



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์

ภาควิชา

เรื่อง การตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม ด้วยตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

Quantitative Measurement of Specific Activities of ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in Rock Phosphate, Phosphate Fertilizer and Phosphogypsum Sample with a High Purity Germanium Gamma Ray Detector

نامผู้วิจัย นายสิทธิพงษ์ พลธรรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อู๋ดร ยังช่วย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กาญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต
ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม ด้วยตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

Quantitative Measurement of Specific Activities of ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in Rock Phosphate,
Phosphate Fertilizer and Phosphogypsum Sample with a High
Purity Germanium Gamma Ray Detector

โดย

นายสิทธิพงษ์ พลธรรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สิทธิพงษ์ พลธรรม 2554: การตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม ด้วยตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์, D.Eng. 106 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีเริ่มต้น ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม ซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยใช้ตัวตรวจหารังสีแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี และได้ทำการคำนวณค่ากัมมันตภาพสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย, ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา, ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี เพื่อประเมินอันตรายจากรังสีของวัสดุดังกล่าว ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ของตัวอย่างหินฟอสเฟตมีค่าอยู่ในช่วง 12.30 ± 1.81 ถึง 138.35 ± 1.96 Bq/kg, 284.09 ± 3.77 ถึง $3,511.07 \pm 11.64$ Bq/kg และ 426.46 ± 16.10 ถึง 474.43 ± 18.74 Bq/kg ตามลำดับ, ปุ๋ยฟอสเฟตมีค่าอยู่ในช่วง 4.64 ± 0.72 ถึง 38.01 ± 1.81 Bq/kg, 16.25 ± 1.47 ถึง $2,085.85 \pm 9.58$ Bq/kg และ 373.36 ± 11.67 ถึง 635.81 ± 14.98 Bq/kg ตามลำดับ, ฟอสฟอริปซัม PG1 มีค่าเท่ากับ 15.93 ± 1.53 Bq/kg, $1,686.43 \pm 9.01$ Bq/kg และ 499.99 ± 16.32 Bq/kg ตามลำดับ, ฟอสฟอริปซัม PG2 มีค่าเท่ากับ 10.96 ± 1.35 Bq/kg, $1,354.45 \pm 7.99$ Bq/kg และ 483.60 ± 15.92 Bq/kg ตามลำดับ ยิ่งกว่านั้นค่ากัมมันตภาพสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย, ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา, ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี ในตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1 มีค่าสูงสุด เท่ากับ 3,563.42 Bq/kg, 9.63, 23.83, 1,533.40 nGy/h และ 1.88 mSv/y ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าค่าเกณฑ์ความปลอดภัยที่กำหนดโดย UNSCEAR

Sittipong Polthum 2011: Quantitative Measurement of Specific Activities of ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in Rock Phosphate, Phosphate Fertilizer and Phosphogypsum Sample with a High Purity Germanium Gamma Ray Detector. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Teerasak Veerapasong, D.Eng. 106 pages.

This research aims to measure specific activities of primordial radionuclides, i.e., ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in the rock phosphate, phosphate fertilizer and phosphogypsum samples imported from abroad by using a high – purity germanium (HPGe) detector and a gamma spectrometry analysis system. The radium equivalent activities (Ra_{eq}), external hazard index (H_{ex}), gamma hazard index (I_{γ}), adsorbed dose rate (D) and annual effective dose (E) were also calculated. The results showed that the specific activities of the three radionuclides ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in rock phosphate samples range from 12.30 ± 1.81 to 138.35 ± 1.96 Bq/kg, 284.09 ± 3.77 to $3,511.07 \pm 11.64$ Bq/kg and 426.46 ± 16.10 to 474.43 ± 18.74 Bq/kg, respectively. In phosphate fertilizer samples range from 4.64 ± 0.72 to 38.01 ± 1.81 Bq/kg, 16.25 ± 1.47 to $2,085.85 \pm 9.58$ Bq/kg and 373.36 ± 11.67 to 635.81 ± 14.98 Bq/kg, respectively. In the phosphogypsum PG1 sample was found to be 15.93 ± 1.53 Bq/kg, $1,686.43 \pm 9.01$ Bq/kg and 499.99 ± 16.32 Bq/kg, respectively. In the phosphogypsum PG2 sample was found to be 10.96 ± 1.35 Bq/kg, $1,354.45 \pm 7.99$ Bq/kg and 483.60 ± 15.92 Bq/kg, respectively. Moreover, the rock phosphate RP1 had the maximum values of Ra_{eq} , H_{ex} , I_{γ} , D and E as 3,563.42 Bq/kg, 9.63, 23.83, 1,533.40 nGy/h and 1.88 mSv/y, respectively, which those values were greater than the safety limit set by UNSCEAR.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และ ดร.อุคร ยังช่วย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำตลอดจน
การแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดทั้งจากการค้นคว้าและการทดลองรวมถึงการแก้ไขความถูกต้องของ
วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณวุฒิเดช ธรฤทธิ์ และ คุณนพพร ยิ้มแฉล้ม เจ้าหน้าที่สถาบัน
เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ให้ความช่วยเหลือในการทดลองรวมถึงการให้
คำปรึกษาและแนะนำการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ทั้งจากการค้นคว้าและการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณเจริญ ทะนันไธสง เจ้าหน้าที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
(องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องอบ และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่ๆ เพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ
ชี้แนะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สิทธิพงษ์ พลธรรม
กุมภาพันธ์ 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	10
การตรวจเอกสาร	11
อุปกรณ์และวิธีการ	42
อุปกรณ์	42
วิธีการ	51
ผลและวิจารณ์	59
ผล	59
วิจารณ์	78
สรุปและเสนอแนะ	87
สรุป	87
ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	92
ภาคผนวก	95
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก	12
2	แสดงการสลายตัวและพลังงานรังสีแกมมาของนิวไคลด์ ในอนุกรมยูเรเนียม	16
3	แสดงค่าความเข้มข้นยูเรเนียมเฉลี่ยในหินชนิดต่างๆ	17
4	แสดงการสลายตัวและพลังงานรังสีแกมมาของนิวไคลด์ ในอนุกรมทอเรียม	19
5	แสดงค่าระดับความปลอดภัยของความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม ในวัสดุก่อสร้าง	31
6	แสดงค่าพลังงานรังสีแกมมาที่ใช้ในการสอบเทียบพลังงาน และนิวไคลด์สารกัมมันตรังสี	56
7	แสดงจำนวนนับรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในสารมาตรฐาน IAEA Soil-375	61
8	แสดงค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของตัวตรวจหารังสีแกมมา ที่พลังงานต่าง ๆ	63
9	แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของ ^{232}Th โดยพิจารณานิวไคลด์ กัมมันตรังสีของ ^{208}Tl ที่พลังงาน 583.14 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	68
10	แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของ ^{238}U โดยพิจารณานิวไคลด์ กัมมันตรังสีของ ^{214}Bi ที่พลังงาน 609.32 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของ ^{40}K โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่พลังงาน 1460.75 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	70
12	แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{232}Th โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{208}Tl ที่พลังงาน 583.14 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	72
13	แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{238}U โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{214}Bi ที่พลังงาน 609.32 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	74
14	แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{40}K โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่พลังงาน 1460.75 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	75
15	แสดงผลการคำนวณหาค่า LLD (Lower Limit of Detection) และค่า MDC (Minimum Detectable Concentration) เฉลี่ยของการวัดสำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	76
16	แสดงค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}), ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{Ext}), ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (I_γ), ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (E) ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต	78
18	แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟตจากการทดลองกับ ข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ	80
19	แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต	81
20	แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม	83
21	แสดงแสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม จากการทดลองกับ ข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ	85
ตารางผนวกที่		
1	แสดงปริมาณค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th และในหินฟอสเฟต จากหลายๆ ประเทศ	99
2	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติใน ปุ๋ยฟอสเฟต (pCi/g)	100
3	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติใน ฟอสฟอริปซัม	101
4	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ในหินฟอสเฟต	102
5	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ในปุ๋ยฟอสเฟต (Bq/kg) (UNSCEAR, 1982)	103

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
6	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติ ในวัสดุก่อสร้าง(UNSCEAR. 1982)	104
7	แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติใน วัตถุดิบ, ผลิตภัณฑ์ และกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมแร่	105

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงรูปร่างลักษณะของแร่อะพาไทต์	5
2	กระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี	7
3	กระบวนการผลิตปุ๋ยและกรดฟอสฟอริก	9
4	แผนผังอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม	15
5	แผนผังอนุกรมการสลายตัวของทอเรียม	18
6	แผนผังการสลายตัวของโพแทสเซียม – 40	20
7	แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิด สภาวะสมดุลแบบเซคูลาร์	27
8	แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิด สภาวะสมดุลแบบทรานเซียนด์	28
9	แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่สมดุลทางรังสี	29
10	แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยาหลักที่เกิดจากรังสีแกมมา	36
11	แสดงการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก	37
12	แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาโฟตอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน	38
13	แสดงการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน	39
14	แสดงการเกิดปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน	40
15	แสดงรูปตัวตรวจหารังสีแกมมาเจอร์มานีเยมบริสุทธิ์สูงที่ใช้ในการวัด	44
16	แสดงโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี Gamma Version V32	45
17	เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multi Chanel Analyzer ; MCA)	45
18	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด	46
19	แสดง Liquid Nitrogen Dewar	46
20	แสดงอุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding)	47
21	แสดงคู่มือสารตัวอย่าง	48
22	ยี่ห้อ Sartorius Model LC1201S	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แสดงภาชนะบรรจุสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง	52
24	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ขณะปฏิบัติงาน	54
25	แสดงผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ห้กัมมันตรังสีแกมมา	55
26	แสดงกราฟการสอบเทียบพลังงาน	57
27	แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพ ของตัวตรวจหารังสีแกมมาเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง	59
28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา กับพลังงานต่างๆ	62
29	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ประเทศโมร็อกโก	63
30	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP2 ประเทศโมร็อกโก	64
31	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP3 ประเทศแอลจีเรีย	64
32	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมโมเนียม ฟอสเฟต MAP1 ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน	65
33	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดทรีปเปิ้ล ซูเปอร์ฟอสเฟต TSP1 ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน	65
34	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดทรีปเปิ้ล ซูเปอร์ฟอสเฟต TSP2 ประเทศอิสราเอล	66
35	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิด ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต DAP1 ประเทศสหรัฐอเมริกา	66
36	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดไดแอมโมเนียม ฟอสเฟต DAP2 ประเทศสหรัฐอเมริกา	67
37	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากฟอสฟอริปซัม PG1 ประเทศแอลจีเรีย	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากฟอสฟอริปซัม PG2 ประเทศโมร็อกโก	68
39	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต กับข้อมูลจาก UNSCEAR 1977, 1982	79
40	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสี ธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต กับข้อมูลจาก UNSCEAR 1977, 1982	82
41	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม กับข้อมูลจาก UNSCEAR 1977, 1982 และ 2000	84

การตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K

ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัมด้วย

ตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

Quantitative Measurement of Specific Activities of ^{232}Th , ^{238}U and ^{40}K in Rock Phosphate, Phosphate Fertilizer and Phosphogypsum Samples with a High Purity Germanium Gamma Ray Detector

คำนำ

ธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ (Naturally Occurring Radioactive Materials, NORM) เป็นสารกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นพร้อมกับการเกิดโลกและปะปนอยู่ในส่วนประกอบของเปลือกโลก ดังนั้นในสิ่งแวดล้อมจึงมีธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ปะปนอยู่ทั่วไป ไม่ว่าจะเป็น ดิน หิน น้ำ อากาศ พืช สัตว์ ในอาคารบ้านเรือนที่ก่อสร้างจากวัสดุธรรมชาติ หรือแม้แต่ในตัวมนุษย์เอง ในสินแร่ หรือวัตถุดิบบางชนิดที่ถูกสกัดจากเปลือกโลกมาใช้ในการอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี จะมีธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติปะปนอยู่ในปริมาณที่สูง เพราะธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติบางตัว มีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนหรือคล้ายกับธาตุที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบนั้นๆ อุตสาหกรรมปุ๋ยเคมีเหล่านี้ จะใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ยังผลให้ในผลิตภัณฑ์ปุ๋ยเคมี และผลิตภัณฑ์พลอยได้โดยเฉพาะในฟอสเฟตยิปซัมที่ได้จากกระบวนการผลิตจะมีความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติสูงขึ้นจากระดับเดิมที่มีอยู่ในวัตถุดิบเริ่มแรก ธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่ถูกทำให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเนื่องด้วยเทคนิคหรือกระบวนการใดๆทางอุตสาหกรรม หรือจากกิจกรรมของมนุษย์ จะถูกเรียกว่า Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials หรือ TENORM ซึ่งอุตสาหกรรมปุ๋ยฟอสเฟต ก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ทำให้ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติเพิ่มสูงขึ้น อุตสาหกรรมปุ๋ยดังกล่าวนี้จะใช้หินฟอสเฟตมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต และจะผลิตภัณฑ์พลอยได้ของเสียที่เรียกว่า ฟอสฟอริปซัม ออกมาด้วย

ได้มีงานวิจัยที่ทำการตรวจหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในวัตถุดิบหินฟอสเฟต, ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยเคมี และผลิตภัณฑ์พลอยได้ฟอสฟอริปซัมในต่างประเทศ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Saueia *et al.* (2004) ทำการวิจัยเรื่องกัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในหินฟอสเฟต ฟอสฟอริปซัม และปุ๋ยฟอสเฟตในบราซิล งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจหาความเข้มข้นมวลกัมมันตภาพรังสีแกมมาในตัวอย่าง หินฟอสเฟต ฟอสฟอริปซัม และปุ๋ยฟอสเฟต โดยใช้ตัวตรวจหารังสีแกมมาเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) นอกจากนี้ ยังมีการคำนวณค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Radium Equivalent Activity: Ra_{eq}) อีกด้วย จากการวิจัยพบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟตพบว่ามีปริมาณกัมมันตภาพรังสีของยูเรเนียมและทอเรียม มีค่าอยู่ในช่วง $19 - 1,414 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $56 - 310 \text{ Bq kg}^{-1}$ ในส่วนของปุ๋ยฟอสเฟต พบว่า ปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (Monoammonium Phosphate ; MAP), ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium Phosphate ; DAP) และทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (Triple Superphosphate ; TSP) จะมีค่าเท่ากับ 283 Bq kg^{-1} , 374 Bq kg^{-1} และ 221 Bq kg^{-1} ตามลำดับ สำหรับยูเรเนียม, 250 Bq kg^{-1} , 120 Bq kg^{-1} และ 538 Bq kg^{-1} ตามลำดับ สำหรับทอเรียม ในส่วนของฟอสฟอริปซัม พบว่ามีปริมาณกัมมันตภาพรังสีของยูเรเนียมและทอเรียม มีค่าอยู่ในช่วง $2 - 1,135 \text{ Bq kg}^{-1}$ และ $19 - 273 \text{ Bq kg}^{-1}$ ในส่วนของค่า Ra_{eq} พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม จะมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ UNSCEAR ที่ 370 Bq kg^{-1}

Tufail *et al.* (2006) ได้มีการศึกษากัมมันตรังสีที่เกิดจากหินฟอสเฟตและปุ๋ยฟอสเฟตในประเทศปากีสถาน การศึกษาวิจัยนี้ได้ทำการตรวจหาความเข้มข้นมวลกัมมันตภาพรังสีแกมมาในหินฟอสเฟตและตัวอย่างปุ๋ยจากโรงงานผลิตปุ๋ยต่างๆในประเทศ ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมรังสีโดยใช้ตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium Detector) เชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์และเครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง (Multi Channel Analyzer ; MCA) มีการตรวจวัดปริมาณกัมมันตภาพรังสีของ ^{40}K , ^{226}Ra และ ^{232}Th พบว่าความเข้มข้นมวลกัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{238}U (^{226}Ra) ในหินฟอสเฟตจากจอร์แดนและปากีสถานที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 428 ± 11 และ $799 \pm 10 \text{ Bq kg}^{-1}$, สำหรับ ^{232}Th และ ^{40}K ค่าที่ได้ถึงว่าอยู่ในระดับเบคกราวด์ (background) เมื่อเทียบกับข้อมูล UNSCEAR ในส่วนของปุ๋ยฟอสเฟตพบว่ามีปริมาณกัมมันตภาพรังสีมากกว่าปุ๋ยชนิดอื่นๆ และในทุกตัวอย่างค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสีจากธรรมชาติก็จะมีความสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานด้วย

Papastefanou *et al.* (2006) ทำการวิจัยเรื่องการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอริปซัมในการเกษตร และผลกระทบทางรังสีในประเทศกรีซ งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณเรเดียม-226 ในดินที่มีฟอสฟอริปซัมผสมอยู่ และในดินที่ไม่มีฟอสฟอริปซัมผสม พบว่า ปริมาณเรเดียม-226 ในดินที่มีฟอสฟอริปซัมผสมอยู่จะมีปริมาณเรเดียม-226 เฉลี่ยมากกว่าในดินที่ไม่มีฟอสฟอริปซัมผสม 4 เท่า และเมื่อนำข้าวที่ปลูกโดยใช้ดินที่มีฟอสฟอริปซัมผสมอยู่มาวัดปริมาณรังสี พบว่ามีปริมาณเรเดียม-226 เฉลี่ยเท่ากับ 1.53 Bq kg^{-1} ซึ่งมากกว่าข้อมูลของ UNSCEAR

Saueia and Mazzilli (2006) ได้ทำการศึกษาการกระจายของสารกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ เนื่องจากการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตในประเทศบราซิล โดยทำการตรวจวัดปริมาณกัมมันตรังสีในปุ๋ยฟอสเฟต ได้ผลดังนี้ ในปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (Monoammonium Phosphate ; MAP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Diammonium Phosphate ; DAP) จะมีปริมาณความเข้มข้นกัมมันตรังสีสำหรับ ^{226}Ra , ^{228}Ra และ ^{210}Pb ต่ำ สำหรับ U และ Th จะตรวจพบปริมาณความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่สูง ซึ่งวัดได้เกินกว่า 822 Bq kg^{-1} และ 850 Bq kg^{-1} ตามลำดับ ส่วนในปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (Single superphosphate ; SSP) และปุ๋ยทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (Triple superphosphate ; TSP) จะมีปริมาณความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีสูงสำหรับ ^{238}U วัดได้ถึง 1158 Bq kg^{-1} , 1167 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{234}U , 1169 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{230}Th , 879 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{226}Ra , 1255 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{210}Pb , 521 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{232}Th , 246 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{228}Ra และ 302 Bq kg^{-1} สำหรับ ^{228}Th

จากที่กล่าวมาในเบื้องต้น จะพบว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีในวัตถุดิบ, ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยเคมี และผลิตภัณฑ์พลอยได้เหล่านี้จะมีค่าที่สูง อาจมีความเข้มข้นสูงในระดับที่เสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชนได้ ถ้าไม่มีการควบคุมหรือจัดการอย่างถูกวิธี ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในวัตถุดิบเหล่านี้เป็นพิเศษ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศสักรัม ที่มีทั้งการผลิตและการนำเข้าวัตถุดิบเหล่านี้เป็นจำนวนมาก จึงได้ทำการตรวจหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม โดยทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ด้วยตัวตรวจหารังสีแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณหาค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสีจากธรรมชาติต่างๆ เช่น ค่ากัมมันตภาพสมมูลเรเดียม (Radium Equivalent Activity : Ra_{eq}), ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (External Hazard Index : H_{Ext}), ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (Gamma hazard index: I_γ), ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน

(Gamma Absorbed Dose Rate : D) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (Annual Effective Dose : E) และยังสามารถนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) อีกด้วย

1. หินฟอสเฟต (Rock Phosphate)

หินฟอสเฟต หมายถึง สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต $[(Ca_3PO_4)_2]$ หรือ ที่เรียกว่า แร่ฟอสฟอไรต์ (Phosphorites) ฟอสเฟตอาจอยู่ในรูปของ $Ca_5[(PO_4)_3(F)]$ หรือ แร่อะพาไทต์ (Apatite) โดยทั่วไป แร่ฟอสฟอไรต์จะมียูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติปนอยู่ประมาณ 20-300 ppm หรือ 260-370 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (7-100 พิโคคูรีต่อกกรัม) และมีทอเรียมอยู่ประมาณ 1-5 ppm หรือ 3.7-22.2 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (0.1-0.6 พิโคคูรีต่อกกรัม) ส่วนในแร่อะพาไทต์ จะมีปริมาณยูเรเนียมน้อยกว่าแร่ฟอสฟอไรต์ นอกจากนี้ในสินแร่ฟอสเฟตยังพบ เรเดียม-226 (^{226}Ra), ตะกั่ว-210 (^{210}Pb) และโพลonium-210 (^{210}Po) ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม-238 (^{238}U)

หินฟอสเฟตเป็นสินแร่ตามธรรมชาติที่มีแคลเซียมฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ และมีธาตุอื่นๆ ปนอยู่ในปริมาณแตกต่างกัน เช่น โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca), เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) หินฟอสเฟตส่วนใหญ่อยู่ในแร่อะพาไทต์ โดยจะเกิดอยู่ในลักษณะผลึกเล็กๆ หรือไม่เป็นผลึก เรียกว่า คอลโลเฟน (collophane) มีสูตรทางเคมี $Ca_{10}(PO_4)_6(F, Cl, OH)_2$ คุณสมบัติทางกายภาพของแร่อะพาไทต์ มีความถ่วงจำเพาะ 3.15-3.20 ความแข็ง 5 มีสีหลายสี เช่น เขียว, น้ำตาล, น้ำเงิน, ม่วง หรือขาว แสดงดังภาพที่ 1 ลักษณะการเกิดของแร่อะพาไทต์ มักพบใน 3 แบบ คือ 1. อิกเนียส อะพาไทต์ (igneous apatite) เกิดจากหินอัคนี 2. มารีน อะพาไทต์ (marine apatite) เกิดจากการสะสมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง หินปูนกับอนุมูลฟอสเฟตที่ปะปนมากับน้ำทะเล และมีการทับถมร่วมกับอินทรีย์วัตถุจากสิ่งมีชีวิต (พืชและสัตว์ที่สะสมอนุมูลฟอสเฟตจากทะเลไว้มาก) เป็นชั้นตะกอนหนาในก้นทะเล 3. กัวโน (guano) เกิดจากการสะสมของมูลและซากสัตว์ (นก หรือค้างคาว) ลักษณะนี้มักเกี่ยวข้องกับหินปูน โดยเกิดจากการละลายของฟอสเฟต ซึ่งเป็นส่วนประกอบของมูลและซากสัตว์ที่ทับถม ซึมแทรกเข้าไปในหินปูนจากการสำรวจของกรมทรัพยากรธรณี พบแหล่งหินฟอสเฟตเกือบทุกภาคของประเทศ และเป็นประเภทกัวโน เช่น จังหวัดลำพูน สุโขทัย เพชรบูรณ์ กาญจนบุรี ราชบุรี กระบี่ สุราษฎร์ธานี ภูเก็ต พังงา และร้อยเอ็ด

เนื่องจากหินฟอสเฟตมีธาตุฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืชเป็นองค์ประกอบอยู่ จึงเหมาะสำหรับนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมีฟอสเฟตในทางอุตสาหกรรม และนำมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรง แต่การนำฟอสเฟตมาใช้เป็นปุ๋ยโดยตรงมีประสิทธิภาพในการใช้ต่ำ และมีขอบเขตเงื่อนไขการใช้ที่จำกัดมาก กล่าวคือ ในหินฟอสเฟตมีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดสูงประมาณ 8–18% แต่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ละลายออกมาและพืชสามารถนำไปใช้ได้เพียง 1–2% เท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอกับความต้องการของพืช หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายของหินฟอสเฟต ให้มากขึ้น จะเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของพืช การเพิ่มประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟต กระทำได้หลายวิธี เช่น ทางกายภาพ โดยการบดให้เป็นผงละเอียด และการเผาที่อุณหภูมิสูง, ทางเคมี โดยการละลายหินฟอสเฟตในกรด เช่น กรดซัลฟิวริก, ทางชีวภาพ โดยการใช้จุลินทรีย์ ที่มีประสิทธิภาพในการละลายหินฟอสเฟต (ประเสริฐ, www.tistr.or.th)



ภาพที่ 1 แสดงรูปร่างลักษณะของแร่อะพาไทต์

ผลผลิตของแร่ฟอสเฟตประมาณร้อยละ 70 นำมาใช้ในอุตสาหกรรมทำปุ๋ยเคมี ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปุ๋ยฟอสเฟตทุกชนิดนิยมบอกเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของ Phosphorus Pentoxide (P_2O_5) นอกนั้นก็เอามาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างอื่น ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของหินฟอสเฟต ดังต่อไปนี้

เกรดปุ๋ย แร่ฟอสเฟตที่มีองค์ประกอบ P_2O_5 สูงกว่าร้อยละ 30 สามารถนำมาทำปุ๋ยได้โดยตรง นอกจากนี้แร่ฟอสเฟตที่ใช้การผลิตปุ๋ยเคมี โดยละลายกับกรด เช่น ปุ๋ยซูปเปอร์ฟอสเฟต มี P_2O_5 16-20 % ได้จากผสมแร่ฟอสเฟตบดละเอียด (ขนาด 200 เมช) กับกรดกำมะถันเข้มข้น (93% H_2SO_4) ในปริมาณที่เหมาะสม ปุ๋ยทริปเปิลซูปเปอร์ฟอสเฟต (Triple Super Phosphate; TSP)

มี P_2O_5 46-28 % เตรียมได้จากเอาหินฟอสเฟตที่บดแล้วทำปฏิกิริยากับกรดโทฟอสฟอริก (Orthophoric) แทนกรดกำมะถัน เมื่อเอาปุ๋ยทรีปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตผสมกับแอมโมเนียจะได้ปุ๋ยแอมโมเนียฟอสเฟตมีอัตราส่วน $N : P : K = 16 : 48 : 0$ หรือ $16 : 46 : 0$ เมื่อเอาผสมกับปุ๋ยโพแทสเซียมจะได้ปุ๋ยโพแทสเซียมฟอสเฟต และถ้าผสมทั้งแอมโมเนียและโพแทสเซียมจะได้ปุ๋ย N-P-K ซึ่งจะมีหลายเกรดตามอัตราส่วนผสม เช่น 1 : 1 : 1, 1 : 2 : 2, 2 : 2 : 1 เป็นต้น

เกรดสูง หินฟอสเฟตที่มีเปอร์เซ็นต์ P_2O_5 20-30 % หรือเกรดสูงเหมาะสำหรับใช้ผลิตธาตุฟอสฟอรัส โดยวิธีการถลุงในเตาไฟฟ้า ใช้ถ่านโค้กและซิลิกอน (SiO_2) เป็นฟลักซ์ (flux) ธาตุฟอสฟอรัสนี้นำมาใช้ประกอบอุตสาหกรรมอื่นได้มากมาย เช่น ใช้ผลิตโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium Tripoly Phosphate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผงซักฟอก โนโนแคลเซียมฟอสเฟต (Monocalcium Phosphate) ซึ่งเป็นผงฟู (Baking Powder) และเป็นตัวทำให้น้ำอ่อน (Water Softener) นอกจากนี้ยังใช้ในการทำยาสีฟัน แปรงสีฟัน ยารักษาโรค ทำไม้ขีดไฟ วัสดุขัดถู และวัสดุระเบิด

