

รายการอ้างอิง



1. Clifford G. Brown and Leonard G. Sherrington. Solvent extraction used in industrial of rare earths. J.chem. tech. Biotechnol.1979.
2. Helgorsky and Levegue. Separation of rare earths by liquid-liquid extraction. The Rhone poulenc Research Center at Aubervilliers. 1982.
3. ปิยะสาร ประเสริฐธรรม หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2536.
4. Moller E. Liquid-Liquid Extraction. Frankfurt : Weinheim , 1978.
5. Cusack R. W. A Fresh look at Liquid-Liquid Extraction. Chemical Engineering , 98, 2(1991) : 66-76.
6. Laddha G.S. and Degaleesan T.E. Transport phenomena in liquid extraction. New Delh; tata : Mc Graw-Hill Book Company ,1979.
7. Ritcey G.M. and Ashbrook A.W. Solvent extraction principles and applications to process metallurgy. Part 1, Canment Dept. Enery Mines & Resurces ottawa and Eldorado Nuclear Research&Development Div.,Ottawa, 1984.
8. สิรินาฏ เลาะห์โรจนพันธ์ และ อุทัยวรรณ อินทร์เจริญ การศึกษาลักษณะที่เหมาะสมในการสกัดแยกซีเรียมออกจากแอมเอิร์ทผสม กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ,2540.
9. Fike F.P.et.al. The Performance Contractor for Liquid-Liquid Extraction . Progress Report No3, North Cardina : Raleigh , 1954.
10. Hanson A. Recent advances in liquid-liquid extraction. (n.p.) :Pergamon Press,1968.
11. พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์ และ สุรศักดิ์ พงษ์พันธุ์สุข. ศึกษาลักษณะการทำงานของระบบ mixer-settler ของ Krebe. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ , 2531.
12. จารุณี ไกรแก้ว . การออกแบบและไฮโดรไดนามิกส์ของ mixer-settler. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ , 2531.
13. Rushton J.H. and Oldshue J.Y. Chem.Eng.Progr. 49 (1957):161.
14. Laity, D.S.and Treybal R.E. AI CH E J. 8 (1957):176.

15. Sherrington L. Commercial process for rare earth and thorium. Workingham United Kingdom , 1972.
16. Sodenhoff K., Wilkins D. and Ring R. The solvent extraction of cerium from sulphate Solutions Mini-Plant Trials. Materials Science Forum .(1999) :131-317.
17. Ffletcher J.M. and Hardy C.J. Extraction of metal nitrates by TBP. HNO₃. Nuclear Science and engineering , 16(1963): 421-427.
18. Perry , Robert H. et al. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Malaysia:McGraw-Hill,1979.
19. Donald F. Peppard. et al. Separation of rare earths by solvent extraction. United State Patent Office,(1960) : 955-913.
20. Renato G. Bautista. The Chemical reactions of tributyl phosphate in the solvent extraction of metals. Hydrometallurgical Process Fundamentals, 1984.
21. Bird R. Byron. Transport phenomena . Joyn Wiley & Sons, 1960.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ตารางผลการทดลอง

ตาราง ก.1 การทดลองหาความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำผสม กับ น้ำมันก๊าด
(1:1) ดีที่สุด

เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ : น้ำมันก๊าด						
	100 rpm	200 rpm	300 rpm	400 rpm	500 rpm	600 rpm	700 rpm
5	0.11	0.17	0.33	0.66	0.90	0.90	0.94
10	0.11	0.21	0.48	0.81	0.90	0.90	0.94
15	0.11	0.21	0.53	0.85	0.90	0.90	1.00
20	0.11	0.21	0.53	0.85	0.90	1.00	1.00
25	0.14	0.25	0.6	0.85	1.00	1.00	1.00
30	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
35	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
40	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
45	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
50	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
55	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00
60	0.14	0.25	0.53	0.85	1.00	1.00	1.00

ตาราง ก.2 การทดลองหาความเร็วรอบใบพัดที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำผสมกับ น้ำมันก๊าด (1:2 ถึง 1:5) ดีที่สุด

	เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ : น้ำมันก๊าด						
		100 rpm	200 rpm	300 rpm	400 rpm	500 rpm	600 rpm	700 rpm
1 : 2	5	0.11	0.16	0.17	0.25	0.25	0.33	0.35
	10	0.11	0.16	0.21	0.29	0.33	0.33	0.4
	15	0.14	0.18	0.28	0.34	0.33	0.35	0.45
	20	0.17	0.19	0.28	0.4	0.35	0.37	0.48
	25	0.2	0.21	0.29	0.42	0.37	0.4	0.50
	30	0.21	0.24	0.3	0.42	0.39	0.42	0.50
	35	0.21	0.25	0.31	0.43	0.43	0.46	0.50
	40	0.25	0.26	0.35	0.43	0.44	0.46	0.50
	45	0.26	0.28	0.37	0.43	0.44	0.46	0.50
	50	0.26	0.3	0.4	0.43	0.44	0.46	0.50
	55	0.27	0.32	0.4	0.43	0.44	0.46	0.50
	60	0.27	0.33	0.42	0.43	0.44	0.46	0.50
1 : 3	5	0.05	0.07	0.11	0.11	0.12	0.12	0.14
	10	0.10	0.11	0.13	0.17	0.23	0.24	0.22
	15	0.12	0.13	0.14	0.21	0.24	0.26	0.30
	20	0.12	0.14	0.14	0.22	0.26	0.29	0.30
	25	0.12	0.14	0.16	0.26	0.27	0.29	0.30
	30	0.12	0.16	0.17	0.26	0.29	0.29	0.30
	35	0.12	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30
	40	0.13	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30
	45	0.13	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30
	50	0.13	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30
	55	0.13	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30
	60	0.13	0.17	0.17	0.26	0.28	0.29	0.30

	เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ : น้ำมันก๊าด						
		100 rpm	200 rpm	300 rpm	400 rpm	500 rpm	600 rpm	700 rpm
1 : 4	5	0.02	0.03	0.11	0.06	0.06	0.08	0.08
	10	0.03	0.04	0.13	0.06	0.08	0.10	0.14
	15	0.04	0.05	0.14	0.08	0.10	0.11	0.15
	20	0.05	0.08	0.14	0.11	0.12	0.16	0.17
	25	0.06	0.08	0.16	0.12	0.13	0.17	0.19
	30	0.07	0.10	0.17	0.14	0.19	0.19	0.20
	35	0.07	0.10	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
	40	0.09	0.11	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
	45	0.11	0.11	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
	50	0.11	0.11	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
	55	0.11	0.11	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
	60	0.10	0.11	0.17	0.16	0.17	0.19	0.20
1 : 5	5	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06
	10	0.02	0.03	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06
	15	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.11
	20	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.11	0.14
	25	0.05	0.06	0.08	0.06	0.09	0.11	0.16
	30	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.16
	35	0.07	0.07	0.08	0.10	0.11	0.13	0.17
	40	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.14	0.17
	45	0.07	0.06	0.09	0.11	0.13	0.17	0.17
	50	0.07	0.09	0.10	0.11	0.14	0.17	0.17
	55	0.07	0.09	0.10	0.13	0.14	0.18	0.18
	60	0.07	0.10	0.10	0.14	0.16	0.18	0.18

ตาราง ก.3 การทดลองหาความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำผสม กับ น้ำมันก๊าด
(2:1 ถึง 5:1) ดีที่สุด

	เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ : น้ำมันก๊าด						
		100 rpm	200 rpm	300 rpm	400 rpm	500 rpm	600 rpm	700 rpm
2 : 1	5	5.43	4.00	3.44	3.39	3.08	2.63	2.41
	10	4.33	3.74	3.16	3.00	2.84	2.44	2.30
	15	4.12	3.44	2.8	2.50	2.38	2.33	2.17
	20	3.95	3.00	2.73	2.33	2.17	2.12	2.00
	25	3.40	2.92	2.63	2.25	2.05	2.03	2.00
	30	3.08	2.88	2.63	2.07	2.03	2.00	2.00
	35	3.00	2.63	2.33	2.07	2.03	2.00	2.00
	40	2.84	2.47	2.17	2.03	2.00	2.00	2.00
	45	2.63	2.44	2.07	2.03	2.00	2.00	2.00
	50	2.60	2.33	2.07	2.03	2.00	2.00	2.00
	55	2.60	2.33	2.07	2.03	2.00	2.00	2.00
60	2.60	2.22	2.07	2.03	2.00	2.00	2.00	
3 : 1	5	7.00	6.40	5.89	5.66	5.25	4.71	4.12
	10	6.4	5.66	4.71	4.40	4.12	3.59	3.44
	15	5.89	4.71	4.12	4.00	4.00	3.44	3.04
	20	4.17	4.12	3.59	3.54	3.44	3.25	2.96
	25	4.00	3.70	3.44	3.25	3.16	3.12	3.00
	30	3.70	3.44	3.08	3.08	3.08	3.08	3.00
	35	3.39	3.12	3.88	3.04	3.00	3.00	3.00
	40	3.12	3.12	3.04	3.04	3.00	3.00	3.00
	45	3.12	3.08	3.04	3.04	3.00	3.00	3.00
	50	3.12	3.08	3.04	3.00	3.00	3.00	3.00
	55	3.12	3.08	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
60	3.12	3.08	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	

ตาราง ก. 4 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมของ น้ำ กับ 10% ตัวสกัดใน น้ำมันก๊าด อัตราส่วน 1:1

เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 100 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 300 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 500 rpm	
	10 % TBP	10 % VA10	10% TBP	10 % VA10	10% TBP	10 % VA10
20	0.17	0.16	0.42	0.38	0.95	0.90
30	0.17	0.17	0.43	0.40	1.00	1.00
40	0.17	0.17	0.43	0.40	1.00	1.00
50	0.17	0.17	0.43	0.40	1.00	1.00
60	0.17	0.17	0.43	0.40	1.00	1.00

ตาราง ก. 5 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมของ น้ำ กับ 20% ตัวสกัดใน น้ำมันก๊าด อัตราส่วน 1:1

เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 100 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 300 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 500 rpm	
	20 % TBP	20 % VA10	20% TBP	20 % VA10	20% TBP	20 % VA10
20	0.15	0.14	0.40	0.35	0.98	0.90
30	0.15	0.14	0.40	0.38	1.00	1.00
40	0.15	0.14	0.40	0.38	1.00	1.00
50	0.15	0.14	0.40	0.38	1.00	1.00
60	0.15	0.14	0.40	0.38	1.00	1.00

ตาราง ก. 6 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมของ น้ำ กับ 30% ตัวสกัดในน้ำมัน
ก๊าด อัตราส่วน 1:1

เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 100 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 300 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 500 rpm	
	30 % TBP	30 % VA10	30% TBP	30 % VA10	30% TBP	30 % VA10
20	0.13	0.12	0.36	0.33	1.00	0.95
30	0.14	0.12	0.36	0.33	1.00	1.00
40	0.14	0.12	0.36	0.33	1.00	1.00
50	0.14	0.12	0.36	0.33	1.00	1.00
60	0.14	0.12	0.36	0.33	1.00	1.00

ตาราง ก. 7 ผลการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้การผสมของ น้ำ กับ 40% ตัวสกัดใน น้ำมัน
ก๊าด อัตราส่วน 1:1

เวลา (นาที)	อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 100 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 300 rpm		อัตราส่วน น้ำ กับ % ตัว สกัดที่ 500 rpm	
	40 % TBP	40 % VA10	40% TBP	40 % VA10	40% TBP	40 % VA10
20	0.13	0.11	0.35	0.30	0.95	0.92
30	0.13	0.11	0.35	0.30	1.00	1.00
40	0.13	0.11	0.35	0.30	1.00	1.00
50	0.13	0.11	0.35	0.30	1.00	1.00
60	0.13	0.11	0.35	0.30	1.00	1.00

ตาราง ก.8 องค์ประกอบของสารป้อน (Composition of mixed rare earth nitrate)

องค์ประกอบ (Composition)	ความเข้มข้น (กรัม/ลิตร)
แลนทานัม (La)	9.15
ซีเรียม (Ce)	15.34
เพรซีโอดีเนียม (Pr)	2.12
นีโอดีเนียม (Nd)	8.31
แรเอิร์ทกลุ่มหนัก (Y,Sm,Gd,Dy แทนด้วย (H.RE.)	5.68
อื่น ๆ (Na,Ca,Fe,Th)	1

หมายเหตุ

สารป้อน (Feed)

- ซีเรียม (Ce) ความเข้มข้น 15.34 กรัม/ลิตร
- แรเอิร์ทตัวอื่น ๆ แทนด้วย (Ln) 25.26 กรัม/ลิตร

ตาราง ก.9 ผลการสกัดแยก Ce ออกจากแร่เอิร์ทผสมด้วยตัวสกัด % TBP

ในน้ำมันก๊าดอัตราส่วน(1:1) ความเร็วรอบใบพัดกวน 500 รอบ/นาที ที่สภาวะคงที่

	องค์ประกอบ สารป้อน	ความเข้มข้น สารป้อน (กรัม/ลิตร)	Raf. (กรัม/ลิตร)	Extract (กรัม/ลิตร)	Loss (กรัม/ลิตร)	อัตราส่วน Extract/Ref.
10%TBP	La	9.15	9.00	0.14	0.01	
	Ce	15.34	11.00	0.12	0.22	
	Pr	2.12	2.07	0.04	0.01	
	Nd	8.31	6.61	1.61	0.09	
	H.R.E.	5.68	4.00	1.59	0.04	
	Ln	25.26	21.7	3.38	0.18	0.16
	Ce	15.34	11.02	4.15	0.17	0.38
20%TBP	La	9.15	7.67	1.37	0.11	
	Ce	15.34	9.80	5.15	0.39	
	Pr	2.12	2.00	0.11	0.01	
	Nd	8.31	6.02	2.13	0.16	
	H.R.E.	5.68	4.50	1.09	0.09	
	Ln	25.26	20.79	4.70	0.37	0.25
	Ce	15.34	9.80	5.20	0.39	0.59
30%TBP	La	9.15	7.04	1.92	0.19	
	Ce	15.34	7.70	7.02	0.62	
	Pr	2.12	1.78	0.31	0.03	
	Nd	8.31	5.94	2.17	0.20	
	H.R.E.	5.68	4.20	1.35	0.13	
	Ln	25.26	18.96	5.75	0.55	0.30
	Ce	15.34	7.70	7.02	0.62	0.91
40%TBP	La	9.15	7.00	1.94	0.21	
	Ce	15.34	3.02	11.07	1.20	
	Pr	2.12	1.40	0.65	0.07	
	Nd	8.31	3.90	3.07	0.34	
	H.R.E.	5.68	3.65	1.82	0.21	
	Ln	25.26	14.95	9.48	0.83	0.44
	Ce	15.34	3.02	11.07	1.20	2.50

