

# อภิธานนาการ

รายงานการวิจัย



สำนักหอสมุด

การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมใน  
โดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe)

Measurement gamma-ray of Potassium Uranium and Thorium in soil using  
a High-Purity Germanium detector



ดร. พรรรัตน์ ศรีสวัสดิ์  
ดร. อุษณี เกิดพันธ์  
นางสาว สุภรพรรณ ชูถิ่น

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันที่ลงทะเบียน..... 8 JUL 2011
เลขทะเบียน..... 5639451 62
เลขเรียกหนังสือ..... จ. จ.ค.

วันที่  
.....  
.....  
.....

ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2550

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

### กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับงบประมาณจากทุนอุดหนุนการวิจัยของคณะวิทยาศาสตร์ประจำปี 2549 ขอขอบคุณ รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย อธิพิพนธกร และคุณจิระพงศ์ รอดภาษากลุ่มฝ้าตรวจกัมมันตภาพรังสี สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่กรุณาช่วยวิเคราะห์ตัวอย่างดินเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ รวมถึงคุณรอน เจมส์ บริษัทอัครไม่นิ่ง จำกัด ที่กรุณาให้ความสะดวกด้านการออกบัตรปริมาณรังสีในภาคสนาม บริเวณบ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์ และบริเวณเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์ และขอขอบคุณ นางสาว ดวงชีวัน จันเครื่อง และ นางสาวธรรทิพย์ ก้อนแก้วมูล ที่เป็นผู้ช่วยวิจัยนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทั้งอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้



**ชื่อโครงการ** การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดินโดยใช้  
หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง

**ชื่อผู้วิจัย** ดร.พรวิรัตน์ ศรีสวัสดิ์

**หน่วยงานที่สังกัด** ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

**ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยสาขา** ฟิสิกส์

**งบประมาณเงินรายได้ประจำปีการศึกษา** 2550

**จำนวนเงิน** 50,000 บาท

**ระยะเวลาทำการวิจัย** 1 ปี (ตั้งแต่ 31 ตุลาคม 2549- 31 ตุลาคม 2550)

#### บทคัดย่อ

การวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริงโดยใช้หัววัดหัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อหาปริมาณ K-40, U-238 และ Th-232 ในดิน การวิจัยนี้ได้ทำการวัดรังสีแกมมาจากพื้นดินในพื้นที่จริงสี่บริเวณ ได้แก่ บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก, สนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4 ของมหาวิทยาลัยนเรศวร, บ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์ และเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์ ได้ความแรงรังสีจำเพาะของโพแทสเซียม-40, ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 เท่ากับ 296.00-629.00, 209.79 - 296.00 และ 29.60-74.00 Bq/kg ตามลำดับ จากการเก็บตัวอย่างดินไปวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยการนำไปอบให้แห้ง บดให้ละเอียด และบรรจุลงในกล่องพลาสติก หาค่าความแรงรังสีจำเพาะของโพแทสเซียม-40, ยูเรเนียม-238 และทอเรียม-232 ได้เท่ากับ 121.50-636.20, 116.56-246.36 และ 15.40-67.74 Bq/kg ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการวิเคราะห์ในพื้นที่จริงแล้วพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

**คำสำคัญ :** หัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์, รังสีแกมมา, โพแทสเซียม-40, ยูเรเนียม-238, ทอเรียม-232

#### Abstract

In situ gamma-ray measurement using HPGe detector have been widely used for determination of K-40, U-238, and Th-232 in soil. Measurement of gamma-rays in soil from four selected areas were carried out i.e. the Klongnonglake's field, the garden around the 3rd and 4th woman dormitory of Naresuan University, Ban Wangmaprang Wangpong District of Pechaboon province and Suriya Mine of Pechaboon province. The specific activities of K-40, U-238 and Th-232 were found to be in the ranges of 296.00 - 629.00, 209.79 - 296.00 and 29.60 - 74.00 Bq/kg respectively. The soil samples were also taken for laboratory analysis. The samples were air-dried, finely ground then sealed in plastic containers. The specific activity of K-40, U-238 and Th-232 were found to be in the ranges of 121.50-636.20, 116.56-246.36 and 15.40-67.74 Bq/kg respectively which were in good agreement with the results obtained from the in situ gamma-ray measurements.

**Keywords :** HPGe Detector, Gamma-Ray, K-40, U-238, Th-232

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ ( ภาษาไทย )	ข
บทคัดย่อ ( ภาษาอังกฤษ )	ข
สารบัญเรื่อง	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูปประกอบ	ช
รายการสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 การตรวจเอกสาร	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 แหล่งกำเนิดของกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ	4
2.1.2 แหล่งกำเนิดรังสีจากพื้นผิวโลก	5
2.1.3 กัมมันตภาพรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น	6
2.2 การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียม	7
2.2.1 การวัดปริมาณรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ	7
2.2.2 การวัดปริมาณรังสีแกมมาในพื้นที่จริง	7
2.2.3 การปรับเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับพลังงาน	10

2.2.4 การเปรียบเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับมุมที่ฟลักซ์ของ รังสีแกมมา มาตกกระทบนหัววัด	12
2.3 ระบบตรวจวัดรังสี	14
2.3.1 หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe)	15
2.3.2 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง ( High voltage power supply )	15
2.3.3 ภาคขยายส่วนต้น ( Pre –amplifier )	15
2.3.4 ภาคขยายหลัก ( Amplifier )	16
2.3.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง ( MCA )	16
2.4 ระบบการนับวัดรังสี	16
บทที่ 3 อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง	19
3.1 วัสดุ อุปกรณ์	19
3.2 วิธีการปรับเทียบเครื่องมือวัดรังสี	20
3.2.1 การปรับเทียบหัววัดรังสีกับพลังงาน	20
3.2.2 การปรับเทียบหัววัดรังสีกับมุม	20
3.2.3 การคำนวณหาจำนวนนับสุทธิ	21
3.3 วิธีการวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในพื้นที่จริง	22
3.4 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในห้องปฏิบัติการ	22
บทที่ 4 ผลการทดลอง	27
4.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในภาคสนามกับห้องปฏิบัติการ	27
4.2 เปรียบเทียบความเข้มรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดิน	28
อภิปรายผลการวิจัย	28

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	29
วิจารณ์ผล	30
ข้อเสนอแนะ	30
บรรณานุกรม	31
ภาคผนวก ก.	32
ภาคผนวก ข.	55
ภาคผนวก ค.	63
สรุปขั้นตอนการทำวิจัย	66



รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีแกมมาจากการวัด ในภาคสนาม และผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ	27
4.2 เปรียบเทียบความเข้มรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดิน (Bq/kg)	28
ก.1 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Cs-137 ( 662 keV)	32
ก.2 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Co-60 ( 1173 keV)	33
ก.3 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Co-60 ( 1332 keV)	33
ก.4 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Na-22 ( 511 keV)	34
ก.5 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Na-22 ( 511 keV)	34
ก.6 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Ba-133 ( 276.3 keV)	35
ก.7 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Ba-133 ( 302.7 keV)	35
ก.8 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Ba-133 ( 355.9 keV)	36
ก.9 แสดงค่าการหักลบแบบคกราวด์ของ Ba-133 ( 383.7 keV)	36
ก.10 แสดงข้อมูลของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณ	50
ก.11 กัมมันตภาพรังสีจากวัสดุก่อสร้าง	50
ก.12 แสดงค่า $\frac{\Phi}{S}$ และ $\frac{\Phi}{I}$ ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติบางชนิด	51
ก.13 Radioactivity in Human Body	52

## รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสัดส่วนของกัมมันตภาพรังสี	4
2.2 แสดงตำแหน่งของหัววัดรังสี	8
2.3 พิกัดทางเรขาคณิตของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินและหัววัดรังสี	8
2.4 แสดงตำแหน่งกำบังวางต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่มุมต่าง ๆ	13
2.5 ระบบการนับรวม	16
2.6 ระบบการนับรวมโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว	17
2.7 สเปกตรัมของรังสีแกมมา	17
2.8 ระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง	18
2.9 กราฟเปรียบเทียบพลังงาน	18
3.1 แสดงการติดตั้งหัววัดรังสี	19
3.2 แสดงการให้เห็นการคำนวณหาจำนวนสุทธิ	21
3.3 ตัวอย่างดิน	23
3.4 แสดงสเปกตรัมจากสารมาตรฐาน ตัวอย่างดินลบแบบคกราวด์	25
ก.1 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{137}\text{Cs}$ (662 keV)	43
ก.2 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{60}\text{Co}$ (1173 keV)	44
ก.3 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{60}\text{Co}$ (1332 keV)	44
ก.4 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{22}\text{Na}$ (551 keV)	45
ก.5 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{22}\text{Na}$ (1275 keV)	45
ก.6 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{133}\text{Ba}$ (276.3 keV)	46
ก.7 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{133}\text{Ba}$ (302.7 keV)	46
ก.8 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{133}\text{Ba}$ (355.9 keV)	47
ก.9 กราฟเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ $^{133}\text{Ba}$ (383.7 keV)	57



ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{N_f}{N_0}$ กับพลังงาน	48
ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการวัดรังสีที่มุม 0 องศา กับพลังงาน	48
ก.12 แสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์ที่มีผลต่อพื้นดิน ณ ระดับความสูง 1 เมตร	49
ก.13 อนุกรมยูเรเนียม	52
ก.14 อนุกรมทอเรียม	53
ก.15 แสดงอนุกรมการสลายตัวของ $^{238}\text{U}$	53
ก.16 รูปแบบการสลายตัวของ 208 Tl	54
ข.1 แสดงตัวอย่างการหาค่า $N_f / N_0$ โดยการสร้างสูตรคำนวณบน Microsoft Excel	56
ข.2 Linear attenuation coefficient of gamma-ray for soil and air	58
ข.3 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก	59
ข.4 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4	60
ข.5 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณบ้านวังมะปราง อ. วังโป่ง จ. เพชรบูรณ์	61
ข.6 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณเมืองแร่สุริยะ จ. เพชรบูรณ์	62
ค.1. การวัดปรับเทียบมุม 0-90 องศา	64
ค.2 บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4	64
ค.3 บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก	65
ค.4 บริเวณเมืองแร่สุริยะ จังหวัดเพชรบูรณ์	65
ค.5 บริเวณบ้านวังมะปราง อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์	66

## รายการสัญลักษณ์

## สัญลักษณ์

$T_{1/2}$	ค่าครึ่งชีวิต (half life)
$A_s$	ความแรงรังสีจำเพาะ (Bq)
$N$	อัตรานับรังสีสุทธิ ( $s^{-1}$ )
$C$	จำนวนสัญญาณที่นับได้
$\epsilon$	ประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมา
$L_t$	ระยะเวลาในการนับรังสี
$G$	จำนวนของรังสีแกมมาต่อการสลายตัวใน 1 ครั้ง
$\Phi$	ความเข้มหรือฟลักซ์ของรังสีแกมมาทั้งหมดต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีที่หัววัดรังสี
$\theta$	มุมระหว่างหัววัดรังสีกับธาตุกัมมันตรังสีในดิน
$\rho$	ความหนาแน่นของดิน ( $g/cm^3$ )
$\alpha$	relaxation length ระหว่างกันของการกระจายรังสีแบบเอกโพเนนเชียลกับความลึก
$\frac{d\Phi}{d\theta}$	ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่มาถึงหัววัดรังสีจากมุมและความลึกต่าง ๆ กันจากนิวไคลด์
$H$	ระยะห่างจากหัววัดจนถึงผิวดิน (cm)
$r$	ระยะห่างจากหัววัดจนถึงธาตุกัมมันตรังสีนั้น ๆ ในดิน
$S_0$	ความแรงของรังสีที่ผิวดิน ( $photons/s.cm^{-3}$ )
$Z$	ความลึกจากผิวดินจนถึงธาตุกัมมันตรังสีในดิน (cm)
$\mu_s$	สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาในดิน ( $g/cm^3$ )
$\mu_a$	สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาในอากาศ ( $cm^{-1}$ )
$l$	คือ ลิตร
$C_u$	จำนวนช่องที่เลือกใช้ในการคำนวณ
$B_1$	ค่าเฉลี่ยของแบคกราวด์ทางด้านซ้ายมือ 4 จุด
$B_2$	ค่าเฉลี่ยของแบคกราวด์ทางด้านขวามือ 4 จุด
$K$	จำนวนช่องที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของ background
$V$	เลขช่องทางด้านขวามือ (จุดสุดท้าย) ของบริเวณที่เลือก
$U$	เลขช่องทางด้านซ้ายมือ (จุดเริ่มต้น) ของบริเวณที่เลือก
$X_u$	จำนวนนับในหมายเลขช่อง U
$X_v$	จำนวนนับในหมายเลขช่อง V

A ความแรงรังสี (pCi/g หรือ Bq/kg)

$\frac{N_f}{S}$  อัตรานับรังสีแกมมาสุทธิต่อความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสี

$\frac{N_o}{\Phi}$  อัตรานับรังสีสุทธิที่พลังงานนั้น ๆ ต่อฟลักซ์ของโฟตอน ณ ตำแหน่งที่หัววัดรังสีอยู่ใน  
แนวแกนเดียวกันกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน ( point source ) ระยะห่าง 1 เมตร

$\frac{N_f}{N_o}$  ค่าปรับแก้ประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่มุมต่าง ๆ ของรังสีแกมมาที่สลายตัวจากนิวไคลด์  
กัมมันตรังสีที่อยู่ในดิน เนื่องจากรังสีแกมมาจากดินมาจากทุกทิศทางที่ต่าง ๆ กัน คือจาก  
ตำแหน่งที่ความลึกและมุมต่าง ๆ กัน

$\frac{\Phi}{S}$  อัตราส่วนระหว่างความเข้มของโฟตอนที่พลังงานหนึ่ง ๆ ต่อความแรงรังสีจำเพาะของนิว  
ไคลด์กัมมันตรังสีในดิน



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการแพทย์ การเกษตร อุตสาหกรรม วิศวกรรม การทหาร และการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงการทดลองอาวุธนิวเคลียร์ ซึ่งถ้ามีการรั่วไหลของกัมมันตภาพรังสีก็จะทำให้เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นโดยหลักสากลแล้วประเทศที่มีการใช้พลังงานนิวเคลียร์ จะมีการตรวจวัดรังสีอย่างต่อเนื่อง แต่ประเทศเพื่อนบ้านที่ไม่มีการใช้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก็จำเป็นต้องมีการตรวจวัดเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากอุบัติเหตุทางรังสีสามารถที่จะฟุ้งกระจายตามกระแสลมที่พัดออกสู่บริเวณใกล้เคียงตามสภาวะอากาศได้ ผลภาวะทางรังสีเราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จะเกิดการสะสมในร่างกายของมนุษย์ กัมมันตภาพรังสีมีแหล่งกำเนิดใหญ่ๆ 2 แหล่ง คือ กัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ จะเห็นได้ว่ากัมมันตภาพรังสีอยู่รอบๆ ตัวเราตลอดเวลา ดังนั้นการตรวจวัดรังสีจึงจำเป็นและเป็นประโยชน์อย่างมากในแง่ของการวัด การหาปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม เช่น ในดิน ในน้ำ ในอากาศ และในพืช จึงเป็นมาตรการหนึ่งในการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดจากการใช้พลังงานนิวเคลียร์และรังสีจากกิจกรรมต่าง ๆ ได้ นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติทั่วไปในสิ่งแวดล้อมจะมีปริมาณต่ำและที่แปรอะเปื้อนจากการใช้พลังงานนิวเคลียร์และรังสีสามารถตรวจวัดด้วยเครื่องวัดรังสีที่มีประสิทธิภาพสูง

โดยทั่วไปการหาปริมาณนิวไคลด์กัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อมทำโดยเก็บตัวอย่างไปวัดรังสีในห้องปฏิบัติการแล้วนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน ซึ่งต้องมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวัดรังสีอย่างน้อย 1-2 ชั่วโมง การวัดรังสีแกมมาเป็นวิธีที่สะดวกเนื่องจากรังสีแกมมามีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงมีขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างไม่ยุ่งยากมากนัก นอกจากนี้การวัดรังสีแกมมายังสามารถตรวจวัดโดยทำในภาคนามซึ่งใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) แล้วนำไปคำนวณหาความเข้มของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแต่ละชนิดจากความเข้มรังสีแต่ละพลังงานซึ่งวิธีนี้มีความไวสูง แต่เราจำเป็นต้องมีการปรับเทียบหัววัดให้เหมาะสม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงน่าจะเกิดประโยชน์เพื่อการพัฒนาแนวทางการวัดกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อมให้เหมาะสมกับสถานการณ์ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและทดลองวัดปริมาณกัมมันตรังสีของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และ ทอเรียม ในดิน โดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) ชนิดเคลื่อนย้ายได้
2. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในดิน โดยออกภาคสนามกับการนำดินมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการโดยใช้เทคนิคGamma spectroscopy

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและทดลองเปรียบเทียบเครื่องวิเคราะห์รังสีแกมมาโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง(HPGe)
2. ทดลองวัดปริมาณกัมมันตรังสีของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และ ทอเรียม ในดิน โดยออกภาคสนามบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร , บริเวณแปลงนาข้าวที่มีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมจำนวนมากที่อยู่ใกล้มหาวิทยาลัย และบริเวณเหมืองแร่เพื่อเป็นฐานข้อมูลของกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาเทคนิคการวัดปริมาณกัมมันตรังสีของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และ ทอเรียมในดินโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง(HPGe)
2. ทดลองวัดคุณภาพและปริมาณรังสีในบริเวณมหาวิทยาลัยนเรศวร , บริเวณแปลงนาข้าวที่มีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมมากใกล้มหาวิทยาลัยนเรศวร และเหมืองแร่แล้วเปรียบเทียบกับผลการวิจัยในห้องปฏิบัติการเพื่อเป็นฐานข้อมูลของกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อม

## 1.5 การตรวจเอกสาร

ในปี 2532 ได้มีการวิจัยเรื่อง การวัดปริมาณรังสีซีเซียม-137 ในสิ่งแวดล้อมบริเวณอำเภอไทย โดย พรศรี พลพงษ์ , มีศักดิ์ มิลินทวิสมัย , ยัวร์พร ปัญญาพิทยสกุล กองการวัดกัมมันตภาพรังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ซึ่งวัดปริมาณรังสีซีเซียม-137 ในน้ำทะเล ตะกอนหินและทรัพยากรที่มีชีวิตที่เก็บตัวอย่าง 5 จุด บริเวณอำเภอไทยโดยน้ำทะเล 50 ลิตรต่อตัวอย่างตกตะกอนด้วย AMP ( Ammonium Phosphomlypdate ) วิเคราะห์ปริมาณรังสีซีเซียม - 137 ในตะกอนด้วยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรีโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง พบว่าปริมาณรังสีซีเซียม-137 อยู่ในช่วง  $3.43 \pm 0.31$  ถึง  $4.24 \pm 0.25$  mBq/l ส่วนตัวอย่างตะกอนดินและสัตว์น้ำเตรียมโดยอบให้แห้งและวิเคราะห์ด้วยวิธีการเดียวกัน ผลคือพบปริมาณรังสีซีเซียม - 137 ในตะกอนดินอยู่ในช่วง  $0.82 \pm 0.11$  ถึง  $2.14 \pm 0.12$  และในสัตว์น้ำอยู่ในช่วง  $0.10 \pm 0.15$  ถึง  $0.61 \pm 0.19$  Bq/kg ตามลำดับ

ในปี 2539 ได้มีการศึกษาและทดสอบเทคนิคการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริงเพื่อนำไปใช้งาน สำหรับการตรวจวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมโดย ภาวดี สราภัสสร หัววัดรังสีที่ใช้ในการวิจัยครั้งนั้น เป็นหัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ 10 % โดยใช้ซอฟต์แวร์ชื่อ GANAAS ในการวิเคราะห์สเปกตรัมของรังสีแกมมา วัดรังสีภาคสนามในพื้นที่ 5 แห่ง ด้วยกันคือ บริเวณสนาม หน้าหน้าจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , สถานที่ก่อสร้างศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ที่อำเภอองครักษ์ จังหวัด นครนายก , อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดและหาดบ้านแพ จังหวัด ระยอง พบความเข้มข้นของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดินที่อยู่ในช่วง 14.60 – 545.19, 7.74 – 20.97, 3.39 – 38.78 Bq/kg ซึ่งใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างดิน ที่เก็บจากพื้นที่เดียวกัน

ในปี 2541 ได้มีการศึกษาในลักษณะเดียวกันโดย นภลัย คำสีม่วง , ปาจริย์ สิงโต , สุนิศา อhurst เพื่อหาปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดิน โดยทำการวัดที่ บริเวณสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยนเรศวร จากการวิจัยดังกล่าวได้ผลจากการวัดภาคสนามโดย ความเข้มข้นของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม อยู่ในช่วง 3.88 – 6.53 , 1.38 – 1.41 และ 1.13 – 1.43 pCi/g ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซึ่งคือความเข้มข้นของโพแทสเซียม เท่ากับ 876215.71 pCi/g ของทอเรียม เท่ากับ 1.02 pCi/g และไม่พบฟิสิกของยูเรเนียมเลย จะเห็นว่าจากการวิจัยครั้งนี้มีเพียงปริมาณทอเรียมเท่านั้นที่ใกล้เคียงกัน

## บทที่ 2

### กัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

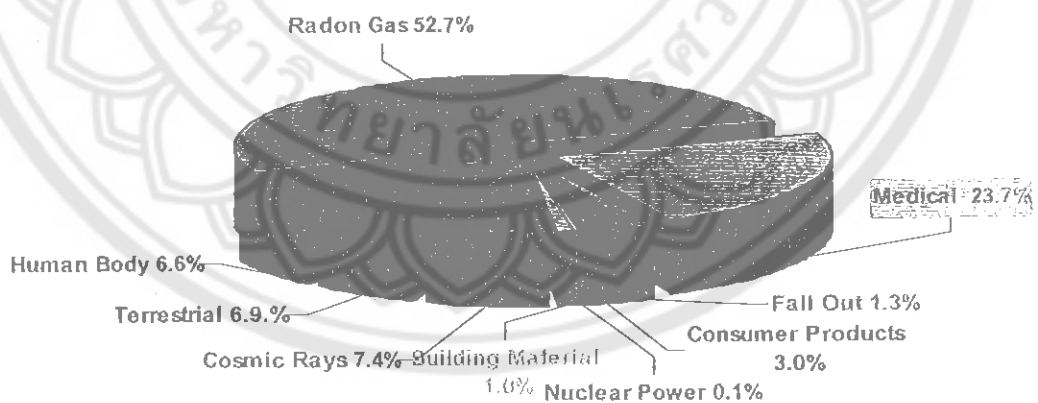
#### 2.1 แหล่งกำเนิดของกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม

แหล่งกำเนิดรังสีโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แหล่งใหญ่ๆ คือ แหล่งกำเนิดรังสีจากธรรมชาติ (Natural Sources of Radiation) และ แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made Sources of Radiation) มนุษย์โดยทั่วไปได้รับรังสีจากธรรมชาติประมาณ 82 % (จากเรดอน 55%, รังสีที่อยู่ในร่างกายมนุษย์ 11 %, จากรังสีคอสมิก 8%, จากหินและดิน 8%) ที่เหลือมาจากรังสีที่มนุษย์ผลิตขึ้น 18% (รังสีทางการแพทย์ 4%, เครื่องอุปโภคบริโภค 3%, การฉายเอกซเรย์ 11%, รังสีในอุตสาหกรรมและอื่นๆ 1%) ซึ่งสังเกตได้ว่าเรดอนเป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่มีผลต่อการได้รับรังสีของมนุษย์มากกว่าแหล่งกำเนิดรังสี

#### Background Radiation

Natural 2.4 mSv/yr (82%)

Man-Made 0.6 mSv/yr (18%)



รูปที่ 2.1 แสดงสัดส่วนของกัมมันตภาพรังสี

#### 2.1.1 แหล่งกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ

แหล่งกัมมันตภาพรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสามารถ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

2.1.1.1 รังสีคอสมิก (cosmic rays) เป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงมาก ส่วนหนึ่งเกิดจากนิวตริโนที่มาจากนิวเคลียสของดวงอาทิตย์จะเกิดการปะทุขึ้นอยู่เสมอ แล้วจะมีก๊าซร้อนที่

ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าพุ่งออกมา

รังสีคอสมิก ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ

2.1.1.1.1 รังสีคอสมิกปฐมภูมิ เป็นอนุภาคที่มีพลังงานสูงมาก (ขึ้นไปถึง  $10^{18}$  eV)

ส่วนใหญ่เป็นโปรตอน หรืออาจมีอนุภาคชนิดอื่นที่ใหญ่กว่า เกือบทั้งหมดมาจากนอกระบบสุริยะ และพบได้ทั่วไปในอวกาศ รังสีคอสมิกปฐมภูมิบางส่วนมาจากดวงอาทิตย์ โดยเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ดวงอาทิตย์

2.1.1.1.2 รังสีคอสมิกทุติยภูมิ เป็นรังสีที่เกิดจากรังสีคอสมิกปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เช่น นิวตรอน โปรตรอนและอิเล็กตรอน รังสีคอสมิกส่วนใหญ่จะถูกชั้นบรรยากาศเบื้องบนของโลกกรองไว้ ส่วนที่เหลือจะทะลุผ่านลงมายังพื้นผิวโลกในระดับพื้นดิน ปริมาณรังสีภายนอกร่างกาย (external exposure) ที่ประชาชนได้รับจากรังสีคอสมิกจะค่อนข้างคงที่ไม่ว่าจะอยู่ที่ทวีปใด กล่าวคือมีค่าประมาณ 30 นาโนเกรย์ต่อชั่วโมง แต่ระดับปริมาณรังสีนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากหากอยู่ในพื้นที่ที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเล โดยจะเพิ่มสูงขึ้นถึงสองเท่าที่ระดับ 1500 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล รังสีคอสมิกยังก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีที่สำคัญอีก 4 ชนิด คือ  $^3\text{H}$   $^{14}\text{C}$   $^7\text{Be}$  และ  $^{22}\text{Na}$  ซึ่งเข้าสู่ร่างกาย และมีผลต่ออวัยวะต่างๆ โดยคิดเป็นปริมาณรังสีในรอบปีประมาณ 0.01 ไมโครซีเวิร์ต สำหรับ  $^3\text{H}$  12 ไมโครซีเวิร์ตสำหรับ  $^{14}\text{C}$  3 ไมโครซีเวิร์ต สำหรับ  $^7\text{Be}$  และ 0.2 ไมโครซีเวิร์ต สำหรับ  $^{22}\text{Na}$

2.1.1.2 . แหล่งกำเนิดรังสีจากพื้นผิวโลก (terrestrial sources of radiation)

มี 6.9% ประกอบด้วยสารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาวมาก สารพวกนี้มีอยู่ตั้งแต่กำเนิดโลก ตัวอย่างเช่นโพแทสเซียม-40 ครึ่งชีวิต  $1.28 \times 10^9$  ปี รูบิเดียม-87 ปี ครึ่งชีวิต  $4.7 \times 10^{10}$  ปี ยูเรเนียม-238 ครึ่งชีวิต  $4.47 \times 10^9$  ปี และทอเรียม-232 ครึ่งชีวิต  $1.41 \times 10^{10}$  ปี ปริมาณรังสีที่คนได้รับจากธรรมชาติ โดยไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้มีค่าประมาณ 2.4 มิลลิซีเวิร์ตต่อปี นอกจากนี้ ลักษณะการดำเนินชีวิตรวมทั้งการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรบางอย่างก็อาจเป็นสาเหตุให้ได้รับรังสีที่เกินจากค่าปกตินี้ได้ ดังกล่าวต่อไปนี้

2.1.1.2.1 วัสดุก่อสร้าง (Construction Materials) วัสดุก่อสร้างบางชนิดอาจจะมีสารกัมมันตรังสีปนอยู่ตามธรรมชาติในปริมาณ ค่อนข้างสูง เช่น มีโพแทสเซียม-40 เรเดียม-226 หรือทอเรียม-232 ซึ่งจะมีผลให้ผู้ที่อยู่อาศัยได้รับรังสีจากภายนอก นอกจากนี้ เรเดียม-226 ยังทำให้เกิดก๊าซเรดอน-222 ซึ่งหากการระบายอากาศภายในอาคารไม่ดีพอ จะทำให้ผู้อยู่อาศัยได้รับรังสีจากก๊าซเรดอนที่เข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ



2.1.1.2.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil Fuel) ก๊าซธรรมชาติและถ่านหินจากแหล่งต่างๆ อาจมีปริมาณของสารกัมมันตรังสีแตกต่างกันไป ที่พบในก๊าซธรรมชาติมักจะเป็นเรดอน-222 ตะกั่ว-210 และพอลอนเนียม-210 ส่วนในถ่านหิน พบยูเรเนียม-238

2.1.1.2.3 น้ำแร่ (Mineral Waters) ในน้ำแร่อาจมีเรเดียมและธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเรเดียม

2.1.1.2.4 ปุ๋ยฟอสเฟต (Phosphate Fertilizers) การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตก็อาจนำไปสู่การได้รับรังสีจากการแผ่รังสีจากพื้นดิน และจากการสะสมในพืช และเข้าสู่ร่างกายโดยการรับประทานพืช

## 2.1.2 แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made sources of radiation)

ตั้งแต่สงครามโลกครั้งที่สอง เป็นต้นมา คนทั่วไปเริ่มรู้จักสารกัมมันตรังสี โดยขั้นต้นคือ สารกัมมันตรังสีที่เป็นผลผลิตของการแตกตัวของยูเรเนียม (fission products) ต่อมาเมื่อมีการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ในทางสันติ จึงมีการผลิตสารกัมมันตรังสีชนิดอื่นๆ ขึ้น นอกจากนี้ยังมีเครื่องกำเนิดรังสี อาทิ เครื่องเอกซเรย์และเครื่องเร่งอนุภาคด้วย แหล่งกำเนิดรังสีที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่นในทางการแพทย์มี 23.7% ได้นำเอาสารกัมมันตรังสีมาใช้เป็นจำนวนมาก ทั้งด้านการตรวจวินิจฉัย (diagnosis) และการรักษา (therapy) เมื่อมีการประมวลแล้วพบว่ามีปริมาณรังสีเฉลี่ยที่คนได้รับเป็นอันดับสองรองจากปริมาณรังสีตามธรรมชาติ ก็คือปริมาณรังสีจากการแพทย์นั่นเอง ในทางอุตสาหกรรม ปัจจุบันนี้ การนำนิวเคลียร์เทคโนโลยีมาใช้ในอุตสาหกรรมกำลังเป็น เทคโนโลยีที่นำหน้า ทั้งนี้เพราะผลการดำเนินงานหลายอย่างได้พิสูจน์แล้วว่าคุ้มค่า สามารถทำให้ประหยัดได้ และสำหรับงานบางอย่างไม่สามารถดำเนินการได้โดยไม่ใช้นิวเคลียร์เทคโนโลยี เช่น การตรวจสอบอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ก๊าซคริปทอน-85 เป็นต้น ระเบิดนิวเคลียร์ จากการใช้ระเบิดนิวเคลียร์ในสงครามโลกครั้งที่สอง หลังจากนั้นยังมีการทดลองระเบิดในบรรยากาศอีกหลายครั้งจนกระทั่งมีการลงนามยุติการทดลองระเบิดในบรรยากาศ แต่สารกัมมันตรังสีที่ตกค้างอยู่และมีครึ่งชีวิตยาวจะคงมีผลอยู่ แม้ว่าจะลดลงไปมากแล้ว การผลิตพลังงานโดยนิวเคลียร์ ในการนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้า โดยเริ่มตั้งแต่ การสำรวจแหล่งแร่ การทำเหมือง การถลุงให้บริสุทธิ์ การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง และการจัดการกากที่เหลือ กระบวนการเหล่านี้จะต้องมีการจัดการที่เหมาะสม เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานและประชาชนทั่วไปได้รับรังสี (As Low As Reasonably Achievable, ALARA) น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด (Dose Limit) เครื่องใช้และอุปกรณ์ต่างๆ เช่น GASEOUS TRITIUM LIGHT SOURCES ปัจจุบันมีการใช้กว้างขวางมาก เช่น ในหน้าปัดนาฬิกาแบบดิจิตอล ดังนั้น การใช้และการทิ้งจึงควรมีการดูแล และ IONIZATION CHAMBER SMOKE

DETECTORS หรือสายล่อฟ้า ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสีอาทิ อะเมริเซียม-241 นิเกิล-63 หรือในสมัยก่อนใช้เรเดียม-226ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากมีการเผาไหม้หรือรั่วกระจาย

## 2.2 การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียม

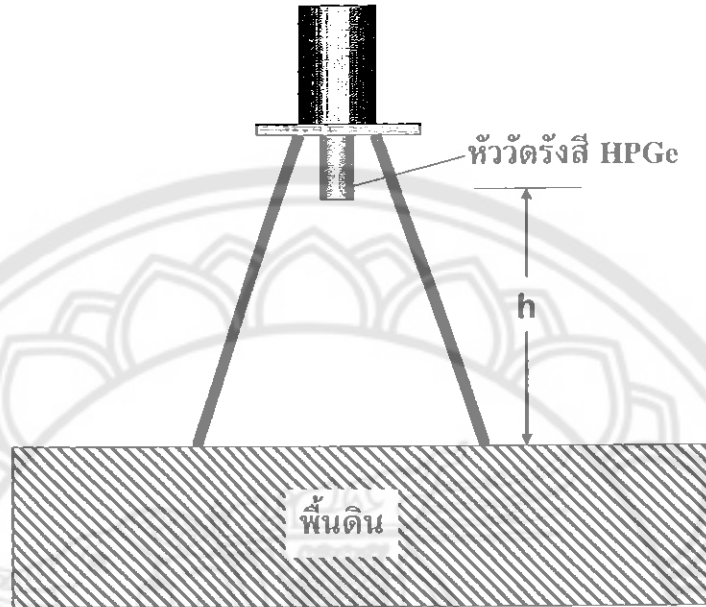
การวัดรังสีทั้ง 3 ชนิดนี้สามารถที่จะวัดรังสีแกมมาได้ทั้งในห้องปฏิบัติการ ( Laboratory Gamma-Rays Measurements ) และวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริง ( In-Situ Gamma-Rays Measurement ) การวัดรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการทำได้ง่ายกว่าการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริง ซึ่งเมื่อเราเอาตัวอย่างดินจากบริเวณใดๆมาทำการวัดรังสีแล้ว ถือว่าเราวัดจากสิ่งแวดล้อมนั้นๆ และขณะนั้นด้วย

### 2.2.1 การวัดปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในห้องปฏิบัติการ

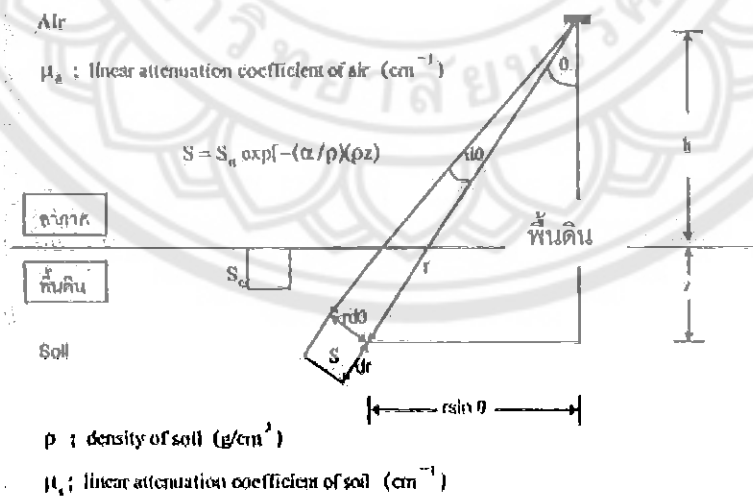
การวัดปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในห้องปฏิบัติการเป็นวิธีที่ง่ายเนื่องจากใช้ระยะเวลาวัดไม่มากนักแต่ต้องมีการเตรียมและเก็บตัวอย่างดินเป็นเวลาอย่างน้อย 1 เดือน และวิธีการไม่ค่อยซับซ้อนเท่ากับการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริงการวัดปริมาณรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการนั้นจะต้องอยู่ภายใต้สภาวะภายในห้องปฏิบัติการส่วนการเตรียมตัวอย่างนั้นเราต้องนำตัวอย่างดินพื้นที่ละ 2-3 จุด มาวิเคราะห์เพื่อให้ได้ความแม่นยำ และจะต้องจัดเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสมกับการวัดด้วย เช่น จัดให้มีขนาดเดียวกัน ความหนาเท่ากัน อยู่ในภาชนะเหมือนกัน และมีผิวหน้าที่เรียบไม่ขรุขระ ต้องเตรียมตัวอย่างให้มีขนาดพอเหมาะกับหัววัดรังสี สำหรับภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างนั้นจะต้องทำด้วยสารที่มีเลขอะตอมต่ำๆ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับเข้าหัววัดอีก เนื่องจากรังสีที่สะท้อนกลับอาจจะเข้าไปรบกวนพีคที่มีพลังงานต่ำกว่า การวัดตัวอย่างเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์มากที่สุดเราจะต้องคำนึงถึงคือ ชนิดของหัววัด แกมมันตรังสีของตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างที่จะวัด เวลาที่ใช้วัด และขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อผลที่ได้แม่นยำที่สุด

### 2.2.2 การวัดปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในพื้นที่จริง

การวัดปริมาณรังสีแกมมาในพื้นที่จริงนั้น สิ่งสำคัญที่สุดคือการปรับเทียบหัววัดรังสีให้สัมพันธ์กับการกระจายฟลักซ์ของรังสีแกมมาและที่พลังงานต่างๆเนื่องจากรังสีมีการแผ่รังสีออกทุกทิศทางดังนั้นจึงเปรียบเทียบหัววัดที่มุมต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับหัววัดรังสีที่ความสูงใด  $h$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของหัววัดรังสี



รูปที่ 2.3 พิกัดทางเรขาคณิตของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินและหัววัดรังสี

เห็นว่า ความแรงรังสีจากพื้นดินที่มุมที่เป็นแนวแกนของหัววัดรังสี ( มุมฉากกับระนาบพื้นดิน ) สามารถคำนวณได้จาก

$$S = S_0 \exp[-(\alpha / \rho)(\rho z)] \quad (2.1)$$

- โดยที่  $\theta$  = มุมระหว่างหัววัดรังสีกับธาตุกัมมันตรังสีในดิน  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของดิน ( g/cm<sup>3</sup> )  
 $h$  = ระยะห่างจากหัววัดรังสีจนถึงผิวดิน ( cm )  
 $r$  = ระยะห่างจากหัววัดรังสีถึงธาตุกัมมันตรังสี ( cm )  
 $S_0$  = ความแรงรังสีที่ผิวดิน ( photon/s.cm<sup>3</sup> )  
 $\alpha$  = relaxation length ระหว่างกันของการกระจายรังสีแบบเอกโพเนนเชียลกับ  
ความลึก ( cm<sup>-1</sup> )  
 $z$  = ความลึกจากผิวดินจนถึงธาตุกัมมันตรังสีใด ๆ ในดิน ( cm )  
 $\mu_s, \mu_a$  = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาในดิน , อากาศ ( cm<sup>-1</sup> )

ซึ่งสามารถจำแนกตำแหน่งการจัดวางตัวของธาตุกัมมันตรังสี ได้ 3 รูปแบบ ดังนี้  
การกระจายแบบปกคลุมพื้นดิน ( Infinite plane source ) ตัวอย่างคือ นิวไคลด์ทั้งหลายที่พบในกรณี  
ของการเกิดอุบัติเหตุทางรังสีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้น ในกรณีนี้  $\alpha / \rho$  มีค่าเป็นอนันต์

$$\Phi = \frac{S_A}{2} \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \tan \theta d\theta = \frac{S_A}{2} E_1(\mu_a h)$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{S_A}{2} \tan \theta \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \quad (2.2)$$

โดยที่  $S_A$  = ความแรงรังสีในดินต่อหน่วยพื้นที่ ( photon/cm<sup>2</sup>sec )

การกระจายแบบเอกโพเนนเชียลกับความลึก ( Exponentially distributed source with depth )

ตัวอย่างเช่น เช่น กัมมันตรังสีชนิดเดียวกับที่แผ่ปกคลุมพื้นผิวดิน แต่เนื่องจากระยะเวลาที่ยาวนาน  
กว่าจึงมีการกระจายลงสู่ใต้พื้นดิน กรณีนี้  $\frac{\alpha}{\rho}$  มีค่ามากกว่าศูนย์

$$\Phi = \iint \frac{S_0}{4\pi r^2} \exp[-(\alpha / \rho)(\rho z)] \exp[-\mu_s z / \cos \theta] \exp(-\mu_a h / \cos \theta) 2\pi r \sin \theta dr d\theta$$

$$\Phi = \frac{S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \int_{\frac{h}{\cos \theta}}^{\infty} \exp\{-(\alpha / \rho)\rho + (\mu_s / \cos \theta)z\} \exp(-\mu_a h / \cos \theta) \sin \theta dr d\theta$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{S_0}{2\rho} \frac{\sin\theta}{(\alpha/\rho)\cos\theta + (\mu_a/\rho)} \exp(-\mu_a/\cos\theta) \quad (2.3)$$

การกระจายอย่างสม่ำเสมอกับความลึก ( Uniformly distributed source with depth )

ตัวอย่างเช่น โฟแทสเซียม-40 , อนุกรมยูเรเนียม-238 , อนุกรมทอเรียม-232 ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่สามารถพบได้โดยทั่วไปในธรรมชาติ โดยที่  $\frac{\alpha}{\rho}$  มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\Phi = \left[ \left( \frac{S_0}{\rho} \right) / \left( \frac{2\mu_s}{\rho} \right) \right]^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_a h / \cos\theta) \sin\theta d\theta$$

$$\frac{d\Phi}{d\theta} = \frac{(S_0/\rho)\sin\theta}{2(\mu_s/\rho)} \exp(-\mu_a h / \cos\theta) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\frac{d\Phi}{d\theta}$  คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่มาจากหัววัดรังสีจากมุมและความลึกต่าง ๆ กันจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติในดิน

แต่การวัดรังสีในพื้นที่จริงจะแตกต่างจากการวัดรังสีในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากพื้นที่จริงนั้นมีขนาดใหญ่ และมีปริมาตรมากกว่ารวมถึงพื้นที่จริงยังมีธาตุกัมมันตรังสีที่หลากหลายและมีพลังงานที่ซับซ้อนมาก ดังนั้นการที่จะวัดรังสีให้ได้ถูกต้องแม่นยำมากที่สุดจึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบ หัววัดให้มีความแม่นยำ

### 2.2.3 การปรับเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับพลังงาน

การปรับเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับพลังงานนี้ เพื่อทราบความสัมพันธ์ของหัววัดรังสีกับฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่พลังงานใด ๆ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่คาดว่าสามารถครอบคลุมกับพลังงานของรังสีที่มีอยู่จริงในสิ่งแวดล้อมที่สามารถพบได้ นำผลที่ได้มาเขียนเส้นโค้งของการปรับเทียบที่พลังงานต่างๆ มาคำนวณหาค่าประมาณอัตราการนับวัดรังสีที่พลังงานอื่นๆ นอกเหนือจากที่ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่นำมาใช้ในการปรับเทียบ เพื่อใช้เป็นการคำนวณหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีที่พลังงานต่าง ๆ นั่นคือเพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียมยูเรเนียมและทอเรียม ซึ่งรูปแบบการคำนวณที่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{C(\text{counts})}{L_i(\text{sec}) \cdot A(\mu\text{Ci}) \cdot G(\text{gamma / dis}) \cdot (3.7 \times 10^4)(\text{dis / sec})} \quad (2.5)$$

$$\Phi = \frac{L_i(\text{sec}) \cdot A(\mu\text{Ci}) \cdot G(\text{gamma / dis}) \cdot (3.7 \times 10^4)(\text{dis / sec})}{4 \cdot \pi \cdot h^2 \varepsilon} \quad (2.6)$$

$$\frac{N_0}{\Phi} = 4 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot \varepsilon \quad (2.7)$$

เมื่อ	$\varepsilon$	คือ ค่าประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมา
	$C$	คือ จำนวนสัญญาณที่นับได้
	$L_i$	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการวัดรังสี ( sec )
	$A$	คือ ความแรงของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน ( $\mu\text{Ci}$ )
	$G$	คือ จำนวนของรังสีแกมมาต่อการสลายตัวใน 1 ครั้ง ( gamma/dis )
	$h$	คือ ระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีถึงต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน

ประสิทธิภาพของการนับรังสี ( Counting efficiency )

บอกถึงประสิทธิภาพของการนับวัดรังสีของหัววัด ค่าประสิทธิภาพของการนับวัดรังสีนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

ก. ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัด ( Absolute efficiency ) ซึ่งเท่ากับจำนวนสัญญาณที่นับได้ ต่อ จำนวนรังสีที่ปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดรังสี คือ

$$\varepsilon = \frac{C(\text{counts})}{L_i(\text{sec}) \cdot A(\mu\text{Ci}) \cdot G(\text{gamma / dis}) \cdot (3.7 \times 10^4)(\text{dis / sec})}$$

ซึ่งประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัดนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหัววัดรังสี และลักษณะการจัดวางต้นกำเนิดรังสีกับหัววัด ( counting geometry ) ในทางปฏิบัตินิยมใช้ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของการวัด

ข. ประสิทธิภาพอินทรินสิค ( Intrinsic efficiency ) ซึ่งจะเท่ากับจำนวนสัญญาณที่นับได้ต่อจำนวนรังสีที่ตกกระทบหัววัดซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของหัววัดรังสีเพียงอย่างเดียว ซึ่งทางปฏิบัติจะไม่ค่อยนิยมใช้

