การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดิน

DEVELOPMENT OF ANALYSIS PROCESS FOR THORIUM ISOTOPES IN SOIL

วุฒิไกร กุลสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดิน

วุฒิไกร กุลสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดิน
	Development of Analysis Process for Thorium Isotopes in Soil
ชื่อ - นามสกุล	นายวุฒิไกร กุลสวัสดิ์
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส แก้วช่วย, Ph.D.
ปีการศึกษา	2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุจิตรา ภู่ระหงษ์, ปร.ด.)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ศิริวรรณ ตี้ภู่, ปร.ด.)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส แก้วช่วย, Ph.D.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพัทธ์ จงสวัสดิ์, ปร.ด.)
วันที่ 10 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดิน
ชื่อ – นามสกุล	นายวุฒิไกร กุลสวัสดิ์
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนตรนภิส แก้วช่วย, Ph.D.
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

ไอโซโทปทอเรียม เป็นสารกัมมันตรังสีอยู่ในธรรมชาติที่เป็นพิษปนเปื้อนในดินซึ่งมาจากการจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตของเกษตรกร เมื่อไอโซโทปทอเรียมตกค้างในร่างกายจะเพิ่มโอกาสเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการวิเคราะห์หาไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีและวิธีวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีเพื่อให้การแยกไอโซโทปทอเรียมในดินมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินมีด้วยกัน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด ขั้นที่สองการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ ด้วยการใช้เรซินชนิด AG 1-X8 Cl^- เพื่อแลกเปลี่ยนอิออนของทอเรียมออกจากสารละลาย ขั้นสุดท้ายการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์แอมโมเนียมออกซาเลตกับแอมโมเนียมคลอไรด์ แล้ววัดค่ารังสีของไอโซโทปทอเรียมด้วยวิธีแอลฟาสเปกโทรเมทรี

ผลจากการวิจัย พบว่าในการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์หาไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีทำให้การสกัดแยกไอโซโทปทอเรียมออกจากตัวอย่างดินได้ดีและมีความปลอดภัยต่อผู้วิเคราะห์ สามารถแยกไอโซโทปทอเรียมที่บริสุทธิ์โดยใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยและเพิ่มประสิทธิภาพการผนึกไอโซโทปทอเรียมได้ดี สามารถแยกไอโซโทปทอเรียมออกจากธาตุอื่นได้ให้ผลที่มีความถูกต้องและเที่ยงตรง นอกจากนี้เครื่องมือแอลฟาสเปกโทรเมทรีสามารถวัดค่ารังสีทอเรียมในปริมาณน้อยซึ่งค่าต่ำสุดของเครื่องมือวัดที่สามารถวิเคราะห์ได้เท่ากับ 0.16 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

คำสำคัญ: ไอโซโทปทอเรียม กระบวนการวิเคราะห์ทอเรียม ทอเรียมในดิน แอลฟาสเปกโทรเมทรี

Thesis Title Development of Analysis Process for Thorium Isotopes in Soil
Name – Surname Mr. Wutthikrai Kulsawat
Program Applied Chemistry
Thesis Advisor Assistant Professor Netnapit Kaewchuay, Ph.D.
Academic Year 2021

ABSTRACT

Thorium isotope is a radioactive element in nature that contaminates in soil from an application of phosphate fertilizers by farmers. The consumption of food containing contaminated plant material can cause cancer. This research aimed to develop a simple preparation process using a radiochemistry technique for an analysis of Thorium isotopes in soil with Alpha-spectrometry in order to separate Thorium isotopes effectively.

The developed analysis process of Thorium isotopes in soil was composed of 3 steps. Firstly, Thorium isotopes were extracted from a soil sample by using certain acids one at a time. Secondly, purified Thorium isotopes were separated by AG 1-X8 Cl^- resin to exchange ions of Thorium from the solution. Lastly, an electroplating of Thorium isotopes was sealed onto stainless plates with Ammonium oxalate and Ammonium chloride and then measured for radioactivity of Thorium isotopes by Alpha-spectrometry.

The findings revealed that the developed analysis process for Thorium isotopes in soil by radiochemistry resulted in a better separation of Thorium isotopes as well as the safety of the analyst. In terms of the separation of purified Thorium isotopes, a small amount of the soil sample was used and more efficient electroplating of Thorium isotopes was shown. Thorium isotopes were separated from other interference elements accurately, precisely and validly. Moreover, Alpha-spectrometry detected a small amount of Thorium isotopes. The limit of detection and the limit of quantitation revealed a relatively low value of 0.16 Becquerel per kilogram.

Keywords: Thorium isotopes, Thorium analysis process, Thorium in soil, Alpha-spectrometry

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภิส แก้วช่วย ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจิตรา ภู่ระหงษ์ ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ ตี้ภู่ กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยและคำแนะนำในการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและข้อคิดเป็นแนวทางในการทำวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชมงคลธัญบุรีที่ได้คอยอบรมให้ความรู้วิชาต่าง ๆ ในหลักสูตรและคอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ช่วยแก้ไขปัญหาเพื่อพัฒนาศักยภาพของผู้วิจัยในการทำวิทยานิพนธ์ ร่วมอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ และขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2560 ที่คอยให้ช่วยเหลือทำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ดำเนินไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ตัวผู้วิจัยเอง และพี่บุญสม พรเทพเกษมสันต์ และครอบครัว เป็นหัวหน้างานที่คอยช่วยเหลือให้ความรู้ และการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในงานวิจัย และขอบคุณห้องปฏิบัติการงานวิจัยไอโซโทปสิ่งแวดล้อมที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และทุก ๆ ท่านที่เกี่ยวข้อง ที่ให้กำลังใจตลอดจนส่งเสริมการศึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความผิดพลาดหรือบกพร่องประการใด ผู้วิจัยกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วยความเคารพและขอบคุณอย่างสูง

วุฒิไกร กุลสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ....(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ....(4)
กิตติกรรมประกาศ ....(5)
สารบัญ ....(6)
สารบัญตาราง ....(8)
สารบัญรูป ....(10)
บทที่ 1 บทนำ 12
1.1 ที่มาและความสำคัญ 12
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 14
1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย 15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 17
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 18
2.1 ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียม 18
2.2 การใช้ประโยชน์ของธาตุไอโซโทปทอเรียม 23
2.3 ธาตุไอโซโทปทอเรียมในสิ่งแวดล้อม 24
2.4 ความเป็นพิษของธาตุไอโซโทปทอเรียม 27
2.5 วิธีวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียม 30
2.6 วิธีวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี 35
2.7 เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี 44
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 46
3.1 สารเคมี 46
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ 47
3.3 วิธีการทดลอง 48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิจัย........72
4.1 ผลการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี........72
4.2 ผลการทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี........83
4.3 สรุปกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่........87
4.4 ผลการนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี........88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ........93
5.1 สรุปผลการทดลอง........93
5.2 ข้อเสนอแนะ........95
บรรณานุกรม........96
ภาคผนวก........103
ภาคผนวก ก........104
ประวัติผู้เขียน........130

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติของธาตุไอโซโทปทอเรียม....................19
ตารางที่ 2.2 รายชื่อสินแร่ที่พบทอเรียมปะปน และองค์ประกอบของสินแร่....................20
ตารางที่ 2.3 ค่าครึ่งชีวิตและการสลายตัวของไอโซโทปทอเรียมธรรมชาติ และไอโซโทปทอเรียมสังเคราะห์....................21
ตารางที่ 2.4 ค่า Specific activity ของไอโซโทปทอเรียม....................22
ตารางที่ 2.5 ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมทอเรียม-232 ในปุ๋ยฟอสเฟต....................25
ตารางที่ 2.6 ชนิดของดินและปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียม-232....................26
ตารางที่ 2.7 ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียม-232 ในดินจากประเทศต่าง ๆ....................26
ตารางที่ 2.8 พลังงานแอลฟาของไอโซโทปทอเรียม....................43
ตารางที่ 3.1 สรุปสภาวะที่ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์....................60
ตารางที่ 4.1 ผลการพัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี....................73
ตารางที่ 4.2 ผลการพัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด....................74
ตารางที่ 4.3 สรุปผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยไฟฟ้า....................79
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์....................82
ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่....................84
ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาความเที่ยงตรง โดยการทำซ้ำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่....................85
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาความเที่ยงตรง โดยการทวนซ้ำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่....................86
ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ....................90

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปี ของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ 91

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย 16
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลหะทอเรียม 18
รูปที่ 2.2 ลักษณะทางธรณีเคมีของทอเรียม ก. สินแร่ทอไรท์ ข. ยูราโนทอไรท์ และค. ทอริเอไนท์ 19
รูปที่ 2.3 ผังแสดงอนุกรมทอเรียมและยูเรเนียม 22
รูปที่ 2.4 ลักษณะของทอเรียมในปุ๋ยฟอสเฟตเข้าปนเปื้อนดินเกษตรกรรม 24
รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมในดินประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป (เดือนมกราคม 2562) 25
รูปที่ 2.6 อวัยวะวิกฤตที่กลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียมเข้าสะสม 29
รูปที่ 2.7 ลักษณะเนื้อเยื่อปอดปกติที่เปลี่ยนเป็นเนื้อเยื่อมะเร็ง เมื่อได้รับรังสีจากการสูดฝุ่นทอเรียม . 29
รูปที่ 2.8 แผนผังการวิเคราะห์ยูเรเนียมและทอเรียมปราศจากสมดุลในดิน 32
รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ทอเรียมของ สถาบันคณะกรรมการวิจัยพลังงานปรมาณูแห่งออสเตรเลีย 33
รูปที่ 2.10 กลไกการดูดซับไอออนในสารละลายเพื่อทำให้บริสุทธิ์ 36
รูปที่ 2.11 สูตรทางเคมีและลักษณะโครงสร้างของสไตรีน 37
รูปที่ 2.12 สายพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน 37
รูปที่ 2.13 ก. โมเลกุลเดี่ยวของไดไวนิลเบนซีน และข. การเชื่อมต่อพอลิสไตรีน 2 สาย 38
รูปที่ 2.14 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ในการสังเคราะห์เรซินแบบไอออนบวก 38
รูปที่ 2.15 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 1 ในการสังเคราะห์เรซินแบบไอออนลบ 39
รูปที่ 2.16 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 2 ในการสังเคราะห์ได้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ แบบ 1 และแบบ 2 39
รูปที่ 2.17 ก. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และข. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ 40
รูปที่ 2.18 โครงสร้างเรซินชนิด ก. UTEVA® ข. TRU® 40
รูปที่ 2.19 การผนึกทอเรียมด้วยไฟฟ้า 41
รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาการผนึกแผ่นฟิล์มทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า 42
รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของไอโซโทปทอเรียม 43
รูปที่ 2.22 เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี 44

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.1 ผังแสดงค่าออกซิเดชันของกลุ่มธาตุแอกทิไนด์ 52
รูปที่ 3.2 การเตรียมเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 57
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 61
รูปที่ 3.4 การวัดตัวอย่างด้วยเครื่องแอลฟาสเปกโทรมิเตอร์ 63
รูปที่ 3.5 พื้นที่ศึกษา อำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด 67
รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มโดยวิธีตีตาราง 68
รูปที่ 3.7 พื้นที่ศึกษา ตำบลแม่จะเรา อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก 69
รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์เก็บดินแบบแท่ง ก. ภาพจากพื้นที่ศึกษา ข. ภาพจำลอง 70
รูปที่ 3.9 รูปแบบการเก็บตัวอย่างแบบ Line transect sampling 70
รูปที่ 4.1 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 76
รูปที่ 4.2 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 77
รูปที่ 4.3 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม 78
รูปที่ 4.4 ผลการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม 79
รูปที่ 4.5 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสหลังการผนึก 82
รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของไอโซโทปทอเรียม จากกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ 83
รูปที่ 4.7 กระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ 87
รูปที่ 4.8 ปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาที่มีการจัดการซากพืชทั้ง 2 แบบตามระดับความลึกในแนวดิ่ง 89
รูปที่ 4.9 ผลการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก 91

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ทอเรียม (Th) เป็นธาตุในกลุ่มอนุกรมแอททิไนด์ (Actinide series) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติบนเปลือกโลก จึงมีการปะปนในดินพบค่าปริมาณเฉลี่ย 6 ไมโครกรัมต่อกรัม ทอเรียมมี 4 ไอโซโทป ที่มีค่าครึ่งชีวิตสูง และเป็นธาตุกัมมันตรังสีทุกไอโซโทป ทอเรียมนับว่าเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีความเป็นพิษสูง เพราะธาตุลูกสลายตัวให้รังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา ไอโซโทปทอเรียมที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และพืชได้แก่ ทอเรียม-232 มีค่าครึ่งชีวิต 1.4×10^{10} ปี ทอเรียม-230 มีค่าครึ่งชีวิต 7.7×10^{4} ปี ทอเรียม-228 มีค่าครึ่งชีวิต 1.9 ปี และทอเรียม-229 มีค่าครึ่งชีวิต 7.3×10^{3} ปี [1-4]

ทอเรียมที่เกิดขึ้นบนโลกมีทั้งที่อยู่ในรูปออกไซด์ (ThO_2) ฟอสเฟต ($ThPO_4$) และซิลิเกต ($ThSiO_4$) โดยมีแนวโน้มที่สามารถจับกับสารประกอบเชิงซ้อนไฮโดรคาร์บอนได้ [1-4] จากรายงานการศึกษาเกี่ยวกับการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดินเกษตรที่เป็นผลจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตเป็นเวลานาน โดยทำการวิเคราะห์ในตัวอย่าง 3 ชนิดคือ ดินเกษตร ปุ๋ยฟอสเฟต และปุ๋ยทั่วไป (ไม่มีสารประกอบฟอสเฟต) ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของไอโซโทปทอเรียมในดินเกษตรมีความสัมพันธ์กับปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่วิเคราะห์พบในปุ๋ยฟอสเฟต อย่างไรก็ตามในพื้นที่แต่ละแห่งจะมีปริมาณทอเรียมที่แตกต่างกัน เนื่องจากทอเรียมเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติปะปนอยู่กับหินแร่โลหะชนิดต่าง ๆ บนผิวโลก ดังนั้นปริมาณทั้งหมดของทอเรียมในดินจึงมาจากพื้นที่ที่มีหินธรรมชาติที่เป็นต้นกำเนิดทอเรียมรวมกับส่วนที่ตกค้างมาจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟต [5-8]

ทอเรียมที่ปะปนในดินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ดี จึงพบว่าน้ำเป็นตัวทำละลายที่ชะล้างทอเรียมจากดินลงสู่แหล่งน้ำผิวดิน น้ำใต้ดิน และปนเปื้อนพื้นที่ผิวดินในบริเวณโดยรอบ และกระจายการปนเปื้อนในพื้นที่เป็นบริเวณที่กว้างขึ้น เนื่องจากการเสื่อมสลายของไอโซโทปทอเรียมต้องใช้เวลานาน ส่งผลให้ช่วงเวลาการตกค้างในดินมีค่าสูง ก่อให้เกิดปัญหาการส่งผ่านจากดินสู่ผลผลิตทางการเกษตร การฟุ้งกระจายของดินที่ปนเปื้อนจะเข้าสู่ร่างกายของเกษตรกรได้ทางการหายใจ การชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ และมีการกระจายตัวปนเปื้อนในพื้นที่ผิวดินเป็นบริเวณกว้างขึ้น [6-9]

เกษตรกรเป็นอาชีพหลักของประเทศไทย มีบทบาทสำคัญที่ทำให้ประเทศสามารถพึ่งพาตนเองได้ในด้านอาหาร และเสริมสร้างเศรษฐกิจชาติให้เข้มแข็ง ผลผลิตทางการเกษตรที่ได้ส่วนหนึ่งใช้

บริโภคภายในประเทศ และอีกส่วนหนึ่งเป็นสินค้าส่งออกสร้างรายได้ให้แก่ประเทศ แต่ความยั่งยืนในการผลิตของเกษตรกรมีแนวโน้มที่จะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากทรัพยากรดินที่เป็นพื้นฐานสำคัญในการผลิตเสื่อมโทรมลง ปัญหามลพิษในดินนั้นเป็นเรื่องที่ควรให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมนุษย์ต้องอาศัยปัจจัยเกี่ยวกับดินในการเพาะปลูก มีการคาดการณ์ว่าในอีก 40 ปีข้างหน้า ประชากรมนุษย์จะเพิ่มมากขึ้นอีกประมาณ 2 พันล้านคน จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณผลผลิตทางการเกษตรอย่างน้อยประมาณ 40% เพื่อให้เพียงพอต่อประชากรที่เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากพื้นที่การเกษตรที่อุดมสมบูรณ์ และเหมาะสมแก่การเพาะปลูกนั้นเหลืออยู่ประมาณ 11% บนพื้นผิวโลกเท่านั้น เกษตรกรจึงเลือกใช้วิธีบำรุงดินด้วยการเติมปุ๋ยเคมีลงในดินทุกรอบของการเพาะปลูก เนื่องจากปุ๋ยเคมีโดยเฉพาะปุ๋ยฟอสเฟตให้ผลทางการผลิตที่เร็วกว่าการใช้ปุ๋ยหมักหรือปุ๋ยชีวภาพ ส่งผลให้ตรวจพบสารพิษรวมทั้งสารในกลุ่มไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดิน [1-2, 10-11] ดังนั้นเราจึงควรให้ความสำคัญในการอนุรักษ์ดิน และหันมาทำการเกษตรแบบยั่งยืนเพื่อลดการเกิดมลพิษทางดิน

แม้ว่าในปัจจุบันการเพาะปลูกระบบเกษตรอินทรีย์ของกลุ่มเกษตรกรจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น เนื่องจากผู้บริโภคยอมรับได้ในราคาที่สูงขึ้น แต่ในระบบเกษตรอินทรีย์มีความเป็นไปได้ที่ผลผลิตจะถูกตรวจพบสารเคมีปนเปื้อนหรือสารพิษตกค้าง ทั้งที่เกษตรกรผู้ผลิตไม่ได้ใช้สารเคมีดังกล่าว แต่เนื่องจากมีการปนเปื้อนของสารเคมีการเกษตรในระบบนิเวศน์เดิมอยู่แล้วทั้งในดิน น้ำ และอากาศ จากการใช้งานอย่างกว้างขวาง และต่อเนื่องตลอดระยะเวลาไม่น้อยกว่า 50 ปี อย่างไรก็ตามระดับการปนเปื้อนดังกล่าวจะต้องอยู่ในระดับที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับเกณฑ์สารตกค้างสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Residue Limit; MRL) ด้วยเหตุนี้การตรวจรับรองเกษตรอินทรีย์ในหลายประเทศจึงยอมรับให้มีการปนเปื้อนได้แต่ในระดับที่ต่ำกว่าค่า MRL ซึ่งกำหนดค่าไว้แตกต่างกันขึ้นกับข้อมูลของแต่ละประเทศ [12] สำหรับประเทศไทยยังไม่เคยมีการกำหนดค่าเกณฑ์สารพิษตกค้างสูงสุดที่ยอมรับได้ของกลุ่มไอโซโทปทอเรียมในดินเกษตรมาก่อน

ปัจจุบันวิธีวิเคราะห์สารพิษตกค้างกลุ่มไอโซโทปทอเรียมในดินทำได้หลายวิธี ได้แก่ การวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างโดยตรง การอาบรังสีตัวอย่างในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Neutron Activation Analysis; NAA) การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการปลดปล่อยอะตอมมิคพลาสมา (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry; ICP-AES) เครื่องวัดมวลพลาสมาของไอออน (Inductively coupled plasma mass spectrometry; ICP-MS) เครื่องวิเคราะห์เทอร์มัลไอออไนเซชัน แมส สเปกโตรเมตรี (Thermal ionization mass spectrometry; TIMS) และการวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เทคนิคดังกล่าวข้างต้นมีข้อจำกัดแตกต่างกัน โดยการวิเคราะห์ด้วยการวัดรังสีแกมมาจะได้ผลเป็นไอโซโทปทอเรียม-232 เท่านั้น ส่วนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA และอาศัยเครื่องมือ ICP จะได้ผลการวิเคราะห์เป็นไอโซโทปทอเรียมรวม

และสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมพร้อมกันทั้งสามไอโซโทปได้ คือ ทอเรียม-232 ทอเรียม-228 และทอเรียม-230 แม้ว่าไอโซโทปทอเรียม-228 และทอเรียม-230 เป็นไอโซโทปรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น [13-16] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีต้องผ่านการเตรียมตัวอย่างตามขั้นตอนทางเคมี มีขั้นตอนที่ซับซ้อน ต้องใช้สารเคมีหลายชนิด วัสดุทดลองราคาสูง สร้างของเสียชนิดสารละลายอินทรีย์และพลาสติก รวมทั้งต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เฉพาะทาง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ซึ่งคาดว่าจะได้วิธีที่สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมโดยใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยได้ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ได้ครั้งละหลายชุดตัวอย่าง วิเคราะห์เชิงปริมาณได้ เป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะสูง มีความไววิเคราะห์สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.2.2 เพื่อทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.2.3 เพื่อนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.3.1.1 พัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี

1.3.1.2 พัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด

1.3.1.3 พัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1.3.2 ทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.3.2.1 ศึกษาความจำเพาะ (Selectivity)

1.3.2.2 ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit) ได้แก่ ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection; LOD) และ ขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation; LOQ)

1.3.2.3 ศึกษาความแม่นยำ (Accuracy)

1.3.2.4 ศึกษาความเที่ยงตรง (Precision) ได้แก่ การทำซ้ำ (Repeatability) การทวนซ้ำ (Reproducibility)

1.3.3 นำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.3.3.1 ประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด

1.3.3.2 ประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก

1.4 กรอบแนวความคิดของการวิจัย

ไอโซโทปทอเรียม เป็นสารกัมมันตรังสีอยู่ในธรรมชาติที่เป็นพิษปนเปื้อนในดินซึ่งมาจากการจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตของเกษตรกร เกษตรกรไทยนิยมใช้วิธีเติมปุ๋ยฟอสเฟตแทนการใช้ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยชีวภาพ เนื่องจากให้ผลผลิตเร็ว สามารถเพิ่มผลผลิตได้ทันตามความต้องการของตลาด ในการใช้ปุ๋ยเพื่อบำรุงดิน เกษตรกรมักมีความเชื่อและความเข้าใจว่าการให้ปุ๋ยปริมาณสูงจะช่วยเพิ่มผลผลิตได้ดียิ่งขึ้น โดยไม่ได้ตระหนักว่าปุ๋ยที่เติมมากเกินกว่าที่พืชต้องการ เป็นการสิ้นเปลืองและเกิดการตกค้างในดิน ส่งผลให้ทรัพยากรดินเสื่อมโทรมลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ในสารตั้งต้นของผลิตภัณฑ์ปุ๋ยฟอสเฟตตรวจพบสารกัมมันตรังสีครึ่งชีวิตยาวกลุ่มไอโซโทปทอเรียมปะปนอยู่ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิธีวิเคราะห์สารพิษกลุ่มไอโซโทปทอเรียม มีข้อจำกัดด้านความไว และความไม่แน่นอนมีค่าค่อนข้างสูง และไม่สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียม-228 และทอเรียม-230 ได้ เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตสั้น นอกจากนี้ในบางวิธีต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนและราคาสูง เช่น เครื่องวัดการปลดปล่อยอะตอมมิคพลาสมา เครื่องวัดมวลพลาสมาของไอออน หรือเครื่องวิเคราะห์เทอร์มอลไอออไนเซชันแมสสเปกโตรเมทรี การวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมพร้อมกันทั้งสามไอโซโทปได้ คือ ทอเรียม-232 ทอเรียม-228 และ

ทอเรียม-230 แม้ว่าไอโซโทปทอเรียม-228 และทอเรียม-230 เป็นไอโซโทปรังสีที่มีค่าครึ่งชีวิตสั้น อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแอลฟาสเปกโทรมิเตอร์แบบดั้งเดิมต้องผ่านการเตรียมตัวอย่างตามขั้นตอนทางเคมี มีขั้นตอนที่ซับซ้อน ต้องใช้สารเคมีหลายชนิด ค่าใช้จ่ายในการทดลองสูง มีปริมาณของเสียชนิดสารละลายอินทรีย์และพลาสติกจำนวนมาก รวมทั้งต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่เฉพาะทาง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ซึ่งคาดว่าจะได้วิธีที่สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมโดยใช้ตัวอย่างปริมาณน้อยได้ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์ได้ครั้งละหลายชุดตัวอย่าง วิเคราะห์เชิงปริมาณได้ เป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะสูง มีความไววิเคราะห์สูง โดยงานวิจัยนี้มีกรอบแนวความคิดของการวิจัย แสดงดังรูปที่ 1.1

พัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1) พัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี
2) พัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด
3) พัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1) ศึกษาความจำเพาะ (Selectivity)
2) ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit)
3) ศึกษาความแม่นยำ (Accuracy)
4) ศึกษาความเที่ยงตรง (Precision)

นำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1) ประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด
2) ประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก

รูปที่ 1.1 กรอบแนวความคิดของการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้พัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.5.2 ได้กระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมที่มีประสิทธิภาพสำหรับวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1.5.3 ได้กระบวนการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

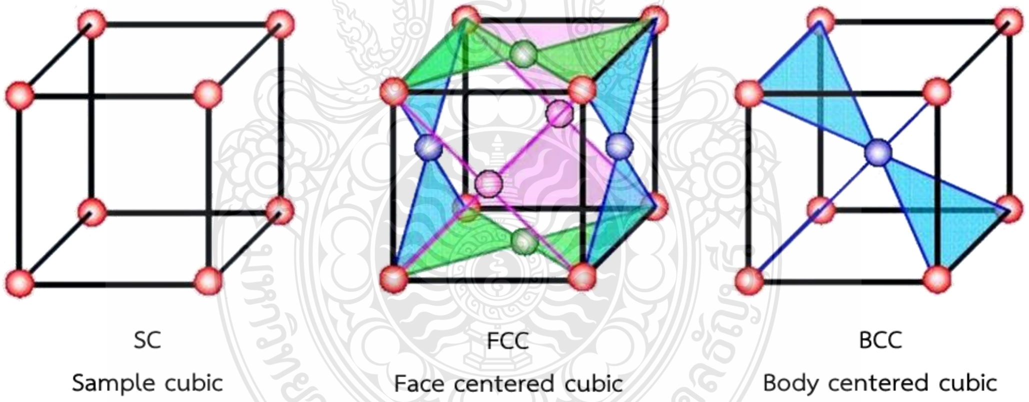
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียม

ทอเรียม (Thorium) เป็นธาตุกัมมันตรังสีอยู่ในอนุกรมแอกทิไนด์ (Actinide series) ปฏิกิริยาการสลายตัวของทอเรียมทำให้เกิดพลังงานความร้อนใต้พิภพ ทอเรียมอยู่ในลำดับที่ 2 ของตารางธาตุ ค้นพบเมื่อปีค.ศ. 1828 โดย Jons Jakob Berzelius นักวิจัยชาวสวีเดน โดยตั้งชื่อธาตุที่ค้นพบว่า "ทอเรียม" ตามชื่อเทพเจ้าทอร์ (Thor) เทพเจ้าแห่งสายฟ้าตามตำนานเทพปกรณัมนอร์สของชาวสแกนดิเนเวียน และในปีค.ศ. 1914 นักวิจัยชาวดัทส์ Dirk Lely Jr. และ Lodewijk Hamburger สามารถแยกโลหะทอเรียมได้สำเร็จ

ทอเรียมมีสัญลักษณ์ทางเคมีคือ Th ค่ามวลอะตอม 90 เลขอะตอม 232.40 กรัม/โมล โครงสร้างของโลหะทอเรียมที่อุณหภูมิห้องเป็นแบบ Face-centered cubic แต่เมื่อให้ความร้อนถึง 1,400 ± 25 องศาเซลเซียส โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็นแบบ Body-centered cubic แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของโลหะทอเรียม

ทอเรียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติพบบนผิวโลก ในสภาวะปกติทอเรียมบริสุทธิ์ จะมีความนิ่ม ยืดหยุ่นดี ดัดม้วน และขึ้นรูปได้ง่าย มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง ลักษณะเป็นของแข็งสีขาวมันวาว แต่เมื่อรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบออกไซด์ สีจะหมองลงช้า ๆ เปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเทาจนกระทั่งกลายเป็นสีดำ ผงละเอียดทอเรียมสามารถติดไฟได้เองในอากาศเมื่อได้รับความร้อน และให้เปลวไฟสว่างจ้าสีขาว สารประกอบทอเรียมเกือบทั้งหมด มีค่าออกซิเดชัน

เพียงค่าเดียวคือ +4 โดยส่วนใหญ่ของไอออนทอเรียม (Th^{+}) อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ ฟอสเฟต และซิลิเกต ได้แก่ ทอเรียมออกไซด์ (ThO_2) ทอเรียมฟอสเฟต ($Th_3(PO_4)_2$) และทอเรียมซิลิเกต ($ThSiO_2$) ไอออนทอเรียมสามารถละลายน้ำได้โดยเฉพาะในดินที่เป็นกรด ซึ่งในบางสภาวะความเข้มข้นของทอเรียมสูงถึง 40 ส่วนในล้านส่วน ทอเรียมที่พบบนผิวโลกมีปริมาณใกล้เคียงกับตะกั่ว และมากกว่ายูเรเนียมประมาณ 3-4 เท่า [1-3, 17-20] สมบัติของธาตุไอโซโทปทอเรียมแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของธาตุไอโซโทปทอเรียม

สมบัติ	ธาตุไอโซโทปทอเรียม
เลขอะตอม	90
น้ำหนักอะตอม	232.038
จุดหลอมเหลว	ประมาณ 1,700 °C (3,100 F)
จุดเดือด	ประมาณ 4,000 °C (7,200 F)
ความถ่วงจำเพาะ	ประมาณ 11.66 (17 °C)
ความหนาแน่น	11.72 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20°C
ค่าออกซิเดชัน	+4

ลักษณะทางธรณีเคมีของทอเรียมเหมือนกับกลุ่มธาตุหายากโดยเฉพาะธาตุซีเรียมและธาตุเซอร์โคเนียม จึงพบกระจายปะปนกับธาตุหายากในหิน ดินและสินแร่ชนิดต่าง ๆ เช่น โมนาไซท์ (Monazite) บรอคไทท์ (Brocktite) ยูเซไนท์ (Euxenite) สินแร่ทอเรียมที่พบเป็นส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบทอไรท์ (Thorite) ยูราโนทอไรท์ (Uranothorite) และทอริเอไนท์ (Thorianite) แสดงดังรูปที่ 2.2 [17] สำหรับสินแร่ที่พบทอเรียมปะปนอยู่ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.2 [17]

รูปที่ 2.2 ลักษณะทางธรณีเคมีของทอเรียม ก. สินแร่ทอไรท์ ข. ยูราโนทอไรท์ และค. ทอริเอไนท์

ตารางที่ 2.2 รายชื่อสินแร่ที่พบทอเรียมปะปน และองค์ประกอบของสินแร่ [17, 20]

สินแร่	องค์ประกอบ
Thorite	$(Th, U)SiO_4$
Thorianite	$(ThO_2 + UO_2)$
Thorogummite	$Th\ (SiO_4)_{1-x}\ (OH)_{4x}$
Monazite	$(Ce, La, Y, Th)PO_4$
Brocktite	$(Ca, Th, Ce)(PO_4)H_2O$
Xenotime	$(Y, Th)PO_4$
Euxenite	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
Basnasite	$(Ce, La, Dy)F.CO_2$
Allanite	$(Ca, Ce, Th)_2(Al, Fe, Mg)_3Si_3O_{12}(OH)$
Parisite	$2(Ce, La, Di, Th)(F, CaO.3CO_3)$
Polymignite	$(Ca, Fe, Y, Th)(Nb, Ti, Ta, Zr)O_4$
Cheralite	$(Ca, Ce, Th)(P, Si)O_4$
Samarskite	$(Y, Er, Ce, U, Ca, Fe, Pb, Th)(Nb, Ta, Ti, Sn)_2O_6$

ไอโซโทปทอเรียมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

ประเภทที่ 1 ไอโซโทปทอเรียมธรรมชาติ เป็นไอโซโทปทอเรียมที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ มี 6 ไอโซโทป ได้แก่ ทอเรียม-234 ทอเรียม-232 ทอเรียม-231 ทอเรียม-230 ทอเรียม-228 และทอเรียม-227

ประเภทที่ 2 ไอโซโทปทอเรียมสังเคราะห์ เป็นไอโซโทปทอเรียมที่มนุษย์สังเคราะห์ขึ้น มี 7 ไอโซโทป คือ ทอเรียม-235 ทอเรียม-233 ทอเรียม-229 ทอเรียม-226 ทอเรียม-225 ทอเรียม-224 และทอเรียม-223 ไอโซโทปทอเรียมทั้งหมดเป็นไอโซโทปรังสี สลายตัวให้รังสีแอลฟา เบตาและแกมมา

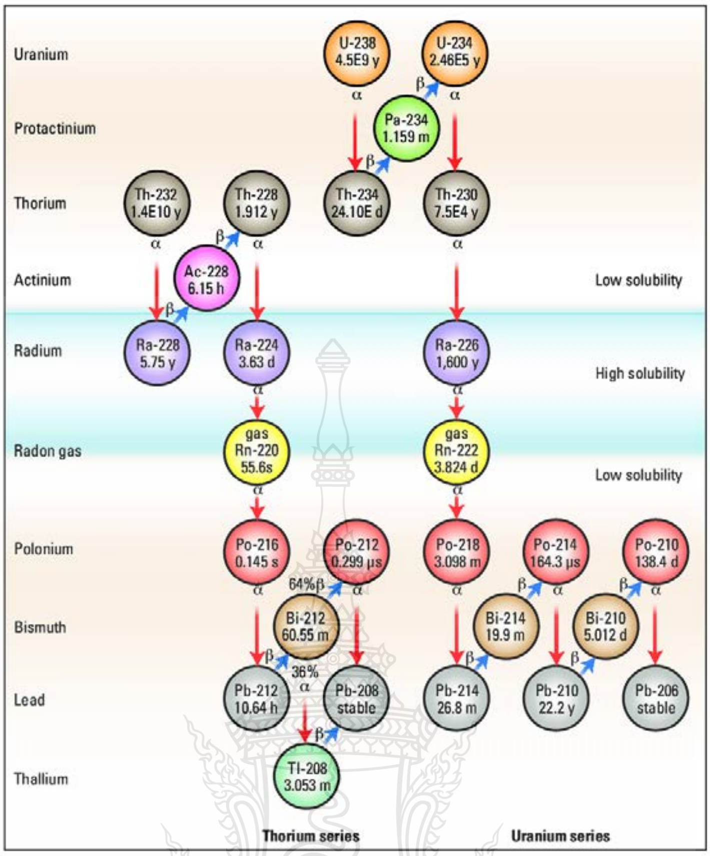
สำหรับค่าครึ่งชีวิตและการสลายตัวของไอโซโทปทอเรียม แสดงดังตารางที่ 2.3 [1-3, 17-20]

ตารางที่ 2.3 ค่าครึ่งชีวิตและการสลายตัวของไอโซโทปทอเรียมธรรมชาติ และไอโซโทปทอเรียมสังเคราะห์

ไอโซโทป	ค่าครึ่งชีวิต	สลายตัวให้รังสี
	ไอโซโทปทอเรียมธรรมชาติ	
ทอเรียม-234	24.10 วัน	เบตา
ทอเรียม-232	1.4×10^{10} ปี	แอลฟา
ทอเรียม-231	29.97 วัน	เบตา
ทอเรียม-230	7.7×10^{4} ปี	แอลฟา
ทอเรียม-228	1.9 ปี	แอลฟา
ทอเรียม-227	18.72 วัน	แอลฟา
	ไอโซโทปทอเรียมสังเคราะห์	
ทอเรียม-235	7.16 นาที	เบตา
ทอเรียม-233	22 นาที	เบตา
ทอเรียม-229	7.3×10^{3} ปี	แอลฟา
ทอเรียม-226	30.56 นาที	แอลฟา
ทอเรียม-225	8.72 นาที	แอลฟา
ทอเรียม-224	810×10^{-3} นาที	แอลฟา
ทอเรียม-223	600×10^{-3} นาที	แอลฟา