ตาราง ก.10 ผลการสกัดแยก Ce ออกจากแร่เอิร์ทผสมด้วยตัวสกัด %VA10

ในน้ำมันก๊าดอัตราส่วน (1:1) ความเร็วรอบใบพัดกวน 500 รอบ/นาที ที่สภาวะคงที่

	องค์ประกอบ สารป้อน	ความเข้มข้น สารป้อน (กรัม/ลิตร)	Raf. (กรัม/ลิตร)	Extract (กรัม/ลิตร)	Loss (กรัม/ลิตร)	อัตราส่วน Extract/Ref.
10%VA10	La	9.15	7.21	1.86	0.08	
	Ce	15.34	14.20	1.09	0.05	
	Pr	2.12	2.02	0.09	0.01	
	Nd	8.31	7.80	0.50	0.01	
	H.R.E.	5.68	5.35	0.31	0.02	
	Ln	25.26	20.36	2.77	0.12	0.14
	Ce	15.34	14.20	1.09	0.05	0.08
20%VA10	La	9.15	6.91	2.10	0.14	
	Ce	15.34	13.95	1.31	0.08	
	Pr	2.12	2.00	0.11	0.01	
	Nd	8.31	7.70	0.57	0.04	
	H.R.E.	5.68	5.29	0.37	0.02	
	Ln	25.26	21.90	3.15	0.21	0.14
	Ce	15.34	13.95	1.31	0.08	0.09
30%VA10	La	9.15	6.20	2.74	0.21	
	Ce	15.34	13.12	2.06	0.16	
	Pr	2.12	1.71	0.38	0.03	
	Nd	8.31	7.40	0.85	0.06	
	H.R.E.	5.68	5.00	0.64	0.04	
	Ln	25.26	20.31	4.57	0.34	0.23
	Ce	15.34	13.12	2.06	0.16	0.15
40%VA10	La	9.15	5.20	3.59	0.36	
	Ce	15.34	12.35	2.72	0.27	
	Pr	2.12	1.67	0.41	0.04	
	Nd	8.31	2.02	1.17	0.12	
	H.R.E.	5.68	4.92	0.70	0.06	
	Ln	25.26	18.81	5.87	0.58	0.31
	Ce	15.34	12.35	2.72	0.27	0.22

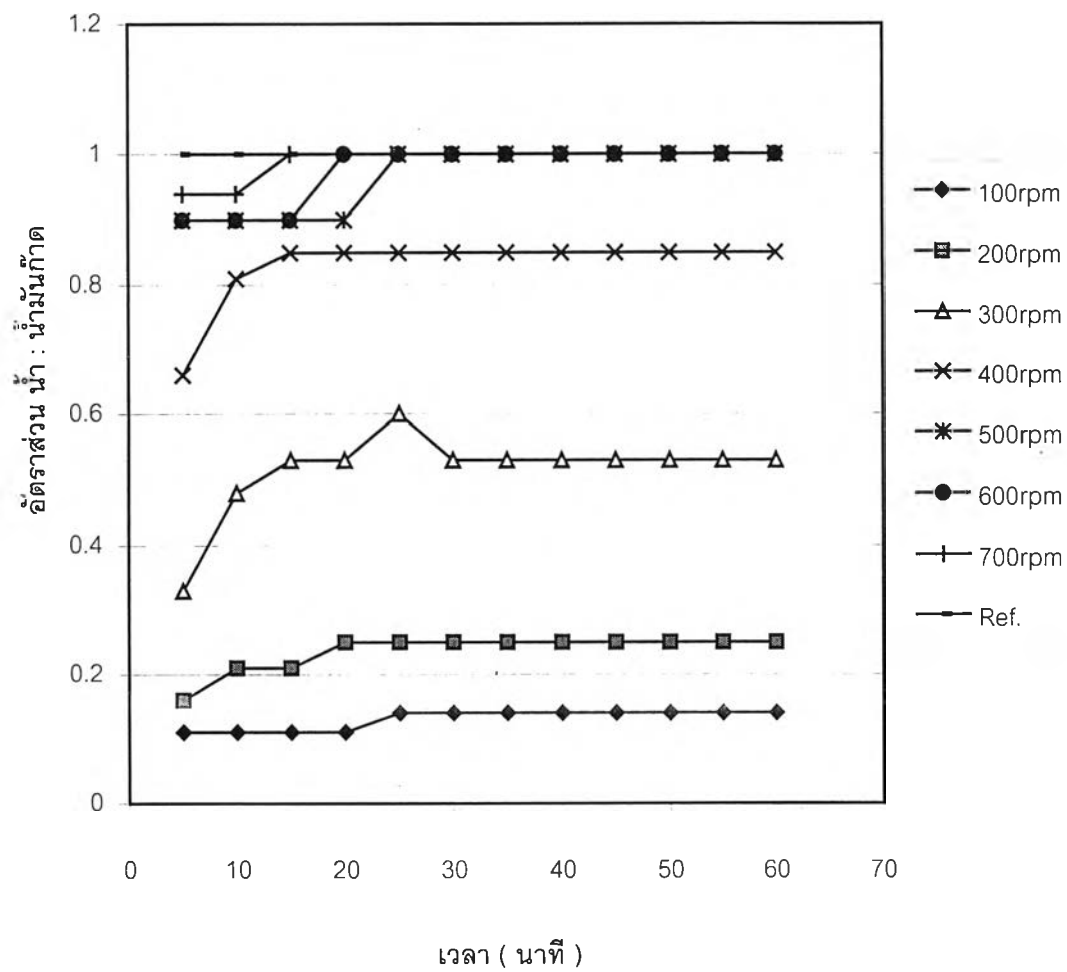
ตาราง ก.11 ผลการสกัดแยก Ce ออกจากเรเอิร์ทผสมแสดงในรูปค่า Separation Factor และค่า Selectivity ของตัวสกัด TBP กับ VA10

%ตัวสกัดในน้ำมันก๊าด	Separation factor Ce - Ln	Selectivity Ce / Ln
10%TBP	2.37	1.20
20%TBP	2.57	1.20
30%TBP	3.33	1.20
40%TBP	5.68	1.20
10%VA10	0.57	0.40
20%VA10	0.64	0.40
30%VA10	0.65	0.40
40%VA10	0.71	0.41

