

บทที่ 3

โมนาไซต์

3.1 ประวัติ (19,20)

มนุษย์เริ่มนำเอาแร่โมนาไซต์มาใช้เป็นประโยชน์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1885 โดยชาวออสเตรียชื่อ Baron Carl Auer Von Welsbach ได้นำเอาทอเรีย (Thoria) หรือทอเรียออกไซด์ (Thorium oxide) (ThO_2) ที่แยกได้จากแร่โมนาไซต์มาประมาณ 98 - 99% มาทำเป็นของผสมกับซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide) (Ce_2O_3) ประมาณ 1 - 2% เพื่อใช้อาบทำเป็นไส้ตะเกียงเจ้าพายุ เพราะสามารถจะให้แสงสว่างที่จ้าและร้อนแรงกว่า พร้อมทั้งมีกำลังแสงสว่างมากกว่าและ เปลืองกาสน้อยกว่าวัสดุที่เคยใช้มาก่อน ซึ่งทำจากเซอร์โคเนีย (Zirconia) แลนทานา (Lanthana) และอิตเตรีย (Ittria) ดังนั้นต่อมาในปี ค.ศ. 1891 อุตสาหกรรมของทอเรียจึงมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แร่โมนาไซต์ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตทอเรียจึงได้ถูกผลิตขึ้นมามากกว่า 6,000 ตันในปี ค.ศ. 1909 โดยเฉพาะในระหว่างสงครามโลกครั้งที่หนึ่งนั้น มีการใช้ธาตุนี้กันมาก ต่อมาเมื่อเริ่มมีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในปี ค.ศ. 1946 ทอเรียจึงเริ่มมีความสำคัญในทางวัสดุต้นกำลังของพลังงานนิวเคลียร์ เมื่อนักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบกระบวนการเปลี่ยน ^{232}Th ไปเป็น ^{233}U ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ได้ ทำให้ความต้องการทอเรียและแร่โมนาไซต์มีมากยิ่งขึ้น ได้มีการศึกษากระบวนการผลิตและทำให้บริสุทธิ์ของสารประกอบทอเรียจากแร่โมนาไซต์กันเป็นครั้งแรก โดย Battelle Memorial Institute และ Ames Laboratory ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งทำการย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยโซดาไฟและกรดซัลฟูริกเข้มข้น ตามลำดับ

แร่โมนาไซต์มีหลายชื่อ⁽²⁰⁾ คือ เทอร์เนอร์ไรต์ (Turnerite) คริปโตไลต์ (Cryptolite) โมนาซิโตอยด์ (Monazitoid) เอดวาร์ดไซต์ (Edwardsite) คาร์ราฟเวอิต (Karraraveite) เออร์ไดต์ (Urdite) และฟอสฟอเซอร์ไรต์ (Phosphocerite)

3.2 องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์^(19,20,21)

แร่โมนาไซต์เป็นแร่ทอเรียม (Thorium-bearing minerals) ชนิดที่มียูเรเนียมปนอยู่ด้วยที่สำคัญชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยเกลือออร์โธฟอสเฟต (Orthophosphate) ของแรรีเอิร์ททอเรียม และยูเรเนียม โดยมีสูตรทางเคมีเป็น $(Ce, La, Y, Th)PO_4$ ซึ่งมีแรรีเอิร์ทปะปนอยู่ประมาณ 60 - 65% มีทอเรียมอยู่น้อยกว่า 10% และมียูเรเนียมอยู่น้อยกว่า 0.5%⁽¹⁹⁾ โดยส่วนประกอบนี้จะเปลี่ยนไปได้ตามสถานที่กำเนิด ดังแสดงในตาราง 3.1 ซึ่งแสดงถึงผลของการวิเคราะห์แร่โมนาไซต์ที่พบในประเทศต่าง ๆ นอกจากนี้แร่โมนาไซต์ยังมีองค์ประกอบอื่น ๆ อีก ดังแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.1 ส่วนประกอบของแร่โมนาไซต์จากประเทศต่าง ๆ⁽²¹⁾

	ThO ₂	Rare earth oxide	U ₃ O ₈
India	8.9	59.4	0.35
Brazil	6.5	59.2	0.17
United States	3.1	40.7	0.47
South Africa	5.9	46.4	0.12
Malagasy Republic	8.8	46.2	0.41
Liberia	7.2	59.9	Not determined

3.3 กำเนิดของแร่โมนาไซต์ (20)

โดยธรรมชาติทั่วไปแล้ว โมนาไซต์มักจะเกิดเป็นส่วนประกอบของหินแกรนิต ไนส์ (Gneisse) แอปไฟต์ (Aplite) และหินเพกมาไทต์ ซึ่งเกิดร่วมกับหินแกรนิตและหินไซอีนิติก-อิกเนียส (Syenitic igneous rock) ปกติแล้วโมนาไซต์จะเกิดปะปนกับแร่อื่น ๆ เช่น รูไทล์ (Rutile) เซอร์คอน ยูเรนิไนต์ ทอไรด์ เฟอรักูไซไนต์ (Fergusonite) ซามาร์สไกต์ แมกเนไทต์ (Magnetite) แอปเพไทต์ (Appatite) และอิมิไนต์ ในหินดังกล่าวนี้พบกิตจะมีแร่โมนาไซต์ปนอยู่ในปริมาณที่ไม่มากพอ เพราะโดยธรรมชาติแล้วเมื่อหินมีการผุพัง โมนาไซต์ซึ่งเป็นแร่ที่คงทนต่อการผุกร่อนและเป็นแร่หนัก ก็จะหลุดจากหินเดิม เป็นอิสระออกมาตามกระแสและ

ตาราง 3.2 องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์⁽²⁰⁾

Constituent	Percentage range			
	Brazil	Indian and Ceylon	U.S.A.	Malaya and Australia
ThO ₂	1.1-10.1	7.9-10.8	1.2-7.0	3.4-8.4
Ce ₂ O ₃	31.2-32.5	26.7-31.0	31.4-37.3	25.5-33.7
P ₂ O ₅	25.5-29.3	24.6-27.7	18.4-29.3	23.7-27.9
SiO ₂	0-10.1	0.9-2.5	0.3-6.4	0.9-2.2
ZrO ₂	0-5.7		0-3.2	
TiO ₂	0-2.6		0-4.7	
Fe ₂ O ₃	0-4.2	0.8-1.5	0-7.8	0.4-2.8
Al ₂ O ₃	0-0.8	0.1-0.7	0-2.5	0.03-0.8
(La, Di) ₂ O ₃	26.0-36.0	28.5-33.5	0-31.6	30.3-35.5
CaO	0-1.1	0.1-0.8	0-1.2	0.2-0.9
U ₃ O ₈	0.18	0.27	0.15	
MoO ₂	0.01	0.01		
H ₂ O	0-0.9	0.2-2.2	0-0.2	0.5-1.3
RE ₂ O ₃	60.5	59.8	40.1	
Miscellaneous	0-1.2	0-2.7	0-7.7	

กระแสน้ำที่พัดพา จึงมักพบโมนาไซต์ตามหาดทรายโดยอยู่ร่วมกับแร่หนักที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

คือ อิลมิไนต์ ทอง เซอร์คอน แคสสิเทอไรต์ (Cassiterite) รูไทล์ แมกเนไทต์ และการ์-
เน็ต (Garnet) หรือแร่ยูเรเนียมปรมาณู ส่วนโมนาไซต์ชนิดที่เกิดมาจากหินแกรนิตนั้น มักจะพบ
อยู่ในสายแร่ตมุก ปกติแล้วปริมาณโมนาไซต์ที่พบอยู่ในหินดังกล่าวนี้จะมีไม่เกิน 0.1%

3.4 แหล่งแร่โมนาไซต์⁽²⁰⁾

แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญของโลกคือตามชายหาดทรายของอินเดียนและบราซิล โดยเฉพาะ
ในอินเดียนั้น เป็นโมนาไซต์ที่มีความเข้มข้นของทอเรีย (ThO_2) มากที่สุด ประมาณ 40% ของโม-
นาไซต์ที่ผลิตขึ้นในโลก จะมีแหล่งมาจากทางชายฝั่งภาคใต้ของอินเดียน คือรัฐทรวานคอร์ (Tra-
vancore) โดยพบตามชายหาด กองทราย และสันดอนของแม่น้ำ มีปะปนอยู่กับแร่อิลมิไนต์
เซอร์คอน รูไทล์ ซิลลิมาไนต์ (Sillimanite) คยานไนต์ (Kyanite) และควอตซ์ (Quartz)

ส่วนโมนาไซต์ในประเทศอื่นนั้นก็มีพบอยู่ทั่วไป โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกาจะพบตามชาย
ฝั่งตะวันออกที่เป็นชายหาด และบริเวณที่มีสิ่งทีกระแสน้ำพามาทับถม โดยมีในรัฐคาโรไลนา และ
ฟลอริดา และตามชายฝั่งตะวันตกของรัฐแคลิฟอร์เนีย ซึ่งเป็นแหล่งใหญ่แต่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ
แหล่งที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจที่สำคัญคือที่บริเวณรัฐโอคาโฮ โดยมีอยู่ตามทางของกระแสน้ำไหล สิ่ง
ทับถมจากแม่น้ำ และตามทางลาดหรืออาณาบริเวณของหุบเขา ซึ่งเป็นโมนาไซต์ชนิดที่เกิดมาจาก
หินแกรนิตปะปนอยู่กับทอง อิลมิไนต์ แมกเนไทต์ การ์เน็ต รูไทล์ และเซอร์คอน ส่วนแหล่งแร่โม-
นาไซต์ในประเทศอื่น ๆ คือ ศรีลังกา อินโดนีเซีย มาเลเซีย ออสเตรเลีย สหภาพอัฟริกาใต้ และ
พบประปรายที่เกาหลี สเปน อิตาลี อียิปต์ อาร์เจนตินา และอุกานดา