เกรดต่ำ หินฟอสเฟตที่มีเปอร์เซ็นต์ P_2O_5 ประมาณ 20 % หรือเกรดต่ำ โดยบดให้ละเอียดขนาดเล็กลงกว่า 200 เมช ใช้เป็นปุ๋ยได้โดยตรง

2. ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate Fertilizer)

ปุ๋ยฟอสเฟตเป็นปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารฟอสฟอรัสเป็นหลัก และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของปุ๋ยนั้นๆ ฟอสเฟตที่พืชดูดไปใช้ได้ง่ายมี 2 รูป คือ $H_2PO_4^-$ (Dihydrogen phosphate ion) และ HPO_4^{2-} (Monohydrogen phosphate ion) ซึ่งอยู่ในสารละลายดิน สารประกอบฟอสเฟตในปุ๋ยสามารถจำแนกตามการละลายได้ 3 พวก คือ 1. ละลายในน้ำ 2. ละลายใน 1 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 3. ไม่ละลายในน้ำและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ฟอสเฟตในส่วนที่ละลายในน้ำและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เรียกว่าฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ (อิสริยาภรณ์, 2538)

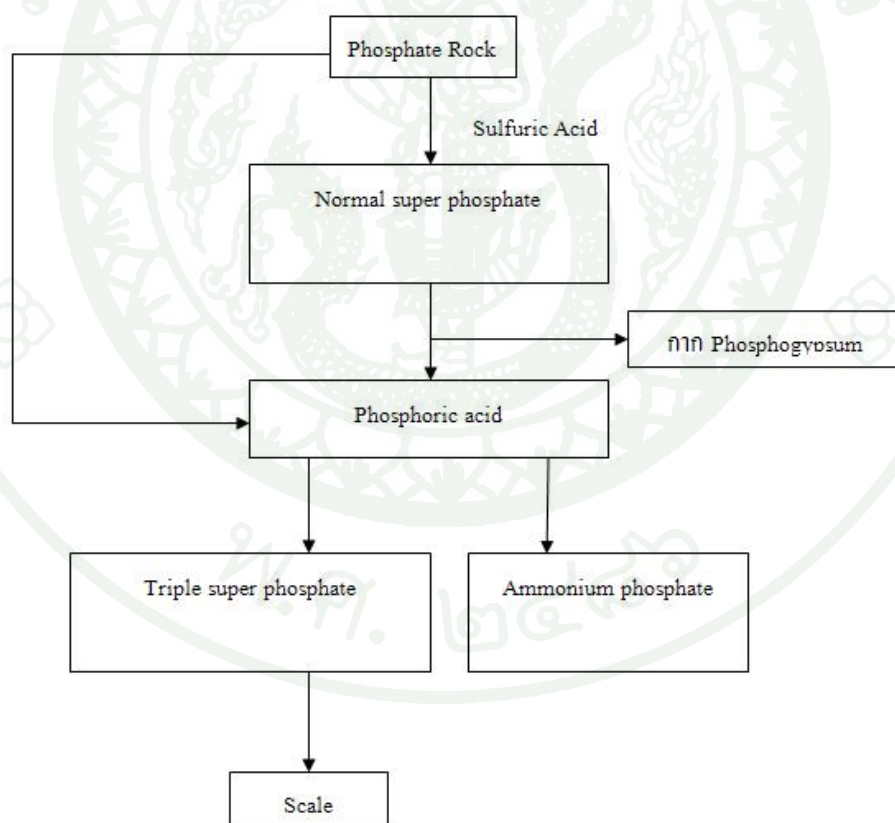
วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตส่วนใหญ่ได้แก่ หินฟอสเฟตในรูปแร่อะพาไทต์ (Apatite) จะถูกพบในหินฟอสเฟตซึ่งจะอยู่ในรูป P_2O_5 วิธีการที่นำมาใช้สำหรับการผลิตกรดโทฟอสฟอริกนั้นได้จากหินฟอสเฟตมาทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก กระบวนการนี้จะทำให้เกิดตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตเรียกว่า ฟอสฟอริปซัม (Phosphogypsum)

การผลิตปุ๋ยเคมี จะเริ่มจากการละลายหินฟอสเฟตด้วยกรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก เพื่อจะได้ กรดฟอสฟอริก ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นที่จะนำไปผลิตปุ๋ยเคมี แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีลำดับดังนี้

1. ละลายหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริก จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อว่า Normal Super Phosphate ซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกกับฟอสฟอริบซัม (แคลเซียมซัลเฟต) ถ้าแยกแคลเซียมซัลเฟต ของเหลวที่ได้คือ กรดฟอสฟอริก

2. ละลายหินฟอสเฟตกับกรดซัลฟูริก จะได้ปุ๋ยอีกประเภทหนึ่ง ที่เรียกว่า Triple Superphosphate

3. ละลายหินฟอสฟอริกกับแอมโมเนีย จะได้ปุ๋ยแอมโมเนียฟอสเฟต (DAP, MAP)



ภาพที่ 2 กระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี

ที่มา: ทิตยัลดา (2548)

3. ฟอสฟอริปซัม (Phosphogypsum)

ฟอสฟอริปซัม คือ ยิปซัมสังเคราะห์ชนิดหนึ่ง (Synthetic Gypsum) ที่ได้จากการบวนการผลิตกรดฟอสฟอริกด้วยการสกัดหินฟอสเฟตแบบ Wet Process เป็นวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตฟอสฟอริก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญของปุ๋ยเคมี ในการผลิตปุ๋ยเคมี 1 ตัน จะทำให้เกิดฟอสฟอริปซัมขึ้น 5 ตัน ซึ่งทำให้ปริมาณฟอสฟอริปซัมทั่วโลกเพิ่มขึ้นมากกว่า 300 ล้านตันต่อปี และในประเทศไทยเฉพาะที่บริษัทปุ๋ยแห่งชาติ (มหาชน) แห่งเดียวมีมากกว่า 5 ล้านตันต่อปี และมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

4. ธาตุกัมมันตรังสีธรรมชาติในอุตสาหกรรมปุ๋ยฟอสเฟต

เมื่อฟอสเฟตถูกแยกออกจากสินแร่ จะมีกาก 2 ชนิดเกิดขึ้น ได้แก่ phosphatic clay tailing หางแร่ส่วนนี้จะมีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ 48% ของสารรังสีที่มีอยู่ในแร่ทั้งหมดและ sand tailing หางแร่ส่วนนี้จะมีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ 10% ของแร่ทั้งหมด สารกัมมันตรังสีที่เหลืออีก 42% จะอยู่ใน phosphate rock ที่แยกออกมา

ในกระบวนการสกัด phosphate rock ทางอุตสาหกรรมมี 2 กระบวนการ ที่ใช้ คือ wet process และ thermal process ในกระบวนการ wet process ส่วนใหญ่จะใช้กรดซัลฟูริก ในการสกัด phosphate rock ผลผลิตที่ได้จะอยู่ในรูปของ phosphoric acid และ กาก hydrated calcium sulfate (gypsum) ซึ่งผลิตผลตัวหลังจะถูกเรียกว่า phosphogypsum (PG) หรือ superphosphate ส่วนกระบวนการ Thermal Process จะได้ phosphate slag เป็น by-product

ในกระบวนการแยกแบบ wet process ยูเรเนียม ประมาณ 86% (ความแรงรังสีจำเพาะ 711-2200 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม หรือ 20-60 พิโคคูรีต่อกรัม) และทอเรียม-232 ประมาณ 70% จะละลายอยู่ในส่วนของกรดฟอสฟอริก ส่วน เรเดียม-226 ประมาณ 20% จะตกตะกอนร่วมกับ PG เนื่องจาก เรเดียมมีคุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับแคลเซียม จึงตกตะกอนร่วม (coprecipitate) กับ $\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ในรูปของ $^{226}\text{RaSO}_4$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ ($K_{sp}=4.25 \times 10^{-11}$) โดยมีความแรงรังสีจำเพาะของเรเดียม-226 อยู่ในช่วง 410-1300 เบคเคอเรลต่อกิโลกรัม (11-35 พิโคคูรีต่อกรัม) จึงทำให้ PG มีเรเดียม-226 ปนเปื้อน และสามารถตรวจวัดความแรงรังสีได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซ์
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซ์ กับข้อมูลที่มีอยู่ในต่างประเทศและข้อมูลจาก UNSCEAR
3. เพื่อคำนวณหาค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสีและนำข้อมูลที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลจาก UNSCEAR

การตรวจเอกสาร

สำหรับเนื้อหาและทฤษฎีต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการศึกษาวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อสำคัญ และอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

ในสิ่งแวดล้อมทุกแห่งมีกัมมันตภาพรังสีซึ่งสิ่งมีชีวิตได้รับอยู่ตลอดเวลา ระดับกัมมันตภาพรังสีนี้โดยทั่วไปถือว่าอยู่ในระดับที่ปลอดภัย ดังเราจะเห็นจากการวัดรังสีชนิดต่างๆ ด้วยเครื่องวัดรังสี จะพบค่าๆหนึ่งที่เรียกว่า “แบคกราวด์” (background) ของเครื่องวัดรังสีประเภทนั้นๆ ซึ่งได้มาจากกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ และกัมมันตภาพรังสีเหล่านั้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามกิจกรรมของมนุษย์ จึงสามารถกล่าวได้ว่า กัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมมีแหล่งที่มาสำคัญจาก 2 แหล่ง ได้แก่ กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ และกัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น

1.1 แหล่งกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ (Natural Radiation Sources)

แหล่งกำเนิดของกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แหล่งใหญ่ ๆ คือ

1.1.1 รังสีคอสมิก (Cosmic Radiation) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.1.1.1 รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (Primary Cosmic Radiation) คือรังสีคอสมิกที่อยู่เหนือชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก โดยส่วนหนึ่งมีแหล่งกำเนิดจากนอกระบบสุริยะจักรวาล และอีกส่วนหนึ่งเกิดบนผิวของดวงอาทิตย์ รังสีคอสมิกประกอบด้วย โปรตอน 87% อนุภาคแอลฟา 11% นิวเคลียสหนัก 1% อิเล็กตรอน 1% โดยรังสีคอสมิกปฐมภูมิจะมีพลังงานอยู่ในช่วง 10^8 - 10^{20} อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าอยู่ที่ประมาณ 10^8 - 10^{11} เมื่อรังสีคอสมิกปฐมภูมิวิ่งเข้ามาถึงชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกส่วนใหญ่จะเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศในระยะ 200-300 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรแรก เกิดเป็นรังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary Cosmic Ray) รังสีคอสมิกปฐมภูมิส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนไว้หมดในระยะ 1/10 แรกของชั้นบรรยากาศ

1.1.1.2 รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (Secondary Cosmic Radiation) คือ รังสีคอสมิกที่เกิดจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก ประกอบด้วยอนุภาคนิวตรอน โปรตอน และอิเล็กตรอน ซึ่งอนุภาคนิวตรอนจะทำอันตรกิริยากับธาตุไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศตอนบน เกิดเป็นคาร์บอน-14 (^{14}C) ทริเทียม (^3H) เบริลเลียม-7 (^7Be) และไนโตรเจน-22 (^{22}N) รวมทั้งนิวไคลด์กัมมันตรังสีอื่นๆ อีกมากมาย ดังแสดงในตารางที่ 1

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะกระจายลงสู่บรรยากาศด้านล่าง ทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม และสิ่งมีชีวิตต่างๆ จะได้รับเข้าสู่ร่างกายต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิก

นิวไคลด์	ครึ่งชีวิต	ชนิดของรังสี	นิวเคลียสเป้า
^{10}Be	$2.5 \times 10^8 \text{ y}$	β^-	N, O
^{26}Al	$7.4 \times 10^5 \text{ y}$	β^+, γ	Ar
^{36}Cl	$3.08 \times 10^5 \text{ y}$	β^-	Ar
^{80}Kr	$2.1 \times 10^5 \text{ y}$	K-X-ray	Kr
^{14}C	5730 y	β^-	N, O
^{32}Si	700 y	β^-	Ar
^{39}Ar	269 y	β^-	Ar
^3H	12.262 y	β^-	N, O
^{22}Na	2.62 y	β^+, γ	Ar
^{35}S	87.9 y	β^-	Ar
^7Be	53.6 d	(E.C), γ	N
^{37}Ar	35.1 d	K-X-ray, Bremsstrahlung 0.81 Mev	Ar
^{33}P	24.4 d	β^-	Ar
^{32}P	14.28 d	β^-	Ar
^{38}Mg	21.2 h	β^-	Ar

ตารางที่ 1 (ต่อ)

นิวไคลด์	ครึ่งชีวิต	ชนิดของรังสี	นิวเคลียสเป้า
^{24}Na	14.96 d	β^- , γ	Ar
^{38}S	2.87 h	β^- , γ	Ar
^{31}Si	2.62 h	β^- , γ	Ar
^{18}F	109.7 m	β^-	Ar
^{39}Cl	55.5 m	β^- , γ	Ar
^{38}Cl	37.29 m	β^- , γ	Ar
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	31.99 m	β^+ , γ	Ar

ที่มา: Aochi (1999)

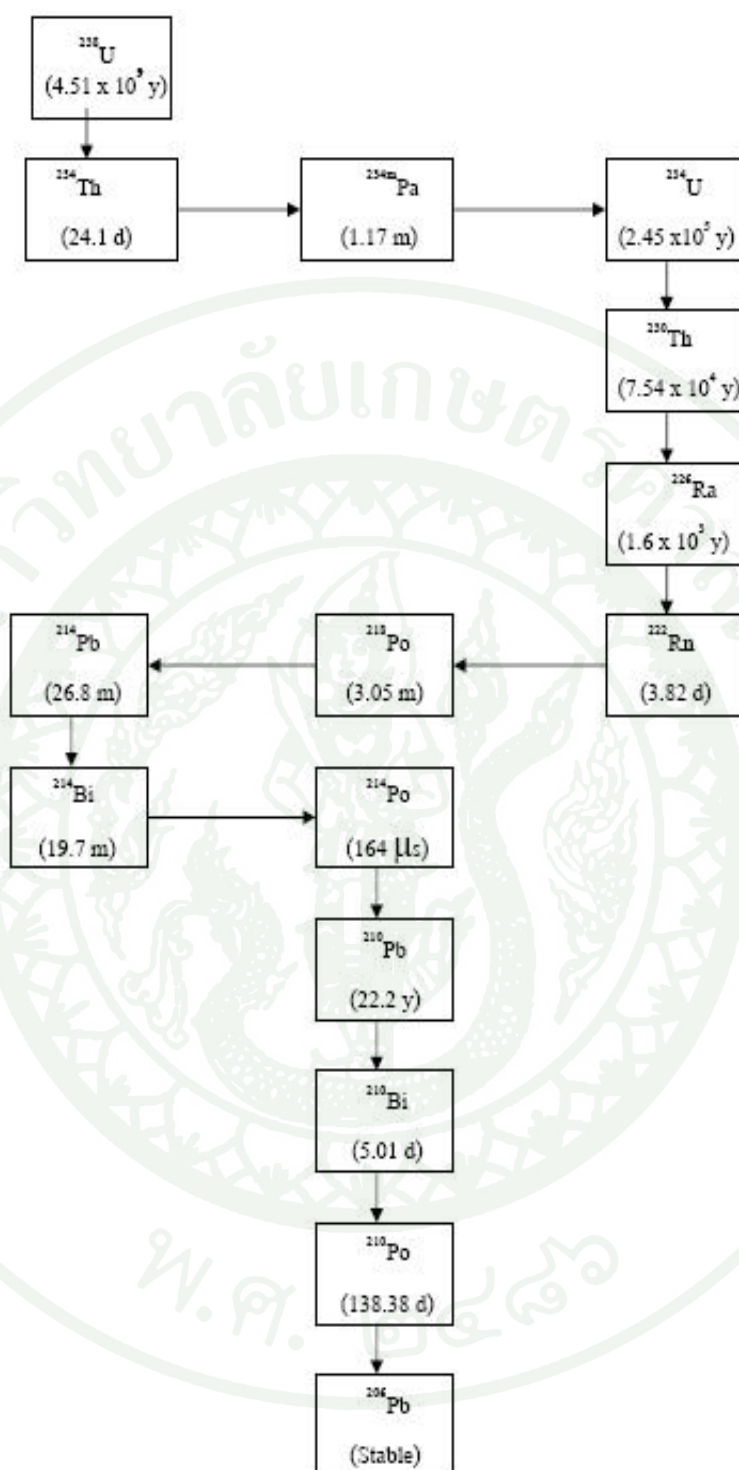
1.1.2 กัมมันตรังสีที่กำเนิดพร้อมโลก

นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่กำเนิดพร้อมโลก ได้แก่ ยูเรเนียมและนิวไคลด์ในอนุกรมยูเรเนียม ทอเรียมและนิวไคลด์ในอนุกรมทอเรียม นอกจากนิวไคลด์ในสองอนุกรมนี้แล้วยังมีนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติอีกชนิดหนึ่ง คือ โพแทสเซียม-40 (^{40}K) โดยที่นิวไคลด์กัมมันตรังสีเหล่านี้ เป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ที่ผิวโลก สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติ ได้แก่ หิน ดิน ทราช เป็นต้น

ยูเรเนียมในธรรมชาติ มีอยู่ด้วยกันสามไอโซโทป ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีทั้งสามไอโซโทป คือ ยูเรเนียม-238 (^{238}U) มีประมาณ 99.274% ยูเรเนียม-235 (^{235}U) มีจำนวน 0.721% ส่วนยูเรเนียม-234 (^{234}U) พบว่ามีเพียง 0.00546% เนื่องจากยูเรเนียม-235 (^{235}U) และยูเรเนียม-234 (^{234}U) มีปริมาณที่น้อยมาก จึงถือว่าปริมาณกัมมันตภาพที่สิ่งมีชีวิตได้รับมาจากยูเรเนียม-238 แต่เพียงไอโซโทปเดียว

1.1.2.1 ยูเรเนียม-238 (^{238}U) มีครึ่งชีวิต เท่ากับ 4.5×10^9 ปี สลายตัวเป็นลูกโซ่ให้นิวไคลด์ลูก 14 ตัว นิวไคลด์ตัวสุดท้ายในอนุกรม คือ ตะกั่ว-206 (^{206}Pb) ซึ่งเป็นธาตุเสถียร แผนภาพการสลายตัวของยูเรเนียม-238 (^{238}U) แสดงในภาพที่ 4 ในแต่ละขั้นตอนการสลายตัวอาจสลายตัวแอลฟา สลายตัวบีตา หรือสลายแกมมา ซึ่งชนิดของการสลายตัว และพลังงานของรังสีแกมมาของนิวไคลด์ต่างๆ ในอนุกรมยูเรเนียม แสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ยังมีการแบ่งนิวไคลด์ในอนุกรมยูเรเนียม-238 (^{238}U) ออกเป็น 5 อนุกรมย่อย ซึ่งได้แก่ อนุกรมย่อยยูเรเนียม-238 อนุกรมย่อยทอเรียม-230 อนุกรมย่อยเรเดียม-226 อนุกรมย่อยเรดอน-222 และอนุกรมย่อยตะกั่ว-210

ยูเรเนียมเป็นธาตุที่พบในธรรมชาติโดยอยู่ในองค์ประกอบของหินและดินทุกชนิด ปริมาณที่พบในหินชนิดต่างๆ ได้จำแนกไว้ในตารางที่ 3 โดยพบว่าปริมาณที่แตกต่างกันออกไปในหินชนิดต่างๆ บางชนิดมีค่าความเข้มข้นต่างกันมาก เช่น หินอัคนีชนิดกรด (Acidic Igneous Rock) จะมีค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมมากกว่าหินอัคนีชนิดเป็นด่างสูง (Ultrabasic Igneous Rock) ถึง 100 เท่า คือ 3.00 ppm ชนิดของหินที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูงคือ หินฟอสเฟต (Rock Phosphate) พบว่าในบริเวณบางแห่งของมลรัฐฟลอริดา และฝั่งตะวันตกของมลรัฐไดาโฮ ประเทศสหรัฐอเมริกา มีปริมาณยูเรเนียมในหินฟอสเฟตสูงถึง 120 ppm ซึ่งค่าความเข้มข้นนี้จัดว่ามีคุณค่าเป็นเชิงพาณิชย์ ดังนั้นเมื่อนำหินฟอสเฟตจากบริเวณนี้มาใช้ผลิตเป็นปุ๋ยฟอสเฟตจึงส่งผลทำให้มีปริมาณยูเรเนียมกระจายสู่สิ่งแวดล้อมด้วย



ภาพที่ 4 แสดงแผนผังอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม

ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

ตารางที่ 2 แสดงการสลายตัวและพลังงานรังสีแกมมาของนิวไคลด์ในอนุกรมยูเรเนียม

นิวไคลด์	ชนิดของการสลายตัว	ครึ่งชีวิต	พลังงานรังสีแกมมา (Energy (Mev) and Abundance)
^{238}U	α	$4.51 \times 10^9 \text{ y}$	
^{234}Th	β	24. D	0.063 (4.49%), 0.093 (5.16%)
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	β	1.17 m	0.766 (0.21%), 1.001 (0.59%)
^{234}U	α	$2.45 \times 10^5 \text{ y}$	0.053 (0.12%)
^{230}Th	α	$7.54 \times 10^4 \text{ y}$	0.068 (0.38%), 0.144 (0.05%)
^{226}Ra	α	$1.6 \times 10^3 \text{ y}$	0.186 (0.07%)
^{222}Rn	α	3.82 d	
^{218}Po	α	3.05 m	
^{214}Pb	β	26.8 m	0.242 (7.5%), 0.295 (18.5%), 0.352 (38.5%)
^{214}Bi	β	19.7 m	0.609 (44.81%), 0.768 (4.88%), 0.934 (3.03%), 1.120 (14.8%), 1.239 (5.86%), 1.378 (3.92%), 1.408 (2.48%), 1.730 (2.88%), 1.765 (15.9%), 2.205 (4.86%)
^{214}Po	α	164 μs	
^{210}Pb	β	22.2 y	0.046 (3.6%)
^{210}Bi	β	5.01 d	
^{210}Po	α	138.38 d	0.803 (0.001%)
^{206}Pb	Stable		

ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

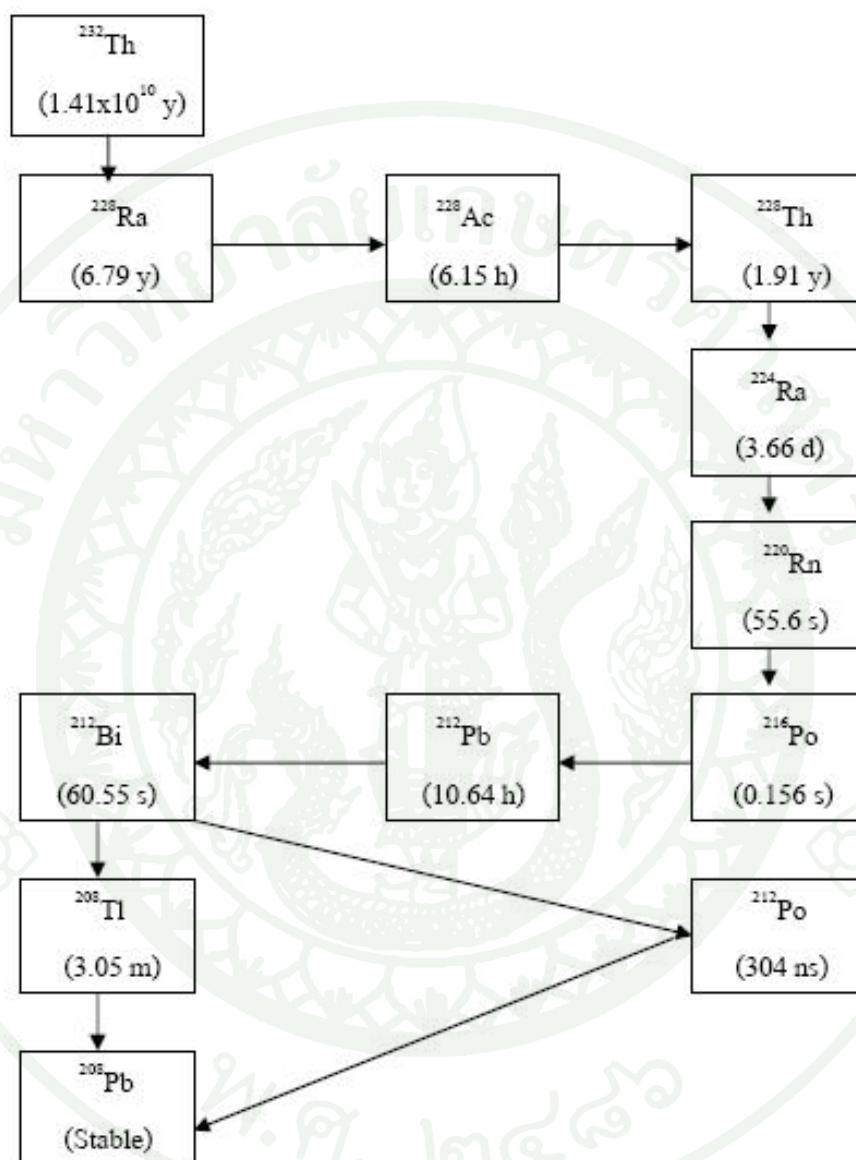
ตารางที่ 3 แสดงค่าความเข้มข้นยูเรเนียมเฉลี่ยในหินชนิดต่างๆ

ชนิดของหิน	ความเข้มข้นยูเรเนียมเฉลี่ย		
	ppm	pCi g ⁻¹	Bq kg ⁻¹
Acid igneous	3.0	0.99	37
Intermediate igneous	1.5	0.50	18
Basic igneous	0.6	0.20	7.3
Ultrabasic igneous	0.03	0.010	0.37
Meteorites	0.003	0.0010	0.037
Phosphate rock (Florida)	120	40	1500
Phosphate rock (N. Africa)	20-30	6.6-10	240-370
Bituminous shale (Tennessee)	50-80	17-26	610-980
Normal granite	4	1.3	49
Limestones	1.3	0.43	16
Other sedimentary rock	1.2	0.40	15

ที่มา: Lowder and Solon (1956)

1.1.2.2 ทอเรียม-232 (^{232}Th) มีครึ่งชีวิตยาวมากเช่นกัน คือ 1.4×10^{10} ปี และมีการสลายตัวเป็นลูกโซ่ เช่นเดียวกับยูเรเนียม-238 (^{238}U) โดยให้นิวไคลด์ลูก 11 ตัว ในการสลายตัวอาจสลายตัวแอลฟา สลายตัวบีตาหรือสลายแกมมา จนได้ธาตุสุดท้ายในอนุกรม คือ ตะกั่ว-208 (^{208}Pb) ในการสลายตัวของทอเรียม-232 (^{232}Th) จะสลายตัวแอลฟา แล้วกลายเป็นเรเดียม-228 (^{228}Ra) ซึ่งสลายตัวต่อโดยการสลายบีตา แล้วเปลี่ยนไปเป็นแอกติเนียม-228 (^{228}Ac) และมีการสลายตัวต่อเนื่องอีกหลายขั้นตอน จนถึงบิสมัท-212 (^{212}Bi) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่บอจุดหักเห โดยมีวิถีของการสลายตัวที่เป็นไปได้ 2 แนว กล่าวคือ แนวหนึ่งเป็นการสลายแอลฟา ไปสู่ทาลเลียม-208 (^{208}Tl) ส่วนอีกแนวหนึ่งเป็นการสลายบีตา ไปสู่โปโลเนียม-212 (^{212}Po) จนในที่สุดต่างก็บรรจบลงสู่ผลปฏิกิริยาปลายคือตะกั่ว-208 (^{208}Pb) ซึ่งเป็นไอโซโทปเสถียร แผนภาพการสลายตัวของทอเรียม-232 (^{232}Th) แสดงดังภาพที่ 5 ส่วนในตารางที่ 4 แสดงชนิดของรังสีจากการสลายตัว และพลังงานของรังสีแกมมาในอนุกรมทอเรียม นอกจากนี้ยังมีการแบ่งนิวไคลด์ในอนุกรมทอเรียม ออกเป็น

3 อนุกรมย่อย ซึ่งได้แก่ อนุกรมย่อยทอเรียม-232 อนุกรมย่อยเรเดียม-228 และอนุกรมย่อยทอรอน-220



ภาพที่ 5 แสดงแผนผังอนุกรมการสลายตัวของทอเรียม

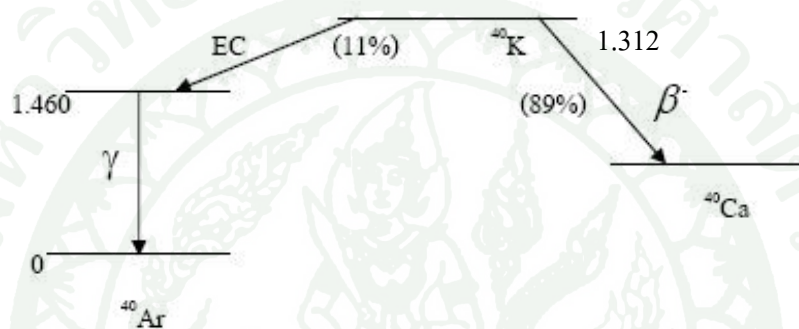
ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

ตารางที่ 4 แสดงการสลายตัวและพลังงานรังสีแกมมาของนิวไคลด์ในอนุกรมทอเรียม

นิวไคลด์	ชนิดของการสลายตัว	ครึ่งชีวิต	พลังงานรังสีแกมมา (Energy (Mev) and Abundance)
^{232}Th	α	1.41×10^{10} y	
^{228}Ra	β	6.79 y	
^{228}Ac	β	6.15 h	0.130 (2.45%), 0.209 (3.88%), 0.270 (3.43%), 0.328 (2.95%), 0.338 (11.3%), 0.463 (4.44%), 0.772 (1.5%), 0.795 (4.34%), 0.836 (1.68%), 0.911 (26.6%), 0.965 (5.11%), 0.969 (16.2%), 1.588 (3.27%), 1.631 (1.6%)
^{228}Th	α	1.91 y	0.084 (1.27%), 0.216 (0.26%)
^{224}Ra	α	3.66 y	0.241 (3.97%)
^{220}Rn	β	55.6 s	0.186 (0.07%)
^{216}Po	α	0.156 s	
^{212}Pb	β	10.64 h	0.239 (43.6%), 0.300 (3.34%)
^{214}Bi	α, β	60.55 s	0.288 (0.31%), 0.453 (0.31%), 0.727 (6.65%), 0.785 (1.11%), 0.893 (0.37%), 1.513 (0.54%), 1.621 (1.51%)
^{212}Po	α	304 ns	
^{208}Tl	β	3.05 m	0.277 (6.31%), 0.511 (22.6%), 0.583 (84.5%), 0.763 (1.81%), 0.861 (12.42%), 2.615 (99.2%)
^{208}Pb	Stable		

ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

1.1.2.3 โพแทสเซียม-40 (^{40}K) มีเพียง 0.0118% ของโพแทสเซียมที่มีในธรรมชาติ มีครึ่งชีวิต 1.28×10^9 ปี การสลายตัวของโพแทสเซียม-40 (^{40}K) มีสองแบบ แบบที่หนึ่งสลายตัวโดยการให้รังสีบีตา 89% ให้พลังงานของรังสีบีตาสูงสุด เท่ากับ 1.312 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แล้วกลายเป็นธาตุแคลเซียม-40 (^{40}Ca) แบบที่สองสลายตัวโดยการจับอิเล็กตรอน (Electron Capture) ในชั้น K ให้รังสีแกมมา 11% กลายเป็นอาร์กอน-40 (^{40}Ar) มีพลังงานของรังสีแกมมา เท่ากับ 1.460 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ นิวไคลด์ลูกของการสลายตัวทั้งสองแบบจะเป็นธาตุเสถียร แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แสดงแผนผังการสลายตัวของโพแทสเซียม - 40

ที่มา: Knoll (1999)

โพแทสเซียม-40 พบกระจายอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ดิน หิน และในเนื้อเยื่อของทั้งพืชและสัตว์ เป็นธาตุที่มีมากบนเปลือกโลกเป็นอันดับ 7 และเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับที่ 6 ของสารละลายที่มีในน้ำมหาสมุทร พบว่าความเข้มข้นของโพแทสเซียม-40 (^{40}K) ในน้ำทะเลมีค่าประมาณ 416 ไมโครกรัมต่อลิตร ในร่างกายพวกก็มีโพแทสเซียมในปริมาณที่สูงเช่นกัน ส่วนโพแทสเซียม-40 (^{40}K) ที่มีในดินนั้น จะยึดเหนี่ยวกับอนุภาคดินโดยแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างของอนุภาคดิน และจะยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรงมากในดินร่วนและดินเหนียว อย่างไรก็ตาม ปริมาณของโพแทสเซียม-40 (^{40}K) ในดินอาจเพิ่มสูงขึ้นได้จากการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มผลผลิต

1.2 กัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้นและจากกิจกรรมของมนุษย์

ได้แก่ การดำเนินงานในด้านการใช้เทคโนโลยีต่างๆ ที่ทำให้เกิดการกระจายของรังสีไปสู่สิ่งแวดล้อมทั่วไป ตัวอย่างของการดำเนินงานเหล่านั้น ได้แก่ การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ซึ่งจะเกิดธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญต่อมนุษย์ เช่น สตรอนเชียม-90 (^{90}Sr) ซีเซียม-137 (^{137}Cs) สารกัมมันตรังสีที่เกิดจากการทดลองอาวุธนิวเคลียร์นี้อาจถูกส่งขึ้นไปถึงชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ (Troposphere) ที่ระดับความสูง 40,000-60,000 ฟุต ซึ่งอาจถูกพัดพาไปไกลทั่วโลก การผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยปฏิกิริยานิวเคลียร์ กากของกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์มีส่วนในการเพิ่มปริมาณรังสีในธรรมชาติ ในปัจจุบันพบว่า ปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากกากของกัมมันตรังสีจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีปริมาณเพียง 0.2 มิลลิเรมต่อปี การใช้สารรังสีในทางการแพทย์ เช่น ในการวินิจฉัยโรค พบว่า 75-90% ของผู้ที่ได้รับรังสีจากการแพทย์จะมาจากการใช้รังสีเอกซ์ (X-Ray) นอกจากนี้ยังมีการใช้ในการรักษาโรค เช่น การใช้รังสีแกมมาจากธาตุกัมมันตรังสีในการยับยั้งโรคมะเร็ง การใช้ในงานทางนิวเคลียร์ทางการแพทย์ เช่น การใช้ไอโอดีน-131 (^{131}I) รักษาไทรอยด์ เทคนิเชียม-99เอ็ม ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) หาสมมติฐานของโรค เป็นต้น

2. กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Law of Radioactive Decay)

การที่นิวเคลียสของนิวไคลด์กัมมันตรังสีเปลี่ยนสภาพเป็นนิวเคลียสสภาพใหม่ และมีการปล่อยพลังงานในรูปของกัมมันตรังสีชนิดต่างๆ นั้นเรียกว่า “การสลายตัว” (Decay) นิวเคลียสกัมมันตรังสีเริ่มต้นเรียกว่า “นิวเคลียสแม่” (Parent) และนิวเคลียสใหม่ที่เกิดขึ้นเรียกว่า “นิวเคลียสลูก” (Daughter) นิวเคลียสลูกที่ได้จากการสลายอาจจะเสถียรหรือไม่ก็ได้ ถ้าไม่เสถียรก็จะมี การสลายตัวต่อไปอีกจนกว่าจะเสถียร การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น อัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะแปรผันตามกับจำนวนนิวเคลียสอะตอมที่มีอยู่เดิมในขณะนั้น

ถ้าให้ N เป็นจำนวนนิวไคลด์ที่เวลา t ใดๆ ซึ่งมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านไป ดังนั้น จากความสัมพันธ์ข้างต้นจึงเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\frac{-dN}{dt} \propto N \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2)$$

โดยเครื่องหมายลบแสดงการลดลงของจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี (N)

เมื่อ λ คือค่าคงตัวของการสลายตัว (Decay Constant) หน่วยต่อวินาที ให้ N_0 เป็นจำนวนนิวไคลด์ที่มีอยู่เดิมเมื่อเริ่มต้น $t = 0$ สมการ (2) จะได้

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \quad (3)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (4)$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (5)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

เมื่อ

N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ($t = 0$)

N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ

t คือ ระยะเวลาของการสลายตัว

λ คือ ค่าคงตัวของการสลายตัว (Decay Constant)

2.1 ความแรงของสารกัมมันตรังสี (Activity, A)

ให้ A เป็นอัตราการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีหรือ “กัมมันตภาพรังสี” หรือ “ความแรงรังสี” (Activity) ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ฉะนั้นจะได้ว่า

$$A \propto N \quad (7)$$

$$A = \lambda N \quad (8)$$

จากสมการ (6) คูณด้วย λ จะได้

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (9)$$

ดังนั้น

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (10)$$

เมื่อ A เป็นกัมมันตรังสีภาพที่เวลาใดๆ

A_0 เป็นกัมมันตภาพรังสีที่เวลา $t = 0$

2.2 ครึ่งชีวิต (Half-life) และค่าชีวิตเฉลี่ย (Mean-life)

ครึ่งชีวิต (Half-life) หมายถึง ระยะเวลาที่สารกัมมันตรังสีสลายตัว แล้วเหลือปริมาณเพียงครึ่งหนึ่งจากของเดิม จากสมการ (6) เมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวนานครึ่งชีวิต ทำให้ $N = N_0 / 2$ ดังนั้น

$$\text{จาก} \quad N_0 = N_0 e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$\text{เมื่อ เวลา } t = t_{1/2} \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (12)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad (13)$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \quad (14)$$

$$-0.693 = -\lambda t_{1/2} \quad (15)$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (16)$$

เวลา $t_{1/2}$ นี้เรียกว่า “ครึ่งชีวิต (Half-Life)” ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของสารกัมมันตรังสีแต่ละชนิด เช่นเดียวกับค่าคงที่ของการสลายตัว

จากสมการที่ (16) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าครึ่งชีวิต ($t_{1/2}$) และค่าคงที่ของการสลายตัว (λ) แต่เนื่องจากอะตอมในนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตไม่เท่ากัน มีการสลายตัวที่เวลาใดๆ ก็ได้ ผลรวมของเวลาที่ทุกนิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตอยู่ต่อจำนวนนิวไคลด์ทั้งหมด เรียกว่า “ชีวิตเฉลี่ย” (Mean-life : τ) เนื่องจากแต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสีอาจมีชีวิตอยู่ได้ตั้งแต่ 0 จนถึงอนันต์ ดังนั้น จากคำจำกัดความของชีวิตเฉลี่ย เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ผลรวมของเวลาที่ทุกนิวไคลด์มีชีวิต} = \int_0^{\infty} t dN \quad (17)$$

$$\tau = \left(\int_0^{\infty} t dN \right) / N_0 \quad (18)$$

เมื่อ $N = N_0 e^{-\lambda t}$, $dN = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$ เครื่องหมาย - ของค่า dN แสดงการลดลงของจำนวนนิวไคลด์ ดังนั้น เมื่อแทนค่า dN ในสมการที่ (18) จะได้

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda t N_0 e^{-\lambda t} dt \quad (19)$$

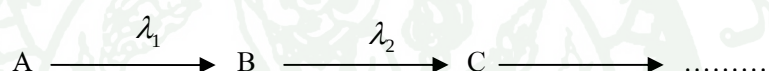
$$\tau = -\lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt \quad (20)$$

$$\tau = -\lambda \left[\frac{-1}{\lambda^2} \right] \quad (21)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (22)$$

3. สมดุลของสารกัมมันตรังสี (Radioactive Equilibrium)

มีสารกัมมันตรังสีหลายตัวที่เมื่อสลายตัวแล้วจะทำให้ได้นิวเคลียสของตัวลูกที่ยังคงเป็นสารกัมมันตรังสี ซึ่งก็จะสลายตัวต่อไปพร้อมกับก่อให้เกิดลูกของกัมมันตรังสีตัวใหม่ โดยตัวมันเองก็จะเปลี่ยนสถานะเป็นพ่อแม่ สมการทั่ว ๆ ไปสำหรับอนุกรมการสลายตัวแบบนี้คือ



เมื่อ A สลายตัวไปเป็น B และเมื่อ B สลายตัวต่อไปจะก่อให้เกิด C

λ_1 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวในการเปลี่ยนแปลงของ A ไปเป็น B

λ_2 เป็นค่าคงที่ของการสลายตัวในการเปลี่ยนแปลงของ B ไปเป็น C

ให้ N_1^0 และ N_2^0 แทนจำนวนอะตอมของ A และ B ณ เวลาเริ่มต้น

N_1 และ N_2 แทนจำนวนอะตอมของ A และ B ตามลำดับ ณ เวลาใดๆ

สมการการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีคือ

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} = \text{อัตราการเกิด} - \text{อัตราการสลายตัว} \quad (23)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณของ N_2 ในขณะใดขณะหนึ่งได้ดังสมการ

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (24)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (25)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (26)$$

แทนค่าสมการ (24) ลงใน (26)

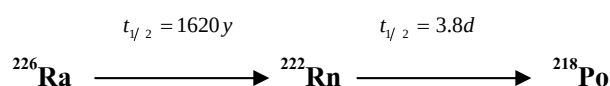
$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (27)$$

และเมื่อแก้สมการจะได้สมการสำหรับอนุกรมการสลายตัวดังนี้

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 [e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}] \quad (28)$$

3.1 สมดุลแบบถาวร (Secular Equilibrium)

เป็นสมดุลทางรังสีที่มีเงื่อนไขกำกับว่า ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่จะต้องมีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกหลายเท่า หรือมองอีกแง่หนึ่งคือ $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ถ้าจะให้เห็นได้ชัดของการเกิดสมดุลในแบบนี้แล้ว ความแตกต่างของค่าครึ่งชีวิตระหว่างนิวไคลด์แม่กับนิวไคลด์ลูกจะต้องต่างกัน 10^4 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์แม่จะไม่เปลี่ยนแปลงเท่าไร ในขณะที่ค่าความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกเปลี่ยนแปลงไปหลายช่วงครึ่งชีวิต ตัวอย่างเช่น การสลายตัวของเรเดียม-226 ไปเป็นเรดอน-222



สำหรับสมดุลทางรังสีระหว่างเรเดียม และเรดอนทำให้สมการ (12) เปลี่ยนแปลงง่ายขึ้น กล่าวคือ λ_1 นั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่า λ_2 และเช่นเดียวกัน

เมื่อเวลา t ผ่านไปนานหลายช่วงครึ่งชีวิตของเรดอน ผลคูณของ t และ λ_2 จะมีค่ามหาศาล ดังนั้น $e^{-\lambda_2 t}$ จะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมการ (28) สามารถลดรูปได้เป็น

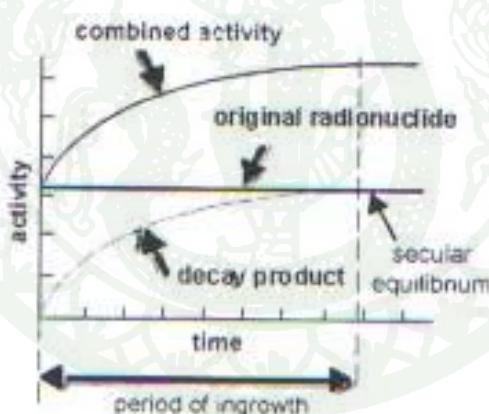
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (29)$$

แทนค่า N_1 จาก (24) ลงใน (29) จะได้

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \quad (30)$$

หรือเมื่อเข้าสู่ระบบสมดุลแบบเซกูลาร์จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 31

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \dots \quad (31)$$



ภาพที่ 7 แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดสภาวะสมดุลแบบเซกูลาร์

ที่มา: ธวัช (2541)

3.2 สมดุลแบบชั่วคราว (Transient Equilibrium)

สมดุลนี้มีความคล้ายคลึงกับสมดุลเชกูลาร์ในกรณีที่ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่มีค่ามากกว่านิวไคลด์ลูก แต่มากกว่าสัดส่วนเพียงเล็กน้อย (ประมาณ 10 เท่า) เมื่อเทียบกับ 10^4 เท่า หรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่า $\lambda_1 < \lambda_2$

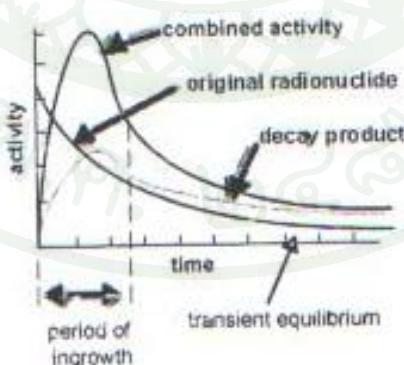
เมื่อเวลา t มีค่ามากๆ ค่า $e^{-\lambda_2 t}$ จะตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับ $e^{-\lambda_1 t}$ เมื่อมองว่าเทอม $e^{-\lambda_2 t}$ มีค่าเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นสมการ (28) จะเปลี่ยนง่ายขึ้นเป็น

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (32)$$

เมื่อแทนค่า N_1 จาก (24) ลงใน (32) จะได้

$$N_1 \lambda_1 = N_2 (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (33)$$

อย่างไรก็ตามในกรณีของสมดุลแบบทรานเซียนต์นั้น ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่สั้นกว่าในกรณีของสมดุลแบบเชกูลาร์ ดังนั้นอาจจะกล่าวได้ว่าความแรงรังสีทั้งหมดจะลดลงตามเวลาดังแสดงภาพที่

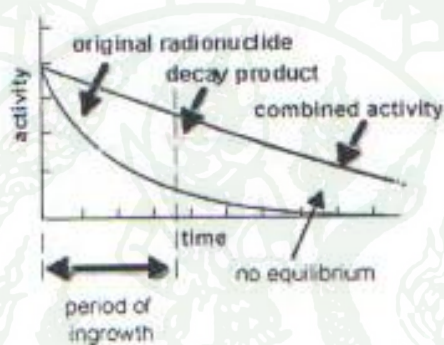


ภาพที่ 8 แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เกิดภาวะสมดุลแบบทรานเซียนต์

ที่มา: วัช (2541)

3.3 ไม่มีสมดุลทางรังสี (No equilibrium)

สมดุลทางรังสีจะไม่เกิดขึ้นถ้าค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่มีค่าน้อยกว่าของนิวไคลด์ลูก ดังแสดงในภาพที่ 9 ถ้าเริ่มต้นจากนิวไคลด์แม่แล้วพิจารณาความแรงรังสีจะพบว่า ความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกจะเพิ่มขึ้นผ่านจุดที่มากที่สุดแล้วลดลง ณ จุดที่ค่าความแรงมากที่สุดความชันของเส้นกราฟนิวไคลด์ลูก $dN_2/dt = 0$ สามารถคำนวณระยะเวลาของความแรงรังสีของนิวไคลด์ลูกจากเริ่มต้นจนมีค่ามากที่สุดได้ โดยอาศัยสมการดิฟเฟอเรนเชียล (28) โดยการตั้งสมการดิฟเฟอเรนเชียลเท่ากับศูนย์ แล้วคำนวณหา t ภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลากับความแรงรังสี



ภาพที่ 9 แสดงกราฟความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ไม่สมดุลทางรังสี

ที่มา: ธวัช (2541)

4. หน่วยวัดกัมมันตภาพรังสี (Unit of radioactivity)

4.1 หน่วยวัดกัมมันตภาพรังสี (Unit of radioactivity)

การวัดค่ากัมมันตภาพหรือวัดค่าความแรงของสารกัมมันตรังสีเป็นการวัดค่าของกัมมันตภาพรังสี (radioactivity) ที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี ในหน่วยของครั้งต่อวินาที (disintegration per second; dps) คูรี (Curie; Ci) โดยที่กำหนดให้

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที นั่นคือ

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} \quad (34)$$

นอกจากนี้ยังได้มีการกำหนดหน่วยสากลในระบบเอสไอ (SI unit) ขึ้นมาใช้ในหน่วยวัดปริมาณรังสี คือ เบคเคอเรล (Becquerel; Bq) เป็นหน่วยวัดค่ากัมมันตภาพ โดยที่

1 เบคเคอเรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้ค่ากัมมันตภาพเท่ากับ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ dps} \quad (35)$$

5. ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Radium Equivalent Activity : Ra_{eq})

ในขบวนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต จากภาพที่ 3 ยูเรเนียมและทอเรียม จะถูกแยกในขบวนการผลิตกรดฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญของการผลิตปุ๋ย ส่วนเรเดียมจะผ่านไปสู่การผลิตฟอสฟอริปซัม จะเห็นได้ว่าธาตุกัมมันตรังสีที่มีบทบาทสำคัญได้แก่ เรเดียม-226 (^{226}Ra), ทอเรียม-232 (^{232}Th) ซึ่งถ้าหากมีการนำวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต เช่น หินฟอสเฟต หรือฟอสฟอริปซัม มาเป็นวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้าง อาจทำให้เกิดการได้รับรังสีแกมมาจากภายนอก (External Exposure to Gamma ray) เพิ่มขึ้น

ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม เป็นค่าดัชนีแสดงความเป็นอันตรายทางรังสี (radiation hazard index) ชนิดหนึ่ง ที่ได้ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อเป็นตัวแทนของค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ซึ่งสามารถคำนวณให้เป็นค่าเพียงค่าเดียว โดย Ra_{eq} เป็นค่าผลรวมถ่วงน้ำหนักของกัมมันตรังสีของ 3 นิวไคลด์ คือ เรเดียม-226 (^{226}Ra), ทอเรียม-232 (^{232}Th) และ โพแทสเซียม-40 (^{40}K) ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักมาจากการประมาณว่า ค่ากัมมันตภาพรังสี 370 Bq/kg ของ ^{226}Ra จะให้ค่าปริมาณรังสีแกมมาเท่ากับ ^{232}Th 259 Bq/kg และ ^{40}K 4,810 Bq/kg ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Ra_{eq} = \frac{370}{370} A_{Ra} + \frac{370}{259} A_{Th} + \frac{370}{4,810} A_K \quad (36)$$

จะได้ว่า

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (37)$$

โดยที่ Ra_{eq} คือ ค่าความแรงรังสีสมมูลของเรเดียม มีหน่วยเป็น Bq/kg

A_{Ra} คือ ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ^{226}Ra มีหน่วยเป็น Bq/kg

A_{Th} คือ ค่าความแรงรังสีจำเพาะของ ^{232}Th มีหน่วยเป็น Bq/kg

A_K คือ ค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K มีหน่วยเป็น Bq/kg

ค่า Ra_{eq} จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยแต่ละประเภทจะบ่งชี้ว่าวัสดุนั้นๆ เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในด้านใด

ตารางที่ 5 แสดงค่าระดับความปลอดภัยของความแรงรังสีสมมูลของเรเดียมในวัสดุก่อสร้าง

Ra_{eq} (Bq/kg)	ประเภท	สิ่งก่อสร้าง
< 370	1	บ้านเรือน อาคารที่พักอาศัย
370 – 740	2	โรงงานอุตสาหกรรม
740 – 2,220	3	ถนน และสะพาน
2,220 – 3,700	4	สิ่งก่อสร้างที่ไม่มีผู้อยู่อาศัย
> 3,700	5	ไม่สมควรก่อสร้างใด ๆ ทั้งสิ้น

ที่มา: United nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)
(1997)

6. ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (External Hazard Index : H_{Ext})

เป็นค่าดัชนีความเสี่ยงอันตรายจากรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย เช่น จากพื้นดิน และจากวัสดุก่อสร้างอาคารบ้านเรือน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะเป็นรังสีแกมมาที่อำนาจทะลุทะลวงสูง ค่าดัชนีความเสี่ยงนี้ คำนวณได้จากสมการที่ 38

$$H_{Ext} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (38)$$

โดยที่ใช้ค่า A_{Ra} , A_{Th} และ A_K เดียวกับสมการ (37) หากค่า $H_{Ext} = 1$ และมีค่าวงน้ำหนักของ ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K มีความแรงจำเพาะเท่ากับ 370, 259 และ 4,810 Bq/kg ตามลำดับ จะพบว่าผู้ได้รับรังสีจากภายนอกจะได้รับปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนที่ยอมรับได้ซึ่งกำหนดโดย ICRP มีค่าเท่ากับ 1.5 mGy/y ดังนั้น ค่า H_{Ext} จึงมีค่าไม่ควรเกิน 1 (M. tufail, 2006)

7. ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (Gamma hazard index: I_γ)

เป็นค่าที่ใช้เพื่อประเมินความเป็นอันตรายจากรังสีแกมมาที่มาจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในวัสดุเฉพาะ คำนวณได้จากสมการที่ (39)

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{150} + \frac{A_{Th}}{100} + \frac{A_K}{1500} \quad (39)$$

โดยที่ใช้ค่า A_{Ra} , A_{Th} และ A_K เดียวกับสมการ (37)

7. ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (Gamma-absorbed dose rate : D) และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (Annual Effective Dose : E)

ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน จากแหล่งกำเนิดรังสีธรรมชาติของโลกสำหรับภายนอกอาคาร บ้านเรือน ซึ่งคำนวณจากค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{226}Ra (^{238}U), ^{232}Th และ ^{40}K โดยสมมติว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดอื่นที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ^{137}Cs , ^{90}Sr และ ^{235}U มีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ โดยปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน ของตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม สามารถคำนวณได้จากสมการ (40)

$$D = 0.429A_{Ra} + 0.666A_{Th} + 0.042A_K \quad (40)$$

โดยที่ D คือ ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน ในหน่วยของ (nGy/h), A_{Ra} , A_{Th} และ A_K ใช้ค่าเดียวกับสมการ (37) นอกจากนี้ยังสามารถนำค่า D ที่ได้ในสมการที่ (40) มาคำนวณหาค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (annual effective dose) ในพื้นที่ที่เก็บตัวอย่าง โดยกำหนดใน 1 ปี เท่ากับ 8760 ชั่วโมง ดังสมการที่ (41) (UNSCEAR, 2000)

$$E = D \times O \times F \times C \quad (41)$$

โดยที่ E คือ ปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี มีหน่วยเป็น mSv/y

D คือ ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน มีหน่วยเป็น nGy/h

O คือ ค่า Occupancy Factor มีค่าเท่ากับ 0.2 มีหน่วยเป็น h/y

F คือ ค่า Environment Factor มีค่าเท่ากับ 1

C คือ ค่า Absorbed-to-effective dose conversion factor มีค่าเท่ากับ 0.7 มีหน่วยเป็น mSv/nGy

8. กัมมันตภาพจำเพาะ (Specific Activity)

เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มข้นของกัมมันตภาพรังสี (Concentration of Radioactivity) ซึ่งหมายถึง กัมมันตภาพต่อหน่วยน้ำหนักของธาตุกัมมันตรังสี ดังนั้น กัมมันตภาพรังสีจำเพาะจึงมีหน่วยเป็น คูรีต่อกรัม (Ci/g) หรือ เบคเคอเรล (Bq/g)

9. รังสีแกมมา

เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงรังสีแกมมาเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$E = h\nu \quad (42)$$

$$E = hc / \lambda \quad (43)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของเพลงค์ (Planck's constant = 4.136×10^{-15} eV.s)

ν คือ ความถี่ของคลื่น (sec^{-1})

C คือ ความเร็วแสง (2.9979×10^{10} cm/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (cm)

เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited State) ภายหลังจากปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตาและกระบวนการอื่นๆที่จะกล่าวต่อไป การลดระดับพลังงานของนิวคลีออนลงสู่สถานะพื้น (Ground State) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่า รังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i เป็นสถานะกระตุ้น และ E_f เป็นสถานะ

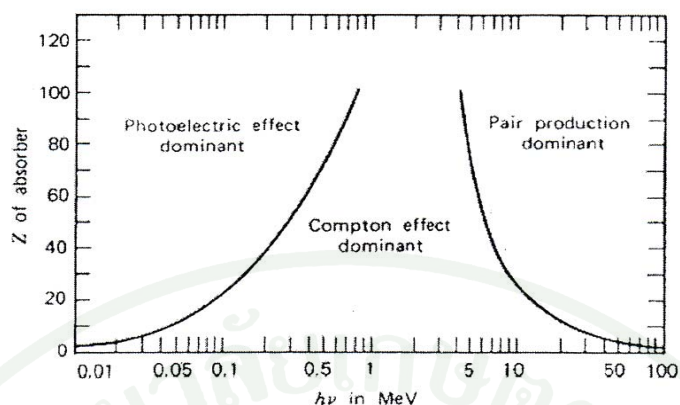
สุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุดลง แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad (44)$$

10. การวัดรังสีแกมมา

เนื่องจากรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแผ่ออกมาในรูปของโฟตอนหรือควอนตัมของพลังงานที่ไม่มีประจุมวลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง ดังนั้นการวัดพลังงานของรังสีแกมมาจึงต้องอาศัยอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับวัสดุ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

อันตรกิริยาของรังสีแกมมา (Gamma Interaction) เมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าชนกับวัสดุการชนนั้นอาจเกิดขึ้นกับนิวเคลียส อิเล็กตรอนหรือสนามรอบนิวเคลียส กระบวนการสูญเสียพลังงานเนื่องจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับวัสดุมีหลายกระบวนการ แต่เนื่องจากพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสอยู่ในช่วง 0.01 MeV ถึง 100 MeV ดังนั้นกระบวนการสูญเสียพลังงานซึ่งมีผลต่อการวัดสเปกตรัมที่สำคัญจึงมีเพียง 3 กระบวนการ คือ การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Absorption) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering) และแพร์โปรดักชัน (Pair Production) ปัจจัยที่ผลต่อการเกิดอันตรกิริยาคือ พลังงานของรังสีแกมมาและเลขอะตอมของวัสดุตัวกลาง การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกจะเกิดได้ดีกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำๆ ในช่วง 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV ส่วนการผลิตุจะเกิดขึ้นกับรังสีแกมมาพลังงาน 1.022 MeV ขึ้นไป และการกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดในช่วงพลังงานระหว่างอันตรกิริยาทั้งสองคือ 0.1 MeV ถึง 10 MeV ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยาหลักที่เกิดจากรังสีแกมมา

ที่มา: Knoll (1999)

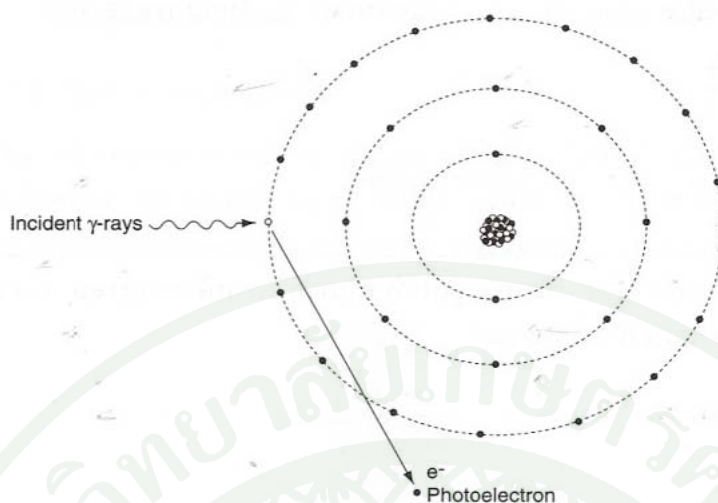
10.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) เป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอะตอมของสาร ซึ่งเมื่ออะตอมของสารถูกชนโดยรังสีแกมมา จะเกิดการถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) และอิเล็กตรอนที่หลุดออกมามีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของพลังงานของรังสีแกมมา กับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม ดังแสดงในภาพที่ 9 และสมการที่ 21

$$E_e = h\nu - B.E \quad (45)$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน หน่วย keV

$h\nu$ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่ตกกระทบสาร หน่วย keV

$B.E$ คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม หน่วย keV



ภาพที่ 11 แสดงการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

เนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก อะตอมสามารถดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาได้หมด จึงนิยมใช้ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกในการอธิบายการดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาในการทำการทดลองและความน่าจะเป็นในการเกิดอันตรกิริยาจะขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวดูดกลืน

10.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect) ในปรากฏการณ์คอมป์ตัน แกมมาโฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของสารแบบยืดหยุ่น ในการชนแบบนี้ ทั้งโมเมนตัมและพลังงานไม่สูญหาย โฟตอนจะเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงโคจรไปในทิศทางทำมุม ϕ กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของโฟตอน เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่าคอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton Electron) ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไป โดยทำมุม θ กับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังภาพที่ 12 และ ภาพที่ 13 โดยพลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ($h\nu$) และพลังงานของโฟตอนที่สะท้อนออกไป ($h\nu'$) มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ 46

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/mc^2)(1 - \cos\theta)} \quad (46)$$

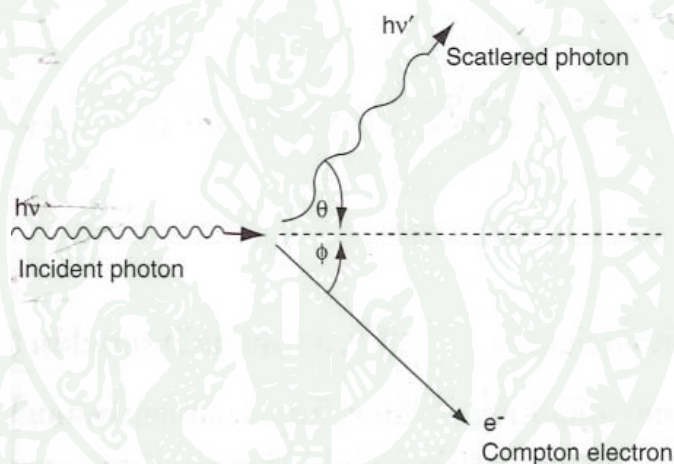
เมื่อ $h\nu$ คือ พลังงานเดิมของรังสีแกมมา

$h\nu'$ คือ พลังงานเดิมของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกไป

θ คือ มุมที่รังสีแกมมาเบนออกไปจากแนวเดิมที่เข้ามา

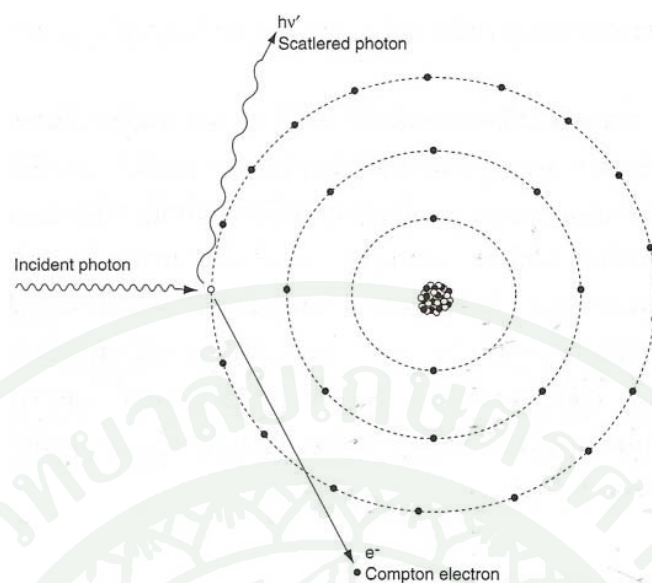
m คือ มวลของอิเล็กตรอนในสภาพหยุดนิ่ง

c คือ ความเร็วแสง เท่ากับ 2.9979×10^{10} cm/s



ภาพที่ 12 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาโฟตอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน

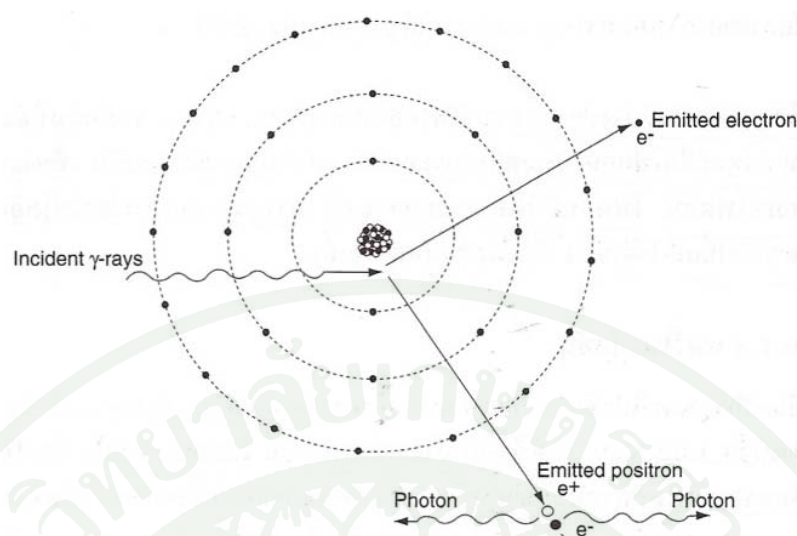
ที่มา: Knoll (1999)



ภาพที่ 13 แสดงการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน

ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

10.3 ปรากฏการณ์เพอร์โปรดักชัน (Pair Production) การผลิตสารคู่เกิดขึ้นได้เมื่อรังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามามีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV หรือมีพลังงานเป็น 2 เท่าของพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน ทำอันตรกิริยากับสนามไฟฟ้าของนิวเคลียส ทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน (Positron) ขึ้นมาจากโฟตอนที่วิ่งเข้ามาชนแล้วหายไป ถ้ารังสีแกมมาที่วิ่งเข้ามามีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV พลังงานส่วนเกินนี้จะเปลี่ยนไปเป็น พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน การผลิตสารคู่จะเกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆนิวเคลียส อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกดึงดูดด้วยนิวเคลียสแต่โพสิตรอนจะถูกผลักออก โดยปกติแล้วโพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานจลน์มากกว่าอิเล็กตรอน แต่ทั้งอิเล็กตรอนและโพสิตรอนต่างก็ถูกสกัดกั้นได้อย่างรวดเร็วในผลึกของตัวดูดกลืน ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนต่างก็ถูกสกัดกั้นได้อย่างรวดเร็วในผลึกของตัวดูดกลืน ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนกลับมารวมกันเป็นรังสีแกมมา 2 ตัว ที่มีพลังงาน 0.511 MeV ซึ่งเรียกว่า แอนนิฮิเลชัน (Annihilation) รังสีแกมมา 2 ตัวที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกันและกัน (180 องศา) และอาจจะเกิดหรือไม่เกิด อันตรกิริยากับผลึกของตัวดูดกลืนก็ได้ ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงการเกิดปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน

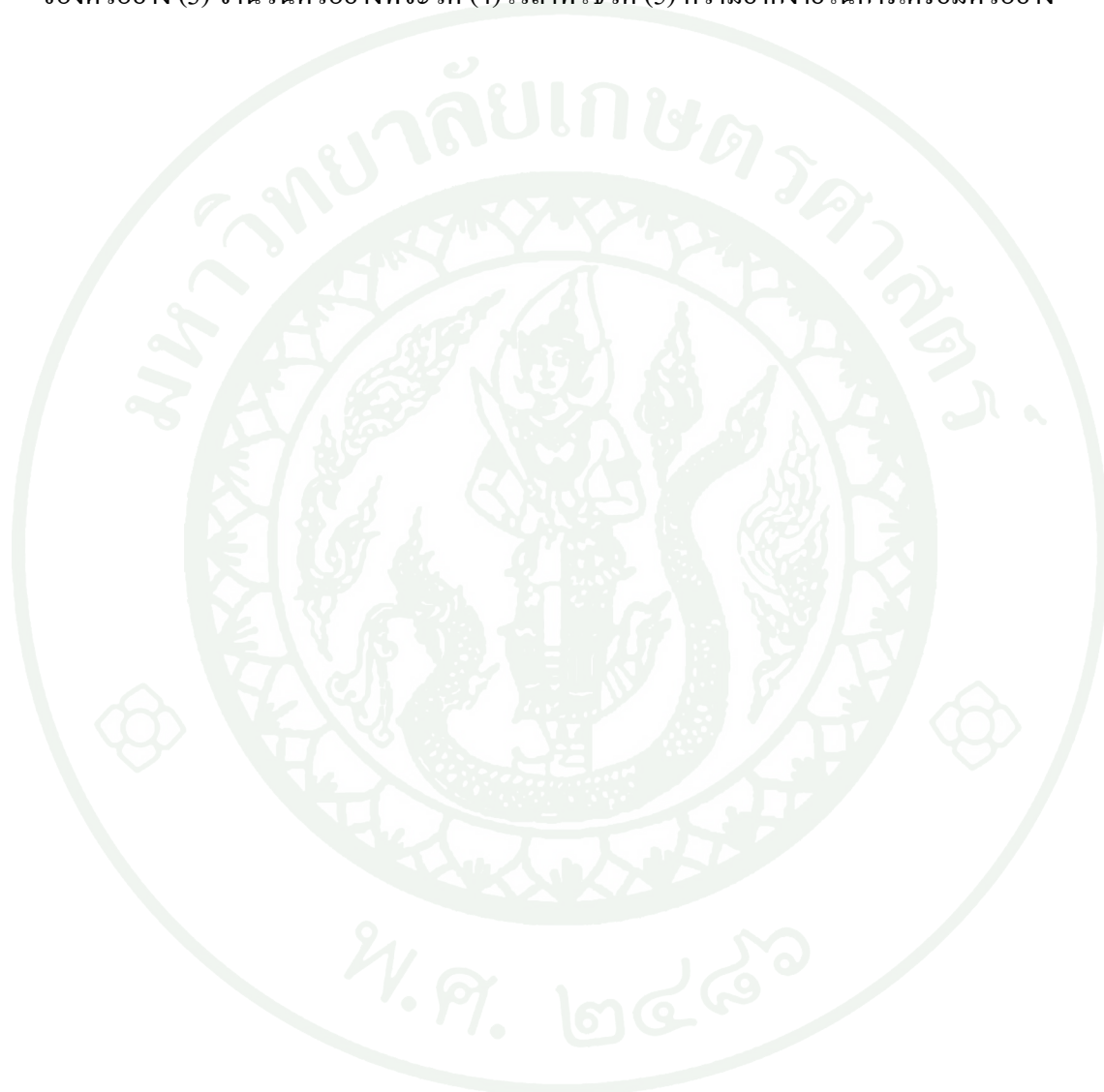
ที่มา: Cooper *et al.* (2003)

11. การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อม

การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมสามารถแบ่งได้เป็น การวัดรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Gamma-Ray Measurement) และการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริง (In-Situ Gamma-ray Measurement) โดยหลักการแล้วการวัดปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อมนั้น มาจากการวัดกลุ่มตัวอย่าง นั่นคือเมื่อทำการวัดเมื่อใด กลุ่มตัวอย่างที่ถูกวัดนั้นจะเป็นตัวแทนของสิ่งแวดล้อมนั้น ๆ ณ ขณะนั้น

การวัดปริมาณรังสีแกมมาของตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมในห้องปฏิบัติการในช่วงเวลาที่กำหนด เป็นวิธีที่ง่าย เพราะเป็นงานสั้น ๆ พื้นที่เล็ก ๆ และการวัดอยู่ภายใต้การควบคุมของสถานะในห้องปฏิบัติการ การเปรียบเทียบตัวอย่างของสิ่งแวดล้อมกับสารมาตรฐานทำได้ง่ายเพราะมีระบบการวัดที่เหมือนกันจึงสามารถเปรียบเทียบกันได้เลยโดยตรง ส่วนเรื่องของการเตรียมตัวอย่าง (Sample Preparation) นั้นโดยปกติตัวอย่างที่จะนำมาวัด จะต้องมีการเตรียมเพื่อให้อยู่ในรูปลักษณะเดียวกันเช่น มีขนาดเดียวกัน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ มีผิวหน้าเรียบ มีความหนาใกล้เคียงกัน โดยต้องไม่หนากว่าความหนาวิกฤต และในขณะเดียวกันตัวอย่างจะต้องนำกลับมาใช้ได้ อีก สำหรับตัวอย่างที่เป็นของแข็งและต้องการวัดรังสีแกมมา ปกติจะวัดโดยตรง ซึ่งอาจมีการเตรียมตัวอย่าง

ล่องหน้าเพียงเล็กน้อย เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดพอเหมาะกับหัววัด ส่วนภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างนั้นจะต้องทำด้วยสารที่มีเลขอะตอมต่ำเพื่อป้องกันการสะท้อนกลับเข้าไปในหัววัดอีก เพราะรังสีที่สะท้อนกลับอาจจะไปรบกวนฟลักที่พลังงานต่ำกว่า ดังจะกล่าวได้ว่า ในการวัดตัวอย่างเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์มากที่สุดนั้น มีหลักการต่างๆไปที่ต้องคำนึงถึงคือ (1) ชนิดของหัววัด (2) กัมมันตรังสีของตัวอย่าง (3) จำนวนตัวอย่างที่จะวัด (4) เวลาที่ใช้วัด (5) ความยากง่ายในการเตรียมตัวอย่าง



อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. ตัวตรวจหารังสีแกมมาแบบเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง ชนิดโคแอคเซียล
2. ระบบวัดแกมมาสเปกโตรสโกปี
 - 2.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Supply) Model 138 EM1
 - 2.2 ภาชนะขยายส่วนหน้า (Preamplifier) Model A 257P
 - 2.3 ภาชนะขยายสัญญาณหลัก
 - 2.4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multi-channel Analyzer)
3. Dewar (Model 729A)
4. อุปกรณ์กำบังรังสี (Shield)
5. โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล
6. เตาอบ
7. เครื่องชั่งไฟฟ้า ทศนิยม 3 ตำแหน่ง
8. สารมาตรฐาน IAEA Soil-375

9. ตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

อุปกรณ์ต่าง ๆ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1. ตัวตรวจหารังสีแบบสารกึ่งตัวนำ เป็นตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดสารกึ่งตัวนำแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง ชนิดโคแอคเซียล (High Purity Germanium Coaxial Type : HPGe) ตัวตรวจหานี้จะใช้เทคนิคการทำให้ผลึกมีความบริสุทธิ์มากขึ้น โดยใช้ผลึก Ge ขนาดใหญ่ ที่มีสารเจือปนน้อยกว่า 10^{10} อะตอมต่อ cm^2 จึงไม่จำเป็นต้องใช้ Li^+ เข้าไปแทนที่สารเจือปน และสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวตลอดเวลา แต่ใช้ในไนโตรเจนเหลวหล่อเย็นเมื่อใช้งานเท่านั้น ตัวตรวจหา HPGe ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ทำจากสารกึ่งตัวนำแบบพี (p-type HPGe coaxial detector) แกนกลางจะเป็นช่องว่าง ด้านนอกของหัววัดต่อเข้ากับขั้วบวก ด้านหน้าเป็นหน้าต่างทำจาก Al ที่มีความหนาประมาณ $700 \mu\text{m}$ ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงถึง 25 keV และวัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานอยู่ในช่วง 40 keV – 10 MeV รายละเอียดของหัววัดมีดังนี้

Detector: EG&G ORTEC

Detector Model: GEM 20 P4

Crystal Characteristics: Diameter 51.9 mm ; Length 90.63 mm

Recommended operating bias: Up to 5,000 Volt

ควบคุมอุณหภูมิโดยไนโตรเจนเหลว ขนาดบรรจุ 35 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงรูปตัวตรวจหารังสีแกมมาเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงที่ใช้ในการวัด

2. ระบบวัดแกมมาสเปกโตรสโคปี

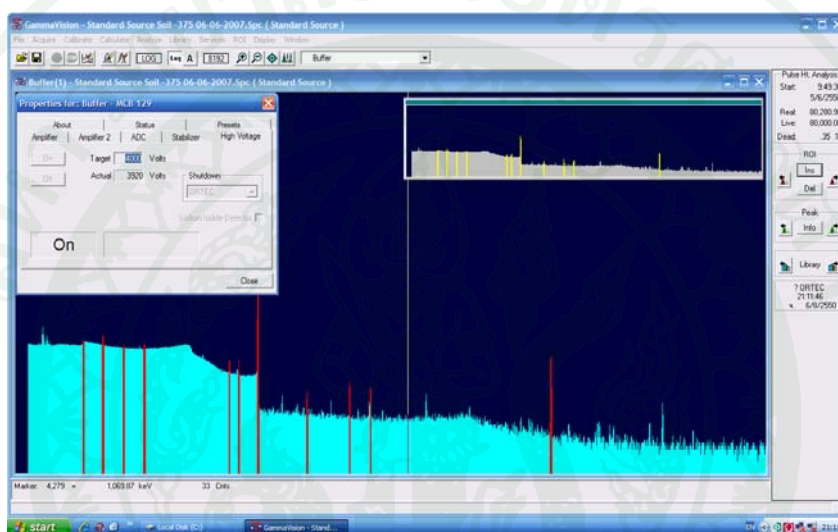
ใช้โปรแกรม Gamma Version V32 เป็นระบบปฏิบัติงานบนโปรแกรมวินโดวส์ ใช้ในการควบคุมการทำงานในระบบการวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้ ระบบการวัดจะประกอบด้วย

2.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Supply) Model 138 EM1 จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งสามารถปรับค่าได้และในการปฏิบัติงานครั้งนี้จ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่หัววัดรังสีแกมมา 4,000 โวลต์

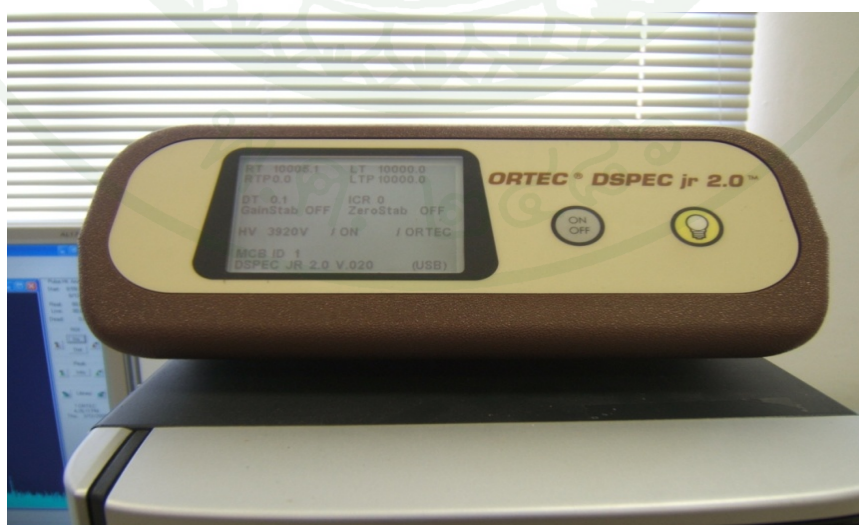
2.2 ภาขยายส่วนหน้า (Preamplifier) Model A 257P โดยทั่วไปตัวตรวจวัดถูกนำมาวางไว้ในตำแหน่งที่ไกลจากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ และถ้าสายต่อมีความยาวมากจะทำให้มีการสูญเสียสัญญาณไปบ้าง ดังนั้นจึงมี Preamplifier เพื่อทำหน้าที่เป็น impedance transformer ในการเปลี่ยน impedance สูงของเอาต์พุตของหัววัดให้เข้ากันกับ impedance ต่ำของ Amplifier

2.3 ภาขยายสัญญาณหลัก (Amplifier) เป็นส่วนที่รับสัญญาณพัลส์จากภาขยายสัญญาณส่วนหน้า แล้วนำมาปรับแต่งรูปร่างของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์

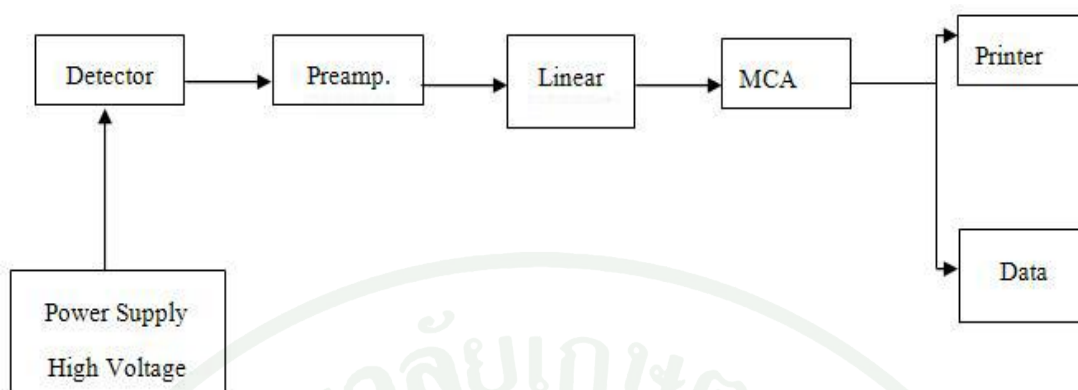
2.4 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multi-channel Analyzer) สัญญาณที่ออกจากตัวตรวจวัดรังสีแบบ HPGe จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องที่สามารถวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณได้หลายช่วงพร้อมกัน จำนวนช่องวิเคราะห์อาจเป็น 512,1024,2048 หรือ 16384 ช่อง เลขที่ช่อง (Channel number) จะแทนพลังงานของรังสี จำนวนนับได้ในแต่ละช่องจะแทนปริมาณของรังสี เครื่อง MCA จึงสามารถดูสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีแกมมาไว้ได้ทั้งหมด เรียกสเปกตรัมนี้ว่า สเปกตรัมของรังสีแกมมา



ภาพที่ 16 แสดงโปรแกรมวิเคราะห์สเปกตรัมรังสี Gamma Version V32



ภาพที่ 17 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multi Chanel Analyzer ; MCA)



ภาพที่ 18 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการวัด

3. Dewar (Model 729A) ทำจากวัสดุที่เรียกว่า ซีโอไลต์ (Zeolit) เป็นสารอินทรีย์ในธรรมชาติ ประกอบด้วย ซิลิเกตของอลูมิเนียมและโซเดียม ทำหน้าที่เก็บในโตรเจนเหลวเพื่อหล่อเย็นหัววัด



ภาพที่ 19 แสดง Liquid Nitrogen Dewar

4. อุปกรณ์กำบังรังสี (Shield) ทำจากตะกั่ว รูปทรงกระบอกหนา 11 เซนติเมตร ด้านผนังตะกั่วบุด้วยทองแดง เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำบังรังสีแกมมาจากสิ่งแวดล้อม มิให้เข้าสู่ตัวตรวจหารังสีแกมมา



ภาพที่ 20 แสดงอุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding)

5. โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล ใช้ในการเขียนกราฟและคำนวณสมการ
6. ตู้อบ ใช้ในการอบสารตัวอย่างเพื่อไล่ความชื้น



ภาพที่ 21 แสดงตู้อบสารตัวอย่าง



ภาพที่ 22 ชีท้อ Sartorius Model LC1201S

3. ตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

ในส่วนตัวอย่างหินฟอสเฟตและฟอสฟอริปซัมนั้น ผู้วิจัยไม่สามารถหาได้เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่นำเข้าจากต่างประเทศและเป็นผลพลอยได้จากโรงงานอุตสาหกรรมปุ๋ยเคมี ซึ่งผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มงานวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่นำตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมปุ๋ยเคมีมาให้ ส่วนปุ๋ยฟอสเฟตนั้นผู้วิจัยได้ทำการซื้อจากตัวแทนจำหน่ายหลายๆบริษัทที่สั่งนำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. หินฟอสเฟต (Rock Phosphate: Boucraa) จากประเทศโมร็อกโก ใช้สัญลักษณ์ RP1
2. หินฟอสเฟต (Rock Phosphate) จากประเทศโมร็อกโก ใช้สัญลักษณ์ RP2
3. หินฟอสเฟต (Rock Phosphate) จากประเทศแอลจีเรีย ใช้สัญลักษณ์ RP3
4. ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (12-60-0) จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ใช้สัญลักษณ์ MAP1 ประกอบด้วย ธาตุไนโตรเจน 12 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 60 เปอร์เซ็นต์ มีสารตัวเติม (Filler) 28 เปอร์เซ็นต์
5. ปุ๋ยทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (0-46-0) จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ใช้สัญลักษณ์ TSP1 ประกอบด้วย ธาตุฟอสฟอรัส 46 เปอร์เซ็นต์ มีสารตัวเติม (Filler) 54 เปอร์เซ็นต์
6. ปุ๋ยทริบเบิลซูเปอร์ฟอสเฟต (0-46-0) จากประเทศอิสราเอล ใช้สัญลักษณ์ TSP2 ประกอบด้วย ธาตุฟอสฟอรัส 46 เปอร์เซ็นต์ มีสารตัวเติม (Filler) 54 เปอร์เซ็นต์
7. ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) จากประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้สัญลักษณ์ DAP1 ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน 18 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 46 เปอร์เซ็นต์ มีสารตัวเติม (Filler) 36 เปอร์เซ็นต์

8. ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (18-46-0) จากประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้สัญลักษณ์ DAP2 ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน 18 เปอร์เซ็นต์ ธาตุฟอสฟอรัส 46 เปอร์เซ็นต์ มีสารตัวเติม (Filler) 36 เปอร์เซ็นต์

9. ฟอสฟอริปซัม (phosphogypsum) จากประเทศแอลจีเรีย ใช้สัญลักษณ์ PG1

10. ฟอสฟอริปซัม (phosphogypsum) จากประเทศโมร็อกโก ใช้สัญลักษณ์ PG2

ซึ่งสารตัวเติม หมายถึง สารที่ใส่เติมลงไปในการผสมปุ๋ย เพื่อให้ได้น้ำหนักปุ๋ยผสมครบ 100 หน่วย น้ำหนักสารนี้จะต้องไม่มีธาตุอาหารหลักเป็นส่วนประกอบ และไม่ทำปฏิกิริยากับปุ๋ยผสมนั้น เช่น ทราย ขี้เลื่อย ดินขาว

วิธีการ

1. ขั้นตอนการทดลอง

1.1 การเตรียมสารมาตรฐาน ใช้สารมาตรฐาน IAEA Soil-375 บรรจุในภาชนะพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ปิดฝาให้สนิท บันทึกน้ำหนัก วันที่เตรียมตัวอย่าง ความสูงของสารมาตรฐาน ปิดไว้ด้านข้างภาชนะ

1.2 การเตรียมสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่ใช้การทำวิจัยมี 10 ชนิด แบ่งเป็น หิน ฟอสเฟต 3 ชนิด ปุ๋ยฟอสเฟต 5 ชนิด และฟอสฟอริปซัม 2 ชนิด มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1.2.1 นำสารตัวอย่างทั้งหมดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

1.2.2 นำตัวอย่างแต่ละตัวอย่างไปบดให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วร่อนด้วยตะแกรง (mesh 40) บรรจุลงภาชนะพลาสติกขนาดเดียวกับที่ได้บรรจุสารมาตรฐานความสูงของสารตัวอย่างที่ 4.7 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับความสูงของสารมาตรฐาน พร้อมทั้งปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันการรั่วซึม บันทึกน้ำหนัก วันที่เตรียมตัวอย่าง และแหล่งที่มาของสารตัวอย่างปิดไว้ด้านข้างภาชนะ ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30 วัน เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลเชกูลาร์ โดยอ้างอิงจากความสัมพันธ์ระหว่าง ^{226}Ra กับ ^{222}Rn ซึ่งเป็นนิวไคลด์กัมมันตรังสีลูกของ ^{226}Ra พบว่า เพื่อจะให้เข้าสู่สภาวะสมดุลเชกูลาร์ ดังสมการที่ 14 ดังนั้นหากเริ่มต้นด้วยนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{226}Ra จะต้องใช้เวลาประมาณ 7 เท่าของค่าครึ่งชีวิตนิวไคลด์กัมมันตรังสี ^{222}Rn (3.82 วัน) หรือประมาณ 27 วัน สำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลเชกูลาร์ ภาชนะบรรจุสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 23 แสดงภาชนะบรรจุสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง

1.3 การตรวจสอบปริมาณ LN_2 ใน Dewar ถ้ามีปริมาณต่ำกว่า 15 % ของถังไม่ควรทำการวัดสารรังสีจะต้องเติม LN_2 ให้เต็มถึงก่อนจึงสามารถทำการวัดสารรังสีต่อไปได้ ในการเติม LN_2 จะต้องลดระดับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Supply) ของระบบวัด เสียก่อนหลังจากการเติมเต็มแล้ว ให้ทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที เพื่อให้ตัวตรวจวัดได้ปรับอุณหภูมิก่อนทำการวัด

1.4 การปรับตั้งตัวตรวจหารังสีแกมมาก่อนการทดลอง ได้ปรับตั้งตัวตรวจหารังสีแกมมาเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ เปิดโปรแกรม Gamma Version V3.2 และเซตค่าต่างๆ ให้ถูกต้อง ดังนี้คือ

1.4.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Power Supply) ที่ความต่างศักย์ 4,000 โวลต์

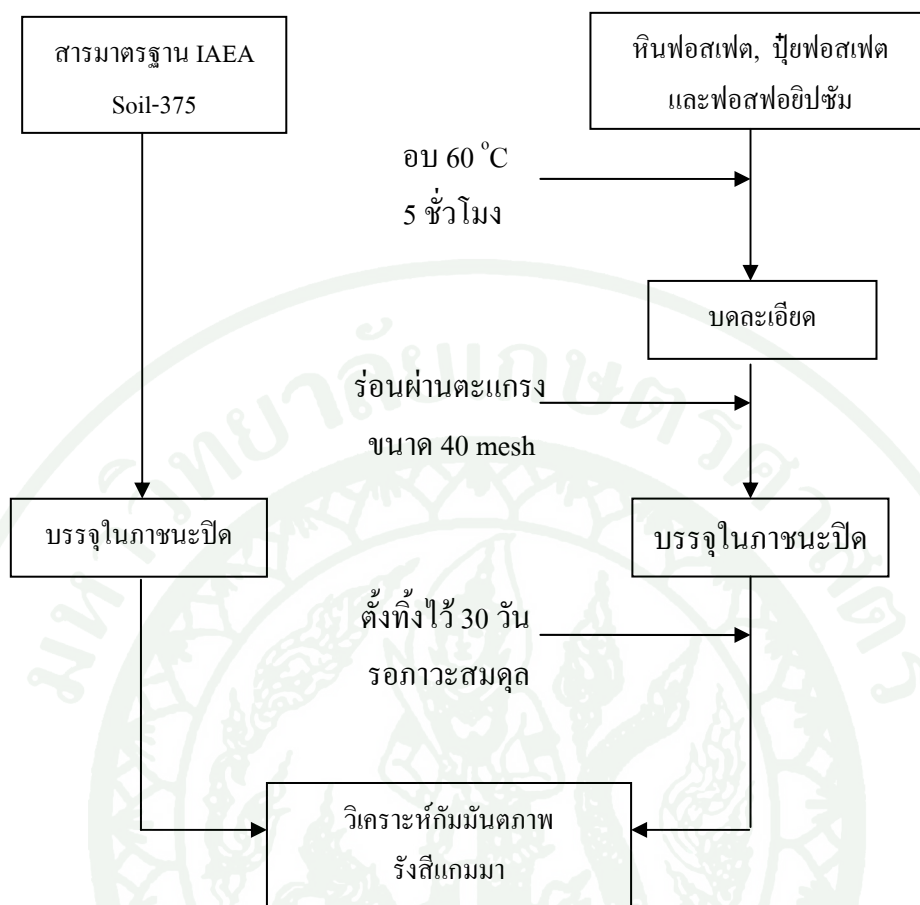
1.4.2 ภาคขยายสัญญาณหลัก (Amplifier) มีอัตราขยายหลัก (Coarse gain) เท่ากับ 20 และอัตราขยายละเอียด (fine gain) เท่ากับ 0.5

1.4.3 ดิสคริมิเนเตอร์ (Discriminator) มี LLD เท่ากับ 0.1 โวลต์ และ ADC gain เท่ากับ 4096

1.4.4 ตั้งเวลาในการตรวจนับวัดที่ 80,000 วินาที



ภาพที่ 24 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ขณะปฏิบัติงาน



ภาพที่ 25 แสดงผังการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ห้กัมมันตภาพรังสีแกมมา

2. ขั้นการทดลอง

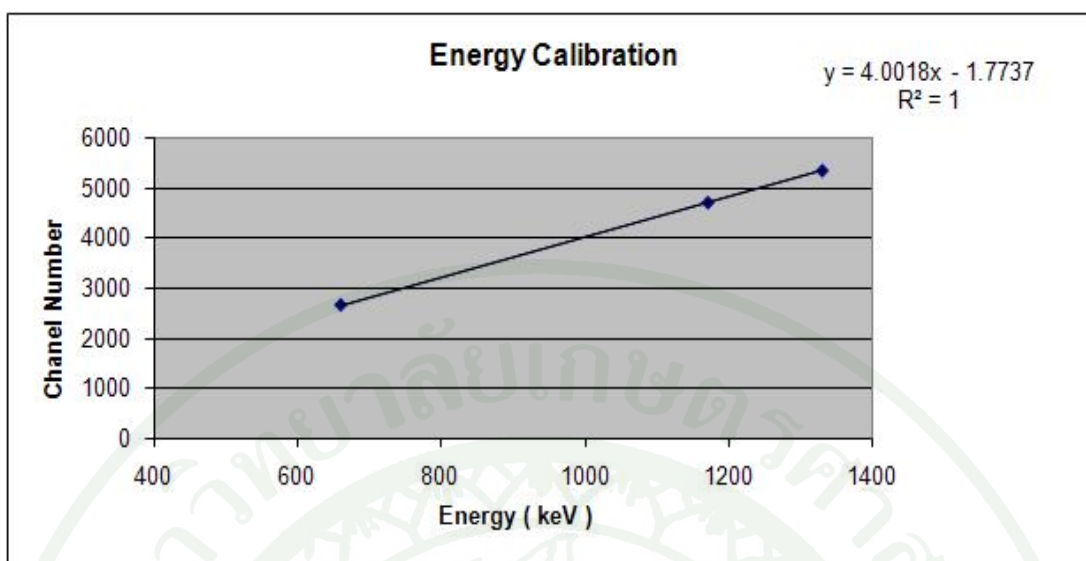
2.1 ทำการปรับเทียบพลังงาน (Energy Calibration) เนื่องจากภาวการณ์ขยายสัญญาณสามารถปรับกำลังขยายได้ ทำให้สัญญาณขาออกที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไป แม้ว่าสัญญาณขาเข้าคงที่ก็ตาม ผลที่เกิดขึ้นคือ ตำแหน่งของยอดฟิสิกสเปกตรัมพลังงานบนจอภาพเปลี่ยนไป ดังนั้นการใช้งานระบบวัดรังสีแกมมา จึงมีความจำเป็นต้องมีการสอบเทียบพลังงาน ซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของยอดสเปกตรัมและค่าพลังงานของรังสีแกมมาก่อนทำการวัดรังสีเสมอ โดยการวัดรังสีแกมมาจากสารมาตรฐานที่ทราบค่าพลังงานที่แน่นอนแล้วทำการสอบเทียบระหว่างตำแหน่งของยอดฟิสิกและค่าพลังงาน การเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานต้องให้ครอบคลุมกับค่าพลังงานที่ต้องการวัด

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน เพื่อช่วยในการสอบเทียบพลังงานคือ ซีเซียม-137 (^{137}Cs) โคบอลต์-60 (^{60}Co) ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าพลังงานรังสีแกมมาที่ใช้ในการสอบเทียบพลังงานและนิวไคลด์สารกัมมันตรังสี

สารกัมมันตรังสี	พลังงาน(keV)
^{137}Cs	661.62
^{60}Co	1173.23
	1332.52

การปฏิบัติงานในห้องทดลองนั้น การสอบเทียบพลังงานได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการทำงาน ผู้ปฏิบัติเพียงแต่ป้อนค่าพลังงานและเลือกหมายเลขช่อง โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมที่ยอดฟิสิกของแต่ละพลังงานจากสารกัมมันตรังสีมาตรฐานที่สอดคล้องกันให้แก่คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะประมวลผลออกมา ปรากฏว่าค่าพลังงานกับหมายเลขช่องมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงกราฟการสอบเทียบพลังงาน

2.2 ทำการปรับเทียบประสิทธิภาพ (Efficiency Calibration) ประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาจะขึ้นกับ geometry ของการวัด และพลังงานของรังสีแกมมา geometry ของการวัด เช่น การจัดวางตัวอย่าง ขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และภาชนะบรรจุสารตัวอย่างนั้นๆ คุณสมบัติโดยตรงของตัวตรวจหารังสีแกมมาค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาของการใช้งาน การหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาจึงต้องพิจารณาออกเป็นขนาดของตัวอย่างที่แตกต่างกัน หรือภาชนะบรรจุตัวอย่างที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลให้ประสิทธิภาพต่างกัน พร้อมกันนี้สามารถหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสี โดยการคำนึงถึงสารมาตรฐานนิวไคลด์กัมมันตรังสีเดียว เช่น ซีเซียม-137 (^{137}Cs) หรือหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาต่อช่วงกลุ่มนิวไคลด์กัมมันตรังสี การรู้ค่าประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา ที่พลังงานต่างๆ ณ ตำแหน่งที่แน่นอน จะสามารถใช้หาค่าความหนาแน่นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีได้ ประสิทธิภาพของระบบวัดมี 2 ประเภท คือ

2.2.1 ประสิทธิภาพแบบภายในตัว (Intrinsic Efficiency) มีค่าเท่ากับจำนวนสัญญาณที่นับได้ต่อจำนวนรังสีที่ตกกระทบตัวตรวจหารังสีแกมมา ประสิทธิภาพแบบภายในตัวขึ้นกับคุณสมบัติของตัวตรวจหารังสีแกมมาเพียงอย่างเดียว

2.2.2 ประสิทธิภาพแบบสัมบูรณ์ (Absolute Efficiency) เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนสัญญาณที่นับได้ต่อจำนวนรังสีที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดรังสี ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหัววัดรังสี และรายละเอียดของการวางต้นกำเนิดกับตัวตรวจหารังสีแกมมาได้แก่รูปร่างของต้นกำเนิด และระยะห่างระหว่างตัวตรวจหารังสีแกมมาในการทดลองครั้งนี้ใช้การหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาแบบสัมบูรณ์ (Absolute Efficiency) โดยใช้สารมาตรฐานจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) คือสารมาตรฐาน IAEA Soil-375 ซึ่งเป็นสารมาตรฐานที่ทราบความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

2.3 นำตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริม ที่เตรียมไว้ไปทำการวัดรังสีแกมมาตัวอย่างละ 3 ครั้ง โดยใช้เวลาในการตรวจวัดแต่ละครั้ง 80,000 วินาที

3. ขั้นตอนวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลของสารมาตรฐาน IAEA Soil-375 หาค่าจำนวนนับรังสีสุทธิของ ^{238}U โดยการวิเคราะห์พีคนิวไคลด์ลูก คือ ^{214}Pb ที่พลังงาน 295.22 และ 351.99 keV หาค่าจำนวนนับสุทธิของ ^{137}Cs โดยการวิเคราะห์ที่พีคพลังงาน 661.62 keV และหาค่าจำนวนนับสุทธิของ ^{40}K โดยการวิเคราะห์ที่พีคพลังงาน 1460.75 keV

3.2 วิเคราะห์หาจำนวนนับรังสีสุทธิของสารตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างแต่ละชนิด โดยวิเคราะห์ ^{232}Th (^{228}Ra) ใช้นิวไคลด์ลูก คือ ^{208}Tl ที่พลังงาน 583.14 keV วิเคราะห์ ^{238}U (^{226}Ra) ใช้นิวไคลด์ลูก คือ ^{214}Bi ที่พลังงาน 609.32 keV และหาค่าจำนวนนับสุทธิของ ^{40}K ที่พลังงาน 1460.75 keV

3.3 นำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ซึ่งปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่ได้นี้ จะถูกนำไปคำนวณหาความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสีต่อไป

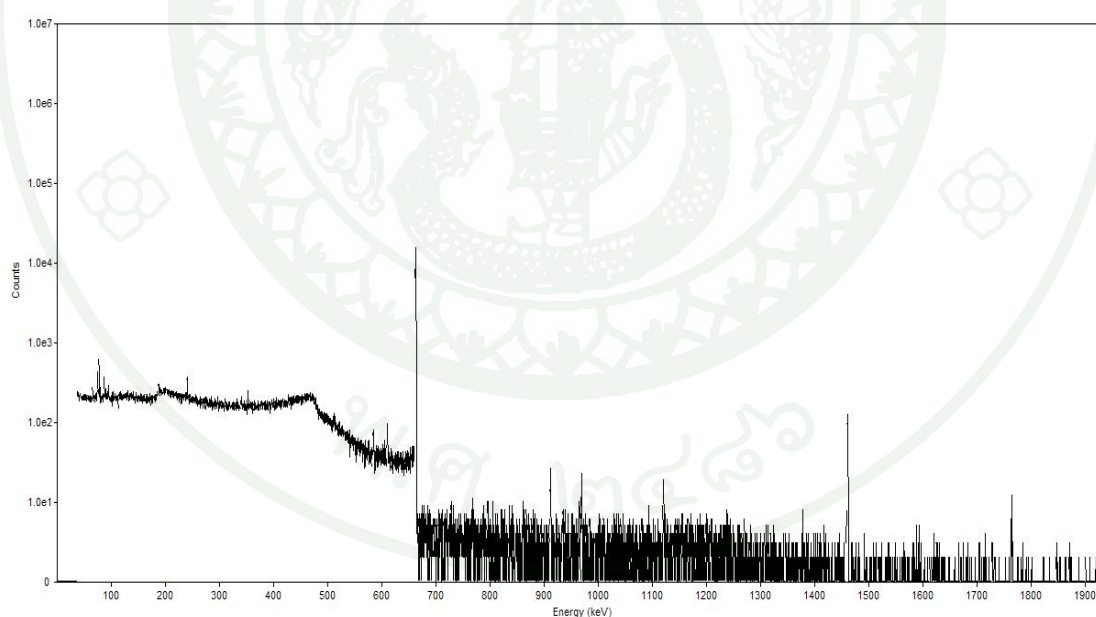
ผลและวิจารณ์

ผล

ในการทดลองนี้ใช้ตัวตรวจหารังสีแกมมาชนิดเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง วิเคราะห์ตัวอย่าง หินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม โดยใช้สารกัมมันตรังสีมาตรฐาน IAEA Soil-375 ในการหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา ได้ผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. ผลการหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา

ในการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมานั้น จะใช้สารมาตรฐาน IAEA Soil-375 ที่เตรียมไว้แล้วมาวัดรังสีแกมมา จะได้สเปกตรัมดังแสดงในรูปที่ 27 และ นำสเปกตรัมที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ใต้พีคที่พลังงาน 295.22, 351.99, 661.62 และ 1460.75 keV



ภาพที่ 27 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานที่ใช้ในการหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาเจอร์มานเนียมบริสุทธิ์สูง

เนื่องจากสารกัมมันตรังสีมีการสลายตัวตลอดเวลา ทำให้ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีลดลง ดังนั้นความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่ IAEA รับรองไว้ดังกล่าวไม่ถูกต้อง จึงต้องมีความจำเป็นที่จะต้องแก้ไขข้อดังกล่าว โดยการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสารมาตรฐาน ณ เวลาปัจจุบัน โดยใช้สมการที่ 23

$$A_n(t) = A_n(0) e^{-\lambda_n t} \quad (47)$$

เมื่อ $A_n(t)$ = ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์ชนิดที่ n ขณะทำการทดลองหาประสิทธิภาพ (เบ็กเคอเรล)

$A_n(0)$ = ความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์ชนิดที่ n ขณะรับรองผลความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสี (เบ็กเคอเรล)

λ_n = ค่าคงที่ของการสลายตัวของนิวไคลด์ชนิดที่ n (s^{-1}) มีค่าเท่ากับ $0.693 / t_{\frac{1}{2}}$

t = เวลาที่สารมาตรฐานสลายตัวตั้งแต่รับรองผลความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.5 ปี

เมื่อได้ค่ากัมมันตภาพรังสี ณ เวลาที่ทำการวัดแล้ว สามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่พลังงานของนิวไคลด์ต่างๆ โดยใช้สมการที่ 48

$$\varepsilon_E = \frac{R_n}{A_n(t) \times P_r} \quad (48)$$

$$R_n = R_t - R_b \quad (49)$$

เมื่อ ε_E คือ ประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาที่ค่าพลังงานใดๆ

R_n คือ อัตราการนับสุทธิของนิวไคลด์ n (counts / วินาที)

R_t คือ อัตราการนับทั้งหมดของนิวไคลด์ n (counts / วินาที)

R_b คือ อัตราการนับแบคกราวด์ของนิวไคลด์ n (counts / วินาที)

$A_n(t)$ คือ กัมมันตภาพรังสีของนิวไคลด์ n ขณะทดลองหาประสิทธิภาพ (Bq/kg)

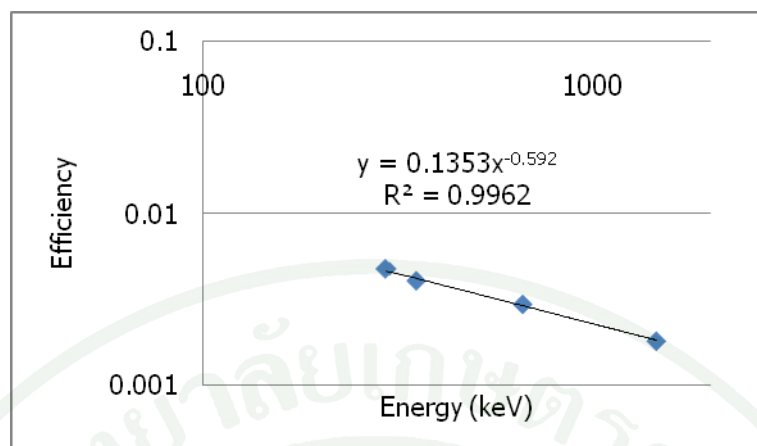
P_γ คือ ค่าคงตัวของจำนวนรังสีแกมมาในการสลายตัวหนึ่งครั้ง

ค่าจำนวนนับรังสีสุทธิที่พลังงานต่างๆ ของแต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะถูกนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาแต่ละพลังงาน ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงจำนวนนับรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ในสารมาตรฐาน IAEA Soil-375

นิวไคลด์	พลังงาน (keV)	R_t	R_b	R_n	ประสิทธิภาพของตัว ตรวจหารังสีแกมมา
^{238}U	295.22	28237	25365	1726	0.0048
	351.99	69825	66765	3060	0.0041
^{137}Cs	661.62	758818	14070	744748	0.0029
^{40}K	1460.75	7156	620	6536	0.0018

นำผลข้อมูลประสิทธิภาพตัวตรวจหารังสีแกมมาในแต่ละค่าพลังงานของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ไปสร้างกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ และหลังจากนั้นใช้วิธีกำลังสองน้อยสุด ในการหาแนวโน้มของประสิทธิภาพ เพื่อใช้เส้นแนวโน้มไปคำนวณหาประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาที่พลังงานอื่นๆ เพื่อที่จะนำค่าประสิทธิภาพที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา กับพลังงานต่างๆ

จากภาพที่ 26 จะได้สมการประสิทธิภาพของหัววัดรังสี คือ

$$y = 0.1353x^{-0.592} \quad (50)$$

เมื่อ y คือ ค่าประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมา

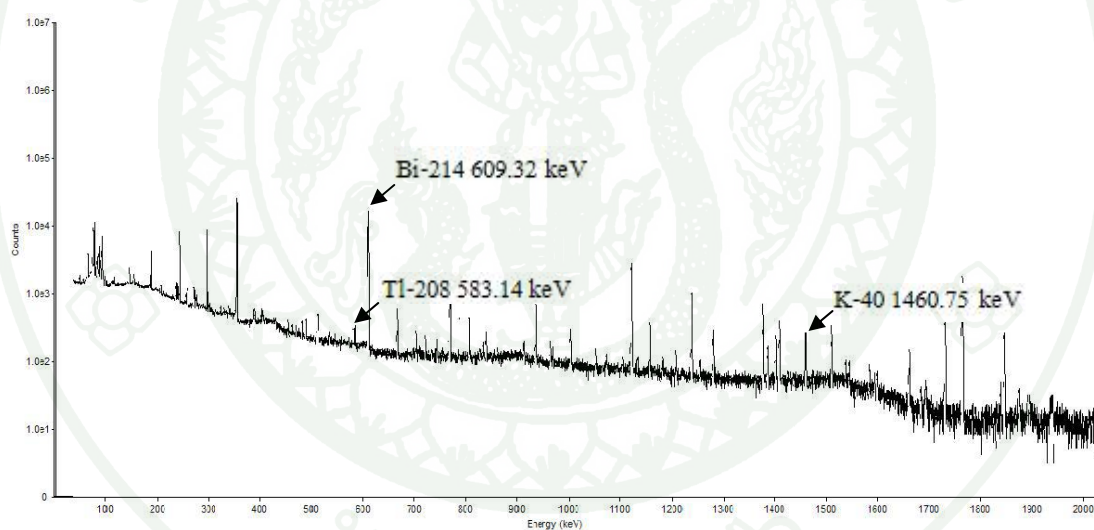
x คือ พลังงานของรังสี

แทนค่าพลังงานกัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในสมการ (50) จะได้ค่าประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ ดังตารางที่ 8

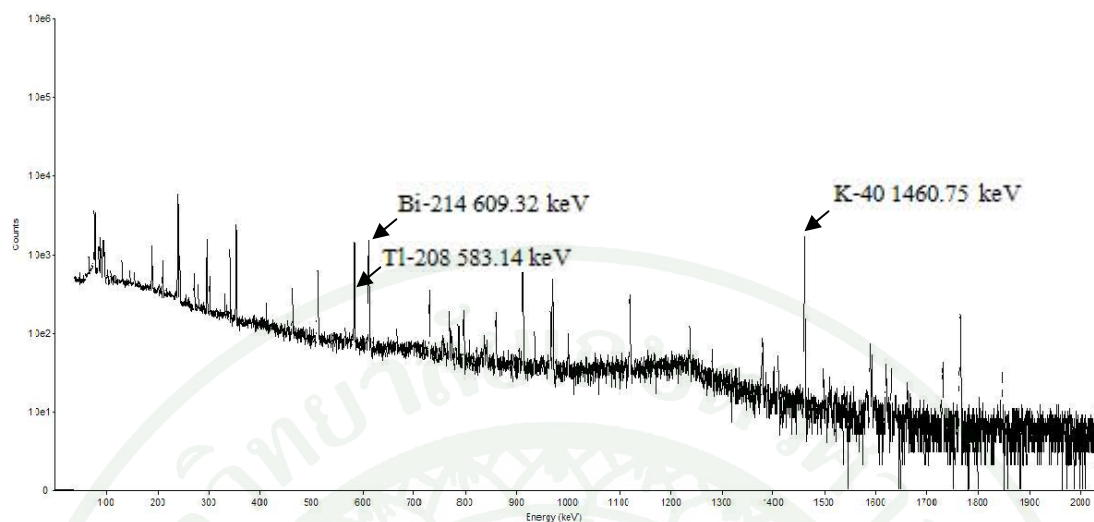
ตารางที่ 8 แสดงค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของตัวตรวจหารังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ

นิวไคลด์	ปลดปล่อยจากนิวไคลด์	พลังงาน (keV)	ประสิทธิภาพของ ตัวตรวจหารังสีแกมมา
^{232}Th	^{208}Tl	583.14	0.003119
^{238}U	^{214}Bi	609.32	0.003039
^{40}K	^{40}K	1460.75	0.001811

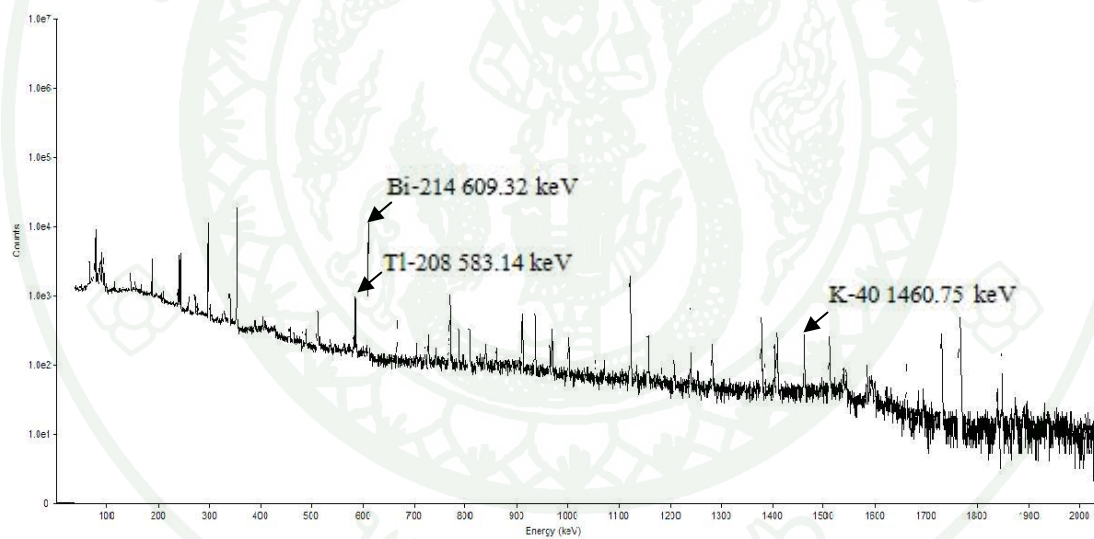
2. ผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP) ปู่ยฟอสเฟต (MAP, TSP, DAP) และฟอสฟอริปซัม (PG) แสดงดังภาพที่ 29 ถึง 38 และตารางที่ 9 ถึง 11



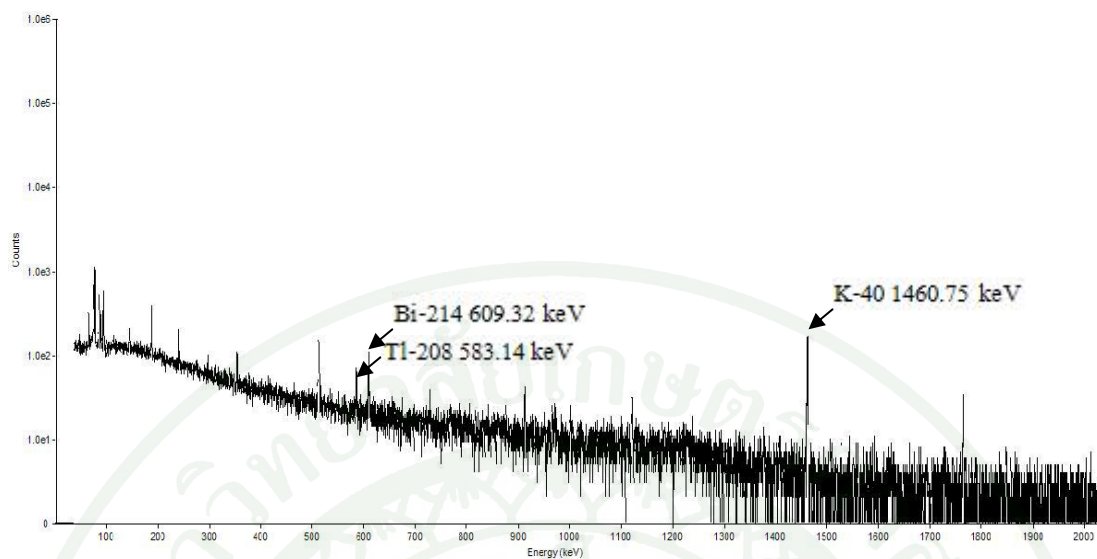
ภาพที่ 29 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ประเทศโมร็อกโก



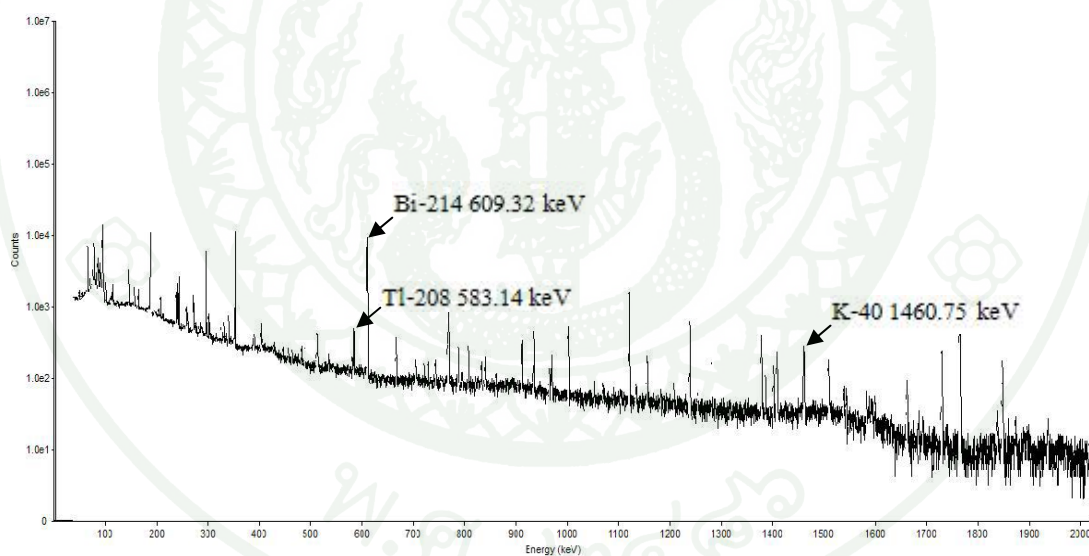
ภาพที่ 30 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP2 ประเทศโมร็อกโก



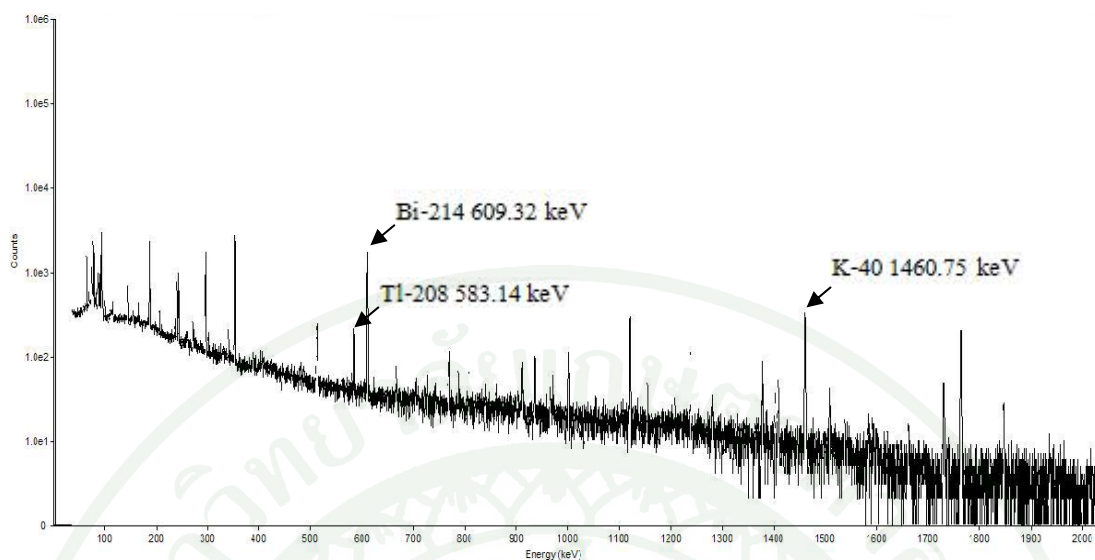
ภาพที่ 31 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากหินฟอสเฟต RP3 ประเทศเอธิโอเปีย



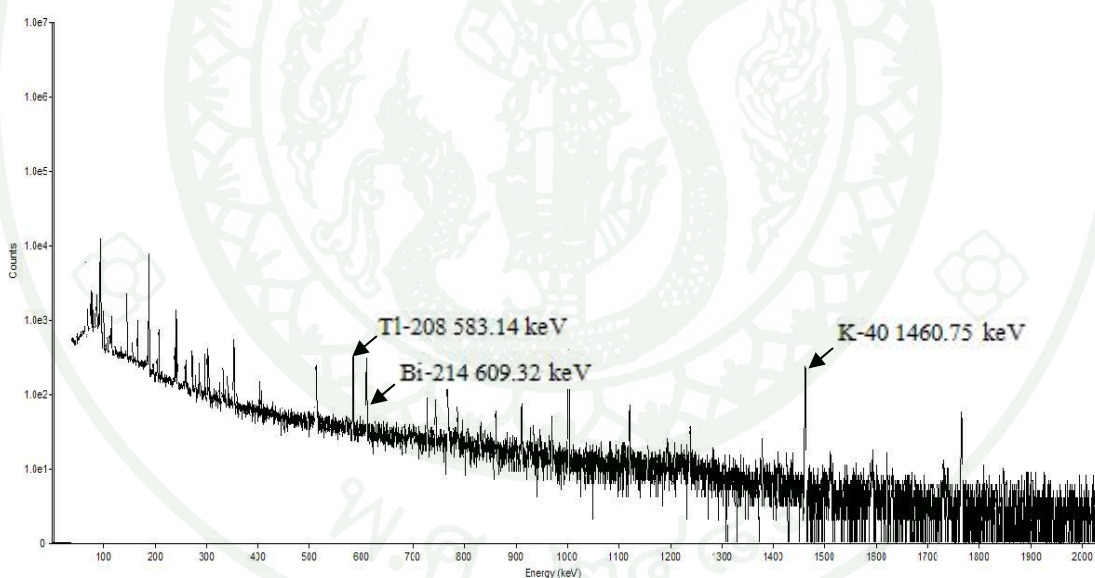
ภาพที่ 32 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต
MAP1 สาธารณรัฐประชาชนจีน



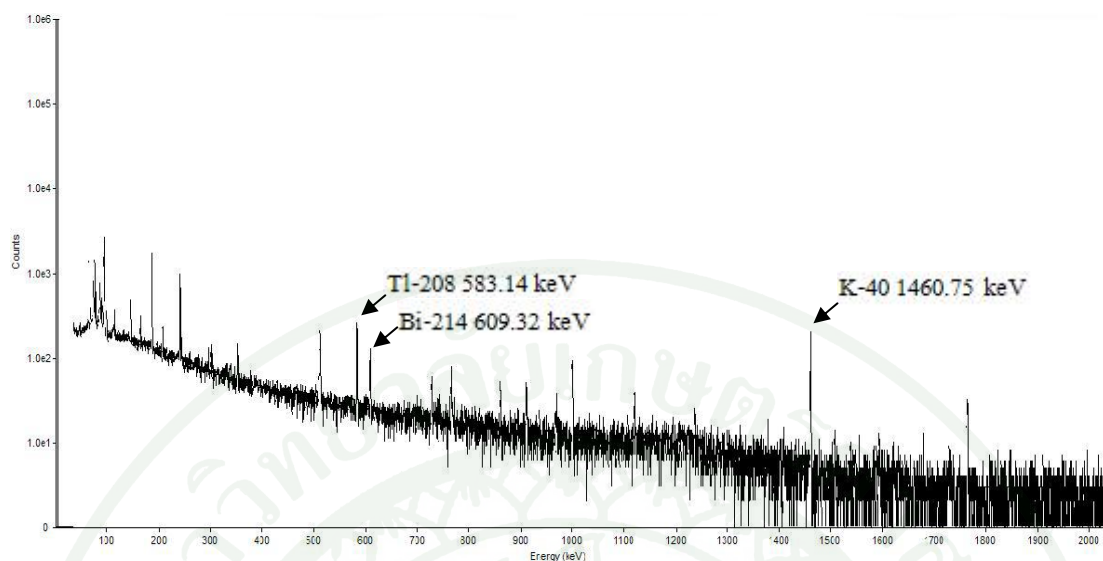
ภาพที่ 33 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์
ฟอสเฟต TSP1 สาธารณรัฐประชาชนจีน



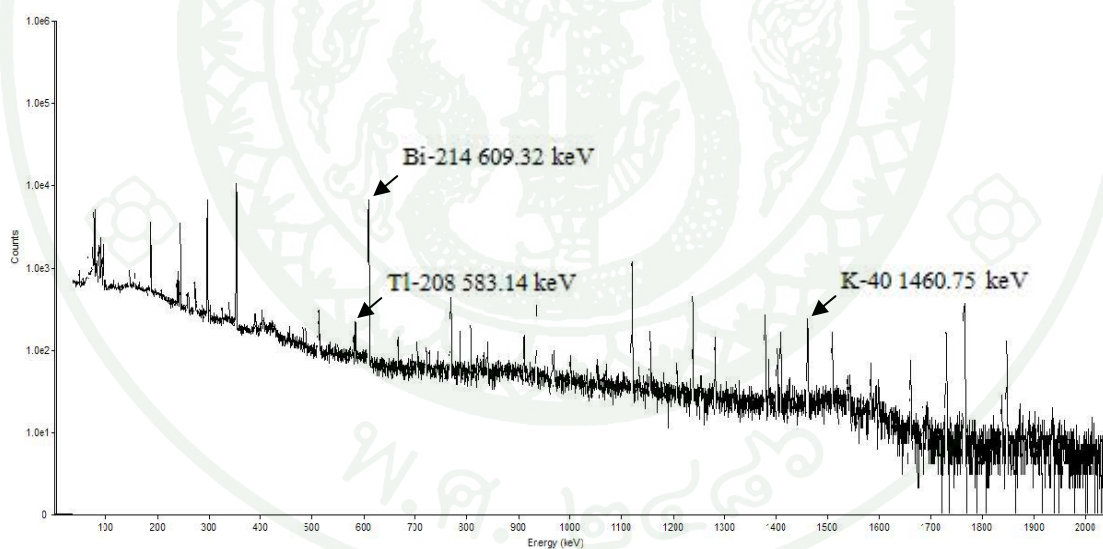
ภาพที่ 34 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์
ฟอสเฟต TSP2 ประเทศอิสราเอล



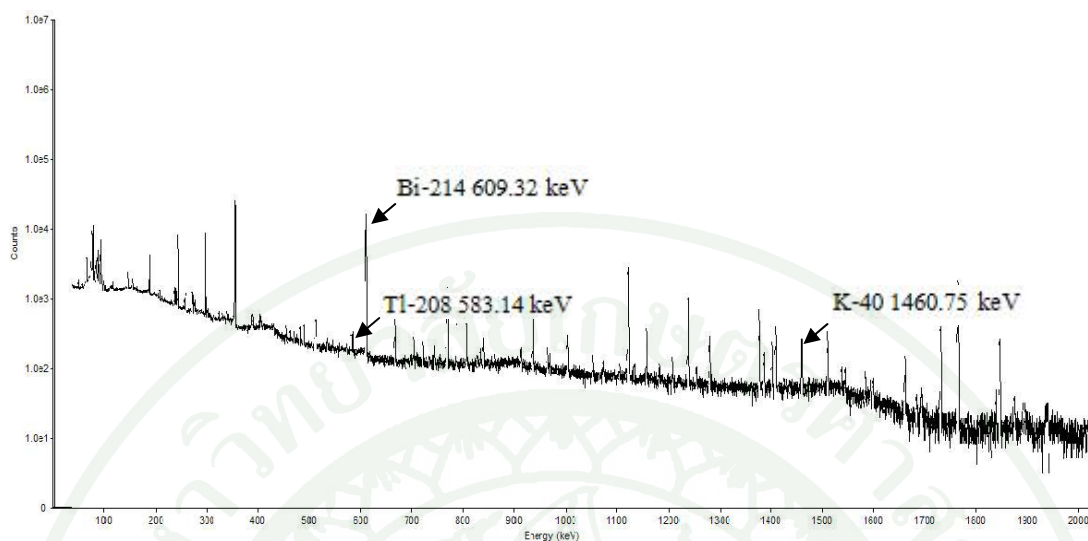
ภาพที่ 35 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดไดแอมโมเนียม
ฟอสเฟต DAP1 ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 36 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากปุ๋ยฟอสเฟต ชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต DAP2 ประเทศสหรัฐอเมริกา



ภาพที่ 37 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากฟอสฟอริปซัม PG1 ประเทศแอลจีเรีย



ภาพที่ 38 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาจากฟอสฟอริปซัม PG2 ประเทศโมร็อกโก

ตารางที่ 9 แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของ ^{232}Th โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{208}Tl ที่พลังงาน 583.14 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
1.RP1, Boucraa โมร็อกโก	5017	4354	663	5000	5020	640	5020	4350	670
2.RP2, โมร็อกโก	9171	1726	7445	9180	1730	7450	9175	1875	7300
3.RR3, แอลจีเรีย	8074	3903	4171	8010	3862	4148	8070	3905	4165
4.MAP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	719	490	229	650	438	212	645	441	204
5.TSP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	1683	840	843	1675	845	830	1650	822	828
6.TSP2, อีซราเอล	4735	2870	1865	4750	2890	1860	4650	2894	1756
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	2219	655	1564	2230	660	1570	2190	720	1470

ตารางที่ 9 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	1677	490	1187	1600	446	1154	1690	492	1198
9.PG1, แอลจีเรีย	2514	1820	694	2500	1832	668	2526	1826	700
10.PG2, โมร็อกโก	2036	1530	506	2006	1556	450	2025	1525	500

ตารางที่ 10 แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของ ^{238}U โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{214}Bi ที่พลังงาน 609.32 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
1. RP1,Boucraa โมร็อกโก	102094	4046	98048	101189	3209	97980	102267	4167	98100
2. RP2, โมร็อกโก	9578	1582	7996	9580	1575	8005	9398	1600	7798
3. RR3, แอลจีเรีย	69428	4529	64899	68589	4713	63876	69400	4595	64805
4. MAP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	843	431	412	835	446	389	810	431	379
5. TSP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	10027	784	9243	9987	848	9139	10010	990	9020
6. TSP2, อิสราเอล	55012	2597	52415	55112	2812	52300	55100	2750	52350
7. DAP1, สหรัฐอเมริกา	2158	644	1514	2170	650	1520	2100	630	1470
8. DAP2, สหรัฐอเมริกา	1002	469	533	980	490	490	995	495	500

ตารางที่ 10 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
9. PG1, แอลจีเรีย	39758	1715	38043	39289	1411	37878	39798	1713	38085
10. PG2, โมร็อกโก	32785	1418	31367	32700	1390	31310	32748	1448	31300

ตารางที่ 11 แสดงผลการนับวัดปริมาณรังสีสุทธีของ ^{40}K โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่
พลังงาน 1,460.75 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และ ฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
1.RP1, Boucraa โมร็อกโก	3176	1431	1745	3100	1388	1712	3100	1388	1712
2.RP2, โมร็อกโก	3565	1689	1876	3498	1711	1787	3500	1680	1820
3.RR3, แอลจีเรีย	2921	1193	1728	2800	1185	1615	2900	1180	1720
4.MAP, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	1381	131	1250	1390	170	1220	1375	105	1270
5.TSP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	2493	243	2250	2400	194	2206	10010	990	9020
6.TSP2, อิสราเอล	2874	941	1933	2870	940	1930	2800	900	1900
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	1870	90	1780	1900	90	1810	1830	90	1740
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	2095	122	1973	1995	95	1900	2005	25	1980

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3		
	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n	R_t	R_b	R_n
9.PG1, แอลจีเรีย	2080	500	1580	2018	540	1478	2095	490	1605
10.PG2, โมร็อกโก	2087	522	1565	2017	512	1505	2080	521	1559

3. ผลการวิเคราะห์ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่าง หินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

นำค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของตัวตรวจหารังสีแกมมาจากตารางที่ 8 และผลที่ได้จากการนับวัดปริมาณรังสีสุทธิของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างต่างๆ มาคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ย โดยใช้สมการที่ (51) และแสดงผลดังตารางที่ 12 ถึง 14

$$A_n = \frac{R_n}{\varepsilon_n \times P_\gamma \times m} \quad (51)$$

เมื่อ A_n คือ ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์ n (เบ็กเคอเรลต่อกิโลกรัม)

R_n คือ อัตราการนับสุทธิของนิวไคลด์ n (counts / วินาที)

ε_n คือ ประสิทธิภาพของตัวตรวจหารังสีแกมมาที่พลังงานนั้นๆ

P_γ คือ จำนวนรังสีแกมมาในการสลายตัวหนึ่งครั้ง

m คือ มวลของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (กิโลกรัม)

4. ค่าความจำกัดของการวัด จำกัดค่าของการวัด เป็นค่าที่ใช้บอกถึงสมรรถภาพในการวัดของระบบวัดรังสี ค่าขีดต่ำสุดที่หัววัดสามารถวัดได้ อธิบายด้วยค่า LLD (Lower Limit of Detection) หรือ MDC (Minimum Detectable Concentration) ดังสมการที่ 52 และ 53

$$LLD = \frac{4.66 \times S_B}{\varepsilon_n \times P_\gamma} \quad (52)$$

$$MDC = \frac{4.66 \times S_B}{\varepsilon_n \times P_\gamma \times m} \quad (53)$$

เมื่อ S_B คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการนับแบบกราวด์ (count/วินาที)

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าขีดจำกัดของการวัดขึ้นกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสี ปริมาณของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ เวลาในการวัด และค่าแบบกราวด์ ดังนั้นเพื่อให้ค่าขีดต่ำสุดที่วัดได้มีค่าต่ำ จำเป็นต้องใช้สารตัวอย่างที่มากพอ ในการวัดต้องใช้เวลานานพอสมควรและจำเป็นต้องลดค่าแบบกราวด์ลงให้มากที่สุด ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่คำนวณได้หากต่ำกว่าค่า MDC จะไม่รายงานผล เพราะไม่ถือว่าเป็นปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะที่มีอยู่จริงในสารตัวอย่าง (IAEA, 1989) ซึ่งจะแสดงผลดังตารางที่ 15

ตารางที่ 12 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{232}Th โดยพิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{208}Tl ที่พลังงาน 583.14 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th (Bq/kg)			เฉลี่ย (Bq/kg)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1.RP1,Boucraa โมร็อกโก	12.40 ± 1.81	11.97 ± 1.81	12.53 ± 1.81	12.30 ± 1.81
2.RP2,โมร็อกโก	75.93 ± 1.99	75.51 ± 1.98	75.82 ± 1.99	75.75 ± 1.99
3.RR3,แอลจีเรีย	139.22 ± 1.95	139.32 ± 1.95	136.51 ± 1.97	138.35 ± 1.96

ตารางที่ 12 (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th (Bq/kg)			เฉลี่ย (Bq/kg)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
4. MAP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	4.94 ± 0.75	4.57 ± 0.71	4.40 ± 0.71	4.64 ± 0.72
5. TSP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	17.48 ± 1.04	17.21 ± 1.04	17.16 ± 1.03	17.28 ± 1.04
6. TSP2, อิสราเอล	38.80 ± 1.81	38.70 ± 1.82	36.53 ± 1.81	38.01 ± 1.81
7. DAP1, สหรัฐอเมริกา	37.96 ± 1.30	38.11 ± 1.31	35.68 ± 1.31	37.25 ± 1.31
8. DAP2, สหรัฐอเมริกา	27.87 ± 1.09	27.09 ± 1.06	28.13 ± 1.10	27.70 ± 1.08
9. PG1, แอลจีเรีย	16.08 ± 1.53	15.48 ± 1.53	16.22 ± 1.53	15.93 ± 1.53
10. PG2, โมร็อกโก	11.42 ± 1.35	10.16 ± 1.35	11.29 ± 1.35	10.96 ± 1.35

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 12 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างหินฟอสเฟต และปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 12.30 ± 1.81 ถึง 138.35 ± 1.96 Bq/kg และ 4.64 ± 0.72 ถึง 38.01 ± 1.81 Bq/kg ในส่วนฟอสฟอริปซัมมีค่าเท่ากับ 15.93 ± 1.53 Bq/kg สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 10.96 ± 1.35 Bq/kg สำหรับ PG2, โมร็อกโก

ตารางที่ 13 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{238}U โดย
พิจารณานิวไคลด์กัมมันตรังสีของ ^{214}Bi ที่พลังงาน 609.32 keV ในตัวอย่างหิน
ฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริซึม

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U (Bq/kg)			เฉลี่ย (Bq/kg)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1.RP1,Boucra โมร็อกโก	3511.26±11.67	3508.83 ±11.57	3513.13 ±11.68	3511.07±11.64
2.RP2,โมร็อกโก	2262.41±9.48	2226.74±9.44	2259.13±9.48	2249.43±9.47
3.RR3,แอลจีเรีย	286.35±3.78	286.67±3.78	279.26±3.76	284.09±3.77
4.MAP1,สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	17.02 ± 1.48	16.07±1.48	15.66±1.46	16.25±1.47
5.TSP1,สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	366.94±4.13	362.81±4.13	358.08±4.16	362.61±4.14
6.TSP2,อิสราเอล	2088.24±9.56	2083.66±9.59	2085.65±9.58	2085.85±9.58
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	70.37±2.46	70.65±2.45	68.33±2.43	69.78±2.45
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	23.96±1.72	22.03±1.72	22.48±1.74	22.82±1.73
9.PG1,แอลจีเรีย	1688.24±9.04	1680.92±8.95	1690.11±9.04	1686.43±9.01
10.PG2,โมร็อกโก	1356.24±8.00	1353.77±7.98	1353.34±8.00	1354.45±7.99

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 13 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต และปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 284.09 ± 3.77 ถึง $3,511.07 \pm 11.64$ Bq/kg และ 16.25 ± 1.47 ถึง $2,085.85 \pm 9.58$ Bq/kg ในส่วนฟอสฟอริซึม มีค่าเท่ากับ $1,686.43 \pm 9.01$ Bq/kg สำหรับ PG1,แอลจีเรีย และ $1,354.45 \pm 7.99$ Bq/kg สำหรับ PG2,โมร็อกโก

ตารางที่ 14 แสดงผลการคำนวณหาปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{40}K โดยพิจารณา
นิวไคลด์กัมมันตรังสี ที่พลังงาน 1460.75 keV ในตัวอย่างหินฟอสเฟต,
ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริซึม

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K (Bq/kg)			เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
1.RP1, Boucraa โมร็อกโก	452.98±17.62	444.41±17.39	456.87±17.62	451.42±17.54
2.RP2, โมร็อกโก	436.65±16.21	408.09±15.95	434.63±16.14	426.46±16.10
3.RR3, แอลจีเรีย	486.98±18.82	463.88±18.74	472.44±18.68	474.43±18.74
4.MAP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	374.35±11.65	365.37±11.83	380.34±11.52	373.36±11.67
5.TSP1, สาธารณรัฐ ประชาชนจีน	647.46±15.05	634.80±14.66	608.33±14.34	630.20±14.68
6.TSP2, อิสราเอล	558.23±17.84	557.36±17.83	548.70±17.57	554.76±17.74
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	599.72±14.92	609.82±15.03	586.24±14.76	598.59±14.90
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	642.97±15.34	619.18±14.90	645.26±14.68	635.81±14.98
9.PG1, แอลจีเรีย	508.24±16.34	475.43±16.27	516.29±16.35	499.99±16.32
10.PG2, โมร็อกโก	490.49±16.01	471.69±15.76	488.61±15.98	483.60±15.92

จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในตารางที่ 14 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต และปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 426.46 ± 16.10 ถึง 474.43 ± 18.74 Bq/kg, 373.36 ± 11.67 ถึง 635.81 ± 14.98 Bq/kg ในส่วนฟอสฟอริซึม มีค่าเท่ากับ 499.99 ± 16.32 Bq/kg สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 483.60 ± 15.92 Bq/kg สำหรับ PG2, โมร็อกโก

ตารางที่ 15 แสดงผลการคำนวณหาค่า LLD (Lower Limit of Detection) และค่า MDC (Minimum Detectable Concentration) เฉลี่ยของการวัด สำหรับนิวไคลด์กัมมันตรังสีในตัวอย่างหิน ฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริซึม

ชื่อตัวอย่าง	ค่า LLD (Lower Limit of Detection) (Bq)			ค่า MDC (Minimum Detectable Concentration)(Bq/kg)		
	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁰ K	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁰ K
1.RP1, Boucraa โมร็อกโก	2.10	13.52	20.37	8.43	54.24	81.75
2.RP2, โมร็อกโก	2.37	11.29	19.21	9.27	44.12	75.03
3.RR3, แอลจีเรีย	2.27	4.38	21.77	9.12	17.59	87.35
4.MAP1, สาธารณรัฐประชาชนจีน	0.73	1.48	8.36	3.38	6.85	54.36
5.TSP1, สาธารณรัฐประชาชนจีน	1.09	4.34	15.38	4.83	19.30	68.41
6.TSP2, อิสราเอล	1.89	1.00	18.52	8.45	44.63	82.68
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	1.17	2.19	13.33	6.08	11.43	69.45
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	1.00	1.60	13.85	5.05	8.05	69.78
9.PG1, แอลจีเรีย	1.43	8.44	15.29	7.11	41.99	76.06
10.PG2, โมร็อกโก	1.30	7.69	15.31	6.28	37.24	74.18

หมายเหตุ ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะเฉลี่ยของ ²³²Th, ²³⁸U และ ⁴⁰K มีค่าสูงกว่าค่าขีดจำกัดของการวัดในทุกๆ ตัวอย่าง

4. ผลการคำนวณวิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}), ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอก (H_{Ext}), ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (I_γ), ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (E) ในตัวอย่างหิน ฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริซึม สามารถคำนวณได้จากผลข้อมูลจากการวิเคราะห์ค่าปริมาณกัมมันตภาพรังสีจำเพาะ ²³²Th, ²³⁸U และ ⁴⁰K ของตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และ

ฟอสฟอริมซัม มาทำการคำนวณโดยใช้สมการที่ 37, 38, 39, 40 และ 41 ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}), ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{Ext}), ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (I_γ), ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (E) ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	Ra_{eq} (Bq/kg)	H_{Ext}	I_γ	D nGy/h	E mSv/y
1.RP1, Boucraa โมร็อกโก	3,563.42	9.63	23.83	1,533.40	1.88
2.RP2, โมร็อกโก	2,390.59	6.46	16.04	1,033.37	1.27
3.RP3, แอลจีเรีย	518.46	1.40	3.59	233.94	0.29
4.MAP, สาธารณรัฐประชาชนจีน	51.63	0.14	0.40	25.74	0.03
5.TSP1, สาธารณรัฐประชาชนจีน	435.85	1.18	3.01	193.54	0.24
6.TSP2,อิสราเอล	2,182.92	5.90	14.66	943.44	1.16
7.DAP1, สหรัฐอเมริกา	169.14	0.45	1.24	79.88	0.10
8.DAP2, สหรัฐอเมริกา	111.39	0.30	0.85	54.94	0.07
9.PG1, แอลจีเรีย	1,747.71	4.72	11.74	755.09	0.93
10.PG2, โมร็อกโก	1,407.36	3.80	9.46	608.67	0.75
UNSCEAR 1988, 1993, 2000	370	1	1	55	0.48

จากตารางที่ 16 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมของตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 518.46 ถึง 3,563.42 Bq/kg, ปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 51.63 ถึง 2,182.92 Bq/kg และฟอสฟอริปซัม มีค่าเท่ากับ 1,747.71 Bq/kg สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 1,407.36 Bq/kg สำหรับ PG2, โมร็อกโก

ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายของตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 1.40 - 9.63, ปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.14 - 5.90 และฟอสฟอริปซัม มีค่าเท่ากับ 4.72 สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 3.80 สำหรับ PG2, โมร็อกโก

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่รับจากรังสีแกมมาของตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 3.59 - 23.83, ปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.40 - 14.66 และฟอสฟอริปซัม มีค่าเท่ากับ 11.74 สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 9.46 สำหรับ PG2, โมร็อกโก

ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนของตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 233.94 - 1,533.40 nGy/h, ปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 25.74 - 943.44 nGy/h และฟอสฟอริปซัม มีค่าเท่ากับ 755.09 nGy/h สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 608.67 nGy/h สำหรับ PG2, โมร็อกโก

และค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปีของตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.29 - 1.88 mSv/y, ปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 - 1.16 mSv/y และฟอสฟอริปซัม มีค่าเท่ากับ 0.93 mSv/y สำหรับ PG1, แอลจีเรีย และ 0.75 mSv/y สำหรับ PG2, โมร็อกโก

วิจารณ์

1. วิจารณ์ผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างหินฟอสเฟต

1.1 วิจารณ์ผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต แสดงดังตารางที่ 17

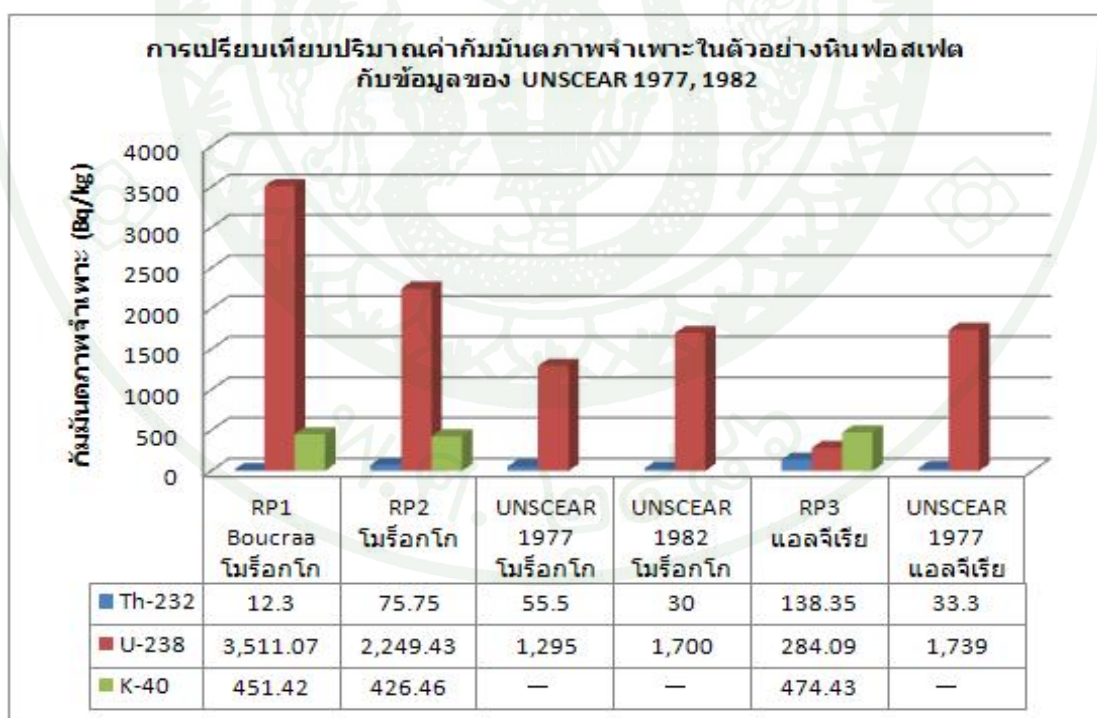
ตารางที่ 17 แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg)		
	^{232}Th	^{238}U	^{40}K
1. RP1, Boucraa โมร็อกโก	12.30±1.81	3,511.07±11.64	451.42±17.54
2. RP2, โมร็อกโก	75.75 ± 1.99	2,249.43 ± 9.47	426.46±16.10
3. RP3, แอลจีเรีย	138.35±1.96	284.09 ± 3.77	474.43±18.74

จากข้อมูลตารางที่ 17 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งเท่ากับ $138.35 \pm 1.96 \text{ Bq/kg}$ และ $474.43 \pm 18.74 \text{ Bq/kg}$ ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1) ที่นำเข้าจาก Boucraa ประเทศโมร็อกโก จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งเท่ากับ $3,511.07 \pm 11.64 \text{ Bq/kg}$

ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1) Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ $12.30 \pm 1.81 \text{ Bq/kg}$ ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ $284.09 \pm 3.77 \text{ Bq/kg}$ และปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ $426.46 \pm 16.10 \text{ Bq/kg}$

1.2 วิจัยนผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K กับข้อมูลจาก UNSCEAR ในตัวอย่างหินฟอสเฟต แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต กับข้อมูลจาก UNSCEAR

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก และตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) จากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR 1977 (โมร็อกโก), UNSCEAR1982 (โมร็อกโก) และ UNSCEAR 1982 (แอลจีเรีย)

ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก และตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) จากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR 1977, 1982 (โมร็อกโก) และ UNSCEAR 1982 (แอลจีเรีย)

1.3 ผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟตกับข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟตจากการทดลองกับข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (Bq/kg)		
	^{232}Th	^{238}U	^{40}K
RP1, Boucraa in โมร็อกโก	12.30±1.81	3,511.07±11.64	451.42±17.54
RP2, โมร็อกโก	75.75 ± 1.99	2,249.43 ± 9.47	426.46±16.10
งานวิจัยต่างประเทศ (โมร็อกโก)	¹ 20, ² 30	^{1,2} 1,700	¹ 10
3. RP3, แอลจีเรีย	138.35±1.96	284.09 ± 3.77	474.43±18.74
งานวิจัยต่างประเทศ (แอลจีเรีย)	¹ 64	¹ 619	¹ 22

หมายเหตุ: ¹ M. Tufail, Nasim Akhtar and M. Waqas. (2006)

² M. Azouazi, Y. Ouahidi, S. Fakhi, Y. Andres, J.Ch. Abbe and M.Benmansour. (2001)

จากตารางที่ 18 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, Boucraa) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่าน้อยกว่าข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศ ส่วนในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก และในหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากกว่า ข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศ

สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, Boucraa) (RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่ามากกว่า ข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศ ส่วนในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่าน้อยกว่า ข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศ

สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, Boucraa), (RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก และในหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากกว่า ข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศทั้งหมด

2. วิจัยผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต

2.1 วิจัยผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต แสดงดังตารางที่ 19

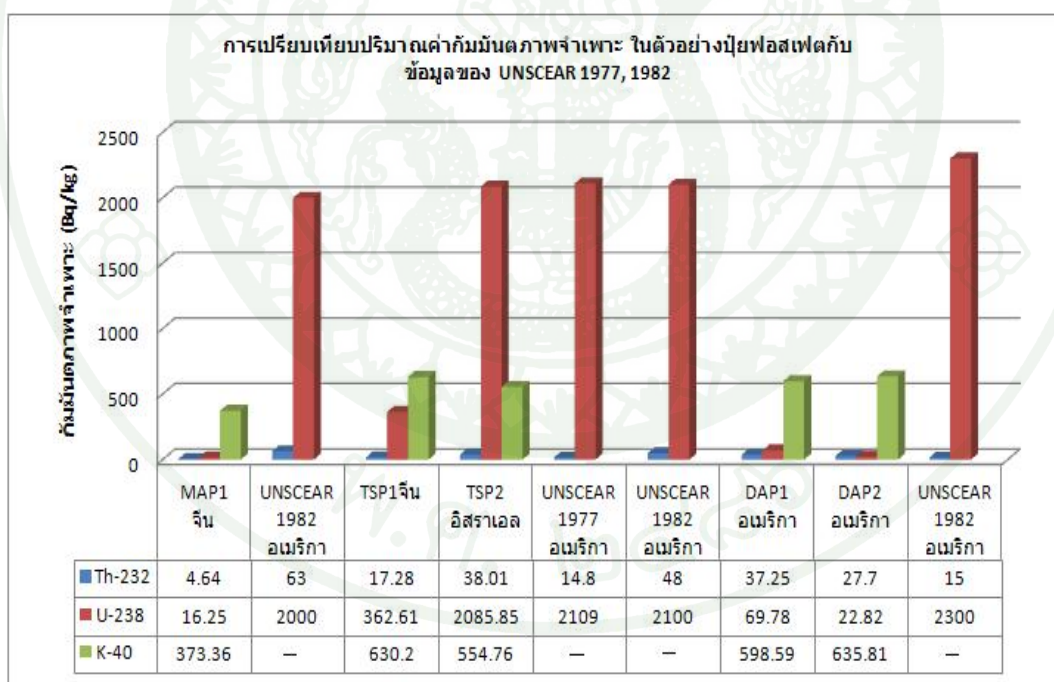
ตารางที่ 19 แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต

ตัวอย่าง	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg)		
	Th-232	U-238	K-40
1.MAP1, สาธารณรัฐประชาชนจีน	4.64±0.72	16.25±1.47	373.36±11.67
2.TSP1, สาธารณรัฐประชาชนจีน	17.28±1.04	362.61±4.14	630.20±14.68
3.TSP2, อิสราเอล	38.01±1.81	2,085.85±9.58	554.76±17.74
4.DAP1,สหรัฐอเมริกา	37.25±1.31	69.78±2.45	598.59±14.90
5.DAP2,สหรัฐอเมริกา	27.70±1.08	22.82±1.73	635.81±14.98

จากข้อมูลตารางที่ 19 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP2) ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งเท่ากับ 38.01 ± 1.81 Bq/kg และ $2,085.85 \pm 9.58$ Bq/kg ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP2) ที่นำเข้าจากประเทศสหรัฐอเมริกา จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งเท่ากับ 635.81 ± 14.98 Bq/kg

ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP1) ที่นำเข้าจากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน จะมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ 4.64 ± 0.72 Bq/kg, 16.25 ± 1.47 Bq/kg และ 373.36 ± 11.67 Bq/kg ตามลำดับ

2.2 วิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K กับข้อมูลจาก UNSCEAR ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต กับข้อมูลจาก UNSCEAR 1977, 1982

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP2) ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล และในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP1, DAP2) ที่นำเข้าจากประเทศสหรัฐอเมริกา จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR 1982 (สหรัฐอเมริกา)

สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตทุกชนิด จะมีค่าน้อยกว่าข้อมูลของ UNSCEAR ส่วนปุ๋ยฟอสเฟตชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP2) ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล จะเห็นว่าใกล้เคียงกับข้อมูลของ UNSCEAR 1977, 1982 (สหรัฐอเมริกา)

3. วิจัยผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม

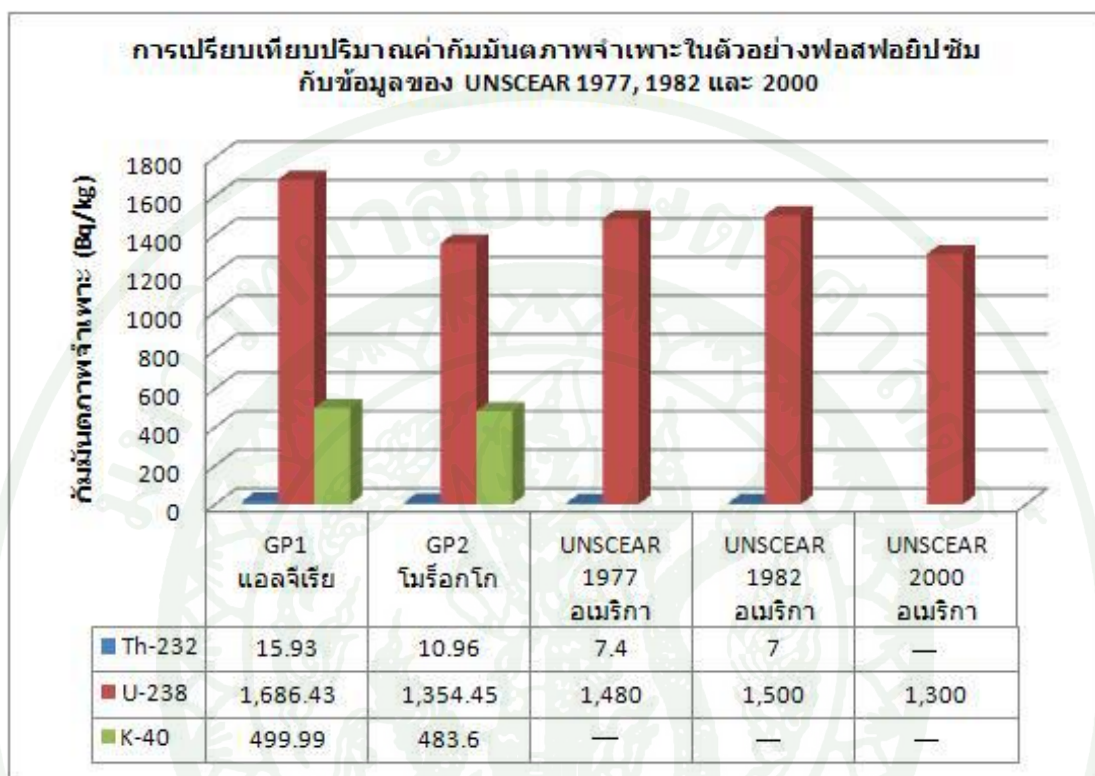
3.1 วิจัยผลการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 แสดงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม

ตัวอย่าง	ค่ากัมมันตภาพจำเพาะ (Bq/kg)		
	Th-232	U-238(Ra-226)	K-40
1.PG1, แอลจีเรีย	15.93±1.53	1,686.43±9.01	499.99±16.32
2.PG2, โมร็อกโก	10.96±1.35	1,354.45±7.99	483.60±15.92

จากข้อมูลตารางที่ 20 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (PG1) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากกว่า ตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (PG2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.93±1.53 Bq/kg, 1,686.43±9.01 Bq/kg และ 499.99±16.32 Bq/kg ตามลำดับ

3.2 วิจัยผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K กับข้อมูลจาก UNSCEAR ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 41 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม กับข้อมูลจาก UNSCEAR 1977, 1982 และ 2000

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (GP1 และ GP2) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย และประเทศโมร็อกโก จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR 1977 (สหรัฐอเมริกา) และ UNSCEAR 1982 (สหรัฐอเมริกา) ในส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (GP1 และ GP2) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย และประเทศโมร็อกโก จะมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลของ UNSCEAR 1977, 1982 และ 2000 (สหรัฐอเมริกา)

3.3 ผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่าง ฟอสฟอริบซัมกับข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ แสดงดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 แสดงผลการเปรียบเทียบปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U ใน ตัวอย่างฟอสฟอริบซัม จากการทดลองกับข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ

ตัวอย่าง	ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะ (Bq/kg)	
	^{232}Th	^{238}U
1.PG1, แอลจีเรีย	15.93±1.53	1,686.43±9.01
2.PG2, โมร็อกโก	10.96±1.35	1,354.45±7.99
ข้อมูลงานวิจัยต่างประเทศ	$^14\pm2$	$^11,420\pm330$

ที่มา: ¹ M. Azouazi, Y. Ouahidi, S. Fakhi, Y. Andres, J.Ch. Abbe and M. Benmansour (2001)

จากตารางที่ 21 พบว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่าง ฟอสฟอริบซัม (PG2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่ามากกว่าข้อมูลจากงานวิจัยต่างประเทศ ซึ่งปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีจำเพาะของ ^{238}U จะมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลของงานวิจัยต่างประเทศ

4. วิจัยผลการตรวจวัดค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสี

จากตารางที่ 16 ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq}) ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP), ฟอสฟอริบซัม (PG) และปุ๋ยฟอสเฟตชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) มีค่ามากกว่า เกณฑ์มาตรฐานที่ 370 Bq/kg ส่วนในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมเนียมฟอสเฟต (MAP1) และชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP1, DAP2) จะมีค่า (Ra_{eq}) ที่ต่ำกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 51.63 Bq/kg, 169.14 Bq/kg และ 111.39 Bq/kg ตามลำดับ

ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย H_{Ext} ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP), ฟอสฟอริปซัม (PG) และปุ๋ยฟอสเฟตชนิดทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) มีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ > 1 ส่วนในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมเนียมฟอสเฟต (MAP) และชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP1, DAP2) จะมีค่า $H_{Ext} < 1$ ที่ต่ำกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.14, 0.45 และ 0.30 ตามลำดับ

ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (I_γ) พบว่า ค่าที่ได้จะคล้ายกับค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย H_{Ext} คือ ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดโมโนแอมเนียมฟอสเฟต (MAP) และชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP2) จะมีค่า $I_\gamma < 1$

ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D) พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, RP2 และ RP3) ตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต (TSP1, TSP2 และ DAP2) และฟอสฟอริปซัม (PG1 และ PG2) มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ 55 nGy/h ส่วนในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต (MAP และ DAP1) จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

ค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (E) พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, RP2) ปุ๋ยฟอสเฟต (TSP2) และฟอสฟอริปซัม (PG1, PG2) จะมีค่าสูงเกินมาตรฐาน ที่กำหนดไว้ที่ 0.48 mSv/y ส่วนในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3), ตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต (MAP, TSP1 และ DAP1) จะมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการตรวจวัดปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม โดยทำการตรวจวัดและวิเคราะห์ด้วยตัวตรวจหารังสีแกมมาแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์ (HPGe) และระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม ได้ผลดังต่อไปนี้

1.1 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP3) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $138.35 \pm 1.96 \text{ Bq/kg}$ และ $474.43 \pm 18.74 \text{ Bq/kg}$ ตามลำดับ ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, Boucraa) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จะมีค่ามากที่สุด มีค่าเท่ากับ $3,511.07 \pm 11.64 \text{ Bq/kg}$

1.2 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP2) ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $38.01 \pm 1.81 \text{ Bq/kg}$ และ $2,085.85 \pm 9.58 \text{ Bq/kg}$ ตามลำดับ ส่วนปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟตชนิดไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP2) ที่นำเข้าจากประเทศสหรัฐอเมริกา จะมีค่ามากที่สุด มีค่าเท่ากับ $635.81 \pm 14.98 \text{ Bq/kg}$

1.3 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K ในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม (PG1) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย จะมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $15.93 \pm 1.53 \text{ Bq/kg}$, $1,686.43 \pm 9.01 \text{ Bq/kg}$ และ $499.99 \pm 16.32 \text{ Bq/kg}$, ตามลำดับ

2. ผลการเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th และ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม กับข้อมูลจาก UNSCEAR

2.1 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างหินฟอสเฟต จะมีค่าอยู่ในช่วง 12.30 ± 1.81 ถึง 138.35 ± 1.96 Bq/kg เมื่อเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 55.5 Bq/kg จะพบว่าในตัวอย่างหินฟอสเฟต RP2 ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก (75.75 ± 1.99 Bq/kg) และหินฟอสเฟต RP3 ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย (138.35 ± 1.96 Bq/kg) จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 284.09 ± 3.77 ถึง $3,511.07 \pm 11.64$ Bq/kg เมื่อเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1,295 ถึง 1,739 Bq/kg จะพบว่าในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1) Boucraa ($3,511.07 \pm 11.64$ Bq/kg), ตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP2) ($2,249.43 \pm 9.47$ Bq/kg) จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR จากข้อมูลที่ได้นี้ จะเห็นได้ว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างหินฟอสเฟต จะมีค่ามากกว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในทุกตัวอย่าง

2.2 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย ปุ๋ยโมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต (MAP), ปุ๋ยทริปเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต (TSP) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) มีค่าอยู่ในช่วง 4.64 ± 0.72 ถึง 38.01 ± 1.81 Bq/kg ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR ที่มีค่าอยู่ในช่วง 14.8 ถึง 63 Bq/kg สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ทั้ง 3 ชนิด มีค่าอยู่ในช่วง 16.25 ± 1.47 ถึง $2,085.85 \pm 9.58$ Bq/kg ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลของ UNSCEAR มีค่าอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 2,300 Bq/kg จากข้อมูลที่ได้นี้ จะเห็นได้ว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต ส่วนมากจะมีค่ามากกว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ยกเว้นในตัวอย่างปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP2) ที่นำเข้าจากประเทศอเมริกา จะมีปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th มากกว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U

2.3 ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (PG1) ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย และตัวอย่างฟอสฟอริปซัม (PG2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.93 ± 1.53 และ 10.96 ± 1.35 Bq/kg ตามลำดับ จะมีค่าสูงกว่าข้อมูลของ UNSCEAR ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 7.00 ถึง 7.40 Bq/kg สำหรับปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม ทั้ง 2 ตัวอย่าง จะมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลของ UNSCEAR ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1,300 ถึง 1,500 Bq/kg จากข้อมูลที่ได้นี้ จะเห็นได้ว่า ปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{238}U ในตัวอย่างฟอสฟอริปซัม ทั้ง 2 ตัวอย่าง จะมีค่ามากกว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของ ^{232}Th

3. ผลการคำนวณวิเคราะห์ค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสี

จากผลการทดลอง คำนวณหาค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมในตัวอย่างหิน ฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมอยู่ในช่วง 518.63 ถึง 3,563.42 Bq/kg โดยที่ตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าสูงที่สุด, ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 51.63 ถึง 2,182.92 Bq/kg โดยที่ตัวอย่างปุ๋ยทริบเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต TSP2 ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล มีค่าสูงที่สุด ส่วนค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม พบว่าในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม PG1 ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 1,747.71 Bq/kg ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นี้ พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยทริบเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมมีค่ามากกว่าระดับความปลอดภัยของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างประเภทที่ 1 ที่กำหนดโดย UNSCEAR ดังตารางที่ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมในวัสดุก่อสร้างใด ๆ มีค่าไม่ควรเกิน 370 Bq/kg นั้นเหมาะสำหรับใช้ในการก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย และบ้านเรือนได้อย่างปลอดภัย ซึ่งหมายความว่า ตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยทริบเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม ในการวิจัยครั้งนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยได้

ผลการคำนวณหาค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายและค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซัม พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายและค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา มีค่าอยู่ในช่วง 1.40 ถึง 9.63 และ 3.59 ถึง 23.83 ตามลำดับ, ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 5.90 และ 0.40 ถึง 14.66 และในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม PG1, PG2 มีค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายเท่ากับ 4.72, 3.80 ตามลำดับ และค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา เท่ากับ 11.74, 9.46 ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นี้ พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ฟอสฟอริบซัม และปุ๋ยทริบเปิ้ลซูเปอร์ฟอสเฟต ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ มีค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายและค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมามีค่ามากกว่า 1 จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้สำหรับก่อสร้างอาคารที่พักอาศัยได้

ผลการคำนวณค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และ ฟอสฟอริบซัม พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน มีค่าอยู่ในช่วง 233.94 ถึง 1,533.40 nGy/h โดยที่ตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าสูงที่สุด, ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 25.74 ถึง 943.44 nGy/h โดยที่ตัวอย่างปุ๋ยทริปเปิ้ล ชุปเปอร์ฟอสเฟต TSP2 ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล มีค่าสูงที่สุด ส่วนค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน ในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม พบว่าในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม PG1 ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 755.09 nGy/h ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นี้ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐานปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนของโลก ที่กำหนดโดย UNSCEAR คือ 55 nGy/h พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ฟอสฟอริบซัม, ปุ๋ยทริปเปิ้ลชุปเปอร์ฟอสเฟต (TSP1,TSP2) และปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP2) ที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้มีค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืนมากกว่า ที่กำหนดโดย UNSCEAR

ผลการคำนวณค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี ในตัวอย่างหินฟอสเฟต ปุ๋ยฟอสเฟต และ ฟอสฟอริบซัม พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.29 ถึง 1.88 mSv/y โดยที่ตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าสูงที่สุด, ในตัวอย่างปุ๋ยฟอสเฟต มีค่าอยู่ในช่วง 0.03 ถึง 1.16 mSv/y โดยที่ตัวอย่างปุ๋ยทริปเปิ้ลชุปเปอร์ฟอสเฟต TSP2 ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล มีค่าสูงที่สุด และในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม พบว่าในตัวอย่างฟอสฟอริบซัม PG1 ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 0.93 mSv/y ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นี้ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี ที่กำหนดโดย UNSCEAR คือ 0.48 mSv/y พบว่า ในตัวอย่างหินฟอสเฟต (RP1, RP2) ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก, ปุ๋ยทริปเปิ้ลชุปเปอร์ฟอสเฟต (TSP2) ที่นำเข้าจากประเทศอิสราเอล และ ฟอสฟอริบซัม PG1 ที่นำเข้าจากประเทศแอลจีเรีย และฟอสฟอริบซัม PG2 ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนดโดย UNSCEAR

ผลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ จึงสรุปได้ว่า เราไม่ควรที่จะนำหินฟอสเฟตหรือฟอสฟอริบซัมที่ได้จากกระบวนการผลิตปุ๋ยเคมี ที่มีค่าความเป็นอันตรายจากการได้รับรังสีมาที่มีค่าสูงเกิน เกณฑ์มาตรฐานที่ทาง UNSCEAR ได้กำหนดไว้ เป็นวัสดุก่อสร้างที่อยู่อาศัยเพื่อที่จะลดการได้รับ ปริมาณรังสีจากภายนอกโดยไม่จำเป็นต่อไป

ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยในครั้งนี้ จะเห็นได้ว่าปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติชนิด ^{232}Th , ^{238}U และ ^{40}K , ค่ากัมมันตภาพสมมูลของเรเดียม, ค่าดัชนีความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย, ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา, ปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน และปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี ในตัวอย่างหินฟอสเฟต, ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยฟอสเฟต และฟอสฟอริบซีปที่ได้จากโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี บางตัวอย่างจะมีค่าค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับเกณฑ์ความปลอดภัยของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างบ้านเรือน ที่กำหนดโดย UNSCEAR ซึ่งโดยทั่วไปเราไม่นิยมนำมาเป็นวัสดุในการก่อสร้าง ซึ่งวัสดุดิบเหล่านี้ จะมีการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยเคมีสูตรต่างๆ ที่ใช้ในการเกษตร ซึ่งในปุ๋ยเคมีสูตรต่างๆ ก็จะมีส่วนผสมของวัสดุดิบเหล่านี้ในปริมาณที่มากน้อยแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม เพื่อการศึกษาต่อไป ควรทำการศึกษาถึงปริมาณค่ากัมมันตภาพจำเพาะของนิวไคลด์รังสีธรรมชาติ ที่ได้จากพื้นที่การเกษตรโดยตรง เพื่อที่จะทำให้เกษตรกรหรือประชาชนทั่วไป มีความมั่นใจในความปลอดภัยจากการได้รับอันตรายจากกัมมันตภาพรังสีต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กนกพร นามโชติ. 2550. **กัมมันตภาพรังสีธรรมชาติในพื้นที่จังหวัดพัทลุง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

กรมทรัพยากรธรณี. ม.ป.ป. **สารานุกรมแร่และอัญมณีไทย**, <http://th.wikipedia.org/wiki/อะพาไทต์>, 25 มกราคม 2551.

ทิตยัลดา พิทยศาสตร์กุล. 2548. **การตรวจวัดอัตราการปลดปล่อยเรดอน-222 จากแผ่นยิปซัมที่มีฟอสฟอริบซัมเป็นองค์ประกอบ: กรณีศึกษาโรงงานผลิตแผ่นยิปซัม**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นวลฉวี รุ่งชนเกียรติ. 2545. **วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ภาวดี สราภัสสร. 2539. **การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุวิชัย สัมปัตตะวนิช และ พิทักษ์ รัตนจารุรักษ์. ม.ป.ป. **ฟอสเฟต**. บทความวิชาการ. กองเศรษฐกิจ กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ.

ธวัช จิตตระการ. 2541. **การตรวจและการวัดรังสี**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

อรอนงค์ ทวีบุตร. 2545. **การวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมในดินและปุ๋ยโดยวิธีนิวเคลียร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Aochi, T. 1999. **Nationwide surveillance for environmental radioactivity in Japan**. Faculty of science, The University of Tokyo.

Azouazi, M., Y. Ouahidi, S. Fakhi, Y. Andres, J. Ch. Abbe and M. Benmansour. 2001. Natural radioactivity in phosphate, phosphogypsum and natural waters in Morocco.

Environmental Radioactivity. 54: 231-242.

Cooper, J. R., K. Randle and R. S. Sokhi. 2003. **Radioactivity releases in the environment impact and assessment.** John Wiley & Sons, UK.

EG & G ORTEC. 2001. **Gamma Vision Gamma – Ray Spectrum Analysis and MCA Emulation.** Instruments & System for Nuclear Spectroscopy, USA.

Knoll, G. F. 2000. **Radiation and Measurement.** John Wiley & Sons, America.

Papastefanou, C., S. Stoulos, A. Ioannidou and M. Manolopoulou. 2006. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact. **Environmental Radioactivity.** 89: 188-198

Saueia, C.H.R. and B. P. Mazzilli. 2006. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizer in Brazil. **Environmental Radioactivity.** 89: 229-239

_____, _____, and D. I. T. Favaro. 2005. Natural radioactivity in phosphate rock, phosphogypsum and phosphate fertilizer in Brazil. **Radioanalytical and Nuclear Chemistry,** 264 (2): 445-448.

Silva, P. S. C., B. P. Mazzilli and D. I. T. Favaro. 2006. Environmental contamination by technologically enhanced naturally occurring radioactive material – TENORM : A case study of phosphogypsum. **Radioanalytical and Nuclear Chemistry.** 269 (3): 739-745.

Tufail, M., N. Akhtar and M. Waqas. 2006. Radioactive rock phosphate : The stock of phosphate fertilizer used in Pakistan. **Health Physics.** 90 (4): 361-370.

UNSCEAR. (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). 1977. **Natural Sources of Radiation.** United Nations, New York.

_____. 1982. **Technologically Modified Exposures to Natural Radiation.** United Nations, New York.

_____. 2000. **Exposures from Natural Radiation,** Nations, New York.

Yucel, H., H. Demirel, A. Parmaksiz, H. Karadiniz, I. Turk Cakir, B. Cetiner, A. Zararsiz, M. Kaplan, S. Ozgur, H. Kislal, M. B. Halitligil and I. Tukenmez. 2004. Measurement of natural radioactivity in phosphogypsum by high resolution gamma ray spectrometry. **Radiation Safety Problems in the Caspian Region.** 197-204.



ตัวอย่างการคำนวณปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่าง

วิธีการคำนวณปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

$$1. \text{ คำนับวัดรังสีแกมมาสุทธิของ } ^{40}\text{K} \text{ (counts/second)} = (\text{ค่านับวัดรังสีของ } ^{40}\text{K}) - (\text{ค่านับวัดรังสีของแบคกราวด์ } ^{40}\text{K})$$

2. สมการหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่พลังงานต่างๆ

$$y = 0.1353x^{-0.592}$$

เมื่อ y คือ ค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี

x คือ พลังงานของรังสี

3. ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาจำเพาะของ ^{40}K

$$A_n = \frac{R_n}{\varepsilon_n \times P_\gamma \times m}$$

เมื่อ A_n คือ ความเข้มข้นกัมมันตภาพของนิวไคลด์ n (เบ็กเคอเรลต่อกิโลกรัม)

R_n คือ อัตราการนับสุทธิของนิวไคลด์ n (counts / วินาที)

ε_n คือ ประสิทธิภาพของหัววัดที่พลังงานนั้นๆ

P_γ คือ จำนวนรังสีแกมมาในการสลายตัวหนึ่งครั้ง

m คือ มวลของสารตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (กิโลกรัม)

การคำนวณปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาจำเพาะของ ^{40}K ในตัวอย่าง

(หินฟอสเฟต (RP1) ครั้งที่ 1)

$$\text{ค่านับวัดรังสีแกมมาของ } ^{40}\text{K} = 3176 \text{ counts}$$

$$\text{ค่านับวัดรังสีของแบคกราวด์ } ^{40}\text{K} = 1431 \text{ counts}$$

$$\text{เวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์} = 80,000 \text{ second}$$

$$\text{ค่านับวัดรังสีแกมมาสุทธิของ } ^{40}\text{K} = \frac{3176 - 1431}{80,000}$$

$$= 0.021813 \text{ count/second}$$

$$\text{ค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสีของ } ^{40}\text{K} = 0.001811$$

$$\text{น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์} = 0.2492 \text{ kg}$$

$$\text{จำนวนรังสีแกมมาในการสลายตัวหนึ่งครั้ง} = 0.1067$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีแกมมาจำเพาะของ } ^{40}\text{K} &= \frac{0.021813}{0.001811 \times 0.1067 \times 0.2492} \\ &= 452.98 \text{ Bq/kg} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียม (Ra_{eq})

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลเรเดียมจากตารางที่ 17 ของตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก

จากสมการที่ (37)

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1.43A_{Th} + 0.077A_K \quad (37)$$

$$Ra_{eq} = 3,511.07 + 1.43(12.30) + 0.077(451.42)$$

$$Ra_{eq} = 3,563.42 \text{ Bq/kg}$$

นั่นคือ หินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีปริมาณค่ากัมมันตภาพรังสีสมมูลของเรเดียมเท่ากับ 3,563.42 Bq/kg

ตัวอย่างการคำนวณค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย (H_{Ext})

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกาย จากตารางที่ 17 ของตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก

จากสมการที่ (38)

$$H_{Ext} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \quad (38)$$

$$H_{Ext} = \frac{3,511.07}{370} + \frac{12.30}{259} + \frac{451.42}{4810}$$

$$H_{Ext} = 9.63$$

นั่นคือ หินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าดัชนีวัดความเสี่ยงรังสีที่ได้รับจากภายนอกร่างกายเท่ากับ 9.63

1. ค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา (I_γ)

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมา จากตารางที่ 17 ของตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก

จากสมการที่ (39)

$$I_\gamma = \frac{A_{Ra}}{150} + \frac{A_{Th}}{100} + \frac{A_K}{1500} \quad (39)$$

$$I_\gamma = \frac{3,511.07}{150} + \frac{12.30}{100} + \frac{451.42}{1500}$$

$$I_{\gamma} = 23.83$$

นั่นคือ หินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าดัชนีความเสี่ยงที่ได้รับจากรังสีแกมมาเท่ากับ 23.83

2. ค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน (D)

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน จากตารางที่ 17 ของตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก จากสมการที่ (40)

$$D = 0.429A_{Ra} + 0.666A_{Th} + 0.042A_K \quad (40)$$

$$D = 0.429(3,511.07) + 0.666(12.30) + 0.042(451.42)$$

$$D = 1,533.40 \text{ nGy/h}$$

นั่นคือ หินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าปริมาณรังสีแกมมาดูดกลืน เท่ากับ 1,533.40 nGy/h

3. ค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี (E)

ใช้ข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี จากตารางที่ 17 ของตัวอย่างหินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก โดยกำหนดใน 1 ปี เท่ากับ 8760 ชั่วโมง

จากสมการที่ (41)

$$E = D \times O \times F \times C \quad (41)$$

$$E = 1,533.40 \times 0.2 \times 1 \times 0.7 \times 8760 \times 10^{-6}$$

$$E = 1.88 \text{ mSv/y}$$

นั่นคือ หินฟอสเฟต RP1, Boucraa ที่นำเข้าจากประเทศโมร็อกโก มีค่าปริมาณรังสียังผลที่ได้รับต่อปี เท่ากับ 1.88 mSv/y

ตารางผนวกที่ 1 แสดงปริมาณค่าความเข้มข้นกัมมันตภาพรังสีเฉลี่ยของ ^{226}Ra , ^{238}U , ^{232}Th และ
ในหินฟอสเฟต จากหลายๆ ประเทศ

Origin and type of rock	Number of samples	Average activity concentration (pCi g^{-1})		
		^{226}Ra	^{238}U	^{232}Th
Algeria	12	31	35	1.5
Australia	6	11	10	0.5
Brazil, apatite	6	1	3	3.8
Brazil (Olinda)	4	96	91	4.4
Christmas Island	5	9	9	0.2
Curacao	9	5	5	0.1
Chile and Ecuador islands	9	1	1	0.7
Egypt	6	37	41	0.7
Guatemala and Mexico	5	12	9	0.4
India, China and south-east Asia	5	4	4	0.7
Jordan and Turkey	6	25	16	^a
Makatea	3	32	34	0.5
Morocco	5	46	47	0.9
Nauru	4	23	22	0.2
Ocean Island	5	32	33	0.4
Peru	14	30	45	1.0
Poland and USSR, phosphorite	5	15	17	0.8
Senegal and other African countries	6	37	36	1.8
Seychelles, guano	4	4	7	0.2
Spain and other western European countries	5	^a	2	0.4
Tunisia	6	14	16	2.5
USSR, apatite	5	2	2	2.5
United States				
Arkansas	13	11	10	1.4
Florida, land pebble and soft phosphate	48	54	52	1.6
Idaho	5	49	50	0.9
Montana	10	41	38	0.7
North Carolina	3	18	26	1.0
Oklahoma	5	10	8	0.8
South Carolina	11	130	130	2.1
Tennessee, brown rock, blue rock, white rock and phosphatic limestone	38	4	4	0.5
Utah	9	50	43	0.8
Wyoming	4	62	61	1.3
Venezuela	4	27	24	1.3
West Indies	12	3	3	1.5

ที่มา: UNSCEAR (1977)

ตารางผนวกที่ 2 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในปุ๋ยฟอสเฟต
(pCi/g)

Type of fertilizer	Country	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{40}K	Ref- erence
Apatite	USSR		0.8	0.7	0.8	1.5	2.6	105
Phosphorite dust	USSR		10.6	10.2	13.1	0.7	6.2	105
"Thomasphosphat"	FRG	< 1.0	0.2			0.1	<0.1	279
Phosphate rock, calcined, soft, partly converted ^d	FRG	18.0	13.0			0.7	3.1	279
Superphosphate	FRG	14	14.1			0.4	3.7	279
Superphosphate	USSR		3.1	8.0	4.1	1.2	3.2	105
Normal superphosphate	USA		25					109
Triple superphosphate	USA	57	21			0.4		109
Triple superphosphate	FRG	21.7	6.3			1.2 ^b	1.4	279
Ammonium phosphate	USSR		2.7			0.4		105
Ammonium phosphate	USA	63	5.7			0.4		109
Nitro phosphate	USSR		23	23.6	25			105
Nitroammonium phosphate	USSR			0.4	0.4			105
NPK	USSR		0.2	0.4	0.5	1.4	33	105
NPK ^c	FRG	12	7.2			0.4	140	279
PK ^d	FRG	11	10			0.4	160	279
NP ^a	FRG	25	8.5			0.8	1.1	279
Enriched concentrate	USSR		11.5	10.6	7.9	0.6	2.0	105
Phosphate without fluor	USSR		0.9				0.9	105

ที่มา: UNSCEAR (1977)

ตารางผนวกที่ 3 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในฟอสฟอริปซัม

Origin of sample	Number of samples	Activity concentration (pCi g^{-1})				Ref- erence
		^{40}K	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th	
Germany, Fed. Rep. of						
Apatite	2	< 1	–	1.5	< 0.5	327
Phosphorite	39	3	–	16	< 0.4	327
Unknown origin	7	2	–	< 0.5	< 0.7	327
United Kingdom	6	2	3.5	21	0.5	265
United States	–	–	5.5	40	0.2	105

ที่มา: UNSCEAR (1977)

ตารางผนวกที่ 4 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในหินฟอสเฟต

	Production of marketable rock in 1977		Activity concentrations (Bq kg ⁻¹)				Ref.
	(10 ⁹ kg)	Percentage of the world production	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	
WORLD	125.7	100					
China a/	4.1	3.3	150	150	25		[15]
Christmas Islands	1.3	1.0	330	300	7		[15]
Israel	1.2	1.0	1500-1700				[D3]
Jordan	1.8	1.4	1300-1850				[D3]
Morocco (1)	17.6	14.0	1700	1700	30		[15]
(2)			1500	1500	30	200	[C2]
(3)			1700	1570	20	10	[P6]
Nauru	1.1	0.9	810	850	7		[15]
Senegal b/	1.8	1.4	1300	1400	67		[15]
Togo	2.9	2.3	1300	1200	110	≤ 100	[C2]
Tunisia	3.6	2.9	590	520	92		[15]
USSR	24.2	19.3					
Kola, apatite (1)			90	40	91	170	[C2]
(2)			70	70	92		[15]
(3)			44	30	78	44	[P6]
Kola, phosphorite				390	25	230	[G6]
United States	47.3	37.6					
Central Florida (1)			1500	1600	16		[14]
Central Florida (2) (pebble)			1700	2100			[R4]
North Florida, pebble			800	1000			[R4]
Florida, land pebble and soft phosphate			1900	2000	59		[15]
Florida			1300	1270	30	48	[P6]
Arkansas			370	410	52		[15]
Idaho			1850	1800	30		[15]
Montana			1400	1500	25		[15]
North Carolina			960	670	40		[15]
Oklahoma			300	370	30		[15]
South Carolina			4800	4800	78		[15]
Tennessee, brown rock, blue rock, white rock, phosphatic limestone			150	150	20		[15]
Utah			1600	1850	30		[15]
Wyoming			2300	2300	10		[15]
Viet Nam	1.5	1.2					[15]

ที่มา: UNSCEAR (1982)

ตารางผนวกที่ 5 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในปุ๋ยฟอสเฟต
(Bq/kg)

Type of fertilizer	Country	^{238}U	^{230}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{40}K	Ref.
TREATED ROCK PHOSPHATES									
Apatite	USSR			30	25	30	60	100	[G6]
Phosphorite	USSR			390	380	480	25	230	[G6]
Concentrate obtained by flotation	USSR			420	390	290	20	73	[G6]
Calcined, ground soft, partly converted rock phosphate, etc. a/	FRG b/	670		480			25	110	[P6]
ONE-COMPONENT PHOSPHATE FERTILIZERS									
Superphosphate	FRG b/	529		520			15	140	[P6]
Superphosphate	USSR			110	300	150	44	120	[G6]
Superphosphate	USA c/	740	670	790			20		[H4]
Superphosphate	Belgium	1100		910			<25	<180	[C2]
Triple superphosphate	FRG b/	800		230			44	52	[P6]
Triple superphosphate	USA	2100	1800	780			48		[H4]
PK-FERTILIZERS d/	FRG b/	410		370			15	5900	[P6]
NP-FERTILIZERS									
NP-fertilizers a/	FRG b/	920		310			30	41	[P6]
Ammonium phosphate	USSR			100			48		[G6]
Nitrophosphate	USSR			850	870	920	10		[G6]
Nitroammonium phosphate	USSR				15	15	30		[G6]
Monoammonium phosphate	USA	2000	1800	20			63		[H4]
Diammonium phosphate	USA	2300	2400	210			15		[H4]
NPK-FERTILIZERS e/									
NPK	FRG b/	440		270			15	5200	[P6]
NPK	USSR			9	15	20	54	1200	[G6]
NPK	Belgium	470		210			<15	5900	[C2]
BASIC SLAG	Belgium	23		19					[K4]

ที่มา: UNSCEAR (1982)

ตารางผนวกที่ 6 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในวัสดุก่อสร้าง

Type of building material	Country b/	No. of samples	Average activity concentration (Bq kg ⁻¹)			Absorbed dose rate in air a/ (10 ⁻⁸ Gy h ⁻¹)	Ref.
			⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th		
Natural origin							
Granite	FRG	34	1200	100	80	30	[S5]
Granite bricks	UK	7	1000	90	85	28	[H1]
Granite	USSR	2	1500	110	170	45	[K6]
Lithoid tuff	Italy	-	1500	130	120	40	[N5]
Pumice stone	FRG	20	1100	130	130	35	[S5]
Concrete containing alum shale	Sweden	83	850	1500	70	145	[S6]
Industrial origin							
Phosphogypsum from phosphorite	FRG	39	110	600	<5	54	[S5]
Phosphogypsum	UK	6	70	800	20	68	[H1]
Phosphogypsum	USA	-	-	1500	7	126	[G6]
Calcium silicate slag Canada	-	-	-	2150	-	184	[P5]
Calcium silicate slag USA	-	-	-	1300-1500	-	110-130	[B4]
Red-mud bricks	FRG	23	330	280	230	58	[S5]
Fly-ash	FRG	28	700	210	130	42	[S5]
Fly-ash type 1	UK	1	550	7	40	10	[H1]
type 2	UK	1	550	140	30	20	[H1]
type 3	UK	1	220	50	44	12	[H1]
Blast-furnace slag	USSR	29	240	70	20	11	[K6]
Slag aggregate c/	Finland	3	190	100	70	19	[H5]

ที่มา: UNSCEAR (1982)

ตารางผนวกที่ 7 แสดงปริมาณความเข้มข้นของนิวไคลด์กัมมันตรังสีธรรมชาติในวัตถุดิบ, ผลิตภัณฑ์ และกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมแร่

Material	Typical concentration in ore / raw material (kBq kg ⁻¹)		Typical concentration in product or tailings / wastes (kBq kg ⁻¹)	
	²³⁸ U-series	²³² Th-series	²³⁸ U-series	²³² Th-series
Phosphate industry				
Phosphate	0.2-1.5 1.5 (Florida ore) 0.03 (Kovdor ore) 0.11 (Palfos ore)	0.02 (Florida ore)	0.9-1.3 ^a 100 (²³² Pb) 600 (²³⁸ Pb) in calcinate 1 (Phosphorus slag)	0.02 (Phosphorus slag)
Artificial fertilizer	0.3-3 0.2-1 (²³² Ra and ²¹⁰ Pb) 2-7 (TSP)	0.008-0.04 0.001 (TSP)		
Rare earths, thorium compounds				
Monazite	6-40	4% (by weight) 5-300	450 ^b	3000 ^b
Oil and gas extraction				
Natural gas Oil	0.34 kBq m ⁻³ (²²² Rn)		(Scale) 1-1 000 (scale) 8-42 kBq m ⁻³ (production water)	
Metal uses				
Iron ore			0.1-0.3 (coal tar) 0.15 (blast furnace slag) / zinc-rich filtercake 1 (slag)	0.15 (blast furnace slag) 4 (slag)
Cassiterite Pyrochlore	1 0-10	0.3 0-10		
Coal tar treatment				
Coal tar	0.1-0.3 (²¹⁰ Po and ²¹⁰ Pb)		0.2-0.6 (electrode pitch)	
Cokes and electric power production				
Coal	0.01-0.025	0.01-0.025	0.02-0.04 (cokes) 0.1-0.3 (coal tar) 0.2 (Fly and bottom ash) 0.4 (Fly dust)	0.2 (Fly dust)
Cement industry				
Marl	0.022	0.003	0.05-0.11 (cement) 0.02 (slag)	0.03-0.1 (cement) 0.003 (slag)
Clay Portland clinker	0.04 0.08	0.05-6 0.05		
Mineral sands handling				
Zirconium sand Monazite Ilmenite Kunite	0.2-74 0.1-0.6 2.3 (1.5- ²³⁸ U) 3.6	0.4-40 0.3-0.1 1.2 0.36	Residue	
Titanium pigment production				
Ilmenite Titanium ore	2.3 (1.5- ²³⁸ U) 0.07-9	1.2 0.07-9	400- 0.15 (VBM) 2.3 (filtercake) 0.03 (water)	up to 1 000 (scale) 0.13 (VBM) 2.6 (filtercake) 0.01 (water)

หมายเหตุ: ^a Phosphogypsum

ที่มา: UNSCEAR (2000)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายสิทธิพงษ์ พลธรรม
เกิดวันที่	15 มิถุนายน 2525
สถานที่เกิด	อำเภอภูเขียว จังหวัดชัยภูมิ
ประวัติการศึกษา	กศ.บ. (วิทยาศาสตร์ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยทักษิณ
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)