### 2.2.4 การเปรียบเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับมุมที่ฟลักซ์ของรังสีแกมมามาตกกระทบหัววัด

การเปรียบเทียบหัววัดรังสีที่สัมพันธ์กับมุมที่ฟลักซ์ของรังสีแกมมามาตกกระทบหัววัด เพื่อหาความสัมพันธ์ของมุมต่าง ๆ ที่รังสีแกมมาตกกระทบหัววัดกับปริมาณฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่ตกกระทบหัววัด โดยการใช้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานมาวัดฟลักซ์แกมมาในแต่ละมุมโดยเริ่มที่ 0 องศาแล้วเพิ่มขึ้นทีละ 10 องศา ตั้งแต่ 0-90 องศา ที่ระยะห่างเท่า ๆ กันจากหัววัด เนื่องจากฟลักซ์ของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานไม่ได้จำกัดอยู่ในเฉพาะแนวแกนของหัววัดเท่านั้นความหนาแน่นของฟลักซ์ยังกระจายเข้าสู่หัววัดเป็นรูปครึ่งวงกลมในอากาศเหนือพื้นดิน ดังนั้นค่า  $N_f / N_0$  จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อเป็นค่าแก้สำหรับการวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในพื้นที่จริงต่อไปนี้ โดยที่

$$\frac{N_f}{N_0} = \int_0^{\pi/2} \frac{\Phi(\theta) N(\theta)}{\Phi N_0} d\theta \quad (2.8)$$

หรือ

$$\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\Phi}{d\theta} R(\theta) d\theta \quad (2.9)$$

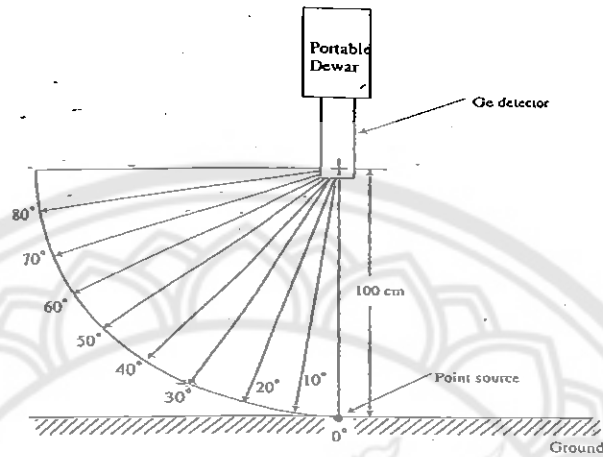
เมื่อ  $\Phi$  คือ ความเข้มหรือฟลักซ์ของรังสีแกมมาทั้งหมดต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ( $\text{photon/cm}^2\text{-s}$ ) ที่หัววัดรังสี

$\frac{\Phi(\theta)}{\Phi}$  คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่มุมใด ๆ ต่อฟลักซ์ทั้งหมดของรังสีแกมมานั้น

$\frac{N(\theta)}{N_0}$  คือ อัตรานับในพีคของรังสีแกมมาพลังงานใด ๆ ที่มุมใด ๆ ต่ออัตราการปลดปล่อยของรังสีแกมมา ( $\text{gamma emission rate}$ ) พลังงานนั้น ๆ

$\frac{d\Phi}{d\theta}$  คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่มาถึงหัววัดรังสีจากมุมและความลึกต่าง ๆ กันจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติในดิน

$R(\theta)$  คือ สมการซึ่งได้จากการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับรังสีที่มุมต่าง ๆ  $N_f$  ต่อจำนวนนับรังสีที่มุม 0 องศา  $N_0$  กับมุม  $\theta$  เมื่อวางต้นกำเนิดรังสีห่างออกไป 1 เมตร



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งการวางต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพห้วงวัดรังสี ที่มุมต่าง ๆ

การหาความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการนับของอัตราการดูดกลืนในพีคของพลังงาน (absorption peak counting rate) โดย

$$\frac{N_f}{S} = \frac{N_0}{\Phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\Phi}{S} \quad (2.10)$$

โดยที่  $\frac{N_f}{S}$  = อัตรานับรังสีแกมมาสุทธิต่อความเข้มรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้น ๆ ในดิน ในหน่วย cps/pCi/g หรือ Bq/kg

$\frac{N_0}{\Phi}$  = อัตรานับรังสีสุทธิที่พลังงานนั้น ๆ ต่อฟลักซ์ของโฟตอน (ในหน่วย cps per photon/cm<sup>2</sup>-s) ณ ตำแหน่งที่ห้วงวัดรังสีอยู่ในแนวเดียวกันกับต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน (standard point source) ที่ระยะห่าง 1 เมตร

$\frac{N_f}{N_0}$  = ค่าปรับแก้ประสิทธิภาพของห้วงวัดรังสีที่มุมต่าง ๆ ของรังสีแกมมาที่สลายตัวจากนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่อยู่ในดิน เนื่องจากรังสีแกมมาจากดินมาจากทุกทิศทางที่ต่าง ๆ กัน คือจากตำแหน่งที่ความลึกและมุมต่าง ๆ กัน

$\frac{\Phi}{S}$  = อัตราส่วนระหว่างความเข้มของโฟตอนที่พลังงานหนึ่ง ๆ ต่อความเข้มรังสี



จำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดิน (ในหน่วย  $\text{photon/cm}^2\text{-s}$  ต่อ  $\text{pCi/g}$  หรือ  $\text{photon/cm}^2\text{-s}$  ต่อ  $\text{Bq/kg}$ ) การคำนวณหาความแรงรังสีจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินได้จากสมการ

$$A = \frac{N}{N_f / S}$$

เมื่อ A คือ ความแรงรังสีจำเพาะของนิวไคลด์กัมมันตรังสีในดินในหน่วยพิโกคูรี/กรัม ( $\text{pCi/g}$ ) หรือต่อแบคเคอเรล/กิโลกรัม ( $\text{Bq/kg}$ )

N คือ อัตรานับรังสีสุทธิ (ต่อวินาที)

$\frac{N_f}{S}$  คือ อัตรานับรังสีแกมมาสุทธิต่อความแรงรังสีของนิวไคลด์กัมมันตรังสีนั้นๆ ในดิน ( $\text{cps}/(\text{pCi/g}$  หรือ  $\text{Bq/kg}$ )

#### การเลือกสถานที่

การเลือกสถานที่ต้องเลือกสถานที่ที่มีพื้นเรียบ และเป็นสถานที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางเนื่องจากจะทำให้กันขวางแนวของแกมมาฟลักซ์จากพื้นจะทำให้ค่าที่วัดได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง เช่น ต้นไม้ยืนต้น ก้อนหินขนาดใหญ่ หรือสิ่งก่อสร้างใดๆ ภายในรัศมี 10 เมตร และจะผลต่อการวัดมากเมื่อระยะห่างจากหัววัดกับพื้นดินน้อยลง

ในการกรณีที่มีการวัดการรั่วไหลของกัมมันตรังสีจากแหล่งที่มีกิจกรรมทางรังสีใดๆ นั้น พื้นที่ที่จะเลือกนั้นจะต้องไม่ถูกรบกวนโดยน้ำ หรือลม รวมไปถึงกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเพาะปลูก การทำไร่ ทำนาต่าง ๆ เป็นต้น

### 2.3 ระบบตรวจวัดรังสี

ส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนที่เป็นหัววัดรังสี ทำหน้าที่แปรเปลี่ยนรังสีที่ตกกระทบเข้ามายังหัววัดรังสีให้อยู่ในรูปของสัญญาณไฟฟ้าจากนั้นจะถูกส่งไปยังส่วนที่ 2 คือส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องนับทำหน้าที่แปรผลให้อยู่ในรูปที่มนุษย์รับรู้ได้ ซึ่งในการทำวิจัยครั้งนี้เราใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) ดังนั้นระบบตรวจวัดรังสีประกอบด้วย

#### 2.3.1 หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe)

หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) เป็นหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำสร้างจากผลึกของเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง เมื่อมีรังสีแกมมาผ่านเข้าไปยังผลึกของเจอร์เมเนียมรังสีจะถ่ายเทพลังงานให้ผลึกอันเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาทำให้เกิดอิเล็กตรอนกับโฮลขึ้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปยังขั้วศักย์ไฟฟ้าบวก โฮลจะวิ่งไปยังศักย์ไฟฟ้าลบ โดยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความต่างศักย์ระหว่างขั้วทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นภายใน  $10^{-9}$  วินาที หลังจากการเกิดอันตรกิริยาแต่ละครั้งปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสี

### 2.3.2 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงสูง ( High Voltage Power supply )

หัววัดรังสีทุกชนิดจะกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งเป็นตัวแทนอนุภาคนิวเคลียร์หลังจากการดูดกลืนพลังงานได้อย่างสมบูรณ์จะต้องได้รับการไบอัสที่ถูกต้องและเหมาะสมกับหัววัดรังสี เนื่องจากหัววัดรังสีแต่ละชนิดต้องการค่าเหมาะสมของศักดาไฟฟ้าและกระแสที่แตกต่างกันอีกทั้งต้องการเสถียรภาพของศักดาไฟฟ้าทางเอ้าท์พุท ดังนั้นแหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าแรงสูงจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- ก. ต้องปรับค่าศักดาไฟฟ้าทางเอ้าท์พุทได้ในช่วง -3000 โวลต์
- ข. ต้องมีเสถียรภาพในการรักษาศักดาไฟฟ้าทางเอ้าท์พุทให้คงที่ ณ จุดที่ตั้งไว้โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรือการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้าในสาย 220 โวลต์
- ค. ต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เพียงพอแก่หัววัดรังสี โดยขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของหัววัด (  $100 \mu\text{A}$ -10mA)
- ง. ต้องมีการกำจัดคลื่นสัญญาณรบกวน

### 2.3.3 ภาคขยายส่วนต้น ( Preamplifier )

ภาคขยายส่วนต้นนี้ทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดรังสีแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งมีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับประจุ สัญญาณที่ได้จากภาคขยายส่วนต้นจะค่อนข้างอ่อนจึงต้องส่งเข้าภาคขยายหลักต่อไป

### 2.3.4 ภาคขยายหลัก( Main amplifier)

ภาคขยายหลักเป็นส่วนที่จ่ายกระแสให้แก่ระบบวัดเป็นส่วนที่รับสัญญาณฟลักซ์จากภาคขยายส่วนต้น มาปรับแต่งรูปสัญญาณพร้อมทั้งขยายขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ เอ้าท์พุทที่ได้จากการขยายหลักจะมี 2 แบบคือ ยูนิโพลาร์ และไบโพลาร์

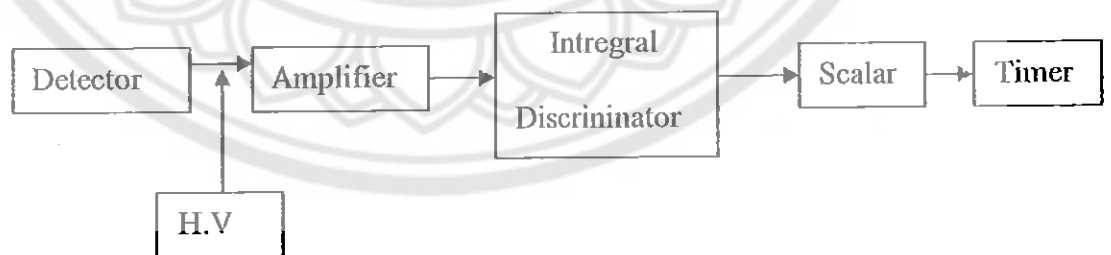
2.3.5 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA)

สัญญาณที่ส่งออกจากหัววัดรังสีเมื่อผ่านภาคขยายส่วนต้นและภาคขยายหลักแล้ว จะถูกส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง ที่สามารถวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณในลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลได้หลายช่องพร้อมกัน เลขช่อง (Channel Number) จะแทนพลังงานของรังสีจำนวนนับที่ได้ในแต่ละช่องจะแทนปริมาณของรังสี เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่องนี้จึงสามารถแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีแกมมาได้จากผลึกไว้ได้ทั้งหมด เรียกว่าสเปกตรัมของรังสีแกมมา (Gamma Spectrum)

2.4 ระบบการนับวัดรังสี ระบบการนับวัดรังสีที่ใช้งานกันโดยทั่วไปมี 2 แบบคือ

2.4.1 ระบบการนับรวม

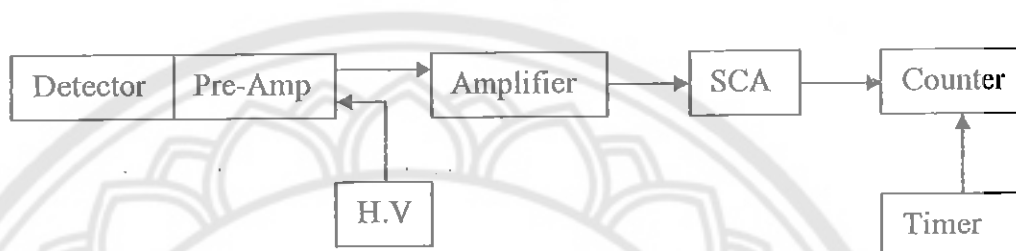
เป็นระบบการนับที่ต้องการทราบเพียงแต่ว่ามีรังสีปนอยู่หรือไม่ มีปริมาณมากน้อยแค่ไหน โดยไม่คำนึงถึงค่าพลังงานของรังสีที่วัดอยู่ สำหรับชนิดของหัววัดรังสีและช่วงพลังงานที่วัดได้ ขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดที่นำมาใช้งาน ตัวอย่างของระบบที่เห็นกันอยู่ทั่วไปคือ Survey Meter ที่นำมาให้ตรวจวัดรังสีในห้องปฏิบัติการ ลักษณะของระบบการนับแบบนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบการนับรวม

2.4.2 ระบบการนับแบบแยกพลังงาน แยกได้เป็น 2 แบบย่อยคือ

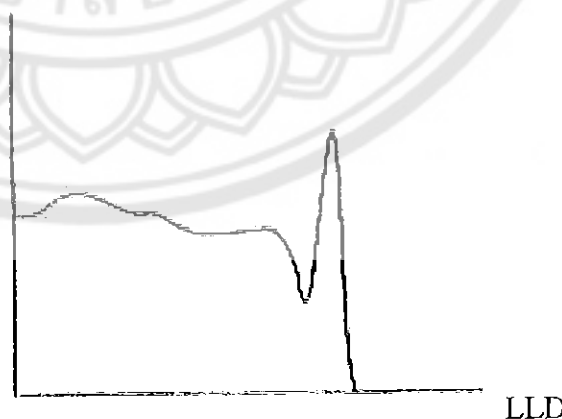
ก. ระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณช่องเดียว (SCA) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 2.6 ระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว

เมื่อรังสีวิ่งเข้าชนหัววัดรังสีปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนระหว่างรังสีกับหัววัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสี อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกรวบรวมด้วยภาคขยายส่วนต้นแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะถูกปรับแต่งรูปร่างและขยายให้มีแอมป์ริจูดที่เหมาะสม โดยภาคขยายหลักของแอมป์ริจูดจะถูกวิเคราะห์โดยการปรับค่า LLD ของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว ถ้านำอัตราการนับที่ค่า LLD มาเขียนกราฟจะได้สเปกตรัมของรังสีดังรูปที่ 2.7 ค่า LLD ที่ตรงกับจุดยอดสูงสุดของพีคจะเป็นตัวแทนของพลังงานของรังสีที่วิ่งเข้าชนหัววัด

อัตรานับ

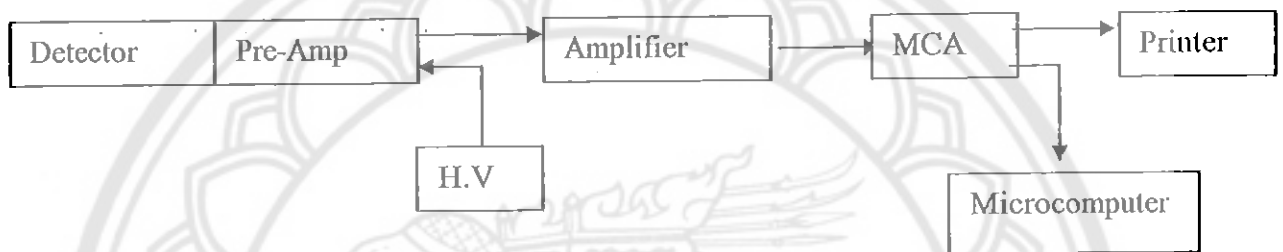


รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของรังสีแกมมา

ข. ระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (MCA) ระบบการนับแบบนี้

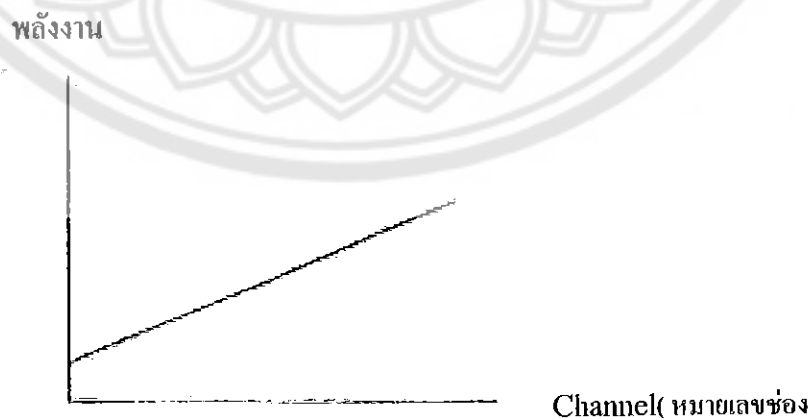
ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.6 หลักการทำงานคล้ายคลึงกับระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบช่องเดียว แต่จะสะดวกกว่าเพราะการวัดสเปกตรัมจะทำแบบอัตโนมัติผลลัพธ์ที่ได้จะมีความละเอียดมากกว่า ในการแสดงผลค่าทางแกนนอนจะมีชื่อเรียกว่า หมายเลขช่อง

( Channel Number )



รูปที่ 2.8 ระบบการนับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง

ในการใช้ระบบการนับแบบแยกพลังงานจำเป็นต้องมีการปรับเทียบค่าของพลังงานก่อนเพื่อที่จะทำให้ทราบที่ค่า LLD ใดๆ หรือหมายเลขช่องใดมีพลังงานเท่ากับเท่าไร วิธีการปรับเทียบทำได้โดยการนำต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่รู้ค่าพลังงานแน่นอนมาทำการวัดสเปกตรัมหาตำแหน่งของยอดพีค นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟจะได้เป็นกราฟเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับค่าหมายเลขช่องดังรูปที่ 2.9



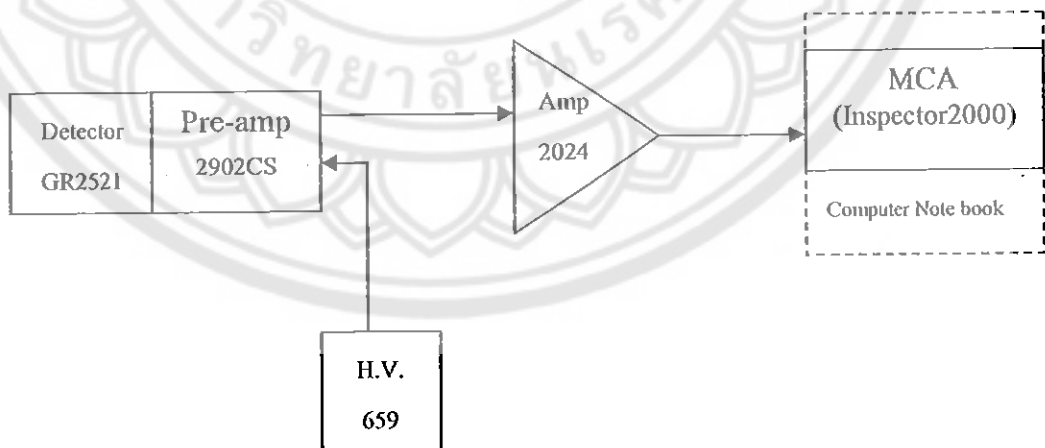
รูปที่ 2.9 กราฟปรับเทียบพลังงาน

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์การทดลองและวิธีการทดลอง

##### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์

1. ระบบวัดรังสี
  - 1.1 หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง(HP-Ge)
  - 1.2 Preamplifier
  - 1.3 Fast spectroscopy amplifier
  - 1.4 High voltage power supply
  - 1.5 ไมโครคอมพิวเตอร์
2. ขาดังเหล็กชนิดสามขา สำหรับตั้งหัววัดรังสี
3. ชุดต้นกำเนิดของรังสีมาตรฐานสำหรับปรับเทียบพลังงานและประสิทธิภาพของหัววัด ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ )
4. โปรแกรมวิเคราะห์แบบ Inspector 2000
5. โปรแกรมปฏิบัติการ ( Microsoft Excel )



รูปที่ 3.1 แสดงการติดตั้งหัววัดรังสี

### 3.2 วิธีการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดรังสี

#### 3.2.1 การเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงาน ( $\frac{N_0}{\phi}$ )

การประเมินค่าการตอบสนองของหัววัดต่อหน่วยของฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่ตกกระทบในแนวแกนของหัววัดนั้นสามารถทำได้จากการวัดฟลักซ์ของรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานแบบจุด (standard point source) หลาย ๆ ชนิดโดยให้พลังงานควบคุมจาก 200 keV- 3 MeV และนำผลการทดลองที่ได้มาลากเส้นข้อมูล ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้รังสีมาตรฐานจำนวน 4 ชนิด คือ  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการติดตั้งหัววัดรังสี ติดตั้งเครื่องมือให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
2. วางต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานแบบจุด  $^{137}\text{Cs}$  ที่ตำแหน่งแนวแกนของหัววัดรังสีโดยให้ระยะห่างระหว่างหัววัดกับรังสีมาตรฐานเท่ากับ 1 เมตร
3. นับฟลักซ์ของรังสีแกมมา 4,000 วินาที
4. ทำเช่นเดียวกันกับข้อ 1 และ 2 โดยเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานเป็น  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  ตามลำดับ
5. นับวัดแบบคร่าวๆ 4,000 วินาที
6. นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 2 ลบออกด้วยแบบคร่าวๆ แล้วคำนวณค่าอัตราการดูดกลืนในพีคของพลังงานต่าง ๆ ในสเปกตรัม
7. ลากเส้นข้อมูลที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{N_0}{\phi}$  กับพลังงานให้เป็นเส้นโค้งแนวโน้มหาสมการกำลังสอง

#### 3.2.2 การเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับมุม $\frac{N_f}{N_0}$ มีขั้นตอนดังนี้

1. นับฟลักซ์ของรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน  $^{137}\text{Cs}$  เป็นเวลา 4,000 วินาที แล้วลบออกด้วยแบบคร่าวๆ
2. ทำการคำนวณหาค่าอัตราการดูดกลืนในพีคของพลังงานต่าง ๆ ในสเปกตรัมของแต่ละต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน
3. เปลี่ยนมุมของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานโดยเพิ่มทีละ 10 องศา ตั้งแต่ 0 – 90 องศา ดังแสดงในรูป 2.4

4. เปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานเป็น  $^{60}\text{Co}$  ,  $^{22}\text{Na}$  ,  $^{133}\text{Ba}$  แล้วทำซ้ำข้อ 1-3 ตามลำดับ

5. วาดเส้นข้อมูลแนวโน้มที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{N_\theta}{N_0}$  กับมุม และหาสมการ

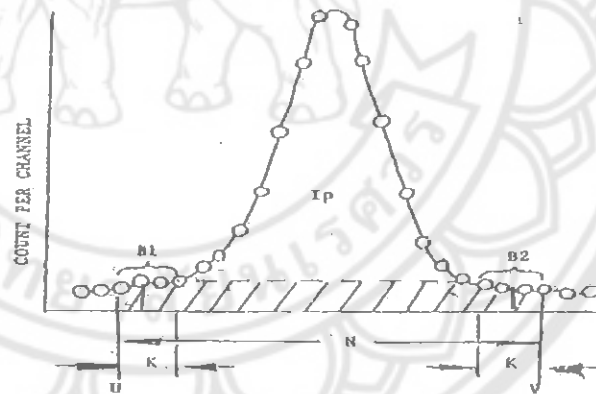
$$\text{เส้นแนวโน้ม } (R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0)$$

6. คำนวณค่า  $\frac{N_f}{N_0}$  จากสมการ  $\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\Phi}{d\theta} R(\theta) d\theta$  โดยใช้โปรแกรม Excel

คำนวณ

7. นำค่า  $\frac{N_f}{N_0}$  มาพล็อตกราฟกับค่าพลังงาน และฟิตข้อมูลให้เป็นเส้นแนวโน้ม

### 3.2.3 การคำนวณหาจำนวนนับสุทธิ



รูปที่ 3.2 แสดงให้เห็นการคำนวณหาจำนวนสุทธิ

การหาพื้นที่ใต้พีค ( peak area ) ในการคำนวณความแรงรังสีจำนวนนับที่ได้จากการวัดรังสี จะมีค่าดังสมการนี้คือ

$$\text{จำนวนนับสุทธิ} = \text{จำนวนนับที่ได้} - \text{จำนวนนับจาก background}$$

$$\text{หรือ net area} = \text{integral area} - \text{background area}$$

$$\text{โดยที่ intregal area} = \sum_{a=U}^V X_a$$

$$\text{Background} = \frac{1}{2} \times (B_1 + B_2) \times C_n$$



ดังนั้น 
$$\text{net area} = \sum_{a=U}^V X_a - \frac{1}{2} \times (B_1 + B_2) \times C_h$$

เมื่อ  $C_h = V - U + 1 =$  จำนวนช่องที่เลือกในการคำนวณ

$B_1 =$  ค่าเฉลี่ยของแบคกราวด์ทางด้านซ้ายมือ 4 จุด

$B_2 =$  ค่าเฉลี่ยของแบคกราวด์ทางด้านขวามือ 4 จุด

$K =$  จำนวนช่องที่ใช้ในการหาค่าเฉลี่ยของ background

$V =$  เลขช่องทางด้านขวามือ(จุดสุดท้าย)ของบริเวณที่เลือก

$U =$  เลขช่องทางด้านซ้ายมือ(จุดเริ่มต้น)ของบริเวณที่เลือก

$X_U =$  จำนวนนับในหมายเลขช่อง U

$X_V =$  จำนวนนับในหมายเลขช่อง V

### 3.3 วิธีการวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในพื้นที่จริง มีขั้นตอนดังนี้

1. เลือกสถานที่ที่เหมาะสมกับการวัดรังสี
2. เตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
3. จัดอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.1 โดยให้มีระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีกับผิวดินเท่ากับ 1 เมตร
4. ทำการวัดรังสีแกมมาในสถานที่นั้น ๆ จำนวน 3 ครั้ง โดยแต่ละครั้งจะใช้เวลา 4,000 วินาที
5. รวบรวมและเก็บข้อมูล

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์ปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในห้องปฏิบัติการ

ในการวิเคราะห์ปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในห้องปฏิบัติการ นั้น ทำโดยเก็บตัวอย่างในสถานที่นั้นๆ แห่งละ 3 จุด เพื่อนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบผล (นำตัวอย่างดินไปอบไล่ความชื้น และนำตัวอย่างไปบดให้ละเอียด จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้บรรจุลงในกล่องตัวอย่าง และเก็บตัวอย่างดินไว้เป็นเวลา 30 วัน เพื่อให้การสลายตัวของสารอยู่ในสภาวะที่สมดุล แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ผล) แล้วนำไปวัดสเปกตรัมโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง (HPGe) นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผล และนำข้อมูลความชื้น และความหนาแน่นของดินเข้ามา

วิเคราะห์ด้วยโดยใช้โปรแกรม Excel เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของเรดิโอไอโนวไคลด์ที่ตรวจพบในพื้นที่นั้นๆ และปริมาณรังสีที่ดูดกลืนในอากาศที่มีผลจากเรดิโอไอโนวไคลด์ตัวนั้นๆ นำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ ในแต่ละสถานที่และวิเคราะห์ที่ได้ แต่ในการทำวิจัยครั้งนี้เราได้ส่งตัวอย่างดินที่เราเก็บมาจากภาคสนามซึ่งผ่านการเตรียมตัวอย่างดินดังที่กล่าวมาแล้วส่งไปที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติช่วยวิเคราะห์ผลตัวอย่างดินให้ เพื่อจะได้ นำผลที่ได้จากการวัดในภาคสนามมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำให้กับการวัดในภาคสนามนั่นเอง

#### 3.4.1 วิธีเตรียมตัวอย่างดิน

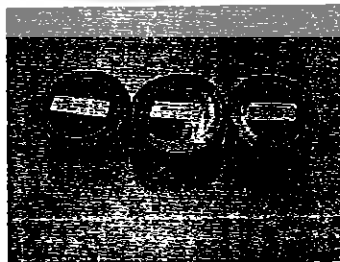
##### วิธีการเตรียมตัวอย่าง

เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมามีทั้งหิน ดิน หวาย ก่อนนำมาวัดต้องมีการเตรียมตัวอย่างก่อนดังนี้

- ก. ชุดดินจากบริเวณที่สำรวจ 3 จุด โดยแต่ละจุดมีขนาด 1 ตารางฟุต
- ข. นำดินที่ได้ไปบดไล่ความชื้น
- ค. นำตัวอย่างที่ได้ไปบดละเอียด
- ง. บรรจุตัวอย่างดินที่ได้ลงในกล่องพลาสติกใสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว จากนั้นปิดฝาแล้วพันด้วยเทปกาว และทาสีลิโคนทับเพื่อป้องกันอากาศเข้า
- จ. เก็บตัวอย่างดินที่ได้ไว้เป็นระยะเวลา 30 วัน ก่อนที่จะนำไปวัด

##### วิธีเตรียมสารมาตรฐาน

การเตรียมสารมาตรฐานนั้น ควรให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง และควรเตรียมให้มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันด้วย ( ควรบรรจุในภาชนะให้มีปริมาตรเท่ากัน มีขนาดและรูปร่างเดียวกัน ) ส่วนการบรรจุเตรียมเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างดิน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างดิน

### 3.4.2 การเลือกพลังงานของรังสีแกมมาเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณ

เนื่องจากตัวอย่างที่เราเตรียมนั้นมีธาตุกัมมันตรังสีหลายตัวแต่สิ่งที่เราต้องการวัดคือ ปริมาณโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียม ในทางปฏิบัตินั้นเราสามารถวัดหาปริมาณโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมได้โดยการเตรียมสารมาตรฐานของทั้งสามตัว แล้วเลือกค่าพลังงานที่เหมาะสมมาใช้วัดในการเลือกก้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้คือ

1. พลังงานที่เลือกวัดจะต้องมีความเข้มข้นมากพอ และไม่รบกวนพีคที่ 1.46 MeV ของโพแทสเซียม
2. มีพลังงานจากนิวไคลด์อื่น ๆ รบกวนน้อยที่สุด
3. มีพลังงานสูงพอ เพราะพลังงานต่ำจะมีปัญหาเรื่องการดูดกลืนตัวเอง จึงทำให้พื้นที่ใต้พีคที่เราสนใจน้อยลง และมีการรบกวนมากขึ้นในการเลือกพลังงานแสดงไว้ในรูปที่ 3.5

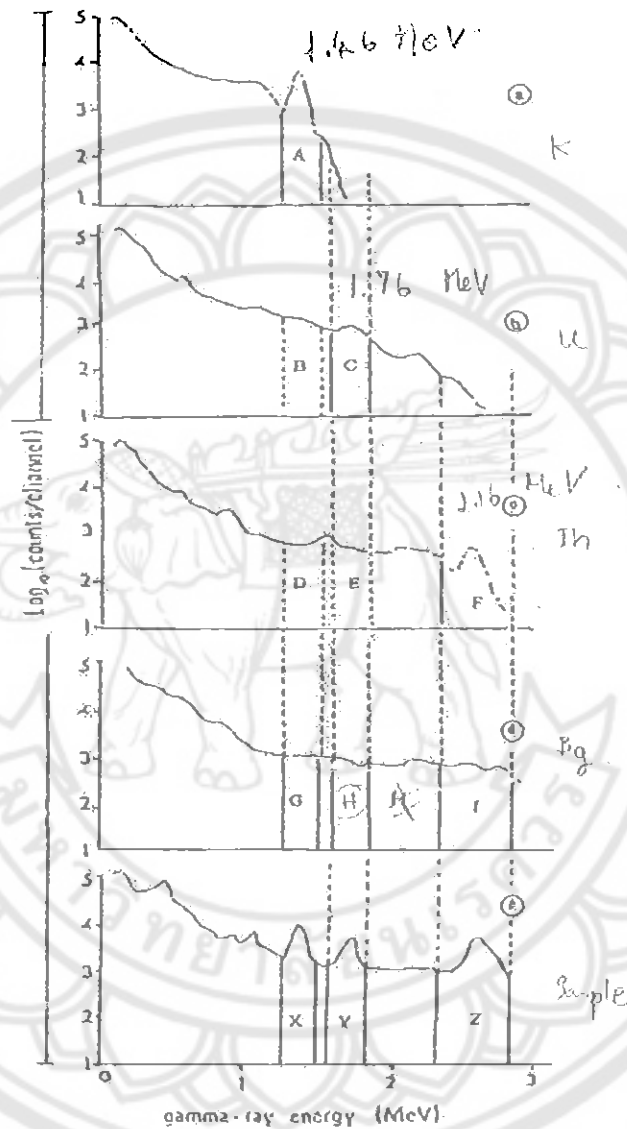
### 3.4.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ดินในห้องปฏิบัติการ

1. จัดระบบวัดดังรูปที่ 3.1
2. วางภาชนะบรรจุตัวอย่างลงบนหัววัด
3. ปรับเทียบพลังงาน โดยใช้พีคของ บิสมัท-241 พลังงาน 1.76 MeV และทอเรียม -208 พลังงาน 2.614 MeV และ โพแทสเซียม-40 พลังงาน 1.46 MeV
4. วัดสเปกตรัมของสารมาตรฐาน โพแทสเซียม แล้วหาพื้นที่ใต้พีคในช่องของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม ( ใช้พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด )
5. วัดสเปกตรัมของสารมาตรฐานยูเรเนียม แล้วหาพื้นที่ใต้พีคในช่องของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม ( ใช้พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด )
6. วัดสเปกตรัมของสารมาตรฐานทอเรียม แล้วหาพื้นที่ใต้พีคในช่องของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม ( ใช้พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด )
7. วัดสเปกตรัมของแบคกราวด์ แล้วหาพื้นที่ใต้พีคในช่องของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม ( ใช้พื้นที่ใต้พีคทั้งหมด )
8. วิเคราะห์ปริมาณ โพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมในตัวอย่าง

๑ GC  
 793  
 ๕ B๖๗  
 ๗๗๒๗๘  
 ๗๕๕๐



- 8 JUL 2011  
 1 5639451



รูปที่ 3.4 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาจากสารมาตรฐาน ตัวอย่างดิน และแบคทีเรีย

a) โพแทสเซียม b) ยูเรเนียม c) ทอเรียม d) แบทเทรเวค e) Sample

จากรูปจะเห็นว่า

จำนวนนับสุทธิของสารมาตรฐาน โพแทสเซียม = (A-G)

จำนวนนับสุทธิของสารมาตรฐาน ยูเรเนียม = (C-H)

$$\alpha = \frac{B-G}{C-H}$$

จำนวนนับสุทธิของสารมาตรฐานทอเรียม = (F-I)

$$\beta = \frac{E-H}{F-I}$$

$$\gamma = \frac{D-G}{F-I}$$

นำค่าต่างๆ ไปแทนค่าหาความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตัวอย่างดิน  
ได้จากสมการ

$$\text{Th in sample} = \% \text{ Th in Standard} \times \frac{(Z-I)}{(F-I)} \times \frac{Wt_{\text{sample}}}{Wt_{\text{std}}}$$

$$\text{U in sample} = \% \text{ U in Standard} \times \frac{(Y-H) - \beta(Z-I)}{(C-H)} \times \frac{Wt_{\text{sample}}}{Wt_{\text{std}}}$$

$$\text{K in sample} = \% \text{ K in Standard} \times \frac{(X-G) - \alpha(Y-H) - \gamma(Z-I)}{(A-G)} \times \frac{Wt_{\text{sample}}}{Wt_{\text{std}}}$$

เมื่อ  $Wt_{\text{sample}}$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างดิน

$Wt_{\text{Std}}$  คือ น้ำหนักของสารมาตรฐาน

มหาวิทยาลัยพระศวร

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในภาคสนามกับห้องปฏิบัติการ  
 ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของรังสีแกมมาจากการวัดในภาคสนาม  
 และผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการโดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ตัวอย่างดิน	กัมมันตรังสี	ค่าความเข้ม ของรังสีแกมมาที่วัดได้ จากภาคสนาม (Bq/kg)	ค่าความเข้มของรังสี แกมมาที่ได้จากการ วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ (Bq/kg)
ดินทุ่งนา คลองหนองเหล็ก	K-40	629.00 ± 17.73	636.20 ± 12.32
	U-238	296.00 ± 12.17	MDC=236.63
	Th-232	74.00 ± 6.08	67.64 ± 2.74
หอพักหญิง3-4 มหาวิทยาลัยนเรศวร	K-40	592.00 ± 17.20	405.11 ± 9.73
	U-238	209.79 ± 10.24	246.36 ± 54.88
	Th-232	59.2 ± 5.44	45.89 ± 1.93
ดินบ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์	K-40	172.79 ± 13.14	121.50 ± 5.46
	U-238	123.21 ± 11.10	MDC=116.56
	Th-232	37.00 ± 6.08	21.50 ± 1.42
ดินเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์	K-40	296.00 ± 12.17	198.74 ± 7.09
	U-238	234.21 ± 10.82	MDC=147.99
	Th-232	29.6 ± 3.85	15.47 ± 1.30

หมายเหตุ : MDC (Minimum detectable concentration) หมายถึง ค่าต่ำสุดที่สามารถวัดได้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมในดิน (Bq/kg)

บริเวณ	K-40	U-238	Th-232
	Bq/kg	Bq/kg	Bq/kg
-ทุ่งนา,สนามหญ้า,บ้านวังมะปราง,เหมืองแร่	296-629	209-296	29-74
-ประเทศไทย	7-720		11-123
-ประเทศจีน	12-2185	2-520	1-457
-โลก	140-850	16-110	11-64

ที่มา: Journal nuclear science and Technology .Vol.42 No.10.p 888-896 (October 2005) and International Journal environmental science and Technology .Vol.1 No.4.pp 279-285,Winter 2005

#### อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวัดปริมาณความเข้มข้นของรังสีแกมมาของ  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  โดยวัดในภาคสนาม (In-Situ) และวัดในห้องปฏิบัติการโดยใช้เทคนิค Gamma Spectroscopy 4 บริเวณ ได้แก่ บริเวณทุ่งนา คลองหนองเหล็ก, หอพักหญิง 3-4 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, บ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์ และเหมืองแร่เหล็กสุริยะ จ.เพชรบูรณ์ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของรังสีแกมมาจากการวัดในภาคสนามและผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการโดยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ พบว่าปริมาณรังสีแกมมาของ  $^{40}\text{K}$  มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาได้แก่  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  ตามลำดับ บริเวณที่มีปริมาณ  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  มากที่สุดได้แก่ บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมและฟอสฟอรัส ซึ่งฟอสฟอรัสได้จากแร่ฟอสเฟตซึ่งเป็นแร่ที่มีระดับ  $^{238}\text{U}$  สูง จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าเปรียบเทียบปริมาณรังสีแกมมาในดินของ  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  ของผลการศึกษาครั้งนี้กับค่ามาตรฐานที่วัดได้ของประเทศไทย, ประเทศจีน และโลกพบว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นจากผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่าปริมาณรังสี  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  จากภาคสนามและการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการนั้นค่าใกล้เคียงกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยครั้งนี้เราได้ออกวัดรังสีในพื้นที่จริงซึ่งได้ปริมาณรังสีที่อยู่ในระดับปกติ(สนามหญ้า หน้าหอพักหญิง 3-4 มหาวิทยาลัยนเรศวร,บ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์) และบริเวณที่มีปริมาณรังสีอยู่ในระดับมากกว่าพื้นที่ปกติ คือบริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการใช้ปุ๋ยโปแตสเซียมเป็นจำนวนมาก ทำให้มีปริมาณรังสีแกมมาของ<sup>40</sup>K สูงกว่าพื้นที่ปกติ ความแรงรังสีที่วัดได้จากพื้นที่จริงของ<sup>40</sup>K ( 296.00-629.00 Bq/kg) , <sup>238</sup>U (209.79-296.00 Bq/kg) และ<sup>232</sup>Th (29.60-74.00 Bq/kg) จากการเก็บตัวอย่างดินแล้วนำไปอบให้แห้ง จากนั้นนำมาบดบดลงในกล่องพลาสติก แล้วนำไปวัดในห้องปฏิบัติการโดยใช้เทคนิค Gamma Spectroscopy หาค่าความแรงรังสีของ<sup>40</sup>K (121.50-636.20 Bq/kg) , <sup>238</sup>U (116.56-246.36 Bq/kg) และ<sup>232</sup>Th (15.40-67.74 Bq/kg) จะเห็นว่าปริมาณความเข้มของรังสี<sup>40</sup>K , <sup>238</sup>U และ <sup>232</sup>Th ที่ได้จากการวัดรังสีจากภาคสนามกับการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณรังสีแกมมาในดินของ<sup>40</sup>K, <sup>238</sup>U และ<sup>232</sup>Th ของผลการศึกษานี้กับค่ามาตรฐานที่วัดได้ของประเทศไทย, ประเทศจีน และโลกพบว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน ดังนั้นสามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้ในการหาปริมาณของรังสีแกมมาจากภาคสนามได้อย่างแม่นยำและสะดวกมากขึ้นโดยไม่ต้องวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการซึ่งต้องใช้เวลาในการเตรียมและเก็บตัวอย่างดินเป็นเวลานานถึง 1 เดือน



### วิจารณ์ผลการวิจัย

จากการวัดปริมาณรังสีแกมมาในภาคสนามทั้งสี่บริเวณจะเห็นว่าปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียมอยู่เป็นจำนวนมากเนื่องจากในธรรมชาติของเรามีโพแทสเซียมมากอยู่แล้ว แต่ที่เห็นชัดเจนที่สุดคือบริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็กจะมีปริมาณรังสีแกมมาของโพแทสเซียมมากกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องมาจากบริเวณแห่งนี้เป็นบริเวณที่มีการทำการเกษตร หรือมีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมเป็นจำนวนมากนั่นเอง ดังนั้นการวัดรังสีแกมมาในพื้นที่จริงโดยใช้หัววัดรังสีเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง เป็นวิธีที่สามารถทำได้และรู้ผลอย่างรวดเร็ว อันจะเกิดประโยชน์อย่างมากหากเกิดอุบัติเหตุจนเกิดการรั่วไหลของรังสีจากกิจกรรมต่างๆ อันรวมไปถึง การทดลองอาวุธนิวเคลียร์ จากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์หรือแม้แต่การรั่วไหลของรังสีจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ ซึ่งสามารถทำการวัดและทราบผลในเวลาอันเร็ว ทันทีทั้งที่ และสะดวกโดยไม่ต้องรอผลการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการซึ่งต้องใช้เวลาจนถึง 1 เดือน

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้หัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นเพราะจะทำให้การวัดมีความแม่นยำมากขึ้น
2. ควรเก็บตัวอย่างดินหลายๆจุดมากขึ้นเพื่อหาค่าเฉลี่ยของผลการวัดจะได้มีความถูกต้องมากขึ้น
3. ควรเพิ่มระยะเวลาในการวัดเพื่อให้ได้ปริมาณความเข้มของรังสีสูงขึ้น
4. ควรมีแบตเตอรี่สำรองสำหรับ Computer Notebook เพราะการวัดแต่ละจุดต้องใช้เวลาานพอสมควร
5. ควรหาสารมาตรฐานที่มีหลายค่าพลังงานมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเปรียบเทียบหัววัดรังสี
6. ควรใช้สารมาตรฐานที่มีความแรงรังสีมากกว่านี้เนื่องจากจะง่ายต่อการวิเคราะห์ผล

## บรรณานุกรม

1. นภลัย คำสีม่วง , ปาจารย์ยี่ สิงโต , สุนิดา อนุวด ,2541, " การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง" ,งานวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ม.นเรศวร , หน้า 1-59.
2. ภารตี สรวาสสร, 2539 , " การวัดรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมโดยใช้หัววัดเจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง" , วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , หน้า 1-97.
3. อภิญญา จาดศรี,2543, " การวัดรังสีแกมมาของโพแทสเซียม ยูเรเนียมและทอเรียมโดยใช้หัววัด เจอร์เมเนียมความบริสุทธิ์สูง( HPGe)" , งานวิจัยวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ ม.นเรศวร , หน้า 1- 22.
4. Kevin M.Miller and Prter Shell , "Enviromental Measuarment Laboratory", U.S Department of Energy New York ( 1993).
5. James E.Turner,1995," Atoms Radiation And Radiation Protection", 2<sup>nd</sup> Edication, A Wiley Interscience Publication, pp 87-88.
2. T.A.Littleftied and N.thorley , "Atomic and nuclear physics", 2<sup>nd</sup>Edication, senior lectures, Newcastle Univerity ,pp 57 – 59.