3.5 แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย

แร่โมนาไซต์ในประเทศไทยนั้นจะมีปนอยู่ในซีแร่ประมาณ 3%⁽³⁾ ซึ่งจะเป็นเกลือฟอส-
เฟตของแร่เอิร์ทและทอเรียม โดยมียูเรเนียมปนอยู่เล็กน้อย และจากการวิเคราะห์ตัวอย่างหัว
แร่โมนาไซต์ (โมนาไซต์สะอาดมากกว่า 95%) จากภาคใต้ของประเทศไทย พบว่ามีปริมาณยูเร-
เนียมแปรผันอยู่ระหว่าง 0.2 - 0.8% หรือเฉลี่ย 0.5%⁽⁹⁾ มีทอเรียมออกไซด์ประมาณ 0.1 -
10%⁽³⁾ และมีแร่เอิร์ทประมาณ 50 - 60%⁽⁸⁾

แหล่งแร่โมนาไซต์ในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะเป็นทางภาคใต้ของประเทศไทย ในช่วง
เส้นรุ้ง 7°45' ถึง 9°10' เหนือ⁽²²⁾ โดยเฉพาะที่จังหวัดภูเก็ต ระนอง และพังงา มักมีอยู่ตาม

ลานแร่ดีบุก-จุลแพรม และตามชายหาคทะเลฝั่งตะวันตกของภาคใต้ของประเทศไทย

3.6 คุณสมบัติของแร่ไมนาไซต์^(19,20)

ไมนาไซต์เป็นแร่ที่เปราะแตกง่าย มีขนาดระหว่าง -30 ถึง -150 เมช (mesh) (B.S.S)⁽²⁰⁾ รูปร่างไม่แน่นอนหรืออาจจะ เป็นรูปคอนคอยคัล (Conchoidal) มีรูปผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก เป็นแร่ที่ให้กัมมันตภาพรังสี ถูกดูดไว้ในสนามแม่เหล็กที่ค่อนข้างแรง มีการนำไฟฟ้าต่ำ ปกติจะปรากฏเป็น เม็ดพรวามัทรงกลมหรือรูปไข่ มีสีน้ำตาล น้ำตาลแดง น้ำตาลเหลือง เหลือง และ เหลืองน้ำผึ้งหรือเขียว โดยเฉพาะสีน้ำตาล เหลืองและ เหลืองน้ำผึ้งจะพบมากที่สุด เมื่อนำมาวางบนจาน (Streak plate) จะไม่มีสีและสี เหลืองซีดหรือ เป็นแนวสี เหลือง (Yellowish streak) จะมีความแวววาวเหมือนยาง (Resinous luster) หรือแก้ว (Vitreous) มีความแข็ง 5 - 5.5 ดัชนีหักเหของแสง 1.786 - 1.837 และมีความถ่วงจำเพาะ 4.6 - 5.3 จะไม่หลอมละลายหรือละลายในกรด เกลือ (HCl) แต่จะยุ่ยถ้าใส่ลงในกรดซัลฟูริก เข้มข้นที่เผาให้ร้อน

3.7 การแปรสภาพแร่ไมนาไซต์

การแปรสภาพแร่ไมนาไซต์นั้นมีวิธีการดำเนินงานอยู่ 2 ขั้นตอน ดังนี้

3.7.1 การแต่งแร่ (Ore Concentration)⁽²⁰⁾

เป็นกระบวนการทางกายภาพในการทำให้แร่ไมนาไซต์มีความ เข้มข้นมากขึ้น โดยมีแร่อื่นหรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ น้อยลง เพราะตามธรรมชาติที่ทรายไมนาไซต์จะเกิดอยู่ปนกับแร่อื่น ๆ ดังแสดงในตาราง 3.3 เฉพาะแหล่งทรายไมนาไซต์ในบราซิลเท่านั้น ที่อาจจะไม่ต้องทำการแต่งแร่ เพราะมีความ เข้มข้นสูงพอสมควร ส่วนทรายไมนาไซต์จากแหล่งอื่น เช่น อินเดีย ศรีลังกา และมาเลเซีย นั้น ปกติแล้วมักจะทำการแต่งแร่วิธีแบบง่าย ๆ ประหยัดค่าใช้จ่ายและใช้แรงงานคนทำ อาจทำการแต่งแร่ที่ชายหาดนั้น เลยหรือขนไปทำการแต่งแร่ในโรงงาน โดยเริ่มด้วยการแต่งแร่แบบหยาบ ๆ ก่อนด้วยกล่องชลูซ (Sluice boxes) หรือด้วยการทำเทบลิ่ง (Tabling) เพื่อคัด เม็ดทรายที่เบาว่าออกไป ซึ่งจะทำให้มีไมนาไซต์อยู่ระหว่าง 20 - 60% จากนั้นจึงทำการแยกแยะพวก เม็ดทรายที่หนักด้วยวิธีอาศัยแรงโน้มถ่วง (Gravity concentration) หรือวิธีใช้ไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic method) หรือวิธีใช้แม่เหล็กไฟฟ้า (Elec-

ตาราง 3.3 องค์ประกอบของแร่โมนาไซต์ก่อนแต่งแร่ (จากรัฐทราวานคอร์ ในอินเดีย)⁽²⁰⁾

Constituent Minerals	Content (%)
Monazite	0.5 - 1.0
Ilmenite	65 - 80
Garnet	1 - 5
Rutile	3 - 6
Zircon	4 - 6
Sillimanite	2 - 5

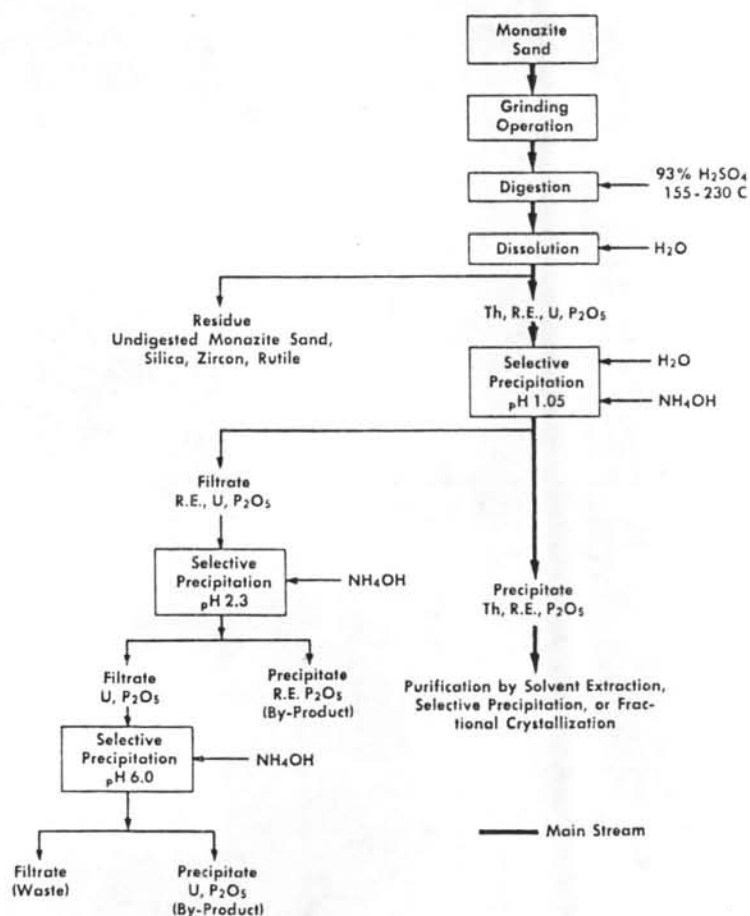
tromagnetic method) โดยเฉพาะวิธีแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะนิยมใช้กันมากที่สุด โดยอาศัยคุณสมบัติในทางแม่เหล็ก (Magnetic property) ที่ต่างกันของแร่ชนิดต่าง ๆ เพราะโมนาไซต์จะมีคุณสมบัติเป็นแมกเนติก (Magnetic) ปานกลาง แต่แร่แมกเนไทต์และอิลมิไนต์จะมีคุณสมบัติเป็นพาราแมกเนติก (Paramagnetic) อย่างแรง ส่วนแร่เซอร์คอน รูไทล์ การ์เนต และซิลลิมาไนต์ จะมีคุณสมบัติเป็นไดอะแมกเนติก (Diamagnetic) เครื่องแยกแร่ด้วยแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะนิยมใช้แบบ Wetherill type ซึ่งสามารถจะแยกขนาดของเม็ดทรายโมนาไซต์ได้ด้วย การแต่งแร่ด้วยการทำเหมืองนี้จะทำให้ได้ทรายโมนาไซต์ที่มีความเข้มข้นสูงถึง 98% ปกติแล้วทรายโมนาไซต์ที่ส่งออกขายสู่ตลาด (Market-grade monazite) นั้นจะต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 95%

3.7.2 การสกัด (Extraction)⁽²⁰⁾

การสกัดนั้น เป็นกระบวนการทางเคมีในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ เพื่อแยกเอาทองเหลือง แร่เอิร์ท และยูเรเนียมที่มีปนอยู่อกจากสิ่งเจือปนอื่น ๆ (Impurities) เช่น ฟอสเฟต ซิลิกา (Silica) ไททาเนียม (Titanium) และเหล็ก แต่ด้วยเหตุที่กระบวนการสกัดแร่โมนาไซต์นั้นมีหลายวิธี ฉะนั้นจึงควรที่จะเลือกใช้วิธีที่ไม่สิ้นเปลืองสารเคมีมาก สามารถผลิตในปริมาณมากได้ พร้อมทั้งมีอัตราการคืนตัว (Recovery rate) ที่สูง ซึ่งแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกันดังนี้

3.7.2.1 กระบวนการสกัดด้วยกรดซัลฟูริก (Sulfuric Acid Extraction Process)