อย่างไรก็ตามไอโซโทปทอเรียมที่มีความสำคัญมีเพียง 4 ไอโซโทป คือ ทอเรียม-232 ทอเรียม-230 ทอเรียม-228 และทอเรียม-229 เนื่องจากทอเรียมทั้ง 4 ไอโซโทปเหล่านี้ มีค่าครึ่งชีวิตสูงกว่าไอโซโทปอื่น และในจำนวนทั้ง 4 ไอโซโทป ทอเรียม-232 นับเป็นไอโซโทปที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากทอเรียม-232 เป็นไอโซโทปที่มีปริมาณร้อยละ (%Abundance) ในธรรมชาติสูงที่สุด

ในส่วนการสลายตัวพบว่าทอเรียม-228 และทอเรียม-232 จัดอยู่ในอนุกรมทอเรียม ทอเรียม-230 และทอเรียม-234 จัดอยู่ในอนุกรมยูเรเนียม โดยเกิดจากการสลายตัวของยูเรเนียม-234 และยูเรเนียม-238 ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2.3 [21]



รูปที่ 2.3 ผังแสดงอนุกรมทอเรียมและยูเรเนียม [21]

ในงานวิจัยเกี่ยวกับปริมาณไอโซโทปทอเรียมสามารถรายงานผลในหน่วยน้ำหนักหรือหน่วยความแรงรังสี (เบคเคอเรล) โดยอาศัยค่า Specific activity ของไอโซโทปทอเรียมใช้ในการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 2.4 [17-20]

ตารางที่ 2.4 ค่า Specific activity ของไอโซโทปทอเรียม

ไอโซโทป	ค่าครึ่งชีวิต	specific activity (เบคเคอเรล/กรัม)
ทอเรียม–234	24.1 วัน	85×10^{11}
ทอเรียม–232	1.4×10^{10} ปี	41
ทอเรียม–230	7.7×10^{4} ปี	72×10^{5}
ทอเรียม–228	1.9 ปี	30.40×10^{10}

2.2 การใช้ประโยชน์ของธาตุไอโซโทปทอเรียม

นับตั้งแต่ Jons Jakob Berzelius ค้นพบธาตุไอโซโทปทอเรียมในปีค.ศ. 1828 เป็นต้นมา ได้เริ่มมีการนำทอเรียมมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมและการแพทย์ รวมทั้งเมื่อมีการทดลองนำทอเรียมมาทำเป็นโลหะอัลลอยด์ชนิดต่าง ๆ เช่น โลหะอัลลอยด์แมกนีเซียม และทอเรียมร้อยละ 2 ถึง 3 พบว่ามีสมบัติในการอ่อนตัวและคงตัวดีขึ้น ส่งผลให้การใช้ประโยชน์ทอเรียมในทางอุตสาหกรรมเพิ่มสูงขึ้น ดังต่อไปนี้ [1, 17, 22]

1) ไส้ตะเกียงเจ้าพายุ (Gas Mantle) ในปีค.ศ. 1885 Baron Carl Auer von Welsbach ได้นำไส้ตะเกียงชุบทอเรียมและเติมซีเรียมออกไซด์ร้อยละ 1-2 พบการให้แสงสว่างมีความเข้มสูงสุด

2) หลอดอิเล็กตรอน (Electron tube) ทอเรียมใช้ทำขั้วไฟฟ้าในหลอดปล่อยประจุแบบแก๊ส (Discharge tube) ซึ่งใช้พลังงานในการทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนน้อยกว่าขั้วไฟฟ้าแบบอื่น

3) ลวดภายในโคมไฟ การเติมทอเรียมร้อยละ 0.8-1.2 ลงในโลหะผสมทังสเตน ประสิทธิภาพการให้ความสว่างของลวดเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งลดการเปราะหักของลวดลง

4) ใช้เป็นส่วนผสมในการทำเบ้าหลอม หรือเซรามิกทนความร้อนสำหรับห้องปฏิบัติการอุณหภูมิสูง

5) ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสีและโลหะทนความร้อน เพื่อใช้ในงานการบินและอวกาศ

6) ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ในขั้นตอนการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นกรดไนตริก ขั้นตอนของกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum cracking) และขั้นตอนการผลิตกรดกำมะถัน (Sulfuric acid)

7) ใช้เติมลงในแก้ว เพื่อใช้ทำแก้วดัชนีหักเหสูงและมีการกระจายแสงต่ำ หรือมีชื่อเรียกว่าแก้วทอร์ริเอท (Thoriated glass) ใช้ในการผลิตเลนส์คุณภาพสูงสำหรับกล้องถ่ายรูป กล้องส่องทางไกลและอุปกรณ์วิทยาศาสตร์

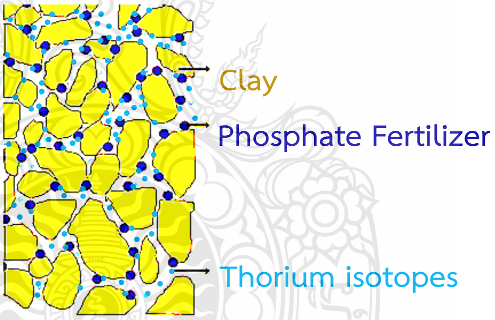
8) ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ สำหรับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ออกแบบเฉพาะใช้กับเชื้อเพลิงทอเรียม

9) ในทางการแพทย์ช่วงปีค.ศ. 1930-1950 ทอเรียมไดออกไซด์ ได้ถูกนำมาเป็นส่วนผสมที่สำคัญของ Thorotrast® เพื่อใช้ในการวินิจฉัยมะเร็ง ร่วมกับการใช้รังสีเอกซ์ ซึ่งนิยมกันอย่างแพร่หลายในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งต่อมาตรวจพบคนไข้จำนวนมากที่ได้รับ Thorotrast® แสดงอาการเป็นมะเร็งตับ และมะเร็งเม็ดเลือดขาว ดังนั้น Thorotrast® จึงถูกสั่งห้ามและยกเลิกการใช้อย่างถาวรในประเทศเดนมาร์กในปีค.ศ. 1947 และสหรัฐอเมริกาในปีค.ศ. 1950

2.3 ธาตุไอโซโทปทอเรียมในสิ่งแวดล้อม

ทอเรียมปริมาณน้อยพบปะปนได้ในหิน ดิน และสินแร่ชนิดต่าง ๆ มีรายงานว่าในเนื้อหินแกรนิต พบธาตุไอโซโทปทอเรียมปะปนอยู่ในปริมาณ 80 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ดินธรรมชาติวิเคราะห์แล้วพบว่ามีปริมาณทอเรียม 6 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ในเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าถ่านหินกำลังการผลิตที่ 1,000 เมกะวัตต์ไฟฟ้า รายงานตรวจพบทอเรียมผสมอยู่ในปริมาณ 13 ตันต่อปี

ทอเรียมพบปะปนได้ในหินฟอสเฟตในปริมาณค่อนข้างสูง หินฟอสเฟตเป็นวัสดุเริ่มต้นใช้ในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตและซุปเปอร์ฟอสเฟต จึงเรียกหินฟอสเฟตว่า ปุ๋ยหินฟอสเฟต ธาตุกัมมันตรังสีที่ปะปนในเนื้อหินฟอสเฟตธรรมชาติจะมีสายโซ่การสลายตัวอยู่ในภาวะสมดุล กล่าวคือ ธาตุกัมมันตรังสีทั้งหมดที่อยู่ในอนุกรมเดียวกัน จะสลายตัวต่อเนื่องไปจนกระทั่งถึงธาตุสุดท้ายที่เป็นธาตุเสถียร แต่เมื่อนำหินฟอสเฟตมาผ่านกระบวนการผลิตตามขั้นตอน จะเป็นการทำลายภาวะสมดุลสายโซ่การสลายตัวถูกตัดขาด ส่งผลให้ธาตุไอโซโทปทอเรียมหลุดรอดออกจากเนื้อหินและเข้าปะปนในปุ๋ยฟอสเฟต มีปุ๋ยซุปเปอร์ฟอสเฟตเป็นผลพลอยได้และกากของเสีย [1] ทอเรียมที่พบตกค้างและดูดซับกับอนุภาคดินเกษตรกรรม มีสาเหตุหลักมาจากทอเรียมปะปนมากับปุ๋ยฟอสเฟต และการเคลื่อนที่ตามทิศทางน้ำ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของทอเรียมในปุ๋ยฟอสเฟตเข้าปนเปื้อนดินเกษตรกรรม [18]

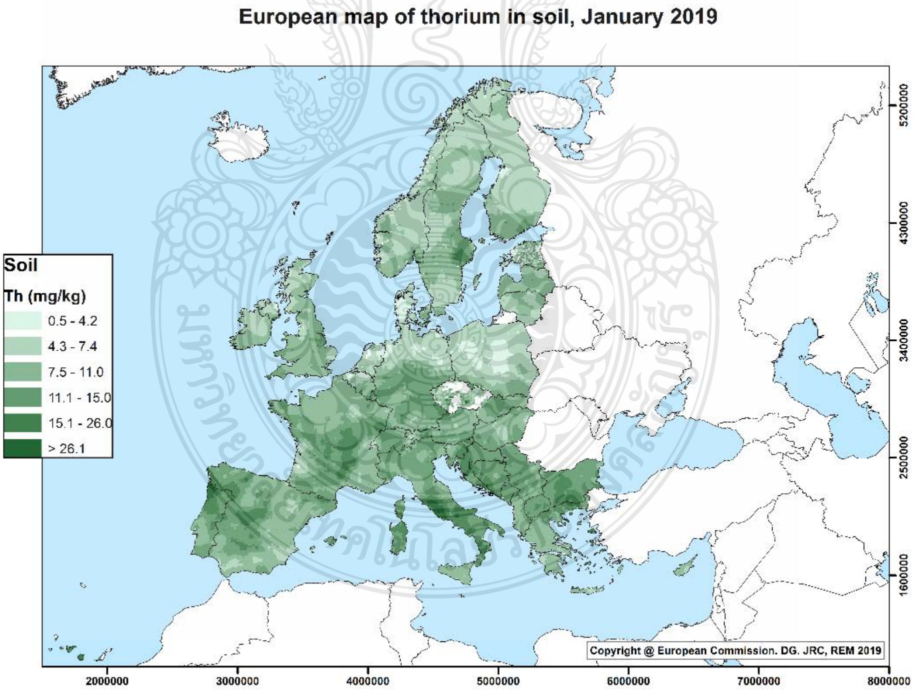
Papastefnou และคณะ [23] เสนอผลการวิเคราะห์ความแรงรังสีทอเรียม-232 (หน่วยเบคเคอเรลต่อกิโลกรัม) ในตัวอย่างต่าง ๆ ในประเทศกรีซ ดังนี้ หินฟอสเฟต (วัสดุเริ่มต้น) 7.8 $\pm$ 0.2 ตัวอย่างเศษตกค้างในปล่องโรงผลิตฟอสโฟยิปซัมจำนวน 3 ปล่อง 3.3 $\pm$ 0.1; 2.7 $\pm$ 0.1; 3.0 $\pm$ 0.5 อาคารที่ใช้วัสดุก่อสร้างผสมฟอสโฟยิปซัม 11.1 $\pm$ 0.4 และในตัวอย่างวัสดุก่อสร้างผสมฟอสโฟยิปซัมเก็บจากแหล่งจำหน่าย เช่น คอนกรีต และบล็อกคอนกรีต 9.3 $\pm$ 0.3

สำหรับปริมาณทอเรียม-232 ในปุ๋ยฟอสเฟต พบการเสนอรายงานผลการวิเคราะห์จากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โดยผลการวิเคราะห์สรุปได้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมทอเรียม-232 ในปุ๋ยฟอสเฟต [24]

ประเทศ	ทอเรียม-232 (เบคเคอเรล/กิโลกรัม)
อิตาลี	3.50
ปากีสถาน	50.00
อินเดีย (เมืองอัมริตสาร์)	65.00
อียิปต์	7.90
ซาอุดิอารเบีย	6.01
ไนจีเรีย	16.10
อิรัก	14.31

ค่าทอเรียมในดินจากแหล่งเกษตรกรรมพบสูงกว่าในดินธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุมาจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตเพื่อเพิ่มผลผลิต ซึ่งเป็นการเพิ่มทอเรียมลงในดินในเวลาเดียวกัน การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตติดต่อกันเป็นเวลานาน ปริมาณทอเรียมในดินสะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมในดินประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป (เดือนมกราคม 2562) [25]

ผลการศึกษาในดินธรรมชาติประเภทต่าง ๆ ในประเทศคูเวต พบว่า ไอโซโทปทอเรียม-232 ปนเปื้อนในดินธรรมชาติในปริมาณที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้สาเหตุมาจากความแตกต่างกันขององค์ประกอบในเนื้อดิน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.6 [26]

ตารางที่ 2.6 ชนิดของดินและปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียม-232

ประเภทของดิน	ทอเรียม-232 (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
Aquisalids (ดินร่วนความเค็มสูง)	2.84 ± 0.05
Calcigypsids (ดินทราย มีแคลเซียมและยิปซัมผสม)	4.45 ± 0.06
Petrocalcids (ดินดาน มีแคลเซียมผสม)	3.12 ± 0.04
Petrogypsids (ดินดาน มียิปซัมผสม)	3.84 ± 0.04
Torripsamments (ดินทรายลุ่มน้ำ)	3.07 ± 0.04

ผลการศึกษาปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียม-232 ในดินจากประเทศต่าง ๆ พบว่า ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมทอเรียม-232 ในดินไม่เท่ากัน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียม-232 ในดินจากประเทศต่าง ๆ [27-28]

ประเทศ	ทอเรียม-232 (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
สเปน	3.2 – 20.9
คูเวต	3.47
จอร์แดน	7.1
อิตาลี	18.0 – 21.0
ไต้หวัน	10.8
ตุรกี	9.1
อินเดีย (รัฐราชสถาน)	10.6 – 26.1
ไซปรัส	< 1 – 9.8
ไนจีเรีย	8.0 – 24.0
อียิปต์	1.5 – 8.3
ทั่วโลก (ค่าเฉลี่ย)	7.4

2.4 ความเป็นพิษของธาตุไอโซโทปทอเรียม

2.4.1 ความเป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์

ทอเรียมเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ได้ 3 ทาง คือ ทางการหายใจ ทางระบบทางเดินอาหาร และทางบาดแผลบนผิวหนังหรือการฉีดเข้ากระแสเลือดเพื่อรักษามะเร็ง

ทอเรียมที่เข้าสู่ร่างกายทางการหายใจเกิดจากการสูดหายใจฝุ่นละอองที่มีทอเรียมปะปนเข้าไป ซึ่งในกรณีนี้ทอเรียมไม่เพียงทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อปอดเท่านั้น แต่ยังทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อส่วนอื่น ๆ อีกด้วย เนื่องจากเมื่อเข้าสู่ปอด ทอเรียมบางส่วนจะสะสมอยู่ที่ปอด ส่วนที่เหลือจะละลายอย่างช้า ๆ อยู่ในของเหลวภายในปอด (พลาสมา) ทอเรียมส่วนที่ละลายในพลาสมาจะถูกพาเคลื่อนที่ไปยังอวัยวะอื่น ๆ ของร่างกาย ซึ่งอาจจะเข้าสะสมยังอวัยวะต่าง ๆ ที่ผ่านมา เช่น กระดูก ตับ ไต และม้าม ทอเรียมที่เข้าสู่ปอดจะถูกขจัดออกจากปอดด้วยขนอ่อนของหลอดลม จากนั้นถูกขจัดออกจากร่างกายทางอุจจาระในปริมาณร้อยละ 97 ของปริมาณทอเรียมที่ถูกขับออกทั้งหมด สำหรับทอเรียม-232 และทอเรียม-230 ที่เข้าสู่ปอด จะถูกขจัดออกจากปอดจนปริมาณเหลือเป็นครึ่งหนึ่งของทั้งหมด หรือมีชื่อเรียกว่า ค่าครึ่งชีวิตทางชีวภาพ (Biological half-lives) ต้องใช้เวลา 5.3 และ 1.4 ปี ตามลำดับ ในการศึกษากับหนูทดลองให้สูดหายใจอากาศผสมทอเรียม พบว่าทอเรียมถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือด แต่ปริมาณส่วนใหญ่สะสมที่กระดูกโครงร่าง และพบบางส่วนสะสมในตับและไตในปริมาณร้อยละ 15 ถึง 20 และ 3 ตามลำดับ [1]

ทอเรียมที่เข้าสู่ร่างกายผ่านทางระบบทางเดินอาหาร เกิดจากการบริโภคอาหารหรือน้ำดื่มที่ปนเปื้อนทอเรียมหรือรับเข้าสู่ร่างกายผ่านทางห่วงโซ่อาหาร จากการศึกษาในหนูทดลอง พบว่าการขับออกทางอุจจาระสูงกว่าทางปัสสาวะ และขับออกมากถึงร้อยละ 94 ภายใน 2 ถึง 4 วัน จากงานวิจัยในคนงานจำนวน 5 คนของโรงงานแปรรูปทอเรียมแห่งหนึ่งในประเทศอินเดีย โดยคนงานเหล่านี้ได้รับทอเรียมผ่านทางการหายใจระหว่างการปฏิบัติงานในโรงงานและทางเดินอาหารจากการบริโภคอาหารและน้ำดื่มที่มีการปนเปื้อนทอเรียม ผลการวิจัยพบว่า ทอเรียมส่วนที่ไม่ขับออกจะตกค้างในร่างกายอย่างน้อย 10 ถึง 15 ปี และพบสะสมในปอดปริมาณสูงที่สุด รองลงมาคือ กระดูกและตับ โดยสะสมในปอด 4.31 ไมโครกรัม กระดูก 3.54 ไมโครกรัม และตับ 0.14 ไมโครกรัม โดยร้อยละ 50 ของทอเรียมที่สะสมในตับ จะเกิดการตกค้างนาน 9 ปี สำหรับทอเรียมส่วนที่สะสมในกระดูกโครงร่าง พบว่าทอเรียมร้อยละ 50 สะสมในกระดูกเยื่อหุ้มสมอง (Cortical bone) ส่วนที่เหลือกระจายไปทั่วร่างกาย พบว่าสะสมในกระดูกเนื้อเยื่อแบบร่างแห (Trabecular bone) และในไขกระดูก (Bone marrow) นอกจากนี้ยังพบทอเรียมสะสมในเนื้อเยื่อกล้ามเนื้ออีกด้วย [1, 29]

ทอเรียมที่เข้าสู่ร่างกายผ่านการฉีดเข้ากระแสเลือดโดยตรง มีรายงานการศึกษาในคนไข้วินิจฉัยโรคมะเร็งด้วยการฉีด Thorotrast® พบว่าทอเรียมร้อยละ 97 จะเข้าไปในระบบ

Reticuloendothelial โดยกระจายไปอยู่ในตับร้อยละ 59 ในม้ามร้อยละ 29 และไขกระดูกร้อยละ 9 ทอเรียมบางส่วนพบสะสมในต่อมน้ำเหลืองและเม็ดเลือดแดง [1, 22]

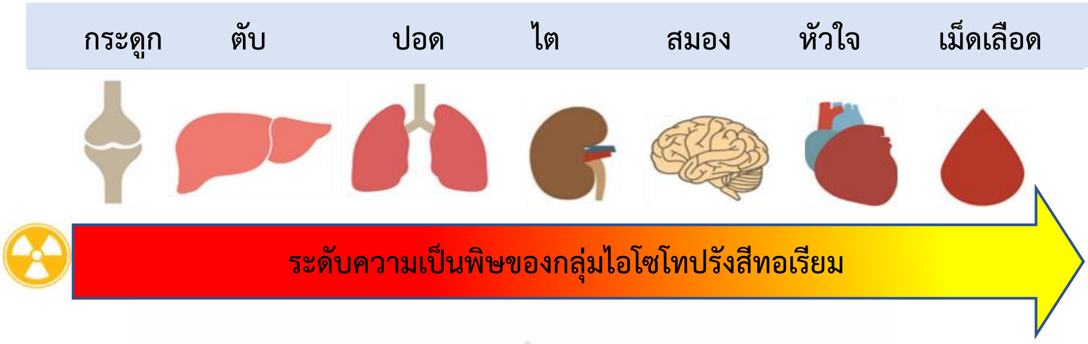
ทอเรียมที่เข้าสู่ร่างกายนอกจากจะสะสมในตับ ไตและกระดูกแล้ว ผลจากงานวิจัยในหนูทดลองพันธุ์ Swiss albino ที่ได้รับทอเรียม-232 ในรูปสารประกอบทอเรียมไนเตรท ด้วยการฉีดเข้าทางเยื่อบุช่องท้อง มีผลรายงานว่าทอเรียม-232 เข้าสะสมในเนื้อเยื่อสมองของหนูทดลองเกือบทุกส่วน ลำดับการเข้าสะสมมีดังนี้ 1) สมองส่วนท้าย ควบคุมการเคลื่อนไหวและการทรงตัว (Cerebellum > 2) เยื่อหุ้มสมอง เป็นที่อยู่ของเครือข่ายใยประสาท (Cortex > 3) สมองส่วนสร้างการเรียนรู้และบันทึกความทรงจำระยะยาว (Hippocampus > 4) สมองส่วนควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อให้มีกำลังและประสานกันได้ดี (Striatum) และเมื่อให้การรักษาด้วยแคลเซียม ไดเอทธิลีน ไตรเอมีน เพนตา อะซีเตท (Calcium diethylene tri-amine-penta-acetate) พบว่าสามารถกำจัดทอเรียม-232 ออกจากเนื้อเยื่อสมองเกือบทุกส่วน ยกเว้นส่วน Hippocampus หรือสมองส่วนสร้างการเรียนรู้และบันทึกความทรงจำระยะยาว ที่ไม่สามารถขจัดทอเรียม-232 ออกได้ [30]

สำหรับรายงานการศึกษาความเป็นพิษของกลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียมในมนุษย์ได้ศึกษาในคนงานเพศชาย จากโรงงานแปรรูปทอเรียมจำนวน 47 คน และจากโรงโม่แร่โมนาไซท์ จำนวน 240 คน ตรวจพบความผิดปกติของโครโมโซมในเม็ดเลือดขาวอย่างมีนัยสำคัญ และมีรายงานผลการศึกษาในคนงานเหมืองแร่ยูเรเนียม พบว่าการสูดหายใจฝุ่นละอองปะปนทอเรียม-230 เป็นสาเหตุของมะเร็งต่อมน้ำเหลือง และมะเร็งเนื้อเยื่อไขกระดูก ในหนูทดลองที่ให้สูดหายใจเอาอากาศผสมทอเรียมไดออกไซด์ เป็นเวลานาน 9 เดือน พบการก่อเนื้องอกในปอดชนิด Reticulosarcoma และ Glandular tumors ซึ่งต่อมากลายเป็นมะเร็งปอด

งานวิจัยความเป็นพิษของทอเรียมต่อผิวหนังไม่ปรากฏข้อมูลในมนุษย์ แต่จากการศึกษาในหนูทดลอง ด้วยการทาทอเรียมไนเตรทลงบนหลังและบริเวณถุงอัณฑะเป็นเวลา 15 วัน รวมความแรงรังสีทั้งหมด 2,146 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม พบความผิดปกติของหนังกำพร้า โดยผิวหนังบางส่วนหนาขึ้น และบางส่วนหลุดลอกและตายลง ในส่วนของอวัยวะสืบพันธุ์ พบอาการบวมน้ำของท่อสร้างอสุจิ และความผิดปกติของตัวอสุจิ [1]

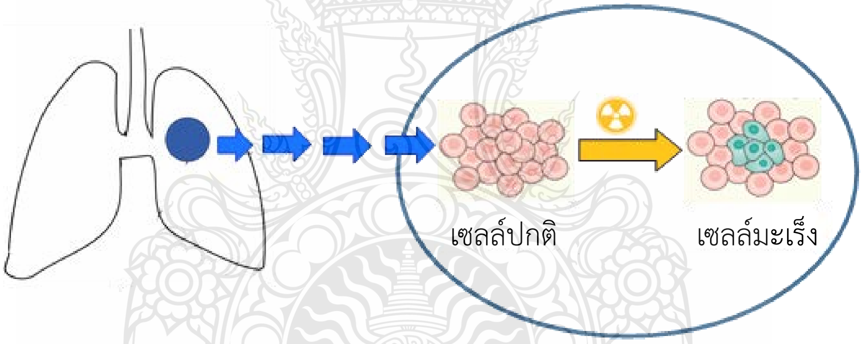
สำหรับความเป็นพิษในมนุษย์มีรายงานการวิจัยในคนไข้ที่ได้รับทอเรียม-232 ไดออกไซด์ (Thorotrast®) ทางเส้นเลือดเพื่อวินิจฉัยโรคมะเร็ง พบว่ามีอาการโลหิตจางขั้นรุนแรง มะเร็งเม็ดเลือดขาว และมะเร็งตับ ความรุนแรงที่พบ ขึ้นกับปริมาณความแรงรังสีของ Thorotrast® ที่ใช้ ซึ่งอาการที่พบเป็นภาวะความเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน [1, 22]

อวัยวะวิกฤตที่กลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียมเข้าสะสม ได้แก่ กระดูก ตับ ปอด และไต นอกจากนี้ยังพบสะสมในเนื้อเยื่อสมองอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.6 [1]



รูปที่ 2.6 อวัยวะวิกฤตที่กลุ่มธาตุไอโซโทปทอเรียมเข้าสะสม

จากการสลายตัวให้กัมมันตภาพรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ส่งผลให้อวัยวะที่ทอเรียมเข้าสะสมเกิดเนื้องอกและแพร่กระจายทั่วอวัยวะ บางรายเนื้องอกได้พัฒนาเปลี่ยนเป็นมะเร็ง แสดงดังรูปที่ 2.7 [1]



รูปที่ 2.7 ลักษณะเนื้อเยื่อปอดปกติที่เปลี่ยนเป็นเนื้อเยื่อมะเร็ง เมื่อได้รับรังสีจากการสูดฝุ่นทอเรียม

ความเป็นพิษจากการสูดหายใจทอเรียมปะปนในอากาศ หรือฝุ่นละออง รวมทั้งจากการบริโภคอาหารและน้ำดื่มที่มีการปนเปื้อนทอเรียม พบว่าจะแสดงอาการในภายหลัง เป็นภาวะความเป็นพิษชนิดเรื้อรัง ซึ่งนับว่าเป็นอันตรายมากกว่าภาวะความเป็นพิษชนิดเฉียบพลัน เพราะผู้ได้รับพิษจากทอเรียมไม่ได้ตระหนักถึงภัยและไม่มีการป้องกันตนเอง อีกทั้งเมื่อแสดงอาการแต่ไม่สามารถบ่งชี้สาเหตุได้ทันการณ์ จึงพบผู้เสียชีวิตในกรณีนี้ค่อนข้างสูง

2.4.2 ความเป็นพิษต่อพืชและสัตว์น้ำ

จากการทดลองปลูกข้าวสาลีในดินที่ผสมทอเรียมปริมาณ 20 นาโนกรัมต่อกรัม และรดด้วยน้ำผสมทอเรียมในปริมาณ 20 นาโนกรัมต่อมิลลิลิตร พบว่าร้อยละการงอกของเมล็ดข้าวสาลีลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และการเจริญเติบโตไม่สมบูรณ์ ต้นแคระแกร็น ทั้งนี้เป็นผลจากทอเรียมไปสกัดกั้นอัตราการดูดซึมธาตุสารอาหารของพืช ได้แก่ โซเดียม (Na) โปแตสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นธาตุสารอาหารที่สำคัญ โดยเฉพาะแคลเซียมซึ่งเป็นธาตุหลักของโครงสร้างผนังเซลล์ และมีส่วนร่วมในกระบวนการต่าง ๆ ของพืชหลายกระบวนการ [31]

รายงานการศึกษาในลูกอ่อนปลาดุกสีเงินซึ่งเลี้ยงเป็นเวลา 30 วัน ในน้ำผสมทอเรียมปริมาณต่างกัน 5 ระดับ (หน่วยไมโครกรัมต่อลิตร) ดังนี้ ระดับที่ 1 ปริมาณทอเรียม 0 (ควบคุม) ระดับที่ 2 ปริมาณทอเรียม 25.3 ± 3.2 ระดับที่ 3 ปริมาณทอเรียม 80.6 ± 12.0 ระดับที่ 4 ปริมาณทอเรียม 242.4 ± 35.6 และระดับที่ 5 ปริมาณทอเรียม 747.2 ± 59.1 ไมโครกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าปลาดุกสีเงินมีการสะสมทอเรียมในเหงือก หนัง ตับ และไต ตามลำดับ อีกทั้งพบการเคลื่อนไหวผิดปกติเนื่องจากปลาดุกสีเงินไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อให้เคลื่อนไหวได้ตามปกติ โดยเกิดจากปฏิกิริยา Oxidative ที่บริเวณเหงือกถูกทำลาย ระดับ Lipidic peroxidation และเอนไซม์ Antioxidant ที่ตับและเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อผิดปกติ รวมทั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมของเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อถูกทำลาย [32]

2.5 วิธีวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียม

วิธีวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียมมีอยู่หลายวิธีโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์แตกต่างกัน เช่น เครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมทรี เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เครื่องวัดการเรืองแสงรังสีในของเหลว เครื่องวัดการปลดปล่อยอะตอมมิคพลาสมา เครื่องวัดมวลพลาสมาของไอออน และเครื่องวัดการคายแสงของธาตุด้วยการกระตุ้นจากพลาสมา การเลือกใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียม ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของตัวอย่าง ระดับปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมในตัวอย่าง และจุดประสงค์ในการวิเคราะห์

2.5.1 วิเคราะห์ด้วยเครื่องแกมมาสเปกโตรเมทรี

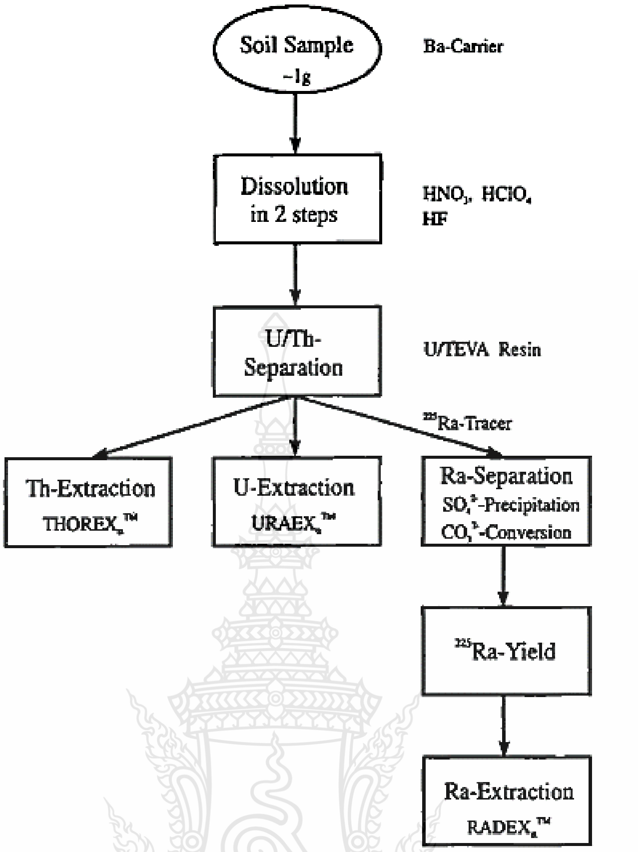
โดยทั่วไปการวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคการอาบรังสีในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุไอโซโทปทอเรียมรวม หรือทอเรียมในตัวอย่างมีสายโซ่การสลายตัวอยู่ในภาวะสมดุล รวมทั้งหน่วยงานนั้นมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย สามารถนำตัวอย่างเข้าอาบรังสีได้ เทคนิคการอาบรังสี วิเคราะห์ปริมาณทอเรียมโดยอาศัยการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยออกมาด้วยเครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมทรีเท่านั้น อย่างไรก็ตามในกรณีตัวอย่างชีวภาพของคนไข้หรือกลุ่มเสี่ยง เช่น น้ำปัสสาวะ อุจจาระ รวมทั้งกรณีตัวอย่างอาหารประเภทปรุงสุก

ซึ่งมีปริมาณทอเรียม-232 ปนเปื้อนค่อนข้างสูง การใช้เทคนิคการอาบรังสี และการใช้เครื่องวิเคราะห์ ICP-MS จึงสามารถทำการวิเคราะห์ได้ อย่างไรก็ตามเทคนิคการอาบรังสีมีข้อจำกัด คือปัจจุบันการขออนุญาตสั่งซื้อและติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยนั้น ต้องผ่านขั้นตอนการตรวจสอบจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศที่เข้มงวด อีกทั้งต้องมีบุคคลากรจำนวนเพียงพอ และเป็นผู้ที่มีความรู้ความสามารถในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้งบประมาณที่ใช้จัดซื้อ ดูแลและซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย มีราคาค่อนข้างสูง

R.S. Sathyapria และคณะ [33] ได้เสนอผลการศึกษาการวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียมเปรียบเทียบระหว่างการใช้เทคนิคการอาบรังสีร่วมกับเครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมตรี กับวิธีนำตัวอย่างเข้าวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมทรีโดยตรง โดยไม่ผ่านการอาบรังสี ตัวอย่างที่ใช้ศึกษาได้แก่ ผักใบเขียว ผักทั่วไป ผักที่บริโภคหัวและราก เนื้อปลา เนื้อสัตว์ และน้ำนม ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองโดยเทคนิคการอาบรังสีให้ค่าที่ดีกว่าวิธีนำตัวอย่างเข้าวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมทรีโดยตรงประมาณ 1-2 เท่า สรุปได้ว่าการอาบรังสีที่ตัวอย่างให้ผลที่น่าเชื่อถือกว่า ในขณะที่วิธีนำตัวอย่างเข้าวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แกมมาสเปกโตรเมทรีโดยตรงที่ไม่ผ่านการอาบรังสี ให้ผลที่สูงเกินจริง