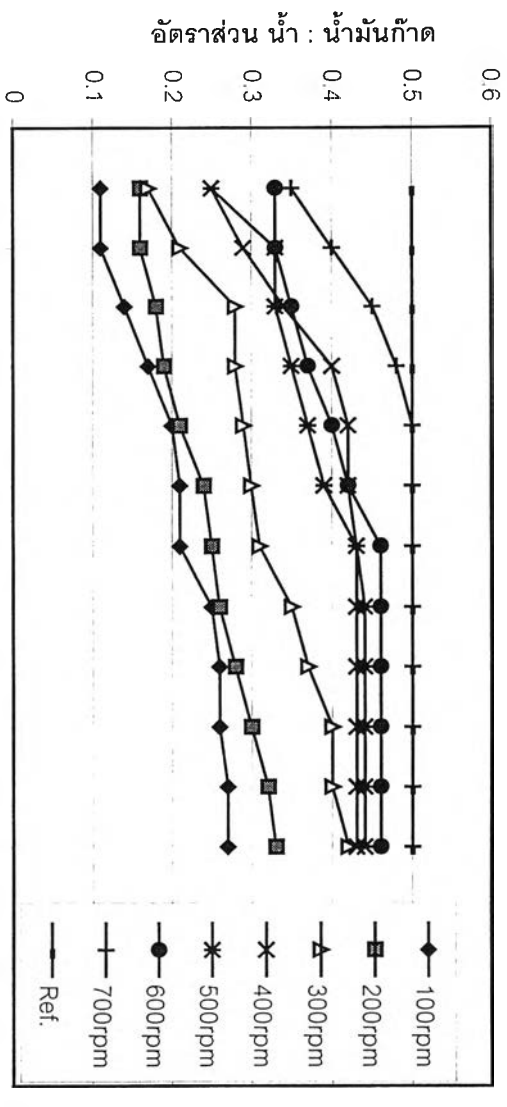
ตาราง ก.12 ผลการสกัดแยก Ce ออกจากแบริทผสมของตัวสกัด TBP กับ VA10 แสดงค่า % การสกัด ,% recovery และ %L ของ Ce และ Ln คือแบริทตัวอื่นๆ

	%การสกัด, Ce	% recovery ,Ce	% L ,Ce
10%TBP	18.7	26.86	1.43
10%VA10	9.15	7.11	0.32
20%TBP	24.40	33.57	2.54
20%VA10	10.24	8.54	0.52
30%TBP	33.60	45.76	4.04
30%VA10	15.20	13.76	1.04
40%TBP	49.50	65.64	8.14
40%VA10	21.05	17.73	1.76

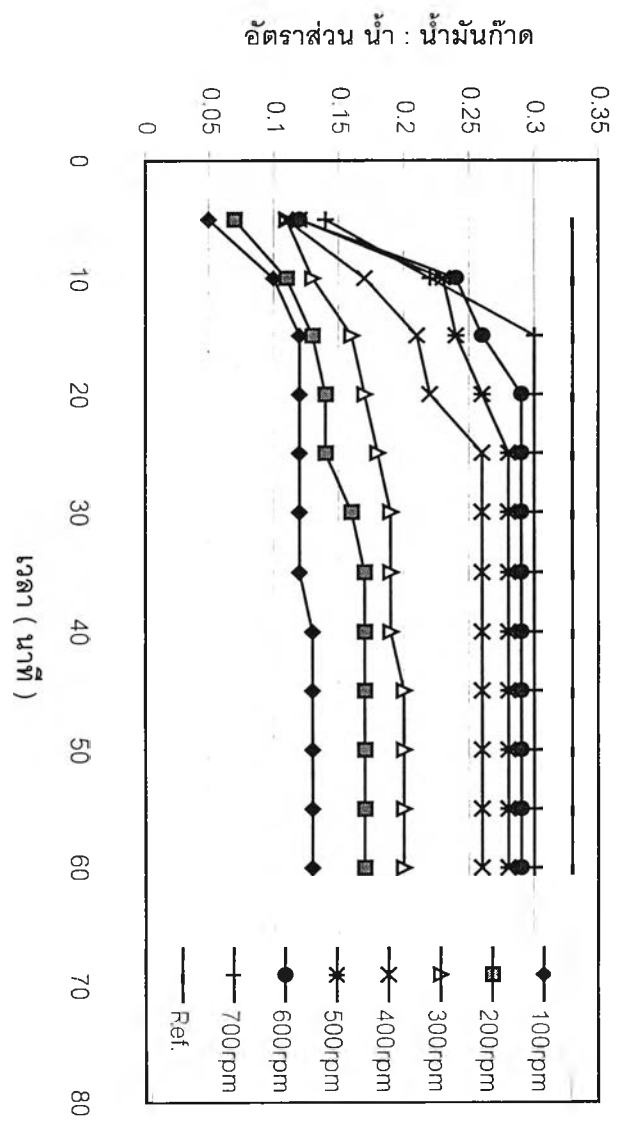
	%การสกัด, Ln	% recovery ,Ln	% L ,Ln
10%TBP	18.7	26.86	1.43
10%VA10	9.15	7.11	0.32
20%TBP	24.40	33.57	2.54
20%VA10	10.24	8.54	0.52
30%TBP	33.60	45.76	4.04
30%VA10	15.20	13.76	1.04
40%TBP	49.50	65.64	8.14
40%VA10	21.05	17.73	1.76



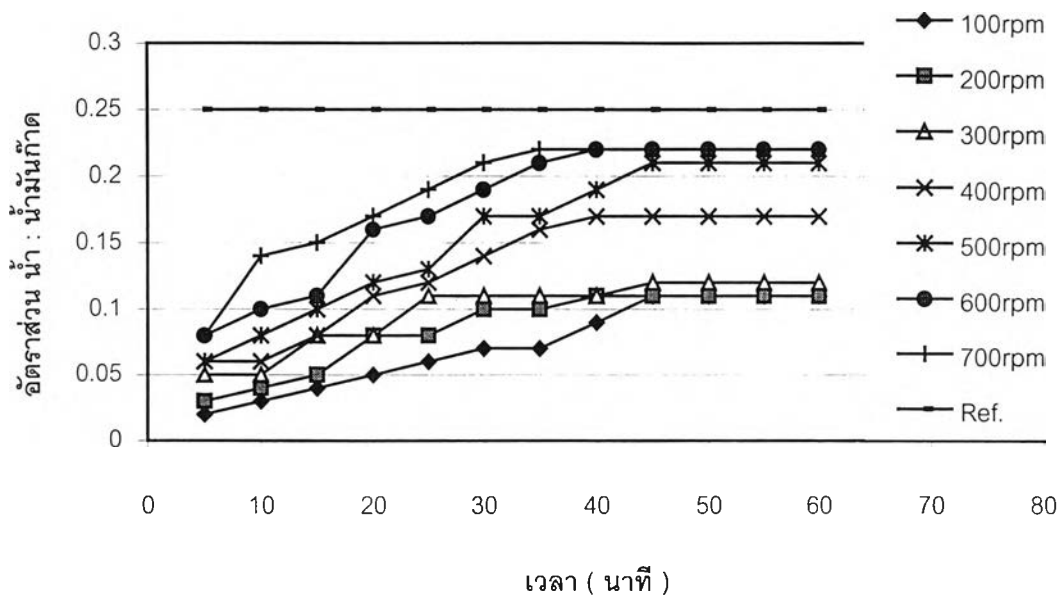
รูปที่ ก.1 การหาความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมที่ทำให้การกระจายน้ำในของเหลวผสม ดีที่สุด ปริมาณน้ำ 50%