โดยทำการละลายทรายโมนาไซต์ด้วยกรดซัลฟูริก เข้มข้นที่ร้อนหรือกรดฟumingซัลฟูริก (Fuming sulfuric acid) เพื่อให้เกิดเป็นสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟต (Monazite sulfate solution) ของทอง เรียม แร่เอิร์ท และยูเรเนียม ซึ่งแยกออกจากกาก (Residue) ที่ประกอบด้วย ซิลิกา เซอร์คอน รูไทล์ หรือวัตถุเจือปนอื่น ๆ ในทรายโมนาไซต์ วิธีนี้เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย หาสารเคมีได้ง่าย และเหมาะสำหรับการผลิตในปริมาณมาก ๆ แต่จะมีฟอสเฟตไอออน (Phosphate ion) และซัลเฟตไอออน (Sulfate ion) เกิดขึ้นอันเป็นอุปสรรคในขั้นการทำให้บริสุทธิ์ วิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Ames Laboratory^(23,25) เป็นวิธีที่นิยมใช้ทำกันมากในประเทศสหรัฐอเมริกา รัสเซีย และแอฟริกาใต้ ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการสกัดดังแสดงในรูป 3.1



รูป 3.1 ขั้นตอนการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยการใช้กรดซัลฟูริก⁽²⁵⁾

การสกัดแยก เป็น 3 ขั้นตอน คือ

ก. การย่อย (Digestion) ⁽²⁰⁾ มักจะต้องคำนึงถึงอัตราการเกิดการกัดกร่อน (Erosion) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ใช้ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของกรด และลักษณะพื้นผิวของเม็ดทราย การใช้กรดซัลฟูริกจะต้องคำนึงถึงการเกิดการเคลือบผิว เม็ดทรายของผลผลิตที่เกิดจากการย่อยและไม่สามารถละลายในสารละลายนั้นด้วย นอกจากนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยานั้นไม่เพียงแต่ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดการกัดกร่อนเท่านั้น แต่ยังคงขึ้นอยู่กับความต้านทานอันเกิดจากการเกิดการเคลือบผิว เม็ดทรายด้วย ซึ่งเราสามารถลดความต้านทานนี้ได้ด้วยการกวน (Agitate) และทำให้มวลของปฏิกิริยา (Reaction mass) มีสภาพเป็นของไหล (Fluidity) อยู่ตลอดเวลา

ในตอนแรก เริ่มที่ใส่ทรายโมนาไซด์ลงไปในการคัลฟูริกที่ร้อนนั้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และต่อมากลไกของปฏิกิริยาจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากการเกิดการกัดกร่อนมาเป็นการเกิดแมสทรานเฟอร์ (Mass transfer) เมื่อมีการเคลือบผิว เม็ดทรายหนามากขึ้น อัตราของปฏิกิริยาก็จะลดลงจนกระทั่ง เมื่อผลผลิตที่เป็นของแข็งมีเกิดมากขึ้น อันทำให้ของผสมนั้นมีสภาพเหมือนเป็นของแข็ง ก็จะมีการซึมซาบ (Diffuse) ของกรดซัลฟูริกผ่านของแข็งที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นมวลที่มีรูพรุน (Porous mass) นี้เข้าไปได้อย่างช้ามาก การที่มวลมีสภาพคล้ายรูพรุน เป็น เพราะมีก๊าซฮีเลียม (Helium) เรดอน (Radon) และโทรอน (Thoron) เกิดขึ้น โดยโทรอนนั้นเป็นธาตุที่สลายตัวมาจากทอเรียมและมีรังสี α , β และ γ ให้ออกมาด้วย ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิตสั้น ส่วนก๊าซเรดอนจะเกิดมาจากการสลายตัวของยูเรเนียม ซึ่งจะมีอันตรายมากกว่าโทรอน เพราะมีค่าครึ่งชีวิตยาวกว่า แต่ก๊าซฮีเลียมที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่เป็นอันตรายแต่อย่างใด โดยเกิดขึ้นจากผลของการเปล่งรังสี α ออกมาของธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าว ปกติก๊าซฮีเลียมนี้จะมัก เกาะอยู่ตามผลึกของโมนาไซด์ และต่อมาก็จะถูกกำจัดได้ด้วยสภาพความเป็นกรดของสารละลายนั้น เราอาจขจัดก๊าซทั้งสามชนิดได้ด้วยการจัดให้มีการระบายอากาศที่ดี ปกติแล้วในระหว่าง 15 นาทีแรกนั้น ของผสมจะเปลี่ยนจากของเหลวไปเป็นวัตถุที่ขึ้นหนืดและละเอียด ต่อมาช่วง 15 - 30 นาที จะเกิดเป็นของแข็งหนาคล้ายแป้งเปียกสีเทา และปฏิกิริยาจะสมบูรณ์เมื่อย่อยไปได้ประมาณ 2 - 4 ชั่วโมง ซึ่งมวลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีกรดอิสระ (Free acid) เหลืออยู่ประมาณ 60% และมีปริมาตรเป็น $1 - \frac{1}{2}$ เท่าของปริมาตรเดิมของทรายและกรด เมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ให้เย็นลงกลายเป็นของแข็ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ



ทั้งความเร็วของการเกิดปฏิกิริยาและความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับขนาด (Particle size) ของเม็ดทรายโมนาไซต์ จุดหลอมเริ่มที่ทำปฏิกิริยา สัดส่วนของกรดที่ใช้อ่ทราย ความเข้มข้นของกรด และเวลาที่ใช้อยู่ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ขนาดเม็ดทราย ปกติแล้วทรายโมนาไซต์จากแต่ละแห่งจะมีขนาดแตกต่างกันออกไป ขนาดของเม็ดทรายยิ่งเล็กก็จะมีสัดส่วนของกรดที่ใช้น้อยลง ความเข้มข้นของกรดที่ใช้น้อยลง เวลาที่ใช้อยู่

2. จุดหลอม การเปลี่ยนแร่เอิร์ท ทอ เรียม และยูเรเนียมจากทรายโมนาไซต์ไปเป็นเกลือซัลเฟตนั้น จะให้ความร้อนออกมา (Exothermic) มากมาย ทรายโมนาไซต์จะถูกย่อยได้ดี เมื่อจุดหลอมสูง แต่ไม่ควรเกิน 300 °ซ. เพราะจากการทดลอง⁽²³⁾ พบว่าที่จุดหลอม 300 °ซ. หรือสูงกว่านี้ จะมีพวกสารประกอบของทอ เรียมที่ไม่ละลายเกิดขึ้น คือทอ เรียมไพโรฟอสเฟต (Thorium pyrophosphate) แต่ถ้ามีทอ เรียมไพโรฟอสเฟตเกิดขึ้น เราก็อาจแก้ไขได้โดยการเติมสารละลายของอัลคาไลคาร์บอเนต (Alkali metal carbonate) ที่เข้มข้นและร้อน เช่น NaOH ลงไปละลายเป็นทอ เรียมคาร์บอเนต (Thorium carbonate) จุดหลอมที่ใช้อยู่ นั้นยิ่งสูงจะยิ่งดี เพราะไม่เพียงแต่จะเพิ่มอัตราการย่อยสลาย (Decompose) เท่านั้น แต่ยังคงลดการทำให้มีสภาพเป็นกรดด้วย ดังนั้นควรใช้จุดหลอมประมาณ 155 - 230 °ซ.⁽²⁰⁾

3. สัดส่วนของกรดต่อทราย ซึ่งจากสทอยชิโอมิตรีของปฏิกิริยาพบว่า จะใช้ปริมาณกรด (100% H_2SO_4) ต่ำสุดต่อทรายที่ถูกย่อยโดยน้ำหนักจะประมาณ 0.6:1 แต่ในทางปฏิบัติ นั้น สัดส่วนอันนี้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายในสารละลายกรดซัลฟูริกของทอ เรียม

ฟอสเฟต (Thorium phosphate) ที่เกิดขึ้น ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจากการที่กรดซัลฟูริกทำปฏิกิริยากับส่วนที่ไม่ละลายนั้น จะทำให้ของผสมมีปริมาตรพองมากขึ้น และมักจะทำให้สารละลายกลายเป็นวุ้น ด้วยเหตุนี้ในทางปฏิบัติแล้วจะต้องใช้สัดส่วนของกรดมากขึ้น และจากการทดลอง⁽²⁵⁾ พบว่า จะต้องใช้สัดส่วนประมาณ 1.6:1 การที่จะเลือกสัดส่วนของกรดที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการย่อยนั้น จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ขนาดของเม็ดทราย ความเจือจางของสารละลายนั้น และ เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา การมีปริมาณของกรดอิสระมากเกินไป จะเป็นอุปสรรคต่อการทำการสกัดด้วยสารละลาย (Solvent extraction) ฉะนั้น สารละลายโมนาไซด์ซัลเฟตจึงควรมีกรดซัลฟูริกอิสระ เพียงแค่รักษาไม่ให้เกิดการตกตะกอนของทอเรียมไฮโดรฟอสเฟต และทำให้สารละลายนั้นมีความเสถียรก็พอ ซึ่งพบว่า ใช้กรดประมาณ 2 - 2.5:1 จะเพียงพอและไม่มีซัลเฟตอิสระเกิดขึ้นมากด้วย

4. ความเข้มข้นของกรด เนื่องจากการทำให้กรดซัลฟูริก เจือจางลงนั้นจะมีผลเกิดขึ้นสองประการคือ ประการแรก ความแรงของกรดจะลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง และประการที่สองคือ สภาพการเป็นของไหลของของผสมนั้นจะเพิ่มขึ้น ทำให้กวนได้ดีขึ้น เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีด้วย ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้น 93% เมื่อทำการย่อยที่ 160°ซ. จะดีที่สุด⁽²³⁾

5. เวลาที่ใช้ย่อย พบว่า เวลาที่ใช้ในการย่อยนั้น ถ้าใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดที่ใช้อยู่ต่ำ ก็จะต้องใช้เวลาที่ย่อยนานกว่า เมื่อใช้อุณหภูมิและความเข้มข้นของกรดสูงกว่า ซึ่งปกติจะใช้เวลาในการย่อยประมาณ 2 ชั่วโมง⁽²³⁾