2.5.2 วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงรังสีในของเหลว

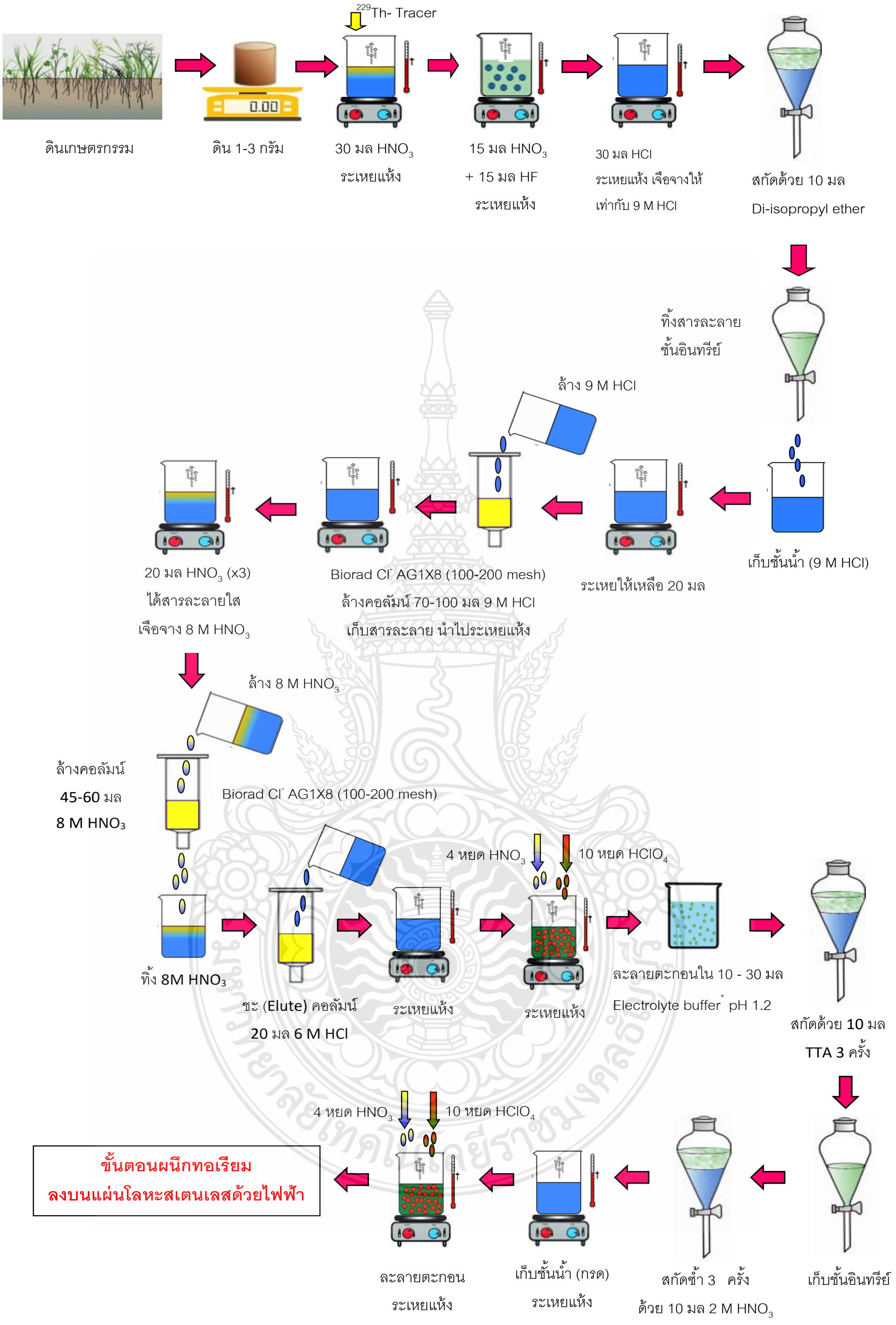
B. Füeg และคณะ [34] ได้เสนอวิธีวิเคราะห์ยูเรเนียม และทอเรียมปราศจากสมดุลในดินด้วยวิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเรืองแสงรังสีในของเหลว โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2.8 สำหรับวิธีที่เสนอโดย B. Füeg และคณะ พบว่ามีข้อดีคือไม่ต้องใช้สารติดตามรังสี แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ การย่อยตัวอย่าง ต้องอาศัยเครื่องมือย่อยระบบไมโครเวฟ ซึ่งมีราคาสูง การใช้เรซินบรรจุสำเร็จรูปที่มีค่าใช้จ่ายสูง เพิ่มกากของเสียคอลัมน์พลาสติก ซึ่งใช้เวลาย่อยสลายนาน และสารอินทรีย์ที่ใช้ในขั้นตอนที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยการสกัดเป็นสารก่อมะเร็งอันตราย อีกทั้งการวัดการเรืองแสงของไอโซโทปทอเรียมต้องใช้สารละลายอินทรีย์ที่เฉพาะ คือ THORAX^{TM} ซึ่งมีราคาสูง และเป็นการเพิ่มภาระการจัดเก็บสารเรืองแสงอินทรีย์ รอส่งจัดการ รวมทั้งเพิ่มค่าใช้จ่ายในส่วนการจัดการ จึงนับว่าวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงและไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.8 แผนผังการวิเคราะห์ยูเรเนียมและทอเรียมปราศจากสมดุลในดิน [34]

2.5.3 วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

การวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี จะใช้เทคนิคเชิงเคมีรังสีร่วมกับการวิเคราะห์รังสีแอลฟา ตามคู่มือวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินและหางแร่ ของสถาบันคณะกรรมการวิจัยพลังงานปรมาณูแห่งออสเตรเลีย (Australian Atomic Energy Commission Research Establishment) [35] เสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีร่วมกับการวิเคราะห์รังสีแอลฟาด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี โดยใช้สารติดตามรังสีทอเรียม-229 เป็นสารมาตรฐานภายในและเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี รายละเอียดขั้นตอนดังแสดงตามรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ทอเรียมของสถาบันคณะกรรมการวิจัยพลังงานปรมาณูแห่งออสเตรเลีย

ข้อดีของวิธีนี้

1) ใช้แผ่นให้ความร้อน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ทั่วไป ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี

2) สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งดิน และหางแร่

3) กรด และสารเคมีที่ใช้ สามารถหาซื้อได้ง่าย

4) เตรียมคอลัมน์เอง โดยใช้เรซิน Biorad AG 1X8 Cl^- ประหยัดค่าใช้จ่าย

5) สามารถวิเคราะห์ได้เป็นชุด (ครั้งละ 4-8 ตัวอย่าง) จึงเหมาะกับงานสิ่งแวดล้อม ซึ่งต้องวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวนมาก

ข้อเสียหรือข้อจำกัดของวิธีนี้

1) วิธีวิเคราะห์มีหลายขั้นตอน ส่งผลให้ต้องใช้เวลานานในการวิเคราะห์ตัวอย่าง แต่ละชุด

2) การดำเนินการวิเคราะห์ที่ผ่านหลายขั้นตอน ส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละการคืนกลับ

3) สารละลายอินทรีย์ในขั้นตอนทำให้บริสุทธิ์ ใช้ถึง 2 ชนิด คือ Di-isopropyl ether และ TTA สารละลายอินทรีย์เป็นสารก่อมะเร็ง มีผลกระทบต่อสุขภาพนักวิจัยและระบบนิเวศ

4) การจัดการของเสียสารอินทรีย์ เสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง อีกทั้งเป็นภาระจัดหาพื้นที่เก็บ

5) ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการผลเร่งด่วน

ในการใช้เทคนิคเชิงเคมีรังสีร่วมกับการวิเคราะห์รังสีแอลฟา ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี พบว่าการวิเคราะห์รังสีแอลฟา ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ทอเรียมปริมาณน้อย จากรายงานการวิจัยสรุปค่าวิเคราะห์ต่ำสุดที่สามารถวัดได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิเบคเคอเรล ซึ่งนับว่าต่ำมาก นอกจากนี้เทคนิคเชิงเคมีรังสีร่วมกับการใช้เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี และยังสามารถวัดไอโซโทปทอเรียมที่สำคัญได้พร้อมกัน 4 ไอโซโทป โดยเฉพาะทอเรียม-228 และทอเรียม-230 ซึ่งเป็นไอโซโทปทอเรียมที่มีปริมาณน้อยและค่าครึ่งชีวิตค่อนข้างสั้น การใช้เทคนิคเชิงเคมีรังสี ร่วมกับเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี พบว่าเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน ตะกอนทะเล และตะกอนแม่น้ำ ลำคลอง รวมทั้งสารตัวอย่างอินทรีย์ เช่น พืช ผัก ปลา และสัตว์น้ำต่าง ๆ [13-16]

2.6 วิธีวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

การใช้เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีร่วมกับการใช้เทคนิคเชิงเคมีรังสีเพื่อวิเคราะห์ธาตุไอโซโทปทอเรียม จำเป็นต้องใช้ตัวติดตามรังสีทอเรียม-229 (Radiotracer) สำหรับใช้คำนวณร้อยละการได้กลับคืน และค่าปริมาณไอโซโทปทอเรียม โดยตัวติดตามรังสีทอเรียม-229 ใช้แทนสารมาตรฐาน ซึ่งนับว่าสะดวก รวดเร็ว และลดขั้นตอนไม่ต้องหักลบค่าแบลงค์ในการคำนวณผล เทคนิคนี้เรียกว่า Internal standard โดยทั่วไปการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี จะดำเนินการผ่านกระบวนการทั้งสิ้น 4 ขั้นตอน [21, 35-37] รายละเอียดตามลำดับดังนี้

2.6.1 การสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่าง

ขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 4 วิธี แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่าง รายละเอียดดังนี้

2.6.1.1 การย่อยแบบแห้ง (Dry aching) เหมาะสำหรับตัวอย่างทางชีวภาพ เช่น ปัสสาวะ อุจจาระ และกระดูกอ่อน ใช้วิธีเผาที่อุณหภูมิสูง 500-550 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้า ๆ เป็นเวลา 8-15 ชั่วโมง

2.6.1.2 การย่อยแบบเปียก (Wet aching) เหมาะสำหรับตัวอย่างดิน ตะกอน แร่ และตัวอย่างอินทรีย์ เช่น พืช ผัก ผลไม้ เนื้อเยื่อสัตว์ เช่น ปลา กุ้ง วิธีนี้อาศัยสารออกซิไดซ์และการกระตุ้นด้วยความร้อน โดยเติมสารออกซิไดซ์ลงในตัวอย่างก่อนระเหยตัวอย่างบนแผ่นให้ความร้อนอย่างช้า ๆ จนแห้งสนิท จากนั้นอาจจะเติมสารออกซิไดซ์ชนิดใหม่เพิ่มอีก 1-2 ชนิด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยสมบูรณ์

2.6.1.3 การหลอมด้วยความร้อน (Fusion) ใช้เบ้าหลอมทำด้วยทองคำขาว เติม Na_2CO_3, Na_2O_2, NaOH หรือสารละลายผสม HF + H_2SO_4 + Na_2SO_4

2.6.1.4 การชะล้าง (Leaching) ใช้วิธีกลั่นลำดับส่วน ด้วยกรดเข้มข้น 2-3 ครั้ง

2.6.2 ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ (Sample purification)

ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย โดยเทคนิคที่ใช้สำหรับแต่ละขั้นตอนย่อยแตกต่างกัน รายละเอียดดังนี้

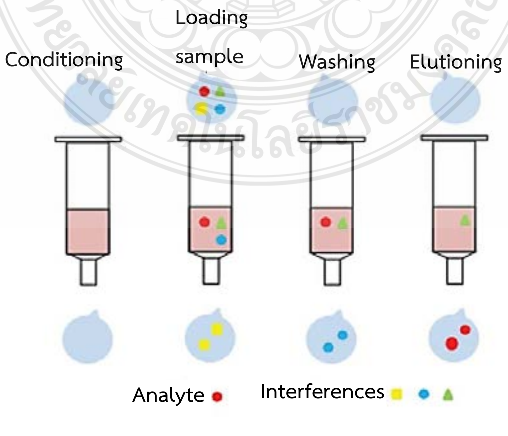
2.6.2.1 ขั้นตอนย่อยที่ 1 ใช้เทคนิคการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ การสกัดที่ได้เสนอไว้ในรายงานต่าง ๆ ได้แก่ Di-isopropyl ether; Tri-octyl-phosphine oxide (TOPO); Di-2-ethyhexylphosphoric acid (D2EHPA); Tri-butyl phosphate (TBP) หรือใช้เทคนิคการ

ตกตะกอนร่วมแทนการสกัดด้วยสารละลายอินทรีย์ โดยละลายตะกอนก่อนนำไปดำเนินการในขั้นตอนย่อยที่ 2 ต่อไป

2.6.2.2 ขั้นตอนย่อยที่ 2 เป็นขั้นตอนที่ใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อทำให้ทอเรียมที่ได้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น พบรายงานการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ เสนอการใช้เรซินบรรจุคอลัมน์สำเร็จรูป ได้แก่ UTEVA Eichrome® TRU Eichrome® และ TEVA Eichrome® ในขณะที่รายงานบางฉบับเลือกใช้การเตรียมคอลัมน์ด้วยการบรรจุเรซินชนิดคลอไรด์ไอออนลบ ขนาด 100-200 เมช และรายงานบางฉบับเลือกใช้เรซินชนิดไฮโดรเจนไอออนบวก นอกจากชนิดของเรซิน การเลือกใช้สารชะล้างที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ พบรายงานการศึกษาไว้แตกต่างกัน ได้แก่ การใช้สารละลายผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 5 โมลาร์ และกรดออกซาลิก ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ในอัตราส่วน 1 : 1 การใช้กรดไนตริก ความเข้มข้น 1 โมลาร์ หรือกรดไฮโดรคลอริค ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ หรือกรดออกซาลิก ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

(1) เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน [38]

เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน เพื่อทำให้ทอเรียมที่ได้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น เป็นเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นวิธีวิเคราะห์ที่อาศัยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนไอออน ระหว่างไอออนในสารละลายกับไอออนในของแข็งที่สัมผัสกับสารละลาย เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้น พบว่าโครงสร้างของของแข็งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และของแข็งไม่ละลายในสารละลาย ของแข็งที่ใช้ในเทคนิคนี้มีทั้งที่เป็นสารธรรมชาติและสารสังเคราะห์ซึ่งเรียกว่า “เรซิน” การทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นผลจากกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนจากสารละลายบนตำแหน่ง Active site ของเรซิน ทำให้ไอออนจากสารละลาย (ธาตุที่ต้องการวิเคราะห์หรือธาตุรบกวน) แทนที่บนเรซิน และกลไกการทำลายการดูดซับบนเรซิน โดยการชะล้างด้วยสารละลายที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กลไกการดูดซับไอออนในสารละลายเพื่อทำให้บริสุทธิ์

(2) การสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออน

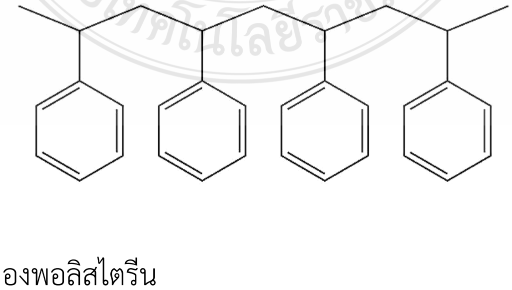
เรซินได้ถูกพัฒนาขึ้นเป็นลำดับจนเป็นสารสังเคราะห์อินทรีย์ที่เป็นพอลิเมอร์ และมีหมู่ธาตุเข้าไปจับอยู่ในเรซิน ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนเกิดได้ทั้งที่เป็นไอออนบวกและไอออนลบ นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์ให้เรซินมีโครงสร้างต่าง ๆ กัน ทำให้นักวิจัยสามารถเลือกใช้เรซินได้ตรงตามวัตถุประสงค์ การสังเคราะห์เรซินทำโดยผ่านกระบวนการ 2 อย่างคือ พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และ การเติมหมู่ฟังก์ชัน (Functionalization)

กระบวนการที่ 1 พอลิเมอไรเซชัน

เรซินส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างหลักเป็นสารอินทรีย์สไตรีน (Styrene) ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เกิดเป็น Polystyrenic matrix ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างแบบอะโรมาติก (Aromatic) เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าไวนิลเบนซีน (Vinylbenzene) ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.11

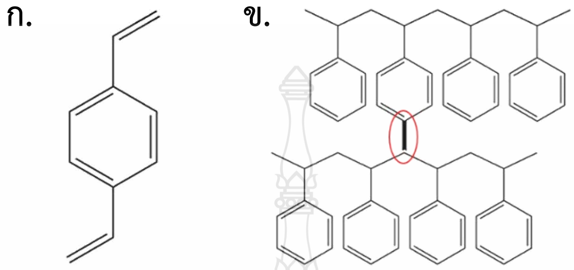
รูปที่ 2.11 สูตรทางเคมีและลักษณะโครงสร้างของสไตรีน [38]

ด้วยโมเลกุลของไวนิลประกอบด้วยพันธะคู่จึงช่วยให้ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สามารถดำเนินได้ และก่อให้เกิดเป็นสายพอลิเมอร์พอลิสไตรีน (Polystyrene) แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 สายพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน

เนื่องจากสายพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นยาวไม่มีความแข็งแรง ดังนั้น ในการสังเคราะห์เรซินด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จึงดำเนินการต่อเนื่องแบบ 3 ระนาบ (Three dimensions) ก่อให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมต่อโมเลกุลที่เหมาะในการเชื่อมต่อ คือ ไดไวนิลเบนซีน (Di-vinylbenzene) แสดงดังรูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาการเชื่อมต่อทำให้เรซินมีลักษณะเป็นตาข่าย



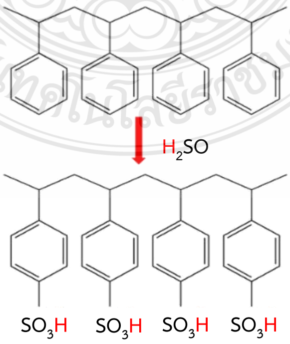
รูปที่ 2.13 ก. โมเลกุลเดี่ยวของไดไวนิลเบนซีน และข. การเชื่อมต่อพอลิสไตรีน 2 สาย

กระบวนการที่ 2 การเติมหมู่ฟังก์ชัน

เป็นการนำหมู่ธาตุไปต่อกับอะโรมาติกนิวเคลียส เรซินที่ได้จากกระบวนการนี้แบ่งตามไอออนของหมู่ธาตุที่นำเข้าไปต่อ ดังนี้

1) เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Strongly acidic cation exchange resins: SAC)

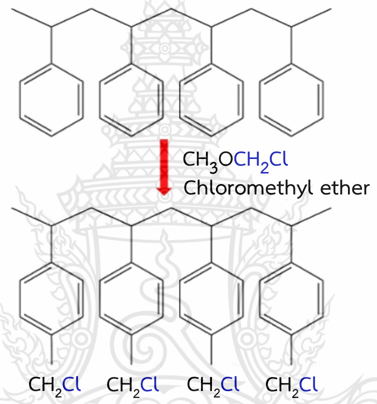
เรซินชนิดนี้มีหมู่ธาตุกรด SO_3H^+ อยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียส แสดงดังรูปที่ 2.14 การเตรียมทำได้โดยนำกรดซัลฟิวริกมาทำปฏิกิริยาเคมีกับพอลิสไตรีน เรซินที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนไฮโดรเจนบวกกับไอออนบวกของธาตุอื่น ๆ ได้ดี นับว่าเป็น เรซินชนิดเป็นกรดค่อนข้างสูง ตัวอย่างเรซินชนิดนี้ ได้แก่ AG W50-X12 H^+ ปฏิกิริยาเป็นดังนี้



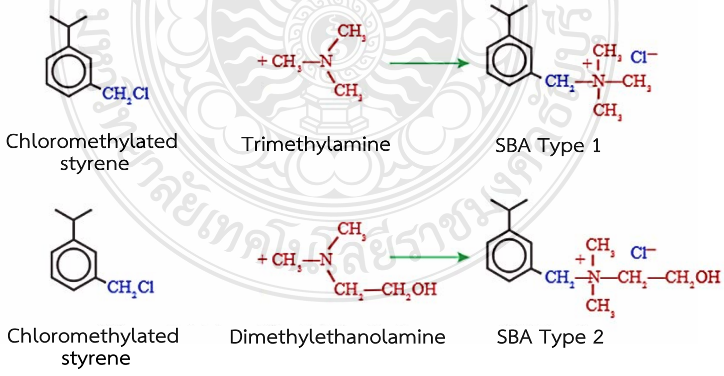
รูปที่ 2.14 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ในการสังเคราะห์เรซินแบบไอออนบวก

2) เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Strongly basic anion exchange resins: SBA)

เรซินชนิดนี้จะมีหมู่ธาตุที่เป็นเบสอยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียส เตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ของเบสกับพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน ถ้ากลุ่มของเบส คือ หมู่เอมีนจตุรภาค (Quaternary amine group) เรซินที่เตรียมได้จะมีฤทธิ์เป็นเบสแก่ สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดี ปฏิกิริยามี 2 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 คลอโรเมทิเลชั่น(Chloromethylation) เป็นกระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2.15 ขั้นตอนที่ 2 อะมิเนชัน (Amination) เป็นกระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2.16 เป็นการแทนที่คลอไรด์ด้วยเอมีน ขั้นตอนนี้การใช้สารประกอบเอมีนต่างกัน ทำให้ได้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ แบบ 1 และแบบ 2

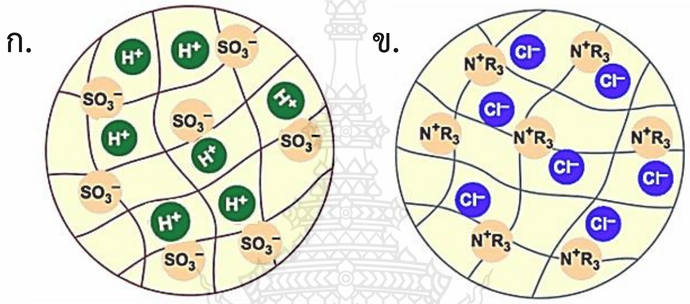


รูปที่ 2.15 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 1 ในการสังเคราะห์เรซินแบบไอออนลบ



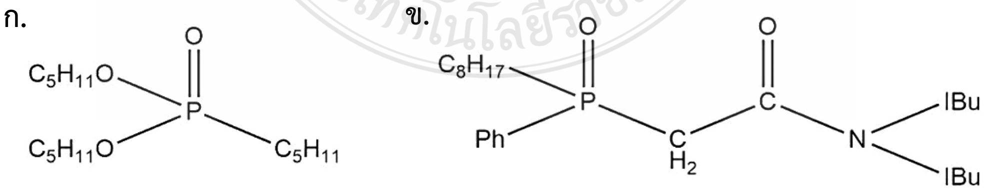
รูปที่ 2.16 กระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน ขั้นตอนที่ 2 ในการสังเคราะห์ได้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ แบบ 1 และแบบ 2

เรซินที่ได้มีชื่อเรียกว่า Quaternary ammonium chloride salt สามารถแลกเปลี่ยนไอออนคลอไรด์ลบกับไอออนลบของธาตุอื่น ๆ ได้ดี นับว่าเป็นเรซินชนิดเป็นเบสค่อนข้างสูง ตัวอย่างเรซินชนิดนี้ ได้แก่ AG 1-X8 Cl^- เรซินที่ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน และ Cross link จะมีโครงสร้างที่แข็งแรง แต่คงความโปร่งเป็นรูปตาข่าย 3 มิติ ยึดติดกันเป็นรูปทรงกลม สามารถพองตัวได้ในสารละลาย และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการเติมหมู่ฟังก์ชัน เรซินที่ได้จะมีสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นแบบเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกและเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ก. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และข. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ [38]

นอกจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ ยังพบการสังเคราะห์เรซินให้มีโครงสร้างและหมู่ธาตุต่างกันอีกหลายชนิด ตัวอย่างเรซินซึ่งได้รับความนิยมสำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับกลุ่มธาตุแอกทิไนด์ ได้แก่ UTEVA® (Di amyl phosphonate) และ TRU® (Octyl phenyl-N, N-di isobutyl carbamoyl phosphine oxide) แสดงดังรูปที่ 2.18 ซึ่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์เป็นความลับทางการค้า



รูปที่ 2.18 โครงสร้างเรซินชนิด ก. UTEVA® ข. TRU®

(3) ปัจจัยที่มีผลทำให้เรซินมีสมบัติการดูดซับ

1) ขนาดของเรซินมีผลต่ออัตราเร็วในการแลกเปลี่ยนไอออนและการซึมผ่านของสารละลายออกจากคอลัมน์

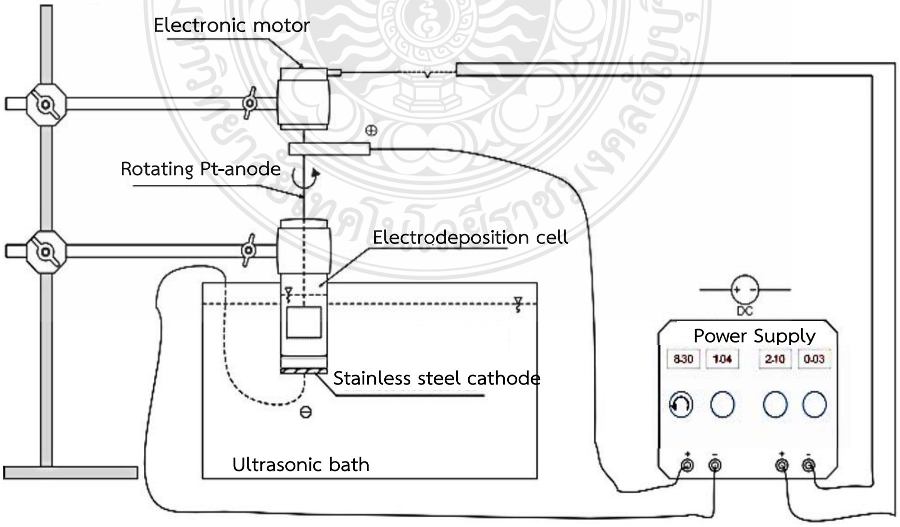
2) จำนวนการเชื่อมต่อจะมีผลทำให้เรซินมีความแข็ง การพองตัว และมีขนาดช่องต่างกัน เรซินที่มีการเชื่อมต่อมากจะมีโครงสร้างที่แข็ง แต่ถ้ามากเกินไป ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง ในทางกลับกัน ถ้ามีการเชื่อมต่อที่น้อยเกินไป เรซินจะอ่อนและ เสียรูปได้ง่าย จำนวนการเชื่อมต่อที่เหมาะสมส่งผลให้เรซินมีความโปร่งหรือความพรุนที่ไอออนสามารถเข้าหรือออกได้ง่าย ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจึงสูงขึ้น

3) ความแข็งแรงของหมู่ธาตุมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของไอออนระหว่างเรซินกับสารละลาย

4) จำนวนหมู่ธาตุมีผลให้เรซินแต่ละชนิดมีความจุต่างกัน

2.6.3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวัด (Source preparation)

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อการวัด ขั้นตอนนี้มีจุดประสงค์ เพื่อให้ตัวอย่างเหมาะสมสำหรับการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี กล่าวคือตัวอย่างต้องมีความบางเรียบเนียน ไม่มีกากตะกอน ช่วงเวลาขณะวัดรังสี ตัวอย่างต้องไม่ฟุ้งกระจาย ขนาดชิ้นงานตัวอย่างที่ใช้เข้าวัดต้องมีขนาดเล็กว่าหัววัดรังสี และสามารถขจัดสารมลทินหรือสารรบกวนให้เหลือน้อยที่สุดได้ ดังนั้นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่นิยมใช้ จึงเป็นเทคนิคการผนึกทอเรียมลงบนแผ่นโลหะด้วยไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2.19

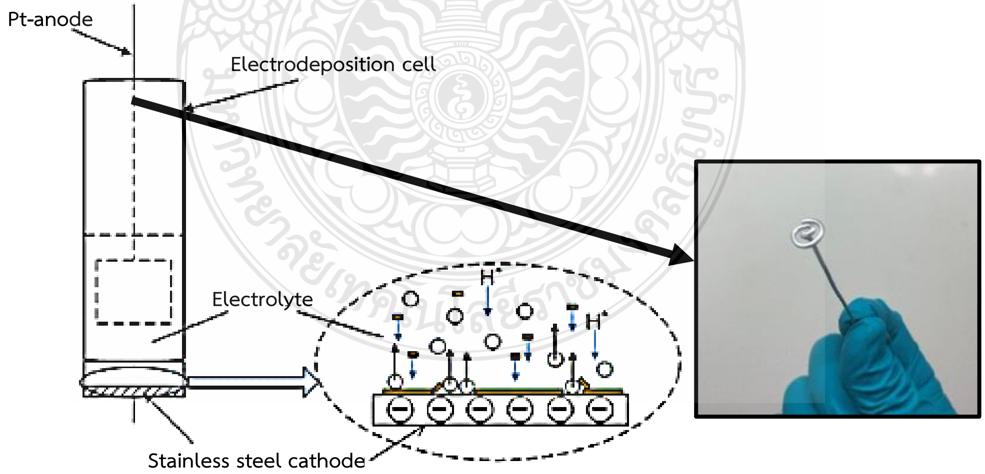


รูปที่ 2.19 การผนึกทอเรียมด้วยไฟฟ้า [39]

2.6.3.1 เทคนิคการผนึกทอเรียมด้วยไฟฟ้า [40]

เป็นเทคนิคที่อาศัยศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าไปทำให้ไอออนของโลหะหรือทอเรียมที่อยู่ในสารละลายเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ไอออนของโลหะทอเรียมเคลื่อนที่ไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบของอิเลคโทรด และเปลี่ยนเป็นสภาพโลหะทอเรียมไปเกาะที่ขั้วไฟฟ้าหรือแผ่นโลหะในลักษณะเป็นฟิล์มบาง ข้อดีของวิธีนี้คือ แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จะมีการกระจายตัวดี มีความสม่ำเสมอ และสามารถควบคุมความหนาบางของแผ่นฟิล์มได้ ปัจจัยที่สำคัญคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของไอออนของโลหะให้คงที่ เพื่อให้แผ่นฟิล์มที่ไปเคลือบมีความเรียบสม่ำเสมอ

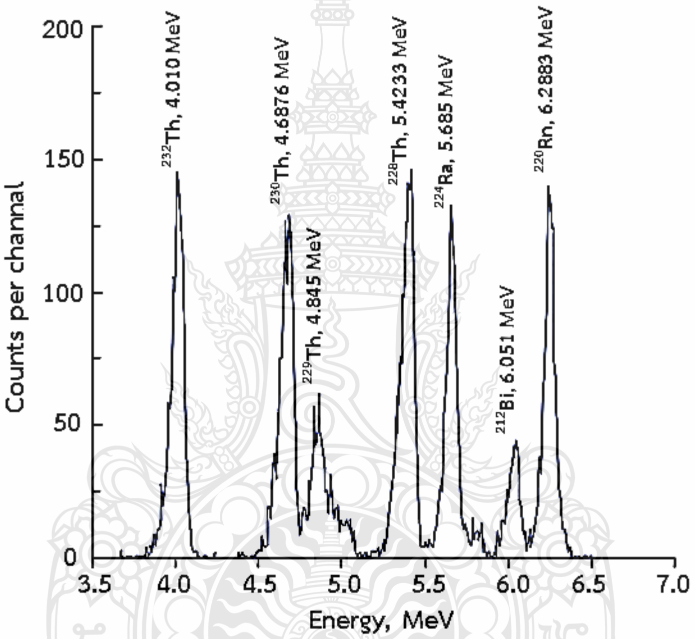
ในส่วนการเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดรังสีแอลฟา ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีจำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างให้มีความบางเพื่อลดการดูดกลืนและลดการกระเจิงของรังสี ตัวอย่างจะต้องไม่หลุดล่อนหรือลอกขณะนำเข้าเครื่องวัด เพื่อป้องกันการเปรอะเปื้อนภายในห้องวัดสุญญากาศที่บรรจุหัววัด เทคนิคที่ใช้กันแพร่หลาย เป็นเทคนิคการผนึกด้วยไฟฟ้า ตัวอย่างของปฏิกิริยาการจับหรือผนึกทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลส แสดงดังรูปที่ 2.20 สำหรับแผ่นโลหะที่ใช้ผนึกทอเรียมมีหลายชนิด ได้แก่ แผ่นอะลูมิเนียม 1100 แผ่นทองคำขาว แผ่นทองแดงบริสุทธิ์ และแผ่นสแตนเลสบริสุทธิ์ นอกจากนี้เทคนิคการผนึกทอเรียมลงบนแผ่นโลหะด้วยไฟฟ้า มีข้อแตกต่างกันในการกำหนดเงื่อนไขสภาวะการผนึก เช่น ค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้า ช่วงระยะเวลาที่ใช้ผนึก ชนิดของขั้วลบ (แผ่นโลหะ) ระยะห่างระหว่างแผ่นผนึกกับขั้วบวก รวมทั้งชนิด ค่าความเป็นกรด-ด่าง และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [36, 40]



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยาการผนึกแผ่นฟิล์มทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า

2.6.4 ขั้นตอนการวัดรังสีแอลฟา (Alpha Measurement)

ขั้นตอนการวัดรังสีแอลฟามีความสำคัญ คือต้องเลือกพีคของสเปกตรัมที่ถูกต้อง เพื่อคำนวณพื้นที่ใต้พีค และนำมาใช้คำนวณผลปริมาณไอโซโทปทอเรียมแต่ละไอโซโทป พีคสเปกตรัมของไอโซโทปแต่ละธาตุ จะแสดงที่ค่าพลังงานที่เป็นค่าเฉพาะตัว แสดงดังรูปที่ 2.21 ในการเลือกพีคจะพิจารณาจากค่าพลังงานของไอโซโทปทอเรียมแต่ละไอโซโทป ซึ่งพีคของไอโซโทปทอเรียม ได้แก่ ทอเรียม-232 ทอเรียม-230 ทอเรียม-229 และ ทอเรียม-228 จะแสดงพีคที่พลังงาน 4.010 4.686 4.845 และ5.423 MeV ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.8



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของไอโซโทปทอเรียม [40]

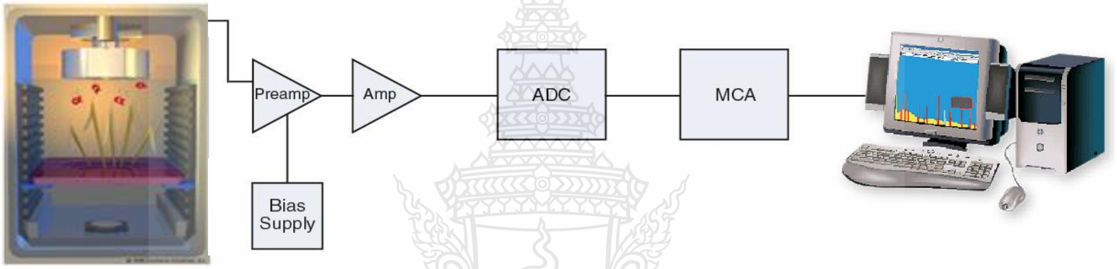
ตารางที่ 2.8 พลังงานแอลฟาของไอโซโทปทอเรียม [36]

ไอโซโทป	พลังงานแอลฟา (MeV)	Emission Probability ($p^{\alpha, r}$ %)
ทอเรียม-228	5.423	99
ทอเรียม-229	4.845	86
ทอเรียม-230	4.686	100
ทอเรียม-232	4.010	100

2.7 เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี [36, 41]

2.7.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ประกอบด้วยหัววัดแบบ Silicon ULTRA Ion Implanted หัววัดมีพื้นที่ใช้งานไม่น้อยกว่า 450 ตารางมิลลิเมตร และมีความลึกไม่น้อยกว่า 100 ไมโครเมตร หัววัดบรรจุอยู่ในกล่องสุญญากาศซึ่งต่อกับปั๊มสุญญากาศ โดยเปิดดูดอากาศออกจากกล่องตลอดระยะเวลาวัดตัวอย่าง ภายในกล่องมีชั้นสำหรับวางตัวอย่าง เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีมีอุปกรณ์ในการขยายสัญญาณ ก่อนเปลี่ยนเป็นภาพแสดงสเปกตรัมบนหน้าจอคอมพิวเตอร์รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

2.7.2 คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี มีคุณลักษณะที่สำคัญซึ่งเหมาะสมต่อการวิเคราะห์สารกัมมันตรังสีชนิดแผ่รังสีแอลฟา ดังนี้

1) ความไวสูงสามารถตอบสนองต่อความแรงรังสีของสารกัมมันตรังสีที่ต้องการวิเคราะห์ได้ดี ส่งผลให้สามารถวิเคราะห์สารกัมมันตรังสีปริมาณน้อยได้

2) ความจำเพาะสูง สารกัมมันตรังสีที่ต่างกัน สามารถแสดงตำแหน่งพีคที่ต่างกันได้

3) ช่วงกว้างของ Window มาก ครอบคลุมพลังงานของสเปกตรัมได้กว้าง

4) เสถียรภาพ (Stability) และสามารถลดการรบกวนของคลื่นได้ดี

5) ค่าพื้นหลัง (Background) ต่ำ

2.7.3 ข้อควรระวังเกี่ยวกับการใช้งานเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

