

รายการอ้างอิง

1. Poothai C., Kulvanich S. and Rattawong S. Heavy Minerals Associated with tin in Alluvial and Beach Deposite in Southevn Thailand, Report prepared for 2nd. Technical Conference of Tin 1969.
2. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม .หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2536 .
3. Tre y bwl , R.E. Liquid Extraction. New York : McGraw – Hill , 1963 .
4. Muller , E. Liquid – Liquid Extraction. Frankfurt : Weinheim , 1978 .
5. Cusack , R . W. “ A Fresh look at liquid – liquid Extraction , ” Chemical Engineering Volume 98, (2) : 66 – 76 ; February , 1991 .
6. พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์ และนิตยา รัตนาเลิศ .การศึกษาการสกัดแอมเรอร์ทโดยวิธีการสกัดแบบ Cross Current และวิธีสกัดแบบ Cross Current with Reflux โดยใช้ 50% TBP ในน้ำมันก๊าด กรุงเทพมหานคร ;สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2531 .
7. Thronton ,J. D. et al. (editor) .Science and Practice of liquid – liquid Extraction. Ox ford : Clarendon Press , 1992 .
8. Laddha , G.S., and Degaleesan, T.E. Transjport Phenomena in liquid Extraction. New Delh ; Tata McGraw – Hill Publishing Co. Ltd , 1976.
9. Rouyer , H.et al. “ Present Study and Development of Extraction Column , ” Proceedings International Solvent Extraction Conference, Vol3 (paper 256) London : Society of Chemical Industry., 1974 .
10. Thornton , J.D. “ Recent Devlopments in Pulsed Column Techniques , ” CEP. Symposium Series (Nuclear Engineering) . 50(13) : 39 –51; 1953 .
11. Perry , Robert H. et al. Perry’s Chemical Engineers’ Handbook. th ed. Malaysia : McGraw –Hill , 1984 .
12. Schwetzer, P. A. Hand-book of Separation Techniques for Chemical Engineers., New York : McGraw-Hill , 1979 .
13. Schmidt, H. “Operating Characteristics of Pulsed Plate Columns,” Separation Science and Technology USA. 18 (14-15) : 1595-1616;1983 .

14. Fike, F. P. et al. The Performance Contractor for Liquid-Liquid Extraction.
(Progress Report No.3) North Cardina : Raleigh , 1954 .
15. Beyer , Gerhard H. and Edwards, R.B. "Flooding Characteristics of a Pulsed Extraction Column."
Contract W-7405 – eng 82.: Ames Lab ,1954 .
16. Baillie, M.G. Pulsed Columns in Nuclear Fuel Processing. New South Wales.: Australia. Atomic
Energy Commission Research Establish , 1961 .
17. McAlliste, R. et al. "A review of Pulsed-column Flooding Data and Correlations with Proposed
Methods of Correlation." Contract W-7405-eng-26 Tenn : Oak Ridge National Lab,
1963 .
18. Groenier, W.S. et al. "Flooding in Pulsed Perforated Plate Extraction Columns" Contract W-7405-
eng-26. Tenn : Oak Ridge National LAB , 1966 .
19. Srinivasan, N. et al Pilot Plant Studies with a Pulsed Solvent Extraction Column. Bombay :
Bhabha Atomic Research Center , 1972 .
20. Zhang-Quanrong and Wang-Rupian "Effect of Sieve Plate Cartridge Geometry on Pulsed-Column
Capacity," Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering. 8(2) : 143-152; June,
1988 .
21. Tai –Darong. et al. " Studies on the wetting Properties of Plate Surfaces Used in Pulsed
Extraction Column," Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering. 11 (4) : 331-
341: Dec ,1991 .

ภาคผนวก ก.

ตารางผลการทดลอง

ตาราง ก.1 องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ (Composition of monasite)

องค์ประกอบ (Composition)	% W / W
ทอเรียมออกไซด์ (ThO_2)	4.5 - 10.5
ยูเรเนียมออกไซด์ (U_3O_8)	0.24 - 0.79
แรเอิร์ทออกไซด์ (RE_2O_3)	47 - 58
ซีเรียมออกไซด์ (CeO_2)	19 - 23
แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3)	7 - 15
นีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3)	6 - 11
เพรซีโอดีเมียมออกไซด์ (Pr_2O_{11})	1.6 - 3.4
ซามเมเลียออกไซด์ (Sm_2O_3)	0.7 - 1.6
แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3)	1.0 - 1.4
ดิสโพรเซียมออกไซด์ (Dy_2O_3)	0.4 - 1.9

ตาราง ก.2 องค์ประกอบของสารป้อน (Composition of rare earth nitrate)

องค์ประกอบ (Composition)	% W / W
แลนทานัมออกไซด์ (La_2O_3)	36
นีโอดีเมียมออกไซด์ (Nd_2O_3)	29
เพรซีโอดีเมียมออกไซด์ (Pr_2O_{11})	8
อิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3)	10
แรเอิร์ทกฤหมหนัก (Sm , Gd , Dy แทน ด้วย H.RE.)	16
อื่นๆ	1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.3 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท โดยไม่มีการป้อนสารเวียนรอบ (No reflux)
แสดงในรูปองค์ประกอบ

ตำแหน่ง	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท (gm / Lt.) ในสารละลาย	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (%w/w)				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.Re
Fo	450	36	8	29	10	16
F1	423.7	38.1	8.1	28.8	9.4	14.3
F2	394.7	40.7	8.6	28.3	8.7	13.3
F3	370.4	43	9	27.8	7.8	11.8
F4	344.1	45.4	9.8	27.1	6.9	10.4
F5	317.8	47.6	10.5	26.8	5.9	8.9
F6	292.3	50.2	11.2	25.9	4.8	7.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.4 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท โดยไม่มีการป้อนสารเวียนรอบ (No reflux)
แสดงในรูปค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)

ตำแหน่ง	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.Re
F1	0.001	0.019	0.027	0.052	0.073
F2	0.003	0.024	0.067	0.124	0.148
F3	0.007	0.032	0.106	0.223	0.259
F4	0.014	0.054	0.159	0.358	0.404
F5	0.028	0.131	0.212	0.56	0.618
F6	0.014	0.139	0.297	0.612	0.680

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก. 5 ผลการสกัดแยกแรร์เอิร์ท โดยไม่มีการป้อนสารเวียนรอบ (No reflux)
แสดงในรูปค่า แสดงการสกัดแยกสาร (Separation factor)

ตำแหน่ง	ค่าแสดงการสกัดแยก (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.F.
F1	19.00	1.42	1.92	1.4
F2	8.00	2.79	1.85	1.19
F3	4.57	3.31	2.1	1.16
F4	3.85	2.94	2.25	1.12
F5	4.67	1.61	2.64	1.10
F6	3.39	2.13	2.96	1.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.6 ผลการสกัดแยกแอร์เรียมเมื่อมี การป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F1
ที่ ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ *

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ (gm/lt)	ความเข้มข้น แอร์เรียมในสารละลาย ที่ F6 (gm/lt)	องค์ประกอบของแอร์เรียม (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	352.8	58.6	11.3	20.9	2.8	5.9
345	340.2	62.3	14.6	17.1	1.7	4.2
370	326.8	66.4	15.5	15.1	0.9	2.1
395	348.1	63.7	15.2	18.2	0.7	2.1
420	374.6	60.5	14.4	21.7	0.9	2.4

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.7 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทเมื่อมี การป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F2
ที่ ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ *

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ (gm/lt)	ความเข้มข้น แร่เอิร์ทในสารละลาย ที่ F6 (gm/lt)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	359.4	57.8	11.1	21.7	2.7	6.3
345	341.0	64.6	15.2	17.3	1.7	2.9
370	320.6	70.2	16.8	10.1	0.8	2.1
395	347.5	64.7	15.2	15.5	1.7	2.6
420	388.8	58.6	13.8	22.6	2.5	2.5

- La₂O₃ - - 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.8 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทเมื่อนำ การป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F3
ที่ ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ *

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ (gm/lt)	ความเข้มข้น แร่เอิร์ทในสารละลาย ที่ F6 (gm/lt)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	385.5	57.0	11.9	21.3	3.2	6.4
345	356.4	63.9	14.0	18.8	0.1	2.3
370	339.2	68.3	15.6	9.2	2.2	4.1
395	366.6	63.2	14.7	14.6	2.2	5.1
420	404.2	60.0	12.8	19.7	2.4	4.9

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด
คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.9 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทเมื่อมี การป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F4
ที่ ความเข้มข้นค่าต่างๆ *

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ (gm/lt)	ความเข้มข้น แร่เอิร์ทในสารละลาย ที่ F6 (gm/lt)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	385.7	58.0	11.9	20.4	3.0	6.4
345	361.0	63.1	13.8	20.2	0.1	1.4
370	355.0	65.3	14.8	16.0	1.6	2.2
395	389.3	61.1	13.8	19.0	2.1	3.8
420	430.4	55.9	13.0	21.3	3.1	6.5

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.10 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทเมื่อมี การป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F5
ที่ ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ *

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ (gm/lt)	ความเข้มข้น แร่เอิร์ทในสารละลาย ที่ F6 (gm/lt)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	380.2	58.3	12.6	21.5	2.4	4.9
345	388.8	58.6	13.3	20.3	2.1	5.5
370	381.3	60.5	14.4	20.1	2.0	2.7
395	436.2	55.4	13.5	27.0	1.7	2.2
420	455.8	55.0	12.9	26.9	1.9	3

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.11 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เร่ท์ในรูปแบบประสิทธิภาพการกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F1
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แอร์เร่ท์ gm / lt)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	0.10	0.20	0.79	2.55	1.83
345	0.09	0.07	1.20	4.90	2.99
370	0.10	0.06	1.56	10.3	6.92
395	0.10	0.06	1.12	12.32	6.54
420	0.10	0.06	0.76	9.19	5.26

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.12 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เรียมในรูปสั้มประสิทธิการกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F2
ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แอร์เรียม gm / lt)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	0.09	0.20	0.71	2.55	1.59
345	0.09	0.04	1.17	4.70	4.50
370	0.07	0.03	2.69	12.24	7.06
395	0.09	0.06	1.40	4.80	5.01
420	0.10	0.08	0.65	2.70	4.68

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.13 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F3
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	0.06	0.09	0.65	1.94	1.44
345	0.05	0.06	0.96	10.70	5.47
370	0.05	0.03	2.81	3.56	3.03
395	0.07	0.04	1.43	3.40	2.16
420	0.06	0.08	0.79	2.76	1.29

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.14 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เรียมในรูปสั้มประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F4
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แอร์เรียม gm / lt)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	0.04	0.09	0.70	2.82	2.05
345	0.06	0.05	0.83	7.35	1.76
370	0.06	0.05	1.27	4.84	5.77
395	0.06	0.04	0.84	3.25	2.90
420	0.06	0.04	0.60	1.86	1.28