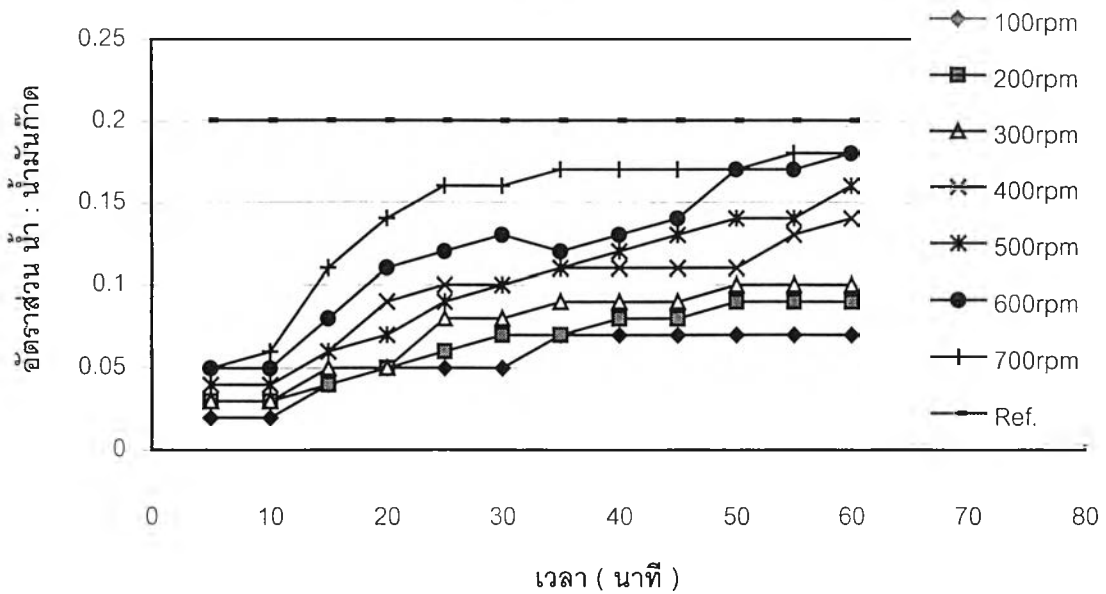
(ก)



(ข)

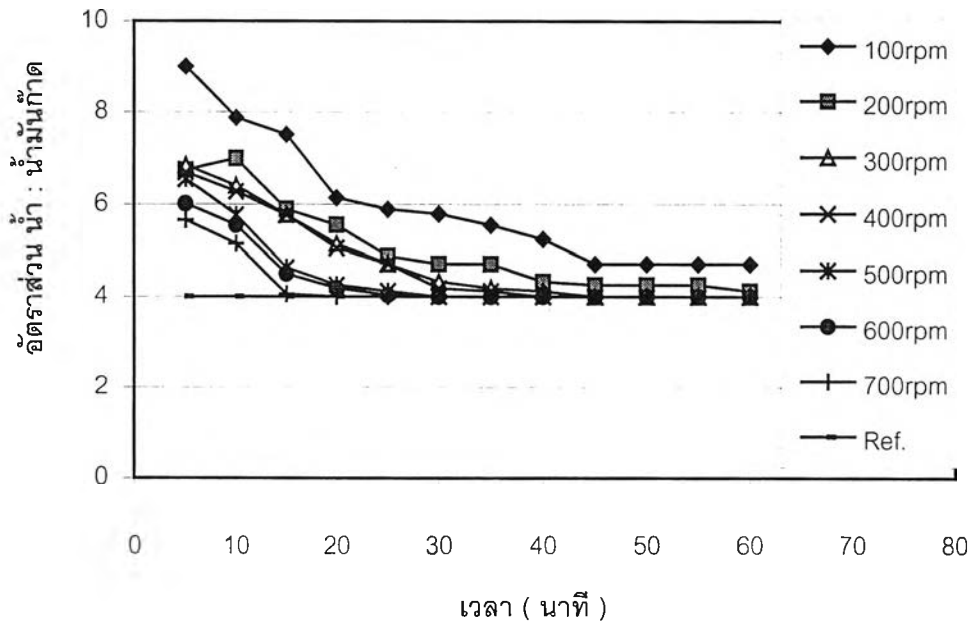


(ค)

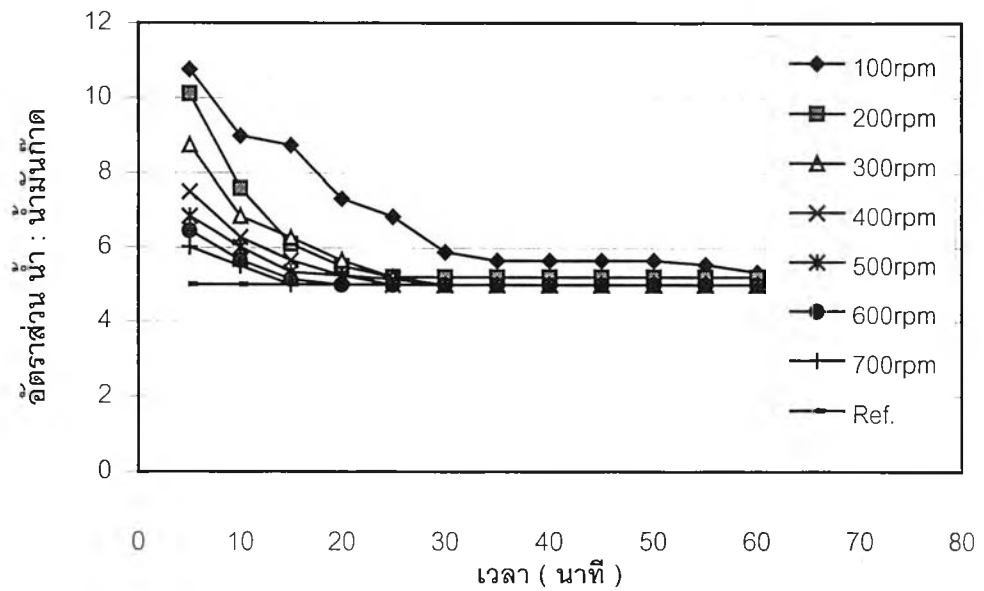


(ง)

รูปที่ ก.2 การหาความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมที่ทำให้การกระจายน้ำในของผสมผสมดีที่ ปริมาณน้ำ (ก) 33.0% , (ข) 25.0% , (ค) 20.0% และ (ง) 16.7%

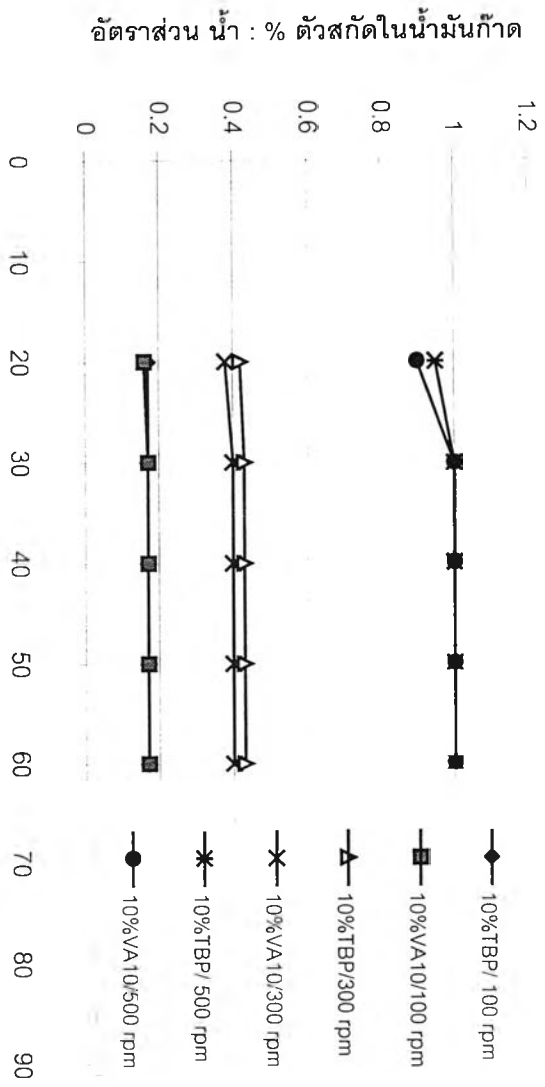


(ค)