1) จำเป็นต้องมีการปรับเทียบพลังงาน และช่อง Channel อยู่เสมอ หากพบการเคลื่อนของพีคสเปกตรัม ต้องดำเนินการปรับให้ถูกต้องทันที

2) ห้องสุญญากาศของหัววัดแต่ละห้อง ต้องตรวจสอบว่าปิดสนิท ไม่มีการรั่วของอากาศ และควรรอจนกว่าจะมีสัญญาณแสดงการปรับระดับสุญญากาศสมบูรณ์ก่อนเปิดให้กระแสไฟฟ้า

3) กระแสไฟที่เข้าเครื่องวัดต้องสม่ำเสมอ ไม่กระชากหรือสะดุด ในการใช้งานประจำจึงนิยมต่อเครื่องวิเคราะห์เข้ากับอุปกรณ์ควบคุมกระแสไฟฟ้า

4) ตัวอย่างที่เตรียมพร้อมเข้าวัดความแรงรังสีจะต้องมีขนาดพื้นที่เล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของหัววัดรังสีแอลฟา เพื่อให้สามารถรับการระดมยิงจากรังสีได้เกือบทั้งหมด เนื่องจากรังสีมีการกระจายออกไปทุกทิศทุกทาง หัววัดรังสีที่กว้างกว่าตัวอย่าง โอกาสรับการระดมยิงจากรังสีจะมีมากขึ้นและการแปลงจากค่าพลังงานจากการถูกระดมยิงจากรังสีให้เป็นจำนวนนับ ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริง

5) ตัวอย่างที่เตรียมสำหรับวัดรังสี ต้องไม่มีฝุ่นหรือตะกอนบนผิวหน้าซึ่งสามารถหลุดลอกออกได้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

3.1.1 กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3, JT Baker)

3.1.2 กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid; HF, JT Baker)

3.1.3 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl, JT Baker)

3.1.4 กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid; $HClO_4$, JT Baker)

3.1.5 กรดออกซาลิก (Oxalic acid; $H_2C_2O_4$, JT Baker)

3.1.6 แอมโมเนียม ออกซาเลต (Ammonium oxalate; $(NH_4)_2C_2O_4$, Merck)

3.1.7 แอมโมเนียม คลอไรด์ (Ammonium chloride; NH_4Cl, JT Baker)

3.1.8 แอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide; NH_4OH, JT Baker)

3.1.9 เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol; C_2H_5OH, Merck)

3.1.10 โซเดียมไบซัลเฟต (Sodium bisulfate; $NaHSO_4$, Merck)

3.1.11 แอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium sulfate; $(NH_4)_2SO_4$, Merck)

3.1.12 สารติดตามรังสีทอเรียม-229 (Thorium-229 radioactive tracer, National Physical Laboratory, United Kingdom)

3.1.13 สารมาตรฐานอ้างอิงของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (Standard Reference Material of the International Atomic energy Agency: SRM IAEA) ได้แก่ SRM IAEA-327

3.1.14 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- (Resin AG 1 X8 Chloride, Biorad Laboratories Ltd)

3.1.15 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ (Resin AG 50W-X12 Hydrogen, Biorad Laboratories Ltd)

3.1.16 คอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA (Commercial pre-packed column, Eichrome®)

3.1.17 ใยควอตซ์ (Quartz wool, Sigma Aldrich)

3.1.18 น้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง (Ultra-pure water 18 mega ohm, Merck Millipore)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี (Alpha spectrometer) รุ่น Octete Plus (EG&G ORTEC, USA)

3.2.2 ตู้ดูดควัน (Fume Hood) (Labconco, USA)

3.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifugal machine)

3.2.4 ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม (BINDER, USA)

3.2.5 เครื่องบดดิน (Mixer mill) รุ่น RM 200 (Retsh, Germany)

3.2.6 ตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ (Desiccator carbinet) (SANPLATEC, Japan)

3.2.7 แผ่นให้ความร้อน (Hotplate) (Velp, Italy)

3.2.8 ชุดแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Power supply)

3.2.9 เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 3200M (Agilent Technologies, USA)

3.2.10 ตะแกรงร่อน 125 ไมครอน (Seive) (Retsh, Germany)

3.2.11 คอลัมน์ ส่วน Funnel ยาว 5 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางกว้าง 3 เซนติเมตร ส่วนบรรจุเรซิน ยาว 15 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลางกว้าง 8 มิลลิเมตร ส่วนปลายแหลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกว้าง 1 มิลลิเมตร

3.2.12 เส้นลวดแพลททินั่ม 99.9% เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร (Platinum rod 99.9% dia 1.5 mm) (Sigma Aldrich, USA)

3.2.13 หมุดย้ำทำด้วยทองแดง (Copper rivet)

3.2.14 แผ่นสแตนเลสขัดเงา รูปวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร (Stainless steel disc dia. 2 cm)

3.2.15 ขวดปากแคบ ขนาด 30 มิลลิลิตร (Polypropylene narrow mouth bottle 30 mL) (Nalgene, USA)

3.2.16 ปากคีบปลายแบน (Blunt end forcep) (Merck Millipore, USA)

3.2.17 บีกเกอร์ และกระจกนาฬิกาแบบมีสัน (Beaker and Ribbed watch glass)

3.2.18 กระบอกตวง (Polypropylene cylinder) (Nalgene, USA)

3.3 วิธีการทดลอง

การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์หาไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี งานวิจัยได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่ง การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ส่วนที่สอง การทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี และส่วนที่สาม การนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี รายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 พัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

การวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีนั้น มีกระบวนการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรด

ขั้นตอนที่ 2 การแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซิน

ขั้นตอนที่ 3 การผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ขั้นตอนที่ 4 วัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

งานวิจัยส่วนที่หนึ่ง ได้ทำการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดิน 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ 1 พัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรด 2 พัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซิน และ 3 พัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1.1 พัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี

การสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรด เป็นกระบวนการกำจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างและการย่อยสลายโครงสร้างของอนุภาคดิน เพื่อให้ไอโซโทปทอเรียมละลายแยกตัวออกมาอยู่ในสารละลายกรด

งานวิจัยได้ศึกษาการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินที่เป็นตัวอย่างดินธรรมชาติสำหรับใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง โดยผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส บด และร่อนผ่านตะแกรงความละเอียด 125 ไมครอน และเก็บในตู้ดูดความชื้นอัตโนมัติ โดยทำการศึกษาทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด วิธีที่ 2 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 4 ชนิด และวิธีที่ 3 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 3 ชนิด ในที่นี้เราจะแทนการย่อยด้วยกรดทั้ง 3 วิธี ด้วยสัญลักษณ์ A B และ C

A) วิธีที่ 1 การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด

การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด เป็นการย่อยโดยจะใส่กรดไนตริก กรดไฮโดรฟลูออริก และกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

A-1 ชั่งตัวอย่างดิน 3 กรัม ลงในบีกเกอร์เทฟล่อน เติมสารติดตามรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.2 เบคเคอเรล

A-2 เติมกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 30 มิลลิลิตร (หรืออัตราส่วนน้ำหนักตัวอย่างต่อกรด 1:1) ปิดกระจกนาฬิกา นำมาระเหยบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้ตัวอย่างเดือด ระเหยจนแห้งสนิท

A-3 เติมกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น ครั้งละ 10 มิลลิลิตร ทั้งหมด 3 ครั้ง โดยในแต่ละครั้งระเหยจนแห้งสนิทก่อนเติมกรดอีกครั้ง

A-4 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ครั้งละ 10 มิลลิลิตร ทั้งหมด 3 ครั้ง ระเหยตัวอย่างจนแห้งสนิท

A-5 ละลายตะกอนที่เหลือจากการย่อย ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

A-6 เทสารละลายใส่หลอดทดลอง และนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเก็บสารละลายใสไว้ และล้างตะกอนซ้ำอีก 2 ครั้ง ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง เก็บสารละลายใสรวมกันกับครั้งแรก จะได้ปริมาตรสารตัวอย่างสุดท้ายเท่ากับ 60 มิลลิลิตร

A-7 ระเหยสารละลายใสบนแผ่นให้ความร้อน จนเหลือประมาณ 20 มิลลิลิตร

A-8 จะได้สารละลาย A นำสารละลายที่ได้ไปทำการศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินต่อไป

B) วิธีที่ 2 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 4 ชนิด

การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 4 ชนิด เป็นการย่อยโดยจะใส่กรดผสม 4 ชนิด ได้แก่ กรดไนตริก : กรดเปอร์คลอริก : กรดไฮโดรฟลูออริก : กรดไฮโดรคลอริก โดยใช้อัตราส่วน 1:1:1:1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

B-1 ชั่งตัวอย่างดิน 3 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์เทฟล่อน เติมสารรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.2 เบคเคอเรล

B-2 เติมกรดผสม 4 ชนิด ได้แก่ กรดไนตริกเข้มข้น กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ปริมาตรกรดอย่างละ 10 มิลลิลิตร ปิดกระจกนาฬิกา ระเหยตัวอย่างบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) จนตัวอย่างแห้งสนิท

B-3 ละลายตะกอนที่เหลือจากการย่อย ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

B-4 เทสารละลายใส่หลอดทดลอง และนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเก็บสารละลายใสไว้

B-5 ระเหยสารละลายใสบนแผ่นให้ความร้อน จนเหลือประมาณ 20 มิลลิลิตร

B-6 จะได้สารละลาย B นำสารละลายที่ได้ไปทำการศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินต่อไป

C) วิธีที่ 3 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 3 ชนิด

การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 3 ชนิด เป็นการย่อยโดยจะใส่กรดผสม 3 ชนิด ได้แก่ กรดไนตริก : กรดไฮโดรฟลูออริก : กรดเปอร์คลอริก โดยใช้อัตราส่วน 4:2:1 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

C-1 ชั่งตัวอย่างดิน 3 กรัม ลงในบีกเกอร์เทฟล่อน เติมสารรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.2 เบคเคอเรล

C-2 จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 16 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และกรดเปอร์คลอริกเข้มข้น ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ปิดกระจกนาฬิกา ระเหยบนแผ่นให้ความร้อน อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) จนตัวอย่างแห้งสนิท

C-3 ละลายตะกอนที่เหลือจากการย่อย ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ระเหยจนแห้งสนิท ทำซ้ำอีก 1 ครั้ง

C-4 ละลายตะกอนอีกครั้งด้วยกรดไนตริกเข้มข้น ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ระเหยจนแห้งสนิท

C-5 ละลายตะกอนที่เหลือจากการย่อย ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

C-6 เทสารละลายใส่หลอดทดลอง และนำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงเก็บสารละลายใสไว้

C-7 ระเหยสารละลายใสบนแผ่นให้ความร้อน จนเหลือประมาณ 20 มิลลิลิตร

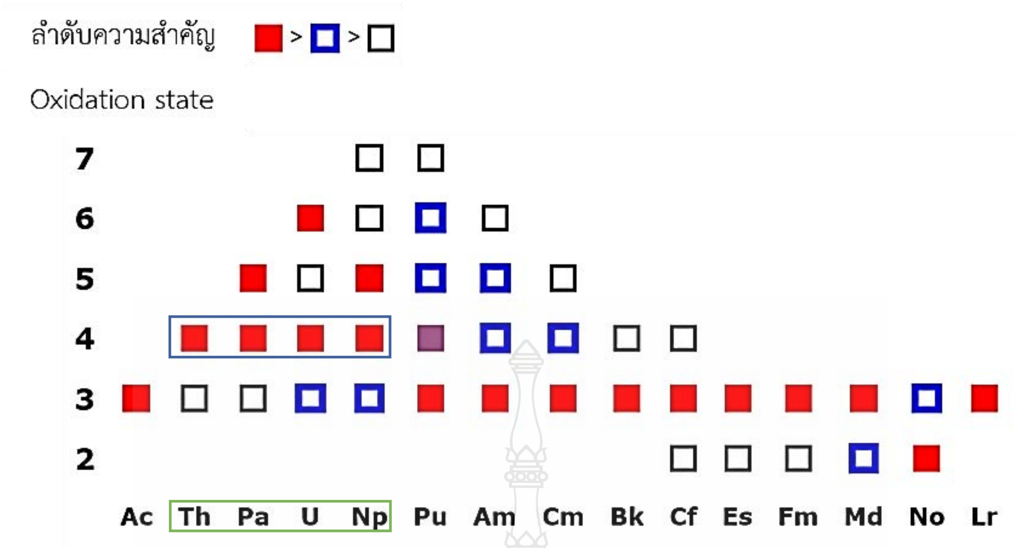
C-8 จะได้สารละลาย C นำสารละลายที่ได้ไปทำการศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินต่อไป

จากการศึกษาการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี ทำให้ได้สารละลาย A B และ C นำสารละลายที่ได้ไปทำการศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิดต่อไป

3.3.1.2 พัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด

การแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์จะอาศัยสมบัติการดูดซับของไอออนทอเรียม และกลุ่มธาตุแอกทิไนด์ที่เป็นธาตุรบกวนอยู่ในตัวอย่างดิน ได้แก่ ยูเรเนียม โพรแอกทิเนียม และเนปทูเนียม บนเรซินแลกเปลี่ยนไอออน คือ สามารถแยกไอโซโทปทอเรียมออกจากกลุ่มธาตุยูเรเนียม โพรแอกทิเนียม และเนปทูเนียมให้ได้ทอเรียมบริสุทธิ์ที่สุด ค่าออกซิเดชันที่แตกต่างกันระหว่างทอเรียมและธาตุกลุ่มแอกทิไนด์ดังกล่าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสำเร็จในขั้นตอนนี้

จากรูปที่ 3.1 ตารางแสดงเลขออกซิเดชันที่อยู่ชั้นเดียวกันซึ่งจะมีผลในการแยกทอเรียมออกจากธาตุอื่นๆที่อยู่ในชั้นพลังงานเดียวกัน ซึ่งในการศึกษาได้ดำเนินการผ่านสารละลายลงในคอลัมน์บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งหมด 2 ครั้ง เพื่อแยกกลุ่มธาตุแอกทิไนด์ ได้แก่ ยูเรเนียม โพรแอกทิเนียม และเนปทูเนียม ออกจากกันให้มากที่สุด เนื่องจากเป็นกลุ่มธาตุรบกวนที่มีผลมาจากเลขออกซิเดชันเดียวกัน



รูปที่ 3.1 ผังแสดงค่าออกซิเดชันของกลุ่มธาตุแอกทิไนด์ [42]

งานวิจัยได้ศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซิน โดยศึกษาเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3 ชนิด ได้แก่ 1. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- 2. เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ และ 3. คอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA ในที่นี้เราจะแทนเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 3 ชนิด ด้วยสัญลักษณ์ 1 2 และ 3 การทดลองมีดังต่อไปนี้

1) เรซินชนิดที่ 1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^-

กลไกการดูดซับไอโซโทปทอเรียมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- คือ คอลัมน์ครั้งที่ 1 เมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างภายใต้ตัวกลางกรดไฮโดรคลอริก เรซินชนิดนี้ มีหมู่ธาตุที่เป็นเบสอยู่ในอะโรมาติกนิวเคลียส ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ดี แต่ไอโซโทปทอเรียมซึ่งมีค่าออกซิเดชัน +4 ในขณะที่กลุ่มธาตุแอกทิไนด์ และ เนปทูเนียม ซึ่งมีค่าออกซิเดชัน +6 และ +5 ดูดซับบนเรซิน ดังนั้นในสารละลายตัวอย่างที่ออกมาจากคอลัมน์จึงเหลือไอโซโทปทอเรียม และโพรแอกทิเนียม จากนั้นเปลี่ยนตัวกลางของสารละลายตัวอย่างเป็นกรดไนตริก เมื่อผ่านสารละลายลงในคอลัมน์ครั้งที่ 2 ซึ่งบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- พบว่าไอโซโทปทอเรียมดูดซับบนเรซิน ขณะที่โพรแอกทิเนียมไม่ดูดซับบนเรซินและไหลผ่านออกจากคอลัมน์ จากนั้นจึงชะล้างไอโซโทปทอเรียมออกจากคอลัมน์ด้วยการผ่านกรดไฮโดรคลอริก [43-44]

ทำการทดลองโดยการนำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1.1 มาผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- 2 ครั้ง ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1-1 ผ่านเรซินครั้งที่ 1 เตรียมคอลัมน์ด้วยการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- กวนในน้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง ถ่ายลงในคอลัมน์

1-2 ผ่านกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในคอลัมน์

1-3 นำสารละลาย A ผ่านลงในคอลัมน์ครั้งละ 5 มิลลิลิตร ด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อ 2 นาที เก็บสารละลายในบีกเกอร์แก้วสะอาดขนาด 100 มิลลิลิตร เมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างลงในคอลัมน์จนหมด ล้างบีกเกอร์ใส่สารละลายตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 9 โมลาร์ ครั้งละ 5 มิลลิลิตร จนเก็บสารละลายได้ทั้งหมดในปริมาตรประมาณ 40 มิลลิลิตร

1-4 นำสารละลายที่ได้ไประเหยแห้งบนเตาไฟฟ้าอุณหภูมิต่ำ จากนั้นเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ระเหยแห้ง ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง ครั้งสุดท้ายเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร พักไว้

1-5 ผ่านเรซินครั้งที่ 2 เตรียมคอลัมน์ด้วยการนำเรนแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- กวนในน้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง เทลงในคอลัมน์

1-6 ผ่านกรดไนตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ลงในคอลัมน์

1-7 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 1-4 ผ่านลงในคอลัมน์ที่เตรียมไว้ อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อ 2 นาที ล้างคอลัมน์ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์ ครั้งละ 15 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

1-8 เก็บไอโซโทปทอเรียมในบีกเกอร์แก้วสะอาดขนาด 50 มิลลิลิตร ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (อุ่นร้อน) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ครั้งละ 10 มิลลิลิตร ผ่านลงในคอลัมน์ เก็บสารละลายได้ทั้งหมดในปริมาตรประมาณ 30 มิลลิลิตร

1-9 นำสารละลายไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ระเหยบนเตาไฟฟ้าจนแห้งสนิท กำจัดสารปนเปื้อนด้วยการเติมกรดไนตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ ระเหยแห้ง ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง

1-10 ทำเช่นเดียวกันนี้สำหรับสารละลาย B และ C

1-11 จะได้สารละลาย A1 B1 และ C1 ปิดกระจกนาฬิกาบนบีกเกอร์ที่แห้งสนิทเพื่อป้องกันฝุ่น พักรอไว้สำหรับศึกษาการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อไป

2) เรซินชนิดที่ 2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+

กลไกการดูดซับไอโซโทปทอเรียมของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ คือ คอลัมน์ที่ 1 เมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างภายใต้ตัวกลางของกรดไฮโดรคลอริก ไอโซโทปทอเรียม และโพรแอกทิเนียม ถูกดูดซับบนเรซิน ขณะที่ยูเรเนียม และเนปทูเนียม ไม่ดูดซับบนเรซิน และไหลผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากชะไอโซโทปทอเรียม และโพรแอกทิเนียม ออกจากคอลัมน์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเปลี่ยนให้อยู่ในสารละลายตัวกลางกรดไนตริก จากนั้นเปลี่ยนตัวกลางของสารละลายตัวอย่างเป็นกรดไนตริก เมื่อผ่านสารละลายลงในคอลัมน์ครั้งที่ 2 ซึ่งบรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ ไอโซโทปทอเรียมถูกดูดซับบนเรซินอีกครั้งหนึ่ง แต่โพรแอกทิเนียมไม่ดูดซับ และไหลผ่านคอลัมน์ออกไป จากนั้นจึงชะล้างไอโซโทปทอเรียมออกจากคอลัมน์ด้วยการกรดออกซาลิก [43-44]

ทำการทดลองโดยการนำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1.1 มาผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ 2 ครั้ง ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2-1 ผ่านเรซินครั้งที่ 1 เตรียมคอลัมน์ด้วยการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ กวนในน้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง ถ่ายลงในคอลัมน์

2-2 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 1-2 ถึง 1-4

2-3 ผ่านเรซินครั้งที่ 2 เตรียมคอลัมน์ด้วยการนำเรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ กวนในน้ำกลั่นบริสุทธิ์สูง เทลงในคอลัมน์

2-4 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 1-6 ถึง 1-7

2-5 เก็บไอโซโทปทอเรียมในบีกเกอร์แก้วสะอาดขนาด 50 มิลลิลิตร โดยใช้กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ครั้งละ 10 มิลลิลิตร ผ่านลงในคอลัมน์ จนเก็บสารละลายได้ทั้งหมดในปริมาตรประมาณ 30 มิลลิลิตร

2-6 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 1-9 ถึง 1-10

2-7 จะได้สารละลาย A2 B2 และ C2 ปิดกระจกนาฬิกาบนบีกเกอร์ที่แห้งสนิทเพื่อป้องกันฝุ่น พักรอไว้สำหรับศึกษาการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อไป

3) เรซินชนิดที่ 3 คอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA

กลไกการดูดซับไอโซโทปทอเรียมของคอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA คือ คอลัมน์ที่ 1 เมื่อผ่านสารละลายตัวอย่างภายใต้ตัวกลางของกรดไฮโดรคลอริก ไอโซโทปทอเรียม และยูเรเนียม ถูกดูดซับบนเรซิน ขณะที่โพรแอกทิเนียม และเนปทูเนียม ไม่ดูดซับบนเรซิน และ

ไหลผ่านออกจากคอลัมน์ หลังจากชะไอโซโทปทอเรียม และโพรแอกทิเนียม ออกจากคอลัมน์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และเปลี่ยนให้อยู่ในสารละลายตัวกลางกรดไนตริก จากนั้นเปลี่ยนตัวกลางของสารละลายตัวอย่างเป็นกรดไนตริก เมื่อผ่านสารละลายลงในคอลัมน์ครั้งที่ 2 ซึ่งเป็นคอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA ไอโซโทปทอเรียม และยูเรเนียม ถูกดูดซับบนเรซินครั้งหนึ่ง จากนั้นจึงชะล้างทอเรียมออกจากคอลัมน์ด้วยการกรดออกซาลิก [43-44]

ทำการทดลองโดยการนำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1.1 มาผ่านคอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA 2 ครั้ง ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3-1 ผ่านเรซินครั้งที่ 1 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 2-2

3-2 ผ่านเรซินครั้งที่ 2 ทำเช่นเดียวกับ ข้อ 2-4 ถึง 2-6

3-3 จะได้สารละลาย A3 B3 และ C3 ปิดกระจกนาฬิกาบนบีกเกอร์ที่แห้งสนิทเพื่อป้องกันฝุ่น พักรอไว้สำหรับศึกษาการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่อไป

จากการศึกษาการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิดทำให้ได้สารละลาย A1-A3, B1-B3 และ C1-C3 นำสารละลายที่ได้ไปทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในสภาวะและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม แล้วนำไปวัดไอโซโทปทอเรียมด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีต่อไป

3.3.1.3 พัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดี ขึ้นอยู่กับสภาวะ และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลส

3.3.1.3.1 การเตรียมเซลล์สำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องใช้กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (Electrolysis) ซึ่งเป็นกระบวนการผ่านกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (D.C.) จากภายนอกเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีบริเวณพื้นผิวแผ่นสแตนเลส เครื่องมือที่ใช้แยกสารละลายด้วยไฟฟ้า เรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วย

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) คือ แผ่นตัวนำที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วต่อกับเซลล์ไฟฟ้าหรือแบตเตอรี่ แบ่งเป็น ขั้วแอโนด (Anode) และ ขั้วแคโทด (Cathode)

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ เพราะมีไอออนบวกและไอออนลบไอออนบวก วิ่งไปรับอิเล็กตรอนที่ขั้วลบ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จึงเรียกขั้วลบว่า แคโทด และเรียกไอออนบวกว่า แคตไอออน (Cation) ไอออนลบ วิ่งไปให้อิเล็กตรอนที่ขั้วบวก เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เรียกว่า แอโนด และเรียก ไอออนลบว่า แอนไอออน (Anion)

3. เครื่องกำเนิดกระแสตรง (D.C.) เช่น เซลล์ไฟฟ้า หรือ แบตเตอรี่

ขั้นตอนการเตรียมเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ตัดขวดปากแคบขนาด 30 มิลลิลิตร ออกประมาณ 1 ใน 3 ของความยาวขวด

2) เจาะรูตรงกลางของฝาขวดให้มีขนาดเท่ากับปลายของหมุดย้ำทองแดง

3) นำหมุดย้ำทองแดงมาติดกับฝาขวดโดยให้ส่วนปลายผ่านรูที่เจาะไว้เพื่อให้หมุดย้ำยึดติดกับฝาไม่เลื่อนหลุด

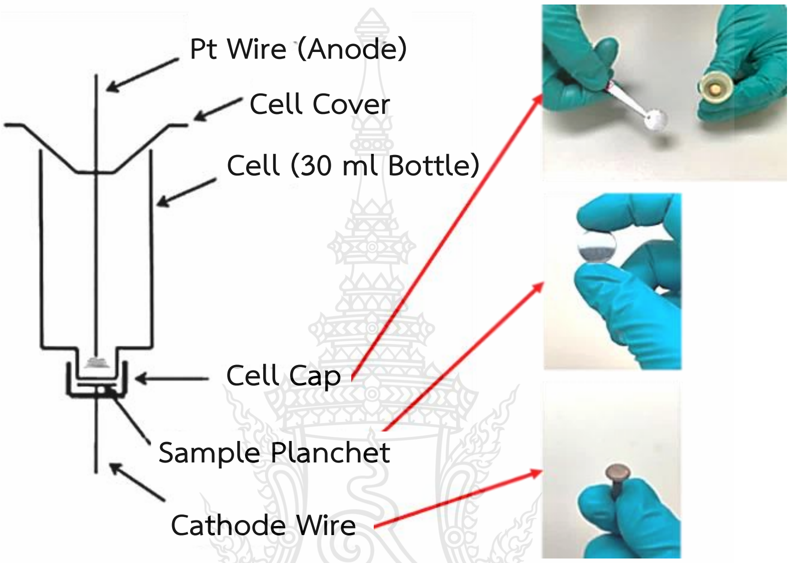
5) ล้างแผ่นสแตนเลสขัดเงาให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นบริสุทธ์ 18 เมกกะโอห์ม และเอทิลแอลกอฮอล์ สัมบูรณ์ ซับให้แห้ง

6) วางแผ่นสแตนเลสขัดเงาบนแผ่นทองแดง ขันฝาเข้ากับขวดให้สนิท

7) ทดสอบการรั่วซึมของเซลล์ด้วยการเติมน้ำกลั่นบริสุทธิ์ 18 เมกกะโอห์ม วางไว้ค้างคืน

8) หากไม่พบการรั่วซึม เทน้ำกลั่นทิ้ง ฉีดล้างเซลล์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ให้ทั่ว วางรอให้เซลล์แห้งสนิท

9) นำเส้นลวดแพลททินั่มปลายขดเป็นแป้นกลมใช้เป็นขั้วบวก ปิดด้านบนของเซลล์ด้วยแผ่นเทฟล่อนกันการระเหยระหว่างผนึก จากนั้นต่อสายไฟจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงเข้าที่ปลายเส้นลวดแพลททินั่ม (ขั้วบวก) และปลายหมุดทองแดง (ขั้วลบ) แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเตรียมเซลล์อิเล็กโทรไลต์สำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ [39]

3.3.1.3.2 การเตรียมสารใช้ทดสอบสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1) เติมสารรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.1 เบคเคอเรล ลงในน้ำกลั่น ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

2) ระเหยบนแผ่นให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

3.3.1.3.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

1) ศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยศึกษาสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 3.0 โมลาร์ ทำการทดลองโดย เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารใช้ทดสอบ อุ่นให้ร้อน นาน 20-30 วินาที เติมสารละลายอิ่มตัวแอมโมเนียมออกซาเลต ครั้งละ 1 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง อุ่นให้ร้อน เติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 อุ่นให้ร้อน ดำเนินการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสโดยใช้เวลา 120 นาที ปรับค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสารละลายตัวกลางเติมลงในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ก่อนครบกำหนดเวลาการผนึกประมาณ 1 นาที เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (2%) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผนึกต่อจนครบเวลา จากนั้นปิดกระแสไฟฟ้านำตัวอย่างออกจากเซลล์ ล้างแผ่นสแตนเลสด้วยขวดฉีดน้ำกลั่น และล้างด้วยขวดฉีดเอทิลแอลกอฮอล์ให้ทั่ว วางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส รอให้แห้งสนิท และนำเข้าเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เกณฑ์การพิจารณาจะเลือกค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนมากที่สุด

2) ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไอโซโทปทอเรียมไอออน โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกหรือบริเวณผิวหน้าของแผ่นสแตนเลส ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมส่งผลให้การผนึกทำได้สมบูรณ์ในการทดลองนี้ใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ค่าต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 1.0 2.0 3.0 5.0 และ 8.5 ทำการทดลองโดย เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารใช้ทดสอบ อุ่นให้ร้อน นาน 20-30 วินาที เติมสารละลายอิ่มตัวแอมโมเนียมออกซาเลต ครั้งละ 1 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง อุ่นให้ร้อน เติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ อุ่นให้ร้อน ดำเนินการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสโดยใช้เวลา 120 นาที ปรับค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ทำการผนึก

ไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสารละลายตัวกลางเติมลงในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ก่อนครบกำหนดเวลาการผนึกประมาณ 1 นาที เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (2%) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผนึกต่อจนครบเวลา จากนั้นปิดกระแสไฟฟ้านำตัวอย่างออกจากเซลล์ ล้างแผ่นสแตนเลสด้วยขวดฉีดน้ำกลั่น และล้างด้วยขวดฉีดเอทิลแอลกอฮอล์ให้ทั่ว วางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส รอให้แห้งสนิท และนำเข้าเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เกณฑ์การพิจารณาจะเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนมากที่สุด

3) ศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

เวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียมมีความสำคัญ ระยะเวลาที่เหมาะสมจะทำให้การผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมจะสมบูรณ์ ไม่เหลือไอโซโทปทอเรียมในสารละลายอีก ในการทดลองนี้ศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม โดยศึกษาที่เวลาต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ เวลา 30 60 90 120 และ 180 นาที ทำการทดลองโดย เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารใช้ทดสอบ อุ่นให้ร้อน นาน 20-30 วินาที เติมสารละลายอิ่มตัวแอมโมเนียมออกซาเลต ครั้งละ 1 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง อุ่นให้ร้อน เติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 อุ่นให้ร้อน ดำเนินการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสโดยใช้เวลา ที่ระดับต่างๆ ปรับค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสารละลายตัวกลางเติมลงในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ก่อนครบกำหนดเวลาการผนึกประมาณ 1 นาที เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (2%) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผนึกต่อจนครบเวลา จากนั้นปิดกระแสไฟฟ้านำตัวอย่างออกจากเซลล์ ล้างแผ่นสแตนเลสด้วยขวดฉีดน้ำกลั่น และล้างด้วยขวดฉีดเอทิลแอลกอฮอล์ให้ทั่ว วางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส รอให้แห้งสนิท และนำเข้าเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เกณฑ์การพิจารณาจะเลือกเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม ที่ให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนมากที่สุด

4) ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม ในการเตรียมฟิล์มบางไฮดรัสออกไซค์ของไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยเทคนิคไฟฟ้า กระแสไฟฟ้ามีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการผนึกฟิล์ม เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าของไอโซโทปทอเรียมให้กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าจำเพาะ ดังนั้นการให้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้ศักย์ไฟฟ้าของระบบสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของไอโซโทปทอเรียมจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้อย่างสมบูรณ์ และช่วยในการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนไปยังขั้วบวกหรือแผ่นสแตนเลสเพิ่มมากขึ้น ด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า ในการทดลองนี้ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม โดยศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าต่างกัน ระดับ ได้แก่ 0.5 0.7 0.9 1.2 และ 1.5 แอมแปร์ ทำการทดลองโดย เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ลงในสารใช้ทดสอบ อุ่นให้ร้อน นาน 20-30 วินาที เติมสารละลายอิ่มตัวแอมโมเนียมออกซาเลต ครั้งละ 1 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง อุ่นให้ร้อน เติมสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ ปริมาตร 4 มิลลิลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2.0 อุ่นให้ร้อน ดำเนินการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสโดยใช้เวลา 120 นาที ปรับค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้า ที่ค่าต่างๆ ทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยนำสารละลายตัวกลางเติมลงในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ก่อนครบกำหนดเวลาการผนึกประมาณ 1 นาที เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (2%) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผนึกต่อจนครบเวลา จากนั้นปิดกระแสไฟฟ้านำตัวอย่างออกจากเซลล์ ล้างแผ่นสแตนเลสด้วยขวดฉีดน้ำกลั่น และล้างด้วยขวดฉีดเอทิลแอลกอฮอล์ให้ทั่ว วางบนแผ่นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150–200 องศาเซลเซียส รอให้แห้งสนิท และนำเข้าเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เกณฑ์การพิจารณาจะเลือกค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียมที่ให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนมากที่สุด

ตารางที่ 3.1 สรุปสภาวะที่ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ปัจจัย	สภาวะที่ทดลอง
ค่าความเข้มข้นชองสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โมลาร์)	0.5 1.0 1.5 2.0 และ 3.0
ค่าความเป็นกรด-ด่างชองสารละลายอิเล็กโทรไลต์	1.0 2.0 3.0 5.0 และ 8.5
ผลของเวลาที่มีต่อการผนึกไอโซโทปทอเรียม (นาที)	30 60 90 120 และ 180
ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	0.5 0.7 0.9 1.2 และ 1.5

3.3.1.3.4 การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

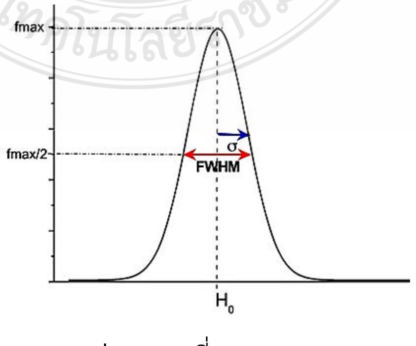
การศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด ได้แก่ 1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ 2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4$ /H_2SO_4 และ 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$

การพิจารณาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมพิจารณาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ค่าความละเอียดในการแยกพีค ค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส ค่าร้อยละการผนึก และคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสที่ได้รับหลังการผนึก รายละเอียดการพิจารณามีดังต่อไปนี้

1) ศึกษาค่าความละเอียดในการแยกพีค

ค่าความละเอียดในการแยกพีค คำนวณจากค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่ง (Full Width at Half maximum (FWHM)) แสดงผลเป็นค่าพลังงาน ค่าที่มีตัวเลขน้อยแสดงว่ามีความละเอียดในการแยกพีคที่ดี สำหรับเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ที่ใช้ในการวิจัย ค่า FWHM คำนวณโดยใช้โปรแกรม MAESTRO ORTEC® MCA Emulation software ซึ่งติดตั้งมาพร้อมกับเครื่องวิเคราะห์ เนื่องจากพีคสเปกตรัมมีลักษณะเป็น Gaussian ดังนั้นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงอยู่ที่ร้อยละ 60 ของความสูงพีค และค่า FWHM อยู่ที่ร้อยละ 50 หรือครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค แสดงดังรูปที่ 3.3 สูตรการคำนวณ FWHM จากสูตรที่ 1 โดยค่า FWHM ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยค่า FWHM ต้องอยู่ในช่วง 20-25 keV

$$\mathrm{FWHM} = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2.35\sigma \qquad (1)$$



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง FWHM และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2) ศึกษาค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส

การศึกษาความหนา-บางของแผ่นฟิลม์ไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส ใช้วิธีการคำนวณจากสูตรที่ 2 และ 3 [45] ดังนี้

(1) น้ำหนักแผ่นฟิล์มทอเรียม = น้ำหนักแผ่นสแตนเลสก่อนผนึก – น้ำหนักแผ่นสแตนเลสหลังผนึก (2)

$$\text{(2) ความหนาของแผ่นฟิล์มทอเรียม} = \frac{\text{น้ำหนักแผ่นฟิล์มทอเรียม}}{\text{ความหนาแน่นของทอเรียม}} \quad (3)$$

เมื่อ ความหนาแน่นของทอเรียม เท่ากับ 11.724 กรัมต่อลบ.ซม.