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.15 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F5
ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
320	0.05	0.07	0.65	2.82	2.05
345	0.05	0.04	0.73	3.28	1.76
370	0.06	0.02	0.79	3.46	4.36
395	0.05	0.01	0.32	3.72	4.78
420	0.04	0.02	0.30	3.19	3.14

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.16 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F1 ที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
320	2.00	3.95	3.22	0.71
345	0.78	1.71	4.08	0.61
370	0.60	26.00	6.60	0.67
395	0.60	18.60	11.00	0.53
420	0.60	12.60	12.09	0.57

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La ₂ O ₃	50.2 % w/w
- Pr ₆ O ₃	11.2 % w/w
- Nd ₂ O ₃	25.9 % w/w
- Y ₂ O ₃	4.8 % w/w
- H.R.E.	7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.17 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปดั้มประติบัติ การสกัดแยกระหว่างสาร
(Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F2
ที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
320	2.20	3.55	3.59	0.62
345	0.44	29.25	4.01	0.95
370	0.42	89.66	4.55	0.57
395	0.67	23.33	3.42	1.04
420	0.80	8.13	3.15	1.73

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.18 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร
(Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F3
ที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
320	1.50	7.20	2.98	0.74
345	1.20	16.00	1.11	0.51
370	0.60	93.60	1.26	0.85
395	0.57	35.75	2.37	0.63
420	1.33	9.87	3.49	0.46

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.19 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร
(Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F2
ที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
320	2.25	7.77	4.02	0.72
345	1.40	11.85	8.85	0.23
370	0.83	25.40	3.81	1.19
395	0.66	21.00	3.86	0.89
420	0.66	3.10	3.10	0.68

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La ₂ O ₃	50.2 % w/w
- Pr ₆ O ₃	11.2 % w/w
- Nd ₂ O ₃	25.9 % w/w
- Y ₂ O ₃	4.8 % w/w
- H.R.E.	7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.20 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปตัวประติภาิ การสกัดแยกระหว่างสาร
(Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ตำแหน่ง F2
ที่ความเข้มข้นค่าต่าง ๆ

ความเข้มข้นสายป้อน สารเวียนรอบ(ความเข้มข้น แร่เอิร์ท gm / lt)	ตัวประติภาิการสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
320	1.40	9.28	4.33	0.72
345	0.80	18.25	4.49	0.53
370	0.33	39.5	4.37	1.26
395	0.20	32.00	11.62	1.28
420	0.50	15.00	10.63	0.93

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La ₂ O ₃	50.2 % w/w
- Pr ₆ O ₃	11.2 % w/w
- Nd ₂ O ₃	25.9 % w/w
- Y ₂ O ₃	4.8 % w/w
- H.R.E.	7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.21 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้นแร่เอิร์ท 320

* gm / lt. ที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท ในสารละลายที่ F6 (gm/lt.)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	352.8	58.6	11.3	20.9	2.8	5.9
F2	359.4	57.8	11.1	21.7	2.7	6.3
F3	385.5	57	11.9	21.3	3.2	6.4
F4	385.7	58	11.9	20.4	3.1	6.4
F5	380.2	58.3	12.6	21.5	2.4	4.9

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.22 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้นแร่เอิร์ท 345
* gm / lt. ที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท ในสารละลายที่ F6 (gm/lt.)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	340.2	62.3	14.6	17.1	1.7	4.2
F2	341.1	62.7	15.2	17.3	1.7	2.9
F3	339.2	68.3	15.6	9.2	2.2	4.1
F4	355.0	65.3	14.8	16.0	1.6	2.2
F5	388.8	5836	13.3	20.3	2.1	5.5

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.23 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้นแร่เอิร์ท 370

* gm / lt. ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท ในสารละลายที่ F6 (gm/lt.)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	326.8	66.4	15.5	15.1	0.9	2.1
F2	320.6	70.1	16.8	10.1	0.8	2.1
F3	339.2	68.3	15.6	9.2	2.2	4.1
F4	355	65.3	14.8	16.0	1.6	2.2
F5	381.3	60.5	14.4	20.1	2.0	2.7

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.24 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้นแร่เอิร์ท 395
* gm / lt. ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท ในสารละลายที่ F6 (gm/lt.)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	348.1	63.7	15.2	18.2	0.7	2.1
F2	347.5	64.7	15.2	15.5	1.7	2.6
F3	366.6	63.2	14.7	14.6	2.2	5.1
F4	389.3	61.1	13.8	19	2.1	3.8
F5	436.2	55.4	13.5	27	1.7	2.2

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.25 ผลการสกัดแยกแร่เอิร์ท เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้นแร่เอิร์ท 420

* gm / lt. ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ความเข้มข้นแร่เอิร์ท ในสารละลายที่ F6 (gm/lt.)	องค์ประกอบของแร่เอิร์ท (% w/w) ที่ตำแหน่ง F6				
		La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	374.6	60.5	14.4	21.7	0.9	2.4
F2	388.8	58.6	13.8	22.6	2.5	2.5
F3	404.2	60.0	12.8	19.7	2.4	4.9
F4	430.4	55.9	13.0	21.3	3.1	6.5
F5	455.8	55.0	12.9	26.9	1.9	3.0

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.26 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 320 gm/Lt.*
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	0.10	0.20	0.79	2.55	1.83
F2	0.09	0.20	0.71	2.55	1.59
F3	0.06	0.09	0.65	1.94	1.44
F4	0.04	0.09	0.70	2.82	2.05
F5	0.05	0.07	0.65	2.82	2.05

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.27 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เรอร์ทินรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 345 gm/Lt.*
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	0.09	0.07	1.20	4.90	2.99
F2	0.09	0.04	1.17	4.70	4.50
F3	0.05	0.06	2.81	3.56	3.03
F4	0.06	0.07	0.83	7.35	1.76
F5	0.05	0.04	0.73	3.28	1.76

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.28 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เร่ท์ในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 370 gm/Lt.*
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	0.10	0.06	1.56	10.30	6.92
F2	0.07	0.03	2.69	12.24	7.06
F3	0.05	0.03	2.81	3.56	3.03
F4	0.06	0.05	1.27	4.84	5.77
F5	0.06	0.02	0.79	3.46	4.36

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w

- Pr₆O₃ 11.2 % w/w

- Nd₂O₃ 25.9 % w/w

- Y₂O₃ 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.29 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปตัวประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 395 gm/Lt.*
ที่ตำแหน่งต่างๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	0.10	0.06	1.12	12.32	6.54
F2	0.09	0.06	1.40	4.80	5.01
F3	0.07	0.04	1.43	3.40	2.16
F4	0.06	0.04	0.84	3.25	2.9
F5	0.05	0.01	0.32	3.72	4.78

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.30 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เร่ท์ในรูปสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
(K) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 420 gm/Lt.*
ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (K)				
	La ₂ O ₃	Pr ₆ O ₃	Nd ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	H.R.E.
F1	0.10	0.06	0.76	9.19	5.26
F2	0.10	0.65	2.71	2.71	4.68
F3	0.06	0.08	0.79	2.76	1.29
F4	0.06	0.04	0.60	1.86	1.28
F5	0.04	0.02	0.30	3.19	3.14

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.31 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 320 gm/Lt.* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
F1	2.00	3.95	3.22	0.71
F2	2.20	3.55	3.59	0.69
F3	1.50	7.20	2.98	0.74
F4	2.25	7.77	4.02	0.72
F5	1.40	9.28	4.33	0.72

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La_2O_3 50.2 % w/w
- Pr_6O_3 11.2 % w/w
- Nd_2O_3 25.9 % w/w
- Y_2O_3 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.32 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 345 gm/Lt.* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
F1	0.78	1.71	4.08	0.61
F2	0.44	29.25	4.01	0.95
F3	0.60	16.00	1.11	0.51
F4	1.40	11.85	8.85	0.23
F5	0.80	9.28	4.33	0.72

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.33 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 370 gm/Lt.* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
F1	0.60	26.00	6.60	0.67
F2	0.42	89.66	4.55	0.57
F3	0.60	93.61	1.26	0.85
F4	0.83	25.40	3.81	1.19
F5	0.33	39.51	4.37	1.26

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.34 แสดงผลการสกัดแยกแอร์เรอร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 395 gm/Lt.* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
F1	0.60	18.60	11.00	0.53
F2	0.67	23.33	3.42	1.04
F3	0.57	35.75	2.37	0.63
F4	0.66	21.00	3.86	0.89
F5	0.20	32.00	11.62	1.28

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La_2O_3 50.2 % w/w

- Pr_6O_3 11.2 % w/w

- Nd_2O_3 25.9 % w/w

- Y_2O_3 4.8 % w/w

- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ตาราง ก.35 แสดงผลการสกัดแยกแร่เอิร์ทในรูปสัมประสิทธิ์ การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor) เมื่อมีการป้อนสารเวียนรอบที่ความเข้มข้น 420 gm/Lt.* ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งป้อน สารเวียนรอบ	สัมประสิทธิ์การสกัดแยกระหว่างสาร (Separation factor)			
	La - Pr	Pr - Nd	Nd - Y	Y - H.R.E
F1	0.60	12.60	12.09	0.57
F2	0.80	8.13	4.15	1.73
F3	1.33	9.87	3.49	0.46
F4	0.66	3.10	3.10	0.68
F5	0.50	15.00	10.63	0.93

หมายเหตุ 1. องค์ประกอบของสารเวียนรอบ

- La₂O₃ 50.2 % w/w
- Pr₆O₃ 11.2 % w/w
- Nd₂O₃ 25.9 % w/w
- Y₂O₃ 4.8 % w/w
- H.R.E. 7.7 % w/w

2. อัตราการไหล สารละลาย ; สายป้อนสารเวียนรอบ ; สารสกัด

คือ 1 : 0.5 : 2.5

ภาคผนวก ข.

กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ใช้โซดาไฟ (NaOH) เข้มข้นให้การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ซึ่งเรียกว่า “กระบวนการต่าง” (alkali process) ประกอบด้วยกิจกรรมหลัก 3 หลัก คือ

1. การแปรสภาพแร่โมนาไซต์
2. การแยกธาตุวัสดุนิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมและทอเรียม
3. การแยกธาตุหายาก

เพื่อให้กิจกรรมหลักทั้ง 3 อย่างดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีกิจกรรมสนับสนุนอีก 2 อย่างได้แก่

1. กิจกรรมห้องปฏิบัติการเคมีควบคุมคุณภาพ
2. กิจกรรมซ่อมบำรุงและบริการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแปรสภาพแร่

ขั้นตอนที่จัดเป็นหัวใจของกิจกรรมแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ได้แก่ การบอแร่ให้ได้แร่โมนาไซต์สามารถถอดผ่านตะแกรงร่อนขนาด # 350 เป็นการเพิ่มผิวสัมผัสขณะบอแร่คมนาไซต์ด้วยค้างช่วยให้การบอแร่เป็นไปอย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูงและเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของแร่โมนาไซต์ ซึ่งมียูเรเนียมและทอเรียมเจือปนอยู่ด้วย เครื่องบดแร่ที่ใช้จึงได้รับการออกแบบเป็นเครื่องบดแร่และคัดขนาดแร่แบบเปียก

การบอแร่โมนาไซต์ด้วยโซดาไฟเข้มข้น (50% NaOH) และใช้อุณหภูมิสูง 140°C นาน 4 ชั่วโมง ทำให้คุณสมบัติของแร่ เปลี่ยนจากสารประกอบฟอสเฟตเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารประกอบนี้จะถูกแยกธาตุได้ง่ายขึ้น ด้วยกรรมวิธีทางเคมีธรรมดา ภายใต้อุณหภูมิปกติในขั้นนี้ จะได้ผลพลอยได้ คือ ไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวแรกของกระบวนการ

แร่ที่ผ่านการบอแล้ว จะประกอบด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ของกลุ่มธาตุหายาก และยูเรเนียมทอเรียม ซึ่งเมื่อนำไปละลายด้วยกรดเกลือ (HCl) และนำมาเลือกตกตะกอน (selective precipitation) ด้วยค้างเจือจาง (20% NaOH) ความเป็นกรดประมาณ 4.5 สารประกอบไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมจะถูกแยกออกจากกลุ่มธาตุหายาก พร้อมทั้งจะนำไปสกัดแยกยูเรเนียม และทอเรียมออกจากกัน สำหรับทำวัสดุนิวเคลียร์ต่อไป ส่วนกลุ่มธาตุหายากที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายกรดเกลือ จะถูกนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะกลุ่ม (light or heavy rare earth groups) หรือธาตุหายากเฉพาะตัว (individual rare earths) ต่อไป

การแยกวัสดุนิวเคลียร์

กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) อาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะระหว่างของเหลว 2 ชนิด ซึ่งจะแยกชั้นจากกันโดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น น้ำกับน้ำมัน และคุณสมบัตินี้ถูกนำมาใช้ในการแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากกันได้

สารประกอบไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมจากขั้นตอนแปรสภาพแร่ จะถูกนำมาละลายด้วยกรดดินประสิว (HNO_3) เป็นสารละลายชั้นน้ำ (aqueous phase) ส่วนสารละลายชั้นน้ำมัน (organic phase) ที่ใช้ ได้แก่ tributyl phosphate (TBP) เจือจางด้วยน้ำมันก๊าดในอัตราส่วน 5 : 95 โดยปริมาตร TBP มีคุณสมบัติพิเศษ ซึ่งจะละลายยูเรเนียมได้ดีกว่าทอเรียม ดังนั้น เมื่อใช้อุปกรณ์ที่ออกแบบพิเศษ ให้สารละลายกรดดินประสิวะของยูเรเนียมและทอเรียม เกิดการผสมตัวกับสารละลาย TBP แล้วปล่อยให้แยกชั้นออกจากกันตามธรรมชาติยูเรเนียมก็จะถูกละลายเข้าไปอยู่ในชั้นของ TBP ทั้งทอเรียมให้ยังคงละลายอยู่ในสารละลายกรดดินประสิวะเช่นเดิม อุปกรณ์พิเศษที่กล่าวถึงนี้มีมากมายหลายแบบ แต่ที่เลือกนำมาใช้สกัดยูเรเนียมนี้ ได้แก่ pulsed perforated-plate column

ยูเรเนียมที่สกัดได้จะถูกนำไปสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่งให้สะอาดที่สุด จากนั้นจึงตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นแอมโมเนียมไดยูเรเนท $[(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7]$ หรือที่เรียกกันว่า “เค้กเหลือง”

ทอเรียมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายกรดดินประสิวะ อาจยังมีธาตุหายากปะปนอยู่บ้างเล็กน้อยและเพื่อให้ได้ทอเรียมสะอาด จึงต้องนำมาสกัดอีกครั้งหนึ่งด้วยสารละลาย TBP ในน้ำมันก๊าดในอัตราส่วน 40 : 60 โดยปริมาตร อุปกรณ์ที่ใช้สกัดในขั้นตอนนี้เรียกว่า mixer settler

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแยกธาตุหายาก

ภายหลังการแยกยูเรเนียมและโทเรียมออกไปจากกลุ่มธาตุหายากจนหมดแล้วยังจะมีสารกัมมันตรังสี ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสลายตัวของยูเรเนียม และโทเรียมตกค้างอยู่บ้าง ดังนั้น ก่อนแยกธาตุหายากต่อไป จึงต้องแยกสารกัมมันตรังสีเหล่านั้นออกไป ซึ่งธาตุหลักในกลุ่มนี้ ได้แก่ เรเดียม (Ra) โดยให้ตกตะกอนร่วมกับแบเรียม แยกออกมาในรูปตะกอนซัลเฟต

การแยกธาตุหายากใช้กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลวอัตราส่วนของ TBP : น้ำมันก๊าดเป็น 50:50 แบ่งการสกัดได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. สกัดซีเรียม (Ce) ออกก่อนโดยใช้ mixer settler
2. สกัดธาตุหายากที่เหลือให้แยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแลนทานัม (La) ปนกับเพรซีโอดีเมียม (Pr) และกลุ่มนีโอดีเมียมปนกับธาตุหายากอื่น ๆ ที่เหลืออยู่ ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มหนัก (heavy rare earth) มีหมายเลขอะตอมตั้งแต่ 64 ถึง 71 การสกัดใช้ pulsed perforated-plate column
3. นำกลุ่มนีโอดีเมียมกับธาตุหายากอื่นที่เหลือมาสกัดด้วย pulsed perforated-plate column เพื่อแยกนีโอดีเมียมออกไป ส่วนธาตุหายากที่เหลือแบ่งเป็น 2 ส่วน ๆ หนึ่งนำไปตกผลึกเป็นเรเอิร์ทคลอไรด์ผสม (mixed RECl₃) ซึ่งสามารถนำออกจำหน่ายได้ อีกส่วนหนึ่งนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะตัวด้วยกรรมวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange chromatography) ด้วยกรรมวิธีนี้แม้จะใช้เวลาทำงานนานแต่ธาตุหายากเฉพาะตัวที่ผลิตได้จะมีความบริสุทธิ์สูงและมีราคาสูงมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ห้องปฏิบัติการเคมี

งานควบคุมคุณภาพเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้การผลิตเป็นไปตามเป้าหมาย ได้ผลผลิตที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดที่ซื้อขายกัน

การควบคุมคุณภาพเริ่มตั้งแต่วัตถุดิบที่ใช้ เช่น การตรวจสอบคุณภาพของสารเคมีชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต หรือการวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ ซึ่งอาจมีปริมาณของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุหายากต่าง ๆ ผิดเพี้ยนกันไปเล็กน้อยในแต่ละงวดของการแปรสภาพแร่ การวิเคราะห์ดังกล่าวนี้กระทำได้ด้วยกรรมวิธีทางเคมี (wet chemistry)

การควบคุมคุณภาพระหว่างขั้นตอนต่าง ๆ ของการผลิต จำเป็นต้องตรวจวิเคราะห์ทั้งด้วยความรวดเร็วและแม่นยำ นอกจากกรรมวิธีทางเคมีต่าง ๆ ที่เหมาะสมแล้ว ศูนย์ฯ ยังได้จัดเตรียมอุปกรณ์พิเศษเพิ่มเติมขึ้นอีก ได้แก่ X-ray Fluorescence Spectrometer (XRF), Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer (ICP-OES) และ Low Level Counter พร้อมกับได้ฝึกอบรมบุคลากรให้มีความชำนาญ ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีและทางรังสี ซึ่งมีความละเอียดอ่อนเหล่านี้ไว้แล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การซ่อมบำรุงและบริการ

ในการให้ความสนับสนุนแก่งานการผลิต งานซ่อมบำรุงและบริการ มีหน้าที่และรับผิดชอบในการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (demineralized water) และน้ำสะอาดสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ตลอดจนน้ำอ่อน (Soft water) สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำรวมถึงการผลิตไอน้ำสำหรับการทำระเหย การกลั่นของกระบวนการผลิต และในกรณีที่กระแสไฟฟ้าขัดข้องก็ได้เตรียมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (diesel generator) ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสำรองขึ้นทันทีที่เกิดไฟฟ้าดับ ด้วยกำลังไฟฟ้าที่พอเพียงสำหรับทุกขั้นตอนของการผลิตที่จำเป็นต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังดูแลสาธารณูปโภคทั้งหมดภายในศูนย์ฯ เช่น ระบบไฟฟ้า ประปา โทรศัพท์ และการกระจายเสียงตามสาย เป็นต้น

สำหรับการซ่อมบำรุงประจำปี หรือการซ่อมเฉพาะหน้า เมื่อเกิดการชำรุดหรือขัดข้องของเครื่องมือในกระบวนการผลิต เช่น ปัมป์ มอเตอร์ หรือเกิดการแตกร้าวของระบบท่อต่าง ๆ ศูนย์ฯ มีโรงซ่อมบำรุง (workshop) พร้อมด้วยเครื่องมือกล เครื่องมือยนต์ และเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น เครื่องเชื่อม เครื่องกลึง เครื่องตัด เครื่องเจาะ เครื่องไส เครื่องเลื่อย และอุปกรณ์การช่างต่าง ๆ เตรียมไว้แล้วสำหรับรองรับเหตุเหล่านี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นที่ทราบกันดีว่า แร่ธาตุต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นแร่โมนาไซต์นั้นมีมูลค่าสูงมาก แต่เนื่องจากประเทศไทยขาดเทคโนโลยีในการแยกแร่ดังกล่าว จึงจำเป็นต้องส่งแร่ดิบไปขายต่างประเทศ ในราคาเพียง 12,500.- บาทต่อตัน ดังนั้น การดำเนินงานของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากนี้หลังจากหักต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการแปรสภาพแล้ว จะทำให้มูลค่าของแร่จะเพิ่มอีกตันละประมาณ 143,000.- บาท ซึ่งแม้ว่าการดำเนินการตามโครงการนี้จะเพิ่มมูลค่าของแร่ได้เพียงปีละ 300 ตัน หรือปีละประมาณ 40 ล้านบาทก็ตาม แต่โครงการนี้จะกระตุ้นผู้ประกอบการเอกชนให้เกิดความสนใจทั้งทางด้านการแปรสภาพ และการสำรวจอย่างกว้างขวาง ซึ่งจะเป็นผลดีต่อเศรษฐกิจของประเทศ
2. ก่อให้เกิดการวิจัย พัฒนา ตลอดจนการลงทุนในอุตสาหกรรมอีกหลายแขนง ซึ่งใช้ธาตุหายากเป็นวัตถุดิบในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมผลิตหลอดโทรทัศน์ ผลิตหลอดอิเล็กทรอนิกส์หลอดเหี่ยวสำหรับผลิตชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เป็นต้น ซึ่งจัดว่าเป็นบันไดก้าวแรกของการก้าวไปสู่ประเทศอุตสาหกรรม
3. สำหรับในด้านพลังงานนั้น การดำเนินการตามโครงการนี้ จะผลิตทอเรียมออกไซด์ได้ปีละประมาณ 20 ตัน ยูเรเนียมออกไซด์ปีละประมาณ 1 ตัน ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการผลิตพลังงานนิวเคลียร์ เป็นการสร้างสมวัตถุดิบและเทคโนโลยีในแขนงที่ประเทศต่าง ๆ ปกปิดไม่ยอมให้มีการถ่ายทอด ซึ่งจะมีคุณค่าอย่างมากในอนาคต
4. แลนทานัม ซึ่งได้จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ตามแผนงานนี้ จะมีบทบาทสำคัญในการผลิตพลังงานจากไฮโดรเจน ซึ่งนักวิทยาศาสตร์คาดว่าจะเป็แหล่งพลังงานสำคัญอย่างหนึ่งในอนาคตอันใกล้ ทั้งนี้เนื่องจากโลหะผสมแลนทานัม-นิกเกิล สามารถดูดซับและคายไฮโดรเจนปริมาณมาก ๆ ได้ในอุณหภูมิและความดันที่ไม่สูงนัก การวิจัยและพัฒนาเรื่องนี้จะทำให้ประเทศไทยสามารถติดตามวางแผน และเตรียมการเกี่ยวกับพลังงานในอนาคตได้อย่างเหมาะสม และทันต่อทั้ง