## ภาคผนวก ก.

## การเปรียบเทียบห้วงรังสีกับมุม

## 1. แสดงตารางการหักเหค่าแบบคกราวด์ของสารมาตรฐาน

ตารางที่ ก.1 แสดงการหักเหค่าแบบคกราวด์ ของ  $^{137}\text{Cs}$  พลังงาน 662 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	2119	1694	1.00
10	1663	1985	1.17
20	1857	1968	1.16
30	1705	1897	1.12
40	2645	2102	1.24
50	2654	2041	1.20
60	2049	1564	0.92
70	2986	2312	1.36
80	2755	2043	1.21
90	2841	2145	1.27

ตารางที่ ก.2 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{60}\text{Co}$  พลังงาน 1173 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	489	401	1.00
10	579	413	1.03
20	688	461	1.15
30	463	395	0.99
40	562	472	1.18
50	456	375	0.94
60	645	540	1.35
70	861	738	1.84
80	495	439	1.09
90	556	501	1.25

ตารางที่ ก.3 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{60}\text{Co}$  พลังงาน 1332 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	320	214	1.00
10	245	215	1.00
20	312	244	1.14
30	405	301	1.41
40	310	291	1.36
50	350	311	1.45
60	312	223	1.04
70	298	264	1.23
80	321	241	1.13
90	314	225	1.05

ตารางที่ ก.4 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{22}\text{Na}$  พลังงาน 511 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	906	698	1.00
10	1425	771	1.10
20	941	870	1.25
30	847	685	0.98
40	841	711	1.02
50	798	697	1.00
60	811	767	1.10
70	856	721	1.03
80	989	877	1.26
90	902	702	1.01

ตารางที่ ก.5 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{22}\text{Na}$  พลังงาน 1275 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	195	115	1.00
10	212	102	0.89
20	254	109	0.95
30	315	135	1.17
40	158	113	0.98
50	156	156	1.36
60	264	112	0.97
70	313	132	1.15
80	202	140	1.22
90	254	143	1.24

ตารางที่ ก.6 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 276.3 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	701	560	1.00
10	698	523	0.93
20	689	548	0.98
30	725	583	1.04
40	706	628	1.12
50	895	621	1.11
60	801	610	1.09
70	759	606	1.08
80	789	598	1.07
90	721	623	1.11

ตารางที่ ก.7 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 302.7 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_{\theta} / N_0$
0	2119	1694	1.00
10	1663	1985	1.17
20	1857	1968	1.16
30	1705	1897	1.12
40	2645	2102	1.24
50	2654	2041	1.20
60	2049	1564	0.92
70	2986	2312	1.36
80	2755	2043	1.21
90	2841	2145	1.27

ตารางที่ ก.8 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 355.9 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_0 / N_0$
0	3232	2989	1.00
10	2798	2789	0.93
20	3530	3173	1.06
30	4201	3459	1.16
40	5405	3586	1.20
50	5450	4148	1.39
60	4356	3556	1.19
70	4442	3992	1.34
80	4487	4084	1.37
90	4132	3102	1.04

ตารางที่ ก.9 แสดงการหักลบค่าแบคกราวด์ ของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 383.7 keV

มุม ( $\theta$ )	จำนวนที่นับได้	จำนวนนับสุทธิ	$N_0 / N_0$
0	462	385	1.00
10	843	392	1.02
20	244	365	0.95
30	458	356	0.92
40	300	361	0.94
50	290	377	0.98
60	847	396	1.03
70	865	378	0.98
80	1635	386	1.00
90	1893	354	0.92

2. หาค่า  $R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$  จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{N_\theta}{N_0}$  กับมุม ( $\theta$ )

โดย  $R(\theta)$  เป็นสมการของเส้นแนวโน้ม จะได้ดังนี้

Cs-137(662 keV)    มี  $R(\theta) = -1E-06x^3 + 0.0001x^2 + 0.0094x + 1.0532$

Co-60(1173 keV)    มี  $R(\theta) = -4E-06x^3 + 0.0006x^2 - 0.0139x + 1.0709$

Co-60(1332 keV)    มี  $R(\theta) = 1E-06x^3 - 0.0004x^2 + 0.0221x + 0.9244$

Na-22(551 keV)    มี  $R(\theta) = 4E-07x^3 - 5E-05x^2 + 0.0016x + 1.0609$

Na-22(1275 keV)    มี  $R(\theta) = 6E-08x^3 - 2E-05x^2 + 0.0043x + 0.9373$

Ba-133(276.3 keV)    มี  $R(\theta) = -4E-07x^3 + 3E-05x^2 + 0.002x + 0.9615$

Ba-133(302.7 keV)    มี  $R(\theta) = 2E-06x^3 - 0.0003x^2 + 0.0112x + 1.03$

Ba-133(355.9 keV)    มี  $R(\theta) = -3E-06x^3 + 0.0003x^2 - 0.0024x + 0.9799$

Ba-133(383.7 keV)    มี  $R(\theta) = -2E-06x^3 + 0.0002x^2 - 0.0078x + 1.0266$

3. หาค่า  $\frac{N_f}{N_0}$  จากสมการ  $\frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) d\theta$  โดยนำค่า  $R(\theta)$  มาแทนในโปรแกรม Excel

เพื่อช่วยในการคำนวณ จะได้

Cs-137(662 keV)    มี  $N_f/N_0 = 1.06$

Co-60(1173 keV)    มี  $N_f/N_0 = 1.06$

Co-60(1332 keV)    มี  $N_f/N_0 = 0.94$

Na-22(551 keV)    มี  $N_f/N_0 = 1.06$

Na-22(1275 keV)    มี  $N_f/N_0 = 0.94$

Ba-133(383.7 keV)    มี  $N_f/N_0 = 0.96$

Ba-133(383.7 keV)    มี  $N_f/N_0 = 1.04$

Ba-133(383.7 keV)    มี  $N_f/N_0 = 0.98$

Ba-133(383.7 keV)    มี  $N_f/N_0 = 1.02$

4. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{N_f}{N_0}$  กับพลังงาน เพื่อหาสมการกำลังสองจะได้สมการคือ

$Y = 1.4021X^{0.0301}$  เมื่อแทนค่าพลังงานของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียมลงในสมการจะได้

$^{40}\text{K}$  (1461 keV)    มีค่า  $N_f/N_0 = 0.99$

$^{238}\text{U}$  (1765 keV)    มีค่า  $N_f/N_0 = 0.99$

$^{232}\text{Th}$  (2615 keV)    มีค่า  $N_f/N_0 = 0.98$



5.2 การเปรียบเทียบห้วงวัดรังสีกับพลังงาน  $\frac{N_0}{\Phi}$  หาได้จากสมการ  $\frac{N_0}{\Phi} = 4\pi(100)^2 \cdot \epsilon$

1. การคำนวณหาค่า  $A_0$  ของชุดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน

$$^{137}\text{Cs} \text{ มี } A_0 = 3.478 \mu\text{Ci} \text{ (11/03/42) จะมีค่า } t = 8.34 \text{ ปี}$$

$$^{60}\text{Co} \text{ มี } A_0 = 0.708 \mu\text{Ci} \text{ (11/03/42) จะมีค่า } t = 8.34 \text{ ปี}$$

$$^{22}\text{Na} \text{ มี } A_0 = 0.650 \mu\text{Ci} \text{ (30/10/40) จะมีค่า } t = 7.96 \text{ ปี}$$

$$^{133}\text{Ba} \text{ มี } A_0 = 0.970 \mu\text{Ci} \text{ (03/02/42) จะมีค่า } t = 8.70 \text{ ปี}$$

3. คำนวณหาค่า  $\lambda$  ได้จากสมการ  $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$

$$\lambda \text{ ของ Cs-137} = \frac{0.693}{30\text{y}} = 0.02 \text{ y}^{-1}$$

$$\lambda \text{ ของ Co-60} = \frac{0.693}{5.27\text{y}} = 0.13 \text{ y}^{-1}$$

$$\lambda \text{ ของ Na-22} = \frac{0.693}{2.62\text{y}} = 0.26 \text{ y}^{-1}$$

$$\lambda \text{ ของ Ba-133} = \frac{0.693}{10.54\text{y}} = 0.07 \text{ y}^{-1}$$

4. คำนวณหาความแรงรังสีของชุดต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานซึ่งหาได้จากสูตร คือ

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

จะได้

$$A \text{ ของ Cs-137} = 3.478 \exp(-0.0231 \times 8.34) = 0.60 \mu\text{Ci}$$

$$A \text{ ของ Co-60} = 0.708 \exp(-0.131499 \times 8.34) = 0.24 \mu\text{Ci}$$

$$A \text{ ของ Na-22} = 0.650 \exp(-0.264504 \times 7.96) = 0.08 \mu\text{Ci}$$

$$A \text{ ของ Ba-133} = 0.970 \exp(-0.06575 \times 8.7) = 0.55 \mu\text{Ci}$$

5. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพของการวัดรังสี หาได้จากสูตรคือ

$$\epsilon = \frac{\text{Peak net counts}}{L_t(\text{sec}) \cdot A(\mu\text{Ci}) \cdot G(\text{gamma / dis}) \cdot 3.7 \times 10^4 (\text{dis / sec})}$$

โดยที่ใช้ Peak net count ที่ 0 องศา

$$\epsilon \text{ ของ Cs-137(662 keV)} = \frac{7066}{4000 \times 0.602018 \times 0.852 \times (3.7 \times 10^4)} = 9.31\text{E-05}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Co-60}(11732 \text{ keV}) = \frac{401}{4000 \times 0.236313 \times 0.999 \times (3.7 \times 10^4)} = 1.15\text{E-05}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Co-60}(1332 \text{ keV}) = \frac{214}{4000 \times 0.236313 \times 1 \times (3.7 \times 10^4)} = 6.12\text{E-06}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Na-22}(511 \text{ keV}) = \frac{698}{4000 \times 0.079199 \times 0.999 \times (3.7 \times 10^4)} = 5.96\text{E-05}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Na-22}(1275 \text{ keV}) = \frac{115}{4000 \times 0.079199 \times 1.8 \times (3.7 \times 10^4)} = 5.45\text{E-06}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Ba-133}(276.3 \text{ keV}) = \frac{560}{4000 \times 0.547452 \times 0.07 \times (3.7 \times 10^4)} = 9.87\text{E-05}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Ba-133}(302.7 \text{ keV}) = \frac{1694}{4000 \times 0.547452 \times 0.14 \times (3.7 \times 10^4)} = 1.49\text{E-04}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Ba-133}(355.9 \text{ keV}) = \frac{2989}{4000 \times 0.547452 \times 0.69 \times (3.7 \times 10^4)} = 5.35\text{E-05}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Ba-133}(383.7 \text{ keV}) = \frac{385}{4000 \times 0.547452 \times 0.08 \times (3.7 \times 10^4)} = 5.94\text{E-05}$$

6. พล็อตกราฟหาสมการกำลังสองของความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพของการวัดรังสี ที่มุม 0 องศา กับพลังงานจะได้สมการ  $Y=3.2475X^{-1.7924}$  แล้วคำนวณหาประสิทธิภาพของการวัดรังสีที่มุม 0 องศาของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม จากสมการข้างต้นจะได้

$$\varepsilon \text{ ของ K-40} = 3.2475 (1461)^{-1.7924} = 6.90 \text{ E-06}$$

$$\varepsilon \text{ ของ U-238} = 3.2475 (1765)^{-1.7924} = 4.92 \text{ E-06}$$

$$\varepsilon \text{ ของ Th-232} = 3.2475 (2615)^{-1.7924} = 2.43 \text{ E-06}$$

6. คำนวณหาค่า  $\frac{N_0}{\Phi}$  จากสมการ  $\frac{N_0}{\Phi} = 4 \cdot \pi \cdot h^2 \cdot \epsilon$  โดยที่  $h$  คือระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีกับ

พื้นผิวดินซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 เซนติเมตร ดังนั้นจะได้ค่า  $\frac{N_0}{\Phi}$  ของ  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  คือ

$$\frac{N_0}{\Phi} \text{ ของ } ^{40}\text{K} = 4 \pi (100)^2 \cdot 6.90 \text{ E-}06 = 0.87 \text{ cps/photon/cm}^2\text{-s}$$

$$\frac{N_0}{\Phi} \text{ ของ } ^{238}\text{U} = 4 \pi (100)^2 \cdot 4.92 \text{ E-}06 = 0.62 \text{ cps/photon/cm}^2\text{-s}$$

$$\frac{N_0}{\Phi} \text{ ของ } ^{232}\text{Th} = 4 \pi (100)^2 \cdot 2.43 \text{ E-}06 = 0.31 \text{ cps/photon/cm}^2\text{-s}$$

7. เปิดตารางหาค่า  $\frac{\Phi}{S}$  จะได้  $\frac{\Phi}{S}$  ของ  $^{40}\text{K}$  =  $3.63 \times 10^{-2} \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ per pCi/g}$

$$\frac{\Phi}{S} \text{ ของ } ^{238}\text{U} = 5.39 \times 10^{-2} \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ per pCi/g}$$

$$\frac{\Phi}{S} \text{ ของ } ^{232}\text{Th} = 16.70 \times 10^{-2} \text{ } \gamma \text{ cm}^2 \text{ per pCi/g}$$

8. คำนวณหาค่า  $\frac{N_f}{S}$  จากสูตร  $\frac{N_f}{S} = \frac{N_0}{\Phi} \cdot \frac{N_f}{N_0} \cdot \frac{\Phi}{S}$  จะได้

$$\frac{N_f}{S} \text{ ของ } ^{40}\text{K} = 0.87 \times 0.99 \times 3.63 \times 10^{-2} = 0.03 \text{ cps/pCi/g}$$

$$\frac{N_f}{S} \text{ ของ } ^{238}\text{U} = 0.62 \times 0.99 \times 5.39 \times 10^{-2} = 0.03 \text{ cps/pCi/g}$$

$$\frac{N_f}{S} \text{ ของ } ^{232}\text{Th} = 0.31 \times 0.98 \times 16.70 \times 10^{-2} = 0.05 \text{ cps/pCi/g}$$

9. ทดลองรังสีแกมมาในสิ่งแวดล้อมในบริเวณพื้นที่จริง โดยใช้เวลาในการวัดแต่ละจุด 4000 วินาที ดังนี้

9.1 บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก

9.2 บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4 มหาวิทยาลัยนเรศวร

9.3 บริเวณบ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์

9.4 บริเวณเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์

10. คำนวณหาความแรงของรังสีในดินจาก สมการ  $A = \frac{N}{N_f / S}$

10.1 หาค่าอัตรานับสุทธิ  $N(S^{-1})$

บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก

$$^{40}\text{K} \text{ มีค่า } N = 2039 / 4000 = 0.51 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{238}\text{U} \text{ มีค่า } N = 956 / 4000 = 0.24 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{232}\text{Th} \text{ มีค่า } N = 405 / 4000 = 0.10 \quad \text{s}^{-1}$$

บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

$$^{40}\text{K} \text{ มีค่า } N = 1916 / 4000 = 0.48 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{238}\text{U} \text{ มีค่า } N = 685 / 4000 = 0.17 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{232}\text{Th} \text{ มีค่า } N = 306 / 4000 = 0.08 \quad \text{s}^{-1}$$

บริเวณบ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์

$$^{40}\text{K} \text{ มีค่า } N = 553 / 4000 = 0.14 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{238}\text{U} \text{ มีค่า } N = 387 / 4000 = 0.10 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{232}\text{Th} \text{ มีค่า } N = 201 / 4000 = 0.05 \quad \text{s}^{-1}$$

บริเวณเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์

$$^{40}\text{K} \text{ มีค่า } N = 968 / 4000 = 0.24 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{238}\text{U} \text{ มีค่า } N = 761 / 4000 = 0.19 \quad \text{s}^{-1}$$

$$^{232}\text{Th} \text{ มีค่า } N = 146 / 4000 = 0.04 \quad \text{s}^{-1}$$

## 10.2 คำนวณหาความแรงรังสีในดิน ทั้ง 3 จุด

### บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก

$$^{40}\text{K} (1461 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.51/0.03 = 17.00 \text{ pCi}$$

$$^{238}\text{U} (1765 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.24/0.03 = 8.00 \text{ pCi}$$

$$^{232}\text{Th}(2615 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.10/0.05 = 2.00 \text{ pCi}$$

### บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

$$^{40}\text{K} (1461 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.48/0.03 = 16.00 \text{ pCi}$$

$$^{238}\text{U} (1765 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.17/0.03 = 5.67 \text{ pCi}$$

$$^{232}\text{Th}(2615 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.08/0.05 = 1.60 \text{ pCi}$$

### บริเวณบ้านวังมะปราง อ.วังโป่ง จ.เพชรบูรณ์

$$^{40}\text{K} (1461 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.14/0.03 = 4.67 \text{ pCi}$$

$$^{238}\text{U} (1765 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.10/0.03 = 3.33 \text{ pCi}$$

$$^{232}\text{Th}(2615 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.05/0.05 = 1.00 \text{ pCi}$$

### บริเวณเหมืองแร่สุริยะ จ.เพชรบูรณ์

$$^{40}\text{K} (1461 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.24/0.03 = 8.00 \text{ pCi}$$

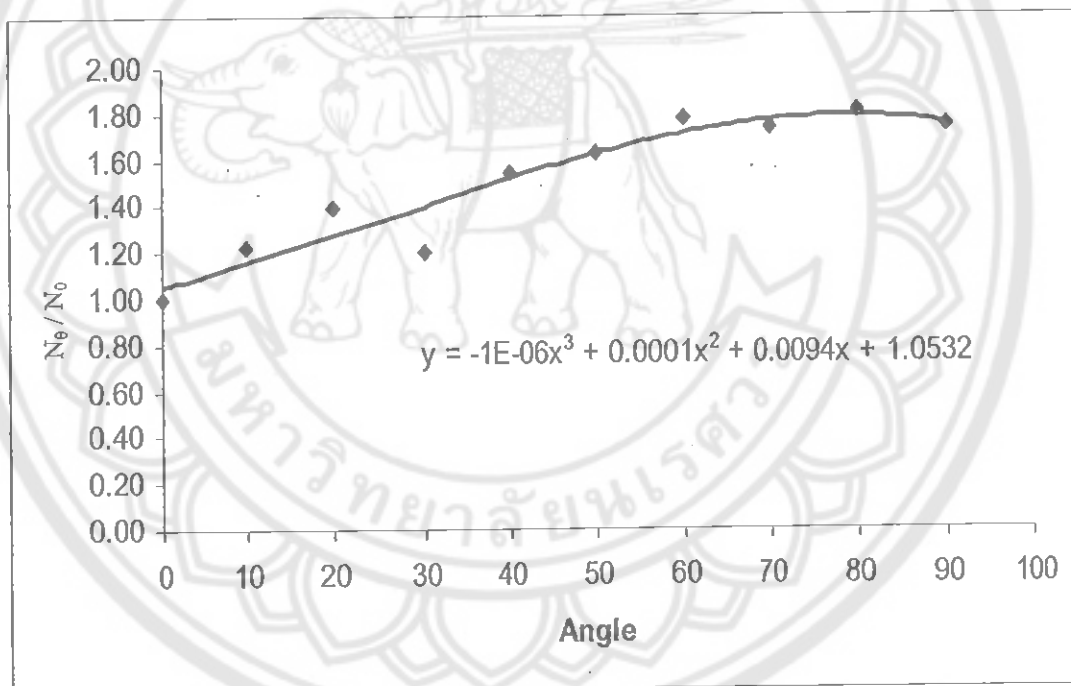
$$^{238}\text{U} (1765 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.19/0.03 = 6.33 \text{ pCi}$$

$$^{232}\text{Th}(2615 \text{ keV}) \text{ มีค่า } A = 0.04/0.05 = 0.80 \text{ pCi}$$

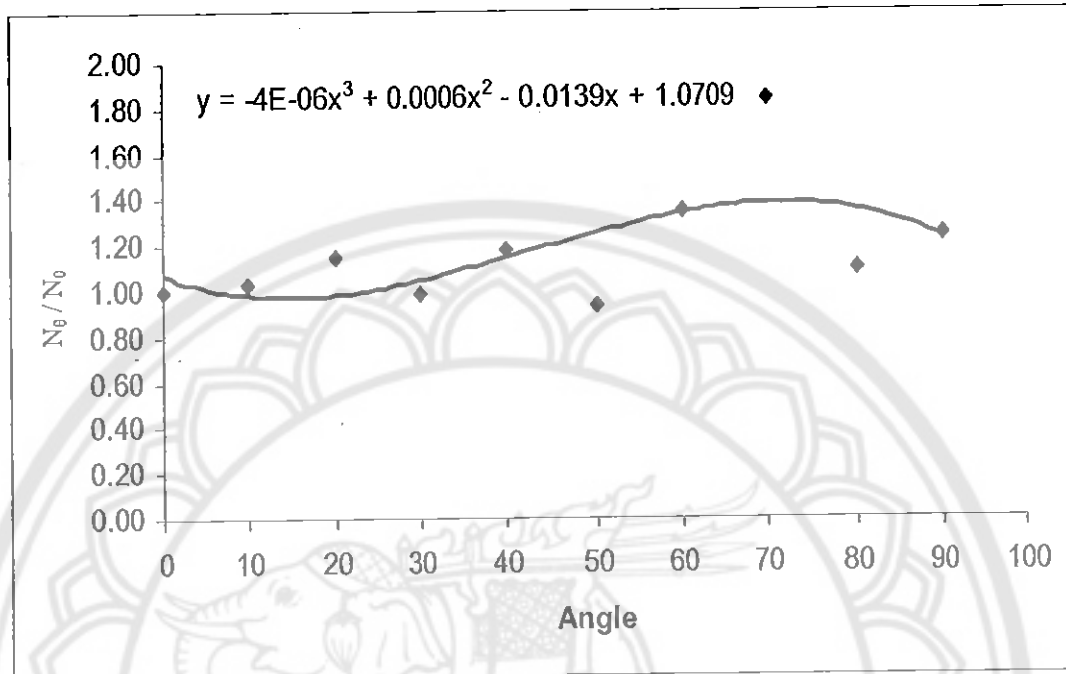
\*\*\*\* เปลี่ยนหน่วยเป็นเบคเคอเรล ต่อ กิโลกรัม โดยที่ \*\*\*\*