ข. การละลาย (Dissolution) เป็นการละลายเอาทอเรียม แร่เอิร์ท และยูเรเนียมออกมาจากกากซึ่งเป็นซิลิกา รุทไธล์ เซอร์คอน และทรายโมนาไซด์ที่ไม่ถูกย่อย ได้เป็นสารละลายของโมนาไซด์ซัลเฟต ซึ่งประกอบด้วยซัลเฟตอิสระและฟอสเฟตอิสระ โดยการทำให้มวลของปฏิกิริยามีอุณหภูมิ เย็นลง เป็น 70°ซ. แล้วเติมน้ำ เย็นลงไปประมาณ 10 เท่าของทรายโดยน้ำหนัก เพราะถ้าน้อยกว่านี้จะทำให้อัตราการสกัดต่ำและละลายมวลที่แข็งนั้นออกจากกันได้ยาก การทำให้สารละลายเจือจางลงด้วยน้ำนั้น จะก่อให้เกิดปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อนภาชนะเกิดขึ้นได้ ภายหลังจากเติมน้ำลงไปแล้วควรจะทำให้สารละลายมีอุณหภูมิ เป็น 30°ซ. เพราะแร่เอิร์ทซัลเฟตจะละลายได้ดีกว่าในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง⁽¹⁹⁾ ส่วนทอเรียมซัลเฟตจะละลายได้ดีที่ 45°ซ. เมื่ออยู่ในเฟสไดอะแกรม (Phase diagram) ของทอเรียมซัลเฟต-กรดซัลฟูริก การละลายนี้ควรจะมีการกวนติดต่อกันเป็นเวลา 12 - 15 ชั่วโมง เพื่อจะได้ชะล้างเอาทอเรียม แร่เอิร์ทและยูเรเนียมออกมาจากสิ่งที่ไม่ละลาย อันประกอบด้วยสารซิลิคอน (Siliceous matter) โมนา-

ไซต์ที่ไม่ถูกย่อย และกากของมีโซทอ เรียม (Mesothorium) ได้อย่างสมบูรณ์

ในกากมีโซทอ เรียมนั้นจะประกอบด้วยธาตุกัมมันตรังสีอื่น เกิดจากทอ เรียมซึ่ง เป็นธาตุแม่ โดยเริ่มจากมีโซทอ เรียม -I (Mesothorium-I) (มีค่าครึ่งชีวิต 6 - 7 ปี) ซึ่งเป็นไอโซโทปของเรเดียมในรูปของซัลเฟตและละลายได้ไม่ดี แต่เรเดียมซัลเฟตนั้นจะมีรูปร่างคล้ายกับบาเรียมซัลเฟต (Barium sulfate) ฉะนั้นเราอาจเติมบาเรียมซัลเฟตลงไป (1 ปอนด์ต่อโมนาไซต์ 1 ตัน) เพื่อขจัดมีโซทอ เรียม -I ให้น้อยลง เพราะถ้ามีมีโซทอ เรียม -I อยู่ในน้ำชะล้างมากเกินไปแล้ว ก็จะทำให้ น้ำชะล้างกลายเป็นวุ้น (Colloidal sol) ได้

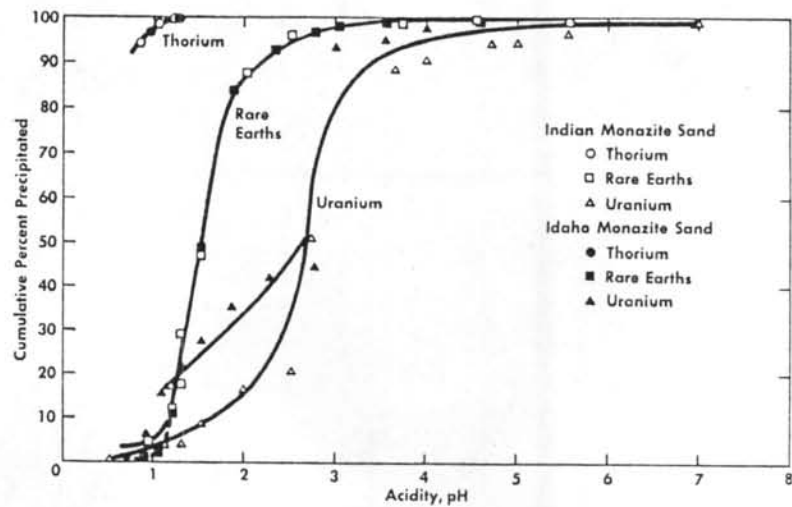
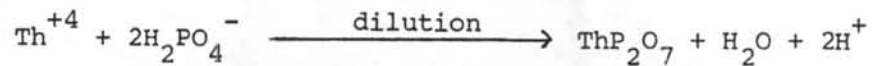
ดังนั้น ส่วนที่ไม่ละลายจะแยกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นทรายที่ยังถูกย่อยไม่หมด ซึ่งจะหนักกว่า และส่วนที่เป็นแกงกิว (Gangue) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกสารกัมมันตรังสีธาตุลูกที่เกิดมาจากยูเรเนียมและทอ เรียม และจากสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟต ก็นำไปทำการแยกเอาแร้ว-เอิร์ท ทอ เรียม และยูเรเนียมออกจากกันต่อไป

พบว่า การย่อยสลายแร้วโมนาไซต์ด้วยส่วนผสมของกรดซัลฟูริกและกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสม จะทำการย่อยได้ดีกว่า เมื่อย่อยด้วยกรดซัลฟูริกตามลำพัง เพราะทอ เรียมและแร้ว เอิร์ท จะละลายออกมาในสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตของกรดผสมนี้ได้ดีกว่า⁽²⁶⁾

ค. การแยกด้วยการตกตะกอน (Selective Precipitation Separation) เป็นการแยกเอาทอ เรียม แร้ว เอิร์ทและยูเรเนียมออกจากกันด้วยการตกตะกอนโดยวิธีการ ดังนี้

1. การควบคุมสภาพความเป็นกรด เป็นด่าง (Acidity Control) เป็นวิธีการอาศัยความแตกต่างของการละลายยูเรเนียม ทอ เรียม และแร้ว เอิร์ทในที่สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ต่างกัน ดังแสดงในรูป 3.2 โดยจะได้เป็นตะกอนคล้าย เค้กของทอ เรียมฟอสเฟต (มีลักษณะเป็นวุ้น) แร้ว เอิร์ทดับ เบิลซัลเฟตและยูเรเนียมฟอสเฟต เป็นส่วนใหญ่ และมีทอ เรียมซัลเฟตอีกเล็กน้อย การควบคุมสภาพความเป็นกรด เป็นด่างมี 3 วิธี คือ

1) การทำให้เจือจาง (Dilution) เป็นการตกตะกอนด้วยการทำให้สารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตเจือจางลงด้วยการเติมน้ำลงไป ซึ่งจะต้องใช้น้ำในปริมาณที่มาก โดยเฉพาะการทำให้ทอ เรียมตกตะกอนนั้นจะต้องใช้น้ำถึง 300 เท่าของสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟต ด้วยเหตุนี้ วิธีนี้จึงไม่สะดวกและไม่เหมาะแก่การทำในทางการค้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

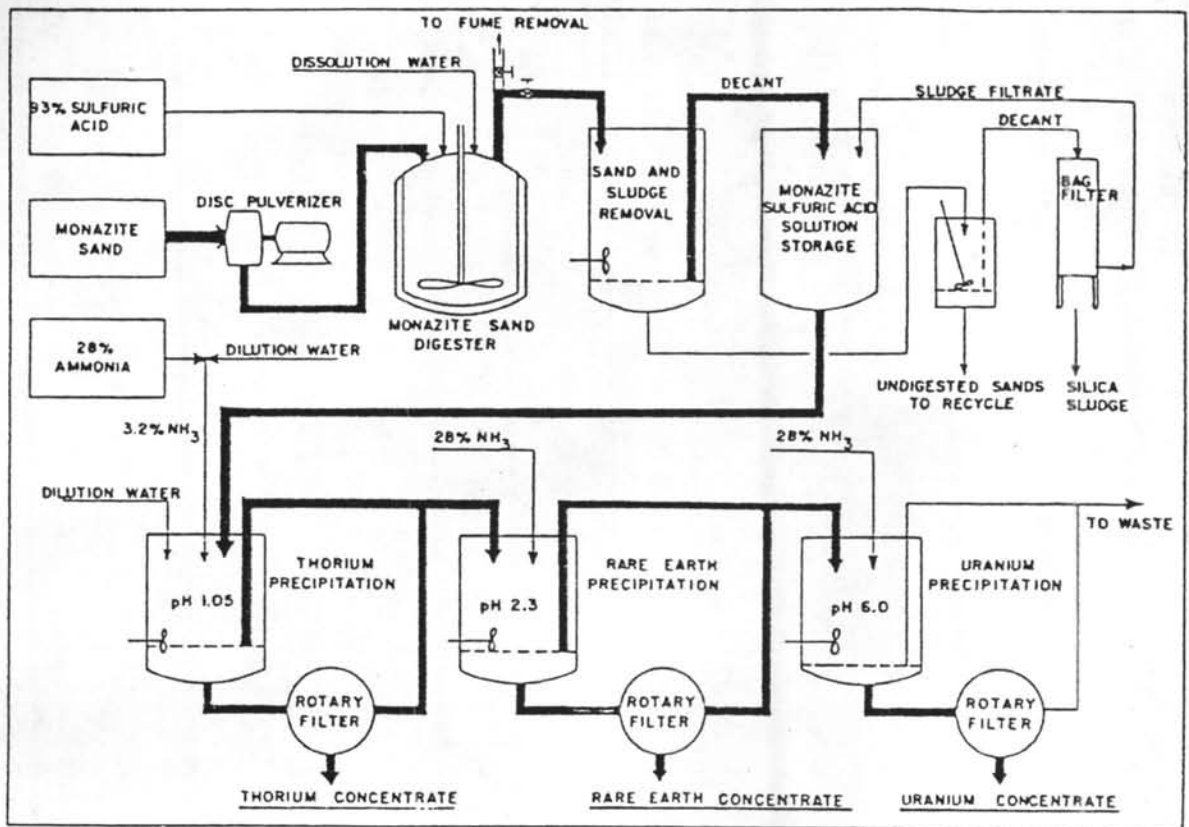


รูป 3.2 การตกตะกอนของสารละลายโมนาไซด์ซิลเฟต (25)

