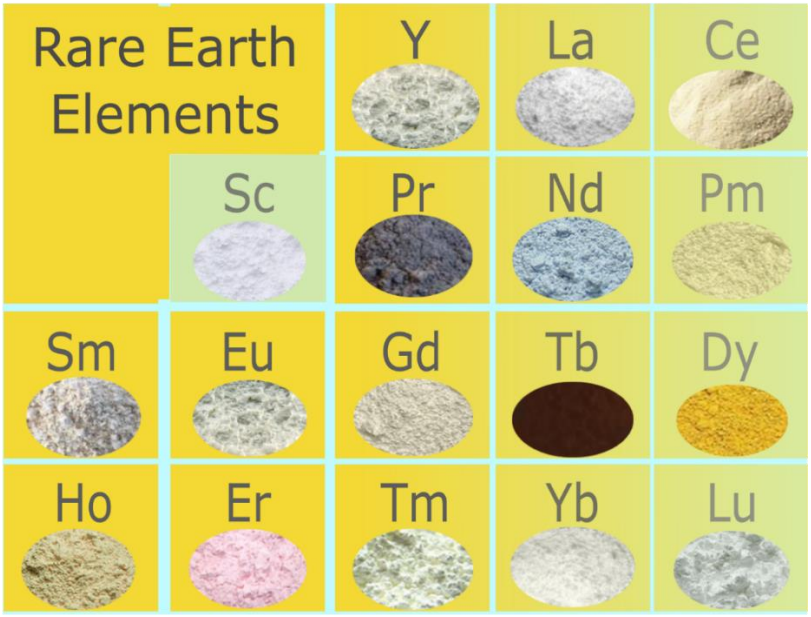
	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทนำ	ง
บทที่ 1 บริบทของธาตุหายาก	1
1.1 สถานการณ์โลก	1
1.2 สถานการณ์ของประเทศไทย	5
บทที่ 2 บทบาทของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกับการกำกับดูแลธาตุหายากในประเทศไทย	7
2.1 อำนาจหน้าที่ตามกฎหมาย	7
2.2 บทบาทเฉพาะด้านในการกำกับดูแลธาตุหายาก	8
2.3 ความร่วมมือกับหน่วยงานอื่น	11
2.4 ข้อเสนอเชิงนโยบาย	11
บทที่ 3 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากการสัมผัสธาตุหายาก	13
บทที่ 4 ความท้าทายของประเทศไทยในอนาคต	15
4.1 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย (Environmental & Waste Management)	15
4.2 ความท้าทายเชิงยุทธศาสตร์และภูมิรัฐศาสตร์ (Geopolitical and Strategic)	16
4.3 ข้อจำกัดด้านบุคลากรและเทคโนโลยี (Human Resource and Technology)	16
เอกสารอ้างอิง	17

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของธาตุหายาก (Rare Earth Elements - REEs)

ธาตุหายาก (Rare Earth Elements หรือ REEs) มักถูกกล่าวถึงว่าเป็น "เมล็ดพันธุ์แห่งเทคโนโลยี" และ "ทองคำอุตสาหกรรม" [1]

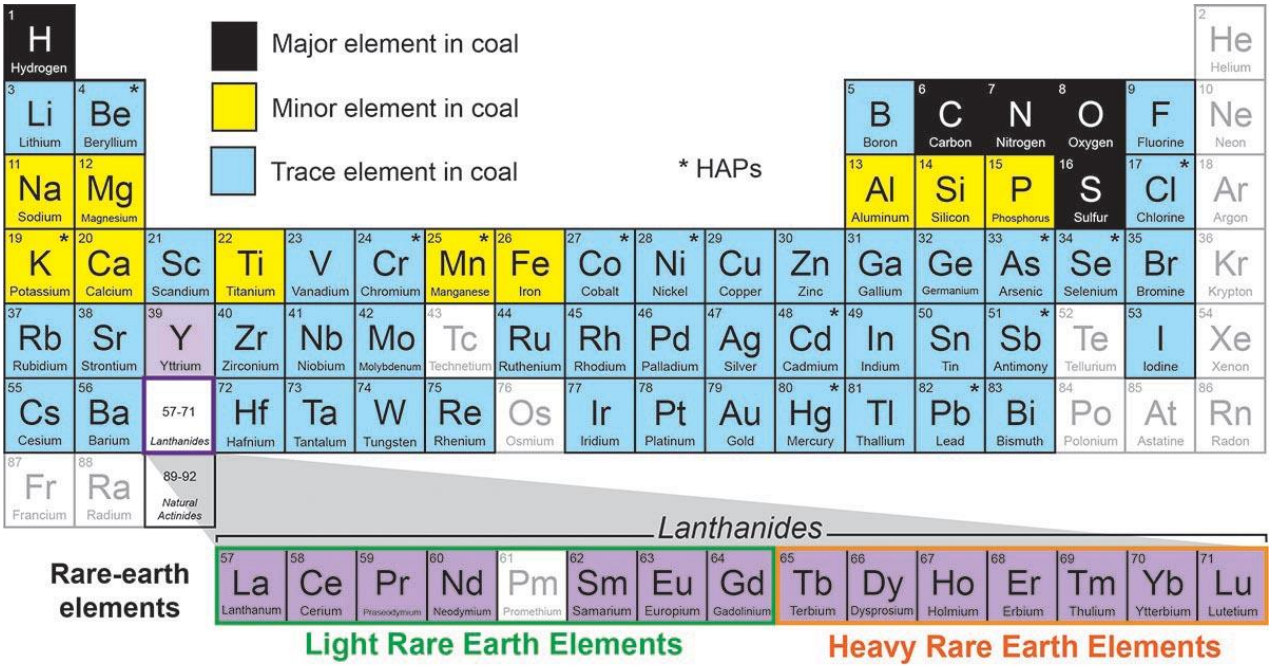
ธาตุหายาก เป็นกลุ่มธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแร่หลายชนิดที่สำคัญและสามารถพบได้ในประเทศไทย ได้แก่ แร่โมนาไซต์ และแร่ซีโนไทม์ ซึ่งแร่ทั้งสองชนิดนี้ได้จากแร่พลอยได้ของการทำเหมืองแร่ดีบุกและการแต่งแร่จากทรายชายหาดทางภาคใต้ของประเทศไทย นอกจากนั้น ยังพบปะปนอยู่กับแร่อื่น ๆ ในหางแร่ดีบุก เช่น แร่อิลเมไนต์ เซอร์เคอน การ์เนต โคลัมไบต์ แทนทาไลต์ เป็นต้น ในแร่โมนาไซต์นั้น นอกจากธาตุหายากแล้ว ยังพบว่ามียูเรเนียม และทอเรียมปนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูงอีกด้วย [2] กลุ่มธาตุนี้ประกอบด้วยธาตุทั้งหมด 17 ชนิด ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ธาตุหายาก 17 ชนิด

(ที่มา: https://chivine-us.com/wp-content/uploads/2017/02/RE-mainpage-pic1.png)

โดยธาตุหายากเป็นกลุ่มธาตุโลหะทรานซิชันหมู่ IIIB ที่มีเลขอะตอมตั้งแต่ 57 ถึง 71 ซึ่งอยู่ในอนุกรมธาตุแลนทาไนด์ (lanthanide series) ประกอบด้วยชนิดธาตุ 15 ธาตุ แต่โดยอนุโลมมักจะนับรวมธาตุสแกนเดียม (scandium: ^{21}Sc) เลขอะตอม 21 และธาตุอิตเทรียม (yttrium: ^{39}Y) เลขอะตอม 39 ของหมู่ IIIB เข้าอยู่ในกลุ่มของธาตุหายากด้วย เนื่องจากมีสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงมากและมักพบเกิดอยู่ด้วยกันเสมอ [3]



รูปที่ 2 ตารางธาตุแสดงกลุ่มธาตุหายากเบา (LREE) และกลุ่มธาตุหายากหนัก (HREE)

(ที่มา: https://www.uky.edu/KGS/coal/images/REE-3_light_and_heavy_chart.jpg)

ธาตุหายากสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มธาตุหายากเบา (light rare earth elements: LREE) และกลุ่มธาตุหายากหนัก (heavy rare earth elements: HREE) อย่างไรก็ตามการจัดแบ่งจำนวนธาตุในกลุ่มย่อยสองกลุ่มนี้มีหลักเกณฑ์กำหนดที่หลากหลาย ซึ่งในที่นี้ใช้เกณฑ์การแบ่งกลุ่มย่อยตามหลักที่ U.S. Geological Survey (USGS) ยึดถือข้อกำหนดของสหพันธ์นานาชาติด้านเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ (The International Union of Pure and Applied Chemistry: IUPAC) ดังนี้ [3]

1) กลุ่มธาตุหายากเบา ประกอบด้วย 8 ชนิด ได้แก่ แลนทานัม (lanthanum: ^{57}La), ซีเรียม (cerium: ^{58}Ce), เพรซีโอดิเมียม (praseodymium: ^{59}Pr), นีโอดิเมียม (neodymium: ^{60}Nd), โพรมีเทียม (promethium: ^{61}Pm), ซาแมเรียม(samarium: ^{62}Sm), ยูโรเพียม (europium: ^{63}Eu) และแกโดลิเนียม (gadolinium: ^{64}Gd)

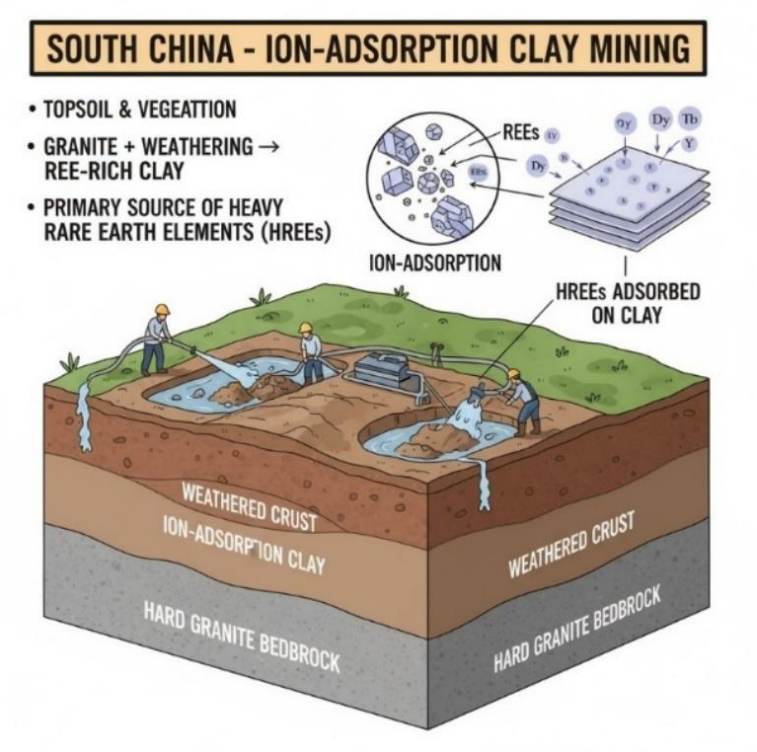
2) กลุ่มธาตุหายากหนัก ประกอบด้วย 8 ชนิด ได้แก่ เทอร์เบียม (terbium: ^{65}Tb), ดีสโพรเซียม (dysprosium: ^{66}Dy), โฮลเมียม (holmium: ^{67}Ho), เออร์เบียม (erbium: ^{68}Er), ทูเลียม (thulium: ^{69}Tm), อิตเทอร์เบียม (ytterbium: ^{70}Yb), ลูทีเทียม (lutetium: ^{71}Lu) และอิตเทรียม (yttrium: ^{39}Y)

ทั้งนี้ สำหรับธาตุสแกนเดียมนั้น จะไม่จัดให้อยู่ในกลุ่มย่อยใดกลุ่มย่อยหนึ่งแม้ว่าจะนับเป็นธาตุหายากตัวหนึ่งก็ตาม โดยมีรายละเอียดคุณลักษณะเฉพาะของกลุ่มธาตุหายากดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะเฉพาะของกลุ่มธาตุหายาก [1]

เลขอะตอม	ธาตุหายาก	สัญลักษณ์	กลุ่มธาตุหายาก	ปริมาณที่พบในธรรมชาติ (ppm)
21	สแกนเดียม (Scandium)	Sc		14
39	อิตเทรียม (Yttrium)	Y	Heavy	21
57	แลนทานัม (Lanthanum)	La	Light	31
58	ซีเรียม (Cerium)	Ce	Light	63
59	เพรซีโอดิเมียม (Praseodymium)	Pr	Light	7.1
60	นีโอดิเมียม (Neodymium)	Nd	Light	27
61	โพรมีเทียม (Promethium)	Pr	Light	-
62	ซาแมเรียม (Samarium)	Sm	Light	4.7
63	ยูโรเพียม (Europium)	Eu	Light	1
64	แกโดลิเนียม (Gadolinium)	Gd	Light	4
65	เทอร์เบียม (Terbium)	Tb	Heavy	0.7
66	ดิสโพรเซียม (Dysprosium)	Dy	Heavy	3.9
67	โฮลเมียม (Holmium)	Ho	Heavy	0.83
68	เออร์เบียม (Erbium)	Er	Heavy	2.3
69	ทูเลียม (Thulium)	Tm	Heavy	0.3
70	อิตเทอร์เบียม (Ytterbium)	Yb	Heavy	2
71	ลูทีเทียม (Lutetium)	Lu	Heavy	0.31