$$1 \text{ Bq} = 27.03 \text{ pCi}$$

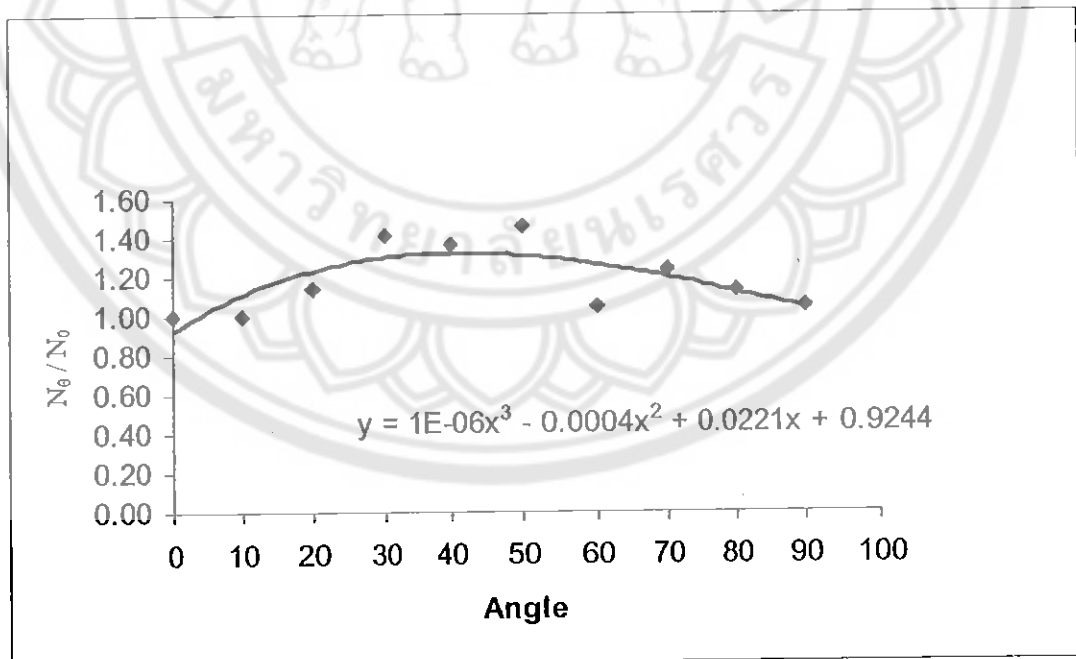
$$1 \text{ pCi/g} = 37 \text{ Bq/kg}$$



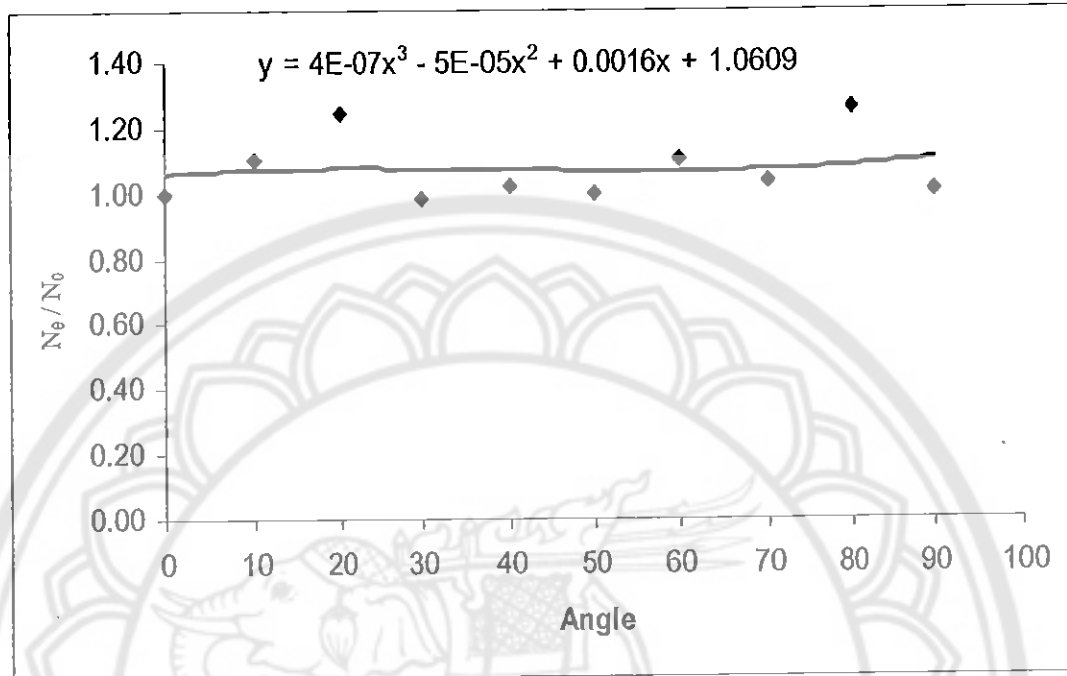
รูปที่ ก.1 กราฟการปรับเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{137}\text{Cs}$  พลังงาน 662 keV



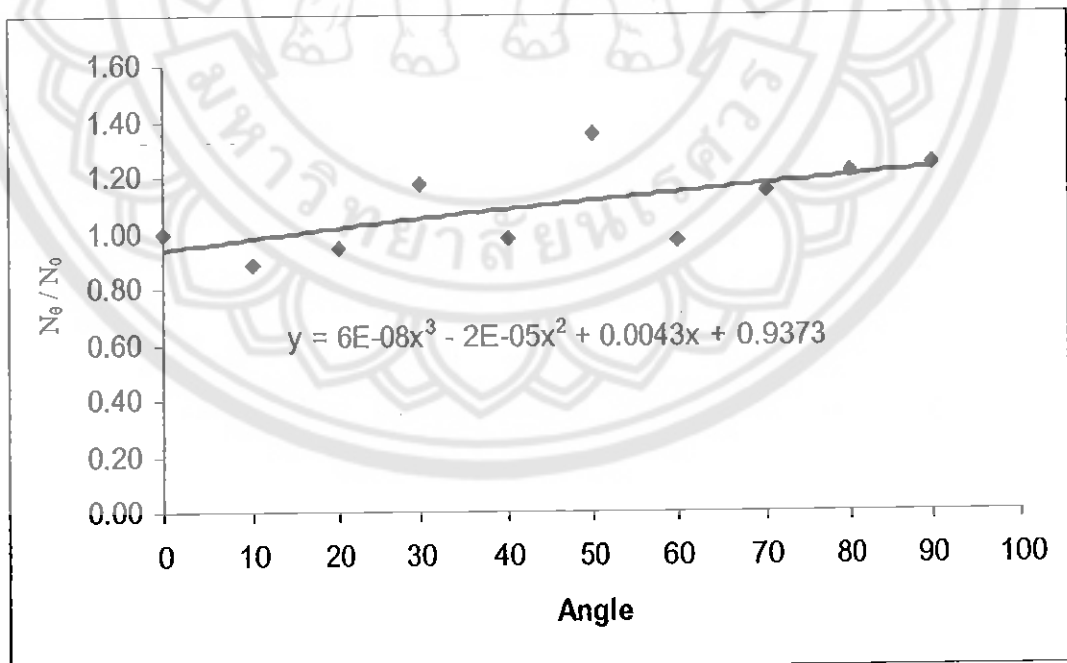
รูปที่ ก.2 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{60}\text{Co}$  พลังงาน 1173 keV



รูปที่ ก.3 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{60}\text{Co}$  พลังงาน 1332 keV

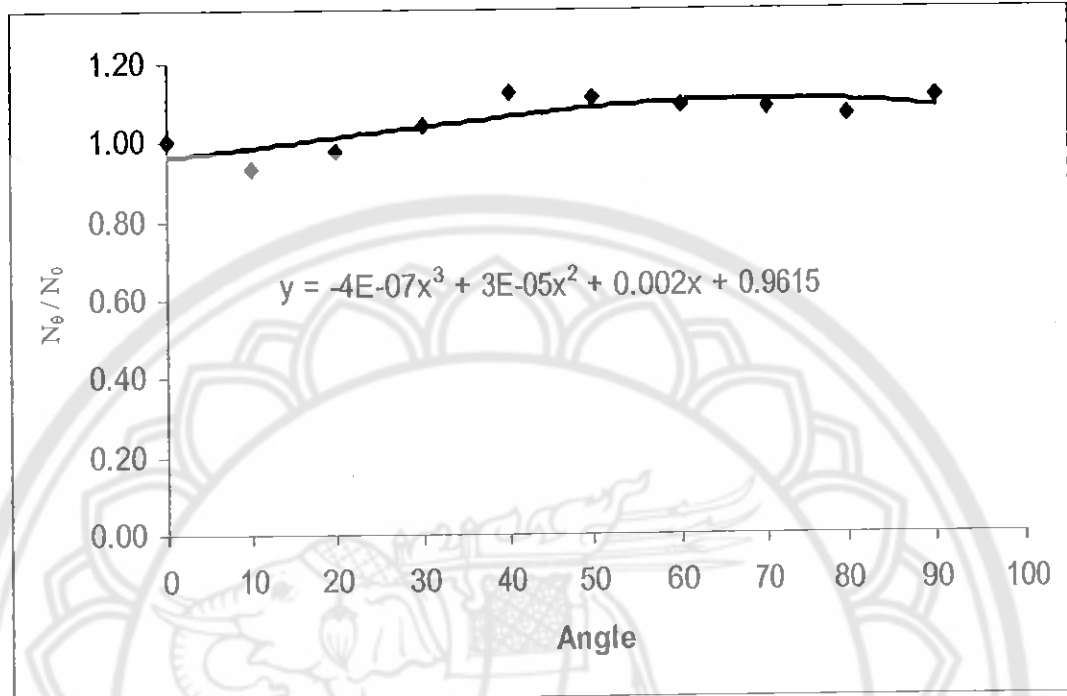


รูปที่ ก.4 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{22}\text{Na}$  พลังงาน 551 keV

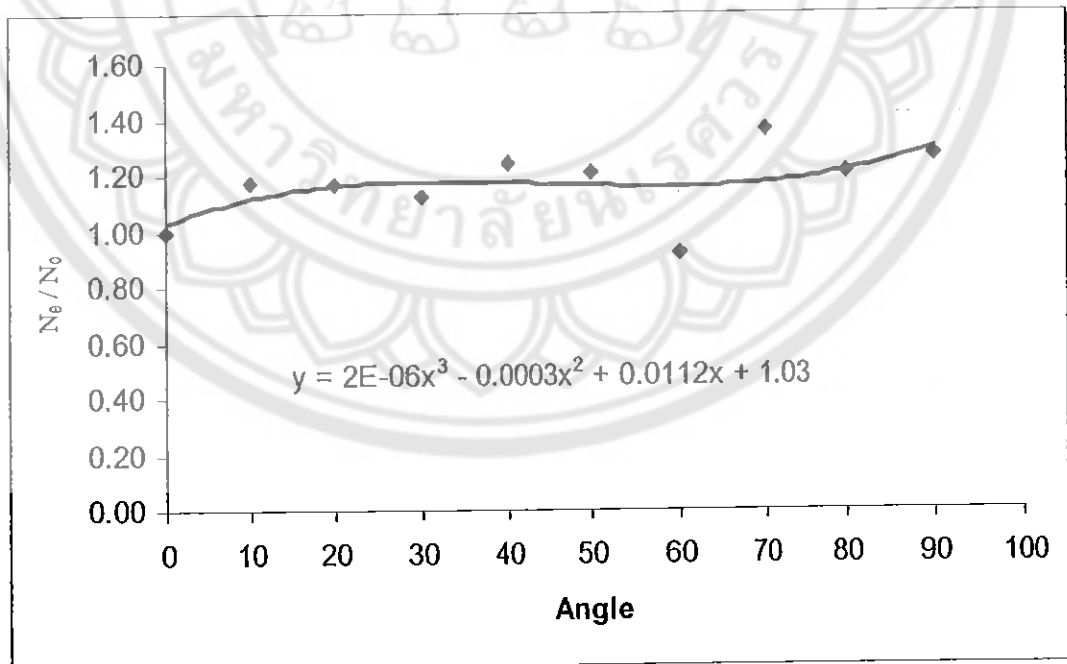


รูปที่ ก.5 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{22}\text{Na}$  พลังงาน 1275 keV

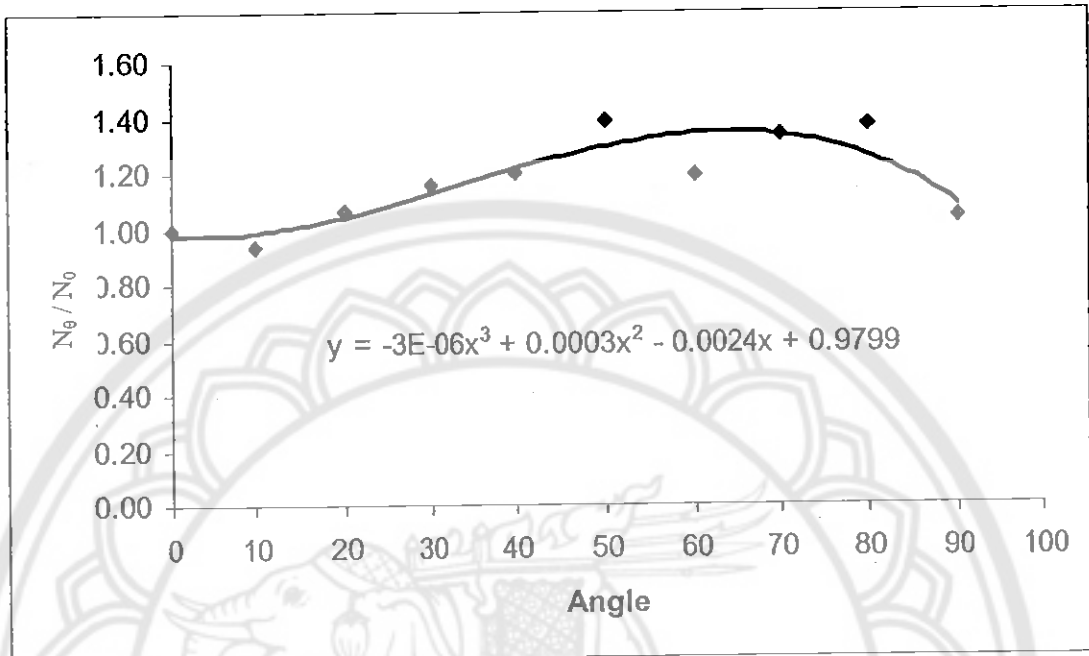




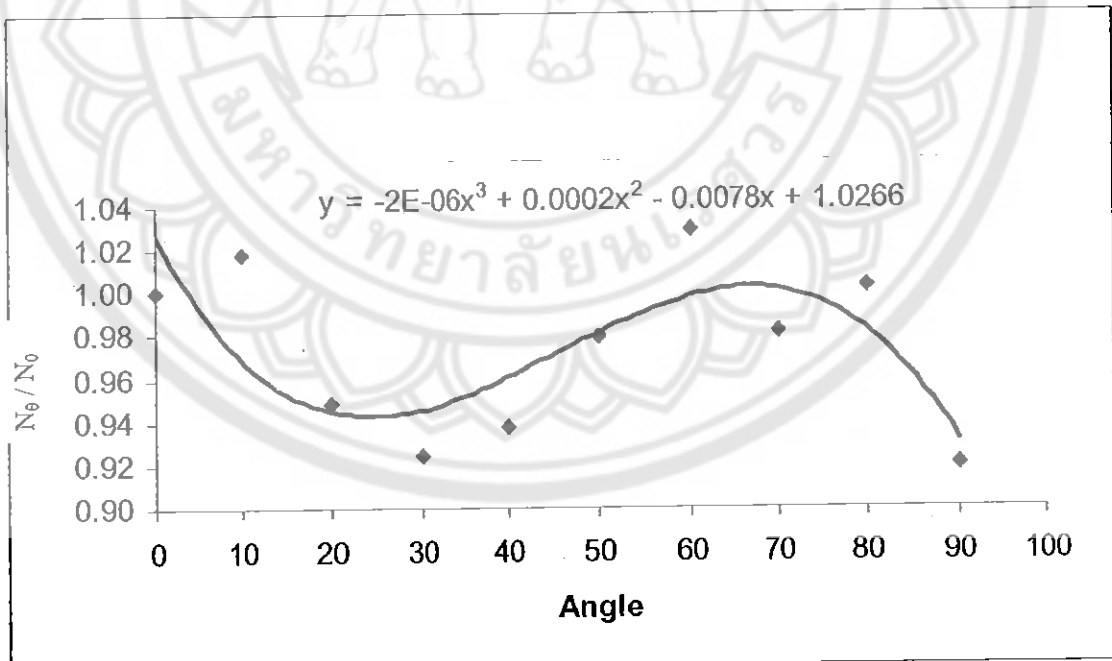
รูปที่ ก.6 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 276.3 keV



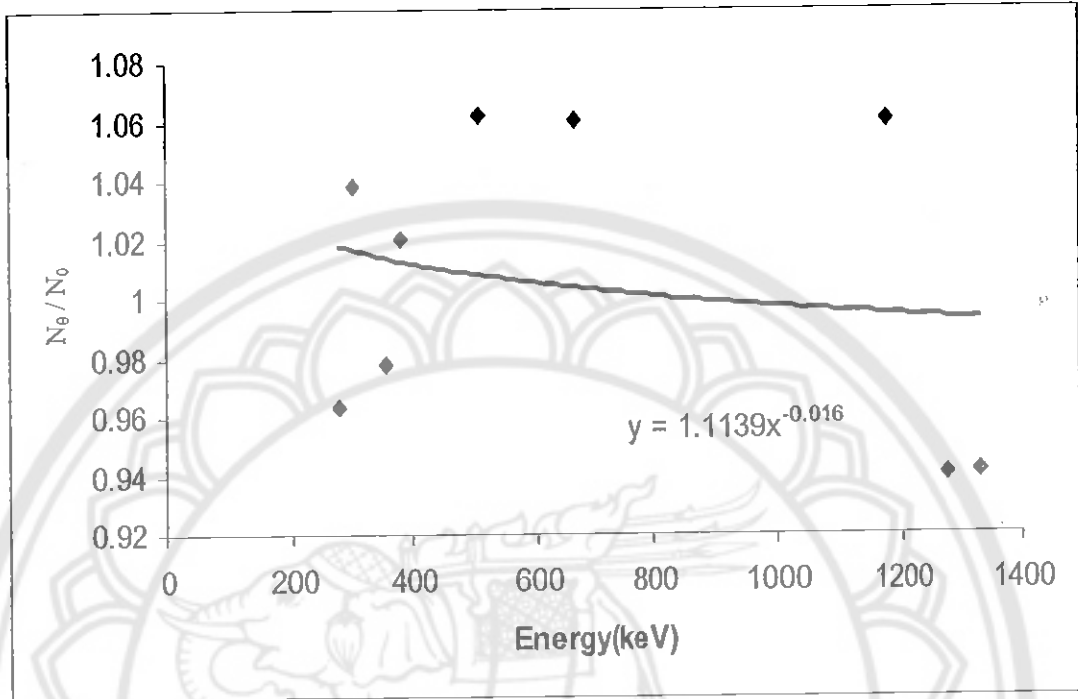
รูปที่ ก.7 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 302.7 keV



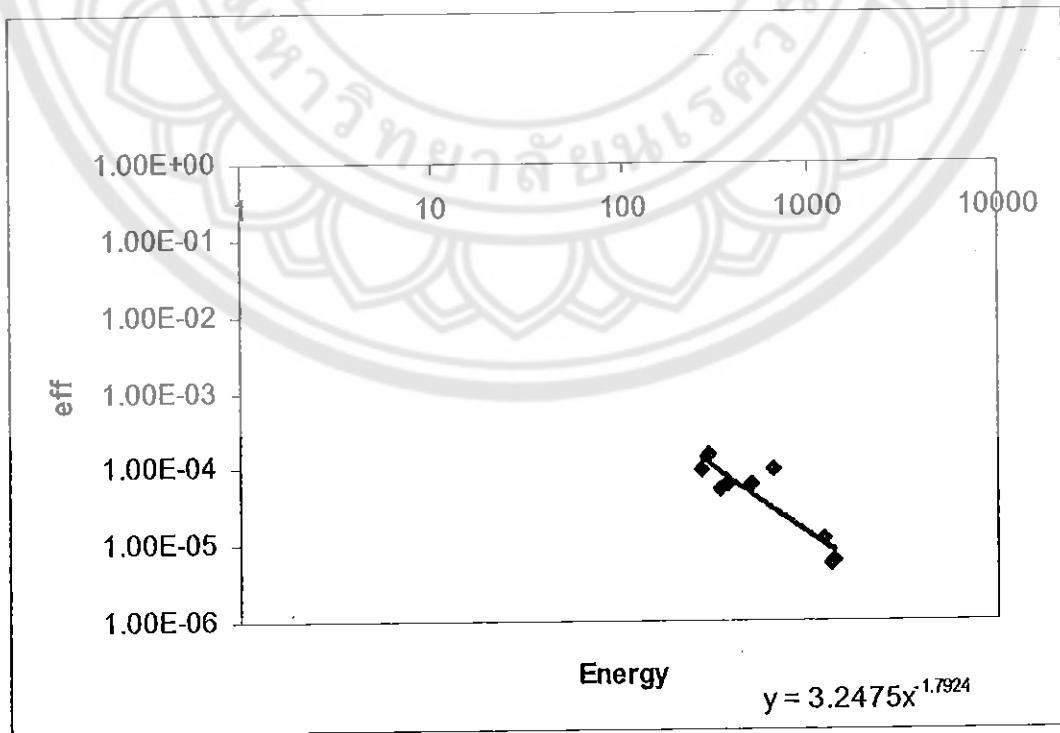
รูปที่ ก.8 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 355.9 keV



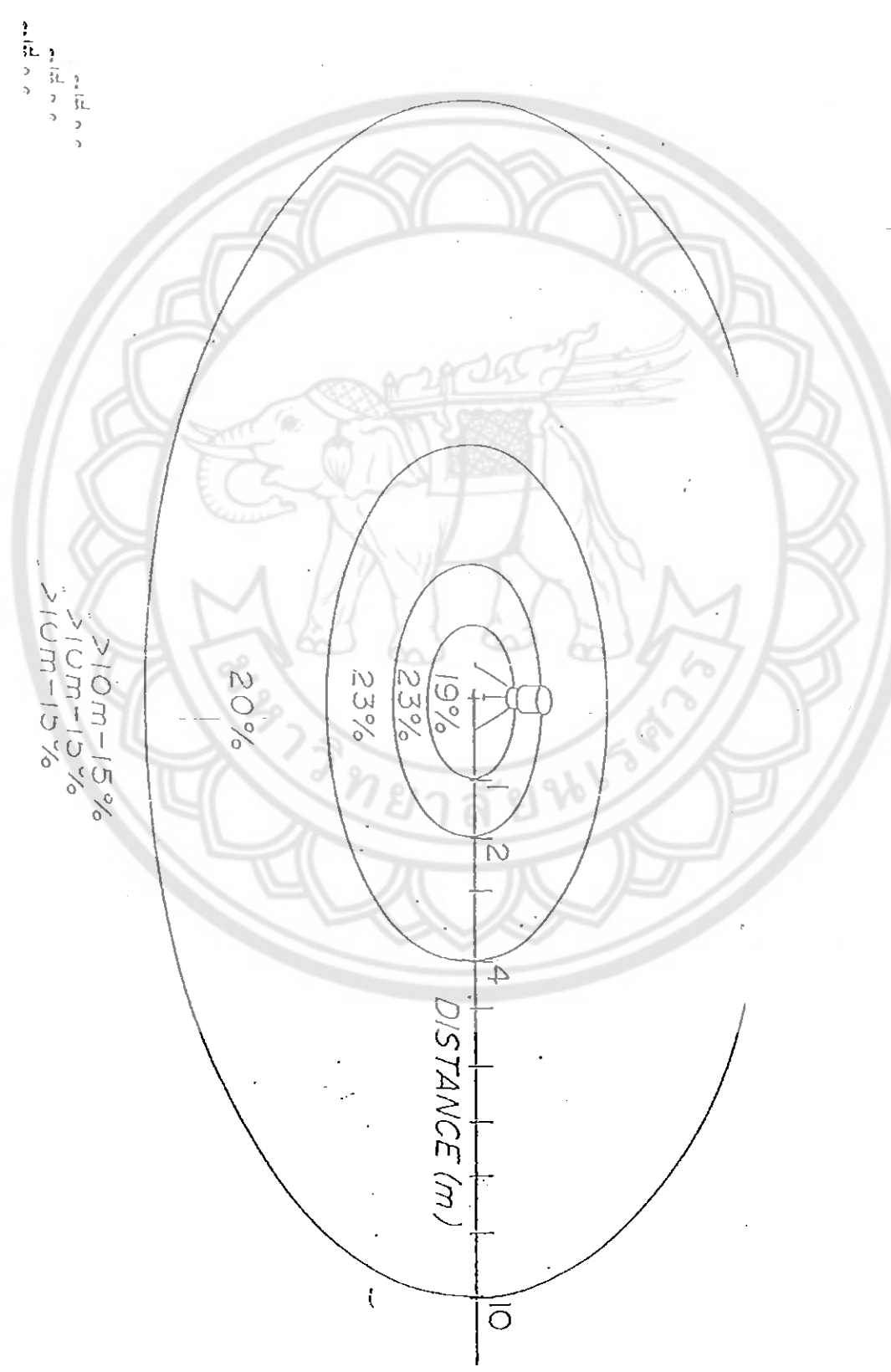
รูปที่ ก.9 กราฟการเปรียบเทียบหัววัดรังสีกับพลังงานของ  $^{133}\text{Ba}$  พลังงาน 383.7 keV



รูปที่ ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $N_t/N_0$  กับพลังงาน



รูปที่ ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการวัดรังสีที่มุม 0 องศา กับพลังงาน



รูปที่ ก.12 แสดงความล้มพันธ์ของฟลักซ์ที่มีผลต่อพื้นดิน ณ ระดับความสูง 1 เมตร จากห้ววัด ในกรณีของรังสีที่มีพลังงานระดับกลาง

( 662 keV ) และเส้นที่แสดงถึง% การกระจายของฟลักซ์ในดินเมื่อ  $= 0.21 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$

ตารางที่ ก.10 แสดงข้อมูลของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณ

รังสีมาตรฐาน	พลังงาน ( keV)	half life (y)	intensity
Ba-133	267.3	10.54	0.07
	302.7	10.54	0.14
	355.9	10.54	0.69
	383.7	10.54	0.08
Na-22	511	2.62	0.999
	1275	2.62	1.8
Cs-137	661.66	30	0.852
Co-60	1173	5.27	0.999
	1332	5.27	1

ตารางที่ ก.11 กัมมันตภาพรังสีจากวัสดุก่อสร้าง

Radioactivity from Construction Materials

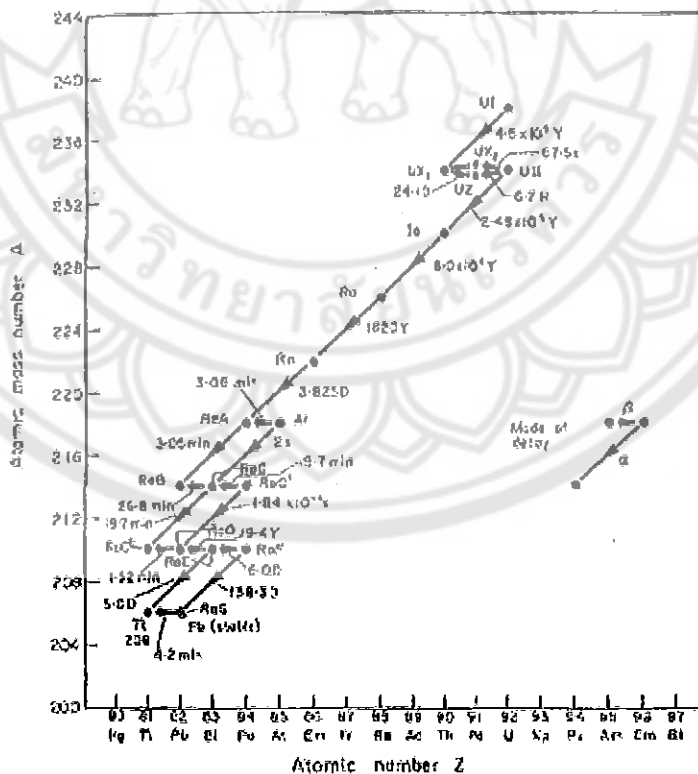
Material	Uranium		Thorium		Potassium	
	dpm	mBq/g (pCi/g)	dpm	mBq/g (pCi/g)	dpm	mBq/g (pCi/g)
Granite	4.7	63 (1.7)	2	8 (0.22)	4	1184 (32)
Sandstone	0.45	6 (0.2)	1.7	7 (0.19)	1.4	414 (11.2)
Cement	3.4	46 (1.2)	5.1	21 (0.57)	0.8	237 (6.4)
Limestone concrete	2.3	31 (0.8)	2.1	8.5 (0.23)	0.3	89 (2.4)
Sandstone concrete	0.8	11 (0.3)	2.1	8.5 (0.23)	1.3	385 (10.4)
Dry wallboard	1	14 (0.4)	3	12 (0.32)	0.3	89 (2.4)
By-product gypsum	13.7	186 (5.0)	16.1	66 (1.78)	0.02	5.9 (0.2)
Natural gypsum	1.1	15 (0.4)	1.8	7.4 (0.2)	0.5	148 (4)
Wood	-	-	-	-	11.3	3330 (90)
Clay Brick	8.2	111 (3)	10.8	44 (1.2)	2.3	666 (18)

ตารางที่ ก.12 แสดงค่า  $\frac{\Phi}{S}$  และ  $\frac{\Phi}{I}$  ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีตามธรรมชาติบางชนิดกรณีการวัดการกระจายของธาตุกัมมันตรังสีในดินตามธรรมชาติ (H.L.Beck et al;HASL-258(1972))

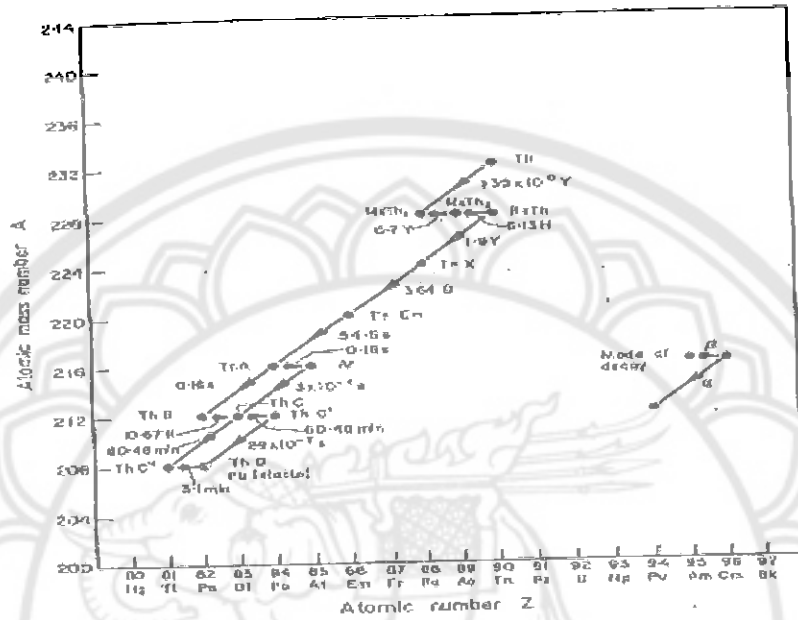
Nuclide	$\gamma$ energy (keV)	$\frac{\Phi}{S}$ ( $\times 10^{-3}$ ) $\gamma \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ per pCi/g	$\frac{\Phi}{I}$ ( $\times 10^{-2}$ ) $\gamma \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ per $\mu\text{R/h}$	Nuclide	$\gamma$ energy (keV)	$\frac{\Phi}{S}$ ( $\times 10^{-3}$ ) $\gamma \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ per pCi/g	$\frac{\Phi}{I}$ ( $\times 10^{-2}$ ) $\gamma \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ per $\mu\text{R/h}$
K-40	1461	3.63	20.3	Pb-212	239	7.25	2.57
U-238 Series				Ru-224	241		2.57
Ra-226	186	0.458	0.252	Ac-228	270	1.02	3.62
Pb-214	242	1.04	0.571	Tl-208	277		3.62
	295	2.91	1.6	Ac-228	282		3.62
	352	6.01	3.3	Pb-212	301	0.553	0.196
Bi-214	609	9.42	5.18	Ac-228	338	2.18	0.773
	666	0.339	0.186	Mixed	328-340	2.9	1.03
	768	1.17	0.643	Ac-228	463	0.92	0.326
	934	0.81	0.445	Tl-208	510	1.93	0.684
	1120	4.21	2.31	Tl-208	585	6.39	2.27
	1238	1.72	0.945	Bi-212	727	1.86	0.56
	1378	1.49	0.819	Ac-228			
	1401-08	1.25	0.687	Ac-228	755	0.27	0.0957
	1510	0.712	0.391		772	0.41	0.145
	1730	1.02	0.56		795	1.2	0.425
	1765	5.39	2.96		830+835+	0.94	0.333
					840		
	1845	0.791	0.435	Tl-208	860	1.18	0.418
	2205	1.95	1.07	Ac-228	911	7.55	2.68
	2448	0.666	0.366		965+969	6.13	2.17
Th-232 series					1588	1.23	4.36
Ac-228	129	0.29	0.103	Tl-208	2615	16.7	5.92
	210	0.58	0.206				

ตารางที่ ก. 13 Radioactivity in Human Body

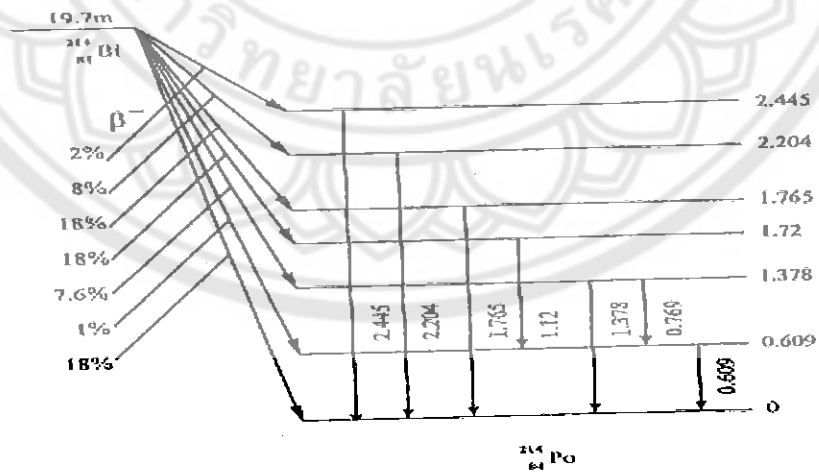
Radioisotope	Total mass in the body	Total Radioactivity	Daily intake of Radiosotopes
Uranium	90 $\mu\text{g}$	30 pCi (1.1 Bq)	1.9 $\mu\text{g}$
Thorium	30 $\mu\text{g}$	3 pCi (0.11 Bq)	3 mg
Potassium-40	17 mg	120 nCi (4.4 kBq)	0.39 $\mu\text{g}$
Radium	31 pCi	30 pCi (1.1 Bq)	2.3 pCi
Carbon-14	95 $\mu\text{g}$	0.4 $\mu\text{Ci}$ (15 kBq)	1.8 $\mu\text{g}$
Tritium or H-3	0.06 pCi	0.6 nCi (23 Bq)	0.003 pCi
Polonium	0.2 pCi	1 nCi (37 Bq)	$\sim$ 0.6 $\mu\text{g}$



รูปที่ ก.13 อนุกรมยูเรเนียม (The Uranium series)

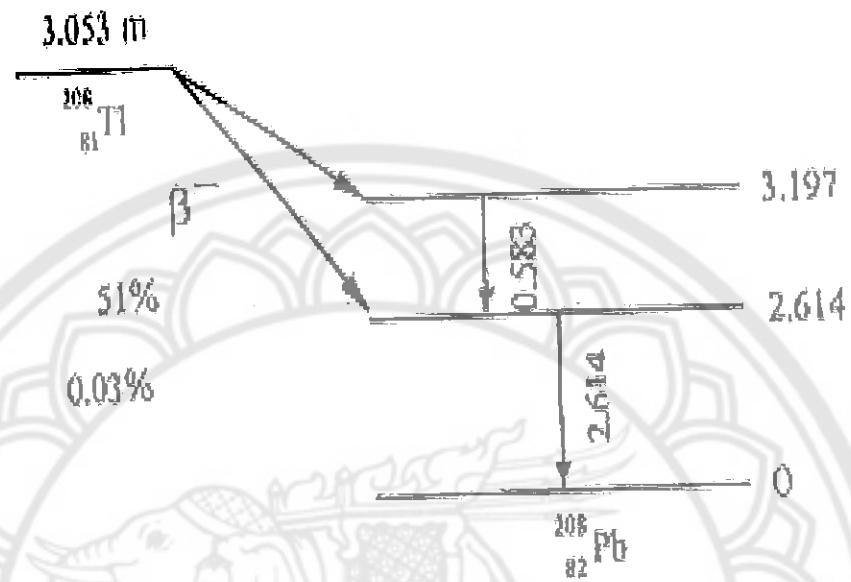


รูปที่ 14 ธอริอัมทอริอัม(The Thorium)



รูปที่ 15 รูปแบบการสลายตัว (decay scheme) ของ  $^{238}\text{U}$





รูปที่ ก.16 รูปแบบการสลายตัว (decay scheme) ของ  $^{208}\text{Tl}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



Microsoft Excel - In-situ radioactive.xls

Type a question for help

OBBS

$\lambda = 1/(0.078032/HB65)$

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
deg	rad	exp(- $\lambda t$ )	d $\lambda$ (deg)	sin $^2$ exp	Phi	N/N0	Us	Ua	ln(Cs-652)	e3	e2	e1	c0	p (Table2)
1	0	0.990829367	0	0	0.005400	#DIV/0!	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
2	0.1	0.001745329	0.011080855	0.001729323	0.011080855	1.053216406	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
3	0.2	0.003490659	0.022161676	0.003438664	0.022161676	1.053232813	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
4	0.3	0.005235988	0.033292427	0.005187946	0.033292427	1.053249221	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
5	0.4	0.006981317	0.044323074	0.006917236	0.044323074	1.053265629	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
6	0.5	0.008726646	0.055403582	0.008646505	0.055403582	1.053282038	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
7	0.6	0.010471976	0.066483917	0.010375746	0.066483917	1.053298448	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
8	0.7	0.012217305	0.077564043	0.012104955	0.077564043	1.053314858	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
9	0.8	0.013962634	0.088643927	0.013834126	0.088643927	1.053331268	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
10	0.9	0.015707963	0.099723534	0.015563254	0.099723534	1.053347678	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
11	1	0.017453293	0.110802828	0.017292333	0.110802828	1.053364091	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
12	1.1	0.019198623	0.121881775	0.019021357	0.121881775	1.053380504	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
13	1.2	0.020943951	0.132960341	0.020750523	0.132960341	1.053396917	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
14	1.3	0.022689238	0.144038491	0.022497223	0.144038491	1.053413331	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
15	1.4	0.024434566	0.155116119	0.024208053	0.155116119	1.053429745	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
16	1.5	0.026179939	0.166193403	0.025936807	0.166193403	1.05344616	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
17	1.6	0.027925368	0.177270096	0.027665448	0.177270096	1.053462575	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
18	1.7	0.029670797	0.188346734	0.029394067	0.188346734	1.053478992	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
19	1.8	0.031416126	0.199423361	0.031122561	0.199423361	1.053495408	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
20	1.9	0.033161455	0.210499706	0.032830958	0.210499706	1.053511826	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
21	2	0.034906583	0.221576051	0.034579252	0.221576051	1.053528244	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
22	2.1	0.036651914	0.232652483	0.036307488	0.232652483	1.053544662	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
23	2.2	0.038397244	0.243728916	0.03803551	0.243728916	1.053561081	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
24	2.3	0.040142573	0.254805349	0.039763463	0.254805349	1.053577501	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
25	2.4	0.041887902	0.265881782	0.041491292	0.265881782	1.053593922	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
26	2.5	0.043633231	0.276958215	0.043218991	0.276958215	1.053610343	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
27	2.6	0.045378561	0.288034648	0.044946554	0.288034648	1.053626764	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
28	2.7	0.04712389	0.299111081	0.046674997	0.299111081	1.053643187	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
29	2.8	0.048869219	0.310187514	0.048403253	0.310187514	1.053659609	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
30	2.9	0.050614548	0.321263947	0.0501203984	0.321263947	1.053676033	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
31	3	0.052359878	0.332340380	0.051853347	0.332340380	1.053692457	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
32	3.1	0.054105207	0.343416813	0.053586291	0.343416813	1.053708882	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0
33	3.2	0.055850536	0.354493246	0.055319234	0.354493246	1.053725307	0.125350954	9.21294E-05	6.495265556	-1.00E-06	1.00E-04	9.40E-03	1.05E+00	1.61E+0

Ready

EN

In-situ-radioactive.xls

รูปที่ ข.1 แสดงตัวอย่างการหาค่า  $N_t/N_0$  โดยการสร้างสูตรคำนวณ Microsoft Excel

คำอธิบายเวิร์กชีตบนโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อช่วยในการคำนวณหาค่า  $\frac{N_f}{N_0}$

คอลัมน์ A แสดงค่ามุมเป็นองศา ตั้งแต่ 0-90 องศา

คอลัมน์ B แสดงค่ามุมเป็นเรเดียนตั้งแต่ 0-1.57 เรเดียน

คอลัมน์ C แสดงค่าของ  $\exp(-\mu_a h/\cos \theta)$

คอลัมน์ D แสดงค่าของ  $\exp(-\mu_a h/\cos \theta) \sin \theta / 2(\mu_s/\rho)$

คอลัมน์ E แสดงค่าของ  $\exp(-\mu_a h/\cos \theta) \sin \theta$

คอลัมน์ F แสดงค่าฟังก์ชันของรังสีแกมมาที่ได้จากการคำนวณตามสมการ

$$\Phi = \frac{(S_0/\rho)}{2(\mu_s/\rho)} \int_0^{\pi/2} \exp(-\mu_a h/\cos \theta) \sin \theta d\theta$$

คอลัมน์ G แสดงค่าแก้ของมุมสำหรับการคำนวณผลการวัดในพื้นที่จริง ( ค่าเฉลี่ย )

$$\text{ซึ่งหาได้จากสมการ } \frac{N_f}{N_0} = \frac{1}{\Phi} \int_0^{\pi/2} R(\theta) \frac{d\Phi}{d\theta} d\theta$$

คอลัมน์ H แสดงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาในดิน ( $\text{g/cm}^{-3}$ )

คอลัมน์ I แสดงค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาในอากาศ ( $\text{cm}^{-1}$ )

คอลัมน์ J แสดงค่าของ  $\ln(\text{gamma energy keV})$

คอลัมน์ K แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ( $C_3$ ) จากสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับมุมเป็น

$$\text{เรเดียนลงในสมการ } R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$$

คอลัมน์ L แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ( $C_2$ ) จากสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับมุมเป็น

$$\text{เรเดียนลงในสมการ } R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$$

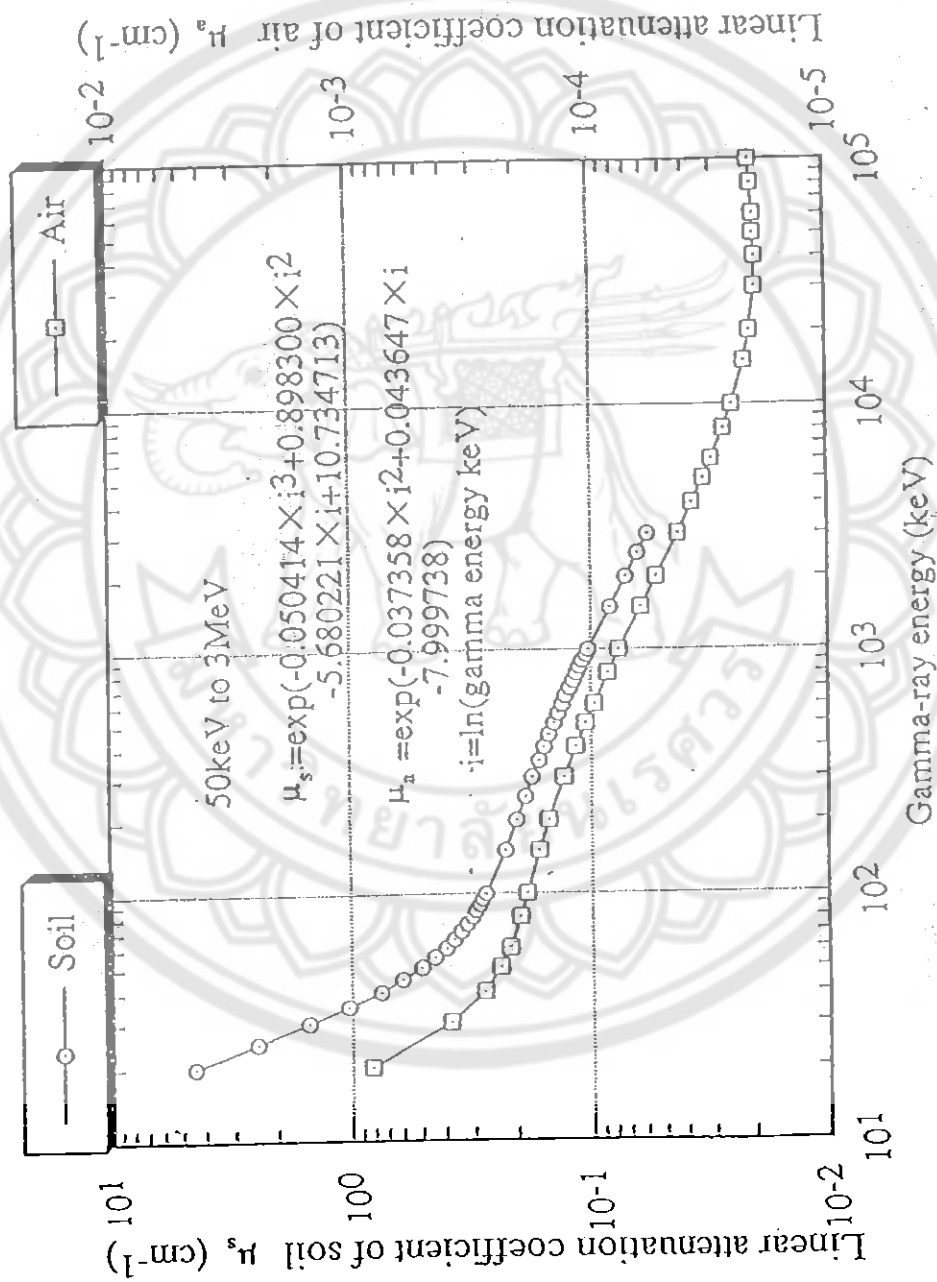
คอลัมน์ M แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ( $C_1$ ) จากสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับมุมเป็น

$$\text{เรเดียนลงในสมการ } R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$$