2) ตัวทำสะเทิน (Neutralizing Agents) เป็นการตกตะกอนด้วยการใช้ตัวทำสะเทิน ดังแสดงในรูป 3.3 ซึ่งเป็นวิธีที่ประหยัดกว่า เพราะตัวทำสะเทินที่เหลือนั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และปริมาตรของสารละลายก็จะมีไม่มากด้วย ในทางปฏิบัตินั้นการควบคุม pH จะกระทำได้ค่อนข้างยาก เพราะ pH ในช่วงใกล้ ๆ จุดที่ทอเริ่มตกตะกอนนั้น ตัวทำสะเทินเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ pH เปลี่ยนไปมาก ซึ่งเราอาจแก้ไขได้ด้วยการทำให้สารละลายนั้นเจือจางด้วยน้ำ ก่อนที่จะใส่ตัวทำสะเทินลงไป ควรใช้น้ำประมาณ 6 - 7 เท่า โดยทอเริ่มจะตกตะกอนได้ดีที่สุดในช่วง pH ประมาณ 1.05 ± 0.02 (27)

การตกตะกอนทอเริ่มนั้น ตัวทำสะเทินจะมีผลมากกว่าการทำให้เจือจางด้วยน้ำ ส่วนแรร์เอิร์ทนั้นจะเป็นผลทั้งจากตัวทำสะเทินและการทำให้เจือจางด้วยน้ำ แต่การทำให้เจือจางด้วยน้ำจะลดการตกตะกอนของฟอสเฟต เป็นผลให้มีฟอสเฟตออนในสารละลายมากขึ้น นอกจากนี้ยังลดค่าใช้จ่ายในขั้นการทำให้บริสุทธิ์ แต่จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการกรอง

ตัวทำสะเทินที่นิยมคือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) แต่แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์จะดีกว่า เพราะจะมีการเกิดการตกตะกอน



รูป 3.3 การตกตะกอนด้วยตัวทำสะเทิน (19)

ร่วม (Co-precipitate) แบบตกตะกอนภายหลัง (Post-precipitate) ของแรร์เอิร์ทกับ
 ทอเรียมน้อยกว่าการใช้โซเดียมคาร์บอเนต เพราะการตกตะกอนในภายหลังของพวกเกลือแรร์-
 เอิร์ทโซเดียมดับเบิลซัลเฟต (Rare earth sodium double sulfate salt) จะละลายใน
 สารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตได้ยากกว่าพวกแรร์เอิร์ทฟอสเฟต (Rare earth phosphate)
 และเกลือแอมโมเนียมดับเบิลซัลเฟต (Ammonium double sulfate salt) แต่ถ้าทำการกรอง
 ทันทีแล้วตัวทำสะเทินทั้ง 2 จะให้ผลเหมือนกัน

การตกตะกอนแยกเอาทอเรียมและแรร์เอิร์ทออกจากสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตนั้น
 ยังขึ้นกับสิ่งต่อไปนี้

ก) สัดส่วนของกรดต่อทราย ถ้าใช้กรดในการย่อยมากก็จะมีปริมาณของกรดซัลฟูริก
 อิสระมาก เป็นผลให้การตกตะกอนของทอเรียมและแรร์เอิร์ทจะถูกจำกัดให้ลดลงได้

ข) เวลาในการกวน (Agitation Time) การกวนขณะ เดิมตัวทำสะ เทินจะทำให้ สารละลายมี pH สม่าเสมอกัน และพบว่ากวนประมาณ 5 นาทีก็เพียงพอ⁽²⁵⁾ และควรจะมี กรองทันที เพราะถ้าปล่อยให้ไว้นานจะมีการ เกิดการตกผลึก (Crystallization) ของแรร์- เอิร์ทเพิ่มขึ้นได้

ค) แหล่งแร่โมนาไซต์ ปกติแล้วคุณสมบัติในการตกตะกอนของโมนาไซต์แต่ละแห่งจะ ไม่แตกต่างกัน แต่องค์ประกอบของโมนาไซต์แต่ละแห่งจะมีสัดส่วนไม่เท่ากัน ฉะนั้นการ เกิดการตก ตะกอนร่วมจึงมีมากน้อยต่างกัน

ง) สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) โดยที่ยูเรเนียม ทอเรียม และแรร์เอิร์ท สามารถตกตะกอนแยกออกมาได้ในช่วง pH ต่าง ๆ กัน คือ ทอเรียม แรร์เอิร์ท และยูเรเนียม จะตกตะกอนสมบูรณ์ที่ pH ประมาณ 1.2, 2.3 และ 6.0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 3.2 ซึ่งใน การตกตะกอนแรร์เอิร์ทนั้นจะไม่เกิดขึ้นรวดเร็วเหมือนทอเรียม แต่จะต้องทิ้งไว้ 1 คืนจึงจะสมบูรณ์

3) อิเล็กโทรไลเซชัน (Electrolyzation)⁽²⁸⁾ เป็นการตกตะกอน ด้วยปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic action) โดยการนำสารละลายโมนาไซต์- ซัลเฟต ซึ่งมีไอออนของทอเรียม แรร์เอิร์ท ยูเรเนียม ซัลเฟต และฟอสเฟต มาทำปฏิกิริยาในอิ- เลกโทรไลติก เซลล์ (Electrolytic Cell) โดยความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือ สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) จะลดลงเรื่อย ๆ เป็นผลให้ทอเรียมตกตะกอนเป็นฟอสเฟตแยก ออกมาก่อน

2. ออกซาเลชัน (Oxalation)⁽²⁹⁾ คือการตกตะกอน เป็น เกลือออกซาเลต (Oxalate) ซึ่งเป็นวิธีการแยกทอเรียมและแรร์เอิร์ทออกจากสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตด้วย การตกตะกอนเป็นทอเรียมและแรร์เอิร์ทออกซาเลต โดยใช้กรดออกซาลิก (Oxalic acid) จากนั้นจึงเผา (Calcine) ให้กลายเป็นทอเรียมและแรร์เอิร์ทออกไซด์ วิธีนี้สามารถจะแยกทอ- เรียมและแรร์เอิร์ทจากยูเรเนียมได้อย่างสมบูรณ์ แถมยังปราศจากการ เจือปนของฟอสเฟตไอออน และซัลเฟตไอออนอีกด้วย

การทำออกซาเลชันโดยตรงจากสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟตที่มีได้ทำให้ เจือ- จางเสียก่อนนั้น จะก่อให้เกิดมีการรวมตัว เป็นก้อนแข็ง (Curd formation) เกิดขึ้น ซึ่งจะประ-

กอบด้วยยูเรเนียม ซัลเฟตไอออน และฟอสเฟตไอออนมากมาย พบว่าควรจะทำให้เจือจางด้วยการเติมน้ำลงไปประมาณ 4 - 5 เท่า ก็จะได้ตะกอนออกซาเลตที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous oxalate) การทำออกซาเลชันจะเกิดสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 20 - 80°ซ. และ pH 0.4 - 3.0 เพราะสารละลายที่มีความเป็นกรดแรงจะเพิ่มการเกิดเกลือออกซาเลตมากขึ้น

ทอเรียมแยกออกจากแรร์เอิร์ทได้ด้วยการทำการเผาแรร์เอิร์ทและทอเรียมออกซาเลต แล้วนำมาละลายใน 8N HNO₃ จากนั้นจึงทำการสกัดสารละลายในเตรท (Nitrate solution) ด้วย TBP และสตริป (Strip) เอาซีเรียมออกจาก TBP ด้วย 0.1M NaNO₃

3. วิธีอื่น ๆ

ก) ตกตะกอนเป็นทอเรียมออกไซด์หรือทอเรียมเปอร์ออกไซด์ (Thorium peroxide) ด้วยการเติมโปแตสเซียมเปอร์มังกาเนต (Potassium permanganate) (K₂MnO₄) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) (H₂O₂) ลงไปในสารละลายโมนาไซด์ซัลเฟต แล้วทำให้ร้อนอย่างช้าที่ 90°ซ.⁽³⁰⁾

ข) ตกตะกอนเป็นแรร์เอิร์ทซัลเฟตด้วยของผสมระหว่างกรดซัลฟูริกเข้มข้นกับกรดฟอสฟอริก (H₂SO₄:H₃PO₄ = 3:5 โดยน้ำหนัก) ส่วนทอเรียมจะเกิดเป็นตะกอนของเกลือผสมของซัลเฟต-ฟอสเฟต⁽³¹⁾

เราอาจกำจัดฟอสเฟตไอออนและซัลเฟตไอออนในสารละลายโมนาไซด์ซัลเฟตได้ด้วยการเติมโซดาไฟ (NaOH) ลงไปเปลี่ยนเป็นโซเดียมฟอสเฟต (Na₃PO₄) และโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) ซึ่งละลายได้ ส่วนทอเรียมและแรร์เอิร์ทจะกลายเป็นทอเรียมและแรร์เอิร์ทออกไซด์ ซึ่งเป็นตะกอนคล้ายเค็ก