3) ศึกษาค่าร้อยละการผนึก

การตรวจสอบประสิทธิภาพการผนึกด้วยไฟฟ้า พิจารณาจากค่าร้อยละของการผนึก คำนวณจากสูตรที่ 4 [45]

$$\text{ประสิทธิภาพการผนึก} = \frac{\text{ความแรงรังสีทอเรียม-229 จากแผ่นผนึก}}{\text{ความแรงรังสีทอเรียม-229 เริ่มต้น}} \quad (4)$$

4) ศึกษาคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสหลังการผนึก

คุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสหลังการผนึก สามารถกระทำได้โดยการสังเกตด้วยสายตา โดยลักษณะทางกายภาพที่ดีของแผ่นสแตนเลสที่ได้หลังการผนึกฟิล์มบนแผ่นสแตนเลสจะมีสีฟ้าใส เงามันวาว ผนึกทั่วทั้งแผ่นสแตนเลส ฟิล์มบาง ผนึกอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีผงตะกอน

เมื่อได้สภาวะและชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงนำสารละลายที่ได้จากข้อ 3.3.1.2 มาทำการทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ แล้วนำไปวัดไอโซโทปทอเรียมด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี เพื่อพิจารณาหาวิธีการย่อยด้วยกรดที่เหมาะสมในการการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดิน และพิจารณาหาเรซินเพื่อแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ต่อไป

3.3.1.4 การวัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

การวัดตัวอย่างโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี แสดงดังรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ใช้ปากคีบปลายแบนนำแผ่นสแตนเลสที่ผนึกเรียบร้อยเข้าวางบนชั้นวางตัวอย่างในห้องสุญญากาศ ซึ่งภายในบรรจุหัววัดรังสีแอลฟา แบบ Silicon ULTRA Ion Implanted ขนาดพื้นที่หัววัด 450 ตารางมิลลิเมตร

2) ปิดห้องสุญญากาศให้สนิท เปิดปั๊มสุญญากาศ รอจนกว่าสัญญาณไฟแสดงว่าเครื่องวัดพร้อมใช้งาน

3) เปิดสวิตช์กระแสไฟ กดปุ่มการวัด ใช้เวลาการวัดประมาณ 5-15 วัน

4) ตรวจสอบสเปกตรัมโดยดูจากพีคที่ปรากฏขึ้นตามตำแหน่งพลังงานของทอเรียมแต่ละไอโซโทป

5) ตรวจสอบพื้นที่ใต้พีคโดยพื้นที่ใต้พีคที่ยอมรับได้ ต้องมากกว่า 1000 จำนวนนับในช่วงเวลาการวัดไม่เกิน 15 วัน

6) บันทึกค่าพื้นที่ใต้พีคของไอโซโทปทอเรียมทั้ง 4 ไอโซโทป ปิดเครื่องวัด โดยดำเนินการดังนี้ ปิดปุ่มการวัด ปิดกระแสไฟ ปิดปั๊มสุญญากาศ

7) รอจนกว่าจะมีสัญญาณแสดงว่าเครื่องวัดหยุดทำงาน เปิดห้องสุญญากาศ และนำตัวอย่างออก

8) นำค่าพื้นที่ใต้พีคมาคำนวณหาความแรงรังสีของทอเรียมที่ต้องการทราบ จากสูตรที่ 5 [45]

$$\text{ความแรงรังสี } Th_{Unknow} = \frac{\text{ค่าความแรงรังสีของ Th-229} \times \text{พื้นที่ใต้พีค } Th_{Unknow}}{\text{พื้นที่ใต้พีค Th-229} \times \text{น้ำหนักตัวอย่าง}} \quad (5)$$

รูปที่ 3.4 การวัดตัวอย่างด้วยเครื่องแอลฟาสเปกโทรมิเตอร์

3.3.2 ทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

งานวิจัยส่วนที่สอง ได้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ เพื่อยืนยันว่ากระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ สามารถให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความจำเพาะ ความแม่นยำ และความเที่ยงตรง ก่อนนำไปใช้วิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ มีดังนี้

3.3.2.1 ศึกษาความจำเพาะ (Selectivity)

ศึกษาความจำเพาะโดยใช้สารมาตรฐานอ้างอิงของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ SRM IAEA 327 [46] วิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่

พิจารณาโดยตรวจสอบสเปกตรัมที่ปรากฏบนเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ซึ่งต้องมีเพียง 4 พีค และแสดงพีคตรงตำแหน่งตามพลังงานของไอโซโทปทอเรียม ได้แก่ ทอเรียม-232 ทอเรียม-230 ทอเรียม-229 และ ทอเรียม-228 แสดงพีคที่พลังงาน 4.010 4.686 4.845 และ 5.423 MeV ตามลำดับ และค่าความละเอียดในการแยกพีค ซึ่งเป็นค่าบ่งชี้ความจำเพาะของวิธีวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมคำนวณจากค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่ง (Full Width at Half maximum (FWHM)) ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยค่า FWHM ต้องอยู่ในช่วง 20-25 keV

3.3.2.2 ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (Detection limit)

1) ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (Limit of detection; LOD)

ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด โดยการวัดความแรงรังสีของทอเรียม ในแบลงค์ วิเคราะห์ซ้ำ 10 ครั้ง นำค่าความแรงรังสีที่ได้ไปคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation; SD) เพื่อนำมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดจากสูตรที่ 6 [47]

$$\text{LOD} = 3 \times \text{SD} \tag{6}$$

2) ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation; LOQ)

ศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด โดยการวัดความแรงรังสีของทอเรียม ในแบลงค์ วิเคราะห์ซ้ำ 10 ครั้ง นำค่าความแรงรังสีที่ได้ไปคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาคำนวณหาค่าขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณจากสูตรที่ 7 [47]

$$LOQ = 10 \times SD \qquad (7)$$

3.3.2.3 ศึกษาความแม่นยำ (Accuracy)

ศึกษาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ หาได้จากค่าร้อยละการได้กลับคืน (% Recovery) โดยเติมสารรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.2 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ในสาร SRM IAEA 327 หลังจากนั้นนำค่าความแรงรังสีทอเรียม ที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณค่าร้อยละการได้กลับคืนจากสูตร 8 เกณฑ์การพิจารณาค่าร้อยละการได้กลับคืนในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\geq$ 70 [47]

$$\% \text{ Recovery} = \frac{\text{ค่าแรงรังสีทอเรียมที่วัดได้}}{\text{ค่าแรงรังสีทอเรียมที่ทราบค่า}} \times 100 \qquad (8)$$

3.3.2.4 ศึกษาความเที่ยงตรง (Precision)

1) ศึกษาการทำซ้ำ (Repeatability)

ศึกษาความเที่ยงตรงของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ ด้วยการทดสอบซ้ำ โดยทำการวัดค่าความแรงรังสีทอเรียมในสาร SRM IAEA 327 จำนวน 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากสูตรที่ 9 ความเที่ยงตรงพิจารณาจากค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\leq$ 30 [47]

$$\text{ค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน} = \frac{\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}}{\text{ค่าเฉลี่ย}} \times 100 \qquad (9)$$

2) ศึกษาการทวนซ้ำ (Reproducibility)

ศึกษาความเที่ยงตรงของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ ด้วยการทวนซ้ำ โดยทำการวัดค่าความแรงรังสีทอเรียมในสาร SRM IAEA 327 จำนวน 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน ด้วยการวัดตัวอย่างโดยเปลี่ยนหัววัด (Detector) และวัดทุกวัน รวมเป็นเวลา 10 วัน นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ความเที่ยงตรงพิจารณาจากค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า < 30 [47]

3.3.3 นำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

งานวิจัยส่วนที่สาม ได้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม โดยประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้างรวมทั้งปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด และประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก วิธีการทดลองรายละเอียดดังต่อนี้

3.3.3.1 การประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด

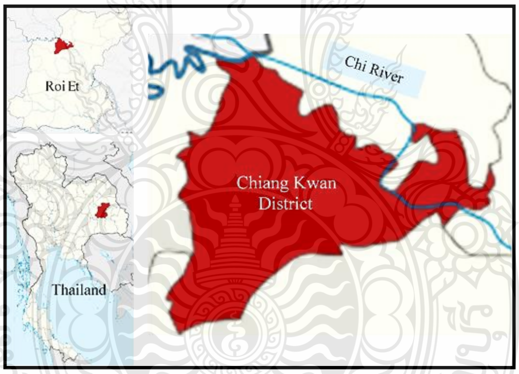
การศึกษานี้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด ขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1) พื้นที่ศึกษา

ได้นำวิธีที่พัฒนาขึ้นมาศึกษาปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดิน ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินมาศึกษาในพื้นที่ทำนาแบบนาน้ำฝน จำนวน 2 แปลง ขนาดพื้นที่แปลงละ 15 ไร่ ตั้งอยู่ ในอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด แสดงดังรูปที่ 3.5 เป็นพื้นที่เพาะปลูกข้าวเจ้าสายพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จัดการกากพืชแบบไถกลบ 1 แปลง และแบบเผาตอซัง 1 แปลง ตั้งอยู่ใน

หมู่ที่ 5 บ้านมีชัย ตำบลหมูม้น อำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด โดยทั้งสองแปลงห่างกัน 1 กิโลเมตร (พิกัด16^{0} 5’ 49.2” เหนือ, 103^{0} 42’ 39.6” ตะวันออก)

จังหวัดร้อยเอ็ดตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นที่ราบสูง สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 120-160 เมตร บริเวณตอนเหนือของจังหวัดมีภูเขาซึ่งติดต่อจากเทือกเขาภูพาน บริเวณตอนกลางของจังหวัด มีลักษณะเป็นที่ราบลูกคลื่น บริเวณตอนล่างมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มริมฝั่งแม่น้ำมูลและสาขา ได้แก่ ลำน้ำชี ลำน้ำพลับพลา และลำน้ำเตา พื้นที่ในจังหวัดร้อยเอ็ดเป็นส่วนหนึ่งของทุ่งกุลาร้องไห้ พื้นที่ประมาณ 80,000 ไร่ มีลักษณะเป็นที่ราบต่ำแอ่งกระทะ มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจ ได้แก่ ข้าว มันสำปะหลัง ยางพารา อ้อย มะพร้าว และปาล์ม จังหวัดร้อยเอ็ดได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ สภาพภูมิอากาศอยู่ในประเภทฝนเมืองร้อน ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,196.8 มิลลิเมตร ฝนตกชุกในเดือนมิถุนายนถึงกันยายน อากาศร้อนและแห้งแล้งในเดือนกุมภาพันธ์ถึงเมษายน การใช้ปุ๋ยในพื้นที่เป็นชนิดแอมโมเนียมฟอสเฟต และ N P K จำนวน 3 ชนิดได้แก่ 16-16-8, 18-22-0 และ 18-46-0 ในปริมาณ 30-35 กิโลกรัมต่อไร่ [48]

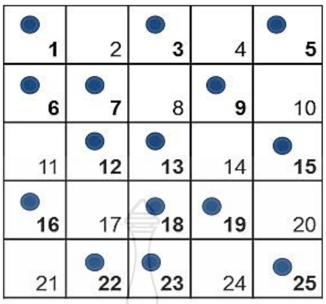


รูปที่ 3.5 พื้นที่ศึกษา อำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด

2) การเก็บตัวอย่างดิน

ดำเนินการเก็บตัวอย่างดินช่วงเดือนมกราคม-กุมภาพันธ์ บนพื้นที่นาหลังเก็บเกี่ยวข้าวแบบไถกลบและเผาตอซัง กำหนดจุดสำรวจด้วยวิธีตีตารางขนาด 10 x 10 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.6 จากนั้นเก็บตัวอย่างดินตามแนวดิ่งหรือภาคตัดขวาง ด้วยอุปกรณ์เก็บดินแบบแท่งรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร เก็บดินชั้นไถพรวนที่ความลึกจากผิวหน้าดินจนถึงระดับความลึก 30 เซนติเมตร ตัดแบ่งแท่งดินออกเป็นชั้น ชั้นละ 3 เซนติเมตร ดังนี้

0-3 3-6 6-12 12-18 18-21 21-24 24-27 และ 27-30 บรรจุดินลงถุงซิปล็อก ปิดปากถุงให้สนิท บันทึกตำแหน่ง ประเภทพื้นที่ ชั้นที่เก็บและวันที่เก็บ บนหน้าถุงซิปล็อก



รูปที่ 3.6 การเก็บตัวอย่างดินแบบสุ่มโดยวิธีตีตาราง [25]

3) เมื่อถึงห้องปฏิบัติการทางรังสี นำดินไปผึ่งลมให้แห้ง ชั่งน้ำหนักดินแห้งจนได้ค่าน้ำหนักคงที่ จากนั้นบดดินด้วยเครื่องบดดิน ร่อนผ่านตะแกรงขนาดความถี่ 125 ไมครอน บรรจุดินในถุงซิปปิดล็อกสนิท

4) นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปทอเรียมด้วยวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ไป วัดค่าความแรงรังสีทอเรียมด้วยเครื่องวัดวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี คำนวณผลความแรงรังสีหน่วยเบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

5) นำค่าความแรงรังสีทอเรียม-232 มาทำการประเมินปริมาณรังสีดูดกลืน (D) หน่วยนาโนเกรย์ต่อชั่วโมง โดยคำนวณจากสูตรที่ 10

$$D\ (nGy.h) = 0.604\ A_{Th} \qquad (10)$$

A_{Th} = ปริมาณไอโซโทปทอเรียมในดิน (หน่วย Bq/Kg)

6) นำค่าปริมาณรังสีดูดกลืน (D) มาทำการประเมินปริมาณรังสียังผลรายปี (AED) หน่วยไมโครซีเวิร์ตต่อปี โดยคำนวณจากสูตรที่ 11

$$AED\ (\mu Sv/y) = D\ (nGy/h) x (10^{-9} Gy/nGy) \times 8760\ (h/y) \times 0.7\ (Sv/Gy) \times (\mu Sv/10^{-6} Sv) \times 0.20 \qquad (11)$$

เมื่อ D (nG/h) คือ ปริมาณรังสีดูดกลืน 8760 คือ จำนวนชั่วโมงต่อปี 0.20 คือแฟกเตอร์เวลาที่เกษตรกรใช้ในการปฏิบัติงานในพื้นที่นา (5 ชั่วโมงต่อวัน) 0.7 Sv/Gy คือ conversion coefficient ใช้สำหรับแปลงค่าจากปริมาณรังสีดูดกลืนเป็นปริมาณรังสียังผลรายปี

3.3.3.2 การประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก

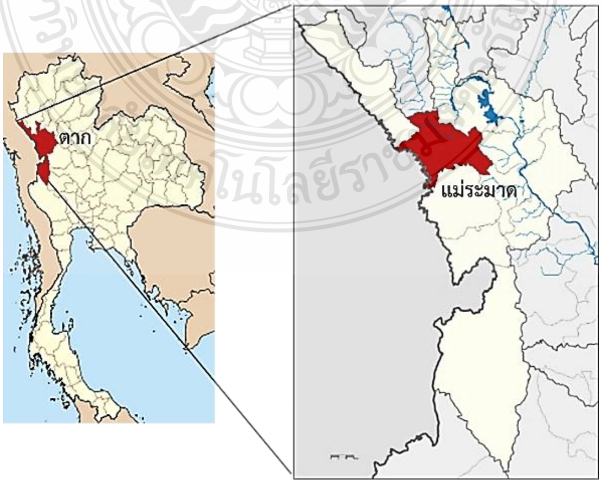
การศึกษานี้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก ขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1) พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ทำไร่ข้าวโพด ตำบลแม่จะเรา อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก ตั้งอยู่ในภาคเหนือค่อนไปทางตะวันตกของประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 3.7 ระหว่างเส้นรุ้งที่ 15^{0} 50’ 36” เหนือ และเส้นแวงที่ 99^{0} 7’ 22” ตะวันออก สูงกว่าระดับน้ำทะเล 116.2 เมตร (ที่ตั้งศาลากลางจังหวัดตาก) มีเนื้อที่ประมาณ 16,406.65 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 10,324,156.25 ไร่ ใหญ่เป็นอันดับที่ 2 ของภาคเหนือรองจากจังหวัดเชียงใหม่

สภาพภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นป่าไม้และภูเขา มีทิวเขาถนนธงชัยเป็นตัวแบ่งพื้นที่ออกเป็น 2 ฝั่ง ตากในฝั่งตะวันออก คือ อำเภอเมือง อำเภอบ้านตาก อำเภอสามเงา และกิ่ง อำเภอวังเจ้า และตากในฝั่งตะวันตก คือ อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภอท่าสองยาง และอำเภออุ้มผาง แบ่งการปกครองออกเป็น 8 อำเภอ 1 กิ่งอำเภอ คือ อำเภอเมือง อำเภอบ้านตาก อำเภอสามเงา อำเภอแม่สอด อำเภอแม่ระมาด อำเภอพบพระ อำเภอท่าสองยาง อำเภออุ้งผาง และกิ่ง อำเภอวังเจ้า

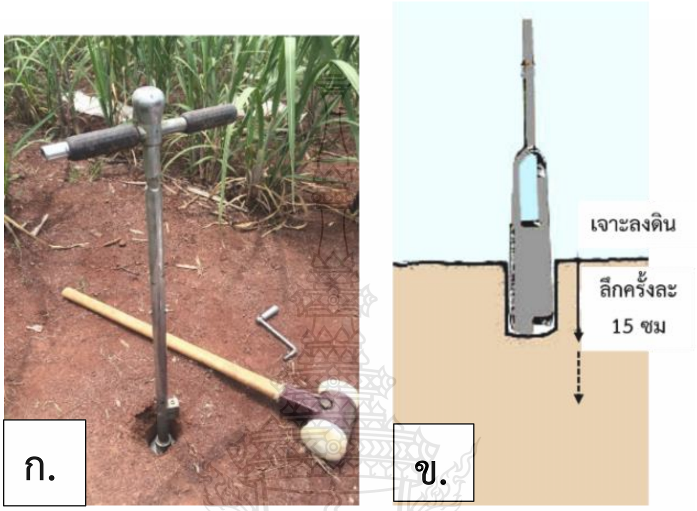
ปัญหาของพื้นที่ที่พบคือมีการกร่อนดินจากลมและน้ำฝน โดยเฉพาะในบางพื้นที่ปัญหาที่พบค่อนข้างรุนแรงคือการใช้ปุ๋ยในพื้นที่เป็นชนิดไดแอมมอเนียมฟอสเฟต และ N P K 2 ชนิด ได้แก่ 15-15-15 และ 16-20-0 ในปริมาณ 15 กิโลกรัมต่อไร่ [49]



รูปที่ 3.7 พื้นที่ศึกษา ตำบลแม่จะเรา อำเภอแม่ระมาด จังหวัดตาก [49]

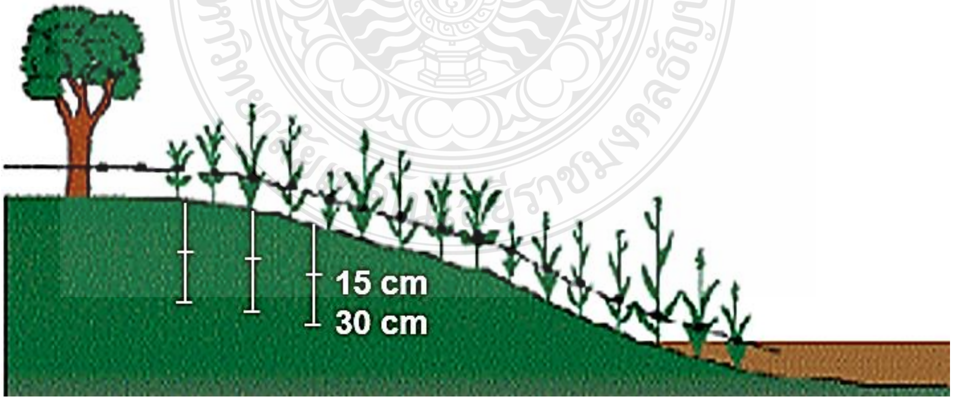
2) การเก็บตัวอย่าง

ดำเนินการเก็บตัวอย่างดิน 2 ครั้ง ช่วงเดือนกรกฎาคม และธันวาคม ในการเก็บตัวอย่างจะใช้เทคนิค Transect sampling ด้วยชุดอุปกรณ์แบบแท่ง รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ชุดอุปกรณ์เก็บดินแบบแท่ง ก. ภาพจากพื้นที่ศึกษา ข. ภาพจำลอง [50]

ตัวอย่างดินเก็บในระยะความลึก 30 เซนติเมตร โดยจัดเก็บเป็น 3 เส้นทางลงตามทางลาดเชิงเขา แต่ละจุดสำรวจห่างกัน 20 x 20 เมตร (โดยประมาณ) แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รูปแบบการเก็บตัวอย่างแบบ Line transect sampling [50]

3) การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำดินไปตากให้แห้ง บดดินด้วยเครื่องบดดิน และร่อนผ่านตะแกรงขนาดความถี่ 125 ไมครอน ผสมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันตลอดแท่ง บรรจุดินในถุงซิปล็อกปิดสนิท

4) นำตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ปริมาณไอโซโทปทอเรียมด้วยวิธีวิเคราะห์ที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ไป โดยวัดความแรงรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 ด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี คำนวณผลความแรงรังสี หน่วยเบคเคอเรลต่อกิโลกรัม นำค่าที่ได้มาประเมินผลลักษณะและทิศทางการกร่อนดิน

บทที่ 4
ผลการวิจัย

งานวิจัยได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนั้นจึงแยกอภิปรายผลการวิจัยออกเป็นดังนี้ ส่วนที่หนึ่ง ผลการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ส่วนที่สอง ผลการทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี และส่วนที่สาม ผลการนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี รายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

4.1.1 ผลการพัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี

ผลการพัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี ทำการศึกษาเทคนิคการย่อยตัวอย่าง 3 วิธี ผลการศึกษาพบว่า วิธีที่ 1 การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 96.59 และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.48 วิธีที่ 2 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 4 ชนิด มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 36.13 และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 15.68 และวิธีที่ 3 การย่อยด้วยกรดแบบกรดผสม 3 ชนิด มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 52.43 และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 7.62 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1

นำค่าร้อยละการได้กลับคืน (% Recovery) และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) มาเปรียบเทียบกันระหว่างเทคนิคการย่อยตัวอย่าง 3 วิธี โดยค่าร้อยละการได้กลับคืนในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า ≥ 70 และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า ≤ 25 พบว่า วิธีที่ 1 การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด เป็นการย่อยโดยจะใส่กรดไนตริก กรดไฮโดรฟลูออริก และกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ มีผลแสดงค่าร้อยละการได้กลับคืน สูงที่สุด และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ วิธีที่ 1 จึงเป็นวิธีการย่อยตัวอย่างดิน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน และ

ย่อยสลายโครงสร้างของอนุภาคดิน เพื่อให้ไอโซโทปทอเรียมละลายแยกตัวออกมาอยู่ในสารละลายกรดได้สมบูรณ์กว่าวิธีที่ 2 และวิธีที่ 3 ดังนั้นวิธีที่ 1 จึงเป็นวิธีการย่อยตัวอย่างดินที่ถูกเลือก เพื่อนำไปย่อยตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

ตารางที่ 4.1 ผลการพัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วย กรดแต่ละวิธี

ลำดับ	วิธีที่ 1 ย่อยเรียงลำดับด้วยกรดแต่ละชนิด		วิธีที่ 2 ย่อยด้วยกรดผสม 4 ชนิด		วิธีที่ 3 ย่อยด้วยกรดผสม 3 ชนิด	
	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD	% Recovery	%RSD
1	92.29	0.47	32.58	14.62	50.11	8.07
2	93.06	0.41	30.97	15.44	51.52	6.63
3	94.59	0.39	36.13	14.00	50.94	7.95
4	96.04	0.54	36.17	13.87	51.25	7.75
5	97.36	0.52	34.84	16.85	49.67	7.04
6	98.21	0.54	36.69	19.24	52.41	7.96
7	98.79	0.47	35.01	15.37	53.28	8.61
8	96.23	0.49	36.43	15.24	55.46	7.45
9	99.55	0.51	40.84	17.78	55.34	7.38
10	99.84	0.48	41.59	14.36	54.33	7.38
$\bar{x}$	96.59	0.48	36.13	15.68	52.43	7.62

4.1.2 ผลการพัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด

จากการศึกษาเปรียบเทียบเรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3 ชนิด ได้แก่ เรซินชนิดที่ 1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- เรซินชนิดที่ 2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวก AG 50W-X12 H^+ และเรซินชนิดที่ 3 คอลัมน์บรรจุเรซินสำเร็จรูป UTEVA โดยพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อยละการได้กลับคืน และค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ (%RE) โดยค่าร้อยละการได้กลับคืนในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\geq$ 70 ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\leq$ 25 และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\leq$ 10

จากผลการวิจัยที่ได้เรซินชนิดที่ 1 มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 91.67 ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 0.63 และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์เท่ากับ 6.36 เรซินชนิดที่ 2 มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 76.66 ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 3.17 และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์เท่ากับ 9.51 เรซินชนิดที่ 3 มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 85.78 ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์เท่ากับ 2.03 และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์เท่ากับ 8.81 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2

เรซินชนิดที่ 1 มีค่าร้อยละการได้กลับคืน ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์ ที่ดีกว่าเรซินชนิดที่ 2 และเรซินชนิดที่ 3 อีกทั้งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้นเรซินชนิดที่ 1 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- จึงเป็นเรซินที่ถูกเลือก เพื่อนำไปแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์สำหรับวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

ตารางที่ 4.2 ผลการพัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด

ลำดับ	ชนิดที่ 1 เรซิน AG 1-X8 Cl^-			ชนิดที่ 2 เรซิน AG 50W-X12 H^+			ชนิดที่ 3 เรซิน UTEVA		
	% Recovery	%RSD	%RE	% Recovery	%RSD	%RE	% Recovery	%RSD	%RE
1	90.02	0.68	6.21	76.90	2.41	10.11	86.11	1.96	7.32
2	90.33	0.65	7.05	75.10	2.96	8.84	85.12	1.73	8.82
3	94.26	0.64	6.28	74.83	2.57	8.45	86.94	1.91	8.24
4	89.91	0.59	5.84	76.10	3.73	9.67	85.24	2.15	10.33
5	89.22	0.62	5.97	75.66	3.91	9.81	83.37	1.78	8.26
6	89.34	0.59	6.45	78.53	2.15	10.23	86.11	2.03	9.95
7	91.45	0.58	7.00	78.53	3.27	9.59	85.95	1.97	8.71
8	91.63	0.64	6.79	76.07	3.56	8.96	87.55	1.86	8.69
9	94.65	0.66	5.95	77.85	4.78	10.05	86.38	2.26	7.76
10	95.87	0.68	6.03	77.00	2.39	9.34	85.01	2.61	10.06
$\bar{x}$	91.67	0.63	6.36	76.66	3.17	9.51	85.78	2.03	8.81

4.1.3 ผลการพัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

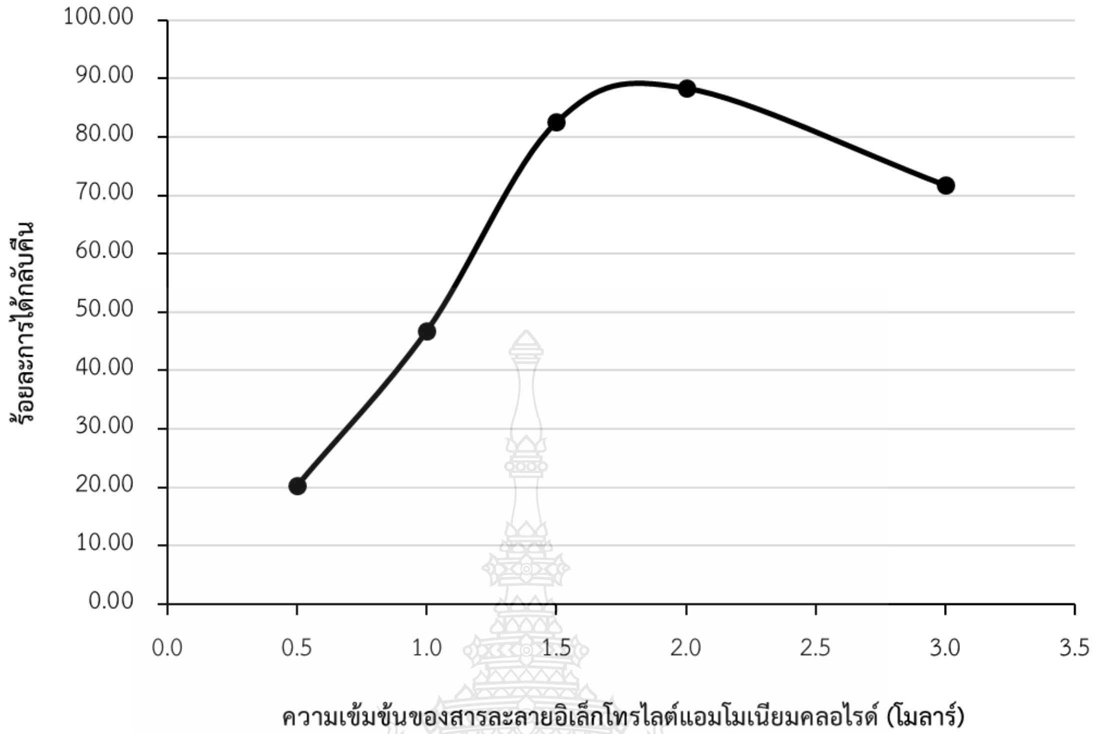
การผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ดี ขึ้นอยู่กับสภาวะ และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลส ผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

4.1.3.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีดังต่อไปนี้

1) ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วบวกหรือผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียม การศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ศึกษาจากสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ ความเข้มข้น 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 3.0 โมลาร์ ผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละการได้กลับคืนเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แอมโมเนียมคลอไรด์เพิ่มขึ้น และมีค่าร้อยละการได้กลับคืนสูงที่สุด ที่ค่าความเข้มข้นเท่ากับ 2.0 โมลาร์ หลังจากนั้นค่าร้อยละการได้กลับคืนจะเริ่มลดลง ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.1 จากการศึกษาจึงเลือกสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

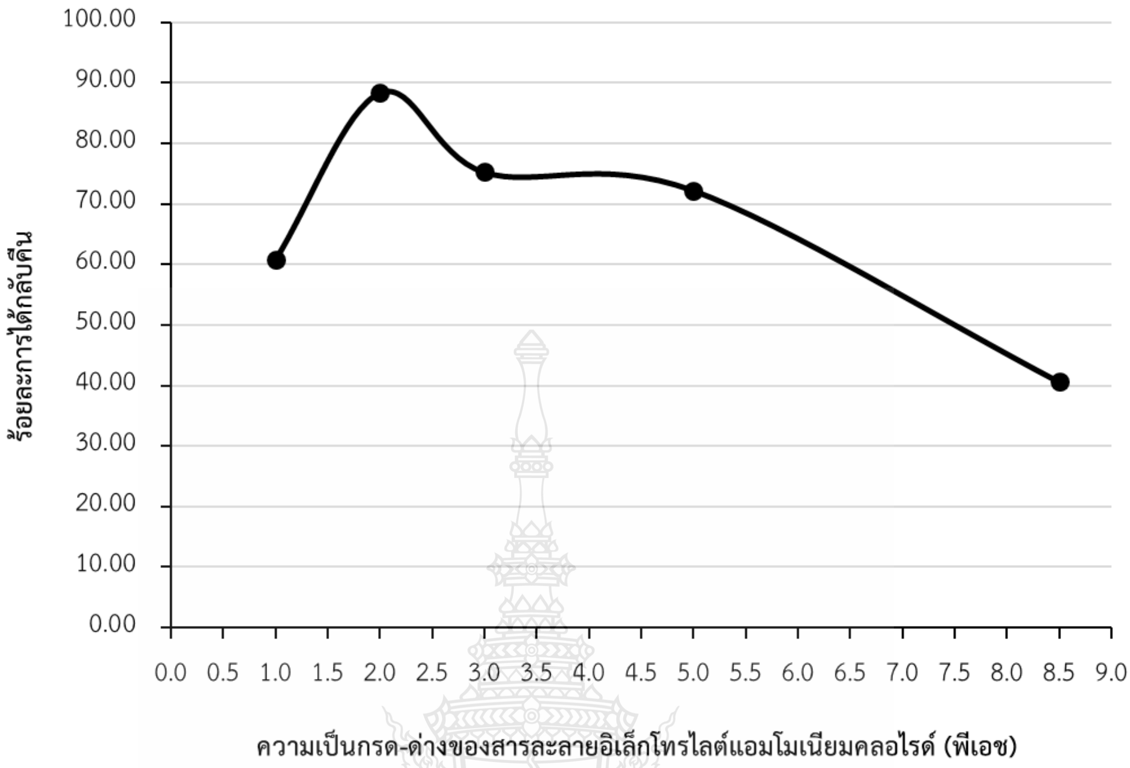


รูปที่ 4.1 ผลการศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

2) ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

การทดลองนี้ได้ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แอมโมเนียมคลอไรด์ค่าต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 1.0 2.0 3.0 5.0 และ 8.5

ผลการศึกษา พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าร้อยละการได้กลับคืนที่สูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.0 ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.2 จากการศึกษาจึงเลือกค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ค่าเท่ากับ 2.0 ในการในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

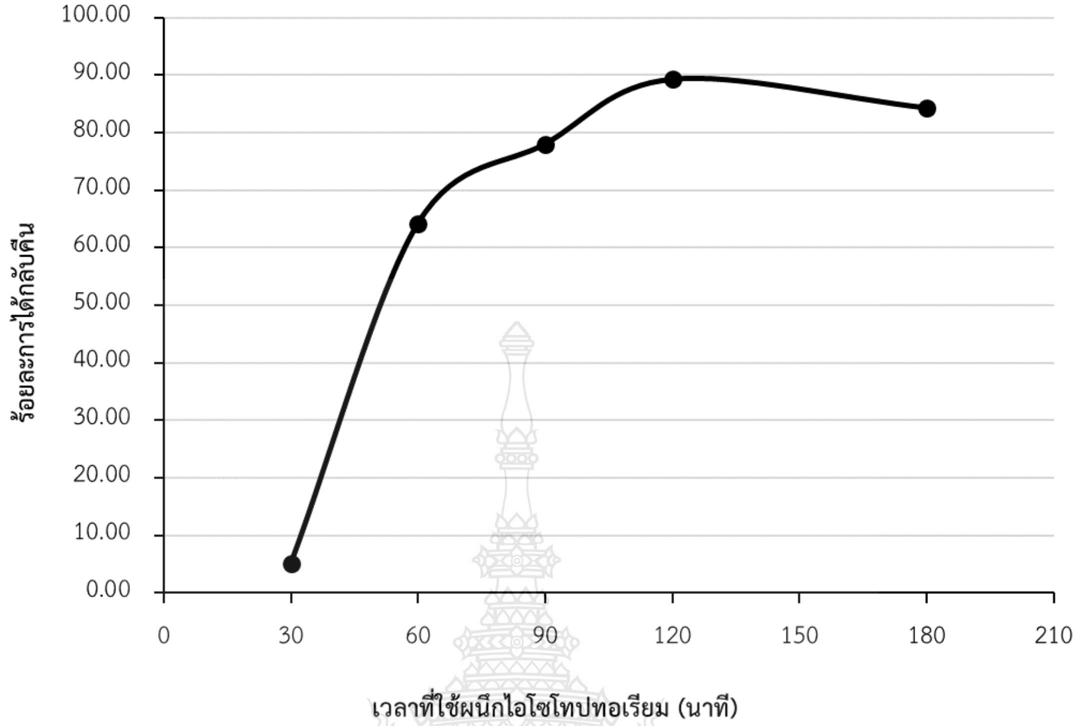


รูปที่ 4.2 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

3) ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

การทดลองนี้ได้ศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม โดยศึกษาที่เวลาต่างกัน ได้แก่ เวลา 30 60 90 120 และ 180 นาที