ภาคผนวก ง.

งานควบคุมคุณภาพของสิ่งแวดลอม

ในการแปรสภาพแรมอนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากเพื่อผลิตธาตุหายากชนิดต่าง ๆ นั้น มีผลผลิตพลอยได้หลายอย่าง รวมทั้ง ธาตุทอเรียม ยูเรเนียมและธาตุที่เกิดจากการสลายตัวจากธาตุกัมมันตรังสีทั้ง 2 ชนิดนี้ เช่น เรเดียม เรคอน และพอลเนียม เป็นต้น ผลพลอยได้เหล่านี้ ส่วนใหญ่ ได้แก่ยูเรเนียม และทอเรียม ถูกจัดเก็บไว้เป็นผลผลิตของศูนย์ฯ โดยมีส่วนน้อยจากการสลายตัวของยูเรเนียมและทอเรียมนั้น ในการแปรสภาพแร่ก็ได้มีขั้นตอนเพื่อการกำจัดออกอยู่ด้วย อย่างไรก็ตาม ในแผนการปฏิบัติงานต้องตั้งสมมุติฐานว่าผลผลิตพลอยได้เหล่านี้อาจจะปนเปื้อนในกระบวนการแปรสภาพแร่และตกค้างไปสู่ระบบบำบัดน้ำทิ้งต่อไปได้ ดังนั้น ข้อกำหนดเบื้องต้นของศูนย์ฯประการหนึ่งก็คือ จะต้องไม่มีการระบายน้ำทิ้งที่เจือปนด้วยกากสารกัมมันตรังสีและสารเคมีออกสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งอาจทำได้โดยการปล่อยให้น้ำทิ้งค่อย ๆ ระบายไปเองแต่ในทางปฏิบัตินั้น จำเป็นต้องตั้งสมมุติฐานต่อไปอีกว่าอาจจะมีภาวะการณ์ (incident) บางอย่าง ที่ทำให้เกิดการระบายน้ำที่เจือปนด้วยสารกัมมันตรังสีออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้น จึงมีการเตรียมแผนการตรวจสอบและติดตามสถานะแวดล้อมทางรังสีโดยรอบบริเวณศูนย์ฯ เพื่อเป็นหลักประกันยืนยันว่า จะไม่มีผลกระทบทางรังสีเกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานของศูนย์

การตรวจสอบและติดตามสถานะแวดล้อมนั้นเป็นการปฏิบัติสืบเนื่องจากการศึกษา เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ของการปฏิบัติงานของศูนย์ฯ ซึ่งได้เน้นการศึกษาสภาพภูมิอากาศ ภูมิศาสตร์ธรณีวิทยาอุทกวิทยาและนิเวศวิทยาต่าง ๆ ณ บริเวณศูนย์ฯ

การศึกษาสภาพภูมิอากาศ อาทิเช่น ทิศทางลมความเร็วและความแรงลม ปริมาณน้ำฝน โอกาสที่จะเกิดพายุและมรสุมต่าง ๆ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เช่น ในกรณีการกำหนดบ่อพักน้ำทิ้งที่จะรอเวลาให้มีการระเหยน้ำกระทั้งแห้ง ซึ่งพบว่าในอาณาบริเวณภาคกลาง เช่น ที่ตั้งของศูนย์ฯ นี้มีปริมาณน้ำฝนสูงมาก จึงอาจจำเป็นต้องกำหนดให้มีการสร้างหลังคากันฝน สำหรับคลุมบ่อพักน้ำทิ้งชนิดเลื่อนเปิด-ปิดได้เพื่อปกคลุมบ่อเวลาฝนตก และเปิดรับแสงแดดได้เมื่อฝนหยุดตกแล้ว เป็นต้น

ด้านสภาพภูมิศาสตร์นั้น สถานที่ตั้งของศูนย์ฯ จัดอยู่ในพื้นที่ราบลุ่มและล้อมรอบด้วยพื้นที่การเกษตรเฉพาะและชุมชนซึ่งทวีขนาดใหญ่มากขึ้น และแหล่งน้ำที่อยู่ใกล้เคียงเป็นคลองชลประทานซึ่งต่อเนื่องกับคลองรังสิตประชาชนโดยรอบบริเวณยังใช้น้ำผิวดินเพื่อการอุปโภคและใช้ในกิจการเกษตร

ด้านต่าง ๆ ดังนั้น จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการดำเนินการจัดการกากของเสียต่าง ๆ ของศูนย์ฯ ที่จะต้องกำหนดเกณฑ์ที่เข้มงวด อันเป็นข้อกำหนดเบื้องต้นดังกล่าว คือ มิให้มีการระบายน้ำทิ้งสารเคมี/รังสีออกสู่สิ่งแวดล้อม เพราะจะมีผลกระทบต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อมได้

จากข้อมูลพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้จากการศึกษาวิจัยในห้องปฏิบัติการของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ รวมทั้งข้อมูลจากการตรวจวิเคราะห์สภาพแวดล้อมด้านนิเวศวิทยาและรังสีวิทยา (radiology) ของสถานที่ที่ทำการก่อสร้างศูนย์ฯ ได้นำไปปรับปรุงการออกแบบระบบการทำงานต่าง ๆ ของกระบวนการแปรสภาพแร่ เพื่อควบคุมการปฏิบัติงานให้บรรลุเป้าหมายของผลผลิตที่ต้องการได้รับ และมีให้ก่อผลกระทบต่อประชาชนและสิ่งแวดล้อม โดยได้มีการพิจารณาถึงองค์ประกอบสำคัญต่าง ๆ ที่จะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังต่อไปนี้

1. สภาพภูมิประเทศ การเดินทางเข้าไปยังศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ณ ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี หากเริ่มจากถนนพหลโยธิน กระทำได้ 2 ทางคือ โดยใช้เส้นทางรังสิต-นครนายก และเส้นทางบางชัน-คลองห้า ซึ่งมีระยะทางประมาณ 10 กม. ทั้ง 2 เส้นทาง และทางเข้าศูนย์ฯ แยกจากถนนหลัก 2 สายนี้อีกประมาณ 5 กม. และ 2.5 กม. ตามลำดับ

พื้นที่อันเป็นบริเวณที่ตั้งของศูนย์ฯ และบริเวณใกล้เคียงเดิมเป็นที่ราบลุ่ม เป็นพื้นที่ทำนา และมีน้ำท่วมขังในฤดูฝน อยู่ห่างจากคลองระบายน้ำที่ 5 ประมาณ 500 เมตร ตามแนวริมคลองมีบ้านเรือนประชาชนอยู่ประปราย ในรัศมี 5 กม. คาดว่ามีประชาชนอาศัยอยู่ราว 20 ครัวเรือน นอกจากนาข้าวแล้วในรัศมี 10 กม. ยังมีสวนผลไม้ อาทิ ส้มเขียวหวาน ส้มโอ และมะม่วงอีกด้วย

ในด้านน้ำเพื่อการอุปโภคบริโภคในศูนย์ฯ นี้ในปัจจุบันจะต้องใช้น้ำบาดาล ซึ่งจากข้อมูลของบ่อน้ำบาดาลที่ขุดเจาะ พบว่า ณ ระดับความลึกประมาณ 180 เมตร น้ำที่ได้มีคุณภาพดี มีอัตราการไหลต่ำสุดประมาณ 40 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการ (ในศูนย์จะมีการใช้น้ำชั่วโมงละประมาณ 15-20 ลบ.ม.) ส่วนการระบายน้ำเสีย/น้ำใช้จากการใช้น้ำทั่วไปนั้น มีทางระบายลงสู่คลองห้า หรือคลองข่อยระหว่างคลองห้าและคลองหก ในอัตราวันละประมาณ 100 ลบ.ม. (24 ชม.) และลงสู่คลองรังสิต ซึ่งเป็นคลองหลักก่อนไหลลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยาต่อไป ทั้งนี้ โดยที่น้ำทิ้งจากกระบวนการแปรสภาพแร่จะถูกกักเก็บในบ่อพักระเหยสลักเปลี่ยนหมุนเวียนในบ่อพัก ซึ่งเตรียมไว้ใช้จำนวน 6 บ่อ และบ่อสำหรับกรณีฉุกเฉินอีก 1 บ่อ และจะไม่มีการระบายทิ้งสู่ภายนอก

2. สารเคมี ที่ใช้ในกระบวนการขั้นตอนต่าง ๆ จากการพิจารณาขั้นตอนต่าง ๆ ของการแปรสภาพแร่โมนาไซด์ สรุปได้ว่าสารเคมีที่ใช้แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

2.1 ด่าง ได้แก่ โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต ปูนขาว และแอมโมเนีย ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป สามารถละลายน้ำได้ดี มีการระเหยน้อยมาก ยกเว้นแอมโมเนีย ซึ่งสามารถระเหยได้ค่อนข้างดี และมีกลิ่นฉุน ดังนั้นในการใช้งานจึงต้องทำให้เจือจางลงเหลือประมาณ 8% การระเหยจะลดลงมาก โดยทั่วไปแล้วสารเคมีดังกล่าวถือว่ามีอันตรายน้อยและปลอดภัยสำหรับใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเคมีทั่วไป เช่น อุตสาหกรรมผลิตแก้ว ปูน และกระดาษ เป็นต้น