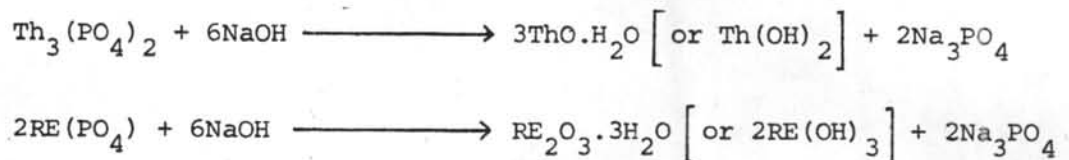
เราอาจกำจัดฟอสเฟตไอออนได้ด้วยการทำออกซาเลชัน หรือใส่น้ำชะล้างนั้นลงไปในการกรดซัลฟูริกเข้มข้นและร้อน 200°ซ. เพื่อให้ น้ำระเหยออกและตกตะกอนเป็นแอนไฮดรัสซัลเฟต (Anhydrous sulfate) หรือตกผลึกเป็นโซเดียมดับเบิลซัลเฟต เมื่อเติม Na₂SO₄ ลงไป⁽³²⁾

3.7.2.2 กระบวนการสกัดด้วยโซดาไฟ (Caustic Soda Extraction Process)

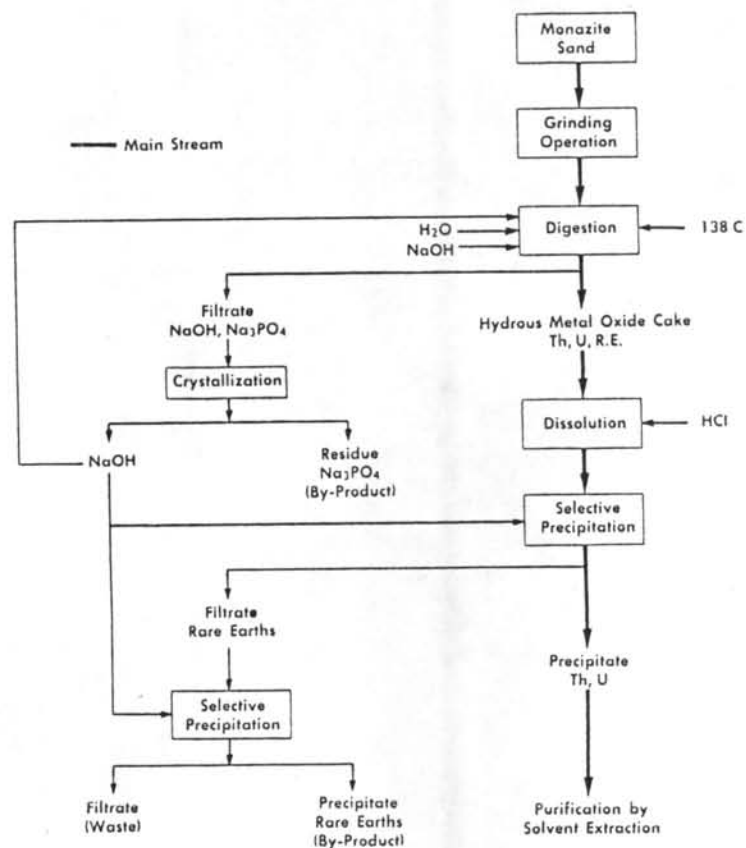
โดยการใส่ทรายโมนาไซด์ที่ละเอียดลงไปนึ่งละลายโซดาไฟที่เข้มข้นและร้อน ได้เป็นตะกอนคล้ายเค้กของไฮดรอกไซด์ออกไซด์ (Hydrous metal oxide cake) วิธีนี้จะไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนและสามารถสกัดยูเรเนียมที่มีอยู่ในโมนาไซด์ออกมาได้สูงกว่าวิธีใช้กรด เพราะมีสารประกอบฟอสเฟตเกิดขึ้น อันทำให้สะดวกต่อการทำให้บริสุทธิ์ และพวกแกงกิว (Gangue) จะละลายอยู่ในสารละลาย ไม่มีปนติดไปกับตะกอนที่ขึ้นเหนียว (Slurry) นอกจากนี้ยังจัดซัลเฟตและฟอสเฟตให้อ่อนได้ดีกว่า แอมยังสามารถนำโซดาไฟมาใช้ใหม่ได้อีก และมีไตรโซเดียมฟอสเฟต (Trisodium phosphate) เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้อีกด้วย แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับแร่เกรดต่ำและมีซิลิกาเกิดมาก เพราะจะยุ่งยากในเวลารอง ฉะนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะแก่การทำในทางการค้าเพราะลงทุนมาก วิธีนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Battelle Memorial Institute^(33,34) และนิยมใช้ทำกันในประเทศฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา รัสเซีย อินเดีย และบราซิล ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ มีแสดงดังในรูป 3.4

การสกัดแยก เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ก. การย่อย⁽²⁰⁾ กระทำโดยการใส่ทรายโมนาไซด์ลงไปนึ่งในโซดาไฟที่ร้อน พร้อมทั้งมีการกวนและมีเครื่องกลั่นควบแน่น (Reflux condenser) อยู่ด้วย และควรจะมีการระบายอากาศที่ดี เพื่อขจัดพวกก๊าซไทรอนซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีออกไป ต่อมาเมื่อของผสมของทรายโมนาไซด์กับโซดาไฟร้อนมากขึ้น ก็จะได้เป็นมวลสีเทาอ่อนเกิดขึ้น ซึ่งง่ายต่อการกวนและเทออก เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะได้เป็นของแข็ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ



ทอ เรียมไฮดรอกไซด์และแรร์เอิร์ทไฮดรอกไซด์จะขึ้นเหนียว สามารถแยกออกจากสารละลายไตรโซเดียมฟอสเฟต (Na_3PO_4) ได้ด้วยการกรอง ส่วนซิลิกาจะได้เป็นโซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) ซึ่งละลายได้ และยูเรเนียมจะได้เป็นโซเดียมยูเรเนต (Sodium uranate) ซึ่งไม่ละลายเช่นกัน



รูป 3.4 การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยการใช้โซดาไฟ⁽³³⁾

ความสำเร็จของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับขนาดของ เม็ดทรายโมนาไซต์ สัดส่วนของโซดาไฟต่อทราย ความเจือจางของสารละลาย คุณสมบัติของปฏิกิริยา และเวลาที่ใช้อยู่เป็นไปดังนี้

1. ขนาดเม็ดทราย เป็นปัจจัยที่สำคัญของความเร็วและความสำเร็จของการเกิดปฏิกิริยา ขนาดของเม็ดทรายที่ใหญ่ก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาละลายออกมาได้สมบูรณ์ก็ต่อ เมื่อใช้คุณสมบัติสูง ปริมาณต่างจำนวนมาก และใช้เวลาย่อยนานขึ้น ฉะนั้นจึงควรใช้ขนาด เม็ดทรายที่เล็ก ปฏิกิริยา จึงจะสมบูรณ์ ปกติควรใช้ขนาด -300 เมช⁽²⁴⁾ จะดีที่สุด

2. สัดส่วนของโซดาไฟต่อทราย ซึ่งตามสทอโยอิมีทริจากปฏิกิริยานั้น พบว่าปริมาณของโซดาไฟ (100% NaOH) ต่อทรายโดยน้ำหนักจะต้องใช้ประมาณ 0.5:1 ในทางปฏิบัตินี้ ถ้าใช้ค่ามากก็จะมีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในตะกอนไฮดรอกไซด์น้อยกว่าในสารละลายต่างนั้น แต่การใช้ค่ามากก็ทำให้ทรายถูกย่อยสลายมากขึ้น ฉะนั้น เมื่อคำนึงถึงค่าใช้จ่าย การคินตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และแรร์เอิร์ท จึงควรใช้ค่าต่อทรายประมาณ 1.5:1 โดย

น้ำหนัก

3. ความเข้มข้นของโซดาไฟ ไม่ควรจะเข้มข้นมาก เพราะจะทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงเกินไปและมีเหลือมากเกินไป ปกติแล้วจะใช้โซดาไฟมีความเข้มข้นประมาณ 55%⁽²⁴⁾

4. อุณหภูมิ⁽²⁰⁾ ยิ่งเพิ่มอุณหภูมิจะยิ่งเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา แต่ไม่ควรเกิน 220°ซ. เพราะที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้มวลของปฏิกิริยาแห้งเกินไปและหนามากขึ้น ยากแก่การเคลื่อนย้าย (Handle) นอกจากนี้อุณหภูมิสูงจะเป็นอุปสรรคต่อการละลายทอ เรียมในกรด (ในขั้นการละลาย) เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงเกิน 145°ซ. จะทำให้ทอ เรียมและแรร์ เอิร์ทออกไซด์ที่ได้นั้นละลายในกรดไนตริกได้ไม่สมบูรณ์ และยังพบว่าของผสมชั้นที่ได้จากปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง จะละลายในกรดได้ดีกว่าและมีแก๊สเกิดขึ้นน้อยกว่า เมื่อใช้ปฏิกิริยาที่รุนแรง (อุณหภูมิสูงและค้างมีความเข้มข้นมาก) ปกติแล้วจะใช้อุณหภูมิประมาณ 130°ซ.⁽²⁴⁾

5. เวลาที่ใช้ย่อย⁽²⁰⁾ อัตราการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลานานขึ้น ปกติแล้วปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมง⁽²⁴⁾

เนื่องจากภายหลังจากการย่อยนั้นจะมีไตรโซ เดียมฟอส เฟต เกิดขึ้นละลายอยู่ในสารละลาย นั้น โดยเกิดขึ้นจากโซดาไฟที่ใช้เพียง $\frac{1}{3}$ ส่วน ส่วนอีก $\frac{2}{3}$ ส่วนจะยังคงมีเหลืออยู่ในสารละลายนั้น เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 60°ซ. จะทำให้ไตรโซ เดียมฟอส เฟตตกผลึกแยกออกมาเป็น $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ เราอาจทำให้มีการตกผลึกของไตรโซ เดียมฟอส เฟตมากขึ้นได้ด้วยการต้มสารละลายให้เดือด แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิต่ำ ก็จะมีผลึกเกิดขึ้นตามต้องการ สารละลายนั้นไม่ควรมีโซดาไฟต่ำกว่า 10 N เพราะปริมาณของยูเรเนียมที่มีปนในไตรโซ เดียมฟอส เฟตจะน้อยลง เมื่อใช้ค้างเข้มข้นมากขึ้น เมื่อกรองเอาผลึกไตรโซ เดียมฟอส เฟตออกไปแล้ว ก็นำสารละลายโซดาไฟที่เหลือมาใช้ใหม่ได้อีก⁽³⁵⁾

สารละลายโซดาไฟเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่หลาย ๆ ครั้ง ก็จะทำให้มีปริมาณซิลิกาและยูเรเนียมมากขึ้น อันเป็นอุปสรรคต่อการตกตะกอนไตรโซ เดียมฟอส เฟต เพราะซิลิกาจะทำให้ยูเรเนียมละลายในโซดาไฟได้ดีขึ้น ทำให้ยูเรเนียมมีปนอยู่ในผลึกไตรโซ เดียมฟอส เฟตมากขึ้น ฉะนั้นจึงควรนำไปเป็นตัวทำสะเทินกับสารละลายกรดในขั้นการตกตะกอนทอ เรียม ส่วนประกอบของไตรโซ เดียมฟอส เฟตและน้ำล้าง (Liquor) มีแสดงดังในตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ส่วนประกอบของผลึกไตรโซ เดียมฟอส เฟตและน้ำล้างภายหลังจากตกผลึก⁽³⁴⁾

Constituent	Crystals (%)	Liquor (%)
Na ₃ PO ₄	86.80	0.53
Na ₂ SiO ₃	0.39	1.48
NaOH	10.20	47.40
U	0.001	0.003

ในการกรอนั้นควรจะทำที่อุณหภูมิประมาณ 110 °c เพื่อให้ไตรโซ เดียมฟอส เฟตยังคงอยู่ในสารละลาย⁽³⁶⁾ เพราะที่อุณหภูมินี้จะทำให้ตะกอนมีขนาดโตขึ้นและเพิ่มอัตราการกรองได้เร็วยิ่งขึ้น ตะกอนของไฮดรอกไซด์ที่ได้นั้นควรจะทำล้างด้วยน้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อจัดฟอสเฟตให้ลดน้อยลงจนเหลือประมาณ 5 -10% อัน เป็นการง่ายต่อการทำการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction)

ข. การละลาย⁽²⁰⁾ เป็นการนำเอาตะกอนคล้าย เค้กของไฮดรอกไซด์ ซึ่งประกอบด้วยแรร์เอิร์ท ทอเรียม และยูเรเนียมมาทำเป็นสารละลาย เพื่อสะดวกต่อการทำในขั้นการทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งสามารถละลายได้ในกรดแร่ (Mineral acid) คือ กรดไฮโดรคลอริก ไนตริก และซัลฟูริก ดังนี้คือ

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จะสามารถละลายตะกอนไฮดรอกไซด์ได้เป็นอย่างดี แต่พวกซิลิกา เซอร์คอน รูไทล์ และทรายที่ไม่ถูกย่อยจะไม่ละลายในกรดนี้ ดังสมการ



ถ้าในตะกอนไฮดรอกไซด์มีซีริกออกไซด์ (Ceric oxide) อันเกิด

จากซีรอสออกไซด์ (Cerous oxide) ถูกอากาศออกซิไดซ์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับ HCl จะมีคลอรีนเกิดขึ้น

2. กรดไนตริก (HNO_3) การละลายตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยกรดไนตริกนี้จะดีกว่าใช้กรดชนิดอื่น เพราะสามารถใช้สารละลายของกรดไนตริกนี้ไปทำการสกัดด้วยตัวทำละลายได้โดยตรง แต่มีข้อเสียคือทอเรียมอาจจะละลายได้ไม่สมบูรณ์ ฉะนั้นจะต้องใส่ H_2O_2 ลงไปในกรดไนตริกที่เดือด เพื่อให้ตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะออกไซด์มีการละลายได้สมบูรณ์⁽³⁶⁾ นอกจากนี้ไทเทเนียมที่มีปนอยู่จะกลายเป็น TiO_2 อันจะสามารถพาทอเรียมติดไปด้วย ดังนั้นการละลายด้วยกรดไนตริกจึงไม่ค่อยจะนิยมกัน

ในกรณีที่แร่โมนาไซต์มีแร่อะเพไทต์ (มี Calcium phosphate) ซึ่งจะไม่ถูกย่อยโดยโซดาไฟ เป็นผลให้มีฟอสเฟตอยู่บนในตะกอนมากเกินไป ดังนั้นเราอาจแก้ไขได้โดยการชะล้างแร่โมนาไซต์เสียก่อนด้วย 8N HNO_3 ที่จุดเดือด เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะทำให้แร่อะเพไทต์ละลายออกมาได้⁽³⁷⁾

3. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) โดยนำตะกอนไฮดรอกไซด์มาละลายในกรดซัลฟูริกที่ร้อน แต่จะก่อให้เกิดซัลเฟตไอออนอันเป็นอุปสรรคในขั้นการทำให้บริสุทธิ์ นอกจากนี้การละลายของทอเรียมและแรร์เอิร์ทซัลเฟตในกรดซัลฟูริก จะต้องใช้มากกว่ากรดไฮโดรคลอริกถึง 2 - 3 เท่า อย่างไรก็ตามการใช้กรดซัลฟูริกจะดีกว่ากรดไฮโดรคลอริก เพราะสารเคมีถูกกว่า ไม่มีก๊าซคลอรีนเกิดขึ้น สะดวก และละลายตะกอนได้อย่างสมบูรณ์ โดยใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง⁽³⁸⁾

ค. การแยกด้วยการตกตะกอน⁽²⁰⁾ โดยจากสารละลายไฮดรอกไซด์ของโลหะ เราสามารถทำการตกตะกอนแยกยูเรเนียม ทอเรียม และแรร์เอิร์ท ออกจากกันได้ด้วยการควบคุมสภาพความเป็นกรดเป็นด่าง เช่นเดียวกับในสารละลายโมนาไซต์ซัลเฟต การตกตะกอนมีหลายวิธี คือ

1. ตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) เป็นวิธีที่นิยมกันมาก โดยใช้ไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion) ใส่ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกของไฮดรอกไซด์ของโลหะ ทำให้ยูเรเนียมและทอเรียมตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ แยกออกมาจากสารละลายที่เป็นแรร์เอิร์ทคลอไรด์ (Rare earth chlorides) ตัวทำสะเทินที่ใช้ในการตกตะกอนของยูเรเนียมและทอเรียมนั้น จะใช้แอมโมเนียไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟ โดยแอมโมเนีย-

ไฮดรอกไซด์จะมีข้อดีในแง่ การเคลื่อนย้ายสะดวกกว่า และราคาถูกกว่า ส่วนโซดาไฟมีข้อดีที่ว่า สารละลายโซดาไฟที่เหลือใช้จากขั้นตอนแรก ๆ ก็สามารถนำมาใช้ได้ แต่การตกตะกอนด้วยโซดาไฟนั้นควรจะทำให้สารละลายเจือจางลง ให้มีโซดาไฟเหลือประมาณ 30% เพื่อลดการเกิดสภาพความเป็นกรดเป็นด่างสูง เฉพาะแห่ง (Localized high pH) และทำให้ตะกอนเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ดังนั้น การตกตะกอนด้วยโซดาไฟจึงต้องมีการวัด การควบคุม และคนสารละลายมากกว่าการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ แต่การที่นำโซดาไฟที่เหลือใช้มาใช้ในขั้นนี้ นั้น จะก่อให้เกิดมีสิ่งเจือปนในตะกอนของยูเรเนียมและทอเรียมจากพวกซิลิกา เหล็ก และฟอสเฟตได้

การตกตะกอน เป็นไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมและทอเรียม นั้น จะขึ้นอยู่กับ

ก) สภาพความเป็นกรดเป็นด่าง โดยพบว่า pH ประมาณ 5.8 จะทำให้ยูเรเนียมและทอเรียมตกตะกอนค่อนข้างจะสมบูรณ์ โดยมีแรร์เอิร์ทติดมาเพียงเล็กน้อย

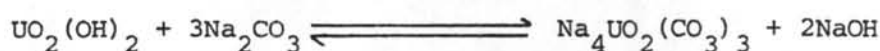
ข) ความเข้มข้นของแรร์เอิร์ท ยิ่งมีความเข้มข้นของแรร์เอิร์ทสูงก็จะทำให้แยกแรร์เอิร์ทออกได้น้อยลง เพราะจะมีแรร์เอิร์ทติดมากับตะกอนมากขึ้น

ค) การล้างตะกอน ตะกอนไฮดรอกไซด์อันประกอบด้วย ยูเรเนียม ทอเรียม เหล็ก ไทเทเนียม และฟอสเฟตนั้น ควรจะทำการล้างด้วยน้ำเสียก่อนที่จะนำไปทำในขั้นตอนต่อไป เพื่อขจัดพวกแรร์เอิร์ทคลอไรด์และคลอไรด์อออน เราอาจเติมอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เช่น NaNO_3 ลงไปผสมกับน้ำล้าง เพื่อช่วยให้มีการตกตะกอนดียิ่งขึ้น เมื่อล้างตะกอนแล้วจึงนำตะกอนมาทำให้แห้ง แต่ควรจะมีควมชื้นเหลืออยู่ประมาณ 30% เพราะถ้าแห้งเกินไปจะทำให้เป็นมวลที่แข็งและเป็นผง

2. ตกตะกอน เป็นคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)⁽³³⁾ เป็นการแยกทอเรียมและยูเรเนียมออกมาเป็นสารประกอบคาร์บอเนตเชิงซ้อน (Metal carbonate complex) ละลายอยู่ในสารละลายนั้น และแยกแรร์เอิร์ทออกเป็นตะกอนคาร์บอเนต ซึ่งการแยกแบบนี้จะกระทำได้ 2 วิธี คือ