ธาตุหายากเป็นองค์ประกอบที่พบได้ในหินทุกชนิดของเปลือกโลก แต่มีการกระจายตัวอยู่ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน การค้นพบแหล่งสะสมที่มีความเข้มข้นสูงมากพอที่จะคุ้มค่าเชิงพาณิชย์สำหรับการสกัดจึงเป็นเรื่องที่ท้าทาย โดยในธรรมชาติมีแร่ประกอบหินประมาณ 73 ชนิด ที่จัดเป็น “แร่ให้ธาตุหายาก (rare earth minerals)” เนื่องจากมีธาตุหายากเป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างผลึก ส่วนใหญ่จะมีสัดส่วนปริมาณธาตุหายากเบาสูงกว่าธาตุหายากหนัก โดยแร่ส่วนน้อยมีธาตุหายากหลักเป็นชนิดธาตุหายากหนัก ทั้งนี้ มีเพียง 4 แร่หลักที่ทั่วโลกได้นำมาใช้เป็นสินแร่ (ore) ในการสกัดแยกธาตุหายาก ได้แก่ แบสต์นีไซต์ (bastnaesite) โมนาไซต์ (monazite) ซีโนไทม์ (xenotime) และอะพาไทต์ (apatite) โดยมีตัวอย่างแร่ที่ให้ธาตุหายากทั้งจากธาตุหายากหนักและธาตุหายากเบาดังตารางที่ 2 ซึ่งนอกจากสินแร่หลักข้างต้นแล้ว ในบริเวณภาคใต้ของสาธารณรัฐประชาชนจีนยังมีการทำเหมืองจากแหล่งธาตุหายากรูปแบบพิเศษ โดยเป็นการสกัดแยกธาตุหายาก ออกจากชั้นหินผุ (weathered crust) ของมวลหินแกรนิตแหล่งแร่ชนิดนี้เกิดจากการที่หินแกรนิตผุพังตามธรรมชาติ ทำให้ธาตุหายากหลุดออกจากโครงสร้างผลึกแร่เดิม และถูกแร่ดิน (clay minerals) ที่เกิดขึ้นใหม่จากกระบวนการผุพังนี้ดูดซับประจุ (ion-adsorption) ไว้บนพื้นที่ผิวผลึกของแร่ดินอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแหล่งแร่ดินดูดซับประจุนี้มักเป็นแหล่งสำคัญของธาตุหายากหนัก ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาพจำลองการทำเหมืองจากแหล่งธาตุหายากรูปแบบพิเศษบริเวณภาคใต้ของสาธารณรัฐประชาชนจีน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างแร่ที่ให้ธาตุหายาก [3]

กลุ่มแร่	ชนิดแร่หลัก
กลุ่มแร่ให้ธาตุหายากเบา	bastnaesite, monazite, allanite, loparite, ancylite, parasite, lanthanite, cerite, fluocerite, cerianite, chevinite, stillwellite, และ britholite
กลุ่มแร่ให้ธาตุหายากหนัก	xenotime, gadolinite, samarskite, euxenite, fergusonite, yttrotantalite, yttrotungstile, และ yttrialite

ธาตุกัมมันตรังสีแฝงที่มาพร้อมกับธาตุหายาก หมายถึง ธาตุทอเรียม (thorium: ^{90}Th) และธาตุยูเรเนียม (uranium: ^{92}U) ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีแฝงที่เกิดร่วมกับธาตุหายาก โดยธาตุทอเรียม พบได้ในดินและหินทุกชนิด มีปริมาณเฉลี่ย 6 ppm ซึ่งธาตุทอเรียมมี 25 ไอโซโทป มีน้ำหนักอะตอมตั้งแต่ 212 amu (Th-212) ถึง 236 amu (Th-236) โดยที่เกิดในธรรมชาติ มีไอโซโทปเดียวคือ Th-232 ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียรที่สุดมีการสลายตัวช้า (มีครึ่งชีวิต 14.05 พันล้านปี) สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ส่วนธาตุยูเรเนียม มีปริมาณน้อยในดิน หิน และน้ำ ซึ่งจะมีความเข้มข้นสูงกว่าปกติในบางชนิด เช่น หินฟอตเฟส ลิกไนต์ และโมนาไซต์ ซึ่งธาตุยูเรเนียมที่เกิดในธรรมชาติ มี 3 ไอโซโทป ได้แก่ U-234, U-235 และ U-238 โดย U-238 มีจำนวนมากที่สุด และมีครึ่งชีวิต 4.5×10^9 ปี ซึ่งธาตุทอเรียมและธาตุยูเรเนียมพบได้ในแร่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุทอเรียม [3]

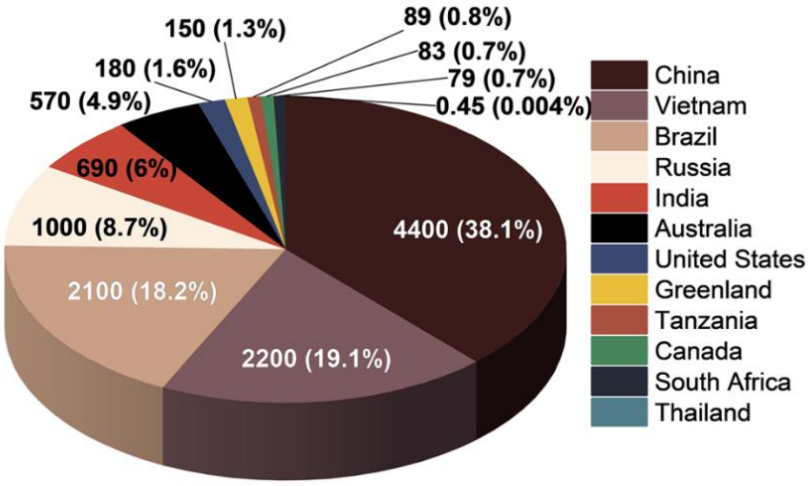
Thorium Mineral	Chemical Formula	% ThO_2
Minerals with Th as major constituent		
Huttonite	$ThSiO_4$	80
Thorite, Uranothorite	$ThSiO_4$, $(Th, U)SiO_4$	50, <50
Cherelite	$(Th, Ce, Ca)(SiO_4PO_4)$	30
Thorianite, Urathorianite	ThO_2, $(Th, U)O_2$	80, <80
Common accessory minerals		
Monazite	$(REE,Th)PO_4$	10
Xenotime	YPO_4	0.4-1
Zircon	$ZrSiO_4$	0.01-1
Allanite	(Ca, Al, Fe, Mg) silicate	0.1-1
Apatite	$Ca5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	0.001-0.1
Sphene	$CaTiSiO_5$	0.001-0.1
Epidote	$CaF_3{}^+Al_2O{\cdot}OH(Si_2O_7(Si_2O_4)$	0.005-0.05

ตารางที่ 4 แร่ที่มีองค์ประกอบของธาตุยูเรเนียม [3]

Uranium Mineral	Chemical Formula	% UO_2/ ppm eU
Minerals with U as major constituent		
Uraninite, (Pitchblende)	UO_2	
Betafite	$(U, Ca)(Nb, Ta, Ti)_3O_9{\cdot}nH_2O$	
Huttonite	$ThSiO_4$	100-20000 ppm
Uranospherite	$(Bio)(UO_2)(OH)_3$	
Thorite, Uranothorianite	$ThSiO_4$, $(Th, U)SiO_4$	1-35%
Thorianite, Uranothorianite	ThO_2 $(Th, U)O_2$	5%
Common accessory rock-forming minerals		
Zircon	$ZrSiO_4$	5%
Xenotime	YPO_4	5%
Monazite	$(REE,Th)PO_4$	100-20000 ppm
Allanite	(Ca, Al, Fe, Mg) silicate	10-2000 ppm
Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	5-200 ppm
Sphene	$CaTiSiO_5$	10-500 ppm

2. บทบาทเชิงยุทธศาสตร์ของธาตุหายาก [1], [4], [5], [6]

ธาตุหายาก ไม่ได้เป็นเพียงส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ แต่เป็นทรัพยากรเชิงยุทธศาสตร์ที่มีความสำคัญสูง หรือวัตถุดิบที่มีความสำคัญวิกฤต (critical raw materials) ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการกำหนดทิศทางการแข่งขันทางเทคโนโลยีและภูมิรัฐศาสตร์โลก เนื่องจากต้องพึ่งพาเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีแห่งอนาคต เช่น รถยนต์ไฟฟ้า (electrical vehicle: EV) กังหันลม และแบตเตอรี่ความจุสูง ซึ่งผลักดันการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานสะอาด (green transition) รวมทั้ง เป็นส่วนประกอบสำคัญในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราใช้ในชีวิตประจำวัน (โทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์) อุปกรณ์ทางการแพทย์ (เครื่อง X-ray, MRI) และอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ นอกจากนี้ ยังมีความสำคัญต่อความมั่นคงของชาติและการทหาร เนื่องจากธาตุหายากเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอาวุธยุทโธปกรณ์สมัยใหม่ ที่มีความแม่นยำสูง (precision-guided munitions) เช่น ระบบนำวิถีของขีปนาวุธ เรดาร์ ระบบสื่อสารทางทหาร และเครื่องยนต์อากาศยาน ซึ่งการเข้าถึงและควบคุมห่วงโซ่อุปทานธาตุหายากจึงถูกมองว่าเป็นอำนาจต่อรองทางภูมิรัฐศาสตร์ (geopolitical leverage) และเป็นปัจจัยชี้ขาดในสมรภูมิเทคโนโลยีและความมั่นคงของประเทศ ธาตุหายากจึงเป็นมากกว่าสินค้าโภคภัณฑ์ แต่เป็นอาวุธทางเศรษฐกิจ และเทคโนโลยีที่ทุกชาติให้ความสำคัญในระดับสูงสุด เพราะเป็นรากฐานของความก้าวหน้าและการปกป้องผลประโยชน์ของชาติ ทั้งนี้ มีปริมาณสำรองธาตุหายากจากข้อมูลในหน่วยหมื่นเมตริกตันของปริมาณเทียบเท่าออกไซด์ธาตุหายาก (rare earth oxide: REO) ของประเทศและภูมิภาคหลัก ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ปริมาณสำรองธาตุหายากจากข้อมูลในหน่วยหมื่นเมตริกตันของปริมาณเทียบเท่าออกไซด์ธาตุหายาก (rare earth oxide: REO) ของประเทศและภูมิภาคหลัก [1]

3. การใช้งานและแนวโน้มในอนาคต [1], [4], [5], [6]

ธาตุหายากมีบทบาทสำคัญในช่วงทศวรรษ 1950 ด้านการทหารและนิวเคลียร์ จนถึงปัจจุบันธาตุหายากยังคงมีความสำคัญทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องของเศรษฐกิจโลกและความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมไฮเทค ดังนั้น จึงมีความต้องการธาตุหายากเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ด้วยความตระหนักที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับการรักษาสิ่งแวดล้อมและการพัฒนาที่ยั่งยืน ธาตุหายากจึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านการคุ้มครองสิ่งแวดล้อมและพลังงานใหม่ เช่น กังหันลม (wind turbines) หลอดไฟประหยัดพลังงาน (energy-saving light bulbs) และแผงโซลาร์เซลล์ (solar panels) นอกจากนี้ ธาตุหายากยังสามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพเชื้อเพลิงรถยนต์และลดการปล่อยไอเสียอุตสาหกรรมได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้ โลกจึงมีความต้องการที่สูงขึ้นสำหรับการผลิตธาตุหายาก ซึ่งจำเป็นต้องมีการจัดตั้งห่วงโซ่อุปทานที่มั่นคงในระยะยาวเพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว

4. ความท้าทายในการผลิตและอุปทานธาตุหายาก [1], [4], [5]

ปัจจุบัน ทั่วโลกกำลังเผชิญกับความท้าทายกับสถานการณ์ผลิต อุปสงค์ และอุปทานของธาตุหายาก ถึงแม้ว่าการทำเหมืองธาตุหายากจะตอบสนองต่อความต้องการระยะสั้น แต่ยังคงได้รับผลกระทบจากการผลิตและความต้องการระยะยาวหลายประการ ซึ่งรวมถึง เกรดสินแร่ (ore grade) ปริมาณสำรองแร่ (mineral reserve tonnage) เทคโนโลยีการสกัด (extraction technology) และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (environmental impact) ทั้งนี้ ความท้าทายเหล่านี้สามารถจำแนกออกเป็นทางเทคนิคและไม่ใช่ทางเทคนิค

4.1 ความท้าทายทางเทคนิค

ความท้าทายทางเทคนิคส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับความซับซ้อนของการสกัด และการแปรรูปธาตุหายาก เช่น ความเข้มข้นของธาตุหายากในธรรมชาติที่มีปริมาณความซับซ้อนของแร่วิทยา ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการแยกและการทำให้บริสุทธิ์

4.2 ความท้าทายที่ไม่ใช่ทางเทคนิค

ความท้าทายที่ไม่ใช่ทางเทคนิคครอบคลุมประเด็นที่หลากหลาย ดังนี้

1) ปัจจัยทางเศรษฐกิจ เช่น ต้นทุนการผลิตที่สูง และความผันผวนของตลาด

2) ปัจจัยทางการเมืองและภูมิรัฐศาสตร์ เช่น ข้อจำกัดในการส่งออก นโยบายการค้า และลัทธิชาตินิยมด้านทรัพยากร (resource nationalism)