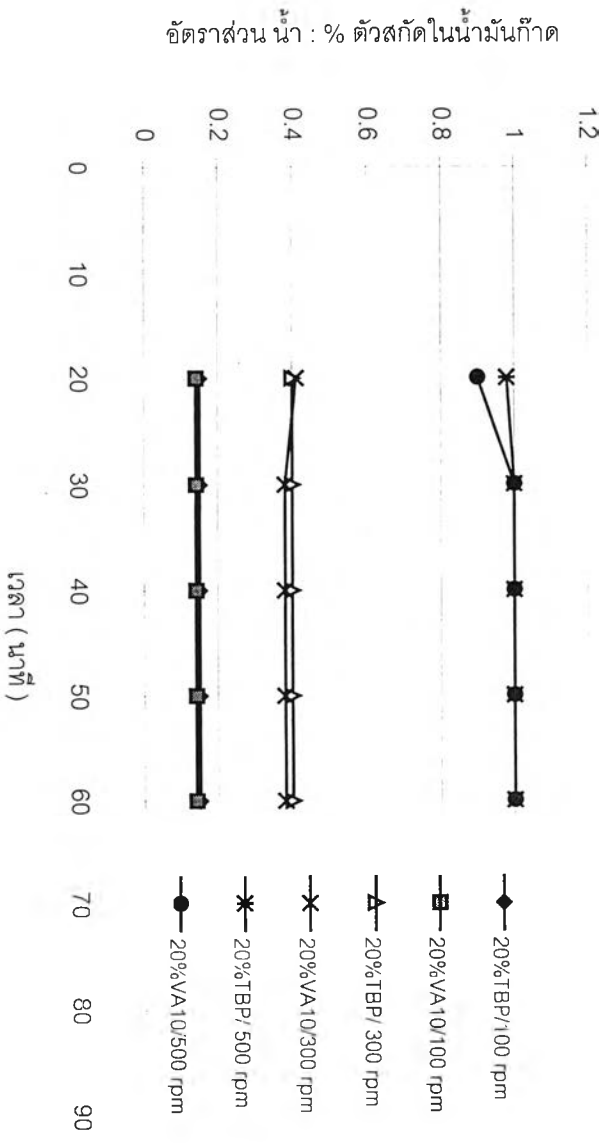


(ง)

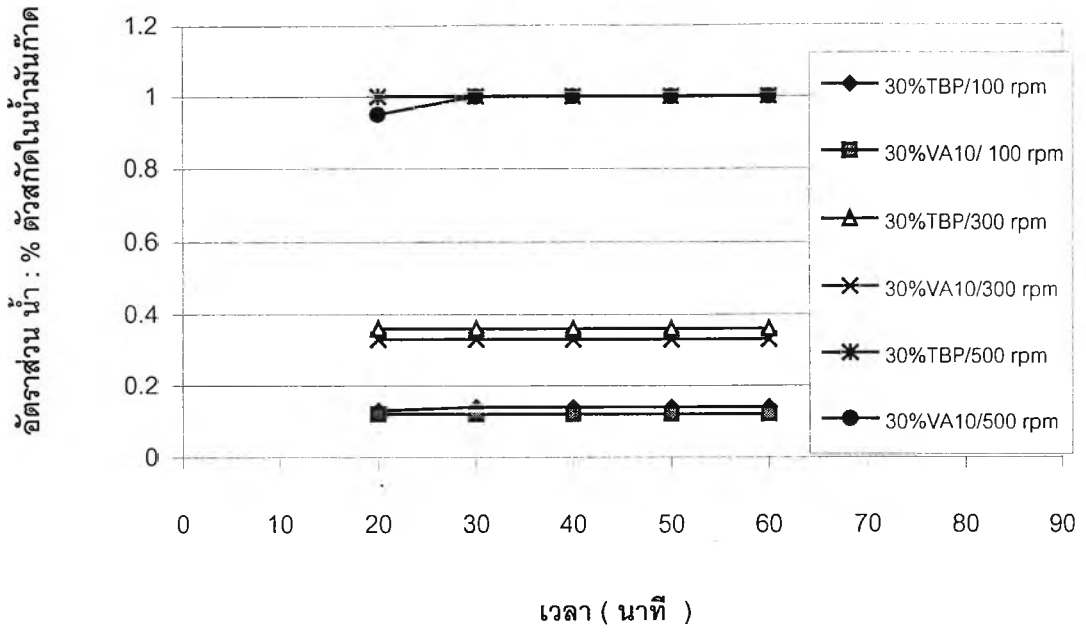
รูปที่ ก.3 การหาความเร็วรอบใบพัดกวนที่เหมาะสมที่ทำให้การกระจายน้ำในของเหลวผสมดีที่
สุด ปริมาณน้ำ (ก) 66.7% , (ข) 75.0% , (ค) 80.0% และ (ง) 82.0 %



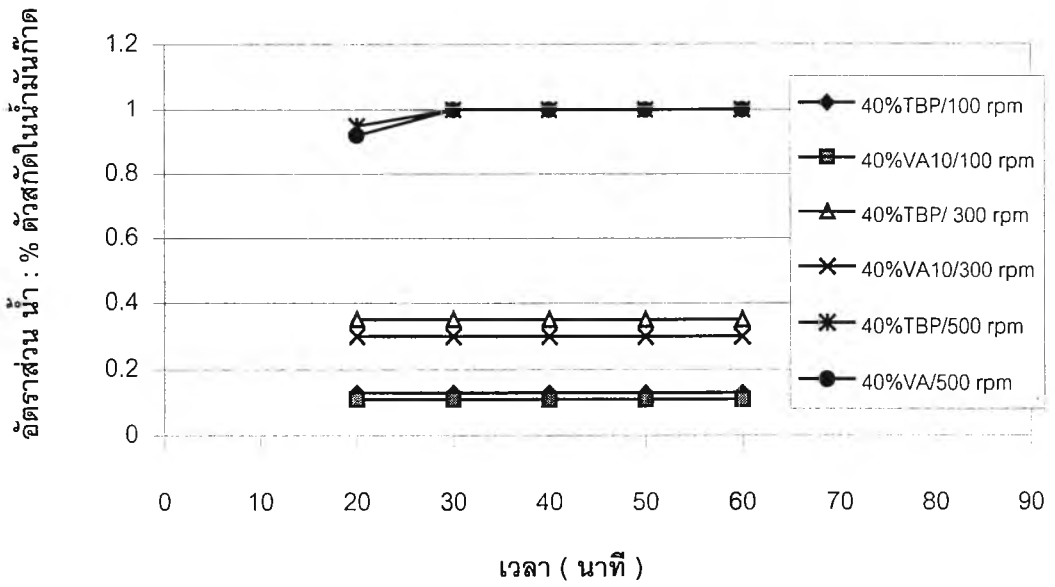
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ ก.4 เปรียบเทียบผลการกระจายน้ำในของเหลวผสม(%ตัวสกัด 2 ชนิดในน้ำมันก๊าด ปริมาณน้ำ 50% เข้มข้นของตัวสกัด (ก) 10% , (ข) 20% , (ค) 30% , (ง) 40%

ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติของตัวสกัด และ ตัวเจือจาง

1. Versatic acid (VA10)

สูตรโมเลกุล [(C₅ H₁₁ C₂ H₅ CH₃) CCOOH]

1.1 Specifications

Average molecular weight	175
Colour maximum (Hazen Units)	100
Acid value (mg koh/ g)	318 – 330
Water maximum (% m/m)	0.1
Appearance	Clear Liquid

1.2 Typical physical properties

Density at 25 °C (kg /m ³)	920
Boiling rang at 760 mmHg (°C)	270 - 280
Melting point (°C)	< - 30
Vapour pressure at 20 °C (kpa)	< 0.02
Flash point (PMC) (°C)	129
Miscibility with water	Negligible
Purity (% m/m)	90 min
Viscosity at 25 °C (Cp)	4.0

2. Tri-n-butylphosphate (TBP)

สูตรโมเลกุล $[(C_4H_9O_3)P=O]$

2.1 Specifications

Average molecular weight	266
Colour maximum (Hazen Units)	50
Acid value (mg koh/ g)	0.07
Water maximum (% m/m)	0.05
Appearance	Clear Liquid
N-Butanol maximum (% m/m)	0.2

2.2 Typical physical properties

Density at 25 C (kg /m)	975
Boiling rang at 760 mmHg (°C)	280 - 290
Melting point (°C)	-
Vapour pressure at 25 °C (Kpa)	-
Flash point (PMC) (°C)	135
Miscibility with water	0.01
Purity (% m/m)	99.0
Viscosity at 25 C (°Cp)	3.32

3. น้ำมันก๊าด (Kerosene , Undyed)

3.1 Specification

Copper strip Corrosion (G hrs,50°C)	max 1
Colour maximum (astmd 156)	min.25
Appearance	Clear Liquid

3.2 Typical physical properties

Density at 25 °C (kg /m ³)	785
Flash point (PMC) (°C)	38
Miscibility with water	Negligible
Purity (% m/m)	98.0
Viscosity at 25 °C (Cp)	2



ภาคผนวก ค.

การใช้ประโยชน์ซีเรียมในอุตสาหกรรมประเภทต่าง ๆ

1. อุตสาหกรรมเคมี-ตัวเร่งปฏิกิริยา

- ใช้ซีเรียมเป็นตัวผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการสังเคราะห์แอมโมเนียเพื่อลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาจาก 450-550 องศาเซลเซียส เป็น 400-470 องศาเซลเซียส
- ใช้ซีเรียมหรือซีเรียมเป็นส่วนผสมของตัวเร่งปฏิกิริยา ดูดซับของเสียจากการเผาไหม้ของน้ำมันเครื่องยนต์ (Catalytic Converter) ซึ่งตามปกติจะต้องใช้สารถึง 3 ชนิด คือ แพลทินัม โรเดียม และ แพลเลเดียม ผสมกันและมีราคาแพง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แพลทินัม การใส่ธาตุหายากมาผสมช่วยให้สามารถใช้แพลเลเดียมเพียงธาตุเดียวได้ ซึ่งมีราคาถูกกว่า เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายลดลงร้อยละ 30-50
- ใช้ซีเรียมเป็นสารกันน้ำออกแทนตะกั่วได้ดีและช่วยลดมลพิษ

2. อุตสาหกรรมแก้วและเซรามิก

- ใช้ซีเรียมออกไซด์และยูโรเพียมออกไซด์ผสมในเลนส์ที่ให้มีสีเข้มเมื่อถูกแสงแดดและใสเมื่ออยู่ในร่ม (Phototropic Lens)
- ใช้ซีเรียมออกไซด์และนีโอไดเนียมออกไซด์ผสมในแก้วที่ดูดแสงในช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต เพื่อทำภาชนะบรรจุเบียร์ อาหาร และยาที่ไวต่อแสงในช่วงคลื่นนี้
- ใช้ซีเรียมออกไซด์ผสมในแก้วสำหรับผลิตจอโทรทัศน์ เพื่อป้องกันมิให้จอเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเนื่องจากถูกอิเล็กตรอน
- ผงซีเรียมออกไซด์ (CeO_2) ใช้สำหรับขัดเลนส์โดยไม่ทำให้เกิดรอยขีด

3. อุตสาหกรรมสี

ผลิตภัณฑ์เซรามิก สีทาอาคาร และสีเคลือบ ที่มีสีแดงซึ่งผลิตจากซีเรียม (Cerium Sulfide, Ce_2S_3) สำหรับทดแทนแมงกานีสแดงที่ใช้ในปัจจุบันมากกว่าปีละ 2 พันตัน ซึ่งผลิตจากโลหะหนัก 2 ชนิดคือ แคลเดเนียม และตะกั่ว

ภาคผนวก ง.
แร่สำคัญที่เป็นต้นกำเนิดของธาตุหายาก

ชนิดของสารประกอบ

Bastnaesite	$CeFCO_3$
Monazite	$(Ce, Y) PO_4$
Xenotime	YPO_4
Pyrochlore	$(Na, Ca, Ce)2Nb_2O_6F$
Loparite	$(Ce, Na, Ca)(Ti, Nb)_2O_6$
Apatite*	$(Ce, Ce)_5((P, Si)O_4)_3(O, F)$
Perovskite*	$CaTiO_3$
Uraninite	$(U, Th, Ce, Y, Pb)O_2$
Fergusonite	$(Y, Ce, U, Th, Ca)(Nb, Ta, Ti)_2O_4$
Samarskite	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
Euxenite	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
Cerite	$CaCe_6Si_3O_{13}$
Fluocerite	CeF_3
Brannerite	$(U, Ce, Fe, Y, Th)_3(TiSi)_5O_{16}$
Zircon	$(Zr, Th, Y, Ce)SiO_4$

* อีออนของธาตุหายาก เข้าแทนที่ Ca^{++} เพราะมีขนาดใกล้เคียงกัน

ธาตุหายาก กลุ่มเบา	ธาตุหายากกลุ่มหนัก
(กลุ่มซีเรียม)	(กลุ่มอิตเทรียม)
La Ce Pr Nd	Y Tb Dy Ho
Pm Sm Eu	Gd Er Tm Yb Lu
	(รวมถึง Sc ด้วย)

แร่ซีโนไทม์อยู่ในรูปสารประกอบฟอสเฟตเช่นเดียวกับแร่โมนาไซต์ แต่มีองค์ประกอบหลักเป็นธาตุหายากกลุ่มหนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีอิตเทรียมออกไซด์(Y_2O_3) โดยเฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 60 พบมาก

ในลานแร่ดีบุกในประเทศมาเลเซีย อินโดเนเซีย และไทย ในลานแร่หนักอื่นๆ เช่น อิลเมนไนต์ รูไทล์ และเซอร์คอน ในประเทศออสเตรเลีย และจีน และเหมืองแร่ดีบุกในบราซิล

ธาตุหายากในแร่บาสนไซต์เป็นกลุ่มเบา มีองค์ประกอบคล้ายคลึงกับแร่โมนาไซต์ ซึ่งใกล้เคียงกับความอุดมของธาตุหายากต่างๆของเปลือกโลก แต่อยู่ในรูปสารประกอบฟลูออโรคาร์บอเนต มีแหล่งใหญ่อยู่ที่ Mountain Pass ในแคลิฟอร์เนีย แหล่งที่เล็กลงมาอยู่ที่ Koronge ใน Burundi (ประเทศในแอฟริกา) แต่แหล่งใหญ่ที่สุดอยู่ที่ Baya Obo ในแคว้นมองโกเลียใน (inner Mongolia) ของประเทศจีน โดยกำเนิดร่วมกับแร่โมนาไซต์ในอัตราส่วน 70:30 และเกิดปนอยู่กับแร่เหล็ก ไนโอเบียมและฟลูออไรต์ และประมาณว่ามีปริมาณมากถึง 36 ล้านตัน คิดเป็น ร้อย 90 ของปริมาณสำรองของธาตุหายากทั้งโลก

ภาคผนวก จ.

กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ใช้โซดาไฟ (NaOH) เข้มข้นในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ซึ่งเรียกว่า "กระบวนการต่าง" (alkali process) ประกอบด้วยกิจกรรมหลัก 3 หลัก คือ

1. การแปรสภาพแร่โมนาไซต์
2. การแยกธาตุวัสดุนิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียมและทอเรียม
3. การแยกธาตุหายากหรือแอรเอิร์ท

เพื่อให้กิจกรรมหลักทั้ง 3 อย่างดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีกิจกรรมสนับสนุนอีก 2 อย่าง ได้แก่

1. กิจกรรมห้องปฏิบัติการเคมีควบคุมคุณภาพ
2. กิจกรรมซ่อมบำรุงและบริการ

การแปรสภาพแร่

ขั้นตอนที่จัดเป็นหัวใจของกิจกรรมแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ได้แก่ การบดแร่ให้ได้แร่โมนาไซต์สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนขนาด #350 เป็นการเพิ่มผิวสัมผัสขณะย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยต่างช่วยให้การย่อยแร่เป็นไปอย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูงและเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของแร่โมนาไซต์ ซึ่งมียูเรเนียมและทอเรียมเจือปนอยู่ด้วย เครื่องบดแร่ที่ใช้จึงได้รับการออกแบบเป็นเครื่องบดแร่และคัดขนาดแร่แบบเปียก

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

แร่ที่ผ่านการย่อยแล้ว จะประกอบด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ของกลุ่มธาตุหายาก และ ยูเรเนียมทอเรียม ซึ่งเมื่อนำไปละลายด้วยกรดเกลือ (HCl) และนำมาเลือกตกตะกอน (selective precipitation) ด้วยด่างเจือจาง (20% NaOH) ความเป็นกรดประมาณ 4.5 สารประกอบไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมจะถูกแยกออกจากกลุ่มธาตุหายาก พร้อมทั้งจะนำไปสกัดแยก ยูเรเนียมและทอเรียมออกจากกัน สำหรับทำวัสดุนิวเคลียร์ต่อไป ส่วนกลุ่มธาตุหายากที่ยังคงเหลือ อยู่ในสารละลายกรดเกลือ 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 ให้สารละลายกรดดินประสิวของยูเรเนียมและทอเรียม เกิดการผสมตัวกับสารละลาย TBP แล้วปล่อยให้แยกชั้นออกจากกันตามธรรมชาติ ยูเรเนียมก็จะถูกละลายเข้าไปอยู่ในชั้นของ TBP ทั้งทอเรียมให้ยังคงละลายอยู่ในสารละลายกรดดินประสิวเช่นเดิม อุปกรณ์พิเศษที่กล่าวถึงนี้มีมากมายหลายแบบแต่ที่เลือกนำมาใช้สกัดยูเรเนียมนี้ ได้แก่ pulsed perforated-plate column

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

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

การแยกธาตุหายาก

ภายหลังการแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกไปจากกลุ่มธาตุหายากจนหมดแล้วยังจะมี สารกัมมันตรังสี ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสลายตัวของยูเรเนียม และทอเรียมตกค้างอยู่บ้าง ดังนั้น ก่อนแยกธาตุหายากต่อไป จึงต้องแยกสารกัมมันตรังสีเหล่านั้นออกไป ซึ่งธาตุหลักในกลุ่มนี้ ได้แก่ เรเดียม (Ra) โดยให้ตกตะกอนร่วมกับแบเรียม แยกออกมาในรูปตะกอนซัลเฟต

การแยกธาตุหายากใช้กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลวโดยใช้ตัวสกัด TBP ในน้ำมันก๊าด แบ่ง การสกัดได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. สกัดซีเรียม (Ce) ออกก่อนโดยใช้ mixer settler
2. สกัดธาตุหายากที่เหลือให้แยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแลนทานัม (La) ปนกับ เพอร์ซีโอดีเมียม (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 หนึ่งนำไปตกผลึกเป็นแรเอิร์ทคลอไรด์ผสม (mixed RECl₃) ซึ่งสามารถนำออกจำหน่ายได้ อีกส่วนหนึ่งนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะตัวด้วยกรรมวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange chromatography) ด้วยกรรมวิธีนี้แม้จะใช้เวลาทำงานนานแต่ธาตุหายากเฉพาะตัวที่ผลิตได้จะมีความบริสุทธิ์สูงและมีราคาสูงมาก

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

การซ่อมบำรุงและบริการ

ในการให้ความสนับสนุนแก่งานการผลิต งานซ่อมบำรุงและบริการ มีหน้าที่และรับผิดชอบ ในการผลิตน้ำบริสุทธิ์ (demineralized water) และน้ำสะอาดสำหรับใช้ในกระบวนการผลิต ตลอดจน น้ำอ่อน (Soft water) สำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำรวมถึงการผลิตไอน้ำสำหรับการทำงาน การกลั่นของกระบวนการผลิต และในกรณีที่กระแสไฟฟ้าขัดข้องก็ได้เตรียมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าดีเซล (diesel generator) ซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าสำรองขึ้นทันทีที่เกิดไฟฟ้าดับ ด้วยกำลังไฟฟ้าที่พอเพียงสำหรับทุกขั้นตอนของการผลิตที่จำเป็นต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังดูแล มาตรฐานปลอดภัยทั้งหมดภายในศูนย์ฯ เช่น ระบบไฟฟ้า ประปา โทรศัพท์ และการกระจายเสียงตามสาย เป็นต้น

สำหรับการซ่อมบำรุงประจำปี หรือการซ่อมเฉพาะหน้า เมื่อเกิดการชำรุดหรือขัดข้องของ เครื่องมือในกระบวนการผลิต เช่น ปั๊ม มอเตอร์ หรือเกิดการแตกรั่วของระบบท่อต่าง ๆ ศูนย์ฯ มีโรงซ่อมบำรุง (workshop) พร้อมด้วยเครื่องมือกล เครื่องมือยนต์ และเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น เครื่องเชื่อม เครื่องกลึง เครื่องตัด เครื่องเจาะ เครื่องไส เครื่องเลื่อย และอุปกรณ์การช่างต่าง ๆ เตรียมไว้แล้วสำหรับรองรับเหตุเหล่านี้

ประวัติผู้เขียน



นางสาวอัมพิกา อภิชัยบุคคล สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพฯ ในปีการศึกษา 2535 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540