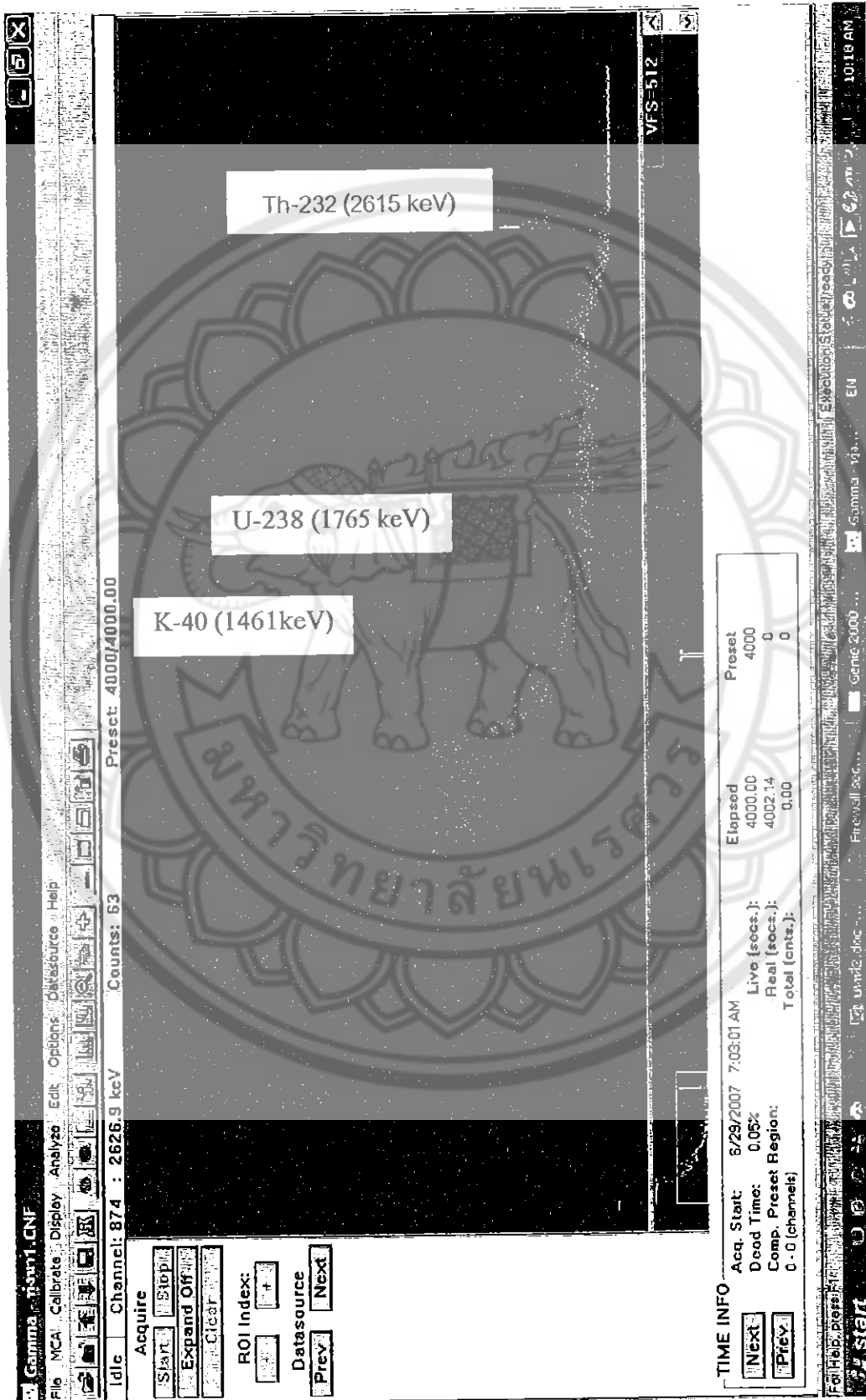
คอลัมน์ N แสดงค่าสัมประสิทธิ์ ( $C_0$ ) จากสมการความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับมุมเป็น

$$\text{เรเดียนลงในสมการ } R(\theta) = C_3\theta^3 + C_2\theta^2 + C_1\theta + C_0$$

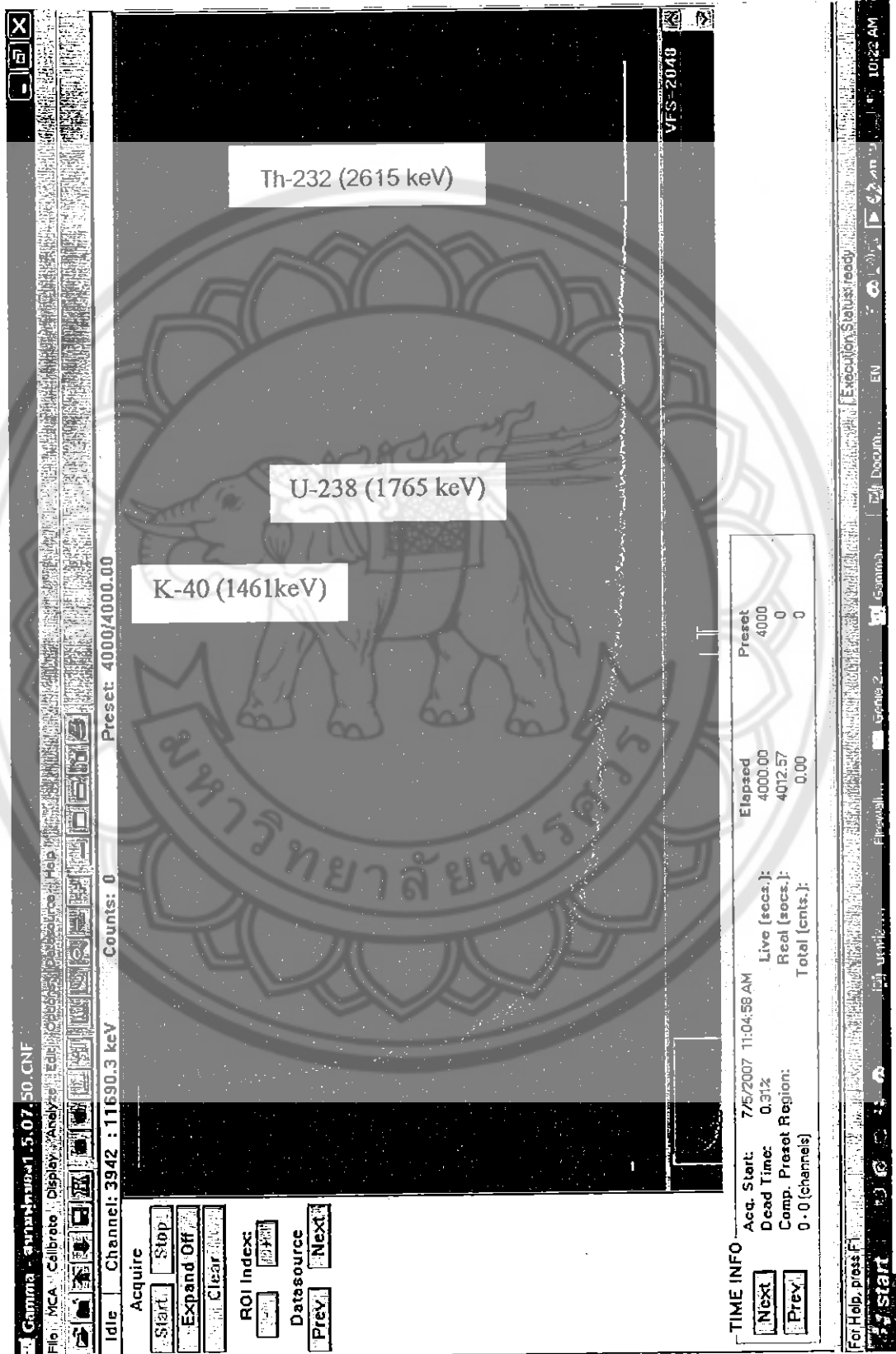
คอลัมน์ O แสดงค่าความหนาแน่นของดิน  $\rho$  ( $\text{g/cm}^{-3}$ )



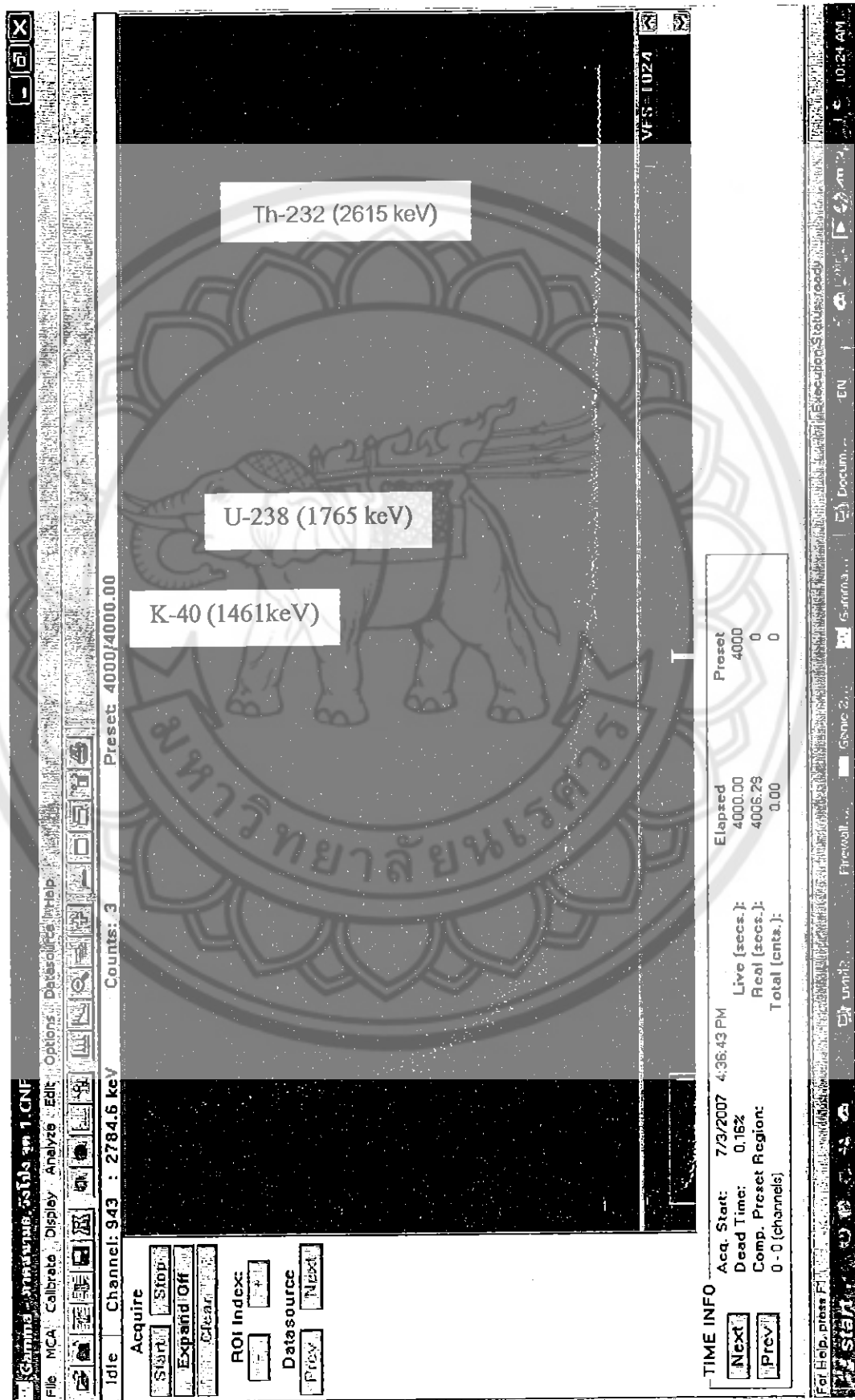
รูปที่ ๓.๒ Linear attenuation coefficient of gamma-ray for soil and air



รูปที่ ข.3 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก

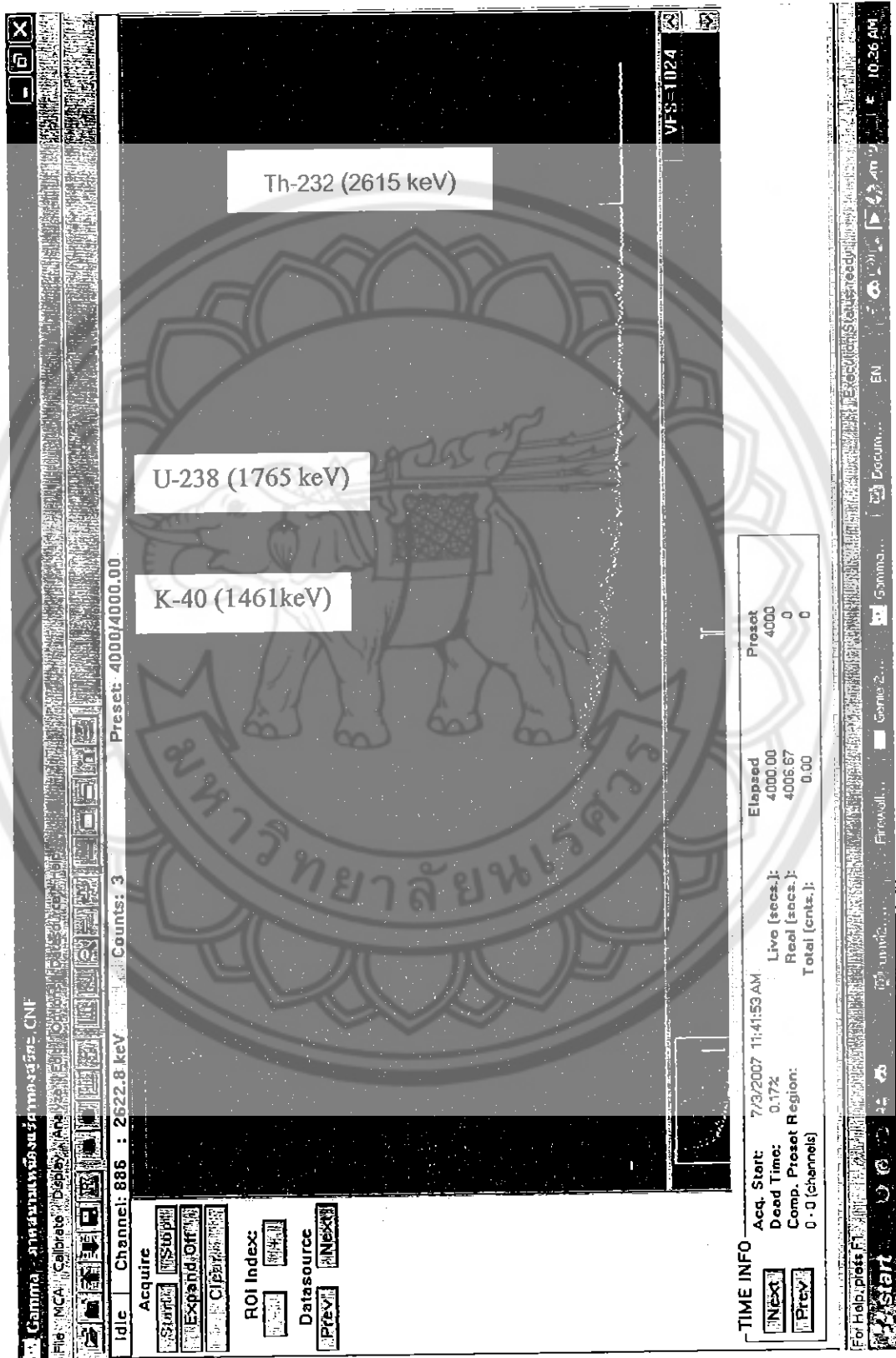


รูปที่ ๓.๔ แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณสนามหน้าหอพักหญิง 3-4



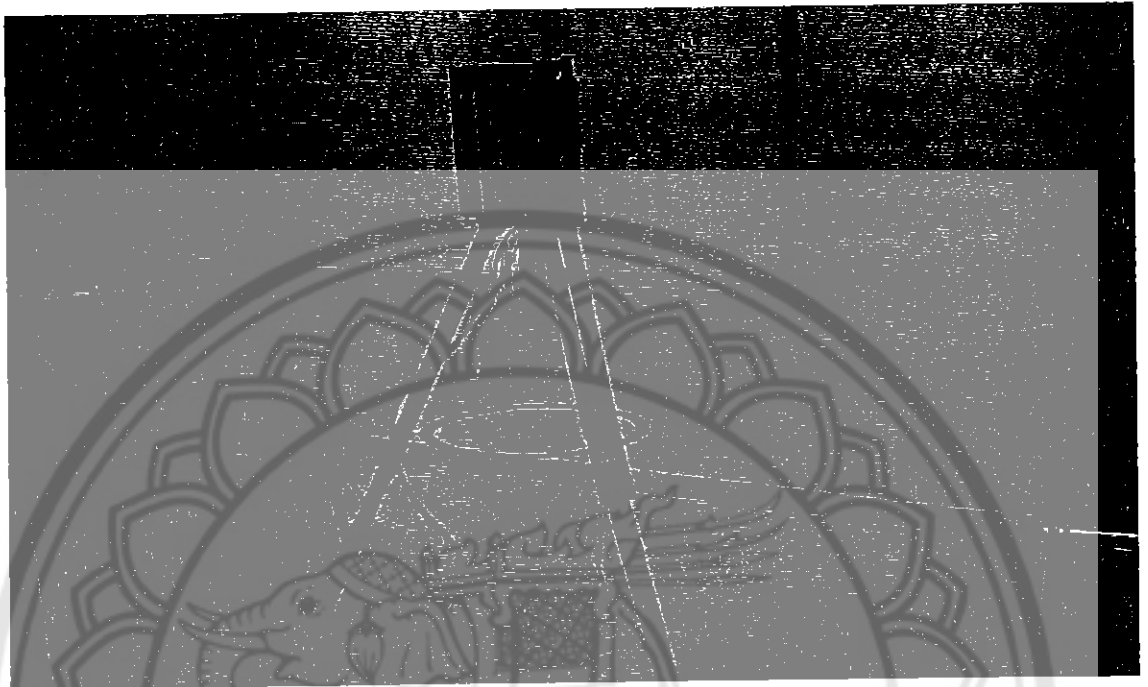
รูปที่ ๗.5 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณบ้านรังมบรรพราช อ. ทุ่งโป่ง จ. เพชรบูรณ์





รูปที่ ข.6 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่วัดได้บริเวณเหมืองแร่สุริยะ จ. เพชรบูรณ์





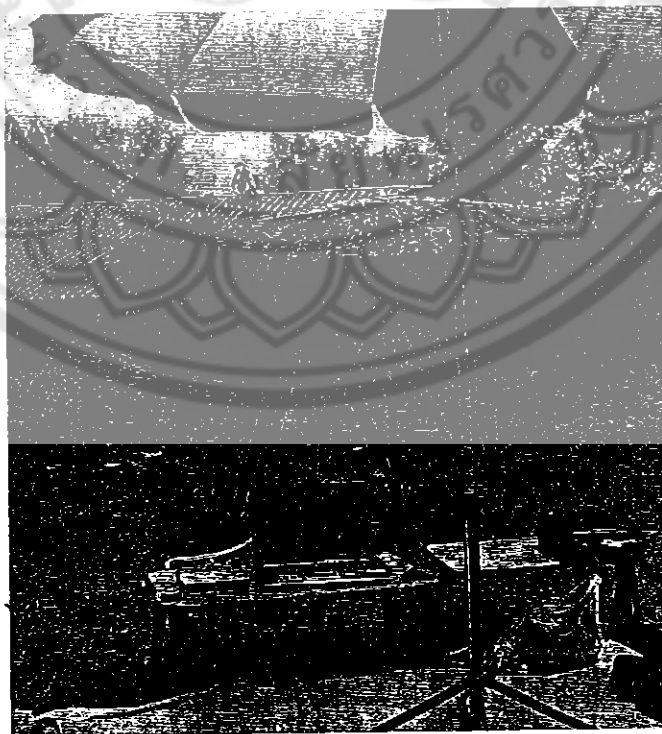
รูปที่ ค.1 การวัดปรับเทียบมุม 0-90 องศา



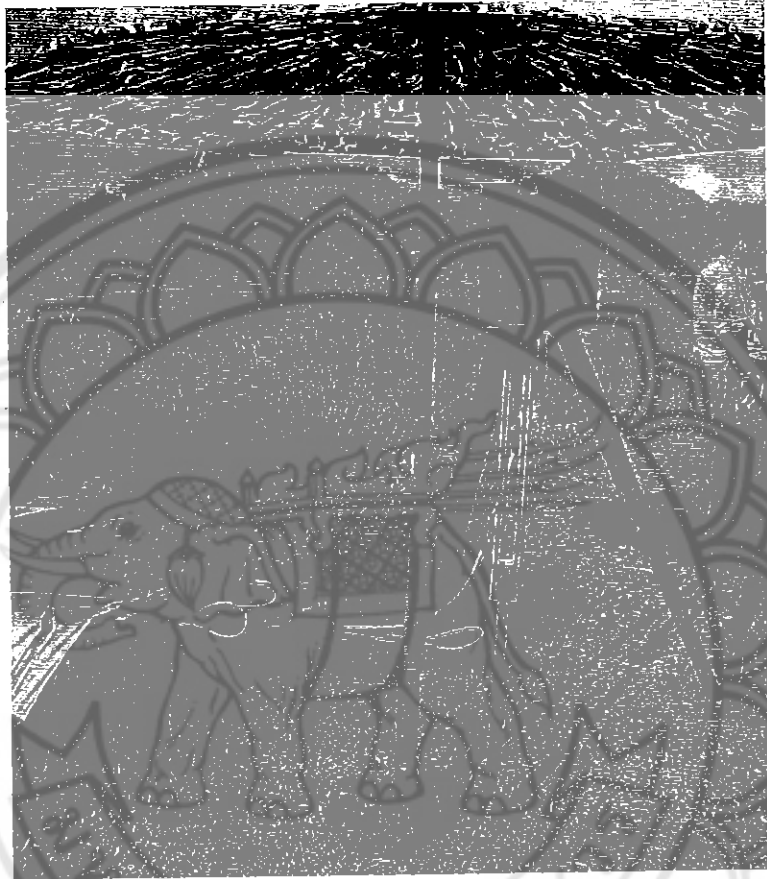
รูปที่ ค.2 บริเวณสนามหญ้าหน้าหอพักหญิง 3-4



รูปที่ ค.3 บริเวณทุ่งนาคลองหนองเหล็ก



รูปที่ ค.4 บริเวณเหมืองแร่สุริยะ จังหวัดเพชรบูรณ์



รูปที่ ค.5 บริเวณบ้านวังมะปราง อำเภอวังโป่ง จังหวัดเพชรบูรณ์

## สรุปขั้นตอนการทำวิจัย