2.2 กรด ได้แก่ กรดเกลือ กรดกำมะถัน กรดดินประสิว และกรดออกซาลิก กรด 2 ชนิดแรกสามารถผลิตได้ในประเทศ ส่วน 2 ชนิดหลังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ แต่กรดเหล่านี้ก็เป็นกรดที่ใช้อยู่ในอุตสาหกรรมทั่วไป เพียงแต่ปฏิบัติงานด้วยความระมัดระวังก็ไม่ถือว่าเป็นกรดที่มีอันตราย โดยเฉพาะในการใช้ระหว่างกระบวนการแปรสภาพแร่ จำเป็นจะต้องทำให้เจือจางลงเสียก่อน ซึ่งโดยปกติกรดเกลือ และกรดดินประสิ่วที่เข้มข้น จะระเหยได้ปานกลางที่อุณหภูมิประมาณ 30°C

2.3 สารอินทรีย์เคมี ที่สำคัญคือไตรบิวทิลฟอสเฟต (TBP) น้ำมันก๊าดและเอททิลีนไดอะมิโนเตตราอะซีติกแอซิด (EDTA) ทั้ง TBP และ EDTA ปกติเป็นสารประกอบที่อยู่ตัว โดยเฉพาะ TBP นี้ มีอัตราการระเหยต่ำมาก และการใช้งานจะต้องเจือจางลงด้วยน้ำมันก๊าดในด้านอันตรายนั้น ทั้ง TBP และ EDTA จัดว่าเป็นสารเคมีมีอันตรายน้อย เช่น TBP เข้มข้น เมื่อถูกผิวหนังแล้วทิ้งไว้ ไม่ล้างออก จะทำให้ผิวหนังรู้สึกปวดแสบปวดร้อนคล้ายถูกพริก ในที่สุดผิวหนังบริเวณนั้นจะตาย และลอกออกภายใน 3-5 วัน สารอินทรีย์เคมีเหล่านี้หลังจากใช้แล้วจะถูกนำกลับมาใช้อีก เนื่องจากมีราคาแพง สำหรับกระบวนการสกัดธาตุหายากของศูนย์ฯ จะมีอัตราการสูญเสียสารอินทรีย์เหล่านี้เพียง 0.1% ที่จะติดไปกับน้ำทิ้ง ก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำทิ้งในบ่อระเหย

2.4 สารเคมีอื่น ๆ ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แบริยมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต เป็นสารเคมีที่เติมเข้าไประหว่างกระบวนการ เพื่อวัตถุประสงค์บางประการ มิใช่สารเคมีหลักที่ต้องใช้จึงมีปริมาณการใช้น้อย และสารเคมีทั้ง 3 ชนิดก็เป็นสารเคมีที่ใช้ทั่วไป เช่น ใช้ในทางการแพทย์หรือในการชุบโลหะ จึงไม่ถือว่าเป็นสารอันตรายแต่อย่างใด

3. สารรังสี

โดยเหตุที่แร่โมนาไซด์มีธาตุยูเรเนียม (0.2-0.8%) และทอริยม (4.5-10.6%) เป็นองค์ประกอบอยู่ในระดับความเข้มข้นค่อนข้างสูง จึงถือว่าแร่โมนาไซด์เป็นแร่วัสดุนิวเคลียร์ การดำเนินการใด ๆ ที่จะทำให้แร่พ้นจากสภาพที่เป็นอยู่ในธรรมชาติทางเคมี จะต้องได้รับอนุญาตจากคณะกรรมการ

พลังงานปรมาณูเพื่อสันติเสียก่อน และจะต้องมีการปฏิบัติงานที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายทางรังสีต่อผู้ปฏิบัติงาน โดยที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในเรื่องการระวังป้องกันอันตรายจากรังสีจะทำการตรวจสอบสารรังสีด้านต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอกอาคาร ตลอดจนให้คำแนะนำ และร่วมกำหนดมาตรการในการปฏิบัติงานทางรังสี ทั้งนี้ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม ที่มีอยู่ในโมนาไซต์เป็นสารกัมมันตรังสี และธาตุที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุทั้งสองก็เป็นสารกัมมันตภาพรังสีอีกด้วย ที่สำคัญคือ เรเดียม-228 (จากทอเรียม) และเรเดียม-226 (จากยูเรเนียม) เป็นต้น สารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติในกลุ่มนี้ ส่วนใหญ่ให้รังสีอนุภาคแอลฟาและเบตา ซึ่งมีอำนาจในการทะลุผ่านตัวกลางต่ำ ดังนั้น เมื่อสารเหล่านี้ที่อยู่ภายนอกร่างกายจะเป็นอันตรายมากขึ้น โดยประมาณได้ว่าปริมาณรังสีรวมในแร่โมนาไซต์ที่มีความสะอาดในเกณฑ์ที่ซื้อ-ขายในตลาดโลก จะมีความแรงรังสีจำเพาะ 190-250 เบคเคอเรล/กรัม (ในกรณีของตะกั่วและแร่แทนทาลัม/โคบอลต์ที่มีความแรงรังสีจำเพาะ 70-130 เบคเคอเรล/กรัม) ซึ่งยังถือว่าอยู่ในระดับต่ำ ดังเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน การปฏิบัติงานทางรังสีของต่างประเทศ อาทิ ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน ถือว่าความแรงรังสีจำเพาะของวัตถุที่จะต้องอยู่ในการควบคุมดูแล เมื่อนำวัสดุ หรือแร่เหล่านั้นมาผ่านกระบวนการแล้ว วัสดุนี้มีความแรงรังสีสูงกว่า 370 เบคเคอเรล/กรัม ถ้าต่ำกว่านี้ไม่ต้องควบคุม

อย่างไรก็ตามสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ให้ความสำคัญในเรื่องนี้เป็นพิเศษ และได้กำหนดแนวปฏิบัติในการดำเนินการต่าง ๆ ดังนี้ คือ

3.1 การบดแร่ ใช้วิธีการบดแร่แบบเปียกและกักขนาดโดยใช้น้ำ เพื่อจะลดการฟุ้งกระจายของฝุ่นจากการบดและกักขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แม้จะสิ้นเปลืองพลังงานในการบดและกักขนาดมากกว่าวิธีอื่นก็ตาม

3.2 ก๊าซเรดอน เป็นสิ่งที่เกรงกันว่าจะถูกปลดปล่อยออกจากเม็ดแร่ในระหว่างการบดแร่และการย่อยสลายแร่ ซึ่งเป็นความเข้าใจที่ไม่ถูกต้องนัก ความจริงแล้ว ก๊าซเรดอนจะเกิดและมีขึ้นอยู่ตลอดเวลา เป็นคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของธาตุเรเดียม ที่จะสลายตัวให้ก๊าซเรดอนตลอดเวลา มนุษย์ไม่สามารถที่จะหยุดยั้งคุณสมบัติของสารรังสีไม่ให้มีการสลายตัวได้ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะไม่ถูกกักเก็บอยู่ในเม็ดแร่ แต่จะซึมออกสู่ภายนอกเม็ดแร่ตลอดเวลา ดังนั้น ไม่ว่าจะการบดแร่ การย่อยแร่หรือกองแร่ทิ้งไว้เฉย ๆ จะมีปริมาณของก๊าซเรดอนที่เกิดขึ้นต่อหน่วยเวลาเดียวกันมีปริมาณ ** แต่อาจจะมีการสะสมตัวของก๊าซดังกล่าว ในกรณีที่อยู่ในพื้นที่กักอากาศ ดังนั้นสิ่งที่ช่วยได้ในเรื่องของก๊าซเรดอนนี้คือ จะต้องมีการระบายของอากาศที่ดีโดยอาจมีปล่องควันช่วย จากข้อมูลของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ

ในระหว่างทำการข่อยแร่โมนาไซต์ที่สำนักงานฯ พบว่า การปลดปล่อยก๊าซเรดอน อยู่ระหว่าง 0.1-0.2 เบคเคอเรล/ลิตร ซึ่งใกล้เคียงกับระดับของก๊าซเรดอนตามธรรมชาติ และยังต่ำกว่าระดับที่ปลอดภัยสำหรับประชาชน ที่กำหนดโดย ICRP คือ 0.37 เบคเคอเรล/ลิตร เป็นต้น

3.3 กระบวนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ใช้กระบวนการทางเคมี ซึ่งนอกจากจะไม่ทำให้เกิดมีสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นจากที่มีเดิมอยู่แล้ว ยังได้ทำการแยกเอาธาตุยูเรเนียมและทอเรียมที่มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงเพื่อเก็บไว้ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของประเทศในอนาคต โดยจะต้องเก็บไว้อย่างมิดชิดในห้องที่มีผนังบุด้วยตะกั่ว และมีระบบระบายอากาศผ่านเครื่องกรองอากาศที่ดีก่อนปล่อยอากาศออกนอกจากการแยกยูเรเนียมและทอเรียมแล้ว ยังได้ทำการแยกเอาเรเดียม ซึ่งเป็นธาตุที่สำคัญที่เกิดจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีทั้งสองออกด้วย โดยการตกตะกอนด้วยแบเรียมซัลเฟต เรเดียมจะถูกพามาจับตะกอนแบเรียมซัลเฟต ซึ่งจะถูกส่งไปสู่อุโมงค์จัดการกากในรูปของกากกัมมันตรังสีต่อไป จากขั้นตอนนี้จะทำให้ผลผลิตพลอยได้โดยเฉพาะแเรเธอร์ท่าง ๆ ซึ่งปราศจากการเจือปนของสารกัมมันตรังสี และแม้ในน้ำทิ้งก็จะมีสารกัมมันตรังสีเหลืออยู่เพียง 3.7-11 เบคเคอเรล/ลิตร โดยจากการศึกษาทดลองได้มีการติดตามเกี่ยวกับสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้งและผลผลิต ได้กระทำติดต่อกันเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าไม่มีสารกัมมันตรังสีเพิ่มขึ้นแต่กลับลดลงเรื่อย ๆ ทุกสัปดาห์ ซึ่งยืนยันได้ว่ากระบวนการแยกเรเดียม มีประสิทธิภาพที่สามารถแยกเรเดียมได้ดียิ่ง

4. น้ำทิ้ง

เนื่องจากในกระบวนการแปรสภาพแร่ มีการใช้กรด ต่าง และสารเคมีอื่น ๆ ในหลายขั้นตอน ดังได้กล่าวแล้วในเรื่องสารเคมี ดังนั้น น้ำทิ้งที่จะออกจากกระบวนการก็จะมีสารเคมีเหล่านั้นหรือเกลือของสารเคมีเหล่านั้นเจือปนอยู่ในน้ำทิ้งขั้นตอนต่าง ๆ ด้วยเสมอ น้ำทิ้งทั้งหมดจะถูกส่งลงสู่บ่อระเหยที่เตรียมไว้ โดยไม่มีการระบายออกสู่ภายนอกแต่อย่างใด