ก) ชะล้างตะกอนไฮดรอกไซด์ออกไซด์ด้วยสารละลายคาร์บอเนต เช่น สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต [$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$] เพื่อแยกเอายูเรเนียมและทอเรียมออกมาอยู่ในสารละลายคาร์บอเนต ดังปฏิกิริยา





จะมีฟองของก๊าซ CO_2 เกิดขึ้นเพื่อป้องกันมิให้ปฏิกิริยาผันกลับ (Reverse) วิธีนี้จะแยกยูเรเนียมและทอ เรียมออกมาได้ไม่มาก ฉะนั้นจึงไม่นิยมทำกัน

ข) เติม เกลือคาร์บอเนตลงไปในสารละลายไฮดรอกไซด์ เมทัลออกไซด์ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตหรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต เพื่อตกตะกอนแรร์เอิร์ทแยกออกมาจากสารละลายไฮดรอกไซด์เมทัลออกไซด์ ส่วนยูเรเนียมและทอ เรียมก็จะเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอเนตอยู่ในสารละลายนั้น ดังปฏิกิริยา



ตะกอนของแรร์เอิร์ทคาร์บอเนตจะมีมากจน เป็นเหตุให้น้ำพาทอ เรียมติดออกมาเกือบหมด ส่วนยูเรเนียมจะยังคงอยู่ในสารละลายคาร์บอเนต เป็นส่วนใหญ่

3. ตกตะกอน เป็นฟอสเฟต (Phosphate Precipitation)⁽³³⁾ เป็นการตกตะกอนทอ เรียม แรร์เอิร์ท และยูเรเนียมออกมาเป็นฟอสเฟต โดยที่ทอ เรียมจะตกตะกอนที่ pH ต่ำกว่าแรร์เอิร์ท แต่วิธีนี้จะไม่ดี เพราะจะมียูเรเนียมอยู่ในสารละลายและ เป็นตะกอนในปริมาณที่พอ ๆ กัน นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดฟอสเฟตอื่นมากด้วย

4. ตกตะกอน เป็นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide Precipitation)⁽³⁹⁾ เป็นการตกตะกอนยูเรเนียม ทอ เรียมและแรร์เอิร์ท เป็นเปอร์ออกไซด์ ด้วยการใส่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งทอ เรียมและยูเรเนียมจะตกตะกอนร่วมกันออกมาที่ pH ประมาณ 2.0 โดยทอ เรียมเปอร์ออกไซด์จะเป็นตัวนำพา ยูเรเนียม เปอร์ออกไซด์ ส่วนแรร์เอิร์ท เปอร์ออกไซด์จะยังคงละลายได้ดีใน pH ช่วงนี้ วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีในการแยกยูเรเนียมและทอ เรียมออกจากแรร์เอิร์ท แต่ค่าใช้จ่ายจะสูง เพราะไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แพง

3.7.2.3 การสกัดด้วยวิธีอื่น (Miscellaneous Extraction Processes)

ก. ย่อยสลายด้วยกรดเปอร์คลอริก (Perchloric Acid Treatment)⁽⁴⁰⁾ เป็นการย่อยโมนาไซด์ด้วยกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) ซึ่งจะย่อยได้เร็วกว่า

การใช้กรดซัลฟริกถึง 4 - 5 เท่า โดยซีริกฟอสเฟต (Ceric phosphate) จะตกตะกอน แต่จะละลายได้เมื่อทำการรีดักชันให้กลายเป็นซีริสฟอสเฟต (Cerous phosphate) ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือไฮดราซีนไดไฮโดรคลอไรด์ (Hydrazine dihydrochloride) ส่วนทอเรียมและแรร์เอิร์ทจะตกตะกอนเป็นออกซาเลตได้โดยการทำไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับเมทิลออกซาเลต (Methyl oxalate) และทอเรียมจะถูกแยกเป็นตะกอนฟอร์มเมต (Formate) ได้ด้วยการทำไฮโดรไลซิสกับยูเรีย (Urea) โดยจะเปลี่ยน pH ของสารละลายไปอย่างช้า ๆ ซึ่งปกติแล้วตะกอนทอเรียมฟอร์มเมตจะเกิดที่ pH ประมาณ 5.3

เนื่องจากกรดเปอร์คลอริกจะแพงกว่ากรดซัลฟริกถึง 10 เท่า ฉะนั้นวิธีนี้จึงไม่นิยมทำกันในทางการค้า แม้ว่าจะเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าและสามารถแยกซีเรียมออกมาโดยตรงได้ด้วยการตกตะกอนเป็นซีริกฟอสเฟตก็ตาม

ข. ย่อยสลายด้วยกรดไนตริก⁽³⁶⁾ พบว่าเมื่อใช้กรดไนตริกมาทำการย่อยโมนาไซต์ที่อุณหภูมิ 100 °C โดยมีตัวออกซิไดซ์และตัวรีดิวซ์ (Reducing agents) และโซเดียมฟลูออซิลิเกต (Sodium fluosilicate) โดยย่อยเป็นเวลา 5 ชั่วโมงจะย่อยได้เพียง 10% เท่านั้น ฉะนั้นวิธีนี้จึงไม่นิยมใช้กัน

3.8 ผลผลิตและประโยชน์ของแร่โมนาไซต์

เนื่องจากส่วนประกอบที่สำคัญของแร่โมนาไซต์คือ ยูเรเนียม ทอเรียม และแรร์เอิร์ท ฉะนั้นผลผลิตทั้งสามพวกที่ได้จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ ดังนี้

3.8.1 แรร์เอิร์ท⁽⁴²⁾ เป็นกลุ่มของธาตุ 15 ธาตุที่มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกัน ตั้งแต่ธาตุช่วงเลขอะตอม (Atomic number) 57 - 71 โดยแบ่งเป็น 3 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มซีเรียมเอิร์ท (Cerium earths) (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) กลุ่มเทอร์เบียมเอิร์ท (Terbium earths) (Eu, Gd, Tb, Dy) และกลุ่มอิตเทอร์เบียมเอิร์ท (Ytterbium earths) (Ho, Er, Tm, Yb, Lu) นอกจากนี้ยังรวมทั้งธาตุอิตเทรียม (Yttrium) (Y) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับแรร์เอิร์ทด้วย สำหรับในโมนาไซต์นั้นจะเป็นแรร์เอิร์ทกลุ่มซีเรียมเอิร์ทที่มีปริมาณซีเรียมสูง

แรร์เอิร์ทเป็นกลุ่มธาตุที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งตามสถิติแล้วแต่ละปีทั่วโลกจะมีการใช้แรร์เอิร์ทกว่า 25 ล้านปอนด์ โดยส่วนใหญ่จะนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม

ต่าง ๆ คือ

ก. แร่เอิร์ทออกไซด์ แร่เอิร์ทคลอไรด์ และแร่เอิร์ทฟลูออไรด์ จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กหล่อ เหนียว เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์และชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล นอกจากนี้ยังใช้ในอาร์คคาร์บอนอิเล็กโทรด (Arc carbon electrode) ในการทำเลเซอร์ และใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกาซโซลีนแครกกิง (Gasoline cracking)

ข. ซีเรียมออกไซด์และแลนทานัมออกไซด์ จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมขั้วเลนซ์ และในการทำตัวคาปาซิเตอร์ (Capacitor) ซึ่งใช้ในทางอิเล็กทรอนิกส์

ค. นีโอไดมียมคาร์บอเนต (Neodymium carbonate) จะใช้เป็นสารผสมสีในอุตสาหกรรมแก้ว ใช้เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ (Temperature compensater) ในคาปาซิเตอร์ ซึ่งใช้ในวิทยุ โทรทัศน์ และเรดาร์ ใช้ผสมในคาร์บอนอาร์ค (Carbon arc) ใช้ผสมลงในโลหะผสมของสแตนเลสสตีล เพื่อให้คุณสมบัติดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า โดยเป็นตัวป้องกันการซึมของน้ำในเนื้อผ้า

3.8.2 ทอเรียม⁽²⁰⁾ ในแร่โมนาไซต์นั้นจะมีทอเรียมอยู่ในรูปของทอเรียมฟอสเฟต แต่ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในรูปของทอเรียมออกไซด์ ซึ่งประโยชน์ที่สำคัญ คือ

ก. ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ซึ่งมีการใช้กันบ้างแล้วในบางประเทศ เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้เป็นพลังงานความร้อนในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น โรงงานกระดาษ น้ำตาล มุ่ย และอื่น ๆ

ข. ในทางอุตสาหกรรมจะใช้ผสมในโลหะผสมแมกนีเซียม นิกเกิล สแตนเลสสตีล และทังสเตน (Tungsten) เพื่อให้โลหะเหล่านั้นมีคุณสมบัติแข็งและดีขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ผสมทำแว่นตาและในอุตสาหกรรมทำสีเรืองแสง

ค. ใช้ทำเป็นผงอาบไล่ตะเกียง เจ้าพายุและวัสดุทนไฟ

ง. ใช้ทำอิเล็กโทรดในหลอดอิเล็กตรอน หรือหลอดเอกซเรย์

จ. ในทางเคมี จะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

3.8.3 ไตรโซเดียมฟอสเฟต⁽⁴³⁾ เป็นสารประกอบพลอยได้จากการย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยโซดาไฟ มีสูตรทางเคมีเป็น $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ อาจเรียกว่าโซเดียมฟอสเฟต ซึ่งประโยชน์ที่สำคัญของไตรโซเดียมฟอสเฟต คือ

ก. ใช้เกี่ยวกับงานทางด้านอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมทอผ้า ผลิตภัณฑ์กระดาษ กระบวนการทำน้ำตาลให้บริสุทธิ์ ผงซักฟอก และอุตสาหกรรมยา

ข. ใช้เป็นสารประกอบในเครื่องผลิตไอน้ำ

ค. ใช้เป็นตัวทำความสะอาดโลหะ

ง. ใช้เป็นตัวโพโตกราฟิกดีเวลลอปเปอร์ (Photographic developer)