ผลการศึกษา พบว่าจะค่าร้อยละการได้กลับคืนมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามเวลาที่ให้เพิ่มขึ้น และมีค่ามากที่สุดที่เวลา 120 นาที หลังจากนั้นค่าร้อยละการได้กลับคืนจะเริ่มมีค่าคงที่ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.3 จากการศึกษาจึงเลือกเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม 120 นาที ในการในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

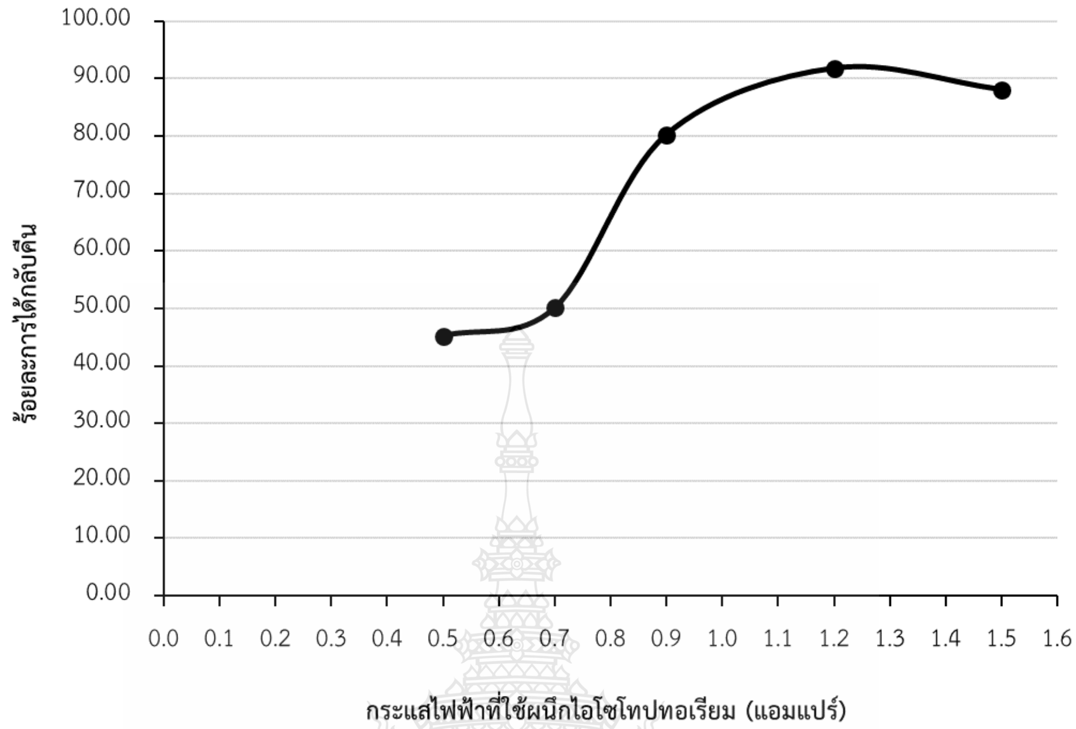


รูปที่ 4.3 ผลการศึกษาเวลาที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

4) ผลการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

การทดลองนี้ได้ศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม โดยศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 0.5 0.7 0.9 1.2 และ 1.5 แอมแปร์

ผลการศึกษา พบว่าที่ระดับกระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ให้ค่าร้อยละการได้กลับคืนสูงที่สุด เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าสูงที่สุด หลังจากนั้นค่าร้อยละการได้กลับคืนจะเริ่มมีค่าคงที่ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.4 จากการศึกษาจึงเลือกกระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ในการในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 4.4 ผลการศึกษาค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ผนึกไอโซโทปทอเรียม

ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยไฟฟ้า มีรายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยไฟฟ้า

ปัจจัย	สภาวะที่เหมาะสม
ค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โมลาร์)	2.0
ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (พีเอช)	2.0
ผลของเวลาที่มีต่อการผนึกไอโซโทปทอเรียม (นาที)	120
ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	1.2

4.1.3.2 ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

นอกจากสภาวะที่เหมาะสมในการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นับว่ามีความสำคัญ ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด ได้แก่ 1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ 2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4$ /H_2SO_4 และ 3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$ ผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผลการศึกษาค่าความละเอียดในการแยกพีค

ค่าความละเอียดในการแยกพีคเป็นค่าบ่งชี้สมรรถนะในการแยกพีคของแต่ละไอโซโทปรังสีออกจากกัน ค่าความละเอียดในการแยกพีคที่ดี คือสเปกตรัมจะแสดงพีคเดี่ยวได้อย่างชัดเจน ไม่มีการเชื่อมรวมกับพีคอื่น พีคที่ดีจะต้องมีความสมมาตร ลักษณะพีคแคบและสูง [51] การวิเคราะห์ค่าความละเอียดในการแยกพีค คำนวณได้จากค่า FWHM แสดงผลเป็นค่าพลังงาน โดยค่าตัวเลขที่ต่ำ แสดงว่าการแยกพีคชัดเจนและมีสมรรถนะสูง และค่า FWHM ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ โดยค่า FWHM ต้องอยู่ในช่วง 20-25 keV

ผลการคำนวณค่าความละเอียดในการแยกพีคพบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ มีค่า FWHM เท่ากับ 22.5 keV แสดงค่าความละเอียดในการแยกพีคดีที่สุด รองลงมา คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4/HNO_3/H_2SO_4$ มีค่า FWHM เท่ากับ 35.5 keV และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$ มีค่า FWHM เท่ากับ 40.5 keV ตามลำดับ

2) ผลการศึกษาค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส

ด้วยความสามารถในการทะลวงของรังสีแอลฟามีค่าต่ำ ดังนั้นการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกลงบนแผ่นสแตนเลส จะต้องบางที่สุด เพื่อป้องกันการดูดกลืนหรือสกัดกั้นรังสีแอลฟาเข้าสู่หัววัดและการกระเจิงรังสี

ในการวิจัยนี้พบว่าความหนาของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมจากการผนึกโดยใช้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ ความหนาเท่ากับ 1.41 นาโนเมตร ซึ่งผนึกแผ่นฟิล์มได้บางที่สุด รองลงมา คือ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$ ความหนาเท่ากับ 3.27 นาโนเมตร และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4$ /H_2SO_4 H_2SO_4 ความหนาเท่ากับ 5.63 นาโนเมตร ตามลำดับ

3) ผลการศึกษาค่าร้อยละการผนึก

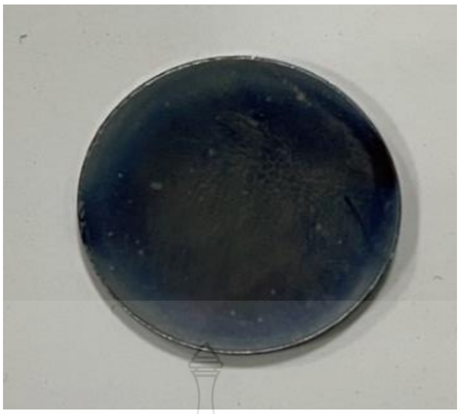
การตรวจสอบประสิทธิภาพการผนึกด้วยไฟฟ้า พิจารณาจากค่าร้อยละของการผนึก ผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละการผนึกสามารถเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ มีค่าเท่ากับ 93.5 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4$ /H_2SO_4 มีค่าเท่ากับ 68.5 และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$ มีค่าเท่ากับ 57.0 ตามลำดับ

4) ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสหลังการผนึก

คุณภาพของแผ่นสแตนเลสที่ได้รับหลังการผนึกมีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์สเปกตรัม หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีผลต่อการคำนวณค่าความแรงรังสีไอโซโทปทอเรียม ผลการวิจัยพบว่า แผ่นสแตนเลสที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ ในการผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียม เกิดแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมเป็น สีฟ้าเงาชัดเจน เรียบเนียนและบาง ตลอดทั่วทั้งแผ่น แสดงดังรูปที่ 4.5 นอกจากนี้หลังจากเก็บไว้นาน 3-6 เดือน และนำกลับมาวัดใหม่ ค่าพื้นที่ใต้พีค และรูปร่างของสเปกตรัม ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่ามีประสิทธิภาพการผนึกสูง สามารถผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมได้แน่น

ในขณะที่คุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4/HNO_3/H_2SO_4$ ในการผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียม พบว่าแผ่นโลหะ สแตนเลสที่ได้หลังการผนึก เกิดแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียม เป็นสีฟ้าอ่อนชัดเจน แต่พบมีช่องว่างเกิดขึ้นบ้าง รวมทั้งพบรอยสีดำเกาะติด ซึ่งเป็น Thorium dendrites ที่เกิดจากสารประกอบเกลือทอเรียมที่เกิดขึ้นในสารละลาย และไปจับบนขั้วลบหรือแผ่นสแตนเลส

ในส่วนของคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสที่ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$ ในการผนึกแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมพบช่องว่างเกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่บริเวณสีฟ้าเงาเกิดขึ้นน้อยกว่า และพบ Thorium dendrites เกาะติดบนแผ่นสแตนเลสเช่นกัน โดยเป็นรอยสีน้ำตาลหรือรอยสีดำ หรือทั้งสีน้ำตาลและดำเกาะติดรวมกัน สภาพที่มี Thorium dendrites เกาะติดบนแผ่นผนึก เป็นสาเหตุของค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส



รูปที่ 4.5 ผลการศึกษาคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสหลังการผนึก

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

รายการ	อิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$	อิเล็กโทรไลต์ $NaHSO_4$ /H_2SO_4	อิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2SO_4/H_2SO_4$
FWHM (keV)	22.5	35.5	40.5
ความหนาของแผ่นฟิล์ม (นาโนเมตร)	1.41	5.63	3.27
ค่าร้อยละการผนึก	93.5	68.5	57.0
คุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลส	- สีฟ้าใส เงามันวาว - ผนึกทั่วทั้งแผ่น - ไม่มีผงตะกอน - ฟิล์มบาง ผนึกอย่างสม่ำเสมอ	- สีฟ้าใสมันวาวและสีดำ - พบ Thorium dendrites เกาะบนผิวหน้า - มีช่องว่าง (ผลจากฟองก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วลบ)	- สีฟ้าใสมันวาวรวมกับสีเหลืองและสีน้ำตาล - พบ Thorium dendrites เกาะบนผิวหน้า - มีช่องว่าง (ผลจากฟองก๊าซเกิดขึ้นที่ขั้วลบ)

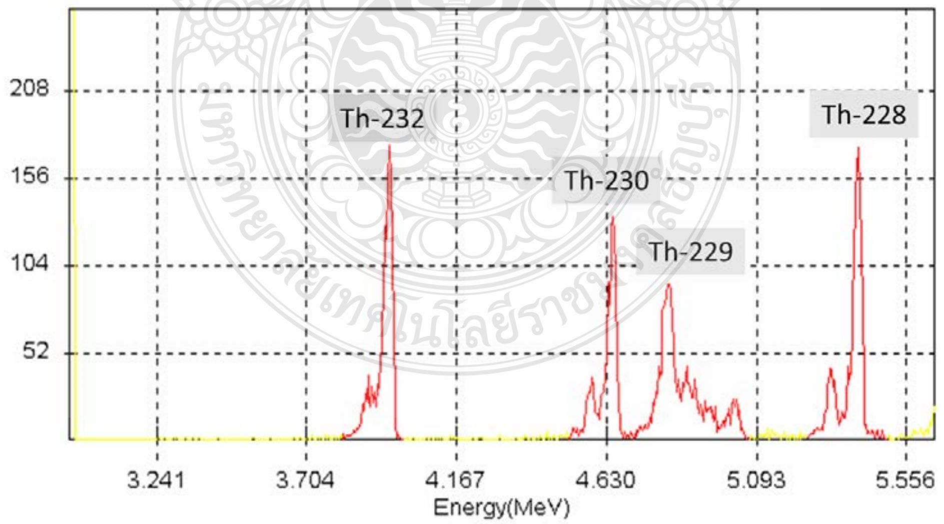
จากการพิจารณาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม ทำโดยเปรียบเทียบ ค่าความละเอียดในการแยกพีค ค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนโลหะสแตนเลส ค่าร้อยละการผนึก และคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสที่ได้รับหลังการผนึก ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมสำหรับผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์

4.2 ผลการทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

ผลการทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาความจำเพาะ

ผลการศึกษาความจำเพาะของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่า ทอเรียม-232 ทอเรียม-230 ทอเรียม-229 และทอเรียม-228 แสดงพีคที่พลังงาน 3.959 4.652 4.821 และ 5.411 MeV ตามลำดับ มีค่าความละเอียดของการแยกพีคเท่ากับ 21 23 25 และ 21 keV ตามลำดับ ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของไอโซโทปทอเรียม จากกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่

4.2.2 ผลการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด

1) ผลการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD)

ผลการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่า ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.16 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

2) ผลการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ)

ผลการศึกษาขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่า ค่าขีดจำกัดการตรวจวัดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.53 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม

4.2.3 ผลการศึกษาความแม่นยำ

ผลการศึกษาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ พิจารณาจากค่าร้อยละการได้กลับคืน โดยเติมสารรังสีทอเรียม-229 ความแรงรังสี 0.2 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ในสาร SRM IAEA 327 หลังจากนั้นนำค่าความแรงรังสีทอเรียมที่วัดได้ มาคำนวณค่าร้อยละการได้กลับคืน ผลการศึกษาดังตารางที่ 4.5

ผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละการได้กลับคืนของค่าความแรงรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 100 97 101 และ 101 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางนิวเคลียร์เคมี แสดงว่าวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความความแม่นยำ

ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่

ตัวอย่าง	ค่าความแรงรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)		% Recovery
	ก่อนเติม	หลังเติม	
ทอเรียม-228	38.20 ± 1.00	38.23 ± 0.31	100 ± 0.8
ทอเรียม-229	ND	0.19 ± 0.01	97± 2.9
ทอเรียม-230	34.10 ± 1.70	34.47 ± 0.31	101 ± 0.9
ทอเรียม-232	38.70 ± 1.50	39.27 ± 0.15	101 ± 0.4

ND = ตรวจไม่พบ

4.2.3 ผลการศึกษาความเที่ยงตรง

1) ผลการศึกษาการทำซ้ำ

ผลการศึกษาการทำซ้ำ พิจารณาจากค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากการวัดค่าความแรงรังสีทอเรียมในสาร SRM IAEA 327 จำนวน 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะเดียวกัน เกณฑ์การพิจารณาค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้อง $\leq$ 30 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.6

ผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 มีค่าเท่ากับ 0.71 7.70 0.61 และ 0.76 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางนิวเคลียร์เคมี แสดงว่าวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ มีความเที่ยงตรงเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะเดียวกัน

ตารางที่ 4.6 ผลการศึกษาความเที่ยงตรง โดยการทำซ้ำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่

ลำดับ	ค่าความแรงรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)			
	ทอเรียม-228	ทอเรียม-229	ทอเรียม-230	ทอเรียม-232
1	38.40	0.19	34.20	38.90
2	38.10	0.18	34.50	38.60
3	38.70	0.17	34.10	38.90
4	38.20	0.20	34.30	39.00
5	38.80	0.21	34.40	38.50
6	38.50	0.22	34.40	39.10
7	38.00	0.20	34.20	39.30
8	38.30	0.20	34.80	39.40
9	38.60	0.19	34.50	38.80
10	38.90	0.20	34.60	38.60
$\bar{x}$	38.45	0.20	34.40	38.91
SD	0.27	0.02	0.21	0.30
%CV	0.71	7.70	0.61	0.76

2) ผลการศึกษาการทวนซ้ำ

ผลการศึกษาการทวนซ้ำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ พิจารณาจากค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากการวัดค่าความแรงรังสีทอเรียมในสาร SRM IAEA 327 จำนวน 10 ซ้ำ ภายใต้สภาวะที่ต่างกัน เกณฑ์การพิจารณาค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ต้องมีค่า $\leq$ 30 ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.7

ผลการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 มีค่าเท่ากับ 1.34 12.45 1.01 และ 1.02 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางนิวเคลียร์เคมี แสดงว่า วิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ มีความเที่ยงตรงเมื่อทดสอบภายใต้สภาวะที่ต่างกัน

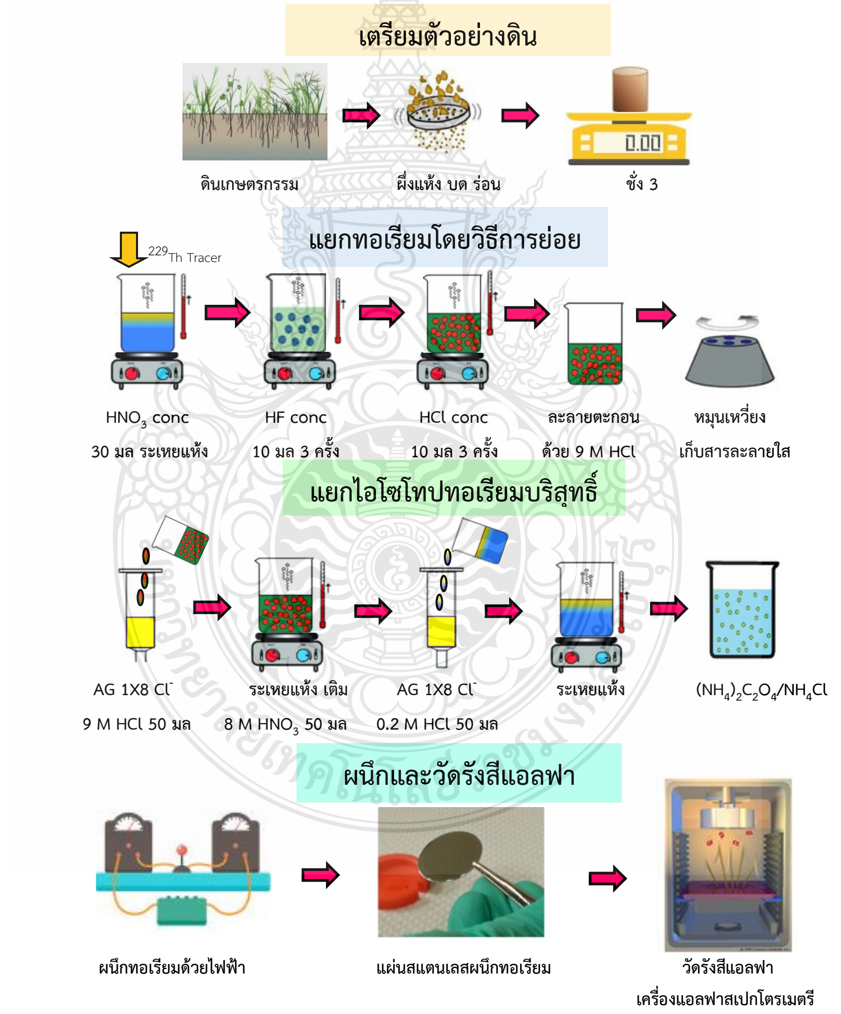
ตารางที่ 4.7 ผลการศึกษาความเที่ยงตรง โดยการทวนซ้ำของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่

ลำดับ	ค่าความแรงรังสี (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)			
	ทอเรียม-228	ทอเรียม-229	ทอเรียม-230	ทอเรียม-232
1	39.00	0.26	34.70	39.30
2	38.40	0.21	34.60	38.90
3	38.70	0.22	34.50	39.10
4	38.10	0.20	34.30	39.00
5	37.90	0.19	34.00	38.40
6	37.90	0.18	33.90	38.50
7	38.10	0.22	34.00	38.80
8	39.40	0.25	34.90	39.70
9	38.40	0.20	34.30	39.10
10	38.30	0.20	34.70	38.60
$\bar{x}$	38.42	0.21	34.39	38.94
SD	0.51	0.03	0.35	0.40
%CV	1.34	12.45	1.01	1.02

จากการศึกษาความเที่ยงตรงของวิธีวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่พัฒนาขึ้นใหม่ พบว่าค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากการศึกษาการทำซ้ำและการทวนซ้ำผ่านเกณฑ์มาตราฐานในทางนิวเคลียร์เคมีที่ยอมรับได้ จึงสรุปได้ว่าวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นใหม่มีความเที่ยง

4.3 สรุปกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่

กระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่

4.4 ผลการนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี

งานวิจัยส่วนที่สาม ได้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม โดยประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด และประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก ผลการประยุกต์ใช้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 ผลการประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด

การศึกษานี้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด ผลการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

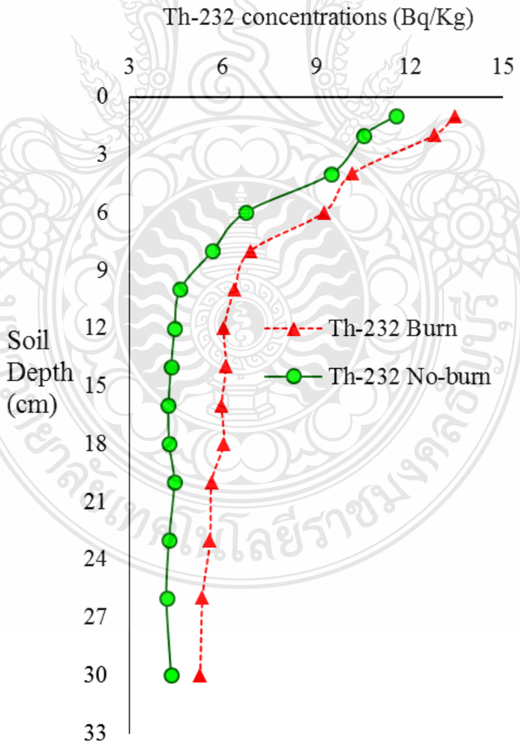
1) ผลการศึกษาปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดินนา

ทำการศึกษาปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ จะทำการศึกษาจากปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียม-232 เนื่องจากไอโซโทปทอเรียม-232 มีอยู่ในปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้ในเกษตรกรรม โดยนำตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ปริมาณของไอโซโทปทอเรียม-232 ด้วยวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นใหม่ วัดค่าความแรงรังสีด้วยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี คำนวณผลความแรงรังสี หน่วยเบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ประเมินความแตกต่างของไอโซโทปทอเรียมในดินแบบไถกลบและเผาตอซัง ใช้หลักการทางสถิติ One way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และ $p < 0.05$

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียม-232 ของพื้นที่ไถกลบและเผาตอซังมีแนวโน้มอย่างเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 กล่าวคือ ค่าลดลงตามความลึกของชั้นดินตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกษตรกรใส่ปุ๋ยฟอสเฟตด้วยวิธีโรยบนผิวหน้าดิน ปุ๋ยละลายน้ำและซึมลงชั้นดินทั้งแนวระนาบและแนวดิ่ง แต่ส่วนที่อยู่บริเวณหน้าดินมีการสะสมมากกว่าดินชั้นล่างเพราะต้นข้าวดูดซึมปุ๋ย (รวมกับไอโซโทปทอเรียม) บางส่วนจากดินชั้นล่างไปใช้ตามความยาวของรากและไอโซโทปทอเรียมเคลื่อนที่ได้ในระยะทางจำกัด

นอกจากนี้การวิจัยพบว่า ค่าไอโซโทปทอเรียมของพื้นที่ศึกษาทั้งสองแห่งระหว่างพื้นที่ไถกลบและเผาตอซังมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียม-232 ของพื้นที่ไถกลบมีค่าต่ำกว่าพื้นที่เผาตอซัง ที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่าดินของพื้นที่ไถกลบ มีความอุดมสมบูรณ์จากการย่อยสลายของอินทรีย์ คาร์บอนที่ได้จากซากพืชที่ไถกลบหมักในดิน เกษตรกรจึงใช้ปุ๋ยในปริมาณที่น้อยกว่าพื้นที่เผาตอซัง การตกค้างของไอโซโทปทอเรียมจากปุ๋ยเคมีจึงต่ำกว่า ดินที่เสื่อมสภาพเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้เกษตรกรจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยลงในดินเป็นประจำทุกปี ปริมาณของปุ๋ยที่มากเกินความต้องการของต้นข้าวเป็นส่วนที่ตกค้างในดิน

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาแบบเผาตอซัง (ดังรูปที่ 4.8 เส้นสีแดง) อยู่ในช่วง 5.255 ± 0.353 ถึง 13.438 ± 0.566 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม และปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาแบบไถกลบ (ดังรูปที่ 4.8 เส้นสีเขียว) อยู่ในช่วง 4.325 ± 0.341 ถึง 11.541 ± 0.562 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.8 โดยปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาที่มีการจัดการซากพืชทั้ง 2 แบบ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกอย่างมีนัยสำคัญ การตกค้างไอโซโทปทอเรียมในดินนาของพื้นที่ที่ศึกษาอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย



รูปที่ 4.8 ปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาที่มีการจัดการซากพืชทั้ง 2 แบบ ตามระดับความลึกในแนวดิ่ง

ตารางที่ 4.8 ผลการศึกษาปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ

สถานที่ศึกษา	^{232}Th (เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม)
นาที่มีการจัดการซากพืช แบบเผาตอซัง	5.255 ± 0.353 - 13.438 ± 0.566
นาที่มีการจัดการซากพืช แบบไถกลบ	4.325 ± 0.341 - 11.541 ± 0.562
ค่าเฉลี่ยทั่วโลก [48]	30

2) ผลการศึกษาปริมาณรังสีดูดกลืน

ทำการศึกษาปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ จะทำการศึกษาจากการนำค่าความแรงรังสีทอเรียม-232 มาคำนวณหาปริมาณรังสีดูดกลืน มีหน่วยเป็น นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังมีค่าอยู่ในช่วง 3.174 ถึง 8.117 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง และปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบไถกลบมีค่าอยู่ในช่วง 2.522 ถึง 6.971 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชทั้ง 2 แบบ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลกอย่างมีนัยสำคัญ ปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาของพื้นที่ศึกษาอยู่ในเกณฑ์ปลอดภัย

3) ผลการศึกษาปริมาณรังสียังผลรายปี

ปริมาณรังสียังผลรายปีเป็นปริมาณรังสีที่สามารถทำอันตรายต่อเนื้อเยื่ออวัยวะของมนุษย์ ทำการศึกษาปริมาณรังสียังผลรายปีของนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ ทำการศึกษาจากการนำรังสีดูดกลืนที่คำนวณได้ มาคำนวณหาปริมาณรังสียังผลรายปี

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณรังสียังผลรายปีของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังมีค่าอยู่ในช่วง 3.648 ถึง 9.954 ไมโครซีเวิร์ตต่อปี และปริมาณรังสียังผลรายปีของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบไถกลบมีค่าอยู่ในช่วง 3.093 ถึง 8.549 ไมโครซีเวิร์ตต่อปี ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.9 โดยปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชทั้ง 2 แบบ มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่อนุญาตให้รับได้ของปริมาณรังสียังผลเท่ากับ 1,000 ไมโครซีเวิร์ตต่อปี

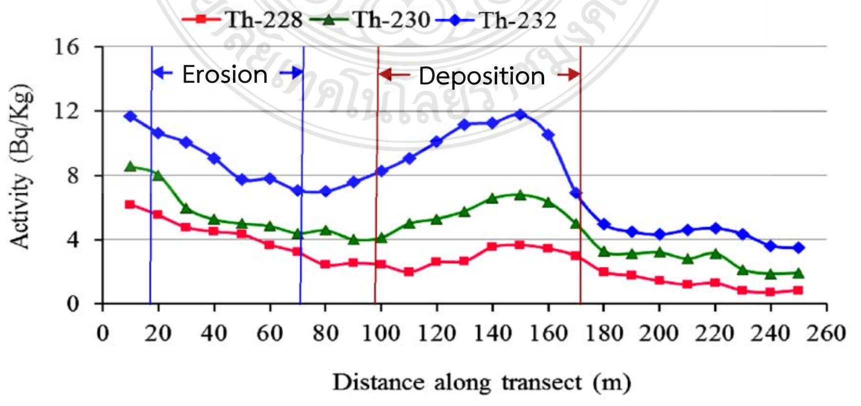
ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปี ของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณรังสีดูดกลืน (นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง)	เผาตอ	3.174	8.117	4.516
	ไถกลบ	2.522	6.971	3.578
ปริมาณรังสียังผลรายปี (ไมโครซีเวิร์ตต่อปี)	เผาตอ	3.648	9.954	5.538
	ไถกลบ	3.093	8.549	4.389

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดินนา ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปี จากพื้นที่ศึกษาอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก และอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย อย่างไรก็ตามการไถกลบซากพืชลงในพื้นที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดิน ลดการสะสมไอโซโทปทอเรียมที่เกิดจากปุ๋ยตกค้าง และลดค่าใช้จ่ายจากการใช้ปุ๋ย อีกทั้งช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และฝุ่นพิษที่เกิดจากการเผาตอซังลงได้

4.4.2 ผลการประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก

การศึกษานี้นำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 4.9 ค่าไอโซโทปทอเรียมทั้ง 3 ไอโซโทป ได้แก่ ทอเรียม-228 (ดังรูปที่ 4.9 เส้นสีชมพู) ทอเรียม-230 (ดังรูปที่ 4.9 เส้นสีเขียว) และทอเรียม-232 (ดังรูปที่ 4.9 เส้นสีน้ำเงิน)



รูปที่ 4.9 ผลการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก

จากการประเมินลักษณะการกร่อนและทับถมด้วยปริมาณไอโซโทปทอเรียม พบว่าตัวอย่างดินที่เก็บจากทั้งพื้นที่ศึกษานั้น ค่าไอโซโทปทอเรียมจะลดต่ำลงในช่วงลาดลงเชิงเขาที่ระยะทาง 60 เมตร และมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงระดับสูงสุดที่ระยะทาง 140 เมตร จากนั้นจะลดต่ำลงอีกที่ระยะทาง 180 เมตรเป็นต้นไป สามารถอธิบายได้ว่าค่าที่ลดต่ำลงนั้นแสดงว่าผิวหน้าดิน (ช่วงลึก 30 เซนติเมตร) มีการกร่อน ถูกชะล้างออกไปด้วยน้ำและลม ดินที่ถูกชะล้างจะไปสะสมในช่วงด้านล่างของแนวลาด ก่อนจะถูกชะล้างไปอีกครั้ง นอกจากนี้ผลการศึกษายังพบทอเรียมในดินที่เกิดธรรมชาติของดินในพื้นที่ร่วมกับทอเรียมที่ปะปนมากับปุ๋ยฟอสเฟตที่เกษตรกรเพิ่มลงในดินระหว่างเพาะปลูกข้าวโพด ค่าไอโซโทปทอเรียมทั้ง 3 ไอโซโทป มีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน คือเพิ่มขึ้นและลดลงในแนวเดียวกัน

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนากระบวนการวิเคราะห์หาไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรีเพื่อให้การแยกไอโซโทปทอเรียมในดินมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่หนึ่ง การพัฒนากระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีโดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี กระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ มีขั้นตอนการศึกษาดังต่อไปนี้ ขั้นตอนแรก การพัฒนาขั้นตอนการสกัดแยกทอเรียมออกจากตัวอย่างดินโดยวิธีการย่อยด้วยกรดแต่ละวิธี พบว่า การย่อยด้วยกรดแบบเรียงลำดับแต่ละชนิด โดยจะใส่กรดไนตริก กรดไฮโดรฟลูออริก และกรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างดิน และย่อยสลายโครงสร้างของอนุภาคดิน เพื่อให้ไอโซโทปทอเรียมละลายแยกตัวออกมาอยู่ในสารละลายกรดได้สมบูรณ์ที่สุด มีผลแสดงค่าร้อยละการได้กลับคืนสูงที่สุด และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ เมื่อพิจารณาค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ ขั้นตอนที่สอง คือ การพัฒนาขั้นตอนการแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ด้วยการใช้เรซินแต่ละชนิด พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบ AG 1-X8 Cl^- สามารถแยกไอโซโทปทอเรียมบริสุทธิ์ได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าร้อยละการได้กลับคืน ค่าร้อยละความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ และค่าร้อยละความผิดพลาดสัมพัทธ์สูงสุด และอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ขั้นตอนสุดท้าย คือ การพัฒนาขั้นตอนการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสด้วยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยทำการศึกษาสภาวะ และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลส พบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม คือ $(NH_4)_2C_2O_4/NH_4Cl$ โดยมีความละเอียดในการแยกพีค ค่า FWHM เท่ากับ 22.5 keV ค่าความหนา-บางของแผ่นฟิล์มไฮดรัสออกไซด์ของไอโซโทปทอเรียมที่ผนึกบนแผ่นสแตนเลส เท่ากับ 1.41 นาโนเมตร ค่าร้อยละการผนึก เท่ากับ 93.5 และคุณภาพทางกายภาพของแผ่นสแตนเลสที่ได้รับหลังการผนึก มีลักษณะ สีฟ้าใส เงามันวาว ผนึกทั่วทั้งแผ่น ไม่มีผงตะกอน ฟิล์มบาง ผนึกอย่างสม่ำเสมอ ทำการผนึกไอโซโทปทอเรียมด้วยกระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นสแตนเลสที่ค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2.0 โมลาร์ ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พีเอช 2.0 ใช้เวลาผนึกไอโซโทปทอเรียม 120 นาที ด้วยกระแสไฟฟ้า 1.2 แอมแปร์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผนึกไอโซโทปทอเรียมลงบนแผ่นสแตนเลส

ส่วนที่สอง การทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี ผลการทดสอบความใช้ได้ของกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ พบว่า เป็นกระบวนการวิเคราะห์ที่มีความจำเพาะ ทอเรียม-232 ทอเรียม-230 ทอเรียม-229 และทอเรียม-228 แสดงพีคที่พลังงาน 3.959 4.652 4.821 และ 5.411 MeV ตามลำดับ มีค่าความละเอียดของการแยกพีค คำนวณจากค่าความกว้างเต็มสูงสุดครึ่งหนึ่ง (Full Width at Half maximum (FWHM)) เท่ากับ 21 23 25 และ 21 keV ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ มีค่าขีดจำกัดการตรวจวัด (LOD) เท่ากับ 0.16 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม มีขีดจำกัดการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ที่สามารถนำมารายงานผลได้เท่ากับ 0.53 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม มีความแม่นยำ ค่าร้อยละการได้กลับคืนของค่าความแรงรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 มีค่าร้อยละการได้กลับคืนเท่ากับ 100 97 101 และ 101 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ทางนิวเคลียร์เคมี และมีความเที่ยงตรงโดยการทำซ้ำมีค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และ ทอเรียม-232 มีค่าเท่ากับ 0.71 7.70 0.61 และ 0.76 ตามลำดับ และการทวนซ้ำมีค่าร้อยละสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (%CV) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของรังสีทอเรียม-228 ทอเรียม-229 ทอเรียม-230 และทอเรียม-232 มีค่าเท่ากับ 1.34 12.45 1.01 และ 1.02 ตามลำดับ

และส่วนที่สาม การนำกระบวนการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโทรเมทรี โดยนำกระบวนการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสี โดยเครื่องวิเคราะห์แแอลฟาสเปกโทรเมทรีที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ไอโซโทปทอเรียมในดินบริเวณพื้นที่เกษตรกรรม โดยประยุกต์ใช้กับการศึกษาปริมาณการตกค้าง ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากไอโซโทปทอเรียมในพื้นที่ทำนา จังหวัดร้อยเอ็ด ทำการศึกษาดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังและไถกลบ พบว่า ปริมาณไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาแบบเผาตอซังอยู่ในช่วง 5.255 ± 0.353 ถึง 13.438 ± 0.566 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม และปริมาณ ไอโซโทปทอเรียมที่ตกค้างในดินนาแบบไถกลบอยู่ในช่วง 4.325 ± 0.341 ถึง 11.541 ± 0.562 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม ปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังมีค่าอยู่ในช่วง 3.174 ถึง 8.117 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง และปริมาณรังสีดูดกลืนของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบไถกลบมีค่าอยู่ในช่วง 2.522 ถึง 6.971 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง และปริมาณรังสียังผลรายปีของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบเผาตอซังมีค่าอยู่ในช่วง 3.648 ถึง 9.954 ไมโครซีเวิร์ตต่อปี และปริมาณรังสียังผลรายปีของดินนาที่มีการจัดการซากพืชแบบไถกลบมีค่าอยู่ในช่วง 3.093 ถึง 8.549

ไมโครซีเวิร์ตต่อปี ซึ่งปริมาณการตกค้างของไอโซโทปทอเรียมในดินนา ปริมาณรังสีดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลรายปีจากพื้นที่ศึกษา มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยทั่วโลก และอยู่ในเกณฑ์ความปลอดภัย และประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอุบัติการณ์การกร่อนดินในพื้นที่ลาดชันของไร่ข้าวโพด จังหวัดตาก โดยใช้ปริมาณไอโซโทปทอเรียมประเมินลักษณะการกร่อนและทับถม พบว่า ตัวอย่างดินที่เก็บจากทั้งพื้นที่ศึกษานั้น ค่าไอโซโทปทอเรียมจะลดต่ำลงในช่วงลาดลงเชิงเขาที่ระยะทาง 60 เมตร และมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงระดับสูงสุดที่ระยะทาง 140 เมตร จากนั้นจะลดต่ำลงอีกที่ระยะทาง 180 เมตร เป็นต้นไป สามารถอธิบายได้ว่าค่าที่ลดต่ำลงนั้นแสดงว่าผิวหน้าดิน (ช่วงลึก 30 เซนติเมตร) มีการกร่อนถูกชะล้างออกไปด้วยน้ำและลม ดินที่ถูกชะล้างจะไปสะสมในช่วงด้านล่างของแนวลาด ก่อนจะถูกชะล้างไปอีกครั้ง จากการนำวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย เห็นได้ว่าวิธีวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับตัวอย่างจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีวิเคราะห์กลุ่มไอโซโทปทอเรียมด้วยเทคนิคเชิงเคมีรังสีและเครื่องวิเคราะห์แอลฟาสเปกโตรเมทรีที่พัฒนาขึ้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพื้นที่เกษตรกรรมทำนา และทำไร่ ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้วิจัยการปนเปื้อนของกลุ่มไอโซโทปทอเรียมจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในดิน ท้องน้ำของแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

[1] A. Leiterer, P. Berard, and F. Menetrier, "Thorium and health: State of the art," *Rapport CEA-R-6251*, pp. 1-48, 2010.