5. ธาตุโลหะหนัก

จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ คาดว่าอาจมีธาตุโลหะหนักเกิดขึ้นในกระบวนการด้วย เนื่องจากธาตุโลหะหนักเป็ดมลทินอยู่ในแร่โมนาไซต์ และ/หรือในสารเคมี ซึ่งคาดว่ามิอยู่ในปริมาณที่น้อยมาก อย่างไรก็ตาม การออกแบบระบบบำบัดน้ำทิ้งได้คำนึงถึงประสิทธิภาพของการบำบัดธาตุโลหะหนักไว้ด้วยเช่นกันและจากการศึกษาจากการปฏิบัติงานเบื้องต้นของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ไม่พบว่ามีปัญหาเรื่องธาตุโลหะหนักนี้เนื่องจากการใช้แร่ที่มีความสะอาดอยู่ในเกณฑ์สูง คือความบริสุทธิ์ของแร่โมนาไซต์ประมาณ 95% ถึงเจือปนได้แก่ ไทเทเนียม

ออกไซด์ไม่เกิน 5% และดินุกไม่เกิน 1% เป็นต้น

6. มาตรการเสริม

สำหรับผู้ปฏิบัติงานภายในโรงงานเกี่ยวกับสารรังสี สารเคมี เครื่องจักร อุปกรณ์ต่าง ๆ จะต้องกำหนดเป็นมาตรการและถือปฏิบัติอย่างเคร่งครัด ตามกฎเกณฑ์ GMP (good manufacturing practice) ส่วนภายนอกโรงงานก็ต้องตรวจสอบ และติดตามในด้านต่าง ๆ เป็นระยะ ๆ เสมอ หากพบสิ่งใดผิดปกติจะต้องแจ้งผู้มีหน้าที่รับผิดชอบให้ดำเนินการแก้ไขทันทีรวมทั้งการตรวจสอบของผู้ปฏิบัติงานเป็นประจำทุก ๆ ปี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

การวางแผนระบบความปลอดภัยทางรังสี

การปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากนั้น มีส่วนที่เกี่ยวข้องกับแร่กัมมันตรังสี ดังนั้นในการปฏิบัติจะต้องกำหนดแผนและมาตรการต่าง ๆ เกี่ยวกับการควบคุมความปลอดภัยทางรังสี และควบคุมให้การปฏิบัติงานต่าง ๆ ภายในศูนย์ฯ ดำเนินไปด้วยความปลอดภัยทั้งผู้ปฏิบัติงาน ผู้เกี่ยวข้องและประชาชนทั่วไปด้วย ถึงแม้ที่ศูนย์จะมีการปฏิบัติงานเกี่ยวกับ สินแร่ที่มีความแรงของกัมมันตภาพรังสีในระดับธรรมชาติก็ตาม

การควบคุมความปลอดภัยทางรังสีของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากนั้น ในเบื้องต้นนี้ได้กำหนดเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนสถานที่และส่วนของผู้ปฏิบัติงาน ดังแสดงในรูปที่ 1

ก. สถานที่ ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากเป็นสถานที่ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับรังสีที่มีระดับรังสีปานกลางและระดับรังสีต่ำ ดังนั้นจึงควรแบ่งสถานที่ออกเป็น 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2 กล่าวคือ

1. **บริเวณไม่มีรังสี** ให้ปฏิบัติตามระเบียบข้อบังคับทั่วไปสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเคมี

2. **บริเวณมีรังสี** ให้ปฏิบัติตามระเบียบข้อบังคับเกี่ยวกับสถานปฏิบัติการทางรังสี บริเวณที่เก็บและแปรสภาพแร่โมนาไซด์เป็นบริเวณที่มีรังสี ทั้งนี้เพราะโมนาไซด์มีส่วนประกอบของธาตุกัมมันตรังสีคือทอเรียม (4.5-10.6%) และยูเรเนียม (0.24-0.79%) อยู่ด้วย โดยยูเรเนียม และทอเรียมสลายตัวให้รังสีแอลฟาและแกมมา และเกิดเป็นก๊าซกัมมันตรังสีต่าง ๆ รวมถึงเรดอนและทอรอน ดังนั้นบริเวณมีรังสีต้องมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่เหมาะสม และมีข้อบังคับในการปฏิบัติงานดังนี้

- 2.1 ต้องมีนักฟิสิกส์สุขภาพ (Health Physicist) ที่สามารถให้คำแนะนำและปฏิบัติงานควบคุมความปลอดภัยทางรังสีได้เป็นอย่างดี
- 2.2 มีการสำรวจระดับรังสีแกมมาตามบริเวณต่าง ๆ เป็นประจำอย่างน้อย สัปดาห์ละ 1 ครั้ง
- 2.3 มีระบบระบายอากาศที่ดีและเหมาะสมกับลักษณะของการปฏิบัติงานทางรังสี ทั้งนี้เพื่อการควบคุมการได้รับรังสีเข้าสู่ร่างกาย (internal exposure)
- 2.4 ตรวจสอบการเปื้อนบนพื้นผิวบริเวณต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติงาน

เป็นประจำ โดยทั่วไปกำหนดให้มีการเปราะเปื้อนยูเรเนียมและทอเรียมไม่เกิน 37 Bq/cm^2 (แต่ในทางปฏิบัติเมื่อพบการเปราะเปื้อนบนพื้นผิวเกิน 40 Bq/cm^2 จะต้องดำเนินการชำระล้างการเปราะเปื้อน)

- 2.5 ตรวจวัด เรดอน ทอรอน และไอโซโทป รังสีในอนุกรมของเรดอนและทอรอนในอากาศ และในน้ำเป็นประจำทุกสัปดาห์ (weekly period)
- 2.6 การผ่านเข้าออกบริเวณรังสีจะต้องได้รับอนุญาตจากเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบ และต้องปฏิบัติตามกฎข้อบังคับทางรังสีอย่างเคร่งครัด
- 2.7 มีเสื้อผ้าหรืออุปกรณ์สำหรับบุคคลสวมใส่เพื่อป้องกันการเปราะเปื้อน (protective clothing) เช่น เสื้อ หมวก ถุงมือ รองเท้าบูท หน้ากาก และอื่น ๆ ให้จัดหาไว้ตามความเหมาะสม
- 2.8 มีเครื่องหมายทางรังสีและคำอธิบายอย่างชัดเจนแสดงตามตำแหน่งต่าง ๆ ให้เห็นอย่างเด่นชัด
- 2.9 มีเครื่องวัดรังสีแบบต่อเนื่องพร้อมสัญญาณเตือนภัยทางรังสี (CAM : Continuous Air Monitoring) ณ บริเวณนี้ หรือตำแหน่งที่เหมาะสม
- 2.10 มีเครื่องตรวจสอบความเปราะเปื้อนบนร่างกาย (Hands and Shoes with Body Probe Monitor) ติดตั้ง ณ บริเวณทางผ่านเข้าออกบริเวณรังสี
- 2.11 มีการกำหนดขีดจำกัดของความ ของการได้รับรังสี เช่น Annual Limit on Intake (ALI) , Derived Air Concentration (DAC) ค่าขีดจำกัดการได้รับรังสีแบบ deterministic หรือ non-stochastic effects ไม่เกิน 0.5 Sv (50 rem) ต่อปีสำหรับเนื้อเยื่อทั่วร่างกายยกเว้นเลนส์ตา ซึ่งกำหนดให้ไม่เกิน 0.15 Sv (15 rem) และแบบ stochastic effects เป็น 20 mSv (2 rem) ต่อปี (หมายเหตุ ค่าตัวเลขต่าง ๆ เหล่านี้อาจมีการปรับปรุงใหม่ ทั้งนี้ต้องเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในกฎหมายและมาตรฐานสากลว่าด้วยความปลอดภัยทางรังสี) สำหรับค่า ALI และ DAC ให้กำหนดตาม ICRP No.30 (หรือฉบับปรับปรุงใหม่ล่าสุด)
- 2.12 มีระบบจัดการกากกัมมันตรังสีอย่างถูกต้อง ตามกฎข้อบังคับของการจัดการกากกัมมันตรังสี
- 2.13 มีชุดปฐมพยาบาลเบื้องต้น
- 2.14 มีการตรวจวัดทาง Bio-assays เป็นระยะและในกรณีการได้รับปริมาณ

รังสีเกินที่กำหนดไว้

ข. ผู้ปฏิบัติงาน เจ้าหน้าที่ที่ปฏิบัติงานได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะงานที่รับผิดชอบคือ

1. ผู้ปฏิบัติงานทั่วไป ให้ปฏิบัติตามกฎข้อบังคับทั่วไป สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเคมี
2. ผู้ปฏิบัติงานทางรังสี ต้องปฏิบัติตามกฎเกณฑ์และข้อกำหนดของการปฏิบัติงานทางรังสีดังนี้
 - 2.1 ผู้ปฏิบัติงาน**ต่ำกว่า 18 ปีบริบูรณ์
 - 2.2 ต้องผ่านการฝึกอบรมด้านการป้องกันอันตรายจากรังสี
 - 2.3 มีการตรวจสอบสุขภาพก่อนการเริ่มปฏิบัติงานครั้งแรก บันทึกประวัติสุขภาพ เช่น การสูบบุหรี่ ประวัติครอบครัวเคยเป็นโรคเกี่ยวกับมะเร็งหรือการผิดปกติของเม็ดเลือด เคยทำงานเกี่ยวกับสารที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดเซลล์มะเร็งหรือไม่ (เช่น เบนซิน) เคยรักษาโรคด้วยรังสีหรือไม่ โรคเกี่ยวกับระบบการหายใจ เป็นต้น การตรวจสอบสุขภาพทั่วไป เช่น ความสูง น้ำหนัก เอ็กซ์เรย์ปอด ความดันโลหิต จำนวนเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว หู ตา คอ จมูก การทำงานของไต และอื่น ๆ เป็นต้น ประมวลผลว่ามีสุขภาพเหมาะสมที่จะทำงานหรือไม่
 - 2.4 มีการตรวจสอบสุขภาพประจำทุก ๆ ปีอย่างน้อย 1 ครั้ง (ยกเว้นในกรณีเกิดอุบัติเหตุทางรังสีหรือการได้รับรังสีเกินกว่าปกติ) เป็นการตรวจที่สอดคล้องกับข้อ ข. 2.3 ที่กล่าวมา
 - 2.5 จัดบันทึกและจัดเก็บประวัติทางการได้รับรังสี รวมทั้งประเมินผลการได้รับรังสีของบุคคลและแจ้งต่อเจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบโดยตรงเพื่อการดำเนินการขั้นต่อไปอย่างถูกต้อง
 - 2.6 ผู้ปฏิบัติงานต้องปฏิบัติตามกฎข้อบังคับในการปฏิบัติงานทางรังสีอย่างเคร่งครัด เช่น ต้องมีเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล เป็นต้น

ภาคผนวก ฉ.