3) ความกังวลทางสังคม เช่น การต่อต้านของสาธารณชนต่อการดำเนินงานของเหมือง

4) ข้อจำกัดด้านสิ่งแวดล้อมและกฎระเบียบ เช่น การประเมินผลกระทบทางนิเวศวิทยา และความล่าช้าในการขออนุญาต

5. การนำธาตุหายากมาใช้ประโยชน์ (Applications) [1], [4], [5], [6]

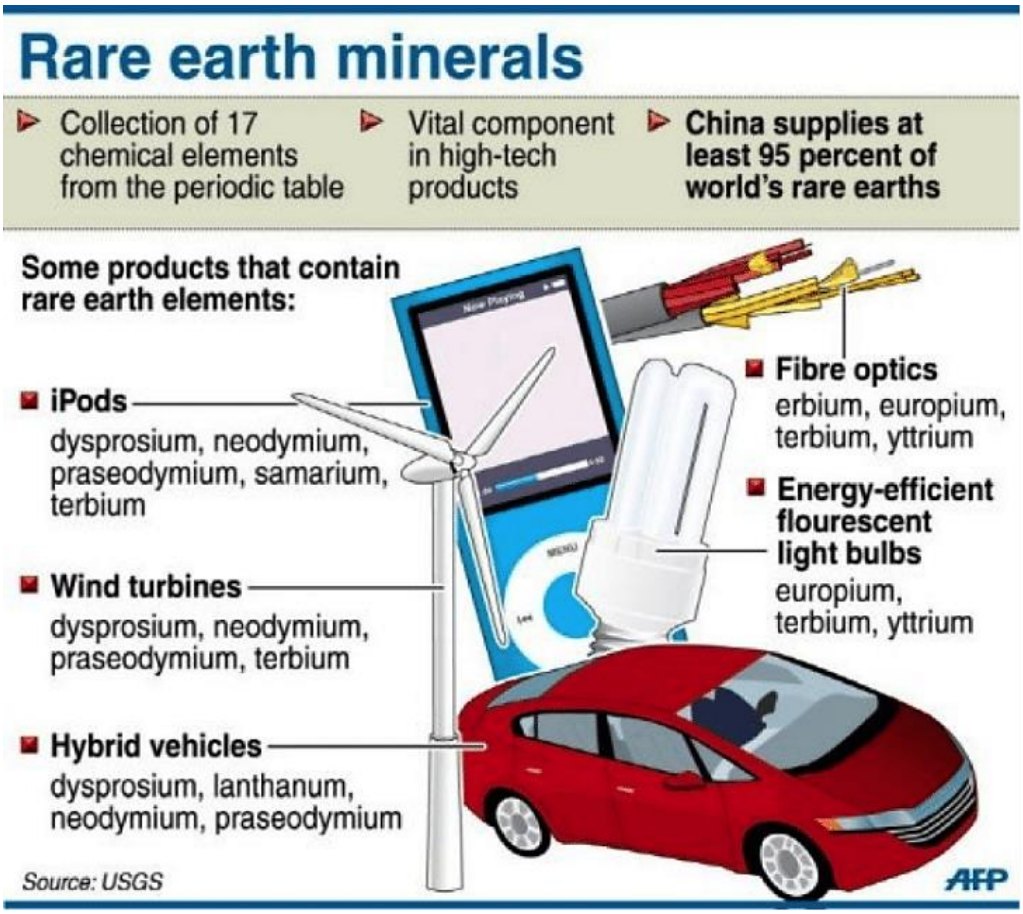
ธาตุหายากเป็นทรัพยากรที่มีความสำคัญสูง และมีมูลค่าในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่เป็นเอกลักษณ์ สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย จึงมีความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ธาตุหายากมีความเชื่อมโยงกับการพัฒนาทางสังคมและเศรษฐกิจ ความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การจัดเก็บพลังงานและการรักษาสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่ออุตสาหกรรมที่ครอบคลุมถึงการบิน โทรคมนาคม อิเล็กทรอนิกส์ พลังงาน การขนส่ง การทหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์

5.1 คุณสมบัติที่โดดเด่นของธาตุหายากต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ

ธาตุหายากถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวัสดุต่าง ๆ เนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสง ตัวเร่งปฏิกิริยา แม่เหล็ก และไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยม การเติมธาตุหายากในปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุได้อย่างมาก ทำให้วัสดุแข็งแกร่งขึ้น เบาขึ้น หรือนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา แม่เหล็กถาวร ยานยนต์ไฮบริดและไฟฟ้า กังหันลม หลอดฟลูออเรสเซนต์ โซลาร์เซลล์ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีประสิทธิภาพและทนทาน นอกจากนี้ ธาตุหายากบางชนิดยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อระบบอาวุธทางทหารหลายประเภทสำหรับใช้ในการป้องกันประเทศ ทั้งนี้ ธาตุหายากยังถือเป็นสินค้าโภคภัณฑ์เชิงยุทธศาสตร์ ที่รับประกันความมั่งคั่งทางเศรษฐกิจและความมั่นคงของชาติ ที่ดึงดูดความสนใจและการแข่งขันของหลายประเทศ จากคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมของธาตุหายากจึงเป็นที่รู้จักในชื่อ "โลหะปรุงรส (seasoning metals)" ในเยอรมนี "ผงชูรสอุตสาหกรรม (industrial MSG)" ในสาธารณรัฐประชาชนจีน และ "วิตามินแห่งอุตสาหกรรมสมัยใหม่ (vitamins of modern industry)" ในญี่ปุ่น

5.2 บทบาทในพลังงานสะอาด

แม่เหล็กถาวรที่มีธาตุหายากเป็นส่วนประกอบสำคัญในภาคส่วนพลังงานยุคใหม่ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา ยานยนต์ไฟฟ้า และกังหันลม จึงมีการใช้งานอย่างกว้างขวางจึงถูกเรียกว่า "ธาตุสีเขียว (green elements)" โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้เป้าหมายการปล่อยก๊าซคาร์บอนถึงจุดสูงสุด (carbon peak) และความเป็นกลางทางคาร์บอน (carbon neutrality) ที่เพิ่มขึ้น เป็นการเน้นย้ำถึงการรักษาสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประเทศต่าง ๆ หันไปใช้พลังงานสะอาด ซึ่งนำไปสู่ความต้องการธาตุหายาก ทั่วโลกอย่างต่อเนื่อง ธาตุหายากที่สำคัญคือ ดิสโพรเซียม (Dy), เทอร์เบียม (Tb), อิตเทรียม (Y), ยูโรเพียม (Eu), และนีโอดิเมียม (Nd) เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับเทคโนโลยีพลังงานเกิดใหม่ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การใช้ประโยชน์ธาตุหายากในบทบาทพลังงานสะอาด

(ที่มา: https://jcdream.org/wp-content/uploads/2019/09/REMs.png)

5.3 ธาตุหายากในภาคการเกษตร

ธาตุหายากถูกนำมาใช้ในเป็นปุ๋ยของภาคการเกษตร เพื่อปรับปรุงการเจริญเติบโตและการผลิตพืชผล ซึ่งโดยทั่วไปปุ๋ยแร่ธาตุ เช่น ปุ๋ยฟอสเฟตและสารปรับปรุงดิน จะมีธาตุอาหารหลัก (คือ Ca, N, P และ S) และธาตุอาหารรอง (เช่น Fe และ Si) และธาตุหายากในสาธารณรัฐประชาชนจีนมีการใช้ปุ๋ยจุลธาตุที่มีธาตุหายากกับพืชผลในภาคเกษตรกรรมในวงกว้าง เพื่อปรับปรุงผลผลิตและคุณภาพ

รูปที่ 6 การใช้ประโยชน์ธาตุหายากภาคการเกษตร

(ที่มา: https://image.made-in-china.com/202f0j00zPtcSldMZCrD/Rare-Earth-Balanced-Fertilizer-Nutrient-Mix-Fertilizer-NPK.webp)

5.4 ธาตุหายากในทางการแพทย์

คุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุหายาก เช่น การปล่อยรังสีหรือความเป็นแม่เหล็ก ทำให้ถูกนำไปใช้ในงานการรักษาและการวินิจฉัยทางการแพทย์สมัยใหม่หลายด้าน โดยมีการยืนยันว่าธาตุหายากมีฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและเชื้อรา ซึ่งเทียบได้กับไอออนทองแดง และธาตุเหล่านี้กำลังเริ่มถูกนำมาใช้ในการใช้งานทางเภสัชกรรมหลายด้าน ตัวอย่างเช่น แกโดลิเนียม (Gd) ถูกนำมาใช้ในรูปของสารประกอบคีเลต (chelated form) เป็นสารสร้างความแตกต่างในการถ่ายภาพด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI)

รูปที่ 7 การใช้ประโยชน์ธาตุหายากทางการแพทย์

(https://rareearthexchanges.com/wp-content/uploads/2024/10/Rare-earths-in-MRI.jpg)

5.5 การประยุกต์ใช้ในระบบป้องกันประเทศ

ในปัจจุบันมีการใช้วัสดุธาตุหายากประมาณ 4 ถึง 30 ชนิด ในระบบป้องกันประเทศ และการทหารที่หลากหลาย (รูปที่ 8) ดังนี้

1) เลเซอร์สำหรับการส่องสว่างเป้าหมาย

2) กระสุนนำวิถีความแม่นยำสูง (precision-guided munitions)

3) ระบบสื่อสารแบบอำพราง (covert communication systems)

4) อุปกรณ์สำหรับสงครามอิเล็กทรอนิกส์ (electronic warfare equipment)

5) ระบบเรดาร์ (radar systems)

6) ระบบอิเล็กทรอนิกส์การบิน (avionics)

7) แว่นตาสำหรับมองในเวลากลางคืน (night-vision goggles)

8) ดาวเทียมเฝ้าระวังและลาดตระเวน (surveillance and reconnaissance satellites)

9) ฮาร์ดไดรฟ์คอมพิวเตอร์

10) แม่เหล็กถาวร ที่ทำจากซาแมเรียมและนีโอดิเมียม สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าที่ต้องการประสิทธิภาพสูงและแรงบิดสูง

11) แม่เหล็กโฟกัสสำหรับหลอดขยายคลื่นเดินทาง (travelling wave tube amplifiers: TWTAs)

รูปที่ 8 การใช้ประโยชน์ธาตุหายากในระบบป้องกันประเทศ

(ที่มา: https://rareearthexchanges.com/wp-content/uploads/2024/10/Rare-earths-in-defense.jpg)

5.6 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

ธาตุหายากถูกนำมาใช้ในส่วนประกอบของอากาศยานและอวกาศ (aerospace) เครื่องยนต์ไอพ่น (jet engines) สแครมเจ็ต (scramjets) อิเล็กโทรดแบตเตอรี่สำหรับแบตเตอรี่กำลังสูง และผลิตภัณฑ์การบินอื่น ๆ อีกมากมาย

รูปที่ 9 การใช้ประโยชน์ธาตุหายากในอากาศยาน

(ที่มา: https://wsm-ind.com/wp-content/uploads/2023/08/Aerospace_5.jpg)

นอกจากนี้ ยังมีการนำธาตุหายากมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เนื่องจากเป็นส่วนประกอบสำคัญของเทคโนโลยีแทบทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 5

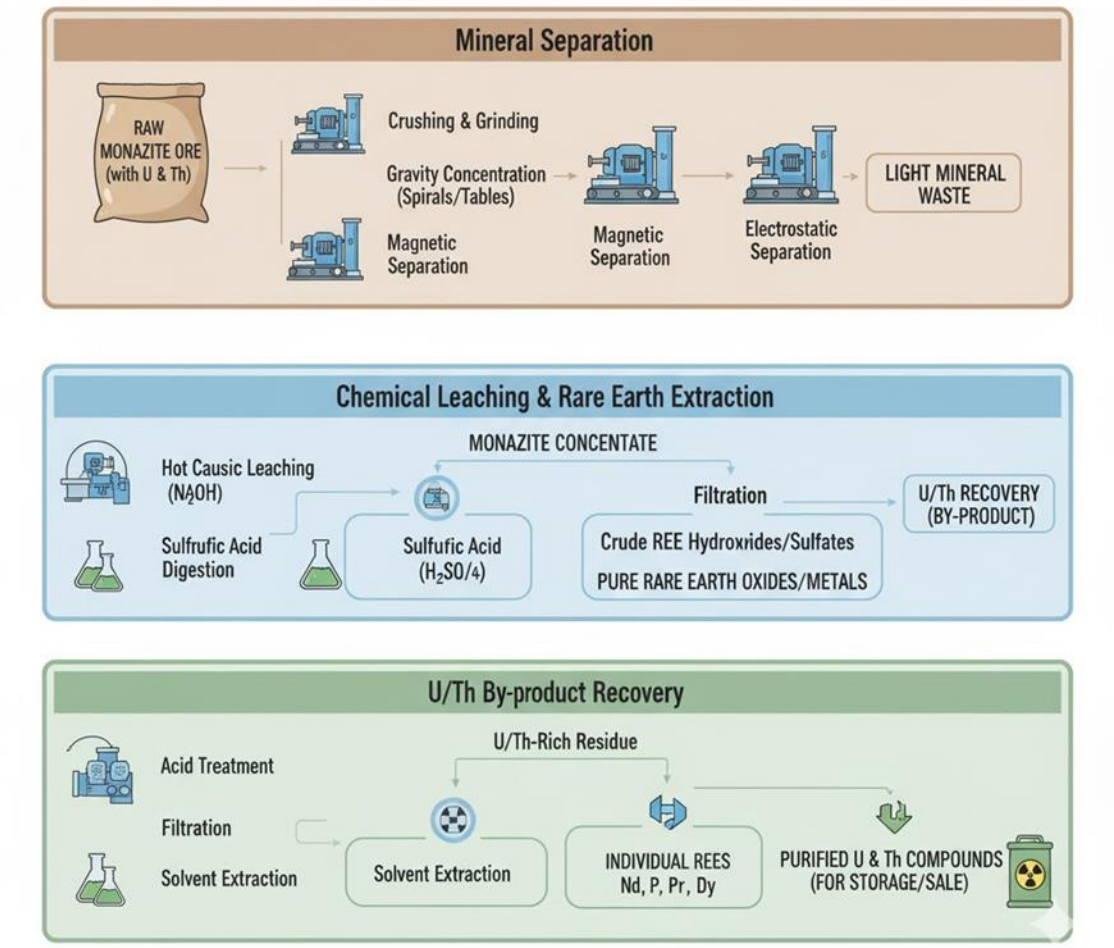
ตารางที่ 5 แสดงการใช้ประโยชน์ของธาตุหายากที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของเทคโนโลยีต่าง ๆ [1], [4], [5], [6], [7]

การใช้ประโยชน์	ธาตุหายาก
การบินและอวกาศ	Sc, Y, Pr, Nd, Tb
รถยนต์	Y, La, Ce, Pr, Nd, Gd, Tb, Dy,
แบตเตอรี่	Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Gd, Tb, Ho, Er, Lu
กระบวนการทางเคมี	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Lu
เครื่องแก้ว	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Eu, Gd, Tb, Ho, Er, Tm, Yb
หลอดไฟ	Sc, Y, La, Ce, Pr, Pm, Eu, Tb, Dy, Ho, Tm, Yb, Lu
แม่เหล็ก	Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Ho
การแพทย์	Sc, Y, La, Ce, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Ho, Tm, Yb
อุตสาหกรรมนิวเคลียร์	Y, Sm, Eu, Gd, Dy, Er
การกลั่นน้ำมัน	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Lu
สารกึ่งตัวนำ	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Gd, Ho, Er, Lu
จอแสดงผลแบบแบน	Y, La, Ce, Eu, Tb
เลเซอร์	Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu
เซรามิก	Y, La, Ce, Pr, Nd
สารเรืองแสง	Y, La, Ce, Eu, Gd, Tb
โลหะผสม	La, Ce, Pr, Nd
สารขัดเงา	La, Ce, Pr,
โทรศัพท์มือถือ ฮาร์ดไดรฟ์คอมพิวเตอร์และกล้องถ่ายรูป	Nd, Pr, Tb, Dy
ยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด แบตเตอรี่ความจุสูงและเลเซอร์อินฟราเรด	La, Ce, Nd, Pr, Dy
หลอดไฟประหยัดพลังงาน	Y, La, Eu, Tb
สารเติมแต่งในแก้ว	La, Ce, Nd, Eu
สายเคเบิลใยแก้วนำแสง เครื่องขยายสัญญาณใยแก้วนำแสง	Y, Eu, Er
อุปกรณ์เอ็กซเรย์แบบพกพา	Pr
ตัวเร่งปฏิกิริยา	Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Lu
อุปกรณ์ดูดซับนิวตรอน	Y, Ce, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er
ยาเวชภัณฑ์	La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Ho, Er, Lu
ปุ๋ย	La, Ce, Nd

การใช้ประโยชน์	ธาตุหายาก
ผงขัดเลนส์	La, Ce, Nd
แม่เหล็กถาวรสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในยานยนต์ไฟฟ้าไฮบริด	Samarium-cobalt

6. บทบาทของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.)

เนื่องจากการทำเหมืองและการแปรรูปธาตุหายากมักพบการปนเปื้อนของธาตุกัมมันตรังสีแฝงในแร่ที่ใช้เป็นแหล่งผลิต เช่น แร่โมนาไซต์ ซึ่งในกระบวนการสกัดธาตุหายากจะมียูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) เป็นผลพลอยได้ (by product) ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ภาพจำลองกระบวนการแปรสภาพและแยกธาตุหายาก

ดังนั้น สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) ภายใต้กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ซึ่งมีภารกิจในการกำกับดูแลยูเรเนียมและทอเรียม ตามพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 และที่แก้ไขเพิ่มเติม จึงมีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับผู้ประกอบการธาตุหายากในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์ ดังนี้

1) การควบคุมวัสดุนิวเคลียร์ โดยผู้ใช้ประโยชน์จากแร่ที่มีวัสดุนิวเคลียร์ปนเปื้อน ต้องขออนุญาตหรือแจ้งการครอบครองหรือใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุนิวเคลียร์

2) การอนุญาต/แจ้งการครอบครอง โดยผู้ประกอบการที่ใช้แร่โมนาไซต์หรือแร่ที่มีธาตุหายากอื่น ๆ เป็นวัตถุดิบ อาจต้องดำเนินการขออนุญาต หรือแจ้งการครอบครองหรือใช้วัสดุนิวเคลียร์ต่อ ปส. ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับปริมาณของยูเรเนียมและทอเรียมที่ครอบครอง

3) การบังคับใช้กฎหมาย ปส. มีภารกิจกำกับดูแลและบังคับใช้กฎหมายอย่างเคร่งครัด เพื่อให้มั่นใจว่าการจัดการกับวัสดุนิวเคลียร์ที่เป็นผลพลอยได้นี้เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยระดับสากล

4) ปส. มีห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่สามารถดำเนินการในส่วนของการวิเคราะห์ ทดสอบองค์ประกอบและปริมาณธาตุหายาก รวมทั้ง ยูเรเนียมและทอเรียม รวมทั้งการตรวจวัดปริมาณรังสีภายในร่างกายและปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม

ทั้งนี้ ปส. มีเป้าหมายเพื่อให้เกิดความมั่นใจและความปลอดภัยสูงสุด ต่อประชาชน สิ่งแวดล้อม และผู้ปฏิบัติงานทางนิวเคลียร์และรังสีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสกัดธาตุหายากซึ่งมียูเรเนียมและทอเรียม เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการดังกล่าว

บทที่ 1 บริบทของธาตุหายาก

1.1 สถานการณ์โลก

ธาตุหายาก ได้กลายเป็นหัวใจสำคัญของการแข่งขันทางอุตสาหกรรมและกลยุทธ์ทางภูมิรัฐศาสตร์ในศตวรรษที่ 21 จากที่เคยเป็นเพียงสินค้าที่เป็นความต้องการเฉพาะกลุ่ม แต่ปัจจุบันกลับเป็นที่ต้องการของตลาดโลกที่สูงมาก เนื่องจากนำมาใช้ในภาคการผลิตที่หลากหลาย เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กคุณภาพสูง วัสดุสำหรับเทคโนโลยีพลังงานสะอาด อุตสาหกรรมรถยนต์ไฟฟ้า หรือระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) ตลอดจนเทคโนโลยีป้องกันประเทศ เช่น ระบบนำวิถี เครื่องบินรบ หรือเรือดำน้ำ เป็นต้น อันเป็นปัจจัยสำคัญทั้งอำนาจการต่อรองทางเศรษฐกิจและทางการทหาร ที่ผ่านมาสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นประเทศที่มีศักยภาพและความสามารถในการผลิตธาตุหายากทั้งทำเหมืองถลุงแร่ การแปรรูป การสกัดแร่ ตลอดจนเปลี่ยนธาตุหายากให้อยู่ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสม พร้อมสำหรับการนำไปผลิตชิ้นส่วนทางเทคโนโลยีต่อไป โดยสาธารณรัฐประชาชนจีนเป็นผู้ครอบครองตลาดในการผลิตสินแร่ (mine production) มากกว่าครึ่งหนึ่งของโลกและในขั้นตอนการเปลี่ยนสินแร่เป็นธาตุหายากในขั้นตอนสุดท้าย (refining) มากกว่าร้อยละ 90 ของตลาดโลก ซึ่งสามารถใช้ความได้เปรียบนี้เพื่อผลักดันผลประโยชน์เชิงกลยุทธ์ของประเทศ นำไปสู่ความกังวลเรื่องห่วงโซ่อุปทาน (supply chain) และผลักดันให้ประเทศอื่น ๆ ต้องพยายามกระจายแหล่งผลิตธาตุหายากเพื่อลดการพึ่งพาจากสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งสหรัฐอเมริกาและสหภาพยุโรปได้มีการลงทุนอย่างหนักเพื่อสร้างขีดความสามารถในการแปรรูปและการผลิตธาตุหายากของตนเองนอกสาธารณรัฐประชาชนจีน

ปัจจุบันตลาดโลกของธาตุหายากได้เติบโตอย่างก้าวกระโดดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า แตะระดับ 320,000 ล้านเหรียญดอลลาร์สหรัฐฯ ในช่วงห้าปีที่ผ่านมาและคาดว่าความต้องการจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าอีกครั้งภายในปี พ.ศ. 2573 อีกทั้งห่วงโซ่อุปทานทั่วโลกกลายเป็นประเด็นสำคัญทางภูมิรัฐศาสตร์มากขึ้นเรื่อย ๆ

ทั้งนี้ หากแบ่งตามห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมธาตุหายาก (rare earth elements supply chain) สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มอุตสาหกรรมหลัก ดังนี้

1) **อุตสาหกรรมต้นน้ำ (upstream)** คือ การผลิตแร่วัตถุดิบ (raw material) เช่น โมนาไซต์ ซีโนไทม์ แบสต์นีไซต์ หรือโลพาไรต์ เป็นต้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย

   - การทำเหมืองแร่หรือการถลุงแร่ (mining) ที่นิยมในทางปฏิบัติมี 2 วิธี คือการทำเหมืองแบบเปิด (open-pit mining) เป็นการเปิดหน้าดินหรือขุดเจาะไปใต้ดินเพื่อนำแร่มาแปรรูปเพื่อใช้งาน ซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม ในขณะที่อีกประเภทหนึ่งเป็นเหมืองแบบชะล้างในแหล่ง (in-situ leaching) เป็นการนำแร่จากใต้ดินโดยตรง ด้วยการใช้วิธีการฉีดสารละลายเคมีเข้าไปในชั้นแร่เพื่อละลายแร่ธาตุ จากนั้นจึงสูบสารละลายที่มีแร่ธาตุนั้นกลับขึ้นมาแปรรูปที่ผิวดิน
   - การทำแร่ให้เข้มข้น (concentration) กระบวนการทำให้ส่วนประกอบสินแร่มีปริมาณสูงขึ้นและกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่สินแร่ออกไป โดยอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันของแร่ เช่น ความหนาแน่น ความไวต่อแม่เหล็ก คุณสมบัติการลอยตัว หรือการแยกด้วยแสง

2) **อุตสาหกรรมกลางน้ำ (midstream)** คือ การผลิตเพื่อได้ธาตุหายากที่มีความบริสุทธิ์และนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์

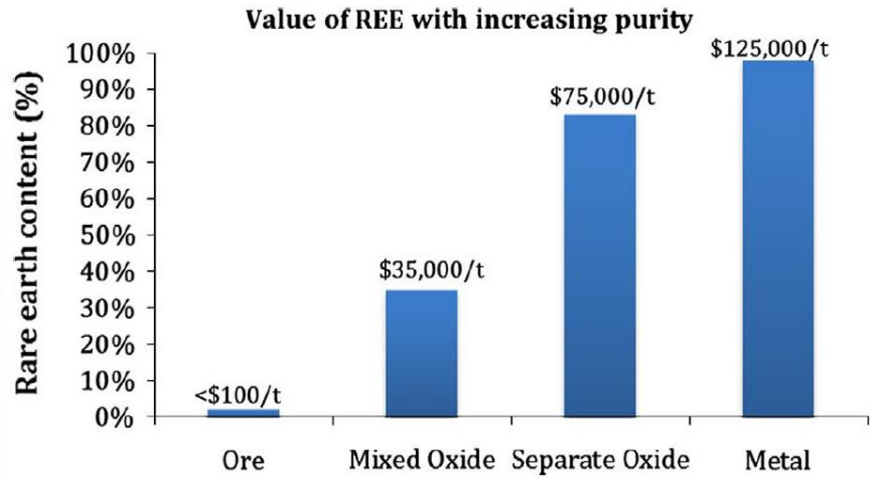
   - การแต่งแร่หรือการสกัดแร่ (separation) เป็นการแยกธาตุหายากออกจากแร่อื่น เพื่อให้ได้มาซึ่งธาตุหายากในรูปแบบออกไซด์ โดยใช้เทคนิคทางกายภาพและเคมี แต่ที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์มักใช้การแยกทางเคมีเป็นหลัก เช่น การชะล้าง (leaching) โดยการละลายธาตุหายากออกจากสินแร่ด้วยสารละลายกรดหรือด่างเข้มข้น เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) ซึ่งเป็นวิธีหลักในเชิงพาณิชย์ โดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ดึงไอออนของธาตุหายากออกจากสารละลายที่เป็นน้ำเพื่อแยกธาตุหายาก หรือการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นกระบวนการที่ช้ากว่า แต่สามารถให้ความบริสุทธิ์ที่สูงกว่าการแยกธาตุหายากประเภทอื่น
   - การทำให้ธาตุหายากบริสุทธิ์ (refining) เป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตธาตุหายากและเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนใช้เทคโนโลยีชั้นสูงเพื่อทำให้ธาตุหายากมีความบริสุทธิ์และแยกธาตุหายากทั้ง 17 ธาตุ อันประกอบด้วยแลนทานัม (La) ซีเรียม (Ce) เพรซีโอดิเมียม (Pr) นีโอดิเมียม (Nd) โพรมีเทียม (Pm) ซาแมเรียม (Sm) ยูโรเพียม (Eu) แกโดลิเนียม (Gd) เทอร์เบียม (Tb) ดิสโพรเซียม (Dy) โฮลเมียม (Ho) เออร์เบียม (Er) ทูเลียม (Tm) อิตเทอร์เบียม (Yb) ลูทีเซียม (Lu) สแกนเดียม (Sc) และอิตเทรียม (Y) เพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง เปลี่ยนธาตุหายากแต่ละธาตุให้อยู่ในรูปของโลหะบริสุทธิ์ (rare earth metals) หรือโลหะผสม (alloys) สำหรับนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมหรือใช้งานที่หลากหลายต่อไป

3) **อุตสาหกรรมปลายน้ำ (downstream)** คือ การนำองค์ประกอบของธาตุหายากมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม (manufacturing) ซึ่งตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากธาตุหายากเป็นไปตามตารางที่ 1 [8]

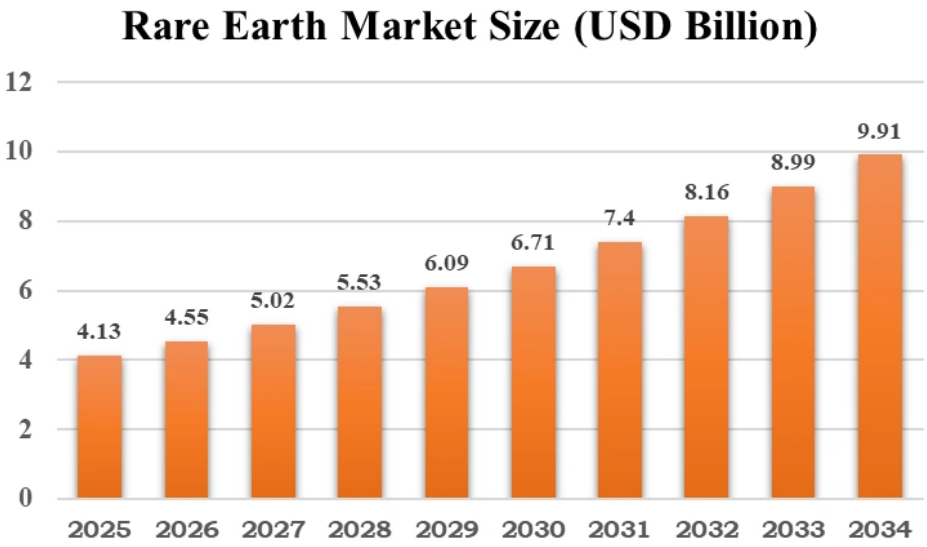
ตารางที่ 6 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์จากธาตุหายาก

การนำไปใช้ประโยชน์	อุตสาหกรรมที่ใช้	ธาตุหายากที่นำไปใช้
แม่เหล็กถาวร (permanent Magnets)	อุตสาหกรรมยานยนต์ การแพทย์ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์เคลื่อนที่ เทคโนโลยีพลังงานสะอาด อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Nd, Pr, Dy, Gd, Tb, Sm
แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ (NiMH)	อุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ดาวเทียม ระบบรักษาความปลอดภัย	La, Ce, Pr, Sm, Nd
สารเรืองแสง (phosphors)	หลอดไฟ LED จอสมาร์ทโฟน ไฟเบอร์ออฟติกส์	Eu, Tb, Y, La, Ce, Gd
ผงขัดเลนส์ กระจก สารเคลือบเลนส์	เลนส์แว่นตา กระจก วัสดุโปร่งแสง	Ce, La, Nd
ตัวลดมลพิษจากท่อไอเสียรถยนต์	อุตสาหกรรมยานยนต์	Ce
ตัวเร่งปฏิกิริยาโรงกลั่นน้ำมัน	อุตสาหกรรมปิโตรเคมี	La, Ce, Pr, Nd
สารเร่งการเจริญเติบโตในพืช	อุตสาหกรรมการเกษตร	Ce, La
อาหารเสริมของสัตว์	อุตสาหกรรมการเกษตร	Ce, La, mixed rare earth
ยุทโธปกรณ์ทางการทหาร	ทางการทหาร อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ	Nd, Pr, Sm, Dy, Tb, Y, Ce, La

หากมองในแง่ของมูลค่าของธาตุหายากที่เพิ่มขึ้นของอุตสาหกรรมต้นน้ำและอุตสาหกรรมกลางน้ำ พบว่ามีมูลค่าทางการตลาดของธาตุหายากเพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก [9] ตามภาพที่ 11 นอกจากนี้จากการคาดการณ์ของทางการเงินการลงทุนพบว่าแนวโน้มการเติบโตของธุรกิจที่เกี่ยวกับธาตุหายากในตลาดโลกยังมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ตามภาพที่ 12



รูปที่ 11 มูลค่าของธาตุหายากตามรูปแบบในกระบวนการผลิต

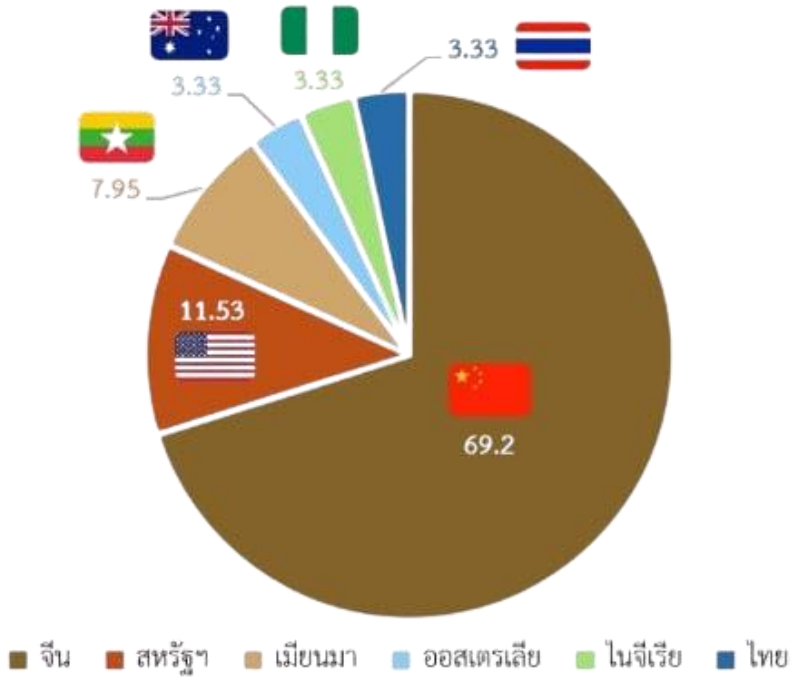


รูปที่ 12 แนวโน้มการเติบโตของธุรกิจที่เกี่ยวกับธาตุหายากในตลาดโลก

1.2 สถานการณ์ของประเทศไทย

จากการสำรวจประเมินศักยภาพทรัพยากรแร่และการจัดทำบัญชีทรัพยากรแร่ของกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับแร่ปฐมภูมิ (Primary Minerals) สำหรับการผลิตธาตุหายากที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน พบว่าทรัพยากรดังกล่าวของประเทศไทยนั้นมีค่อนข้างน้อย [10] และมีอยู่อย่างกระจัดกระจาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันตกและภาคใต้ของประเทศ

จากข้อมูลของสหรัฐอเมริกา [11] การส่งออกธาตุหายากในปี พ.ศ. 2567 ประเทศไทยมีการส่งออกธาตุหายากจำนวน 13,000 ตัน เป็นอันดับ 4 ของโลกร่วมกับประเทศออสเตรเลียและประเทศไนจีเรีย อย่างไรก็ตาม ในกรณีของประเทศไทยไม่มีการทำเหมืองเพื่อถลุงธาตุหายากในเชิงพาณิชย์ การส่งออกของประเทศไทยจึงเป็นลักษณะของการนำเข้าหางแร่จากต่างประเทศและนำมาแต่งแร่เพื่อส่งออกเป็นสินแร่ (ore) สำหรับกระบวนการผลิตธาตุหายาก



รูปที่ 13 สัดส่วนการส่งออกธาตุหายากในตลาดโลกปี พ.ศ. 2567

ปัจจุบันศักยภาพของประเทศไทยมีอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายากดำเนินการแล้ว เช่น โรงงานของบริษัทสินแร่สาคร จำกัด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ หรือ บริษัทรัตนรังษิวัฒน์ จำกัด จังหวัดพังงา มีการนำเข้าแร่โมนาไซต์ มาผ่านกระบวนการแต่งแร่และส่งออกไปต่างประเทศในลักษณะแร่ปฐมภูมิ หรือ โรงงาน Neo Magnequench จากประเทศแคนาดา ในจังหวัดนครราชสีมา โดยโรงงานแห่งนี้มีความสามารถในการนำธาตุหายากมาผลิตผงแม่เหล็กนีโอดิเมียม-ไอรอน-โบรอน (NdFeB) ซึ่งเป็นวัสดุหลักในการผลิตแม่เหล็กถาวรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อมอเตอร์ไฟฟ้าในรถยนต์ EV อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมไฮเทคอื่น ๆ ซึ่งการดำเนินการของบริษัทเหล่านี้อยู่ในการกำกับดูแลของกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมควบคุมมลพิษ เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีโครงการในจังหวัดกาญจนบุรี ของบริษัท Lynas Rare Earths จากประเทศออสเตรเลีย ซึ่งเป็นผู้ผลิตแร่หายาก กำลังศึกษาความเป็นไปได้ในการตั้งโรงงานแปรรูปแร่หายากในพื้นที่ อำดภอทองผาภูมิ และโครงการในจังหวัดภูเก็ต และจังหวัดพังงา โดยบริษัท Thaisarco ซึ่งมีประสบการณ์ด้านการถลุงแร่ดีบุก กำลังศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกแร่โคลัมเบต-แทนทาไลท์ (Columbite-Tantalite) ที่มีธาตุหายากปนอยู่ โดยใช้เทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นเองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกธาตุหายาก

บทที่ 2 บทบาทของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกับการกำกับดูแลธาตุหายากในประเทศไทย

การพัฒนาอุตสาหกรรมธาตุหายากเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจยุคใหม่ของประเทศไทย โดยเฉพาะในภาคพลังงานสะอาด อิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ อย่างไรก็ตามธาตุหายากมักพบร่วมกับวัสดุที่มีรังสีซึ่งเกิดตามธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Material หรือ NORM) เช่น ทอเรียม และยูเรเนียม ทำให้เกิดความเสี่ยงด้านรังสีที่ต้องมีการกำกับดูแลอย่างรอบด้านและเป็นระบบ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ปส.) จึงมีบทบาทสำคัญในการวางกรอบการกำกับดูแลที่ปลอดภัย โปร่งใส และสอดคล้องกับมาตรฐานสากล

2.1 อำนาจหน้าที่ตามกฎหมาย

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติมีอำนาจหน้าที่ตามพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติม โดยพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2562 และกฎระเบียบที่ออกตามกฎหมาย โดยมีบทบาทสำคัญในการกำกับดูแลกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายากที่มีรังสีภายใต้กรอบกฎหมายไทยและมาตรฐานสากล เช่น การกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสีของกิจกรรมแต่งและสกัดธาตุหายากที่มีรังสี ตั้งแต่การนำเข้ามาจนถึงการส่งออกไปจากประเทศไทยและการขจัดกากกัมมันตรังสีที่เกิดจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายาก (cradle to grave) ซึ่งรวมถึง

- การประเมินความปลอดภัย การออกใบอนุญาต การรับแจ้งการครอบครองและการขนส่ง รวมทั้งการกำกับดูแลการจัดการกากกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นจากกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายาก

- การตรวจสอบและประเมินความปลอดภัยทางรังสีในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายาก รวมทั้งการตรวจติดตามรังสีในสิ่งแวดล้อม

- การกำหนดมาตรฐานด้านการป้องกันอันตรายจากรังสี และแนวปฏิบัติสำหรับผู้ประกอบการ รวมทั้งการฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ ผู้ปฏิบัติงาน ในเรื่องการป้องกันอันตรายจากรังสี

- การดำเนินการบังคับใช้กฎหมายเมื่อพบการฝ่าฝืนกฎหมายหรือความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อม

กฎหมายและกฎระเบียบซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของ ปส. ที่เกี่ยวข้องกับการกำกับดูแลธาตุหายาก มีดังนี้

- พระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ พ.ศ. 2559 ซึ่งแก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2562

- กฎกระทรวงความปลอดภัยทางรังสี พ.ศ. 2561

- ประกาศคณะกรรมการพลังงานนิวเคลียร์เพื่อสันติ เรื่อง เกณฑ์ปลอดภัย พ.ศ. 2562

- กฎกระทรวงวัสดุนิวเคลียร์ที่ผู้ดำเนินการไม่ต้องขอรับใบอนุญาต พ.ศ 2567

- กฎกระทรวงการแจ้งการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ พ.ศ. 2567

- ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง แบบคำขอแจ้งการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ ใบรับแจ้ง คำขอแก้ไขเปลี่ยนแปลงข้อมูลในใบรับแจ้ง คำขอรับใบแทนใบรับแจ้ง และคำขอยกเลิกการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ พ.ศ. 2567

- แนวทางการประเมินการเป็นวัสดุต้นกำลังของแร่และสินแร่ พ.ศ. 2567

- กฎกระทรวงความปลอดภัยและความมั่นคงปลอดภัยทางนิวเคลียร์และรังสีในการขนส่ง พ.ศ. 2567

- ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง การแจ้งการขนส่ง พ.ศ. 2567

- ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง หลักเกณฑ์ วิธีการ และเงื่อนไขเกี่ยวกับการขนส่งวัสดุกัมมันตรังสี วัสดุนิวเคลียร์ กากกัมมันตรังสี เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ หรือเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว พ.ศ. 2567

- ประกาศสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เรื่อง การรายงานปริมาณวัสดุนิวเคลียร์ พ.ศ. 2567

- มาตรฐาน IAEA Safety Standards Series No. SSR-60 “Regulatory Control of Radiation Sources”

กฎหมายและมาตรฐานเหล่านี้ครอบคลุมทั้งการประเมินความเสี่ยง การจัดทำรายงานรังสี การตรวจวัดรังสีในสถานที่ทำงาน และการออกใบอนุญาตสำหรับผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตหรือการแปรรูปธาตุหายาก

2.2 บทบาทเฉพาะด้านในการกำกับดูแลธาตุหายาก

แร่ธาตุหายากที่มีส่วนประกอบของยูเรเนียมและทอเรียม สามารถปล่อยรังสีแอลฟา รังสีบีตา และรังสีแกมมา ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพหากได้รับในปริมาณสูง โดยเฉพาะการสูดดมฝุ่นแร่หรือการสัมผัสกับกากตกค้างโดยตรง อาจทำให้เกิดการสะสมของเรเดียมในกระดูก และเพิ่มความเสี่ยงต่อมะเร็งในระยะยาว รวมถึงการประกอบการที่เกี่ยวกับธาตุหายาก จะต้องได้รับการกำกับดูแลทางรังสีด้วย

<u>การออกใบอนุญาต การรับแจ้ง และการตรวจสอบ</u>

ปส. มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบอนุญาตและการรับแจ้งการครอบครองหรือใช้วัสดุนิวเคลียร์ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณทอเรียมและยูเรเนียมในแร่ หากปริมาณเกินกว่าที่กำหนดในกฎกระทรวงก็จะต้องขอรับใบอนุญาต นอกนั้นจะเป็นการรับแจ้งการครอบครอง ปัจจุบัน การดำเนินการเกี่ยวกับธาตุหายากจะเป็นการรับแจ้งการครอบครอง นอกจากนี้ อาจกำหนดเงื่อนไขเฉพาะในใบอนุญาตหรือใบรับแจ้งได้ และผู้รับใบอนุญาตและผู้แจ้งจะต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ที่กำหนด เช่น การติดตั้งระบบป้องกันรังสี การจัดทำแผนฉุกเฉิน และการรายงานผลการตรวจวัด เป็นต้น นอกจากนี้ ปส. ยังมีการตรวจสอบสถานประกอบการอย่างสม่ำเสมอ โดยใช้เครื่องมือวัดรังสีและการตรวจสอบเอกสารตามมาตรฐานทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA)

การดำเนินการเกี่ยวกับธาตุหายากตามกฎหมายแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีหลัก ตามลักษณะและวัตถุประสงค์ของกิจกรรมที่ดำเนินการ ดังนี้

1. กรณีที่<u>เกี่ยวข้อง</u>กับวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

"วัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์" หมายความว่า การดำเนินการทุกขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการก่อให้เกิดพลังงานนิวเคลียร์ เริ่มตั้งแต่การทำเหมืองแร่ การแต่งแร่ และการโลหกรรมที่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียมหรือทอเรียม การเสริมสมรรถนะยูเรเนียม การผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ การแปรสภาพเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว การจัดการกากกัมมันตรังสีที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ และการวิจัยและพัฒนาใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการก่อให้เกิดพลังงานนิวเคลียร์

ดังนั้น กิจกรรมที่เห็นชัดที่สุดคือ การได้มาซึ่งทอเรียมและยูเรเนียมเพื่อใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ หากมีการดำเนินการลักษณะนี้ในประเทศไทย สถานประกอบการนั้นจะกลายเป็นสถานประกอบการทางนิวเคลียร์ ซึ่งต้องขอรับใบอนุญาตที่เกี่ยวข้องตามมาตรา 45 นอกเหนือจากใบอนุญาตที่เกี่ยวข้องกับวัสดุนิวเคลียร์ตามมาตรา 19

2. กรณีที่<u>ไม่เกี่ยวข้อง</u>กับวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

หากวัตถุประสงค์ของผู้ประกอบการเป็นการแต่งหรือแยกแร่ที่ทอเรียมหรือยูเรเนียม เพื่อจำหน่ายในเชิงพาณิชย์หรือเพื่อการส่งออก โดยมิได้มีเจตนาใช้ในวัฏจักรเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ปส. จะออกใบอนุญาต (license) หรือใบรับแจ้งการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ (acknowledgement of possession) ขึ้นอยู่กับปริมาณวัสดุนิวเคลียร์ หากปริมาณทอเรียมหรือยูเรเนียมเกินปริมาณที่กำหนด ก็ต้องขอรับใบอนุญาตตามกฎกระทรวงการอนุญาตเกี่ยวกับวัสดุนิวเคลียร์และเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ใช้แล้ว พ.ศ. 2567 หากปริมาณทอเรียมหรือยูเรเนียมไม่เกินปริมาณที่กำหนดตามกฎกระทรวงวัสดุนิวเคลียร์ที่ผู้ดำเนินการไม่ต้องขอรับใบอนุญาต พ.ศ 2567 ก็ต้องมาแจ้งการครอบครองตามกฎกระทรวงการแจ้งการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ พ.ศ. 2567 ปัจจุบันการกำกับดูแลเกี่ยวกับธาตุหายากจะอยู่ในรูปการรับแจ้งการครอบครองเป็นหลัก

อย่างไรก็ตาม เมื่อการแจ้งการครอบครองทำให้ไม่ต้องขอรับใบอนุญาตครอบครอง รวมทั้งใบอนุญาตนำเข้าส่งออกด้วย จึงทำให้ผู้ประกอบการประสบปัญหาการดำเนินพิธีการศุลกากรกับสินค้าประเภทธาตุหายากที่มีรังสี ปส. จึงได้ออกหนังสือรับรองว่า วัสดุนิวเคลียร์ดังกล่าวไม่จำเป็นต้องขอรับใบอนุญาต แต่ต้องแจ้งการครอบครองให้ ปส. ทราบภายใน 30 วัน นับแต่วันที่ได้ครอบครอง เพื่อใช้การดำเนินพิธีการศุลกากรตามระเบียบการควบคุมสินค้าพิเศษ พ.ศ. 2567 ขั้นตอนการดำเนินการมีดังนี้

1) ผู้ประกอบการยื่นคำขอ

– กรอกแบบคำขอแจ้งการครอบครองวัสดุนิวเคลียร์ (หากประสงค์จะแจ้งการครอบครองด้วย)

– แนบผลวิเคราะห์รังสีจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรอง (ค่ากัมมันตภาพต่อปริมาณของทอเรียมและยูเรียม ในหน่วยเบ็กเคอเรลต่อกรัม (Bq/g)

– แนบเอกสารการขนส่งและข้อมูลปลายทางสินค้า

2) การพิจารณาและตรวจสอบข้อมูลโดย ปส.

– ประเมินตามแนวทางการประเมินการเป็นวัสดุต้นกำลังของแร่และสินแร่ พ.ศ. 2567 ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบค่ากัมมันตภาพรังสีของวัสดุดังกล่าวด้วย

– ตรวจสอบข้อมูลในฐานข้อมูลวัสดุนิวเคลียร์ของประเทศ

3) การออกหนังสือรับรองการนำเข้า–ส่งออก

– ปส. ออกหนังสือรับรองลงนามโดยผู้อำนวยการกองอนุญาตทางนิวเคลียร์และรังสี หรือตามที่เลขาธิการมอบหมาย เพื่อใช้ประกอบการดำเนินการพิธีการศุลกากร

4) การบันทึกข้อมูลเข้าสู่ระบบฐานข้อมูลกลาง (nuclear material database)

– เพื่อการติดตาม ตรวจสอบ และรายงานต่อ IAEA

ปี พ.ศ. 2568 เป็นปีแรกที่มีการบังคับใช้กฎหมายอย่างเต็มรูปแบบกับการประกอบการเกี่ยวกับธาตุหายากที่มีรังสี ปส. ได้ดำเนินงานออกหนังสือรับรองการนำเข้า ส่งออก และหนังสือรับแจ้งวัสดุนิวเคลียร์ ดังนี้

- ปริมาณการนำเข้าแร่ทรายดิบ 13,781 เมตริกตัน

- ปริมาณการส่งออกแร่โมนาไซต์ 7,495 เมตริกตัน

- ปริมาณการส่งออกแร่ซีโนไทม์ 20 เมตริกตัน

- จำนวนผู้ประกอบการที่ยื่นขอหนังสือรับรองและแจ้งการครอบครอง 2 รายการ เริ่มต้นกำกับดูแลในปี พ.ศ. 2568 ถือเป็นก้าวสำคัญของประเทศไทยในการพัฒนาระบบการควบคุมวัสดุนิวเคลียร์และวัสดุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ธรรมชาติ ให้มีความโปร่งใส ตรวจสอบได้ และสอดคล้องกับมาตรฐาน IAEA ซึ่งจะช่วยยกระดับความปลอดภัยด้านรังสี และสนับสนุนการพัฒนาอุตสาหกรรมธาตุหายากต่อไป

<u>การประเมินความเสี่ยงทางรังสี การเฝ้าระวังและการตรวจวัดรังสีในพื้นที่ทำงาน</u>

ปส. กำหนดให้สถานประกอบการที่เกี่ยวข้องกับการสกัดหรือแปรรูปแร่ธาตุหายาก ต้องดำเนินการตรวจวัดรังสีในพื้นที่ทำงานเป็นประจำ โดยตรวจวัดระดับรังสีในแหล่งธาตุหายากและในกระบวนการแปรรูป เช่น การบด การแต่งแร่ และการสกัด โดยเฉพาะบริเวณที่มีการจัดเก็บกากแร่หรือวัสดุที่อาจมี NORM สะสม การตรวจวัดประกอบด้วยการวัดปริมาณรังสีแกมมา (gamma dose rate) การตรวจหาการปนเปื้อนพื้นผิว (surface contamination) และการตรวจวัดรังสีเรดอน (radon monitoring) ภายในอาคารหรือห้องปฏิบัติการ เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อบุคลากรและสิ่งแวดล้อม การเฝ้าระวังดังกล่าวต้องดำเนินการตามหลักเกณฑ์ของ IAEA Safety Standards (GSG-7) และบันทึกผลเพื่อรายงานต่อ ปส. เป็นระยะ รวมทั้งเก็บข้อมูลย้อนหลังไม่น้อยกว่า 5 ปีเพื่อใช้ในการตรวจติดตาม นอกจากนี้ ปส. ยังมีการประเมินความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงาน ชุมชนโดยรอบ และสิ่งแวดล้อม โดยใช้แบบจำลองการแพร่กระจายรังสีและการรับรังสี (dose assessment)

การกำกับดูแลการจัดการกากกัมมันตรังสี

ของเสียจากการสกัดแร่ธาตุหายาก เช่น ตะกอนแต่งแร่หรือสารตกค้างจากกระบวนการสกัด กากกรด และกากตะกอนที่มีทอเรียมหรือเรเดียมสะสม ถือเป็น NORM ที่ต้องจัดการอย่างปลอดภัย โดยมีแนวทางดังนี้

1. การแยกประเภทของเสีย จำแนกกากที่มีรังสีต่ำ ปานกลาง และสูง เพื่อใช้วิธีจัดการที่เหมาะสม

2. การเก็บกักชั่วคราว (Interim Storage) ต้องมีระบบป้องกันการรั่วซึมและป้ายเตือนรังสีอย่างชัดเจน

3. การกำจัดขั้นสุดท้าย (final disposal) กำหนดสถานที่เก็บกากในพื้นที่ควบคุม โดยอยู่ภายใต้การอนุญาตของ ปส.

4. การลดปริมาณรังสี (decontamination) ใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี หรือการเจือจางตามหลัก ALARA (As Low As Reasonably Achievable)

5. ส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีลดปริมาณกากกัมมันตรังสี เช่น การแยกทอเรียมออกจากกระบวนการหรือการนำกลับมาใช้ใหม่ในอุตสาหกรรมอื่น

แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับมาตรฐาน IAEA GSR Part 3 และ SSR-60 ซึ่ง ปส. นำมาใช้ปรับให้เหมาะสมกับบริบทประเทศไทย

การสื่อสารและการมีส่วนร่วม

ปส. ได้จัดทำคู่มือ แนวปฏิบัติ และอินโฟกราฟิกเพื่อสร้างความเข้าใจแก่ผู้ประกอบการและประชาชน พัฒนาแพลตฟอร์มดิจิทัลสำหรับการรายงานข้อมูลรังสีแบบเรียลไทม์ รวมทั้งจัดเวทีรับฟังความคิดเห็นในพื้นที่เป้าหมายตามที่กำหนดในกฎหมายหากมีการขอรับใบอนุญาตพื้นที่เพื่อตั้งสถานประกอบการ

2.3 ความร่วมมือกับหน่วยงานอื่น

การกำกับดูแลธาตุหายากต้องอาศัยความร่วมมือระหว่างหน่วยงานหลายฝ่าย โดย ปส. มีบทบาทเชื่อมโยงและสนับสนุนการดำเนินงานร่วมกับ

- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ (กพร.) ในการประเมินแหล่งแร่และการอนุญาตโรงแต่งแร่

- กรมทรัพยากรธรณี ในการสำรวจและจัดทำฐานข้อมูลแหล่งแร่ที่มีความเสี่ยงด้านรังสี

- กรมควบคุมมลพิษ (คพ.) และสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (สผ.) ในการประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย

- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ในการกำหนดนโยบายระดับชาติ

- หน่วยงานท้องถิ่นและภาคประชาชน ในการติดตามและมีส่วนร่วม

2.4 ข้อเสนอเชิงนโยบาย

ปส. ซึ่งมีบทบาทในฐานะหน่วยงานกำกับดูแลทางนิวเคลียร์และรังสี ควรเล็งเห็นความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมธาตุหายากของประเทศไทยให้เป็นไปอย่างยั่งยืน ในการนี้ เพื่อให้การกำกับดูแลธาตุหายากมีประสิทธิภาพ ปส. ควรดำเนินการในเชิงนโยบายดังนี้

- พัฒนากรอบการกำกับดูแลธาตุหายากที่บูรณาการด้านรังสี อุตสาหกรรม และสิ่งแวดล้อม โดยใช้แนวทาง “One Regulation – Multi Agency” เพื่อให้กฎหมายและกฎระเบียบที่เกี่ยวกับธาตุหายาก ทันสมัยและสอดคล้องกับแนวทางของ IAEA และมาตรฐานสากลอื่นที่เกี่ยวข้อง

- สร้างศักยภาพบุคลากรและเครือข่ายผู้เชี่ยวชาญ เพื่อรองรับการกำกับดูแลในอนาคต

- ผลักดันความร่วมมือระดับภูมิภาคที่เกี่ยวข้องกับ NORM และธาตุหายาก (ASEAN NORM Network) เพื่อยกระดับมาตรฐานการกำกับดูแลในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

- จัดตั้งฐานข้อมูลกลาง NORM เพื่อการติดตามและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความปลอดภัย

- จัดตั้งคณะทำงานร่วมระหว่างหน่วยงานกำกับดูแล เพื่อกำหนดแนวปฏิบัติร่วมและลดความซ้ำซ้อน

- ส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสกัดธาตุหายากที่สะอาดและปลอดภัย เช่น การใช้ตัวทำละลายชีวภาพ (bioleaching) เพื่อลดของเสียและการปล่อยกากกัมมันตรังสีสู่สิ่งแวดล้อม

- ยกระดับการสื่อสารความเสี่ยงและการมีส่วนร่วมของประชาชน โดยใช้สื่อดิจิทัลและการออกแบบเชิงสร้างสรรค์

- พัฒนาระบบติดตามและประเมินผลการกำกับดูแลแบบเรียลไทม์ เพื่อให้สามารถปรับปรุงนโยบายได้อย่างทันการณ์

การบริหารจัดการธาตุหายากในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพต้องอาศัยทั้งกรอบกฎหมายที่เข้มแข็ง การกำกับดูแลที่โปร่งใส และการมีส่วนร่วมจากทุกภาคส่วน เพื่อให้ประเทศไทยสามารถใช้ประโยชน์จากทรัพยากรที่เป็นธาตุหายากได้อย่างปลอดภัยและยั่งยืน ในส่วน ปส. เองก็มีบทบาทสำคัญต่อการกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสีในอุตสาหกรรมแร่ธาตุหายากของประเทศไทย ตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ เพื่อให้การพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมธาตุหายากเป็นไปอย่างปลอดภัยและยั่งยืนตามมาตรฐานสากล

บทที่ 3 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพจากการสัมผัสธาตุหายาก

กลุ่มธาตุหายากเป็นองค์ประกอบสำคัญที่พบในสิ่งแวดล้อม ซึ่งการทิ้งขยะอิเล็กทรอนิกส์ (e-waste) จำนวนมหาศาลส่งผลให้เกิดการปล่อยองค์ประกอบเหล่านี้ในปริมาณมากพร้อมกับสารพิษอื่น ๆ เข้าสู่ดินชั้นล่างและน้ำใต้ดิน โดยธาตุหายากในธรรมชาติ อาจมีอยู่ในปริมาณน้อยผ่านทางน้ำใต้ดินและบรรยากาศเท่านั้น แต่เนื่องจากมีการใช้ประโยชน์ธาตุหายากที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมทางชีวภาพ (bio-accumulation) ในพืช สัตว์ และมนุษย์ ปริมาณของธาตุหายากพื้นฐานในน้ำทั้งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมีความแตกต่างกันอย่างมาก และขึ้นอยู่กับธรณีวิทยาในพื้นที่เป็นส่วนใหญ่ จึงยังไม่มีการกำหนดขีดจำกัดสูงสุดที่ยอมรับได้สำหรับธาตุหายากในน้ำดื่มจากองค์กรด้านสุขภาพระหว่างประเทศใด ๆ และยังไม่มีข้อมูลที่เพียงพอเกี่ยวกับความเป็นพิษต่อสุขภาพของมนุษย์ตามที่ระบุไว้ข้างต้น แต่อย่างไรก็ตาม [13] ได้รายงานค่าขอบเขตความเข้มข้นสูงสุดของธาตุที่ตรวจพบได้ (maximum permission concentration: MPC) ของธาตุหายากในน้ำดื่ม (ตารางที่ 7) โดยขีดจำกัดเหล่านี้มาจากข้อมูลเกี่ยวกับพิษวิทยาทางนิเวศวิทยา (ecotoxicology) และเคมีสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 7 ความเข้มข้นสูงสุดของธาตุที่ตรวจพบได้ในน้ำดื่ม

ธาตุ	ความเข้มข้นสูงสุดในน้ำดื่ม (ng/mL)
La	10.1
Ce	22.1
Pr	9.1
Nd	1.8
Sm	8.2
Eu	-
Gd	7.1
Tb	-
Dy	9.3
Ho	-
Er	-
Tm	-
Yb	-
Lu	-
Y	6.4
Sc	-

การปนเปื้อนของแกโดลิเนียม (Gd) และผลกระทบจากการทำเหมือง

การปนเปื้อนที่สำคัญอย่างหนึ่งที่พบในยุโรปและสหรัฐอเมริกา แต่ยังไม่มีรายงานสำหรับสาธารณรัฐอินเดียคือการปนเปื้อนที่เกี่ยวข้องกับแกโดลิเนียมซึ่งใช้เป็นสารสร้างความแตกต่าง (contrasting agent) ในการถ่ายภาพด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (MRI) หลังจากถูกขับออกจากร่างกายมนุษย์ทางปัสสาวะ แกลโดลิเนียมจะไหลผ่านโรงบำบัดน้ำเสีย โดยแทบไม่ได้รับผลกระทบใด ๆ เข้าสู่ระบบน้ำ ทั้งนี้ กิจกรรมการขุดและการผลิตธาตุหายากอย่างเข้มข้นได้นำไปสู่ผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในประเทศต่าง ๆ เช่น สาธารณรัฐประชาชนจีน สหรัฐอเมริกา สาธารณรัฐอินเดีย สหพันธรัฐมาเลเซีย และสหพันธ์สาธารณรัฐบราซิล กิจกรรมการทำเหมือง เช่น การตัด การเจาะ การระเบิด การขนส่ง การจัดเก็บ และการแปรรูป สามารถปล่อยฝุ่น

ที่มีธาตุหายาก โลหะมีพิษอื่น ๆ และสารเคมีเข้าสู่ชั้นบรรยากาศและแหล่งน้ำโดยรอบ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อดิน สัตว์ป่า และพืชพรรณในพื้นที่ นอกจากนี้ การทำเหมืองธาตุหายากที่มากขึ้นจะส่งผลต่อความเสื่อมโทรมของสิ่งแวดล้อมที่มากขึ้นและอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ เนื่องจากพื้นที่กำจัดของเสียอาจสัมผัสกับสภาพอากาศและมีศักยภาพในการก่อมลพิษทางอากาศ ดิน และน้ำ หากไม่มีมาตรการการเฝ้าระวังและการป้องกันที่เพียงพอ [14] ธาตุหายากบางชนิดมีองค์ประกอบกัมมันตรังสีในปริมาณมาก เช่น ยูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งสามารถปนเปื้อนอากาศ น้ำ ดิน และน้ำใต้ดินได้ ปัญหาเหล่านี้เกิดจากกฎระเบียบและการควบคุมด้านสิ่งแวดล้อมที่ไม่เพียงพอในพื้นที่ทำเหมืองและการแปรรูป ปัญหาที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งคือกัมมันตภาพรังสีของสินแร่บางชนิด ตัวอย่างเช่น เหมืองปายอวิ้นเอ๋อโป๋ (Bayan Obo) สาธารณรัฐประชาชนจีน มีคนงานเกือบ 7,000 คน โดยคนงานประมาณ 3,000 คน สัมผัสกับฝุ่นในอากาศที่มีทอเรียม นอกจากนี้ ยังพบความเข้มข้นของทอโรน (^{220}Rn) ในอากาศที่สูงขึ้น ซึ่งการสัมผัสรังสีแกมมามีความสำคัญในพื้นที่ทำเหมือง [15] ทั้งนี้ มีการใช้ธาตุหายากอย่างแพร่หลายในเทคโนโลยีสมัยใหม่ต่าง ๆ ที่มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง จึงมีความเสี่ยงต่อการถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมพร้อมกับนิวไคลด์กัมมันตรังสี

ผลกระทบที่เป็นอันตรายส่วนใหญ่ของการสัมผัสธาตุหายากต่อมนุษย์และผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้น มาจากการศึกษาคนงานเหมืองและผู้ที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายากหรือผลิตภัณฑ์เป็นประจำ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะได้รับปริมาณที่สูงกว่าบุคคลทั่วไป โดยการศึกษาบางส่วนระบุว่าสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการแปรรูป การสกัด และการกลั่นสินแร่เป็นสาเหตุของอันตรายต่อสุขภาพของคนงานและผู้อยู่อาศัยในท้องถิ่น มลพิษทางน้ำ และการทำลายพื้นที่เพาะปลูก [16] ประเด็นทางสังคมและสิ่งแวดล้อมล่าสุดเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพจากการแปรรูปสินแร่ ธาตุหายาก (จากการปนเปื้อนทั้งกัมมันตรังสีและไม่เป็นกัมมันตรังสี) ในพื้นที่ของสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้ถูกยกขึ้นเป็นข้อกังวลหลัก ตัวอย่างเช่น ฝุ่นถนนในเมืองอุตสาหกรรม จูโจว (Zhuzhou) ในภาคกลางของสาธารณรัฐประชาชนจีน บันทึกความเข้มข้นของธาตุหายากที่มีนัยสำคัญมาก มีช่วงตั้งแต่ 66.1 mg/g ถึง 237.4 mg/g โดยมีค่าเฉลี่ย 115.9 mg/g แสดงให้เห็นถึงความร้ายแรงของมลพิษธาตุหายากโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในเมืองอุตสาหกรรม [17] ตัวอย่างที่ดีที่สุดคือความขัดแย้งทางสังคมและสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาโรงงาน Lynas Advanced Materials Plant ในกวนตัน (Kuantan) สหพันธรัฐมาเลเซีย ซึ่งนำไปสู่การเคลื่อนไหวระหว่างประเทศและการกล่าวอ้างถึงความไม่เป็นธรรมทางสิ่งแวดล้อมและสังคม [18] นอกจากนี้ยังมีรายงานหลายฉบับเกี่ยวกับการสัมผัสธาตุหายากในการทำงานซึ่งส่งผลให้เกิดการสะสมทางชีวภาพและผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ [19], [20], [21], [22] นอกจากนี้ การปนเปื้อนจากการทิ้งขยะอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมหาศาล ซึ่งปล่อยธาตุหายากในปริมาณมากเข้าสู่ดินชั้นล่างและน้ำใต้ดิน กำลังเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว [23] ในแต่ละปี อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์สร้างขยะอิเล็กทรอนิกส์มากถึง 41 ล้านตัน แต่เมื่อจำนวนผู้บริโภคเพิ่มขึ้น และอายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลงตามความต้องการสิ่งใหม่ล่าสุดและดีที่สุด ตัวเลขนั้นอาจสูงถึง 50 ล้านตันในปี 2018 Lange และคณะ (2017) [24] ได้ศึกษาผลกระทบของลานเก็บรถที่ถูกยึดต่อดินชั้นบนในรัฐเซาเปาโล สหพันธ์สาธารณรัฐบราซิล สำหรับโลหะหนักและธาตุหายากหลายชนิด พบว่าเศษมวลของธาตุทั้งหมดรวมถึงธาตุหายากนั้นสูงกว่าค่าอ้างอิงมาก รวมทั้ง สังเกตพบจุดที่มีความเข้มข้นสูง (hot spots) สำหรับธาตุส่วนใหญ่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแหล่งกำเนิดจากยานพาหนะ

บทที่ 4 ความท้าทายของประเทศไทยในอนาคต

การดำเนินงานในกระบวนการของอุตสาหกรรมธาตุหายากทั้งหมดตั้งแต่อุตสาหกรรมต้นน้ำ อุตสาหกรรมกลางน้ำไปจนถึงอุตสาหกรรมปลายน้ำมีปัจจัยต่าง ๆ มากมายขึ้นอยู่กับบริบทของแต่ละประเทศ หากประเทศไทยมองถึงโอกาสในอนาคต ทั้งในมิติของเศรษฐกิจและความมั่นคง การขยายความเชื่อมโยงและยกระดับของประเทศไทยในห่วงโซ่อุปทานของโลกจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ อีกทั้งประเทศไทยเป็นจุดยุทธศาสตร์ที่เชื่อมโยงที่สำคัญในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทำให้มีบทบาทสำคัญในการเชื่อมโยงห่วงโซ่อุปทานด้านเทคโนโลยีระหว่างสาธารณรัฐประชาชนจีนและกลุ่มประเทศอาเซียน ทำให้ประเทศไทยสามารถขยับบทบาทจากผู้ผลิตระดับล่างสู่การเป็นศูนย์กลาง (Regional Hub) ที่สำคัญระดับภูมิภาค และกำลังขยายบทบาทในห่วงโซ่อุปทานของโลกในอุตสาหกรรมไฮเทคยุคใหม่ในอนาคต หากประเทศไทยพัฒนาความสามารถด้านเทคโนโลยีการสกัดแร่ การแต่งแร่ การทำให้ธาตุหายากบริสุทธิ์และรีไซเคิลธาตุหายากในประเทศอย่างต่อเนื่อง ก็จะสามารถยกระดับสู่การเป็นศูนย์กลางการผลิตและการแปรรูปธาตุหายากที่สมบูรณ์แบบในอาเซียนได้ โดยมีแนวโน้มด้านการตลาดที่สดใสจากความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า พลังงานสะอาด อุปกรณ์ไฮเทค และสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มอำนาจการต่อรองทางเศรษฐกิจและความมั่นคงของประเทศได้ อย่างไรก็ตาม การสร้างโรงงานสำหรับกระบวนการผลิตธาตุหายากเป็นเรื่องที่ต้องมีความพร้อมในหลากหลายปัจจัยและต้องใช้เงินลงทุนมหาศาล การดำเนินงานจึงต้องพิจารณาความเหมาะสมและผลกระทบที่จะเกิดขึ้นอย่างละเอียดถี่ถ้วน

ที่ผ่านมาบทบาทของประเทศไทยในห่วงโซ่การผลิตเป็นเพียงผู้ผลิตระดับล่างโดยการนำเข้าแร่หายากมาผ่านกระบวนการทำให้แร่เข้มข้นขึ้นเพื่อเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นหากประเทศไทยมีนโยบายและผลักดันการเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญของห่วงโซ่อุปทานในอุตสาหกรรมธาตุหายากจำเป็นต้องมีการเตรียมความพร้อมซึ่งความท้าทายของประเทศไทยในห่วงโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมธาตุหายาก แบ่งออกได้เป็น 3 ประเด็นสำคัญ ดังนี้

4.1 ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย (environmental & waste management)

เป็นความท้าทายที่สำคัญที่สุดของอุตสาหกรรมธาตุหายาก เนื่องจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการสกัดและแปรรูปแร่ การแต่งแร่ และการทำให้ธาตุหายากบริสุทธิ์ จากกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นสารเคมีเข้มข้น เช่น กรดและด่าง ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายต่อระบบนิเวศและแหล่งน้ำใต้ดินได้หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม อีกทั้งโลหะหนักจำพวกตะกั่วและสารหนูจากกระบวนการผลิตธาตุหายาก อาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินและแหล่งน้ำ ส่งผลกระทบกับภาคเกษตรกรรมทำให้พืชผลเป็นพิษและเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร นอกจากนี้กระบวนการสกัดและผลิตธาตุหายากยังอาจทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ฝุ่นละอองและกากตะกอนที่เป็นพิษ ตลอดจนวัสดุกัมมันตรังสีจำพวก NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) ในขั้นตอนการถลุงแร่ปฐมภูมิ รวมถึงแร่ปฐมภูมิของธาตุหายากมักพบร่วมอยู่กับธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ เช่น ทอเรียม (Th) และยูเรเนียม (U) ซึ่งเป็นผลพลอยได้ (by products) จากกระบวนการผลิตธาตุหายากในขั้นตอนต่อมา ทำให้ประเด็นเรื่องความปลอดภัยทางรังสีและการพิทักษ์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์เข้ามาเกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญ

หากประเทศไทยขาดการบริหารจัดการของเสียและมลพิษที่มีมาตรฐานขั้นสูงในระดับสากล จะนำไปสู่การปนเปื้อนของน้ำและดินอย่างร้ายแรง และส่งผลกระทบกับประชาชนและสิ่งแวดล้อมเป็นวงกว้าง ดังนั้นมาตรการด้านการกำกับดูแลของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกภาคส่วนต้องมีประสิทธิภาพ สมบูรณ์แบบ ครบถ้วน และรัดกุม

4.2 ความท้าทายเชิงยุทธศาสตร์และภูมิรัฐศาสตร์ (geopolitical and strategic)

การพัฒนาอุตสาหกรรมธาตุหายากนี้เชื่อมโยงกับความขัดแย้งและอำนาจการต่อรองของประเทศมหาอำนาจ ก่อให้เกิดความเสี่ยงทางการเมืองและเวทีในระดับนานาชาติ การที่ประเทศไทยพยายามอยู่ตรงกลางเพื่อถ่วงดุลอำนาจ (balance of power) ระหว่างประเทศมหาอำนาจ อาจทำให้ถูกมองจากฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งว่าเป็นส่วนหนึ่งของการแข่งขันทางเศรษฐกิจและการเมืองระหว่างประเทศมหาอำนาจ ซึ่งอาจเสี่ยงต่อการถูกตอบโต้ทางการค้าหรือการจำกัดการลงทุนจากต่างประเทศ ตลอดจนความสัมพันธ์ระหว่างประเทศ และการกำหนดนโยบายต่างประเทศของรัฐ ดังนั้นการวางยุทธศาสตร์และจุดยืนของประเทศจึงเป็นสิ่งที่ต้องมีการพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อมิให้ฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งระแวงสงสัยและมองว่าประเทศไทยเป็นคู่แข่ง

อีกประเด็นที่ไม่ควรมองข้ามคือการยอมรับจากประชาชนและสังคม เนื่องจากที่ผ่านมาต้องยอมรับว่าประเทศยังมีช่องว่างในการดำเนินงานในประเด็นมลพิษจากอุตสาหกรรม หรือการได้รับผลกระทบจากการทำเหมืองของประเทศเพื่อนบ้านแต่ส่งผลกระทบมาถึงประชาชนและสิ่งแวดล้อมในประเทศไทย ซึ่งการสร้างความรู้และความเข้าใจเป็นทางเลือกหนึ่งในการดำเนินการแต่สิ่งสำคัญคือการทำให้ประชาชนเชื่อมั่นว่าการดำเนินการในกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับธาตุหายากจะไม่ส่งผลกระทบต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อม

4.3 ข้อจำกัดด้านบุคลากรและเทคโนโลยี (human resource and technology)

แม้ประเทศไทยจะมีผู้ประกอบการที่มีความสามารถในการนำธาตุหายากมาผลิตผงแม่เหล็กนีโอดิเมียม-ไอรอน-โบรอน แต่ในภาพรวมยังขาดความเชี่ยวชาญและเทคโนโลยีขั้นสูงในการสกัดและแยกธาตุหายากแต่ละชนิดให้ได้ความบริสุทธิ์สูงตามมาตรฐานสากล ประกอบกับที่ผ่านมายังขาดงานวิจัยที่นำมาสนับสนุนหรือต่อยอดเทคโนโลยีอย่างเป็นรูปธรรม ต้องมีการพึ่งพาเทคโนโลยีและองค์ความรู้จากต่างประเทศเป็นหลัก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการส่งเสริมและให้ความสำคัญกับงานวิจัยหรือนวัตกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตธาตุหายากเพื่อยกระดับทางเทคโนโลยีขั้นสูงของประเทศ

ในขณะที่การพัฒนาบุคลากรขาดความต่อเนื่องและอยู่ในวงจำกัด ภาคการศึกษาจึงควรต้องเข้ามามีบทบาทในการเร่งพัฒนาบุคลากรที่มีทักษะเฉพาะทางในด้านที่เกี่ยวข้องกับการผลิตธาตุหายากในทุกขั้นตอน เพื่อรองรับการดำเนินงานในอนาคต ตลอดจนการเพิ่มพูนประสบการณ์และทักษะของผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตธาตุหายาก

เอกสารอ้างอิง

1. Zhao, T.-Y., et al. (2025). A comprehensive review on rare earth elements: resources, technologies, applications, and prospects. **Rare Metals**, *44*(10), 7011-7040.
2. สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ. **ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก**.
3. เอลิน สุขสวัสดิ์ & ธวัชชัย เชื้อเหล่าวานิช. (2566). **คู่มือการสำรวจและประเมินปริมาณทรัพยากรธาตุหายากและธาตุกัมมันตรังสีแฝง** (กทร 1/2566). กองทรัพยากรแร่, กรมทรัพยากรธรณี.
4. Goonan, T.G. (2011). **Rare earth elements - End use and recyclability**: *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5094*. U.S. Geological Survey.
5. JHA, A.R. (2014). **Rare Earth Materials: Properties and Applications** (1st ed.). CRC Press, Talyor & Francis Group.
6. Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, *10* (4), 1285-1303.
7. ธวัชชัย เชื้อเหล่าวาณิช, เอลิน สุขสวัสดิ์, ธนัช วัชรมัย, & สมคิด ไชยชนะ. (2566). **สมุดแผนที่ทรัพยากรแร่ของไทย (ธาตุหายาก)** (ปรับปรุงครั้งที่ 1). กองทรัพยากรแร่, กรมทรัพยากรธรณี.
8. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ. (2567). **สมุดปกขาว - การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมเทคโนโลยีธาตุหายาก**. กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
9. ดร.ดุษฎี รัตนพระ. **การได้มาซึ่งธาตุหายากและการนำไปใช้ประโยชน์**. สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
10. กรมทรัพยากรธรณี. (2566). **สมุดแผนที่ทรัพยากรแร่ของไทย - ธาตุหายาก**. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
11. U.S. Geological Survey. (2025). **Mineral Commodity Summaries, January 2025**. U.S. Geological Survey.
12. Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, *10*(4), 1285-1303.
13. Sneller, F.E.C., Kalf, D.F., Weltje, L., & Van Wezel, A.P. (2000). **Maximum Permissible Concentrations and Negligible Concentrations for Rare Earth Elements (REE)** (*RIVM Report 601501011*). National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.
14. Barakos, G., Mischo, H., & Gutzmer, J. (2015). Rare earth underground mining approaches with respect to radioactivity control and monitoring strategies. In I. Borges de Lima & W.L.

Filho (Eds.), **Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications** (pp. 121-138). Elsevier. (ส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ *Ph.D. Diss. Technical University Bergakademie Freiberg, Germany*).

15. IAEA. (2011). **Radiation Protection and NORM Residue Management in the Production of Rare Earths from Thorium Containing Minerals**. International Atomic Energy Agency, Vienna.
16. Rim, K.T., Koo, K.H., & Park, J.S. (2013). Toxicological evaluations of rare earths and their health impacts to workers: a literature review. **Safety and Health at Work**, *4*(1), 12-26.
17. Sun, G.Y., Li, Z.G., Liu, T., Chen, J., Wu, T.T., & Feng, X.B. (2017). Rare earth elements in street dust and associated health risk. **Environmental Geochemistry and Health**, *39*(6), 1469-1486.
18. Ali, S.H. (2014). Social and environmental impact of the rare earth industries. **Resources**, *3*(1), 123-134.
19. Sabbioni, E., Pietra, R., Gaglione, P., Vocaturo, G., Colombo, F., Zanoni, M., & Rodi, F. (1982). Long-term occupational risk of rare-earth pneumoconiosis - a case report as investigated by neutron activation analysis. **Science of the Total Environment**, *26*, 19-32.
20. McDonald, J.W., Ghio, A.J., Sheehan, C.E., Bernhardt, P.F., & Roggli, V.L. (1995). Rare earth (cerium oxide) pneumoconiosis: analytical scanning electron microscopy and literature review. **Modern Pathology**, *8*(11), 859-865.
21. Yoon, H.K., Moon, H.S., Park, S.H., Song, J.S., Lim, Y., & Kohyama, N. (2005). Dendriform pulmonary ossification in a patient with rare earth pneumoconiosis. **Thorax**, *60*(8), 701-703.
22. Rim, K.T. (2017). A book review; "Rare earth elements in human and environmental health; at the crossroads between toxicity and safety". **Applied Biological Chemistry**, *60*(3), 207-211.
23. Haxel, G.B., Hedrick, J.B., & Orris, G.J. (2002). **Rare Earth Elements e Critical Resources for High Technology** (*USGS Fact Sheet 087-02*). U.S. Geological Survey.
24. Lange, C.N., Figueiredo, A.M.G., Enzweiler, J., & Castro, L. (2017). Trace elements status in the terrain of an impounded vehicle scrapyard. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, *311*(2), 1323-1332.

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

16 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงลาดยาว
เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

0 2596 7600

www.oap.go.th

57 La Lanthanum 138.90547	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90766	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964
64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93422	
70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.9668	21 Sc Scandium 44.955908	39 Y Yttrium 88.90584			