[2] G. Jia, "Sequential separation and determination of uranium and thorium isotopes in soil samples with microthene-TOPO chromatographic column and alpha-spectrometry," *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, vol. 311, pp. 1007-1017, 2017.

[3] A.H. Yusoff, and C.A.R. Mohamed, "Mini review uranium-thorium decay series in the marine environment of the Southern South China Sea," *Journal of Geological Geophysics*, pp. 1-9, 2016.

[4] A.D. Bajoga, A.N. Al-Dabbous, A.S. Abdullahi, N.A. Alazemi, Y.D. Bachama, and S.O. Alaswad, "Evaluation of elemental concentrations of uranium, thorium and potassium in top soils from Kuwait," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51, pp. 1638-1649, 2019.

[5] S.K. Sahu, P.Y. Ajmal, R.C. Bhangare, M. Tiwari, and G.G. Pandit, "Natural radioactivity assessment of a phosphate fertilizer plant area," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 123-128, 2014.

[6] R.P. Chauhan, and A. Kumar, "Soil to plant transfer of alpha activity in potato plants: impact of phosphate fertilizers," *Journal of Environmental Health Science Engineering*, vol. 13, pp. 45-53, 2015.

[7] M. Nain, R. Chauhan, A. Kumar, and P. Chauhan, "Effect of fertilizers on soil to plant transfer of alpha radioactivity in potato plants using SSNTD technique," *Intellectuals Society for Socio-Techno Welfare Journal of Applied Physics*, vol. 5, pp. 88-91, 2013.

[8] B. Porntepkasemsan, W. Kulsawat, and P. Nochit, "Impact of phosphate fertilizers on the uranium and thorium of cultivated soils profiles, Kamphaeng Phet, Thailand." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1144 (1), 2018.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[9] M.S. Alsaffar, M.S. Jaafar, N.A.A. Kabir, and A. Nisar, "Impact of fertilizers on the uptake of ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{40}K by pot grown rice plants," *Pollution*, vol. 2, pp. 1-10, 2016.

[10] Food and Agriculture Organization of the United Nations.(2017), "The future of food and agriculture – Trends and challenges," Available: http://www.fao.org/3/a-i6583e .pdf.

[11] N.K. Fageria, A. Moreira, and A.M. Coelho, "Yield and yield component of upland rice as influenced by nitrogen sources," *Journal of Plant Nutrition*, vol. 34, pp. 361-370, 2011.

[12] European Commission.(2018), "Commission Implementing Regulation (EU) 2018/1584 of 22 October 2018 amending Regulation (EC) No 889/2008 laying down detailed rules for the implementation of Council Regulation (EC) No 834/2007 on organic production and labelling of organic products with regard to organic production, labelling and control," Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2018.264.01.0001.01.ENG

[13] W. Kulsawat, B. Porntepkasemsan, and N. Kaewchuay, "Optimum conditions for electroplating of thorium in soil for alpha spectrometric determination," *2019 - The 7th Burapha University International Conference on Interdisciplinary Research*, pp. 543-548, 2019.

[14] C. Canbazoglu, and M. Dogru, "A preliminary study on ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations in vegetables and fruits frequently consumed by inhabitants of Elazig Region, Turkey," *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, vol. 295, pp. 1245-1249, 2013.

[15] M.S. Choi, X.J. Lin, S.A. Lee, W. Kim, H.D. Kang, and S.H. Doh, "Daily intakes of naturally occurring radioisotopes in typical Korean foods," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 99, pp. 1319-1323, 2008.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[16] Q.T. Tran, S. Pierre, J. de Sanoit, M. Pomorski, and P. Bergonzo, “Electro-Precipitation of actinides on boron-doped diamond thin films for solid sources preparation for high-resolution alpha-particle spectrometry,” *Applied Sciences*, vol. 9, pp. 1473-1484, 2019.

[17] World Nuclear Association.(2020), “Thorium,” Available: http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html.

[18] B. Baeyens, M.M. Fernandes “Chapter 5 Adsorption of heavy metals including radionuclides In Edited by R. Schoonheydt, C.T. Johnston, F. Bergaya,” *Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals*, Vol 9, pp. 125-172, 2018.

[19] K. Szymariska, D. Strumiriska-Parulska, and J. Falandysz, “Uranium (^{234}U, ^{238}U) and thorium (^{230}Th, ^{232}Th) in mushrooms of genus Leccinum and Leccinellum and the potential effective ionizing radiation dose assessment for human,” *Chemosphere*, vol. 18, pp. 250, 2020.

[20] E.K. Hyde, “The radiochemistry of thorium,” *The National Academies of Science National Research*, pp. 1-76, 1960.

[21] A.W. Nelson, E.S. Eitrheim, A.W. Knight, D. May, M.A. Mehrhoff, R. Shannon, R. Litman, W. C. Burnett, T.Z. Forbes, and M.K. Schultz, “Understanding the radioactive ingrowth and decay of naturally occurring radioactive materials in the environment: An analysis of produced fluids from the marcellus shale,” *Environmental Health Perspectives*, vol. 123(7), pp. 689-696, 2015.

[22] N. Becker, D. Liebermann, H. Wesch, and G. Vankaick, "Mortality among Thorotrast-exposed patients and an unexposed comparison group in the German Thorotrast study," *European Journal of Cancer*, vol. 44(9), pp. 1259–1268, 2008.

[23] C. Papastefanou, S. Stoulos, A. Ioannidou, and M. Manolopoulou, “The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 89(2), pp. 188-198, 2006.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[24] A. Bramki, M. Ramdhane, and F. Benrachi, “Natural radioelement concentrations in fertilizers and the soil of the Mila region of Algeria*,” Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 11(1), pp. 49-55, 2018.

[25] G. Cinellia, T. Tollefsena, P. Bossewb, V. Gruberc, K. Bogucarskisa, L. De Felicea, and M. De Corta, “Digital version of the European Atlas of natural radiation,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 196, pp. 240–252, 2019.

[26] A.D. Bajoga, A.N. Al-Dabbous, A.S. Abdullahi, N.A. Alazemi, Y.D. Bachama, and S.O. Alaswad, “Evaluation of elemental concentrations of uranium, thorium and potassium in top soils from Kuwait,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 51(6), pp. 1638-1649, 2019.

[27] N.F. Salih, Z.A. Hussein, and S.Z. Sedeeq, “Environmental radioactivity levels in agricultural soil and wheat grains collected from wheat-farming lands of Koya district, Kurdistan region-Iraq,” *Radiation Protection and Environment*, vol. 42(4), pp. 128-137, 2019.

[28] R. Elsaman, G.A.M. Ali, M.A.M. Uosif, A. El-Taher, and K.F. Chong, “Transfer factor of natural radionuclides from clay loam soil to sesame and cowpea: Radiological hazards,” *International Journal of Radiation Research*, vol. 18(1), pp. 157-166, 2020.

[29] A. Kumar, P. Sharma, M. Ali, B.N. Pandey, K. Mishra, and P. Kaushala, “Decorporation and therapeutic efficacy of liposomal-DTPA against thorium-induced toxicity in the Wistar rat,” *International Journal of Radiation Biology*, vol. 88(3), pp. 223-229, 2012.

[30] A. Kumar, P. Sharma, M. Ali, B.N. Pandey, K. Mishra, and P. Kaushala, “Thorium-induced neuro-behavioral and neurochemical alterations in Swiss mice.” *International Journal of Radiation Biology*, vol. 85(4), pp. 338-347, 2012.

[31] M. Tufail, “Natural radioactivity intake into wheat grown on fertilized farms in two districts of Pakistan,” *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 123(1), pp. 103-112, 2007.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[32] D. Kochhann, M.A. Pavanato, S.F. Llesuy, L.M. Correa, R. Konzen V.L. Loro, M.F. Mesko, E.M. Flores, V.L. Dressler, and B. Baldisserotto, “Bioaccumulation and oxidative stress parameters in silver catfish (*Rhamdia quelen*) exposed to different thorium concentrations,” *Chemosphere*, vol. 77(3), pp. 384-391, 2009.

[33] R.S. Sathyapria, D.D. Rao, and R.K. Prabhath, “Choosing an appropriate method for measurement of ^{232}Th in environmental samples” *Radiation Protection and Environment*, vol. 40(2), pp. 90-94, 2019.

[34] B. Füeg, T. Tschachtli, and U. Krähenbühl, “Alpha liquid-scintillation spectrometry used for the measurement of uranium/thorium-disequilibria in soil samples,” *Radiochimica Acta*, vol. 78, pp. 47-51, 1997.

[35] R.T. Lowson, and S.A. Short, “Analysis for the radionuclides of the natural uranium and thorium decay chains with special reference to uranium mine tailings,” *Australian Atomic Energy Commission Research Establishment*, 1986.

[36] S.K. Aggarwal, “Alpha-particle spectrometry for the determination of alpha emitting isotopes in nuclear, environmental and biological samples: Past, present and future” *Analytical Method*, vol. 8, pp. 5353-5371, 2016.

[37] United States Environmental Protection Agency, “Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludge, and soils” *Environmental Sampling and Analytical Methods (ESAM) Program*, 1996.

[38] IntechOpen.(2020), “New Trends in Chemical Analysis of Disinfection By-Products,” Available: https://www.intechopen.com/chapters/62656.

[39] V. Jobbágy, R.V. Ammel, and M. Marouli, “Preparation of high resolution ^{238}U α-sources by electrodeposition from aqueous solution,” *European Commission JRC Scientific and Policy Reports, Report for EMRP MetroFission project*, pp. 20, 2012.

[40] G. Jia, G.Torri, R.Ocone, A.Di Lullo, A.De Angelis, and R.Boschetto, “Determination of thorium isotopes in mineral and environmental water and soil samples by α-spectrometry and the fate of thorium in water,” *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 66 (10), pp. 1478-1487, 2008

บรรณานุกรม (ต่อ)

[41] R. Calin, M.A. Saizu, I. Radulescu, and A.E. Druker, “Experimental Characterization of a Multi-Chamber Alpha Spectrometry System Using Standard Actinide Sources,” *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, vol. 705, pp. 13–16, 2013.

[42] Radiochemistry Society .(2020), “Actinide Oxidation States,” Available: https://www.radiochemistry.org/periodictable/la_series/A7.html.

[43] F. Stanley, A. M. Stalcup, and H. B. Spitz, “A Brief Introduction to Analytical Methods in Nuclear Forensics,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 295(2), pp. 1-10, 2012.

[44] K. L. Ang, D. Li, and A. N. Nikoloski, “The effectiveness of ion exchange resins in separating uranium and thorium from rare earth elements in acidic aqueous sulfate media. Part 1. Anionic and cationic resins,” *Hydrometallurgy*, vol. 174, pp. 147-155, 2017.

[45] B.A. Walther, and J.L. Moore, “The concepts of bias, precision and accuracy, and their use in testing the performance of species richness estimators, with a literature review of estimator performance,” *Ecography*, vol. 28, pp. 815-829, 2005.

[46] R. Bojanowski, Z. Radecki, M. J. Campbell, K. I. Burns, and A.Trinkl, “Reference sheet: Reference material IAEA-326 and IAEA-327 radionuclides in soil,” *IAEA – International Atomic Energy Agency*, 2001.

[47] G. Kansch, “Alpha-spectrometric analysis of environmental samples: Quantifying uncertainty in nuclear analytical measurements,” *International Atomic Energy Agency*, pp. 127–139, 2004.

[48] W. Kulsawat, and N. Kaewchuay, “Vertical distribution and radiological risks of Thorium-232 in burn and no-burn paddy soil,” *The 46th International Congress on Science, Technology and Technology-based Innovation*, pp. 585-591, 2020.

[49] W. Kulsawat, and N. Kaewchuay, “Potential application of Thorium isotopes in upland maize soils for assessment of soil erosion,” *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1719-1723, 2021.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[50] D. Bergin, and M. Bergin, “Guidelines for community-based monitoring of coastal dunes in the Bay of Plenty Region,” *Development of community-based monitoring methods for coastal dunes of the Bay of Plenty Region*, pp. 1-36, 2018.

[51] P. Martin, and G. Hancock, “Peak resolution and tailing in alpha-particle spectrometry for environmental samples,” *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 61(2-3), pp. 161-165, 2004.

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ภาคผนวก ก

การเผยแพร่ผลงาน

ตีพิมพ์ผลงานวิจัยลงวารสาร Journal of Physics: Conference Series, Vol 1719, (2021)
doi:10.1088/1742-6596/1719/1/012078

Journal of Physics: Conference Series

PAPER • OPEN ACCESS

Potential application of Thorium isotopes in upland maize soils for assessment of soil erosion

To cite this article: W Kulsawat and N Kaewchuay 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* **1719** 012078

View the article online for updates and enhancements.

IOP ebooks™
Bringing together innovative digital publishing with leading authors from the global scientific community.
Start exploring the collection–download the first chapter of every title for free.

This content was downloaded from IP address 103.125.82.11 on 12/05/2021 at 05:42

Potential application of Thorium isotopes in upland maize soils for assessment of soil erosion

W Kulsawat[1, 2] and N Kaewchuay[2 *]

[1]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization),
9/9 Moo 7, Ongkharak District, Nakhon-Nayok 26120, Thailand
[2] Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo1 Klong 6, Khlong Luang, Phathum Thani 12110

*E-mail: jnetnapit@gmail.com

Abstract. Soil core samples from upland maize field at Mae Ramah district, Tak province were analysed for thorium isotopes using the modified method. The measures Th-232, Th-230 and Th-228 revealed that the rock parent material is the dominant source at these sites while fertilizer is an important supplement. Migration behaviour of Thorium isotopes varying with seasonal and human activities during cultivation period such as ploughing, harrowing, and applying fertilizer resulted in different distribution of Thorium isotopes in soils. It was observed the descending and ascending of Th-232, Th-230 and Th-228 concentrations in maize soils along the 250 meters line transect sampling. The highest Th-232 found in the upland maize soils was 11.76 Bq/kg or 5344.56 Bq/m^2 while the lowest was 1.88 Bq/kg or 289.40 Bq/m^2. Erosion and deposition of topsoil in the site should be the most possible reason for the significantly lower thorium isotopes values and vice versa along downhill soils. These results demonstrated that Thorium isotopes could be applied as an ideal substitute of Cs-137 for soil erosion study in the future. Further study is to collect additional line transect sampling including increase with the distance.

1. Introduction

Soil is considered as a non-renewable resources. Time for soil forming processes is relatively long; however, degradation rate is rapid. Soil degradation is increasing worldwide and threatens sustainable land use. Major source of soil degradation mainly linked to water erosion which impacts on nutrient loss, siltation load, reservoir sedimentation, and groundwater pollution. Sediment delivery to streams and rivers can cause flooding and decreases soil fertility. Soil erosion induce socioeconomic problems, lower household incomes, food insecurity and poverty. The earth surface of 23% or approximately 5-10 million hectares has been affected by soil erosion each year [1]. The highest degraded land occurs in Asia due to rapid population growth, land-use changes, inadequate land-use planning and regulations to control soil erosion [2].

Erosion is a serious problem for productive agricultural land and for water quality concerns. Controlling the sediment must be an integral part of any soil management system to improve water and soil quality. Eroded topsoil can be transported by wind or water into streams and other waterways. Sediment is a product of land erosion and derives largely from sheet and rill erosion from upland areas, and to a lesser degree, from cyclic erosion activity in gullies and drainage ways [1-2].

The Northern region of Thailand is vulnerable to soil erosion due to its undulating topography, steep slopes, high rainfall and land use change from forests to agriculture or to urbanization Erosion of

Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 licence. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.
Published under licence by IOP Publishing Ltd

soils is a gradual process which passes mostly unseen especially on upland-cultivated sites but may be responsible for high sediment loss. Conservation method on soil erosion monitoring needs regular and long term period sampling to detect trends. Thus, the alternative methods for estimating soil erosion by using naturally radionuclides in the soil, sampling survey including geo-statistics have been proposed [3-4]. However, Thorium isotopes as a soil erosion tracer for assessing soil erosion rates is scarce in Thailand.

Thorium (Th) is abundant in the Earth's crust, being almost three times more abundant than uranium. Thorium is found in small amounts in most rocks and soils. Thorium occurs in several minerals, the most common being the rare earth–thorium–phosphate mineral, monazite, which contains up to 12% of thorium oxide. Granitile contains up to 80 mg/kg of Th. In the environment, thorium exists in various combinations with other minerals, such as silica. It is commonly accepted that most Thorium compounds found in the environment do not dissolve easily in water and do not evaporate from soil or water into the air. Thorium is a typical lithophilic element, and its geochemical behavior is very similar to that of rare earth elements. The geochemistry of Thorium is simplified by the existence of just one valence state, +4. Since Thorium is commonly found in phosphate rock, the raw material of phosphate fertilizer. Therefore, applications of phosphate fertilizer in the cultivated soil would eventually enhanced Thorium level in the soil [5-6].

The aim of this study is to apply nuclear technique to 75 upland maize soils in Mae Ramah district, Tak province with the purpose to use ^{228}Th, ^{230}Th and ^{232}Th as indicator for soil disturbance.

2. Method

2.1. Study area

The study area Mae Ramah district is situated in the Tak province (figure 1). The bedrock mostly consists of rocks range in age from Precambrian to Quaternary. The common lithologic associations of these rocks are mainly granitic to granodiorite para-gneisses, mica schist, hornblende schist or amphibolite, calc-silicate and marble of the Almandine Amphibolite Facies with frequent collaboration of orthogenesis, migmatite, pegmatite, aplite and granites [7-8].

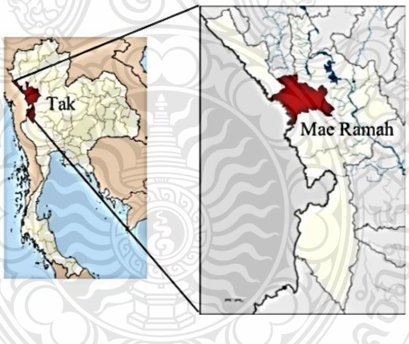


Figure 1. Location of the study area [8].

The geographical coordinates of Mae Ramah are 16.984 degree latitude, 98.517 deg longitude, and 195 meters elevation. The topography within 2 miles of Mae Ramah contains significant variations in elevation, with a maximum elevation change of 165 meters and an average elevation above sea level of 192 meters. Within 10 miles contains significant variations in elevation (945 meters). Total area of the Mae Ramah district is 1,476 km^2. Mountainous with evergreen and pine forest covers 80% of Mae Ramah district. Within 81 km contains large variations in elevation (~207 meters). The area within 3

km of Mae Ramah is covered by trees (100%), within 16 km by trees (85%), and within 81 km by trees (69%) and cropland (17%). Agriculture is a major part of the Tak economy. The province of Tak produces rice, corn, vegetables, fruit, beef, tilapia and other foods. Industries in Tak include granite quarrying and jewelry.

In Mae Ramah, the wet season is oppressive and overcast, the dry season is humid and partly cloudy, and it is hot year round. Over the course of the year, the temperature typically varies from 16°C to 36°C and is rarely below 12 °C or above 38 °C. Mae Ramah experiences extreme seasonal variation in monthly rainfall with average annual rainfall of 1540 mm. The Köppen-Geiger climate classification is Aw [8].

2.2. Sample collection and preparation

Three transects of 250 m length were established in the transition zone of fragment forest to maize agricultural land. Soil cores were taken at 25 sampling points separated by consecutive sampling intervals of 10 m along each transect from up-slope to down-slope. Each transect were 20 meters intervals.

The samples were taken by soil corer (Eijkelkamp, Netherland) at depth level of 0-30 cm during 2018-2019. All fresh soil samples were air-dried, crushed and sieved through a 125 micron mesh sieve, homogenized and stored in zip lock plastic bag for chemical analysis. In each sampling point, five grams of dried finely grounded soil sample was processed.

2.3. Thorium isotopes determination

Thorium determination in this study was based on the modified technique [9]. Briefly, thorium radionuclide analysis was performed using 3 g of dried homogenized soil sample together with 0.12 Bq ^{229}Th as internal isotopic tracer. The sample was digested with concentrated HNO_3. It was slowly heated on a hot-plate until the reaction started. The solution was evaporated to foaming to destroy the organic matter until the incipient dryness was obtained. Due to foaming, the reaction rate was controlled by cooling or lowering the temperature. The sample residue was subsequently digested with $HClO_4$ HF, and then HCl. The dry residue was finally dissolved in 9 M HCl and passed through ion-exchange resin. There are many kinds of ion-exchange resin. Most of them are typically organic polymers onto which functional groups are attached. 90% of the polymers are polystyrene matric. In this study, cation chloride form (AG 5 × 8, 200 mesh) exchange resin (Bio-Rad Lab) was used. Then, the thorium isotopes contained in the solution were electroplated onto a stainless steel disc and simultaneously measured by alpha-spectrometer. Measurements of thorium alpha particles emitted by the disc was performed with low background 450 mm^2 ion implant detector from ORTEC EG&G connected to an Octete Plus alpha spectrometer.

Quality assurance of analytical results was ensured by analysis of IAEA certified reference materials (IAEA-375 soil) with good results.

3. Results and discussion

As the maximum depth of cultivation at the site is 20 cm, it was initially considered that a sampling depth of 35 cm would be sufficient to include all the Thorium isotopes within a soil profile. This was found to be the case where the point inventory was less than the up-slope level, indicating that erosion had taken place. With this approach, it is possible to identify a clear pattern of erosion on the upper parts and deposition in the lower zones of all the sloping fields. Slope gradient is a very important factor affecting soil erosion intensity. In this study slope gradient was approximately 17%.

The measures ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th revealed that the rock parent material is the dominant source at these sites. It was observed that phosphate fertilizer were applied at the actual growth period of maize. Thus, trace of Thorium isotopes in phosphate fertilizer would be enhanced naturally Thorium levels the soil [5-6]. It was observed the descending and ascending of ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th concentrations in maize soils along the 250 metres line transect sampling (figure 2). The values of ^{232}Th associated with

the 75 sampling points indicated the highest ^{232}Th found in the upland maize soils was 11.76 Bq/kg or 5344.56 Bq/m^2 while the lowest was 1.88 Bq/kg or 289.40 Bq/m^2.

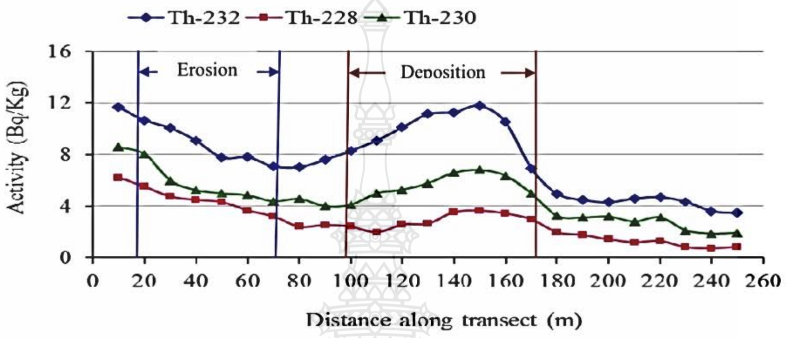


Figure 2. The distribution of ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th in the upland maize soil along the transect.

In this study case, the change from erosion to deposition occurred near the mid-point of the field. In the sloping area, the lower Thorium isotopes trace from soil surface at the upland area could be caused by slowly removal of the topsoil where the Thorium isotopes were normally accumulated in the flat or in the depression area, enhancing soil particles with Thorium isotopes trace. Area with lower values of Thorium isotopes; therefore, was an erosion site and the higher values was a deposition site.

Since radionuclide on earth surface is fixed particularly at fine size soil particles. In the higher annual rainfall, spreading by fine soil particles transport proceed faster [5]. The rainfall totals associated with the different erosive events in the study area ranged from a minimum of 5.4 mm to a maximum of 98.4 mm. with a mean of 32.7 mm. Previous studies have been revealed the probable impact of climate change on soil erosion. Below about 320 mm of rainfall, soil aggregate stability was uniformly low because of the influence of high levels of water soluble salts; above 320 mm aggregate stability varied according to the way in which temperature influenced organic matter dynamics.

Considering the slope and response unit scales and the relationships of climate to aggregate stability, the results showed that the important factor influencing aggregate stability was the degree of shading. Under vegetated or litter covered areas high values of aggregate stability were found. Just as at the humid sites at the landscape scale, favorable organic matter dynamics resulting from a large turnover of organic matter and production of soil stabilizing substances and roots, gave uniformly high levels of aggregate stability. Conversely, areas of soil not covered, had a uniformly low level of aggregate stability, sometimes as a result of dispersive conditions resulting from small amounts of water soluble salts. This is why the areas of low biological activity are the most vulnerable to erosion under intensive disturbance regimes. The more resilient areas are subject to the most disturbance. The relationship of climate to erosion will therefore depend on the effect of climate at different scales. Over a period of months or a few years erosion will be related to the actual amount of rainfall that occurs along transects and to the aggregation (erodibility) status of the soil. Over a period of 15–30 years it will be dependent on the stability and resilience of the soil and vegetation and the frequency and severity of disturbance (fire and grazing) in combination with the amount of erosive rainfall [10].

The study demonstrated the potential for using Thorium isotopes measurements to obtain information on soil erosion and soil redistribution within upland cultivated maize. Further study is to collect additional line transect sampling including increase with the distance.

4. Conclusion

Soil samples were collected from the upland farm cultivated with maize situated at Mae Ramah district, Tak province during 2018-2019. ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th technique for assessments of soil erosion has been applied in the upland maize soil. The soil at the sloping area contained less Thorium radioactivity than those of low-lying area due to the topsoil removal by rate of erosion process. The study demonstrated the potential for using Thorium isotopes measurements to obtain information on soil erosion and soil redistribution within upland cultivated maize. Further study is to collect additional line transect sampling including increase with the distance.

References

[1] Stavi I and Lal R 2015 *J. Arid Environ.* **112** 44
[2] Phuong T T, Thong C V T, Ngoc N B and Chuong H V 2014 *Resour. Environ.* **4(3)** 139
[3] Fulajtar E, Mabit L, Renschler C S and Yi A L Z 2017 *Use of ^{137}Cs for Soil Erosion Assessment* (Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations Food (FAO)) p 64
[4] Yin S, Zhu Z, Wang L, Liu B, Xie Y,Wang G and Li Y 2018 *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **22** 1695
[5] Shtangeeva I 2008 *Chapter 14 Uranium and Thorium Accumulation in Cultivated Plants in Trace Elements as Contaminants and Nutrients: Consequences in Ecosystems and Human Health* Ed M N V Prasad 2008 John Wiley & Sons, Inc. p 344
[6] Bramki A, Ramdhane M and Benrachi F 2018 *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* **11** 49
[7] Department of Mineral Resources 2020 *Geology of Thailand* Online: http://www.dmr.go.th/main.php?filename=GeoThai_En
[8] Wikipedia 2020 *Mae Ramat District* Online: https://th.wikipedia.org/wiki/Mae_Ramat/Tak
[9] Kulsawat W, Porntepkasemsan B and Kaewchuay N 2019 *Proc. Int. Conf. of the 7th Burapha University International Conference Chonburi Thailand* p 543
[10] Imeson A C and Lavee H 1998 *Geomorphology(Amst)* **23** 219

ตีพิมพ์ผลงานวิจัย National and International Research Conference (NIRC IV)7th January (2021) 678-687

Comparative Study of Three Purification Methods for Thorium Analysis in Soil Using Alpha Spectrometry

Wutthikrai Kulsawat[1] Netnapit Kaewchuay[2]
[1]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon-Nayok, Thailand
wutthikrai@tint.or.th
[2]Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Phathum Thani, Thailand
jnetnapit@gmail.com

Abstract

Thorium isotopes mainly of phosphate fertilizer origin were frequently reported on their contamination in agricultural soil, stream and river sediment, vegetables and water resources. Thorium accumulation in human body leads to health hazard due to alpha emission. Therefore, thorium isotopes content is essential for safety assurance. To obtain reliable and accurate results on thorium analysis, sample preparation is an important step. This presented study was to evaluate the efficiency of three purification methods using ion exchange technique. Three different ion exchange columns namely method A (AG1-X8, Cl^- form), method B (AG50W-X12, H+ form) and method C (the commercially pre-packed column) were applied after complete dissolution of the soil with mineral acids. Method A eluted thorium from resin column with 0.2 M hot hydrochloric acid while method B and C eluted with 0.05M oxalic acid. Purified thorium isotopes from each methods were electro- deposited on stainless steel discs and simultaneously measured ^{228}Th, ^{230}Th, ^{232}Th and ^{229}Th (tracer) by alpha spectrometry. Reproducibility and accuracy of the proposed methods were evaluated through replicated analysis of standard reference materials from the International Atomic Energy Agency. Method A revealed the most efficient purification method for thorium isotopes analysis in soil with radiochemical recovery ranging from 90-94% and the peak resolution (FWHM) was 25 keV.

Keywords : Thorium Isotopes, Soil, Purification Method, Ion Exchange Technique, Alpha Spectrometry

1. Introduction

Thorium is a radioactive element of the actinide series, discovered by Jons Berzelius in 1828. It is solid under normal conditions, atomic number 90, atomic weight 232.04, and chemical symbol Th. Thorium is a naturally occurring in the earth's crust and is present in all uranium ores. It is a major element found in monazite and it is present in significant amounts in the minerals

zircon, titanite, gadolinite and betafite. Thorite, uranothorite and thorianite are the minerals commonly found. The amount of thorium in earth's crust is about half as abundant as lead and is three times more abundant than uranium. Thorium exhibits an oxidation state of +4 in almost all of its compounds. The Th^{4+} ion forms many complex ions as an oxide (ThO_2), phosphate ($ThPO_4$), and silicate ($ThSiO_4$) and tend to have affinities with hydrocarbon complexes (Jia, 2017; Yusoff, 2016). Thorium properties are shown in Table 1

Table 1. Thorium element properties (Jia, 2017; Yusoff, 2016).

Thorium Element Properties	
Atomic number	90
Atomic weight	232.038
Melting point	about 1,700 °C (3,100 °F)
Boiling point	about 4,000 °C (7,200 °F)
Specific gravity	about 11.66 (17 °C)
Density	11.72 $g.cm^{-3}$ at 20°C
Oxidation state	+4
Electronic shell	$[Rn]6d^27s^2$

Thorium dioxide (ThO_2) has many industrial applications due to its refractory property. It is formerly added to glass during manufacture to increase the refractive index, producing thoriated glass for use in high-quality camera and telescope lenses. Thorium is also used to make ceramics, welding rods, fire brick, heat resistant paint and metals used in the aerospace industry, as well as in nuclear reactions. Thorium has the potential to be used as a fuel for generating nuclear energy. There is apparently more energy available from thorium than from both uranium and fossil fuels.

Thorium is found at trace levels in soil, rocks, water, plants and animals. It was reported that in Granite tile contains thorium up to 80 ppm while occurred at an average of 6 μg/g in natural soil (Jia, 2017; Yusoff, 2016). Previous studies reported that shale and phosphate rocks have relatively high thorium levels (Bajoga et al, 2019a; Bajoga et al, 2015b; Maxwell et al, 2013). The contaminations of thorium isotopes in agricultural soil were resulting from long term applications of phosphate fertilizer (Maxwell et al, 2013; Sahu et al, 2014; Chauhan & Kumar, 2015). The findings of previous studies revealed that the transfer of ^{232}Th from soil to rice grain and potato plants increased with increase in the amount of fertilizer and plantation time. Early fertilizer application to soil allows the plant to absorb more nutrients, as well as soluble radionuclides (Chauhan & Kumar, 2015; Nain et al, 2013; Alsaffar et al, 2016). ^{232}Th

concentrations in rice grains were increased as maximum by 16% (Nain et al, 2013). Thorium in soils can form soluble carbonate complexes and leach into groundwater as well as transfer to plants and farm animals. Naturally occurring thorium exists as ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th while synthetic isotope is ^{229}Th, all of which are radioactive. Thorium is therefore considered as one of the highly radiotoxic elements, due to its radioactivity as the daughter products decay of other α, β and γ ray. Inhaling thorium dust will remain in the lungs for a long period of time and will cause an increased risk of developing lung cancer. Thorium via digestion typically leaves the body through feces and urine within several days. The small amount of thorium left in the body will enter the bloodstream and be deposited in the bones where it will remain for many years and will resulting of bone cancer (Jia, 2017; Yusoff, 2016). The long term application of phosphate fertilizer is a potential source of enhanced thorium level in cultivated soil, and the resulting environmental impact should be considered carefully to ensure safety and compliance with environmental regulations (Shakhashiro et al, 2011; Bolivar et al, 2000). Therefore, the investigation of thorium isotopes in soil is imperative to achieve the data required for estimation of the hazards from ^{232}Th, ^{230}Th and ^{228}Th on agricultural soils.