ชื่อและที่มา

La

แลนทาถัม (Lanthanum) จากภาษากรีก "lanthanein" แปลว่า "ถูกซ่อนอยู่" หรือ "ถูกปกปิดไว้" เพราะปนอยู่ในออกไซด์ผสม ซึ่งหลงเชื่ออยู่นานถึง 36 ปี ว่าเป็นซีเรียมบริสุทธิ์

Ce

ซีเรียม (Cerium) จากชื่อของดาวเคราะห์น้อย "ceres" โคจรอยู่ระหว่างดาวอังคารและดาวพฤหัสบดี ซึ่งถูกค้นพบเมื่อ พ.ศ. 2346 และเป็นปีเดียวกันกับที่ค้นพบธาตุซีเรียม

Pr, Nd

เพรซีโอดีเมียม และ นีโอดีเมียม (Praseodymium and Neodymium) พ.ศ. 2386 Mosander ค้นพบแลนทานัม คู่กับ "didymium" (จากภาษากรีก คือ "didymium" แปลว่า "ฝาแฝด") และเชื่อว่า didymium เป็นธาตุหายากเพียงธาตุเดียวต่อมา พ.ศ. 2428 Auer จึงพบว่า เป็น 2 ธาตุปนกัน ได้แก่ เพรซีโอดีเมียม และ นีโอดีเมียม ชื่อของธาตุทั้งสองนี้มาจากภาษากรีกว่า "prasios" รวมกับ "didymos" แปลว่า "ฝาแฝดสีเขียว" และ "neos" รวมกับ "didymos" แปลว่า "ฝาแฝดรุ่นใหม่" ตามลำดับ

Pm

โพรเมทีียม (Promethium) จากชื่อเทพ "Prometheus" ในเทพปกรณัมของกรีก เทพองค์นี้เป็นผู้ขโมย "ไฟ" ลงมาจากสรวงสวรรค์ให้แก่มนุษยชาติ

Sm

ซาแมเรียม (Samarium) จากชื่อของนายพันโท M. Samarski เจ้าหน้าที่เหมืองชาวรัสเซีย

Eu

ยูโรเพียม (Europium) จากชื่อทวีปยุโรป

Gd

แกโดลิเนียม (Gadolinium) Marugnac ผู้ค้นพบธาตุนี้ ตั้งชื่อตามชื่อนักเคมีชาวฟินแลนด์ Johann Gadolin

Tb

GmviNg,up, (Terbium) ดัดแปลงจากชื่อเมือง "Ytterby" ในประเทศสวีเดน ซึ่งเป็นแหล่งแร่ของธาตุหายากเมื่อคราวพบในครั้งแรก

Dy

ดิสโพรเซียม (Dysprosium) เป็นธาตุหายากหายๆ ที่ถูกค้นพบ จึงได้ชื่อนี้จากภาษากรีก "dysprositos" แปลว่า "ยากที่จะไปถึง"

Ho

โฮลเมียม (Holmium) จากคำว่า "Thule" เป็นชื่อในภาษาละตินของกรุง สต็อกโฮล์ม

Er

เออร์เบียม (Erbium) ดัดแปลงจากชื่อเมือง "Ytterby" ของสวีเดน Mosander เป็นผู้ค้นพบธาตุเออร์เบียมนี้พร้อมกับเทอร์เบียม ที่จริง Mosander ตั้งชื่อธาตุทั้งสองนี้ไว้สลับกัน แต่ผู้ค้นคว้าในภายหลังเกิดสับสนและเรียกสลับกัน แต่ผู้ค้นคว้าสลับกันในภายหลังเกิดสับสนและเรียกสลับกัน มาจากทุกวันนี้

Tm

ทูลีียม (Thulium) จากคำว่า "Thule" เป็นชื่อโบราณของคำว่า "Scandinavia"

Yb

อิตเทอร์เบียม (Ytterbium) อีกธาตุหนึ่งที่ตั้งตามชื่อเมือง "Ytterby"

การค้นพบ

ธาตุหายากเริ่มเป็นที่สนใจครั้งแรกในประเทศสวีเดน ตรงกับสมัยกรุงรัตนโกสินทร์ของไทยเพิ่งเริ่มต้นได้เพียงสี่ห้าปี โดยใน พ.ศ. 2330 นายพันโท C.A. Arrhenius แห่งกองทัพบก สวีเดน ได้พบแร่สีดำที่มีลักษณะพิเศษต่างไปจากแร่อื่นๆ ที่พบจากเหมืองเดียวกันในเมืองชื่อ Ytterby ซึ่งเป็นเมืองเล็กๆ ใกล้กรุงสต็อกโฮล์ม และอีก 7 ปีต่อมาในปี พ.ศ. 2337 (ห่างจากปัจจุบันราว 200 ปี) นักเคมีชาวฟินแลนด์ชื่อ Johann Gadolin ก็สามารถ แยกสารประกอบออกไซด์ของธาตุหายากออกจากแร่สีดำดังกล่าวได้เป็นครั้งแรกและเรียกว่า "yttria" ถัดมาอีก 6 ปี ใน พ.ศ. 2346 ออกไซด์ของธาตุหายากอีกชนิดหนึ่ง ก็ถูกค้นพบในแร่ที่ได้มาจากเมืองชื่อ Bastnas (ในประเทศสวีเดนเช่นกัน) คราวนี้ให้ชื่อว่า "ceria" และจากคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันมากของธาตุหายากแต่ละธาตุนั้นเอง ทำให้ในขณะนั้นเชื่อกันว่าทั้ง yttria และ ceria เป็นสารประกอบออกไซด์ของธาตุเพียงธาตุเดียว แต่จากการค้นคว้าในเวลาต่อมาก็พบว่า ทั้งคู่เป็นสารประกอบออกไซด์ของธาตุหายากหลายธาตุผสมกัน และต้องใช้เวลาต่อจากนั้นมาอีกกว่า 100 ปี จึงจะสามารถแยกธาตุหายากออกได้ครบทุกธาตุ

เป็นเวลานานถึง 160 ปีทีเดียว (พ.ศ. 2330-2490) นับจากครั้งที่ Arrhenius เริ่มให้ความสนใจในแร่สีดำ ที่การค้นคว้าได้ดำเนินไปอย่างยาวนานใหญ่ จนสามารถแยกแยะธาตุหายากเฉพาะตัว (individual rare earth) มาได้ครบทั้ง 15 ธาตุ โดยในช่วงปลายคริสต์ศตวรรษที่ 18 (ในราว พ.ศ. 2400) มีประเด็นที่ถกเถียงกันมากกว่า ธาตุหายากมีทั้งหมดกี่ธาตุ และจะอยู่ที่ตำแหน่งใดบ้างในตารางธาตุ จนมีการศึกษาและทดลองอย่างกว้างขวาง และมีผู้รายงานการพบธาตุใหม่ๆ มากถึง 70 ชนิด โดยอ้างว่าเป็นธาตุหายาก แต่จากการค้นพบ Spectrograph โดย Bunsen ใน พ.ศ. 2402 อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแต่ละธาตุที่มี Spectrum เป็นของตัวเองและจากการค้นคว้าใน พ.ศ. 2456-2457 ของนักฟิสิกส์ 2 ท่าน ชื่อ Niels Bohr และ H.G.J. Moseley นับเป็นการวางแนวทาง ที่ช่วยแก้ปัญหาในประเด็นนี้ได้สำเร็จ โดย Spectrograph เป็นตัวชี้ขาดธาตุหายากที่ปนกันอยู่ ทฤษฎี "hydrogen atom" ของ Bohr ซึ่งให้เห็นจำนวนธาตุหายากที่จะมีได้ไม่เกิน 15 ธาตุ และผลการทดลองของ Moseley ทำนายว่ามีธาตุหายากอยู่ในธรรมชาติเพียง 14 ธาตุ และมีที่ว่างสำหรับธาตุที่ 15 คือ ธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 61 โดยธาตุนี้ถูกอ้างว่า "ค้นพบ" และถูกแย้งว่า "ไม่ใช่" กันขนานใหญ่ในช่วงทศวรรษ พ.ศ. 2463-2473 โดยไม่มี ผู้ใดประสบความสำเร็จอย่างแท้จริง จนกระทั่ง พ.ศ. 2490 เมื่อนักวิทยาศาสตร์สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียม (nuclear fission) ได้เป็นผลสำเร็จ ธาตุที่ 61 นี้จึงถูกสกัดออกมาได้และให้ชื่อว่า "โพรมิเทียม" ทั้งนี้เป็นการค้นพบโดย J.A. Marinsky, L.E. Glendenin และ C.D. Coryell จากห้องปฏิบัติการ Oak Ridge National Laboratory ของสหรัฐอเมริกา การทดลอง

ในเวลาต่อมาพบว่าโพรมีเทียมเป็นธาตุรังสีและไม่สามารถพบได้ในธรรมชาติ ตรงกับผลการทดลองของ Moseley ที่พบธาตุหายากในธรรมชาติได้เพียง 14 ธาตุ ทำให้คนเป็นจำนวนมากเสียเวลาไปในช่วง 10 ปี เพื่อค้นหา “โพรมีเทียม” จากแร่ในธรรมชาติ โดยไม่มีโอกาสที่ประสบความสำเร็จได้เลย

การแยกธาตุหายากเฉพาะตัวออกมาเพื่อให้ได้ชื่อว่าเป็น “ผู้ค้นพบ” นั้น เป็นเรื่องยุ่งยากมาก นักวิทยาศาสตร์เป็นจำนวนมากแม้จะได้ทุ่มเทเวลาตลอดชีวิตแต่ก็ยังไม่ประสบความสำเร็จ กรรมวิธีทางเคมีที่ใช้ในระยะแรกได้แก่ การตกตะกอนซ้ำแล้วซ้ำเล่า (fractional precipitation) จนกว่าธาตุหายากที่ได้ค่อยๆ บริสุทธิ์ขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนี้ก็ใช้วิธีการตกผลึก (fractional crystallization) และต่อมาได้พบว่าธาตุหายาก ซึ่งปกติเป็นธาตุที่มีเวเลนซ์ 3 บางธาตุ ได้แก่ ซีเรียม สามารถมีเวเลนซ์ 4 ได้ เมื่อถูกออกซิไดส์และบางธาตุสามารถมีเวเลนซ์ 2 ได้เมื่อถูกรีดิวซ์ ได้แก่ ยูโรเพียม อิตเทอร์เบียม และซาแมเรียม การค้นพบธาตุหายากจึงง่ายขึ้นมาก

ความสำเร็จส่วนใหญ่ของการค้นหาธาตุหายากอยู่ระหว่าง 40-50 ปี ที่ผ่านมานี้ โดยส่วนหนึ่งสืบเนื่องมาจากการทุ่มทุนวิจัยของสหรัฐอเมริกาในโครงการ “Manhattan Project” ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยได้มีการพัฒนาเทคนิคการแยกธาตุหายากขึ้นมา 2 วิธี คือ ion exchange chromatography และ liquid-liquid extraction และกลายเป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในราว 30 ปี มานี้เอง

ไฟจากสวรรค์

การถือกำเนิดของสิ่งมีชีวิตทั้งหลายในโลกนั้น ตามเทพนิยายกรีกเล่าสืบต่อกันมาว่า ซุส (Zeus) ที่เทพบดีได้มอบหมายให้เป็นหน้าที่ของเทพ 2 องค์พี่น้อง คือ โพรมิทิวส (Prometheus) และ เอพิมิวส (Epimetheus) โดย เอพิมิวส ลงมือสร้างสรรพสัตว์ขึ้นก่อน จากนั้น โพรมิทิวส ก็สร้างมนุษย์ที่กอรปด้วยสติปัญญา แล้วจึงนำคบเพลิงหေးขึ้นไปจ่อดวงอาทิตย์จนไฟติด และนำกลับมามอบให้กับมนุษย์ชาติไว้คุ้มครองตนและสร้างสรรคสิ่งต่าง ๆ

มนุษย์ได้มีชีวิตอยู่กันอย่างสุขสำราญตลอด ยุคทอง ที่มีแต่สัตว์สันตฤดู และพืชพันธุ์ธัญญาหารงอกเงยขึ้นเองอย่างอุดม ไม่ต้องออกแรงเพาะปลูกให้เหนื่อยยาก แล้ว ยุคเงิน ก็มาถึง โดยซุส เริ่มเล่นตลกกับมนุษย์ ให้เลิกเกิดมีฤดูกาล ทำให้มนุษย์ต้องผจญกับความร้อนหนาว และต้องลงแรงเพาะปลูกด้วยอุทสาหะมนุษย์จึงเริ่มเห็นห่างต่อการบูชาเทพเจ้าด้วยเครื่องเซ่นสรวง ซุส ก็โกรธและริบ ไฟ กลับคืนไฟแต่ด้วยความรักต่อมนุษย์ชาติที่ตนสร้างขึ้น โพรมิทิวส ก็แอบขโมย ไฟ กลับคืนแก่มนุษย์ ทำให้ ซุส อังพิโรธ และลงทัณฑ์แก่ โพรมิทิวส โดยล่ามด้วยโซ่ไว้บนยอดเขาคอเคซัส กลางวัน

ให้พญาเหยี่ยวตัวหนึ่งมาใช้ดับกินพอดตอนกลางคืนก็ให้ดับกลับงอกคืนกลับจนเต็มเพื่อให้พญาเหยี่ยวใช้กินอีกในวันรุ่งขึ้นวนเวียนอยู่อย่างนี้นานหลายร้อยปี จน เฮอร์คิวลีส (Hercules) มาฆ่าพญาเหยี่ยว และปลดปล่อย โพรมิเทอุส ออกมา

ธาตุ โพรมิเทียม ได้ชื่อจากเทพ โพรมิเทอุส องค์นี้นั่นเอง และเป็นธาตุหายากเพียงธาตุเดียวที่ไม่มีปรากฏอยู่ในธรรมชาติ แต่เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่ได้จากปฏิกิริยาแบ่งแยกนิวเคลียสของยูเรเนียม

โพรมิเทียม มีประโยชน์ใช้ทำพาราน้ำหนัก สำหรับเวลาในที่มืด โดยไม่ต้องเปิดไฟ หรือเรียก โพรมิเทียม ได้ว่าเป็นเหมือน ไฟจากสวรรค์ สมกับที่มาของชื่อที่เดียว

กำเนิด

ธรรมชาติกำเนิดของธาตุหายาก ก็มักเกิดกระจุกกระจายอยู่ทั่วไปมากกว่าจะเกิดรวมรวมกันเป็นหัวแร่ (Concentrates) พบว่า มีแร่เกือบ 200 ชนิดที่มีธาตุหายากปนอยู่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.01 (โดยน้ำหนัก) แต่มีแร่เพียง 10 กว่าชนิดเท่านั้นที่มีปริมาณของธาตุหายากสูงพอที่จะจัดเป็นแหล่งกำเนิดที่สามารถนำมาสกัดธาตุหายาก ได้ในเชิงพาณิชย์และในจำนวนแร่ทั้ง 10 กว่าชนิดนี้มีเพียง 3 ชนิดที่มีปริมาณมากซึ่งประมาณร้อยละ 95 ของธาตุหายากทั้งโลกมีกำเนิด อยู่ในแร่ ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แร่บาสเนไซต์ (bastnaesite) แร่โมนาไซต์ (monazite) และแร่ซีโนไทม์ (xenotime)

เนื่องจากจำนวนธาตุหายากมีถึง 15 ธาตุ โดยทั่วไปจึงมักแบ่งธาตุหายากออกเป็น 2 กลุ่มย่อยได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มเบา หรือ กลุ่มซีเรียม หมายถึง ธาตุหายากที่มีหมายเลขอะตอม 57-63 (รวมทอเรียมหมายเลขอะตอม 90 ด้วย) และธาตุหายากกลุ่มหนัก หรือ กลุ่มอิตเทรียมหมายถึง ธาตุหายากที่มีหมายเลขอะตอม 64-71 (รวมอิตเทรียมและสแกนเดียมหมายเลขอะตอม 21 และ 39 ด้วย) องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ ส่วนใหญ่เป็นธาตุหายากกลุ่มเบา และอยู่ในรูปของสารประกอบฟอสเฟต แหล่งแร่โมนาไซต์ชนิดปฐมภูมิ (primary deposit) ที่สำคัญ ในเชิงพาณิชย์ มีอยู่ไม่มากนักเช่นที่ VanRhynsdorp และ Naboomspruit ในประเทศแอฟริกาใต้ ที่ Colorado ในประเทศสหรัฐอเมริกา และที่ Bayan Obo ในประเทศจีน แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญๆ ส่วนใหญ่แล้ว เป็นแหล่งแร่แบบทุติยภูมิ (secondary deposit) ได้แก่ ลานแร่ (placer) จากการทำแร่ชายหาดต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งพบปะปนอยู่กับแร่หนักอื่นๆ เช่น ดีบุก อิตเมไนต์ รูไทล์ และเซอร์คอน เป็นต้น แหล่งลานแร่ใหญ่ๆ มีอยู่ในประเทศออสเตรเลีย บราซิล อินเดีย จีน มาเลเซีย แอฟริกาใต้ และสหรัฐอเมริกา สำหรับแหล่งแร่โมนาไซต์ของประเทศไทยนั้นมีอยู่ตามแหล่งลานแร่ดีบุกในจังหวัดภาคใต้ นับแต่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ลงไปโดยจัดเป็นหางแร่จากการทำเหมืองแร่ดีบุก เช่น กันกับแร่อิตเมไนต์ รูไทล์ และเซอร์คอน ฯลฯ

แร่สำคัญที่เป็นต้นกำเนิดของธาตุหายาก

ชนิดของสารประกอบ

Bastnaesite	$CeFCO_3$
Monazite	$(Ce, Y) PO_4$
Xenotime	YPO_4
Pyrochlore	$(Na, Ca, Ce)_2 Nb_2 O_6 F$
Loparite	$(Ce, Na, Ca) (Ti, Nb)_2 O_6$
Apatite*	$(Ce, Ce)_3 ((P, Si) O_4)_3 (O, F)$
Perovskite*	$CaTiO_3$
Uraninite	$(U, Th, Ce, Y, Pb) O_2$
Fergusonite	$(Y, Ce, U, Th, Ca) (Nb, Ta, Ti)_2 O_4$
Samarskite	$(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti)_2 O_6$
Euxenite	$(Y, Ca, Ce, U, Th) (Nb, Ta, Ti)_2 O_6$
Cerite	$CaCe_6 Si_3 O_{13}$
Fluocerite	CeF_3
Brannerite	$(U, Ce, Fe, Y, Th)_3 (TiSi)_5 O_{16}$
Gadolinite	$Be_2 FeY_2 Si_2 O_{10}$
Zircon	$(Zr, Th, Y, Ce) SiO_4$

* อีออนของธาตุหายาก เข้าแทนที่ Ca^{++} เพราะมีขนาดใกล้เคียงกัน

ธาตุหายาก กลุ่มเบา

(กลุ่มซีเรียม)

La Ce Pr Nd

Pm Sm Eu

(รวมถึง Ty ด้วย)

ธาตุหายากกลุ่มหนัก

(กลุ่มอิตเทรียม)

Y Tb Dy Ho

Gd Er Tm Yb Lu

(รวมถึง Sc ด้วย)

แร่ซีโนไทม์อยู่ในรูปสารประกอบฟอสเฟตเช่นเดียวกับแร่โมนาไซต์ แต่มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุหายากกลุ่มหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีอิตเทรียมออกไซด์ (Y_2O_3) โดยเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 60 พบมากในถ่านแร่คีนุกในประเทศมาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย ในถ่านแร่หนักอื่นๆ เช่น อิลเมนไนต์

รูไทล์ และเซอร์คอน ในประเทศออสเตรเลีย และจีน และเหมืองแร่ดีบุกในบราซิล

ธาตุหายากในแร่บาสนาไซต์เป็นกลุ่มเบา มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับแร่โมนาไซต์ ซึ่งใกล้เคียงกับความอุดมของธาตุหายากต่างๆ ของเปลือกโลก (crustal abundance data) แต่อยู่ในรูปสารประกอบฟลูออโรคาร์บอเนต มีแหล่งใหญ่อยู่ที่ Mountain Pass ในแคลิฟอร์เนีย แหล่งที่เล็กลงมาอยู่ที่ Korong ใน Burundi (ประเทศในแอฟริกา) แต่แหล่งใหญ่ที่สุดอยู่ที่ Bayan Obo ในแคว้นมองโกเลียใน (Inner Mongolia) ของประเทศจีน โดยกำเนิดร่วมกับแร่โมนาไซต์ในอัตราส่วน 70:30 และเกิดปนอยู่กับแร่เหล็ก ในโอเบียมและฟลูออไรด์ และประมาณว่ามีปริมาณมากถึง 36 ล้านตัน คิดเป็นร้อยละ 90 ของปริมาณสำรองของธาตุหายากทั้งโลก

ปริมาณสำรองของธาตุหายาก

(หน่วย : ล้านตันออกไซด์)

สาธารณรัฐประชาชนจีน	36,000,000
สหรัฐอเมริกา	5,500,000
อินเดีย	1,800,000
ออสเตรเลีย	680,000
สหภาพรัสเซียเดิม	450,000
แคนาดา	164,000
มาเลเซีย	30,000
บราซิล	20,000
ไทย	1,000
อื่นๆ	174,000