There are different radiometric methods such as alpha and gamma spectrometry, neutron activation analysis (NAA) and liquid scintillation spectrometry, visible spectrophotometer, inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES), thermal ionization mass spectrometry and inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS). However, NAA, voltammetry, and spectrophotometric techniques are used to determine the total thorium content in the samples. Whereas gamma spectrometry is a suitable method for analysis when the daughter radionuclides are in equilibrium with the parent ^{232}Th. The technique of alpha spectrometry is used to detect alpha particles and to determine their energy. In this way the technique is able to provide simultaneously quantitative information (i.e. the activity) and qualitative information (the identity) on any radionuclide that emits an alpha particle. The advantage of Alpha spectrometry compare with the other instruments mentioned above is its sensitivity and selectivity. Alpha spectrometry is the reliable method for detecting ^{228}Th, ^{230}Th, and ^{232}Th simultaneously. Considerable studies indicated that alpha spectrometry was a well-established method that could precisely measure the thorium isotopes at trace levels down to activities of 0.3 mBq as in case of vegetation, soil, and biological samples that the other instruments could not detect. (Kulsawat et al, 2019; Canbazoglu & Dogru, 2013; Choi et al, 2008; Bolca et al, 2007).

Sample preparation is usually different for each type of sample matrix. As already known, soil is the most complex and difficult medium for thorium isotopes determination in environmental samples due to refractory thorium compounds. However, all sample preparations are designed to concentrated and purified or remove impurities from the sample and convert it into a suitable form for subsequent electrodeposition process prior to counting in an alpha

spectrometry (Jia 2017; Aggarwal 2016]. Several radiochemical analytical procedures have been developed based on extraction with liquid organic solvents, ion exchange column, and ready-to-use packed column. However, the liquid-liquid extraction method is time consuming, generate high amounts of toxic waste (organic solvent) and do not always allow for high chemical recovery yields. Whereas ion exchange column technique of both cation and anion exchanger have been the best choice for purification of thorium with reproducibility and reliability, high recovery yields, and low time demands, [Olivira & F.P. Carvalho].

2. Research objectives

This presented study was to develop radiochemical method on the purification process using ion exchange technique. Reproducibility and accuracy of the developed method was evaluated using two standard reference materials from the International Atomic Energy Agency (IAEA SRM-368 and IAEA SRM-375). This proposed developed method measured thorium isotopes of ^{228}Th, ^{230}Th, and ^{232}Th by alpha spectrometry.

3. Materials and Methods

3.1 Sample Digestion

For digestion process, the blank and the standard reference material of marine sediment (IAEA368) and soil (IAEA375) were digested in Teflon beaker with a sequential of mineral acids (HNO_3, $HClO_4$, HF, and HCL). The final solution was in a media of 9 M HCl.

3.2 Thorium Purification Method

The chromatography column is prepared as the followings:

1. Method A (AG1-X8, Cl^- form, 100-200 mesh)
2. Method B (AG50W-X12, H+ form, 100-200 mesh)
3. Method C (the commercially pre-packed column)

Each column was conditioned before introduction of the sample solution using distilled water and 9 M HCL. Load the sample solution on the conditioned anion exchange column with the adjustment of the flow rate (1 drop/6 seconds) under gravity flow. Eventually, strip thorium fraction from the column by passing 50 ml 9 M HCL solution through the column. The further purification for thorium fraction was carried out.

3.3 Thorium Elution Step

After the first purification, thorium in the 9M HCl was undertaken as the following

1. Method A: thorium solution in 9 M HCl was evaporated to dryness and eventually converted into NO_3^- form by dissolved with 8M HNO_3. Then the solution was passed through the anion exchange resin column. Subsequently, thorium was eluted in 100 ml 0.2 M HCL (hot) solution from the second column.

2. Method B and C: thorium in 9 M HCl was loaded into each method column and thorium from both methods was stripped from the second column by passing 100 ml 0.05 M oxalic acid.

The solution from all methods were evaporated slowly to dryness. After dryness, 20 ml 65% HNO_3 was added, then evaporated to dryness. Repeated this step twice and evaporated to dryness. After dryness, the source of thorium was prepared by electrodeposition method.

Electrodeposition of thorium was performed on the polished surface of stainless disc with a platinum wire as anode. The electrodeposition processes and cell design was proposed by Kulsawat et al. (2019) The electrodeposition was undertaken during 2 hr with electric current of 1000 to 1200 mA. Finally, it was counted by passivated implanted silicon detector with a surface area of 450 mm^2 attached to EG&G ORTEC (Octete Plus) alpha spectrometer.

4. Results and Discussion

This study developed a new method for purification of thorium isotopes using three comparative method; namely, method A, method B, and method C. The developed purification method using ion exchange technique which method A was AG1-X8, Cl^- form resin and then eluted with 0.2 M hot hydrochloric acid. Whereas method B was AG50W-X12, H+ form resin and method C was the commercially pre-packed column. Both method B and C were eluted with 0.05 M oxalic acid. Estimations of the elution peak maximum values for each method under conditions that achieved highly-pure fraction were determined by Alpha spectrometry at Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization). To evaluate the method, ^{229}Th tracer and the International Atomic Energy Agency (IAEA) standard reference materials were performed. These experiments were designed to determine the radiochemical recovery, purity, and alpha-spectral resolution that could be achieved using the method.

The IAEA standard reference materials (IAEA SRM-368 and IAEA SRM-375) were used for validated the developed method. Reproducibility was tested through five repeated analysis of the same homogeneous soil sample material. The soils were acid digested to allow leaching of thorium isotopes. The purification process of method A, method B, and method C were carried out comparatively. The obtained solution was electrodeposited on stainless steel disc and was measured using Alpha spectrometry. The performance of purification and electrodeposition steps is crucial to obtained alpha sources of good quality which usually a blue-like color taints the stainless steel surface and no dark color deposit is visible. Method A were gave a good quality of alpha source compare with method B and C. Counting time was adjusted to the activity in the sample discs to obtain a counting statistics better than 5% relative uncertainty.

The general methodology of thorium purification proposed in this work is based on the adsorption properties of thorium [Bednar et. al. 2004]. Prior to the comparative study of three ion

exchange resin types, samples of thorium solution (9M HCl) were primarily treated by loading into the first ion exchange column. In the first column of anion exchange resins (AG1-X8, Cl^- form), thorium was not adsorbed on the resins in a concentrated hydrochloric acid medium but impurities elements of uranium and its small amount of daughter products were adsorbed. The uranium was retained on the exchanger as a negative uranium chloride complex, while thorium, which did not form chloride complexes, passed through the column. Hence, thorium would remain in the eluent of 9 M HCl and ready to load into the second ion exchange column of method B and C. Except in method A, the loaded solution of thorium was converted to nitrate form using 8 M nitric acid. The exchange resin types of AG1-X8, Cl^- form (method A), AG50W-X12, H+ form (method B) and pre-packed column (method C) were reacted as follows:

1 In the second purify column containing AG1-X8, Cl^- form (method A), thorium was adsorbed and was easily eluted with hot 0.2 M HCl. The explanation is thorium isotopes were absorbed on the resins in HNO_3 medium but not adsorbed in HCl even at low concentration. On the contrary, the impurities elements were not absorbed on the resins in HNO_3 medium.

2 In the AG50W-X12, H+ form column (method B), the method began with the elution of uranium and most other matrix elements. Thorium was retained in this type of cation-exchange resin. Finally, thorium was eluted with 100 ml 0.05 M oxalic acid.

3 Method C (the commercially pre-packed column) the reaction was the same as method B. That was uranium and other impurities were eluted in 9 M HCl, following consecutive elution of thorium with 100 ml 0.05 M oxalic acid. It was worth to note that this ready to use packed column was discarded after used which generated waste materials that took a long time to completely break down.

Table 2 shows the results obtained by each method as well as the IAEA recommended concentration values. Reproducibility test indicated that results of method A were comparable to the IAEA values and shown the consistently high reproducibility (accuracy and precision) with good recovery yield and resolution. However, results obtained by method B and C revealed lower reproducibility (accuracy and precision), recovery yield and resolution than method A. Experiments demonstrated that losses for thorium with AG50W-X12, H+ form resin and commercially pre-packed column were higher than with AG1-X8, Cl^- form resin.

Table 2. Analytical results of IAEA standard reference materials revealed reproducibility (accuracy and precision), radiochemical yield, and spectral resolution.

Item	^{232}Th	^{230}Th	^{228}Th	% yield	Resolution (keV)
IAEA-368 (Marine sediment)	0.3	26.7	1		
Recommended Values Range	0.06 - 2.3	24.1 - 28	0 - 2		
Method A	0.3 ± 0.1	25.8 ± 0.3	1.3 ± 0.01	90 - 94	25
Method B	ND	31.3 ± 1.2	3.6 ± 0.2	53 - 60	31
Method C	1.9 ± 0.1	21.9 ± 1.5	2.4 ± 0.2	65 - 72	28
IAEA-375 (Soil)	21	20.5	ND		
Recommended Values Range	17 - 2.5	19.2 – 21.9	ND		
Method A	17.2 ± 0.2	20 ± 0.3	ND	90 - 94	25
Method B	18 ± 0.4	15 ± 2.1	2.8 ± 0.2	53 - 60	31
Method C	15 ± 0.4	23 ± 1.4	1.6 ± 0.2	65 - 72	28

The resulting spectrum shown natural thorium isotopes; ^{232}Th 3.9 MeV, ^{230}Th 4.6 MeV, ^{229}Th 5.4 MeV, and tracer ^{229}Th 4.8 (multiple peak) MeV with a resolution full width at half maximum (FWHM) of 25 keV (Figure 2).

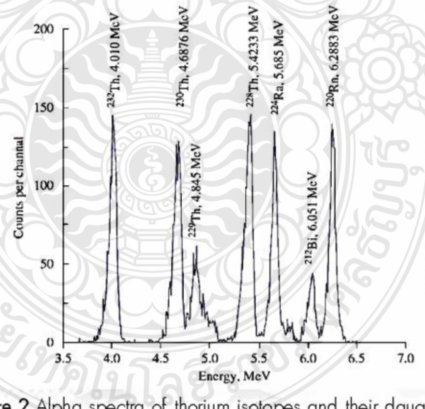


Figure 2 Alpha spectra of thorium isotopes and their daughters

The advantage of the developed purification process by using manipulated ion exchange column of AG1-X8, Cl^- form resin (method A) instead of using manipulated ion exchange column of AG50W-X12, H+ form resin (method B) or ready-to-use chromatography column (method C) were the relatively high performance with higher reproducibility, recovery yield and resolution, .less cost and generating a lower plastic column waste with the purchase of commercially pre-packed column.

5. Conclusion

Thorium in agricultural soils were found to be higher in case of phosphate fertilizers used compare with natural forest soils. This caused by the presence of thorium in the phosphate rock; raw materials used for the phosphate fertilizer production. Thorium will remain strongly sorbed to soil and its mobility will be very slow. Uptake of thorium can cause significant damage to internal organs which eventually develop cancer of the organs. Therefore, the present study has been regards as of importance to develop the purification method for thorium analysis in soil matrices with accuracy, reproducibility and high performance. The developed purification process was based on ion exchange technique. It found that the column packed with AG1-X8, Cl^- form resin and then eluted with 0.2 M hot hydrochloric acid revealed the most efficient purification method for thorium isotopes analysis in soil with radiochemical recovery ranging from 90-94% and a resolution full width at half maximum (FWHM) of 25 keV.

6. Recommendations

The purification method for thorium analysis in soil matrices by using ion exchange technique is clearly feasible. However, the proposed suggestions for further study are:

6.1 To extend the use of this method to fresh-water sediments

6.2 To try expanding the method to analyse uranium isotopes from the same sample as thorium isotopes are.

7. Acknowledgements

The authors are grateful for financial support from the National Research Council of Thailand. The authors would like to thank anonymous reviewers and the editorial staff of the NIRC2021 for assistance in the revision and production of this manuscript.

8. References

Aggarwal, S.K. (2016). *Alpha-particle spectrometry for the determination of alpha emitting isotopes in nuclear, environmental and biological samples: past, present and future.* Analytical Methods, 8(27), 5313-5342.

Alsaffar, M.S, Suhaimi Jaafar, M, Ahmad Kabir, N. A, & Nisar, A. (2016). *Impact of fertilizers on the uptake of ^{226}Ra, ^{232}Th, and ^{40}K by pot grown rice plants.* Pollution. 2(1), 1-10. Retrieved from https://doi: 10.7508/pj.2016.01.001

Bajoga, A.D, Al-Dabbous, A.N, Abdullahi, A.S, Alazemi, N.A, Bachama, Y.D, & Alaswad, S.O. (2019a). *Evaluation of elemental concentrations of uranium, thorium and potassium in top soils from Kuwait.* Nuclear Engineering and Technology. 51 (6), 1638-1649. Retrieved from https://doi.org/10.1016/ j.net. 2019.04.021

Bajoga, A.D, Alazemi, N, Regan, P.H, & Bradley, D.A. (2015b). *Radioactive investigation of NORM samples from Southern Kuwait soil using high-resolution gamma-ray spectroscopy.* Radiation Physics and Chemistry. 116, 305-311.

Bednar A. J., Gent D. B., Gilmore J. R., Sturgis T. C., Larson S. L (2004). *Mechanisms of thorium migration in a semiarid soil.* Journal of Environmental Quality. 33:2070–2077.

Bolca, M, Saç, M.M, Çokuysal, B, Karalı, T, & Ekdal, E. (2007). *Radioactivity in soils and various foodstuffs from the Gediz River Basin of Turkey.* Radiation Measurements. 42, 263-270.

Bolivar, J.P, Garcia-Tenorio, R, & Vaca, F. (2000). *Radio-ecological study of an estuarine system located in the south of Spain.* Water Research. 34, 2941-2950.

Canbazoglu, C. & Dogru, M. (2013). *A preliminary study on ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K and ^{137}Cs activity concentrations in vegetables and fruits frequently consumed by inhabitants of Elazig Region, Turkey.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 295, 1245-1249.

Chauhan, R.P. & Kumar, A. (2015). *Soil to plant transfer of alpha activity in potato plants: impact of phosphate fertilizers.* Journal of Environmental Health Science and Engineering. 13, 45-53. Retrieved from https://doi: 10.1186/ s40201-015-0200-4

Choi, M.S, Lin, X.J, Lee, S.A, Kim, W, Kang, H.D, & Doh, S.H. (2008). *Daily intakes of naturally occurring radioisotopes in typical Korean foods.* Journal of environmental radioactivity. 99, 1319-1323.

Jia, G. (2017). *Sequential separation and determination of uranium and thorium isotopes in soil samples with Microthene-TOPO chromatographic column and alpha-spectrometry.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 311, 1007-1017. Retrieved from https://doi:10.1007/s10967-016-4905-3

Kulsawat, W, Porntepkasemsan, B, & Kaewchuay, N. (2019). *Optimum conditions for electroplating of thorium in soil for alpha spectrometric determination*. Proceedings of the 7th Burapha University International Conference 2019, 27-29 Nov 2019, Chonburi, Thailand.

Maxwell, O, Wagiran, H, Ibrahim, N, Lee, S.K, & Sabri, S. (2013). *Comparison of activity concentration of ^{238}U, ^{232}Th and ^{40}K in different Layers of subsurface Structures in Dei-Dei and Kubwa, Abuja, northcentral Nigeria*. Radiation Physics and Chemistry. 91, 70-80.

Nain, M, Chauhan, R, Kumar, A, & Chauhan, P. (2013). *Effect of fertilizers on soil to plant transfer of alpha radioactivity in potato plants using SSNTD technique*. ISST Journal of Applied Physics. 5(2), 88-91.

Sahu, S.K, Ajmal, P.Y, Bhangare, R.C, Tiwari, M, & Pandit, G.G. (2014). *Natural radioactivity assessment of a phosphate fertilizer plant area*. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 7(1), 123-128. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.01.001

Shakhashiro, A, Sansone, U, Wershofen, H, Bollhofer, A, Kim, C.K, & Kim, C.S. (2011). *The new IAEA reference material: IAEA-434 technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM) in phosphogypsum*. Applied Radiation and Isotopes. 69, 231-236.

Olivira J.M. & Carvalho F.P. (2006) *Sequential extraction procedure for determination of uranium, thorium, radium, lead and polonium radionuclides by alpha spectrometryin environmental samples*, Czechoslovak Journal of Physics, 56, 545-555

Yusoff A.H. & Mohamed, C.A.R. (2016). *Mini review uranium-thorium decay series in the marine environment of the Southern South China Sea*. Journal of Geology and Geophysics. 5(3), 1-9. Retrieved from https://doi:10.4172/2381-8719.1000246.

ตีพิมพ์ผลงานวิจัย National and The 46th International conference STT46 (2020) 585-591

D_022_PF: VERTICAL DISTRIBUTION AND RADIOLOGICAL RISKS OF THORIUM-232 IN BURN AND NO-BURN PADDY SOIL

Wutthikrai Kulsawat[1] Netnapit Kaewchuay[2,*]

[1]Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization) 9/9 Moo7, Ongkharak, Nakhon-Nayok 26120 Thailand
[2] Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 39 Moo1 Klong 6, Khlong Luang, Phathum Thani 12110 Thailand
*e-mail: jnetnapit@gmail.com

Abstract:

The present study was to investigate the vertical distributions of ^{232}Th in paddy soils of rice straw in-situ burning and no burning in Chiang Khwan district, Roi-et province. Samples were randomly collected at depth levels from 0 to 30 cm. ^{232}Th was determined by using radiochemical analysis and alpha spectrometry. Risk assessment of the radiological hazard has also been estimated. Results of ^{232}Th activities in the straw burning plot ranged from 5.255 ± 0.353 to 13.438 ± 0.566 Bq.kg^{-1} and in no-burning plot from 4.325 ± 0.341 to 11.541 ± 0.562 Bq.kg^{-1}, respectively, which were within the reported world mean. The values of ^{232}Th dramatically decreased along the depth of soil profiles in both plots. The studied results revealed that the ^{232}Th concentrations in burn soils were higher than those in no-burn soils. It was suggested that levels of ^{232}Th concentrations in the soil were affected by the application rates of phosphate fertilizer. The range values of external air-absorbed dose rate and annual effective dose were 3.174 to 8.117 nGy.h^{-1} and 3.648 to 9.954 µSv, respectively, in the straw burning plot and 2.522 to 6.971 nGy.h^{-1} and 3.093 to 8.549 µSv, respectively, in no-burning plot. These values were far below the minimum recommended safety values of 1 mSv. Therefore, these areas were safe use as far as radiological health hazards of the living populations are concerned.

Introduction:

Rice *(Oryza sativa L.)* is the primary food staple for Thais with per capita consumption ranging from 80 kilograms (kg) for city households to around 155 kg for rural households. Thailand is not only one of the world's largest rice producers; it also remains the world's largest rice exporter. [1] Therefore, the sustainability of rice cropping systems is important to the food security and economy in Thailand. Changes in soil properties caused by cultivation and management and their consequences to soil productivity have generated significant concerns. Evidence indicates that the degradation of soil quality is a key factor for the observed declining yield [1, 2]. The challenge is to find a paddy field management system that is economically and environmentally sustainable. Burning rice straw and stubble is a common method used to facilitate soil preparation. This practice decreases soil organic carbon levels compared to soil in its natural condition which increases the risks of soil degradation. Removal of rice-straw from the field limits the return of soil N, P and K element in soils. Meanwhile, retaining rice straw on the surface (no burn management) is one possibility for improving soil quality and cutting the risks of soil degradation. However, straw burning practice is to prevent effect of plant pathogens or deleterious rhizosphere microorganisms and to destroy a specific rotation on pest species proliferation such as stem borers, stalk rot, and leaf blight which negatively affect plant growth and yield [2, 3].

Maintaining an adequate supply of nutrients for high rice yields on paddy soils is fertilizer applications. Chemical fertilizers are important in modern agriculture of both plant bio-mass retention and in situ burning practices. Rice is highly variable in its response to fertilizer application, depending on soil type. The best use of fertilizer for particular soil types at the appropriate rates are formulated from local knowledge and experience and from the results of fertilizer trials conducted by the farmers. However, farmers want to ensure good crop yield by using more than the recommended rates, and apply so much such that it has a residual effect on both the soil and the crop. Fertilizers that are not taken up by plants during the growing season would accumulate in the soil. This is what is referred to as fertilizer residues and it is the effects of such residues on soil and human health as a consequence. [4, 5]

Phosphate rocks, raw material of phosphate fertilizer are source of ^{232}Th decay products. It has been reported that an annual crop rarely takes up more than about 25% of the phosphate applied to it as fertilizer. Thus, the long-continued application of phosphate fertilizers can redistribute and elevate thorium in soil profiles and consequently its external exposure to the outdoor occupation [6-9]. Thorium is considered as one of the highly radiotoxic elements, due to its radioactivity as the daughter products decay of other alpha (α), beta (β), and gamma (γ) ray. The external radiological implication of this radionuclide is due to the γ ray exposure of the body. [8-10]

Therefore, the aim of the study was to evaluate if the vertical distribution and health hazards of ^{232}Th are affected by rice management systems with burn and no burn postharvest. This study was focused on determining the activity concentrations of ^{232}Th in soil samples collected from two plots of paddy field locates in Chiang-Khwan district, Roi-et province and to assess the air-absorbed dose rate and annual effective dose. The ^{232}Th activity concentrations in studied soil samples were determined by using the developed radiochemical analysis method.

Methodology:

A. Study Area

The study area (Figure 1) is situated in Thung Kula sub district, Chiang-Khwan district, Roi-et province (16^0 5' 49.2" N, 103^0 42' 39.6" E), Thailand and covers 12,720 ha. Roi-et soils are derived from washed deposits of sand stone and occur on the lower parts of pen plains. The elevation ranges from 100 to 200 m above sea level. This area has a tropical monsoon climate (Köppen 'Aw'). The average annual precipitation in 2019 was 1,225 mm, and the mean annual air temperature ranged from 26 to 28 °C [11].

Figure 1

Location of the study area

The major soil type in Roi-Et Province is Ultisol with more than 60% sand content; low soil organic content SOC, ranging from 0.40% to 1.29%; and medium acid surface soil of pH 5.0–6.0. In general, the soils are deep, and are characterized by different colors ;however, the dominant colors are a grayish-brown or light browns and loam A horizon overlying a light brown grading to pinkish-gray sandy clay loam or loam kandic B horizon, which, in turn, overlies a light gray or whitish clay loam or clay C horizon. The soils are mottled throughout the profile, with strong brown or yellowish brown or dark brown and some yellowish red or red mottles being common in the subsoil. The reaction is medium acidic over strong to very strongly acidic [12].

B. Soil Sampling and Preparation

^{232}Th in paddy soils of different rice straw management practices with burn and no burn postharvest was analyzed. The study was conducted in two plots area each of 1.0 hectare. The soil samples were collected from both plots at depth level of 0-30 cm using soil corer (Eijkelkamp, Netherland) from different sampling stations covering each plot of the paddy fields. Each sampling plot was considered as being overlaid by a 20 x 20 m grid, subdivided in 24 cells of 4 x 4 m. Twenty soil cores of 50 cm^2 x 30 cm were sampled in 20 cells selected by a random process. The soil cores were sliced 2-3 cm interval and transported back to the laboratory.

In the laboratory, samples were air-dried as well as ground in a mixer mill (Mixer Mill mm200, Retsh) and sieved through a 125 micron mesh sieve and stored in sealed plastic bag prior to analysis.

C. Radiochemical Analysis

The radiochemical analysis was based on the developed method. Briefly, five grams of dried finely grounded soil sample of each soil depth was processed. Sample was acid digested on hot plate with HNO_3 to near dryness. The residue was treated with $HClO_4$ to remove any remaining organics. Residue was further digested with 3 times HF to near dryness and digested repeatedly with 3 times concentrated HCl. Thorium-232 present in the sample was purified by ion exchange using AG1-X8, 100-200 mesh, Chloride form resin. ^{232}Th was eluted with 50 cm^3 of warm 0.2 M HCl, collected into 50 cm^3 beaker and evaporated to dryness.

The dry residue was dissolved in 0.1 M HNO_3, saturated ammonium oxalate and $(NH_4)_2SO_4$ buffer with pH 2. The solution was transferred to an electrodeposition cell containing a platinum electrode. ^{232}Th was electrodeposited on a stainless steel disc (dia. 1.8 cm^2) for 2 h at 0.95 A. At 1 min prior to the end of this stage, 1 cm^3 of concentrated ammonia solution was added to the cell before switching off the current. The cell was disassembled and the disc was then rinsed and allowed to dry. The electrodeposited uranium was measured using implant ultra-pure silicon detector (450 mm^2 active area ORTEC EG&G) equipped with high resolution alpha spectrometry (ORTEC Model Octete Plus).

The accuracy and precision of the radiochemical method were evaluated using IAEA reference material.

D. Calculation of Air-Absorbed Dose Rate

The absorbed dose rate indicates the received dose outdoors and to assess any radiological hazard and radiation emitted by radionuclides in the soil and other environmental resources. Determination of this rate is the main step for evaluating health risk, and this parameter is expressed in gray. D (nGy.h^{-1}) in air was determined at 1 m above the ground surface to ensure uniform distribution of radionuclides which was calculated according to Eq.1 [13]

$$D\ (\text{nGyh}^{-1}) = 0.604\ A_{Th} \quad (1)$$

where A_{Th} is the activity concentrations of ^{232}Th in Becquerel per kilogram (Bq.kg^{-1}).

E. Calculation of Annual Effective Dose

The annual effective dose (AED) in the paddy soil samples was express in Sievert and calculated from Eq. (2) [13]

$$\text{AED}\ (\mu\text{Sv y}^{-1}) = D\ (\text{nGy.h}^{-1}) \times 8760\ (\text{h.y}^{-1}) \times 0.7 \times (10^{3}\ \text{mSv}/10^{-9}) \times 0.25\ (\text{nGy}^{-1})$$

$$= D \times 1.2264 \quad (2)$$

where *D* (nGh⁻¹) is the total air absorbed dose rate in the outdoors; 8760 h is the number of hours in one year; 0.20 is the outdoor occupancy factor or Thai people spent ~20% or 5 hours per day of their time outdoors; 0.7 Sv.Gy⁻¹ is the conversion coefficient from absorbed dose in air to effective dose received by adults.

Results and Discussion:

A. ^{232}Th concentraions in the soil

The results for the activity concentrations of natural radionuclides ^{232}Th in paddy soil samples of different rice residues practices are reported. The ± values are because of the 1σ variation due to counting errors. The activity concentrations of ^{232}Th in straw burning site ranged from 5.255 ± 0.353 to 13.438 ± 0.566 Bq.kg^{-1}, and in straw amendment site or no-burn site ranged from 4.325 ± 0.341 to 11.541 ± 0.562 Bq.kg^{-1}. Results of ^{232}Th in this study were lower when compared with worldwide average values. In addition, these values are less than 370 Bq.kg^{-1} which are acceptable for soil safe use [13]. Therefore, these areas were safe use as far as radiological health hazards of the living populations are concerned.

It was revealed that the concentrations of ^{232}Th in both plots were decreased dramatically from surface soil down the soil profile to the bottom depth of 30 cm (Figure 2). The most plausible reasons are the right amount of phosphate fertilizers were applied to the soils and crops have significant effects on ^{232}Th uptake from soil. The observations in this study are agreed with the distribution pattern in Algeria, Qatar and Kuwait [8, 14, 15].

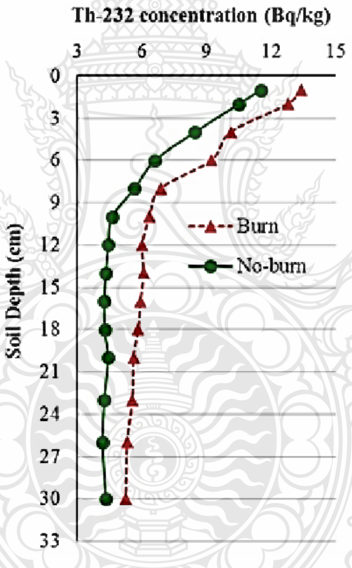


Figure 2

Relationship between ^{232}Th concentrations and soil depth

The obtained results for ^{232}Th have higher values of activity concentrations in burning plot than no-burn, these may be due to the more presence phosphate fertilizer residue in the soil resulting from the higher application rates. The content of natural radionuclides ^{232}Th in the soils depend on many factors: the type and mechanical composition of soil, capacity of absorption, acidity, concentration of exchange forms of carbonates, quantity of phosphate fertilizers application and soil organic substances [2-3]. Although this study met all the basic principles of experimentation: repetition and randomization; areas under rice were homogeneous; with the same soil type; cultivar of rice; the same weather conditions; including the same amount of fertilizers and pesticides. It was revealed that the straw burning site has been usually applied for the higher amount of phosphate fertilizer than in the sampling year. As in the studied year, fertilizer application rate was based on the amount used for the no burn site. Burning rice straw residues resulted in a higher extractable phosphate content in the surface 0-2.5 cm soil layer. Unlike removal or burning, incorporation of straw has been found to increase soil organic matter and available soil N, P and K contents. [3] Therefore, burning site might need excess quantity of phosphate fertilizer resulting in ^{232}Th residue in the soil.

B. Air-Absorbed Dose Rate

The air-absorbed dose rates in air at a height of about 1 m above the ground level due to terrestrial gamma radiation was calculated from the concentration of ^{232}Th. Compared to the average worldwide and the previous reports values, absorbed dose rate in this study was much lower as shown in Table 1.

Table 1

Comparison of ^{232}Th activity and absorbed dose rates of this study with other countries

Country	^{232}Th (Bq.kg^{-1})	D^{*} (nGy.h^{-1})
Algeria [8]	27	16
Nigeria [9]	30	18
Jordan [16]	18	11
Spain [17]	41	25
Kuwait [15]	5 – 21	7.7
Japan [13]	2 - 88	1.2 - 53
China [13]	1 - 360	0.6 - 217
India [18]	35 - 125	21 - 76
Malaysia [19]	83	50
Egypt (farm soil) [20]	12	7
Worldwide average [13]	30	18
Present study	7	5

Note: The values of D^{*} (nGy.h^{-1}) were calculated from ^{232}Th activity only.

C. Annual Effective Dose

The studied results for average annual effective dose are less than the world wide average value. The AED calculated from the air-absorbed dose rate of ^{232}Th in straw burning and straw retention soil samples.

The concentrations of ^{232}Th, absorbed dose rate and AED from this study are summarized in Table 2.

Table 2

Range and mean value of ^{232}Th activity (in $Bq.kg^{-1}$), absorbed dose rates *D* ($nGy.h^{-1}$) and annual effective dose, AED (μSv) in soil samples of burn and no-burn paddy soil.

	Sample	Maximum	Minimum	Mean
^{232}Th ($Bq.kg^{-1}$)	Burn	13.438 ± 0.566	5.255 ± 0.353	7.477
	No-burn	11.541 ± 0.562	4.325 ± 0.341	5.925
D ($nGy.h^{-1}$)	Burn	8.117	3.174	4.516
	No-burn	6.971	2.522	3.578
AED (μSv)	Burn	9.954	3.648	5.538
	No-burn	8.549	3.093	4.389

Conclusion:

- The measured activity concentrations of ^{232}Th in both study sites; burn and no-burn were lower when compared with the world average values.
- The higher values of ^{232}Th in soil samples of straw burning site may be due to the more presence of phosphate fertilizer residue in the area.
- The ^{232}Th levels revealed the distribution on vertical profile as dramatically decreased along the depth in both plots.
- It is noteworthy that even use of the phosphate fertilizer in the study sites, the ^{232}Th in agricultural soil did not exceed the levels that reported in the world mean.
- The overall outdoor terrestrial gamma dose rate in the straw burning plot and no-burning plot ranged from 3.174 to 8.117 $nGy.h^{-1}$ and 2.522 to 6.971 $nGy.h^{-1}$, respectively. While the corresponding outdoor annual effective dose in the straw burning plot and no-burning plot were 3.648 to 9.954 μSv and 3.093 to 8.549 μSv, respectively. These values were comparatively lower than the worldwide average and the safety values of 1 mSv. [13]
- Therefore, these areas were safe use as far as radiological health hazards of the living populations are concerned.
- At the present, there were no causes for environmental alarm concerning the ^{232}Th contents detected in the soils studied in this work.
- This study established a baseline information on levels and paddy soil distribution of ^{232}Th in the environment of Chiang Khwan district, Roi-et province. The results of the study serve as a reference for future assessment.
- The application of organic fertilizers, including green manure, farmyard manure, crop residues or straws, and compost manure, is also an effective measure of improving soil fertility and maintaining land productivity. However, at the present status of maintaining soil quality at a desirable level is a very complicated and difficult task. The combined application of organic and inorganic fertilizers, have been proposed to overcome these problems. However, extensive investigation and research on potential adverse effects, long term impacts, and farmer acceptance are still needed.

Acknowledgements:

This research was financially supported by the National Research Council of Thailand. The authors extend further appreciation to Mrs. Prachit Chompooviset for her generously sharing her experiences and allowing access to her land. The anonymous reviewers are thanked for their insightful contributions.

References:

1. *Thailand Grain and Feed Annual 2019. GAIN Report Number: TH9031. USDA Foreign and Agricultural Service. 17 pages*
2. Hunke P, Roller R, Zeilhofer P, Schroder B, Mueller EN. Geoderma Reg. 2015:4: 31-43.
3. Rossi CQ, Pereira MG, Loss A, Gazolla PR, Perin A, Dos Anjos LHC. Agr Ecosyst Environ. 2013: 170: 36-44.
4. Jin Z, Shah T, Zhang L, Liu H, Peng S, Nie L. Food Energy Secur. 2020: 9 (2) : 1-13 https ://doi.org/10.1002/fes3.200
5. Timsina J, Connor DJ. Field Crops Res. 2001: 69:93-132.
6. Sahu SK, Ajmal PY, Bhangare RC, Tiwari M, Pandit GG. J Radiat Res Appl Sc 2014:7: 123-128.
7. Chauhan RP and Kumar A. J Environ Health Sci Eng. 2015: 13: 45-53.
8. Bramki A, Ramdhane M, Benrachi F. J. Radiat Res App Sci. 2018: 11: 49-55.
9. Aghalagha Eo, Avwirib GO, Chad-Umorehb YE. J Envir Radioact 2012: 109: 64-70.
10. Leiterer A, Berard P, Menetrier F. 2010: Rapport CEA-R-6251, 1-48.
11. Wikipedia 2020. Roi-Et: Information on: https://en.wikipedia.org/wiki/Roi_Et_Province.
12. LDD (Land Development Department). Characterization of Established Soil Series in the Northeast Region of Thailand Reclassified According to Soil Taxonomy 2003; Land Development Department, Ministry of Agriculture and Cooperatives: Bangkok, Thailand.
13. United Nations Scientific Comm11ittee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UNSCEAR 2000 Report Vol.1 United Nations Sales Publication, United Nations, USA.
14. Ahmad AY, Al-Ghouti MA, Al-Sadig I, Abu-Dieyeh M. Sci Rep. 2019: 9:12196 - 12210 https://doi.org/10.1038/s41598-019-48500
15. Bajoga AD, Al-Dabbous AN, Abadullahi AS, Alazemi NA, Bachama YD, Nucl Eng Technol. 2019:51:1638-1649
16. Saleh H, Abu Shayeb M. Annal Nuc Eng. 2014:65: 184-189.
17. Quindos LS, Fernandez PL, Soto J, Rodenas C, Gomez O. Health Physics 2014: 7: 29-39.
18. Singha S, Rania A, Mahajan RK. Radiat Meas 39: 2005: 431–439.
19. Alzubaidi G, Hamid FBS, Abdul-Rahman I. Sci World J. 2016: 1-9 ID 6178103 http://dx.doi.org/10.1155/2016/6178103
20. Ahmed N, El-Arabi A. J. Envir Radioact. 2005: 84: 51-64.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วุฒิไกร กุลสวัสดิ์
วัน เดือน ปีเกิด	8 เมษายน 2525
ที่อยู่	12/1 หมู่ 3 ตำบลทรายมูล อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
เบอร์โทรศัพท์	0614242565
อีเมล์	wkunsawat@yahoo.com

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี