

การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัมและอาร์เซนิกในเล็บมนุษย์  
โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

DETERMINATION OF URANIUM LANTHANUM AND ARSENIC  
IN HUMAN NAIL BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-15-1920-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัมและสารหนูในเล็บมนุษย์

โดยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน

DETERMINATION OF URANIUM LANTHANUM AND ARSENIC  
IN HUMAN NAIL BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS



สุภลักษณ์ กงศรี

SUPALAK KONGSRI

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 60841  
วันเดือนปี - 6 ก.ค. 2549



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1920-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DETERMINATION OF URANIUM LANTHANUM AND ARSENIC  
IN HUMAN NAIL BY NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

**ISBN 974-15-1920-6**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และ
	สารหนูในเส้นผมมนุษย์โดยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน
นักศึกษา	นางสาวสุภลักษณ์ คงศรี
รหัสประจำตัว	45064200
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมี (เคมีวิเคราะห์)
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สิรินาฏ เลาหะโรจนพันธ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในเส้นผมของผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก หน่วยงานในสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน พบว่ามีขีดจำกัดในการตรวจวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูเท่ากับ 0.068, 0.034 และ 0.019 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ ความเที่ยงในการวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู โดยประเมินจากค่า % RSD ของการทดลองซ้ำ 10 ครั้ง พบว่ามีค่า 5.53, 5.35 และ 6.64 %RSD ตามลำดับ การหาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ซึ่งตรวจสอบด้วยสารมาตรฐานอ้างอิง SRM 77-A Uranium ore, SRM 1547 Peach leaves และ SRM 1566b Oyster tissue ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST) ได้ร้อยละการกลับคืนมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูเท่ากับ 106.20%, 104.80% และ 97.39% ตามลำดับ เมื่อนำเทคนิคที่ได้มาวิเคราะห์พบว่าปริมาณของแลนทานัม (0.109-7.636 ไมโครกรัม/กรัม) และปริมาณยูเรเนียม (0.075-0.505 ไมโครกรัม/กรัม) ในเส้นผมผู้ปฏิบัติงานสูงกว่าผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับธาตุเหล่านี้ (ช่วงความเข้มข้นของแลนทานัม 0.012-0.030 ไมโครกรัม/กรัม และช่วงความเข้มข้นของยูเรเนียม 0.002-0.062 ไมโครกรัม/กรัม) แต่ในกรณีของสารหนูพบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณในเส้นผมของผู้ปฏิบัติงาน (0.029-0.076 ไมโครกรัม/กรัม) กับผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสารหนู (0.026-0.036 ไมโครกรัม/กรัม) แล้วพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเส้นผมสามารถนำมาเป็นตัวบ่งชี้ชีวภาพในการตรวจหาสารที่สะสมอยู่ในร่างกายได้และเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชันนี้มีความแม่นยำสูง สภาพไวในการวิเคราะห์สูง และเป็นวิธีที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง

<b>Thesis Title</b>	Determination of Uranium, Lanthanum and Arsenic in Human Nail by Neutron Activation Analysis
<b>Student</b>	Ms. Supalak Kongsri
<b>Student ID.</b>	45064200
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Programme</b>	Chemistry (Analytical Chemistry)
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Dr. Sirinart Laoharajanaphand
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assoc. Prof. Arunee Kongsakphisal

### ABSTRACT

The objective of this prospective study was to determine the uranium, lanthanum and arsenic in fingernails from a group of heavily exposed healthy workers at The Rare-Earth Research and Development Center, Office of Atoms for Peace, Ministry of Science and Technology by Neutron Activation Analysis (NAA). The capabilities of NAA for the determination of trace element in nails were studied. The detection limits for uranium, lanthanum and arsenic was 0.068, 0.034 and 0.019  $\mu\text{g g}^{-1}$  respectively. The reproducibility assessed as average values from ten replicate analysis for all element was found as 5.53 %R.S.D. for uranium, 5.35 %R.S.D. for lanthanum and 6.64 %R.S.D. for arsenic. The accuracy of the analytical procedure estimated by analysis of NIST SRM 77-A Uranium ore, SRM 1547 Peach leaves and SRM 1566b Oyster tissue were 106.2%recovery, 104.8%recovery and 97.39 %recovery for uranium, lanthanum and arsenic, respectively. The results demonstrate that the concentration of lanthanum (0.109-7.636  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) and uranium (0.075-0.505  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) detected in nail of workers were higher than healthy controls (0.012-0.030  $\mu\text{g g}^{-1}$  for lanthanum and 0.002-0.062  $\mu\text{g g}^{-1}$  for uranium). While no difference between the worker (0.029-0.076  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) and control (0.026-0.036  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) were found in case of arsenic. Therefore, nails could be use as bioindicators of trace element exposure in epidemiological studies of health effects. In addition, INAA have shown to be an accurate, high sensitivity and non-destructive method to monitor trace elements in nails.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.สิรินาฏ เลอาหะ โรจนพันธ์ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ และตรวจสอบข้อมูลต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เป็นไปอย่างถูกต้อง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ และคุณอาภรณ์ บุญมงคล นักเคมี นิเวศวิทยา กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณรติรส เกรีภาส นักเคมีนิเวศวิทยา ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับนิเวศวิทยาแอควาเรียม

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่เคารพรักอย่างยิ่ง ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับความง่วงความอ่อนใตที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุภลักษณ์ คงศรี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญคำย่อ.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การวิเคราะห์ทางรังสี.....	6
2.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงกึ่งกัมมันตภาพรังสี.....	6
2.1.2 เทคนิคการเจือจางไอโซโทป.....	6
2.1.3 เทคนิคการไทเทรตโดยการนับรังสี.....	6
2.1.4 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการนับรังสี.....	6
2.2 ทฤษฎีการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี.....	7
2.3 เทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน.....	8
2.3.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน.....	10
2.3.2 การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน.....	13
2.3.3 เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี.....	13
2.3.4 การวัดปริมาณรังสี.....	16
2.3.5 การวิเคราะห์ผล.....	17
2.4 การใช้ประโยชน์ของ NAA.....	20
2.5 เล็บ.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 คุณสมบัติและความเป็นพิษของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู.....	22
2.6.1 ยูเรเนียม.....	22
2.6.2 แลนทานัม.....	23
2.6.3 สารหนู.....	24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	29
3.1.1 สารเคมีที่ใช้.....	29
3.1.2 อุปกรณ์.....	29
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	32
3.2.1 การเตรียมสารมาตรฐานต่างๆ.....	32
3.2.2 การเก็บตัวอย่าง.....	32
3.2.3 การเตรียมตัวอย่าง.....	33
3.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	36
4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน.....	36
4.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์.....	39
4.2.1 การศึกษาความเที่ยงตรง.....	39
4.2.2 การศึกษาความแม่นยำ.....	39
4.3 การศึกษาขีดจำกัดของการตรวจวัด.....	41
4.4 ผลจากการวิเคราะห์เชิงคุณภาพตัวอย่างเก็บ.....	42
4.5 ผลจากการวิเคราะห์เชิงปริมาณตัวอย่างเก็บ.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	55
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก.....	59
ภาคผนวก ข. แร่โมโนไซต์.....	65
ภาคผนวก ค. การแก้ค่า decay time.....	67
ภาคผนวก ง. การคำนวณหาปริมาณธาตุ.....	68
ภาคผนวก จ. สมการการเกิดยูเรเนียม แลนทานัม และสสารหนู.....	73
ภาคผนวก ฉ. วิธีการทำ Regression Analysis.....	74
ภาคผนวก ช. ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision).....	80
ภาคผนวก ซ. การหาขีดจำกัดของการตรวจวัด.....	85
ภาคผนวก ฌ. สเตปक्रमของรังสีแกมมา.....	88
ภาคผนวก ญ. Certificate of Analysis.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	108

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 เปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ทางกัมมันตรังสีเทียบกับเทคนิคทางเคมีวิเคราะห์อื่นๆ ในการวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อย.....	3
2.1 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในสิ่งแวดล้อม.....	22
3.1 รายละเอียดของผู้ปฏิบัติงาน.....	33
3.2 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการวิเคราะห์ปริมาณตัวอย่างเก็บ.....	35
4.1 ผลจากการทำ Regression analysis ในการสร้างกราฟมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู.....	38
4.2.1 ผลจากการศึกษาความเที่ยงตรง (n=10).....	39
4.2.2 ผลจากการศึกษาความแม่นยำ (n=5).....	40
4.3 แสดงค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน.....	41
4.4 ไอโซโทปรังสีและอันตรกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในเก็บ.....	42
4.5.1 ความเข้มข้นของยูเรเนียมจากการวิเคราะห์ตัวอย่างเก็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและ พัฒนาธาตุหายาก.....	43
4.5.2 ความเข้มข้นของแลนทานัม จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเก็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและ พัฒนาธาตุหายาก.....	44
4.5.3 ความเข้มข้นของสารหนู จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเก็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและ พัฒนาธาตุหายาก.....	45
ง.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่างเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547).....	70
ง.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแลนทานัมในตัวอย่างเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547).....	71
ง.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในตัวอย่างเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547).....	72
ฉ.1 แสดงค่า $\epsilon$ ที่ระดับความมั่นใจต่างๆ.....	75
ช.1 ผลการศึกษาความแม่นยำ.....	81
ช.2 ผลการศึกษาความเที่ยง.....	82
ช.1 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู (n=10).....	87

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA.....	9
2.2 ปฏิกริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู.....	10
2.3 สเปกตรัมของพลังงานนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	11
2.4 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ วิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1) ซึ่งเป็นชนิด TRIGA Mark III / MI ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.....	12
2.5 แสดงถึงกระบวนการชนแบบดูดจับนิวตรอนโดยนิวเคลียส.....	12
2.6 แสดงกัมมันตภาพที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสีและกัมมันตภาพที่ลดลงจากการทิ้งไว้ให้สลายตัวหลังจากการอาบรังสี.....	15
2.7 แสดงลักษณะของหัววัด HpGe .....	16
2.8 แสดงแผนภาพของเครื่อง Gamma Multichannel Analyzer ที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และใช้ HpGe เป็นหัววัด.....	17
2.9 แสดงแกมมาสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาวัตถุโบราณของเครื่องปั้นดินเผาอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และใช้หัววัด HpGe.....	18
2.10 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานกับจำนวนช่อง.....	18
2.11 แสดงการหาพื้นที่ของพีกซึ่งเป็นปฏิภาคกับปริมาณกัมมันตภาพ.....	19
2.12 แสดงโครงสร้างส่วนต่างๆ ของแผ่นเล็บ.....	21
3.1 เครื่องวัดรังสีแกมมา สเปกโตรมิเตอร์ บริษัท EG&G Ortec Model Dspec.....	29
3.2 หัววัดเป็น HPGe รุ่น Gem 25685.....	30
3.3 ก. แรบบิท ข. ไวอัล.....	31
3.4 หลอดโฟอินฟราเรดใช้สำหรับระเหยตัวอย่างให้แห้ง.....	31
4.1 กราฟมาตรฐานของยูเรเนียมในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	36
4.2 กราฟมาตรฐานของแลนทานัมในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	37
4.3 กราฟมาตรฐานของสารหนูในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	37
4.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างเล็บ.....	42
4.5.1 เปรียบเทียบปริมาณเฉลี่ยของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเล็บ โดยเก็บ ตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547.....	46
4.5.2 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 1.....	47

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.5.3 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 2.....	47
4.5.4 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 3.....	48
4.5.5 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 4.....	48
4.5.6 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 5.....	49
4.5.7 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 6.....	49
4.5.8 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 7.....	50
4.5.9 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 8.....	50
4.5.10 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 1.....	51
4.5.11 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูใน ตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 2.....	51
ก.1 ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก.....	59
ก.2 เครื่องบดและคัดขนาดแร่แบบเปียก.....	60
ก.3 ชุดย่อยแร่และผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟต.....	61
ก.4 pulsed perforated-palte column.....	62
ก.5 multistage mixer settler.....	63
ก.6 เครื่องต้มระเหยแเรเออร์ทคลอไรด์ผสม.....	64
ก.7 ระบบ ion exchange chromatography.....	64
ข.1 แร่โมนาไซต์.....	65
ข.1 แสดงการหาซีดจำกัดในการตรวจวัดจากพื้นที่พิก.....	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
ฅ.1 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และ สารหนู 0.250 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	88
ฅ.2 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และ สารหนู 0.375 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	89
ฅ.3 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และ สารหนู 0.500 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	89
ฅ.4 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และ สารหนู 1 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	90
ฅ.5 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และ สารหนู 1.250 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร.....	90
ฅ.6 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของแบลงค์.....	91
ฅ.7 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ที่ความเข้มข้น 2, 5 และ 2 ไมโครกรัม/กรัม.....	91
ฅ.8 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 1.....	92
ฅ.9 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 2.....	92
ฅ.10 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 3.....	93
ฅ.11 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 4.....	93
ฅ.12 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 5.....	94
ฅ.13 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 6.....	94
ฅ.14 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 7.....	95
ฅ.15 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 8.....	95
ฅ.16 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 1.....	96
ฅ.17 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 2.....	96
ฅ.18 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูคนที่ 1.....	97
ฅ.19 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูคนที่ 2.....	97

## สารบัญย่อ

NAA	การวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน
INAA	การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีอาบนิวตรอนแบบไม่ทำลายตัวอย่าง
RNAA	การวิเคราะห์ด้วยวิธีอาบรังสีนิวตรอนแบบต้องทำลายตัวอย่างด้วยกระบวนการทางเคมี
$\alpha$	อนุภาคแอลฟา
$\beta$	อนุภาคบีตา
$\gamma$	อนุภาคแกมมา
(n, $\gamma$ )	ปฏิกิริยา (นิวตรอน, แกมมา)
$\lambda$	ค่าคงที่ของการสลายตัวมีหน่วยเป็น $\text{sec}^{-1}$ หรือ $\text{min}^{-1}$
$\sigma$	พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็น $\text{cm}^2$
$\phi$	ความเข้มของรังสีนิวตรอนหรือจำนวนอนุภาคต่อ $\text{cm}^2$ ต่อวินาที
N	จำนวนอะตอมเป่าเสถียร
$W_u$	น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง
$W_s$	น้ำหนักของธาตุในสารมาตรฐาน
$A_u$	ปริมาณกัมมันตภาพของสารตัวอย่าง
$A_s$	ปริมาณกัมมันตภาพของสารมาตรฐาน
S	แฟกเตอร์การอิมิตัว
HpGe	หัววัดแบบไฮเปอร์เพียวเจอร์มานีเยม
cps	อัตราการนับต่อวินาที (count per sec.)
eV	อิเล็กตรอน โวลต์

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

สารต่างๆ ที่ได้รับเข้าสู่ร่างกายอาจจะมีปัจจัยหลายปัจจัยที่เป็นตัวกระตุ้นและก่อให้เกิดโทษต่อร่างกายซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณที่ได้รับเข้าสู่ร่างกาย ระยะเวลา เส้นทางที่สารพิษเข้าสู่ร่างกาย (ลมหายใจ การกิน การดื่มน้ำ หรือการสัมผัส) สารเคมีอื่นๆ ที่เข้าสู่ร่างกายและลักษณะของตัวเอง เช่น อายุ เพศ ภาวะการได้รับสารอาหาร ครอบครัวยุทธศาสตร์ รูปแบบการดำเนินชีวิตและสุขภาพ

ส่วนประกอบของเล็บบถูกกำหนดโดยสารต่างๆ ที่สะสมสารเหล่านี้มาจากทั้งแหล่งภายนอกและจากการหมุนเวียนของเลือด เนื้อเยื่อของเล็บบถูกใช้เส้นทางเลือกหนึ่งในการตรวจหาปริมาณธาตุต่างๆ เพราะเป็นเนื้อเยื่อที่เป็นแหล่งสะสมสารพิษ อาหาร และแร่ธาตุต่างๆ เนื่องจากโครงสร้างของเล็บบเป็นโครงสร้างถาวร ดังนั้นระดับของธาตุที่สะสมในเล็บบจะไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าเล็บบจะยาวขึ้น ปริมาณแร่ธาตุที่สะสมในเล็บบบ่งบอกถึงปริมาณแร่ธาตุที่สะสมอยู่ในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของร่างกายด้วยเช่นกัน นอกจากนั้นเล็บบยังเป็นแหล่งที่บันทึกกระบวนการการเผาผลาญพลังงานและการดูดซึมภายในเซลล์ของร่างกายที่เกิดขึ้นด้วย ทำให้สามารถติดตามผลของการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ในบุคคลได้ ข้อดีของการตรวจหาปริมาณสารในเล็บบก็คือ ง่ายต่อการเก็บตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง แต่ในการวิเคราะห์เล็บบนั้นก็มีข้อจำกัดบางอย่าง เช่น การปนเปื้อนที่มาจากดิน ยาทาเล็บบ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอายุ เพศ และความสูงของบุคคลก็ยังมีอิทธิพลต่อการแปลผลการวิเคราะห์ไปใช้ประโยชน์ด้วย

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาปริมาณสารพิษที่มีปริมาณน้อยที่อาจจะปนเปื้อนอยู่ในเล็บบของผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากซึ่งเป็นหน่วยงานขึ้นกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีหน้าที่วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเพิ่มมูลค่าแร่วัสดุนิวเคลียร์ ในระดับกึ่งอุตสาหกรรม เช่น การแปรสภาพแร่โมนาไซต์ด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อแยกธาตุหายากและธาตุวัสดุนิวเคลียร์จากแร่ ฯลฯ ตลอดจนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการนำธาตุหายาก (แเรเอิร์ท) และธาตุวัสดุนิวเคลียร์ไปใช้ประโยชน์ในกิจการต่างๆ ซึ่งหน่วยงานนี้แบ่งงานที่เป็นหน้าที่หลักดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### งานแปรสภาพแรมโมนาไซด์

มีหน้าที่แปรสภาพแรมโมนาไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมีในขั้นตอนของการบดแร่ การย่อยแร่ จนถึง การแยกกลุ่มยูเรเนียม-ทอเรียม ซีเรียม และแรเออรัทผสม

### งานแรเออรัท

มีหน้าที่แยกแรเออรัทเฉพาะตัวให้มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูงขึ้น โดยวิธีการสกัดด้วยของเหลว การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน และอื่น ๆ จนกระทั่งได้ผลผลิตแรเออรัท สำหรับนำไปใช้ในกิจการต่างๆ

### งานยูเรเนียมและทอเรียม

มีหน้าที่ในการสกัดแยกยูเรเนียม ทอเรียม ที่ได้จากการแปรสภาพแรมโมนาไซด์ให้มีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง สำหรับการวิจัยและพัฒนาเบื้องต้นด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ต่อไป

ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากจึงสัมผัสกับธาตุต่างๆ เหล่านี้ระหว่างการปฏิบัติงาน ในการวิจัยนี้ได้เลือกเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันมาใช้ในการวิเคราะห์ เนื่องจากเป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีความไวในการวิเคราะห์สูงและสามารถทำคุณภาพวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเทคนิคอื่นทำได้ยากกว่าทำให้ผลการวิเคราะห์สารปริมาณน้อยมีความถูกต้อง แม่นยำ และสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีธาตุได้พร้อมๆ กันหลายธาตุเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ทางกัมมันตรังสีเทียบกับเทคนิคทางเคมีวิเคราะห์อื่นๆ ในการวิเคราะห์สารที่มีปริมาณน้อยๆ [1]

Methods	Precision	Detection: Necessary Quantity of Element	Sample Size: Necessary Quantity of sample	Possibility of Nondestructive Analysis	Possibility of Multielemental Analysis	Analysis Time
Activation Analysis	2-10%	$>10^{-12}$ g	a few mg-a few g	yes	yes	a few min to a few weeks
Spark Mass Spectrometry	20-30%	$10^{-3}$ - $10^{-9}$ g	a few mg	no	yes	a few hours
Molecular Absorption Spectrometry	4-8%	$10^{-5}$ - $10^{-7}$ g	10 mg-1 g	no	no	a few hours
Emission Spectrometry	5- 20%	$10^{-5}$ - $10^{-6}$ g	10-100 mg	no	yes	1- 2 h
Flame Emission And Atomic Absorption Spectrometry	2 - 5%	$10^{-6}$ - $10^{-7}$ g	0.1 - 1 g	no	no	1- 2 h
Flameless Atomic Absorption Spectrometry	8- 12%	$10^{-11}$ - $10^{-12}$ g	0.1- 2 mg	no	no	1 - 2 h
X- Ray Fluorescence	1-2 %	$10^{-3}$ - $10^{-5}$ g	0.1-2 g	yes	yes	1 h
Polarography	4- 8%	$10^{-6}$ - $10^{-7}$ g	0.010- 1 g	no	no	1 - 2 h

ด้วยเหตุผลและหลักการข้างต้นจึงเป็นแนวทางสำคัญในการนำไปศึกษาเพื่อที่จะสำรวจหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อยที่อาจสะสมอยู่ในเล็บ โดยใช้เทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ง่ายและรวดเร็ว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อตรวจวัดปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูที่สะสมอยู่ในเล็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน เพื่อประเมินถึงปริมาณของธาตุดังกล่าวที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับเนื่องจากการทำงานในช่วงเดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547

1.2.2 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เล็บเป็นตัวบ่งชี้ชีวภาพสำหรับการตรวจหาสารสะสมในร่างกายของผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานเกี่ยวข้องกับธาตุยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การศึกษาการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชันซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.3.1.1 สร้างกราฟมาตรฐานของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู พร้อมกับศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐานของแต่ละชนิด

1.3.1.2 ตรวจสอบความแม่นยำ (Accuracy) ของวิธีการวิเคราะห์โดยทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง SRM 1566b Oyster tissue, SRM 1547 Peach leaves และ SRM 77-A Uranium ore ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST)

1.3.1.3 ตรวจสอบความเที่ยง (Precision) ของวิธีการวิเคราะห์โดยวิเคราะห์ซ้ำสารมาตรฐานยูเรเนียม สารหนู และแลนทานัมที่ความเข้มข้น 5, 2 และ 10 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ เป็นจำนวน 10 ซ้ำ

1.3.1.4 ศึกษาขีดจำกัดในการตรวจวัด (Detection limit)

1.3.2 เก็บตัวอย่างเล็บจากกลุ่มผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ค.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี โดยทำการเก็บตัวอย่างมาตั้งแต่เดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547

1.3.3 การตรวจวัดหาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเล็บโดยการเตรียมตัวอย่างแล้วทำการอาบรังสีนิวตรอน และวัดปริมาณรังสีด้วยหัววัดรังสีแกมมา

1.3.4 ประเมินผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ที่อาจสะสมอยู่ในเล็บ ของผู้ปฏิบัติงานนี้เนื่องจากการทำงานที่มีโอกาสสัมผัสกับธาตุดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1.4.1 ใช้เป็นแหล่งข้อมูลปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูที่อาจจะสะสมอยู่ในเก็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากและเพื่อประเมินถึงปริมาณของธาตุดังกล่าวที่อาจสะสมในร่างกายของผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากการทำงานกับสารดังกล่าว

1.4.2 การนำเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณเพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูได้ในระดับที่ต่ำมากได้พร้อมกัน ใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่สั้น โดยไม่ต้องย่อยสลายตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การวิเคราะห์ทางรังสี (Radiochemical Methods) [1,2]

การวิเคราะห์ทางเคมีรังสีเป็นการวิเคราะห์ที่อาศัยสมบัติทางกัมมันตรังสี (radioactivity) ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของธาตุกัมมันตรังสี (radioisotopes) โดยมีการสลายตัวให้รังสีซึ่งมีชนิด พลังงาน และค่าครึ่งชีวิต (half-life) เฉพาะตัว ธาตุกัมมันตรังสีเหล่านี้อาจมาจากการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์ของธาตุที่เสถียรหรือมาจากธรรมชาติ เทคนิคต่างๆ ที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพและปริมาณนี้ ได้แก่

#### 2.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสี (Activation Analysis)

เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยการทำให้ธาตุเสถียรที่สนใจเปลี่ยนเป็นธาตุกัมมันตรังสีด้วยการทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับอนุภาคอื่นๆ ซึ่งเป็นตัวกัมมันต์ เช่น ใช้นิวตรอน โปรตอน อนุภาคอิเล็กตรอน อนุภาคแอลฟา เป็นต้น เราเรียกเทคนิคต่างๆ ตามชนิดของอนุภาคที่ใช้เป็นตัวให้เกิดการกัมมันต์แล้ววัดปริมาณของกัมมันตรังสีของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น เมื่อนำค่าความแรงรังสีที่ได้ไปเทียบกับความแรงรังสีของสารมาตรฐานก็จะสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างได้

#### 2.1.2 เทคนิคการเจือจางไอโซโทป (Isotope Dilution Methods, IDA)

ใช้วิธีเติมไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เป็นชนิดเดียวกับสารที่ต้องการหาปริมาณลงไปโดยทราบปริมาณที่แน่นอนทั้งน้ำหนักและความแรงรังสี หลังจากผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้จนถึงสมดุลแล้วแยกเอาองค์ประกอบที่สนใจออกจากสารตัวอย่าง แล้ววัดกัมมันตรังสีของสารที่แยกออกมาได้ เทียบกับความแรงรังสีของสารไอโซโทปที่เติมลงไปก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณของสารที่ต้องการได้

#### 2.1.3 เทคนิคการไทเทรตโดยการนับรังสี (Radiometric Titration)

เป็นการวิเคราะห์สารที่สนใจโดยการไทเทรตกับสารกัมมันตรังสี แล้วหาจุดยุติโดยนับการนับรังสีของไทเทรนต์หรือสารที่ต้องการวิเคราะห์

#### 2.1.4 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการนับรังสี (Radiorelease Methods of Analysis)

วิธีนี้เป็นการทำให้สารที่สนใจทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่มีรังสีนำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาวัดหาความแรงรังสีที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ทฤษฎีการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Theory of Radioactive Decay) [2]

ถ้าพิจารณาจำนวนอะตอมกัมมันตรังสีทั้งหมดในสารตัวอย่างเท่ากับ  $N_t$  อะตอมที่เวลา “  $t$  ” และในจำนวนนั้นได้สลายตัวไปแล้ว  $dN_t$  อะตอม เมื่อเวลาเปลี่ยนจาก “  $t$  ” เป็น “  $t+dt$  ” หรือ ในช่วงเวลา “  $dt$  ” จะได้แสดงอัตราเร็วของปฏิกิริยาการสลายตัวดังนี้

$$\frac{-dN_t}{dt} = \lambda N_t \quad (2.1)$$

และ

$$\frac{-dN_t}{N_t} = \lambda dt \quad (2.2)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.2) จะได้สมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad (2.3)$$

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

$N_0$  = จำนวนอะตอมของธาตุเมื่อเวลาเริ่มต้น  $t = 0$

$N_t$  = จำนวนอะตอมที่เหลือหลังจากทิ้งไว้เป็นเวลา  $t$

การสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีจะพบว่าจำนวนอะตอมไม่มีโอกาสหมดไปโดยสิ้นเชิงมี แต่จะลดลงจนมีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงใช้ช่วงเวลาที่ทำให้ปริมาณของอะตอมกัมมันตรังสีลดลง ครึ่งหนึ่งของจำนวนที่มีอยู่เดิม เรียกว่า ครึ่งชีวิต (half-life) แทนด้วยสัญลักษณ์  $t_{\frac{1}{2}}$  และมีความสัมพันธ์กับ  $\lambda$  ดังนี้

จากสมการที่ (2.4) เมื่อแทนด้วย  $t = t_{\frac{1}{2}}$  และ  $N_t$  ด้วย  $\frac{N_0}{2}$  จะได้

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.6)$$

ถ้าทราบค่า  $\lambda$  ก็จะสามารถหาค่าครึ่งชีวิต ( $t_{\frac{1}{2}}$ ) ได้

เนื่องจาก  $\frac{-dN}{dt}$  เป็นอัตราการสลายตัวของอะตอมของธาตุกัมมันตรังสีเรียกสั้นๆ ว่า กัมมันตภาพ (activity)

$$\therefore A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (2.7)$$

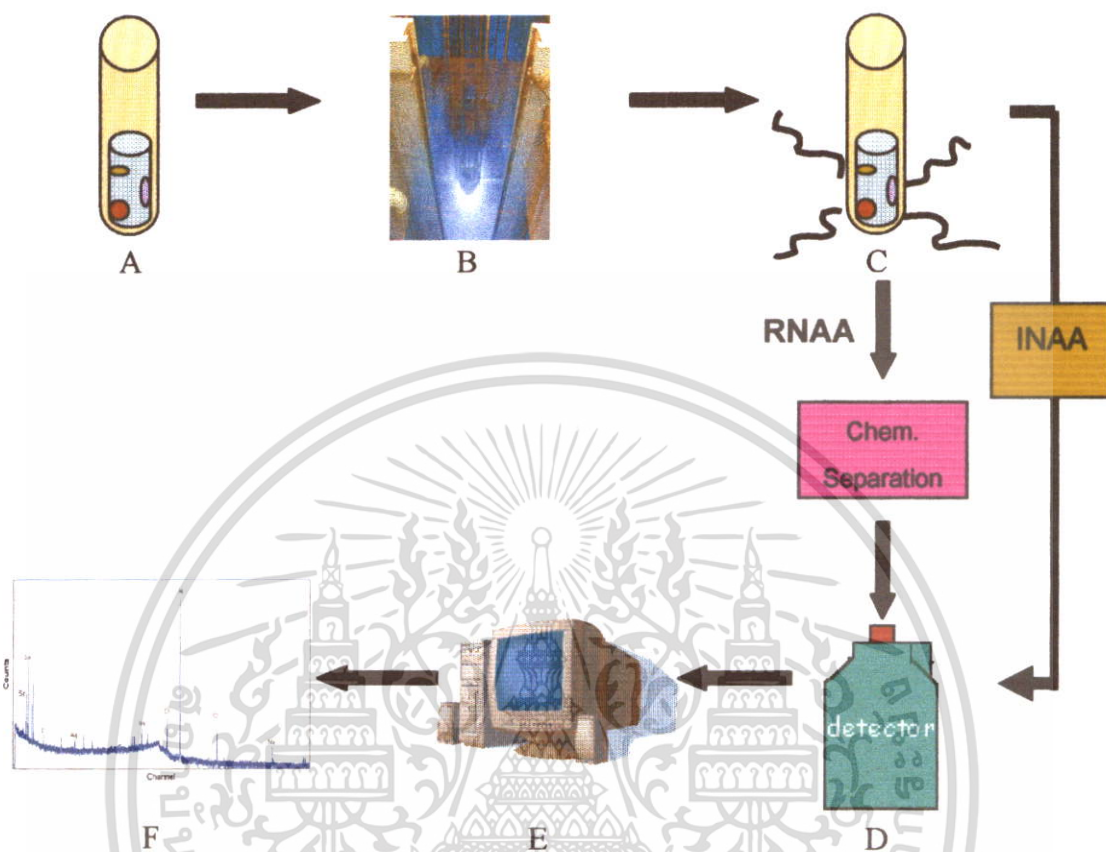
### 2.3 เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron Activation Analysis) [3]

เทคนิคนิวตรอนแอกติเวชันถูกค้นพบโดย Hevesy และ Levi ในปี ค.ศ.1936 ได้เริ่มใช้อนุภาคนิวตรอนยิงสารผสมของธาตุหายาก (rare earth) เพื่อทำการวิเคราะห์ธาตุต่างๆ โดยการยิงอนุภาคนิวตรอนเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสของธาตุเหล่านี้ จากการสังเกตนี้จึงได้มีการนำนิวตรอนมาทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับตัวอย่างเกิดเป็นสารกัมมันตภาพรังสีทำให้สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบที่สนใจในตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ เรียกเทคนิคนี้ว่า นิวตรอนแอกติเวชัน ซึ่งแบ่งได้ 2 แบบ ได้แก่

Radiochemical Neutron Activation Analysis (RNAA) เป็นเทคนิคที่มีการใช้วิธีการทางเคมีร่วมด้วย เช่น มีกระบวนการแยกทางเคมี เป็นต้น

Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA) เป็นเทคนิคที่ไม่ใช้วิธีการทางเคมีแต่ใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (non-destructive)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน ดังแสดงในแผนภาพที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพขั้นตอนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA [4]

- A สารตัวอย่างและสารมาตรฐาน
- B อานรังสีนิวตรอน
- C สารสลายตัว
- D, E วัดรังสีแกมมา
- F สเปกตรัมแกมมา

จากรูปที่ 2.1 นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานซึ่งมีสมบัติเชิงเคมีและฟิสิกส์ใกล้เคียงกันมา อานรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์พร้อมกัน หลังจากสิ้นสุดการอานรังสีจะทิ้งให้สารเกิดการสลายตัว (cooling time) อาจจะใช้เวลาเป็นนาทีหรือเป็นชั่วโมงแล้วแต่ความเหมาะสม การรอให้สลายตัวจะช่วยให้สารที่รบกวนซึ่งมีครึ่งชีวิตสั้นเกิดการสลายตัวส่งผลให้การรบกวนลดลงการวิเคราะห์สารที่เราสนใจจะทำได้ง่ายขึ้น และยังช่วยลดอันตรายจากการสัมผัสกับรังสีที่มี

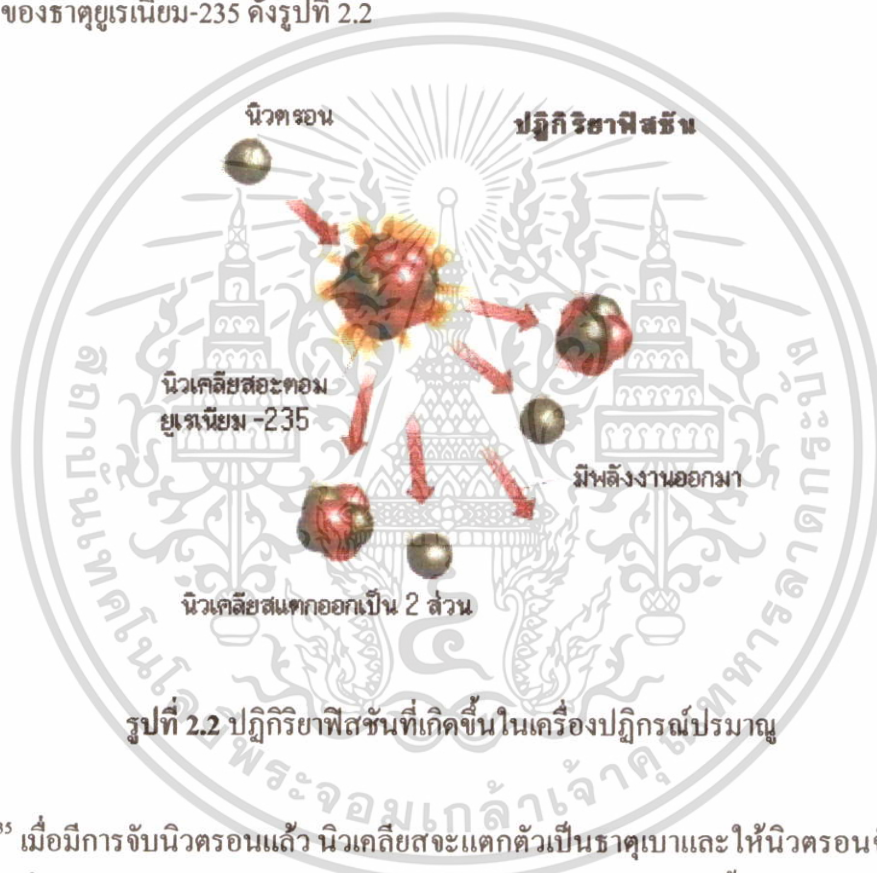
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแรงรังสีสูงกับผู้วิเคราะห์ ในกรณีที่ธาตุที่จะวิเคราะห์ไม่มีสารแทรกสอดก็สามารถวัดกัมมันตภาพได้โดยตรงเลยเป็น INAA แต่ถ้าการเลือก cooling time ที่เหมาะไม่สามารถลดปัญหาสารแทรกสอด (interferences) ก็จะต้องทำ radiochemical separation ก่อนแล้วจึงนำไปวัดกัมมันตภาพรังสีเป็น RNAA [4]

องค์ประกอบในการวิเคราะห์เชิงกัมมันตภาพรังสีด้วยนิวตรอน มีดังต่อไปนี้

### 2.3.1 แหล่งกำเนิดนิวตรอน (Neutron Sources) [2,4]

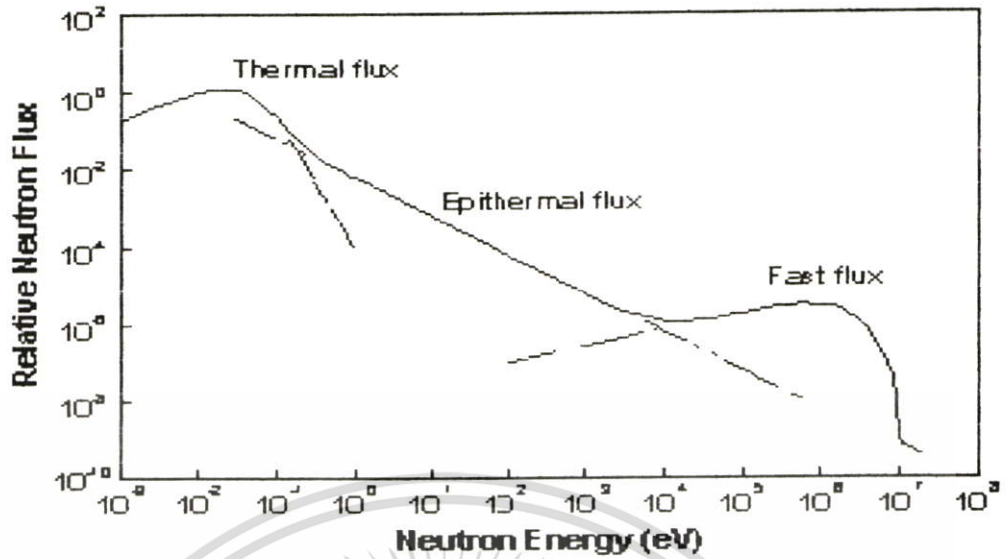
แหล่งผลิตนิวตรอนมีหลายแบบแต่ที่ได้อาศัยในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ชนิดวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1) (nuclear research reactor) โดยอาศัยกระบวนการฟิชชัน (fission process) ของธาตุยูเรเนียม-235 ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาฟิชชันที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

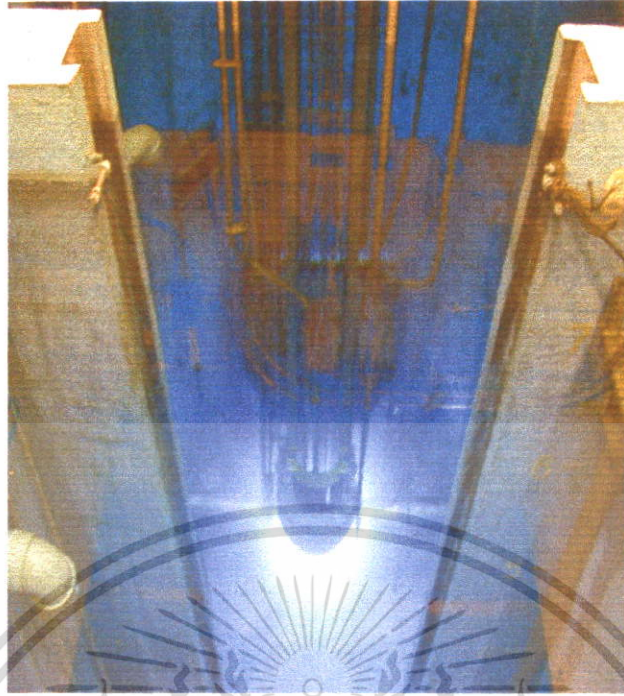
${}_{92}^{235}\text{U}$  เมื่อมีการจับนิวตรอนแล้ว นิวเคลียสจะแตกตัวเป็นธาตุเบาและให้นิวตรอนจำนวนมาก โดยมีค่าเฉลี่ยของการเกิดนิวตรอนต่อฟิชชันเท่ากับ 2.5 และมีพลังงานตั้งแต่ 1-10 MeV ซึ่งเป็นนิวตรอนพลังงานสูง (fast neutron) แต่หลังจากผ่าน moderators ได้แก่ น้ำ  $\text{D}_2\text{O}$  หรือแกรไฟต์จะทำให้พลังงานของนิวตรอนลดลงจากนิวตรอนพลังงานสูงลงมานิวตรอนพลังงานต่ำ อนุภาคนิวตรอนพลังงานต่ำนี้ยังแบ่งออกได้เป็นนิวตรอนช้า (slow neutron) หรือเทอร์มอลนิวตรอน (thermal neutron) ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า 0.5 eV และอีพิเทอร์มอล (epithermal neutron) ซึ่งมีพลังงานในช่วง 0.5 eV -0.5 MeV หรืออาจใช้นิวตรอนเร็วซึ่งมีพลังงานสูงกว่า 0.5 MeV ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของพลังงานนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย [3]

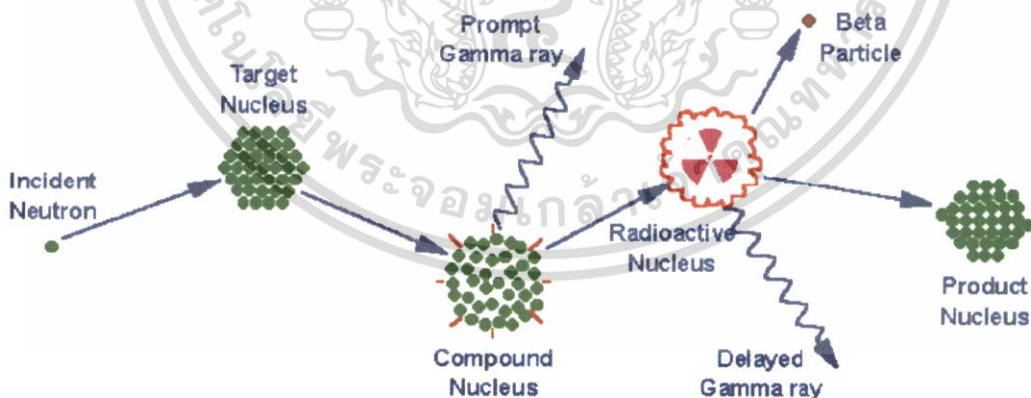
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยนั้นสามารถผลิตนิวตรอนที่มีความเข้ม (neutron flux) ได้ถึง  $10^{11}$ - $10^{14}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นนิวตรอนระดับนี้ใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ต่ำๆ ในช่วง  $10^{-3}$ -10 ไมโครกรัม รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งเป็นแบบ TRIGA Mark III / MI ที่ได้ใช้เป็นแหล่งนิวตรอนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.4 แสดงเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์วิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปว-1/1) ซึ่งเป็นชนิด TRIGA Mark III / MI ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

### ปฏิกิริยานิวเคลียร์ที่ใช้ใน NAA

ส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาที่เรียกว่า (n,γ) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงถึงกระบวนการชนแบบดูดจับนิวตรอน โดยนิวเคลียสตามด้วยกระบวนการปลดปล่อยรังสีแกมมา [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนิวเคลียสของธาตุกัมมันตภาพรังสีเมื่อถูกชนด้วยอนุภาคนิวตรอน โดยเป็นการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) นิวเคลียสของธาตุมักจะถูกกระตุ้น จากนั้นไม่นานก็จะเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาเพื่อกลับสู่สภาวะที่เสถียร ซึ่งจะเกิดเป็นสารกัมมันตรังสีแล้วจึงเกิดการสลายตัวโดยปลดปล่อยรังสีแกมมาที่มีลักษณะเฉพาะของแต่ละตัวขึ้นอยู่กับครึ่งชีวิตของสารกัมมันตรังสี [3]

### 2.3.2 การเตรียมสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะต้องมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีคล้ายกัน องค์ประกอบในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรใกล้เคียงกันต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีเมื่อนำไปอบรังสี ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างและสารมาตรฐานต้องทนต่อความร้อนและความกดดัน สะอาด บริสุทธิ์ โดยทั่วไปจะใช้ภาชนะทำด้วย polyethylene เมื่อใช้เวลาอบรังสีสั้นๆ หากอบรังสีเป็นเวลาหรืออบในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะใช้ภาชนะที่ทำจาก quartz หรืออลูมิเนียม [4]

### 2.3.3 เวลาที่ใช้ในการอบรังสี

เมื่อนำธาตุไปอบรังสีนิวตรอน อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันตรังสีเขียนแทนได้ด้วยสมการ

$$\frac{dn^*}{dt} = N\phi\sigma \quad (2.8)$$

$\frac{dn^*}{dt}$  คือ อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันตรังสีเป็นนิวตรอนต่อวินาที

N คือ จำนวนอะตอมเป้าเสถียร

$\phi$  คือ ฟลักซ์เจ็ล

$\sigma$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่จับนิวตรอนเป็นตารางเซนติเมตรต่ออะตอมเป้า

ขณะที่เกิดนิวคลีโอไอกัมมันตรังสีนิวคลีโอไอนี้จะมีการสลายตัวด้วยอัตราเร็ว  $\frac{dn^*}{dt}$  ดังสมการ (2.1)

$$\frac{dN^*}{dt} = \lambda N^* \quad (2.9)$$

ขณะที่อาบรังสีด้วยฟลักซ์นิวตรอนคงที่ อัตราการเกิดอนุภาคกัมมันตรังสีเขียนแทนด้วย

$$\left(\frac{dN^*}{dt}\right)_{total} = N\Phi\sigma - \lambda N^* \quad (2.10)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตตั้งแต่ 0 ถึง 1 จะได้

$$N^* = \frac{N\Phi\sigma}{\lambda[1 - \exp(-\lambda t)]} \quad (2.11)$$

เมื่อแทนสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.11) จะได้

$$N^* = \frac{N\Phi\sigma}{\lambda[1 - \exp\left(\frac{-0.693}{t_1/2}\right)]} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$A = \lambda N^* = \frac{N\Phi\sigma}{\lambda[1 - \exp\left(\frac{-0.693}{t_1/2}\right)]} = N\Phi\sigma S \quad (2.13)$$

S แฟกเตอร์การอิ่มตัว (saturation) มีค่าเท่ากับ  $\frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-0.693}{t_1/2}\right)}$

การวิเคราะห์มักนิยมอาบรังสีสารตัวอย่างและสารมาตรฐานนานพอจนทุกเทอมทางขวามือของสมการ (2.14) มีค่าคงที่ ยกเว้น N จำนวนนิวคลีไอรังสีที่ใช้วิเคราะห์แปรตรงโดยอัตราการนับถ้านิวคลีไอค์ที่เป็นเป้าหมายอยู่ในธรรมชาติ น้ำหนักสารที่วิเคราะห์หาได้จากจำนวนอะตอม x เลขอวกกาโดร ( $N \times 6.02 \times 10^{23}$ ) x ปริมาณไอโซโทปที่มีในธรรมชาติ x น้ำหนักอะตอมเชิงเคมี เนื่องจากทุกตัวมีค่าคงที่ น้ำหนักสารจึงแปรโดยตรงกับอัตราการนับเขียนได้สมการนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

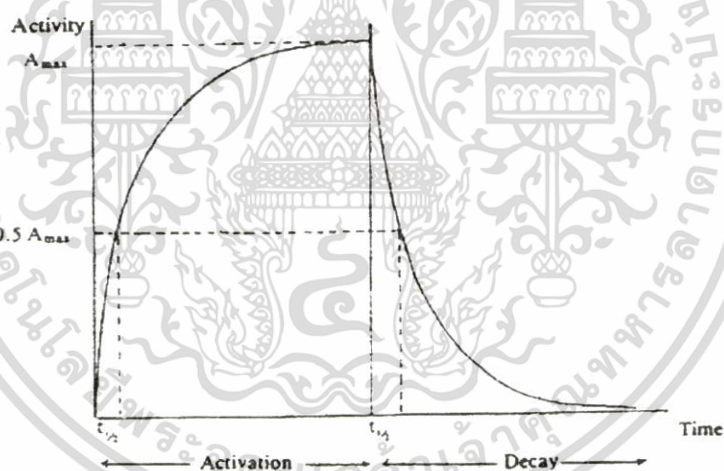
$$W_u = W_s \times \frac{A_u}{A_s} \quad (2.14)$$

$W_u$  และ  $W_s$  = น้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่างและในสารมาตรฐาน

$A_u$  และ  $A_s$  = อัตราการนับของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

เวลาที่ใช้ในการอาบรังสีสารตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ เนื่องจากความ  
แรงของกัมมันตภาพรังสีที่จะได้จากการอาบรังสีขึ้นอยู่กับ saturation factor  $(1 - e^{-\lambda t})$  หรือ  $\left(\frac{t_a}{t_{1/2}}\right)$

ของไอโซโทปรังสีแต่ละตัว ในการทดลองควรใช้เวลาในการอาบรังสีนานพอที่จะเกิดไอโซโทปที่มีความ  
แรงรังสีที่จะสามารถวัดได้อย่างถูกต้อง ถ้าใช้เวลาอาบรังสีนานปริมาณของกัมมันตภาพก็จะ  
ได้มากขึ้น [2] ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงกัมมันตภาพที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสีและกัมมันตภาพที่ลดลงจากการทิ้งไว้ให้  
สลายตัวหลังจากการอาบรังสี [4]

ถ้าใช้เวลาอาบรังสีนานเกินไป saturation factor ไอโซโทปรังสีก็จะคงที่ ทำให้เสียเวลา  
นอกจากนี้ยังอาจเกิดกัมมันตภาพของธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาวซึ่งอาจไปทำให้แทรกสอดการวิเคราะห์  
ธาตุที่ต้องการได้ ในการวิเคราะห์จึงมักใช้วิธีการอาบรังสีหลายช่วงเวลามีการอาบรังสีระยะสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

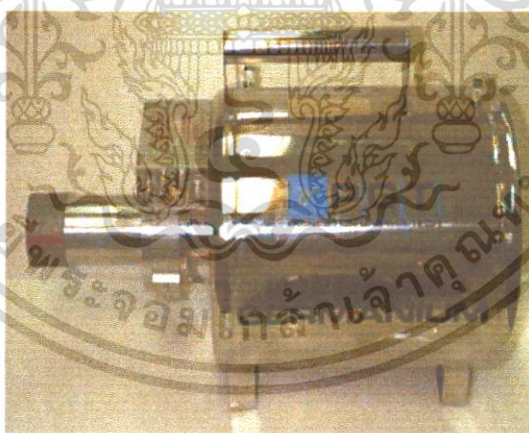
กลางและตามครึ่งชีวิตของธาตุที่จะสนใจ หลังจากการอบรังสีแล้วจะต้องทิ้งเวลาสักกระยะหนึ่ง (cool) เพื่อให้ลดการแทรกสอดจากธาตุกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นๆ ให้สลายตัวไปเสียก่อน จึงทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ธาตุที่มีครึ่งชีวิตยาว

### 2.3.4 การวัดปริมาณรังสีจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน

หลังจากการอบรังสีแล้วถ้าปริมาณของกัมมันตภาพแรงแมกจะต้องทิ้งไว้ก่อนที่จะทำการวัดในการวัดกัมมันตภาพจะต้องเลือกหัววัดให้ถูกต้อง โดยต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพ และความสามารถในการแยกพลังงานด้วย หัววัดที่นิยมใช้ใน NAA ได้แก่ หัววัด solid state detector (SSD) เป็นหัววัดที่ได้รับความนิยมสูงมาก เพราะมีประสิทธิภาพสูง ได้แก่ lithium-drifted silicon detector, Si (Li) เหมาะแก่การใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ และอีกแบบหนึ่ง ได้แก่ lithium-drifted germanium detector, Ge (Li) เหมาะแก่การใช้วัดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงๆ Ge detector มีอยู่ 2 แบบ คือ

ก. แบบธรรมดา ต้องแช่ในโตรเจนเหลวตลอดเวลา (lithium-drifted germanium detector, Ge (Li))

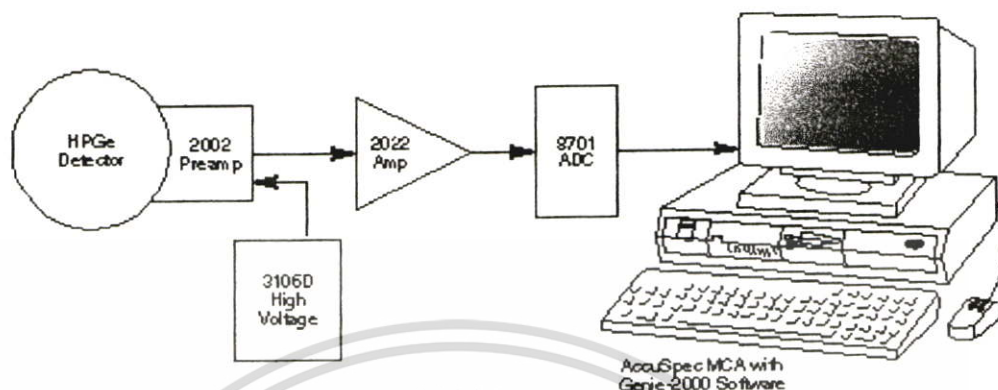
ข. แบบไฮเปอร์เพียว HpGe สามารถเก็บไว้ได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อใช้งานต้องนำไปแช่ในโตรเจนเหลว ดีเทคเตอร์ชนิดนี้ใช้ผลึก germanium ที่มีบริสุทธิ์สูง ลักษณะของหัววัดรังสีแบบ HpGe [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของหัววัด HpGe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของ Solid state detector ที่ใช้ควบคู่กับ multichannel analyzer ดังแสดงในรูปที่ 2.8

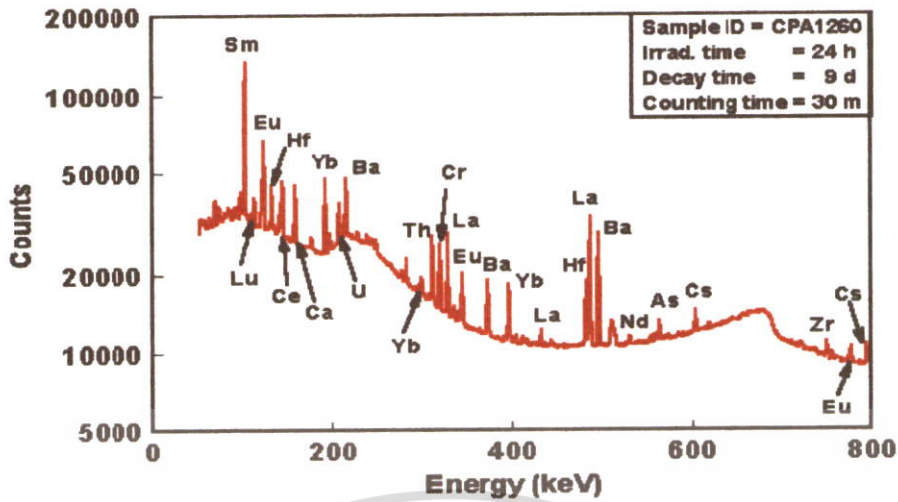


รูปที่ 2.8 แสดงแผนภาพของเครื่อง Gamma Multichannel Analyzer ที่ควบคุมด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ และใช้หัววัด HpGe

### 2.3.5 การวิเคราะห์ผล

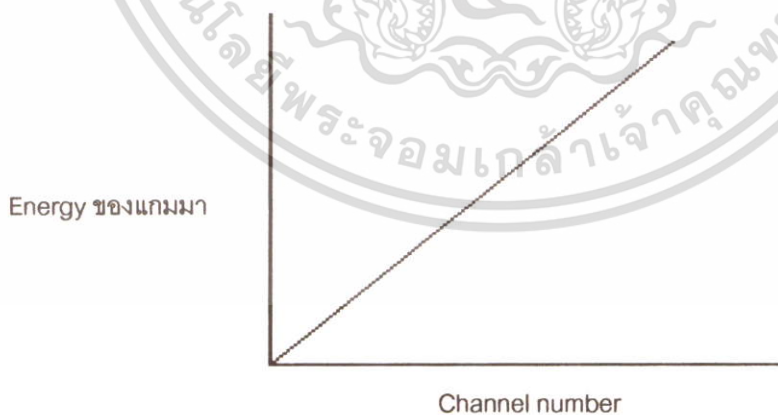
#### 2.3.5.1 การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative Analysis)

ในการทำคุณภาพวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าสารตัวอย่างมีธาตุใดบ้างเป็นองค์ประกอบนั้นๆ เทคนิค NAA จะอาศัยสมบัติของธาตุกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น ซึ่งแต่ละธาตุจะมีครึ่งชีวิตและพลังงานของรังสีที่ธาตุนั้นสลายตัวให้ออกมาที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของธาตุ เมื่อวัดสารตัวอย่างด้วยเครื่องแกมมา สเปกโตรมิเตอร์ จะได้แกมมาสเปกตรัม [3,4] ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงแกมมาสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาวัตถุโบราณของเครื่องปั้นดินเผาอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์และใช้ HpGe [3]

ซึ่งแต่ละพีคสามารถบอกได้ว่ามีพลังงานเท่าใดได้ โดยเราสามารถบอกถึงพลังงานของแต่ละพีคได้โดยเปรียบเทียบจากกราฟเปรียบเทียบ ซึ่งสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของพลังงานรังสีแกมมา กับลำดับช่องการนับ (channel number) ของสารรังสีมาตรฐานที่ทราบพลังงานแน่นอน เช่น Co-60 ที่พลังงานแกมมา 1170 และ 1332 keV เป็นต้น ดังนั้นถ้าทราบว่าพีคอยู่ที่ลำดับช่องที่เท่าใดก็จะหาพลังงานได้ทันที ดังรูปที่ 2.10

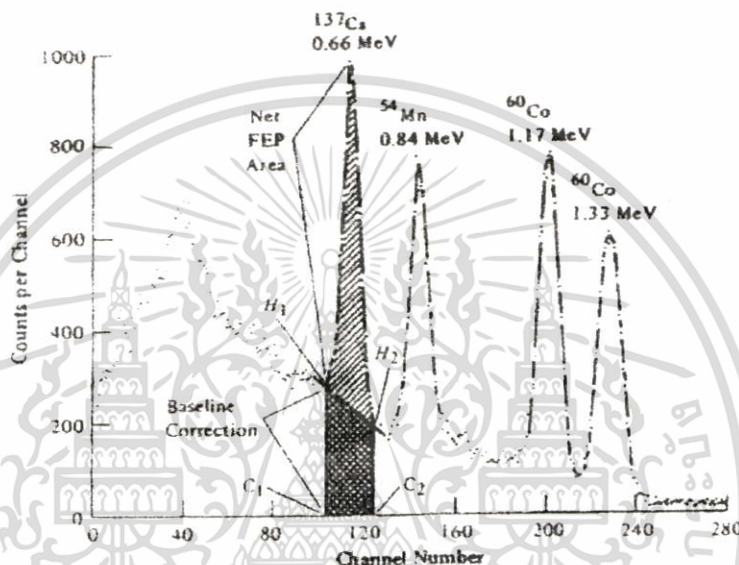


รูปที่ 2.10 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานกับจำนวนช่อง [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5.2 การทำปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative Analysis)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบ โดยทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานจะต้องทำให้อยู่ที่สภาวะเดียวกัน ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างบรรจุในภาชนะชนิดเดียวกัน เวลาที่ใช้ในการอาบรังสี ฟลักซ์ และเวลาที่ใช้ในการสลายตัว เวลาที่ใช้นับรังสี ในการหาพื้นที่ใต้พีกจากสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่มาจากหลายๆ ชนิดปนกันซึ่งจะทำให้ได้สเปกตรัมยุ่งยากขึ้นจึงต้องใช้ baseline subtraction ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการหาพื้นที่ของพีกซึ่งเป็นปฏิภาคกับปริมาณกัมมันตภาพ [4]

$$\text{Photopeak area} = \text{Total area } (C_1 \rightarrow C_2) - \left( \frac{H_1 + H_2}{2} \right) \left( \frac{C_2 - C_1}{1} \right) \quad (2.15)$$

ในทางปฏิบัติ จะต้องหา channel  $C_1$  และ  $C_2$  ให้ได้ โดยเลือก channel number ที่ base line ทั้งสองข้างของพีกหาผลรวมของ count rate จาก channels ต่างๆ ตั้งแต่  $C_1$  ถึง  $C_2$  จะได้พื้นที่ทั้งหมดแล้วลบออกเสียด้วยส่วนที่เสริม โดยใช้ count rate ที่  $H_1 + H_2$ หารด้วย 2 จะได้ค่าเฉลี่ยเมื่อคูณด้วยจำนวนช่องทั้งหมด  $(C_2 - C_1 + 1)$  จะเป็นพื้นที่ส่วนล่างทั้งหมด แล้วจึงนำพื้นที่พีกมาเปรียบเทียบกับกันดังสมการ (2.15)

## 2.4 การใช้ประโยชน์ของ NAA [5]

เทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชันเป็นเทคนิคที่ให้สภาพไวสามารถนำไปใช้เป็นวิธีวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุต่างๆ โดยเฉพาะพวกที่มีปริมาณน้อยๆ ในสารเกือบทุกชนิด ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างที่มีผู้นำเอาเทคนิคทาง NAA ไปใช้วิเคราะห์ธาตุในงานประเภทต่างๆ กัน อาทิ

ใช้ในทาง Earth Sciences มีผู้วิจัยหลายท่านได้ใช้เทคนิค NAA ในการปรับปรุงคุณภาพของสารมาตรฐานธรณีวิทยาให้มีความเที่ยง และแม่นยำยิ่งขึ้น เช่น แร่ธาตุต่างๆ ในอุกกาบาต (meteorites) ตัวอย่างจากดวงจันทร์ ดินตะกอน (sediments) ถ่านหิน และปิโตรเลียม เป็นต้น

ในทางวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้ใช้เทคนิค NAA ในการวิเคราะห์อาหารและของเสียที่ร่างกายขับถ่าย เพื่อศึกษาสมดุลของร่างกาย นอกจากนั้นยังใช้ในการวิเคราะห์ส่วนต่างๆ ของร่างกาย อาทิ เส้นผม เล็บ กระดูก ฟัน เลือด ดับ และซีรัม เป็นต้น

ใช้ในการศึกษาทางสภาวะแวดล้อม (Environmental Science) ได้มีผู้ใช้ NAA ทำการวิเคราะห์หาธาตุต่างๆ ในอากาศ น้ำ ดิน และตะกอน

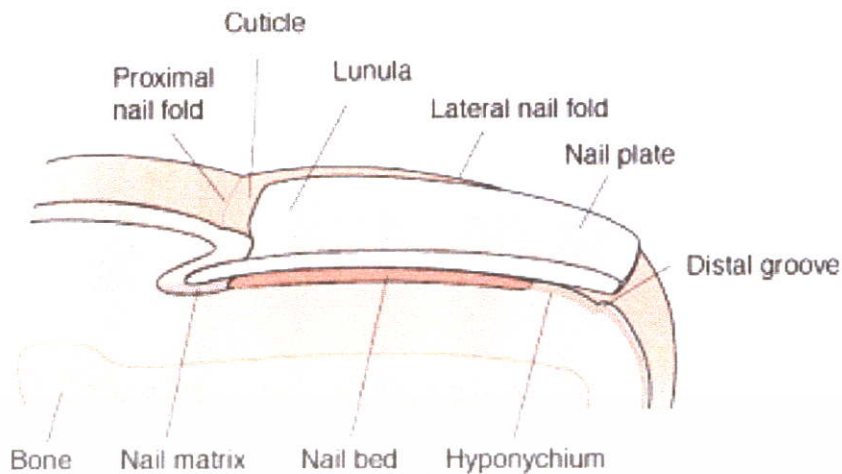
ใช้ในการพิสูจน์หลักฐานหรือนิติเวชศาสตร์ มีตัวอย่างเป็นจำนวนมากที่ได้ทำการตรวจพิสูจน์ด้วยเทคนิค NAA เช่น ยาเสพติด สี เศษกระจก ดินปืน เส้นผม เลือด ตลอดจนชิ้นส่วนของร่างกายของอาชญากรว่าตรงกับชิ้นส่วนที่พบหลักฐานหรือไม่

ใช้ในการศึกษาทางโบราณคดี (Archaeology) ได้มีการใช้ NAA ทำการวิเคราะห์วัตถุโบราณ เช่น ภาชนะต่างๆ หินไฟ โลหะ เหริยวัตถุต่างๆ เป็นต้น

## 2.5 เล็บ (Nail) [6,7]

เล็บ คือ อวัยวะปกคลุมร่างกายชนิดหนึ่งที่พบบริเวณปลายนิ้วมือนิ้วเท้าทั้ง 20 นิ้ว ลักษณะโครงสร้างของเล็บสามารถแบ่งออกได้เป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

Nail plate คือ แผ่นเล็บประกอบด้วยเซลล์ที่ตายแล้ว (dead keratinized plate) เล็บจะยาวและงอกใหม่ตลอดเวลา เคราตินที่เล็บต่างจากเคราตินของผิวหนัง คือ เล็บจะเป็นเคราตินแบบแข็ง แผ่นเล็บถูกสร้างจาก nail matrix และวางตัวอยู่บน nail bed ทั้งแผ่นเล็บและ nail bed จะยึดติดกันแน่นไม่แยกจากกัน ตั้งแต่ proximal part ไปจนถึง distal part ก็จะแยกออกจากกันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดง โครงสร้างส่วนต่างๆ ของแผ่นเล็บ [7]

ตำแหน่งที่แยกจากกันนี้เป็นตำแหน่งที่สามารถตัดเล็บได้ตำแหน่งนี้เรียกว่า Hyponychium บริเวณ Proximal part จะพบส่วนที่เป็นรูปเสี้ยวพระจันทร์ (half moon-shaped area) สีขาวขุ่นๆ (opaque white) เรียกว่า Lunula ซึ่งก็คือ ส่วนของ nail matrix ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่านั่นเอง ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่แผ่นเล็บยึดกับ Nail bed อย่างหลวมๆ และแยกออกจากกันได้ไม่ยาก

Proximal nail fold คือ ผิวหนังที่ปกคลุม proximal part ของแผ่นเล็บไว้ ชั้น Stratum comeum ของ proximal nail fold นี้จะเห็นเป็นเยื่อขาวๆ ช่วยยึด proximal nail fold ให้ติดกับแผ่นเล็บมากยิ่งขึ้น บริเวณนี้มีชื่อเรียกว่า cuticle หนึ่งแท่งของ proximal nail fold จะประกอบไปด้วยเส้นเลือดมากมายเรียงตัวเป็นร่างแหอยู่

Lateral nail folds คือ ผิวหนังที่ปกคลุมด้านข้างทั้งซ้ายและขวาของแผ่นเล็บไว้ทำให้แผ่นเล็บถูกปกคลุมด้วยผิวหนังตลอด 3 ด้าน คือ proximal ถูกปกคลุมด้วย proximal nail fold และด้านข้างทั้ง 2 ด้านปกคลุมด้วย lateral nail folds เหลือเพียงด้าน distal end ด้านเดียวที่ไม่มีผิวหนังปกคลุมและเป็นด้านที่เล็บจะยาวออกไป

Nail matrix คือ ตัวสร้างเล็บ โดย nail matrix จะอยู่บริเวณ proximal part ใต้ต่อ proximal nail fold ใน nail matrix นี้ประกอบไปด้วยเซลล์ต่างๆ คือ keratinocyte เป็นส่วนใหญ่ keratinocytes จะเปลี่ยนไปเป็นเซลล์ของเคราตินที่ทำให้เกิดแผ่นเล็บยาวงอกออกไป

Nail bed คือ เนื้อเยื่อที่อยู่ข้างใต้แผ่นเล็บและยึดติดแน่นกับแผ่นเล็บ nail bed ประกอบด้วย เซลล์เรียงตัว 2-5 ชั้น

Hyponychium คือ ผิวหนังบริเวณที่แผ่นเล็บแยกตัวออกจาก nail bed ทำให้สามารถตัดเล็บได้ บริเวณตำแหน่งนี้

อัตราการยาวของเล็บแต่ละเล็บในแต่ละบุคคลจะไม่เท่ากัน จากการศึกษาพบว่าเล็บมือจะยาวเร็วกว่าเล็บเท้าโดยเฉลี่ยเล็บจะยาวประมาณ 3 มิลลิเมตรต่อเดือนสำหรับเล็บนิ้วมือ และประมาณ 1 มิลลิเมตรต่อเดือน สำหรับเล็บนิ้วเท้า หากทำการถอดเล็บออกจะใช้เวลาประมาณ 100-180 วัน (6 เดือน) ในการงอกของเล็บใหม่จนยาวเต็มแผ่นเล็บสำหรับเล็บนิ้วมือ และประมาณ 12-18 เดือน สำหรับเล็บนิ้วเท้า

## 2.6 คุณสมบัติและความเป็นพิษของยูเรเนียม (Uranium) แลนทานัม (Lanthanum)

### และสารหนู (Arsenic)

#### 2.6.1 ยูเรเนียม (Uranium) [8,9]

ยูเรเนียมถูกค้นพบโดย Martin Klaproth นักเคมีชาวเยอรมัน ในปี ค.ศ. 1789 ยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสีที่มีเลขอะตอม (Atomic Number) 92 มีสัญลักษณ์ธาตุคือ U มีค่าน้ำหนักอะตอม (Atomic Weight) โดยเฉลี่ยประมาณ 238.029 ยูเรเนียมเป็นโลหะหนักมีลักษณะสีเงิน-ขาว มีความแข็งแต่อ่อนกว่าเหล็ก สามารถหลอมแล้วนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ และเป็นเส้นได้ มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย ในเปลือกโลกจะพบว่ามีปริมาณของยูเรเนียมอยู่ประมาณ 3 mg/kg

#### ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในสิ่งแวดล้อม [8]

ตัวอย่าง	ช่วงความเข้มข้น	ข้อมูลอ้างอิง
ดิน	0.3-11.7 mg/kg	UNSCEAR, 1993
อากาศ	$2.5 \times 10^{-8}$ - $10^{-7}$ mg/m <sup>3</sup>	NCRP, 1999
บริเวณผิวน้ำ	$3 \times 10^{-2}$ - 2.1 µg/l	WHO, 2001
น้ำใต้ดิน	$3 \times 10^{-3}$ - 2.0 µg/l	WHO, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยูเรเนียมที่ปรากฏในธรรมชาติมีอยู่ 3 ไอโซโทป คือ ยูเรเนียม-234 มี 0.0054%, ยูเรเนียม-235 มี 0.7110% และยูเรเนียม-238 มี 99.2805% ยูเรเนียมมีมากในแร่ pitchblende ( $U_3O_8^{2+}$ ), uraninite ( $UO_2^{2+}$ ), carnotite, autunite, uranophane และ tobernite เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบได้ในหินฟอสเฟต ลิกไนต์และทรายโมนาไซต์ ซึ่งมีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูงถึง 50-3000 ไมโครกรัม/กรัม

#### ความเป็นพิษของยูเรเนียมที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Health effects of exposure to uranium)

ความเป็นพิษทางเคมีของยูเรเนียมก็คล้ายกับโลหะหนักตัวอื่นๆ เช่น แคดเมียมหรือปรอท โดยจะเข้าไปรวมกับโปรตีนและลิแกนด์ของโปรตีนที่มีมวลโมเลกุลต่ำทำให้มีผลต่อการดูดซึมกลูโคสและกรดอะมิโนการได้รับยูเรเนียมเข้าไปจะส่งผลร้ายต่อร่างกายเนื่องจากยูเรเนียมมีความเป็นพิษสูง โลหะยูเรเนียมสามารถติดไฟได้ ถ้าทำงานเกี่ยวกับแหล่งที่มีความเข้มข้นของยูเรเนียมสูง เช่น ในเหมืองแร่ อาจจะได้รับฝุ่นละอองเข้าไปโดยการหายใจเข้าปอด หรือถูกดูดซึมเข้าไปทางร่างกายได้จนก่อให้เกิดอันตรายได้ นอกจากนั้นยูเรเนียมยังสลายตัวให้ก๊าซเรดอน ซึ่งเป็นก๊าซกัมมันตรังสีที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส สามารถกระจายอยู่ในอากาศและน้ำใต้ดิน ถ้ามีปริมาณมากทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอดได้

#### 2.6.2 แลนทานัม (Lanthanum) [10,11]

แลนทานัมถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1839 โดย C.G. Mosander มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปว่า La ซึ่งมีเลขอะตอม 57 น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 138.91 แลนทานัมเป็นโลหะสีขาว สามารถดึงเป็นเส้นและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ แลนทานัมสามารถพบได้ในแร่บางชนิด ได้แก่ cerite, monazite, allanite และ bastnasite เป็นต้น

#### ความเป็นพิษของแลนทานัมที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Health effects of exposure to lanthanum)

แลนทานัมในรูปผงสามารถติดไฟเองได้ในอากาศ และสารประกอบหลายชนิดเป็นพิษ ถ้าสูดอากาศที่มีแลนทานัมปนเปื้อนเข้าไปจะทำให้เกิดการอุดตันในเส้นเลือดปอด ถ้าได้รับเป็นระยะเวลานานๆ อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดมะเร็งปอด และเมื่อแลนทานัมสะสมอยู่ในร่างกายมากๆ จะถูกนำไปยังตับก่อให้เกิดมะเร็งตับได้ นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสัตว์โดยแลนทานัมจะเข้าไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของอวัยวะสืบพันธุ์ รวมทั้งทำลายหน้าที่ของระบบประสาทได้

### 2.6.3 สารหนู (Arsenic) [12,13]

สารหนูถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1250 โดย Albertus Magnus นักเคมีชาวเยอรมัน สารหนูเป็นจัดเป็นโลหะหนัก มีลักษณะเป็นของแข็งของโลหะสีขาวหรือสีเทาเงิน มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปว่า As น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 74.9 สารหนูเป็นสารก่อกัมมันต์ โดยพบสารหนูได้ 2 แบบคือ สารหนูอินทรีย์ (Organic) และสารหนูอนินทรีย์ (Inorganic) โดยสารหนูอินทรีย์เป็นพิษน้อยกว่าสารหนูอนินทรีย์ ซึ่งสารหนูนี้เกิดขึ้นได้ทั้งในธรรมชาติ และด้วยฝีมือของมนุษย์

ในธรรมชาติเกิดจากการชะล้างของหินและแร่ที่มีสารหนูเป็นองค์ประกอบ เช่น อาร์ซีโนไฟไรท์ (FeAsS) ทำให้พบสารหนูทั่วไปในสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในดิน และอาจพบได้ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำ น้ำบ่อ น้ำพุ ส่วนกิจกรรมการดำเนินชีวิตของมนุษย์ที่ทำให้สารหนูในสิ่งแวดล้อมเพิ่มปริมาณขึ้น คือ การทำเหมืองแร่ การถลุงโลหะ การใช้ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงในการเกษตร อาร์เซนิกไดรอกไซด์ถูกนำมาใช้ทางการค้าและการเกษตรทั่วโลกประมาณปีละ 50,000 ตัน โดยใช้เป็นวัตถุพิษของยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช น้ำยาถนอมเนื้อไม้ บางครั้งผสมในอาหารสัตว์ ในยาคนและยาสัตว์

#### ความเป็นพิษของสารหนูที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ (Health effects of exposure to arsenic)

สารหนูเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมสู่กระแสเลือดก่อนไปยังอวัยวะต่างๆ ของร่างกาย และในที่สุดจะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ อุจจาระ บางส่วนจะสะสมอยู่ในตับและเส้นผม สำหรับการขับออกทางลมหายใจจะมีน้อยมาก เมื่อได้รับสารหนูในวันแรก จะถูกขับออกทางปัสสาวะร้อยละ 25 และหลังจากนั้นร่างกายจะขับออกมาทางปัสสาวะ และอุจจาระเรื่อยๆ ภายใน 12 วัน ถ้าหากสารหนูถูกขับออกไม่หมดจะไปสะสมที่เส้นผม และกระดูก ปกติคนเราในแต่ละวันได้รับสารหนูประมาณ 0.04-1.4 มิลลิกรัม ปริมาณสารหนูที่คนกินแล้วเป็นพิษถึงขั้นเสียชีวิตอยู่ในช่วง 1.5 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (arsenic trioxide) ถึง 500 มิลลิกรัม/น้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Diethyl arsenic acid) โดยจะเกิดอาการพิษเฉียบพลันคือ อาเจียน ท้องเสีย ปวดท้อง กล้ามเนื้อเกร็ง อาการแทรกซ้อนเกี่ยวกับการทำงานของหัวใจ และเสียชีวิตจากการทำงานล้มเหลวของหัวใจ ถ้าได้รับสารหนูในระดับเกินค่ามาตรฐาน (0.01 มิลลิกรัม ต่อลิตร) อาจเกิดอาการเป็นพิษสารหนูเรื้อรัง ได้แก่ ผิวหนังเปลี่ยนสีที่เป็นลักษณะเฉพาะ โรคฟันที่คุมคามฝ่ามือฝ่าเท้า มีปัญหาทางระบบเส้นโลหิต ระบบประสาท ระบบเลือด รวมทั้งมะเร็งอวัยวะภายใน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Atilla Ilhan, et. al. [14] ได้ทำการศึกษาหาปริมาณ Mn, Cu และ Zn ในเล็บและซีรัมของผู้ป่วยโรคลมชักโดยเทคนิค AAS จากการวิเคราะห์พบว่าผู้ป่วยโรคลมชักจะมีปริมาณ Mn มากกว่าคนปกติ ( $p < 0.008$ ) ส่วนปริมาณ Zn และ Cu ในผู้ป่วยโรคลมชักพบว่ามีอยู่ในระดับเดียวกับคนปกติ จากผลการวิเคราะห์สารในตัวอย่างเล็บจะทำให้ดีกว่าการวิเคราะห์สารในตัวอย่างซีรัม

Badal Kumar Mandal, et. al. [15] ทำการศึกษาหาสารพิษต่างๆ ของสารหนูในเล็บและผมด้วยเทคนิค HPLC-ICP-MS โดยเก็บตัวอย่างจากผู้ที่อยู่ในพื้นที่ที่มีผลกระทบจากสารหนู พบว่าในเล็บจะมีสาร As(III) (58.6%), As(V) (21.5%), MMA(V) (7.7%), DMA(III) (9.2%) และ DMA(V) (3.0%) ส่วนในผมจะเจอ As(III) (60.9%), As(V) (33.2%), MMA(V) (2.2%) และ DMA(V) (3.6%)

Iliia Rodushkin และ Mikael D. Axelsson [16] ทำการศึกษาโดยวิเคราะห์หาปริมาณสาร 71 ตัวในผมและเล็บด้วยเทคนิค ICP-MS ทำการเตรียมตัวอย่างโดยใช้สารละลายกรดไนตริกและสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาใช้ในการย่อยสลายตัวอย่างด้วยเครื่องไมโครเวฟ ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดสาร 39 ตัว พบว่าต่ำกว่าระดับ ng/g แต่วิธีนี้ยังไม่สามารถจะตรวจวัดแพททินัมได้ ความแม่นยำของวิธีในการวิเคราะห์ธาตุทั้งหมดจะอยู่ในช่วง 9-10% R.S.D สำหรับผมและ 18-19% R.S.D สำหรับเล็บ

Gautam Samanta, et. al. [17] ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในน้ำและตัวอย่างทางชีววิทยา (ผม เล็บ ปัสสาวะ) ของคนที่อาศัยอยู่ใน Bengal แถวฝั่งตะวันตกเปรียบเทียบกับคนที่อาศัยอยู่ในประเทศบังกลาเทศด้วยเทคนิค FI-HG-AAS ผลจากการหาปริมาณสารหนูในผมและเล็บพบว่าคนที่อาศัยอยู่ในบังกลาเทศมีปริมาณสารหนูมากกว่าคนที่อาศัยอยู่ในแถวฝั่งตะวันตกของ Bengal ซึ่งเทคนิคนี้ง่าย รวดเร็ว ขีดจำกัดในการตรวจวัดค่าสามารถวัดได้ในระดับพีพีบี มีสภาพไวสูงมาก ให้ความถูกต้อง และเที่ยงตรง

Nichols. T. A., et. al. [18] ทำการศึกษาหาปริมาณสารหนูในเล็บคนที่ดื่มน้ำที่ปนเปื้อนด้วยสารหนูด้วยเทคนิค INAA โดยใช้ปริมาณตัวอย่างเพียง 20-100 มิลลิกรัม แล้วนำไปอบรังสีด้วยวิธี pneumatic แล้วทำการวัดปริมาณโดยใช้วิธี  $K_0$  เปรียบเทียบกับวิธี comparison method

Baskett. C.K., et. al. [19] ได้ทำการศึกษาซีลีเนียมในเล็บมือและเล็บเท้าด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน จากการตรวจสอบโดยให้แบ่งกลุ่มเป็นชายและหญิงที่ทำการทดสอบให้รับประทานอาหารที่มีซีลีเนียมประมาณ 150 ไมโครกรัมเข้าไปในแต่ละมือเป็นจำนวน 3 มือต่อหนึ่งวันแล้วทำการเก็บตัวอย่างในแต่ละเดือน จากการวิเคราะห์พบว่าความไวในการวิเคราะห์ Se ในเล็บมือจะดีกว่าในเล็บเท้า โดยฟีกของซีลีเนียมที่พบในเล็บมือจะเกิดขึ้นหลังจากที่ร่างกายได้รับซีลีเนียมเข้า

ไปประมาณสัปดาห์ที่ 19-23 ส่วนในเล็บเท้าจะพบที่ประมาณสัปดาห์ที่ 16-32 จากการหาค่าความเข้มข้นซีลีเนียมเฉลี่ยในเล็บมือและเล็บเท้าจะได้เท่ากับ 0.0015 และ 0.00095 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่าไอโซโทปของ Se-76 สามารถนำมาใช้ตรวจวัดได้เพราะจะช่วยทำให้สภาพแวดล้อมซึ่งจากการค้นพบครั้งนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาหาซีลีเนียมในร่างกายคนและสัตว์ได้

Xiao, L., et. al. [20] ได้ศึกษาปริมาณธาตุในเล็บของผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งหลอดอาหารด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน โดยได้เก็บตัวอย่างจากคน 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มคนปกติไม่ได้ป่วยเป็นโรคหลอดอาหาร ผู้ที่เริ่มป่วยเป็นโรคเยื่อหุ้มหลอดอาหารอักเสบ ผู้ป่วยที่เป็นโรคเยื่อหุ้มหลอดอาหารอักเสบขั้นรุนแรง และผู้ป่วยเป็นโรคมะเร็งหลอดอาหาร จากข้อมูลที่ได้จะนำสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของธาตุ ได้แก่ Ca, Cl, K, Mg, Se และ Zn ที่พบในผู้ป่วยโรคมะเร็งหลอดอาหารนั้นจะแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างคนปกติอย่างมีนัยสำคัญ จากการหาค่าความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์พบว่าได้มากกว่าร้อยละ 80

Carolina M. Vecht-Hart, et. al. [21] ได้ทำการศึกษาดังความเข้มข้นของ Ca และ Mg ในเล็บเท้าเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุในเล็บกับ bone mineral density หรือ BMD ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน จากการศึกษาพบว่าค่า Correlation Coefficients อยู่ในช่วง 0.03-0.18 ซึ่งถือว่าค่อนข้างต่ำ จึงสรุปได้ว่าในการวิเคราะห์หาปริมาณ Ca และ Mg ในเล็บด้วยเทคนิค INAA ไม่สามารถจะใช้ในการตรวจสอบ BMD ได้

Cheng, T.P., et. al. [22] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของธาตุที่มีปริมาณน้อยๆ 28 ตัว ในเล็บเท้าของช่างไม้ด้วยเทคนิค INAA และ GFAAS โดยทำการเก็บตัวอย่างเล็บของช่างไม้มาประมาณ 129 คน อายุเฉลี่ย 47 ปี พบว่าข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มีระดับของตะกั่วอยู่ในช่วงกว้าง จากการวิเคราะห์ธาตุที่มีปริมาณน้อยๆ เหล่านี้พบว่า Co, Cr, Fe, Na, Cd, Cu, F และ Ni จะมีความสัมพันธ์กับตะกั่วอย่างมีนัยสำคัญ จากการศึกษาครั้งนี้ได้เสนอว่าเล็บสามารถนำมาใช้เป็นตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบการปนเปื้อนซึ่งมาจากสิ่งแวดล้อมได้และจากความสัมพันธ์ระหว่าง Ca และ Mg ในเล็บสามารถนำมาใช้ตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงภายในร่างกายที่เกิดขึ้นจากโภชนาการได้

K. Chaudhary, et. al. [23] ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุปริมาณน้อยๆ 17 ธาตุในเล็บกับคนช่วงอายุระหว่าง 4-93 ปี ด้วยเทคนิค INAA จากการใช้สถิติวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างธาตุปริมาณน้อยกับอายุและเพศนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากความสัมพันธ์ระหว่างธาตุ Br, Co, Cr, Fe, Na และ Sb กับอายุพบว่ามีความสัมพันธ์ในเชิงลบ ( $p < 0.05$ ) และยังพบว่าผู้หญิงจะมีความเข้มข้นของ Ag, Au, Se และ Zn สูงกว่าผู้ชายและยังพบว่า

ผู้ชายจะมีความเข้มข้นของ Na และ K สูงกว่าผู้หญิง จากการศึกษาครั้งนี้ได้นำไปใช้ประโยชน์ในการพิสูจน์หาความไม่สมดุลของธาตุกับความเสื่อมของโรคประสาท

Miriam Garland et. al. [24] ได้ทำการเปรียบเทียบหา reproducibility ของธาตุ 16 ตัวในเส้นเท้าของผู้หญิงที่อาศัยอยู่ในสหรัฐอเมริกาช่วงอายุ 6-16 ปี โดยทำการเก็บตัวอย่างจากปี 1982-1983 และในปี 1988 โดยใช้เทคนิค NAA พบว่ามี Spearman correlation coefficients ของ ธาตุ 16 ตัวจะอยู่ในช่วง 0.26 – 0.58 และจากการหาปริมาณของธาตุทั้ง 16 ตัวพบว่ามีความเข้มข้นเฉลี่ยของ Ca และ Cl ประมาณ 1 มิลลิกรัม/กรัม ความเข้มข้นเฉลี่ยของ Zn และ Mn เท่ากับ 0.1 และ 0.2 มิลลิกรัม/กรัม ความเข้มข้นเฉลี่ยของ Al, As, Br, Cr, Cu, Fe, Hg, Se, S และ Tl มีน้อยกว่า 100 ไมโครกรัม/กรัม ส่วนความเข้มข้นเฉลี่ยของ Co และ Sc มีน้อยกว่า 0.1 ไมโครกรัม/กรัม

Nagra. M.S., et. al. [25] ได้ทำการศึกษาหาธาตุปริมาณน้อยๆ ในตัวอย่างผมและเส้นด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างมาจากกลุ่มของคนงานชายและหญิงที่สงสัยว่าอาจจะได้รับสารเข้าสู่ร่างกายซึ่งอาศัยอยู่ในเมือง Hamilton และ Toronto ประเทศแคนาดา โดยจะทำการหาความเข้มข้นของธาตุปริมาณน้อยแต่ละธาตุแล้วนำมาเปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างตัวอย่างผมและเส้น พบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

Hunter, D.J. et. al. [26] ทำการศึกษาหาปริมาณ Se ในเส้นเท้าโดยใช้เทคนิค NAA โดยได้แบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่ได้รับ Se และกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่ไม่ได้รับ Se พบว่ากลุ่มที่ได้รับจะมีปริมาณ Se มากกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับ และได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Se กับอายุของคนที่สูงบูห์และคิมแอลกอฮอลด์ จากผลการทดลองพบว่าแนวโน้มปริมาณ Se จะลดลงตามอายุของคนที่สูงบูห์ แต่ไม่มีผลกับคนที่คิมแอลกอฮอลด์

Vance, D.E., et. al. [27] ศึกษาหาระดับความเข้มข้นของ Br, Hg, K และ Zn ในเส้นของผู้ป่วยโรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease, AD) โดยใช้เทคนิค INAA พบว่าระดับความเข้มข้นของ Hg, K และ Zn จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุและตามความรุนแรงของสติปัญญาเสื่อมของผู้ที่เป็นโรคอัลไซเมอร์ ส่วนระดับความเข้มข้นของ Br จะไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุและตามความรุนแรงของสติปัญญาเสื่อม

I. Benischek-Huber และ F. Benischek [28] ศึกษาความสัมพันธ์ของ Cd, Cu, Hg, Pb และ Zn ในตัวอย่างผมและเส้นด้วยเทคนิคอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปคโตรเมทรี พบว่าในตัวอย่างผมและเส้นจะมีความเข้มข้นของ Cd, Pb และ Hg เปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ และในตัวอย่างเส้นเท้าจะพบว่าความเข้มข้นของ Pb จะเปลี่ยนแปลง ส่วน Zn และ Cu จะคงที่

Steven Morris J., et. al. [29] ได้ทำการศึกษาหาปริมาณ Se ในตัวอย่างเล็บเท้าและเส้นผมด้วยเทคนิค NAA จากการศึกษหาปริมาณ Se พบว่าคนที่อาศัยอยู่ในทางตอนใต้ของ Dakota มีปริมาณ Se เท่ากับ 1.17 พีพีเอ็ม ซึ่งถือว่าปริมาณ Se ค่อนข้างสูงกว่าคนที่อาศัยอยู่ใน Boston และ Georgia ซึ่งมีปริมาณ Se เท่ากับ 0.74 และ 0.81 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ปริมาณ Se ที่พบในเล็บเท้าของคนที่ย้ายอยู่ใน New Zealand มีอยู่ 0.26 พีพีเอ็ม ข้อดีของการใช้ตัวอย่างเล็บเท้า คือ ง่ายต่อการเก็บตัวอย่าง การเก็บรักษา และนำมาใช้ประโยชน์เป็นตัวบ่งชี้ชีวภาพได้ โดยได้มีการนำมาศึกษาถึงอันตรายของ Se ที่สะสมอยู่ในร่างกาย ซึ่งอาจก่อให้เกิดโรคมะเร็งและโรคหัวใจได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ ดังต่อไปนี้

1. Nitric acid ( $\text{HNO}_3$ ) ของ MERCK
2. Uranium oxide ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) ของ SPEX INDUSTRIES
3. Lanthanum trioxide ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) ของ KOCH-LIGHT
4. Arsenic trioxide ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ) ของ JOHNSON MATTHEY เกรด SPECURE
5. Acetone ของ MALLINCKRODT เกรด AR
6. DI water

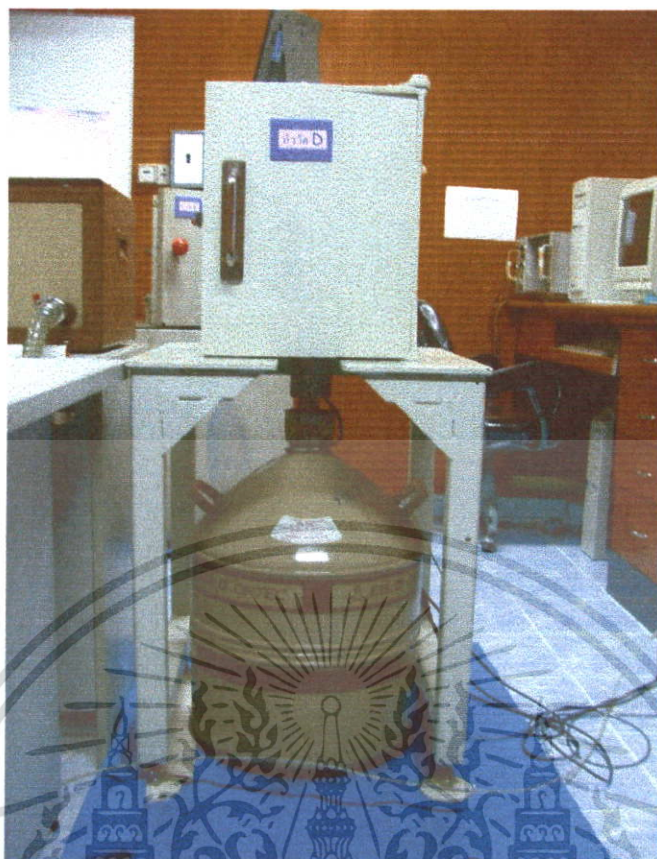
##### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปพว-1/1) ใช้ที่อาคาร CA-2 สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
2. เครื่องวัดรังสีแกมมาสเปกโทรมิเตอร์ บริษัท EG&G Ortec Model Dspec โดยใช้หัววัดเป็น HpGe รุ่น Gem 25685 ดังรูปที่ 3.1 ถึง 3.2



รูปที่ 3.1 เครื่องวัดรังสีแกมมาสเปกโทรมิเตอร์ บริษัท EG & G Ortec Model Dspec

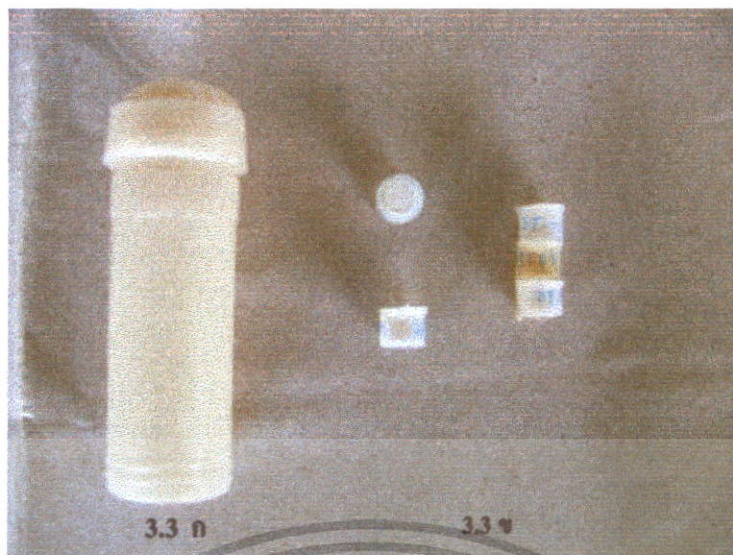
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 หัววัดเป็น HpGe รุ่น Gem 25685

3. เครื่องชั่งแบบทศนิยม 4 ตำแหน่งยี่ห้อ METTLER รุ่น AT210
4. แรบบิท (Rabbit) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 เซนติเมตรสูง 10 เซนติเมตร ทำด้วยพอลิเอทิลีน ดังรูปที่ 3.3 ก และไวอัล (Vial) ขนาด 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำด้วยพอลิเอทิลีนใช้สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อนำไปใช้ในการอบรังสีนิวตรอน ดังรูป 3.3 ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ก. แรบบิท ข. ไวอัล

5. เครื่อง Ultrasonic bath
6. หลอดไพอินฟราเรด ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 หลอดไพอินฟราเรดใช้สำหรับระเหยตัวอย่างให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานต่างๆ

3.2.1.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม (Uranium stock solution) มีความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อกรัม

นำยูเรเนียมออกไซด์ ( $U_3O_8$ ) ไปชั่งให้มีน้ำหนัก 0.0118 กรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปอุ่นเบาๆ บนเตาไฟฟ้าจนยูเรเนียมออกไซด์ละลายหมดแล้วเจือจางด้วย 5 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริกจนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

3.2.1.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานแลนทานัม (Lanthanum stock solution) มีความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อกรัม

นำแลนทานัม ไตรออกไซด์ ( $La_2O_3$ ) ไปชั่งให้มีน้ำหนัก 0.0117 กรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปอุ่นเบาๆ บนเตาไฟฟ้าจนแลนทานัมออกไซด์ละลายหมดแล้วเจือจางด้วย 5 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริกจนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

3.2.1.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสารหนู (Arsenic stock solution) มีความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อกรัม

นำอาร์เซนิก ไตรออกไซด์ ( $As_2O_3$ ) ไปชั่งให้มีน้ำหนัก 0.0132 กรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไปอุ่นเบาๆ บนเตาไฟฟ้าจนอาร์เซนิกออกไซด์ละลายหมดแล้วเจือจางด้วย 5 เปอร์เซ็นต์กรดไนตริกจนมีปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร

### 3.2.2 การเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างเก็บได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มผู้ปฏิบัติงานจากศูนย์วิจัยพัฒนาธาตุหายาก ค. คลองห้า อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี จำนวน 10 คน เป็นผู้ปฏิบัติงานชายจำนวน 8 คน และผู้ปฏิบัติงานหญิง 2 คน โดยทำการเก็บตัวอย่างช่วงเดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547 มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

คนที่	อายุ (ปี)	หน่วยงาน
ชาย (1)	30	บดแร่โมนาไซต์ ย่อยแร่โมนาไซต์ (เพื่อผลิต Hydrous metal oxide cake) และระเหยสารละลาย $\text{Na}_3\text{PO}_4$ และเหวี่ยงแยกผลึก $\text{Na}_3\text{PO}_4$
ชาย (2)	35	
ชาย (3)	38	
ชาย (4)	37	
หญิง (1)	33	
ชาย (5)	28	ละลาย Hydrous metal oxide cake, กรอง undigest ตกตะกอน U, Th กรองตะกอน U, Th ล้างตะกอน U, Th ตกตะกอนและ
ชาย (6)	38	
ชาย (7)	36	
ชาย (8)	41	ตกตะกอน กรองตะกอน ล้างตะกอน $\text{RE}(\text{OH})_3$ ตกตะกอน Cerium และระเหย $\text{RE}(\text{OH})_3$ ตกตะกอน กรองตะกอน U, Th
หญิง (2)	31	

### 3.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.2.3.1 นำตัวอย่างเล็บบมาทำความสะอาดโดยล้างไขมันและฝุ่นออกด้วยสารละลายอะซิโตนเป็นเวลา 15 นาที ตามด้วยน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 10 นาที แล้วตามด้วยสารละลายอะซิโตนอีกครั้งเป็นเวลา 15 นาที ในเครื่อง Ultrasonic bath แล้วนำไปทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง [21]

3.2.3.2 คัดตัวอย่างเล็บบให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำตัวอย่างเล็บบมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนให้ได้ประมาณ 0.01-0.02 กรัม ใส่ลงในขวดไวอัล (Vial) แล้วปิดฝาผนึกให้สนิทด้วยความร้อนเพื่อเตรียมเข้าอบรังสีนิวตรอนต่อไป โดยเตรียมตัวอย่างเล็บบเป็นจำนวน 2 ซ้ำ ต่อการวิเคราะห์ 1 ตัวอย่าง

3.2.3.3 ชั่งตัวอย่างพอลิเมอร์ให้ได้น้ำหนักใกล้เคียงกับตัวอย่างแล้วบีบเปิดสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม สารหนู และแลนทานัมที่มีความเข้มข้น 2, 2 และ 5 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ลงไปยังขวดไวอัล (Vial) แล้วนำไปทำให้แห้งโดยใช้หลอดไฟอินฟราเรด ปิดฝาผนึกให้สนิทด้วยความร้อนเพื่อเตรียมเข้าอบรังสีนิวตรอน

3.2.3.4 นำขวดไวอัลที่บรรจุตัวอย่างและสารมาตรฐานยูเรเนียม สารหนู และแลนทานัมนำไปบรรจุลงในเรบิทเพื่ออบรังสีอิทธิเทอร์มัลนิวตรอนที่ท่อ CA-2 ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอนเท่ากับ  $1 \times 10^{11}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมงแล้วทิ้งให้สลายตัว

### 3.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู

#### 3.2.4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve)

ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม สารหนู และแลนทานัมในช่วงเข้มข้น 1, 1.5, 2, 4 และ 5 ไมโครกรัมต่อกรัม โดยปีเปิดจากสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม สารหนู และแลนทานัมเข้มข้น 200 ไมโครกรัมต่อกรัม มา 50, 75, 100, 200 และ 250 ไมโครลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยสารละลายกรดไนตริก 5 เปอร์เซ็นต์จนถึงขีดบอกปริมาตร จากนั้นปีเปิดแต่ละความเข้มข้นมา 250 ไมโครลิตร ลงไปในไวอัล แล้วนำไปประเหยให้แห้งด้วยความร้อนจากหลอดไฟอินฟราเรด ปิดฝาผนึกให้สนิทด้วยความร้อน นำไปอบรังสีนิวตรอน

#### 3.2.4.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีวิเคราะห์ (Reliability Test)

ผลการทดลองที่ได้นี้จะมีความน่าเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับความแม่นยำ (accuracy) และความเที่ยง (precision) ซึ่งจะต้องดูรายงานในการวิเคราะห์ด้วยเสมอ ในการวิเคราะห์ความเที่ยงของวิธีการวิเคราะห์โดยทำการทดลองวัดซ้ำๆ กันหลายครั้งกับตัวอย่างเดียวกัน ผลที่ได้แต่ละครั้งจะต้องมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าผลการทดลองมีความเที่ยงสูง ค่าความเที่ยงสามารถวัดได้ในเทอมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ตรวจสอบความเที่ยงตรงของวิธีวิเคราะห์โดยทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 2 ไมโครกรัมต่อกรัม เป็นจำนวน 10 ครั้ง

สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์มักนิยมใช้สารมาตรฐานอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์ ถ้าผลของการวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ถูกรับรองของสารมาตรฐาน แสดงว่าการวิเคราะห์มีความแม่นยำสูง ค่าความแม่นยำสามารถแสดงในเทอมของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative error, R.E) หรือร้อยละการคืนกลับมา (%Recovery)

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์โดยการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง SRM 1566b Oyster tissue, SRM 1547 Peach leaves และ SRM 77-A Uranium ore ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST)

#### 3.2.4.3 การหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit)

ในการทดสอบและคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจวัดนั้น ทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด โดยทำการคำนวณตามวิธีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) [30] คุรายละเอียดในภาคผนวก ข.

#### 3.2.4.4 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่างเส้น

ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุตัวอย่างเส้นนั้น ในการวิจัยนี้ใช้วิธีวิเคราะห์แบบเปรียบเทียบโดยจะนำตัวอย่างและสารมาตรฐานอ้างอิงสีพร้อมกัน เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้สลายตัว และนำไปวัดรังสีแกมมาของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น ดังรายละเอียดตามตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างดิบ

ไอโซโทปกัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต	เวลาที่ใช้ในการอบรังสี (ชั่วโมง)	เวลาที่ทิ้งไว้ให้สลายตัว (ชั่วโมง)	พลังงานรังสีแกมมา (keV)
Np-239	2.355 d	10	12	277.6
As-76	26.5 h	10	12	559.1
La-140	1.678 d	10	12	1596.2

day = วัน

hour = ชั่วโมง



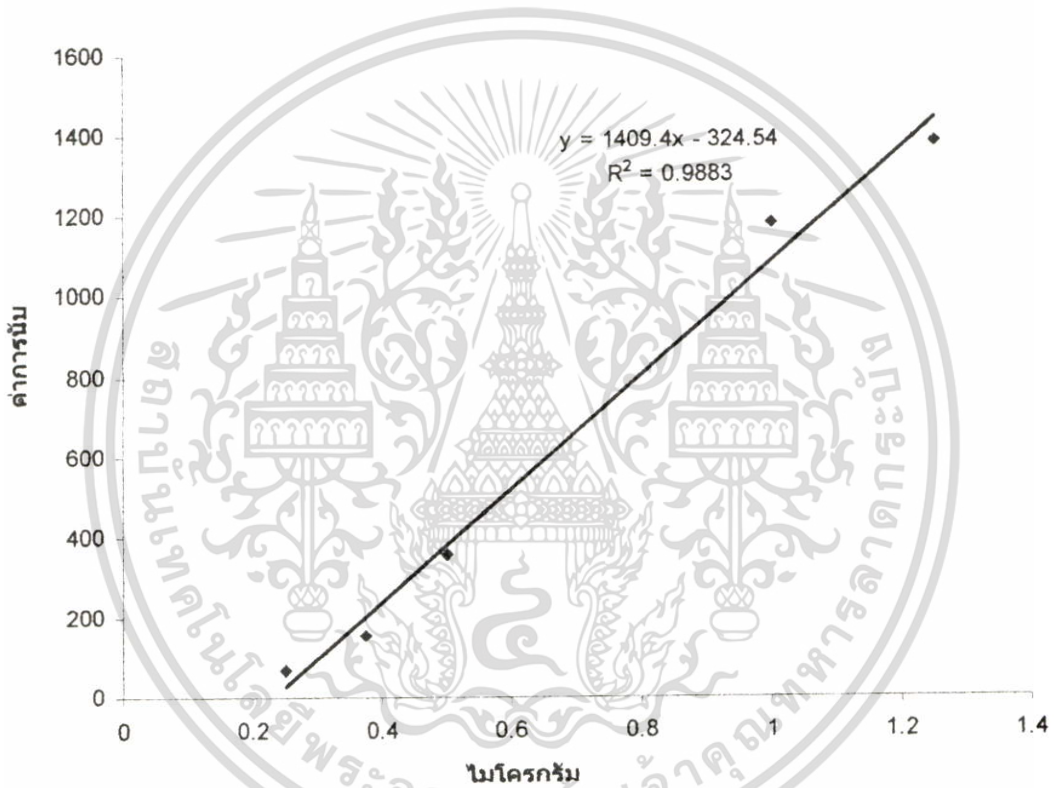
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

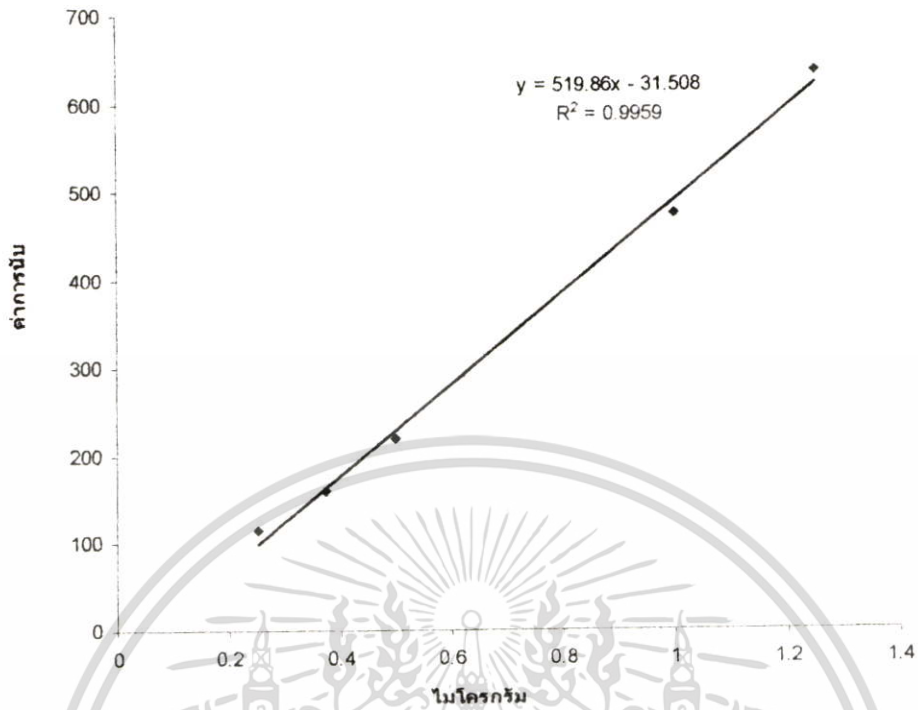
#### 4.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve)

จากการเตรียมสารละลายมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร จะได้ดังรูปที่ 4-1, 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ

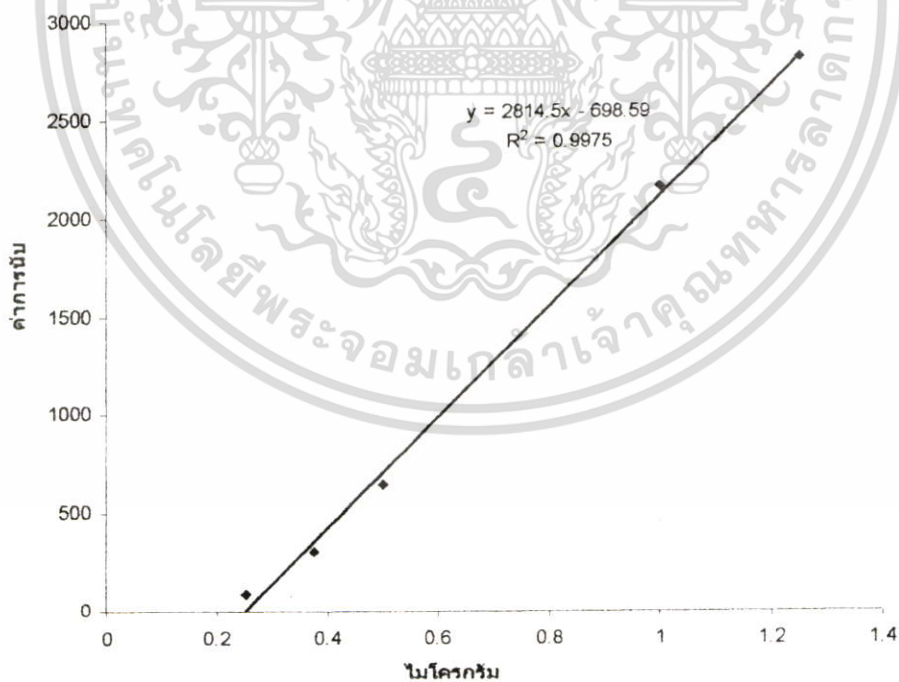


รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานของยูเรเนียมในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานของเส้นทาบในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร



รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานของสารหนูในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาช่วงความเป็นเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน ซึ่งเป็นกราฟที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนับ (แกน y) กับความเข้มข้นของสารมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู (แกน x) ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชัน พบว่าช่วงความเข้มข้นของสารมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ระหว่าง 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร กับสัญญาณที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นตรง (linearity range) ถ้าความเข้มข้นของสารมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูมากกว่า 1.25 ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร พบว่าถ้าความเข้มข้นมากกว่า 1.25 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร ขึ้นไปจะมีความแรงรังสีสูงจนหัววัดไม่สามารถวัดได้อาจเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงได้เลือกทำการศึกษาช่วงความเข้มข้นดังกล่าว จากกราฟจะเห็นจุดแต่ละจุดสำหรับการวัดสัญญาณแต่ละครั้งจะแตกต่างกันค่าที่วัดสัญญาณได้จึงมีการเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง แต่ก็ยังคงรูปที่ออกเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงอยู่ จึงได้ใช้เทคนิคทางสถิติที่จะช่วยในการลากเส้นตรงที่ดีที่สุดสำหรับจุดต่างๆ เรียกว่า regression analysis ซึ่งวิธีการทำ regression analysis ที่ง่ายที่สุดสำหรับเส้นตรง คือ Method of least square (คู่มือการคำนวณในภาคผนวก ฉ.) จะได้ความชัน (slope) ค่าจุดตัด (intercept) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลจากการทำ Regression analysis ในการสร้างกราฟมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู

สารละลายมาตรฐาน	ช่วงความเข้มข้น (ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร)	slope ( $\beta$ )	Intercept ( $\alpha$ )	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)
ยูเรเนียม	0.25-1.25	1409.389 $\pm$ 281.296	-324.537 $\pm$ 218.331	0.9941
แลนทานัม	0.25-1.25	519.864 $\pm$ 100.09	-31.508 $\pm$ 77.391	0.9979
สารหนู	0.25-1.25	2814.508 $\pm$ 259.910	-698.592 $\pm$ 201.831	0.9987

จากกราฟมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ในช่วงความเข้มข้น 0.25-1.25 ไมโครกรัม/250ไมโครลิตร กับค่าการนับ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของเส้นตรงเท่ากับ 0.9941, 0.9979 และ 0.9987 ตามลำดับ ซึ่งในการวิเคราะห์หาปริมาณกราฟมาตรฐานควรมีค่า  $r > 0.9$  จึงจะทำให้ผลการวิเคราะห์น่าเชื่อถือ

## 4.2 การตรวจสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ (Reliability Test)

### 4.2.1 การศึกษาความเที่ยง (Precision)

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ตรวจสอบความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์โดยทำการวิเคราะห์สารมาตรฐานยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูที่ความเข้มข้น 5, 10 และ 2 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับเป็นจำนวน 10 ครั้ง ดังแสดงตาราง 4.2.1 (ดูวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 4.2.1 ผลจากการศึกษาความเที่ยงของยูเรเนียม แลนทานัมและสารหนู (n=10)

ธาตุ	ยูเรเนียม	แลนทานัม	สารหนู
%RSD	± 5.50	± 5.35	± 6.64

ความเที่ยงต้องมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่ควรเกิน 10% จึงจะยอมรับได้ในทางการวิเคราะห์หาปริมาณ

### 4.2.2 การศึกษาความแม่นยำ (Accuracy)

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของวิธีการวิเคราะห์โดยใช้ สารมาตรฐานอ้างอิง 3 ชนิด ได้แก่ SRM 1566b Oyster tissue, SRM 1547 Peach leaves และ SRM 77-A Uranium ore ของสถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นจำนวน 5 ครั้ง ผลที่ได้ดังแสดงตาราง 4.2.2

ตารางที่ 4.2.2 ผลจากการศึกษาความแม่นยำของยูเรเนียม แลนทานัมและสารหนู (n = 5)

ครั้งที่	ยูเรเนียม (ไมโครกรัม / กรัม)	แลนทานัม (ไมโครกรัม / กรัม)	สารหนู (ไมโครกรัม / กรัม)
1	10.375	9.425	7.315
2	10.950	9.215	8.340
3	11.105	9.920	7.021
4	10.570	9.455	8.175
5	10.130	9.170	6.405
เฉลี่ย	10.626	9.437	7.451
SD	± 0.402	± 0.297	± 0.808
ค่าอ้างอิงรับรอง	10	9	7.65
ค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ (%Relative error)	+6.20%	+4.85%	-2.601%
%การได้กลับคืนมา (% Recovery)	106.26%	104.85%	97.398%

ในการศึกษาความแม่นยำพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองเบี่ยงเบนไปจากค่าอ้างอิงอาจเนื่องมาจากความผิดพลาดในการวิเคราะห์ ซึ่งอาจเกิดจากสารตัวอย่างและสารมาตรฐานได้รับนิวตรอนไม่เท่ากัน ความไม่แน่นอนของเครื่องนับ ความผิดพลาดในการนับเนื่องจากการกระเจิง การดูดกลืนสารตัวอย่างและสารมาตรฐานอยู่ห่างจากเครื่องนับไม่เท่ากัน เป็นต้น การวิเคราะห์ที่มีค่าผิดพลาดน้อยหรือใกล้ค่าจริงมากแสดงว่ามีความแม่นยำ ในการวิเคราะห์หาปริมาณเกณฑ์ในการพิจารณาว่าวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้อยู่ให้ผลของความแม่นยำเป็นที่ยอมรับได้ คือ ความผิดพลาดไม่ควรเกิน 20% และค่าความแม่นยำในการวิเคราะห์สารปริมาณน้อย (trace analysis) ต้องเป็น  $\pm 5 - 10\%$

จากตารางที่ 4.2.2 จากการวิเคราะห์สารมาตรฐานอ้างอิง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละตัว เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าอ้างอิงแล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

### 4.3 การศึกษาหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection limit)

การทดสอบและคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจวัด ทำการทดสอบจากสภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละตัว โดยคำนวณตามวิธีของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน

ธาตุ	ขีดจำกัดการตรวจวัด (ไมโครกรัม/กรัม)
ยูเรเนียม	0.068
สารหนู	0.019
แลนทานัม	0.034

จากตารางที่ 4.3 พบว่าขีดจำกัดในการตรวจวัดของสารหนูมีขีดจำกัดในการตรวจวัดต่ำสุดสามารถวัดได้ 0.019 ไมโครกรัม/กรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดกับเทคนิคอื่นๆ ที่ได้รายงานมาแล้วพบว่า

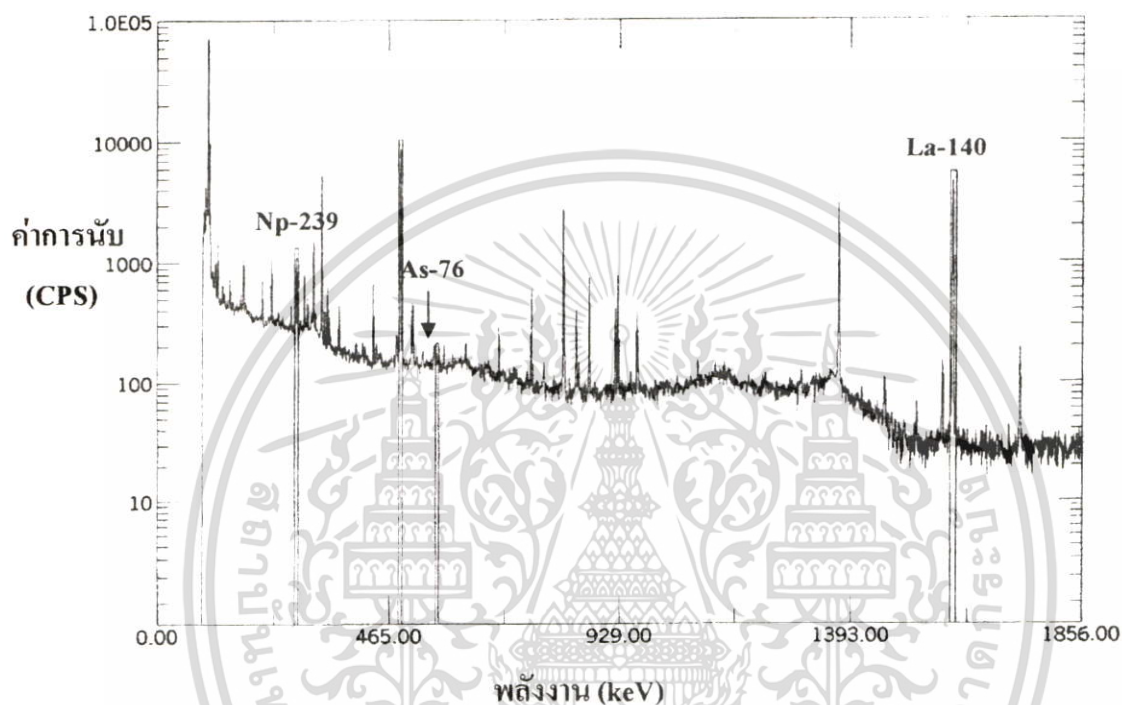
Iliia Rodushkin และ Mikael D. Axelsson [16] สามารถตรวจวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในเล็บด้วยเทคนิค ICP-MS พบว่ามีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.0001, 0.0002 และ 0.006 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ

Gautam Samanta, et. al. [17] ตรวจวัดสารหนูในเล็บด้วยเทคนิค FI-HG-AAS มีค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.3 นาโนกรัม/มิลลิลิตร

ในการวิเคราะห์ทาง NAA นี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปแล้วว่าเป็นวิธีที่ให้ความไวในการวิเคราะห์สูง แต่ในการวิเคราะห์ครั้งนี้อาจผิดพลาดได้จากสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์เกิดการปนเปื้อนทำให้สารตัวอย่างสูญเสียไป หรือจากการที่ฟลักซ์ไม่ homogeneous ทำให้เกิดการแทรกสอดทางปฏิกิริยานิวเคลียร์ทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาปริมาณได้

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพตัวอย่างเล็บ

ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของตัวอย่างเล็บ โดยนำไปอบรังสีอิพิเทอร์มอลนิวตรอนที่ห้องอบ CA-2 เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วนำมาวัดด้วยหัววัดรังสี HpGe เป็นเวลา 30 นาที จะได้สเปกตรัมรังสีแกมมา ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างเล็บ

ผลการวิเคราะห์พบธาตุต่างๆ ตามรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ไอโซโทปรังสีและอันตรกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในเล็บ

ธาตุ	อันตรกิริยา	ครึ่งชีวิต	พลังงานรังสีแกมมา (keV)
ยูเรเนียม	$U^{238}(n,\gamma)Np^{239}$	2.355 วัน	277.6
แลนทานัม	$La^{139}(n,\gamma)La^{140}$	1.678 วัน	1596.2
สารหนู	$As^{75}(n,\gamma)As^{76}$	26.32 ชั่วโมง	559.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางการวิเคราะห์หาปริมาณด้วยเทคนิค NAA สามารถใช้ทำคุณภาพวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ เพราะแต่ละธาตุมีสมบัติเฉพาะตัว ทั้งค่าครึ่งชีวิตและพลังงานแกมมา โดยใช้ gamma spectrometry ซึ่งเทคนิคอื่นๆ ทำได้ยากกว่า และสามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีหลายๆ ธาตุปนกันได้ดี ทำให้ผลการวิเคราะห์แม่นยำขึ้นกว่าเดิม

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในตัวอย่างเล็บ

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ คำนวณหาปริมาณของธาตุยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู โดยใช้พื้นที่ใต้พีคของพลังงานต่างๆ ตามตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเล็บได้แสดงในตารางที่ 4.5.1, 4.5.2 และ 4.5.3 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.5.1** ความเข้มข้นของยูเรเนียม จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเล็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก โดยทำการเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546 – กุมภาพันธ์ 2547

คนที่	จำนวนครั้ง (n)	ช่วงความเข้มข้นของยูเรเนียม (ไมโครกรัม/กรัม)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของ ยูเรเนียม (ไมโครกรัม/กรัม)
ชาย 1	9	0.063 <sup>a</sup> -1.180	0.309
ชาย 2	8	0.016 <sup>a</sup> -0.075	0.023
ชาย 3	8	0.021 <sup>a</sup> -0.359	0.128
ชาย 4	5	0.042 <sup>a</sup> -0.068	0.078
ชาย 5	7	0.010 <sup>a</sup> -0.029 <sup>a</sup>	0.017
ชาย 6	8	0.090-1.111	0.505
ชาย 7	7	0.007 <sup>a</sup> -0.487	0.135
ชาย 8	8	0.014 <sup>a</sup> -0.436	0.099
หญิง 1	7	0.054 <sup>a</sup> -0.319	0.134
หญิง 2	7	0.016 <sup>a</sup> -0.547	0.139
Control 1	3	0.002 <sup>a</sup> -0.015 <sup>a</sup>	0.010 <sup>a</sup>
Control 2	3	0.027 <sup>a</sup> -0.062 <sup>a</sup>	0.047 <sup>a</sup>

a = ค่าที่ได้ต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5.2** ความเข้มข้นของแลนทานัม จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเสียบผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัย และพัฒนาธาตุหายาก โดยทำการเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546 – กุมภาพันธ์ 2547

คนที่	จำนวนครั้ง (n)	ช่วงความเข้มข้นของ แลนทานัม (ไมโครกรัม/กรัม)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของ แลนทานัม (ไมโครกรัม/กรัม)
ชาย 1	9	0.022 <sup>a</sup> -21.420	4.212
ชาย 2	8	0.018 <sup>a</sup> -0.337	0.098
ชาย 3	8	0.041-4.780	1.212
ชาย 4	5	0.140-0.439	0.324
ชาย 5	7	0.029 <sup>a</sup> -0.783	0.163
ชาย 6	8	1.567-22.201	7.636
ชาย 7	7	0.089-2.302	0.663
ชาย 8	8	0.603-17.177	5.695
หญิง 1	7	0.028 <sup>a</sup> -1.245	0.250
หญิง 2	7	0.100-5.594	1.228
Control 1	3	0.004 <sup>a</sup> -0.012 <sup>a</sup>	0.007 <sup>a</sup>
Control 2	3	0.030 <sup>a</sup> -0.021 <sup>a</sup>	0.029 <sup>a</sup>

a = ค่าที่ได้ต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

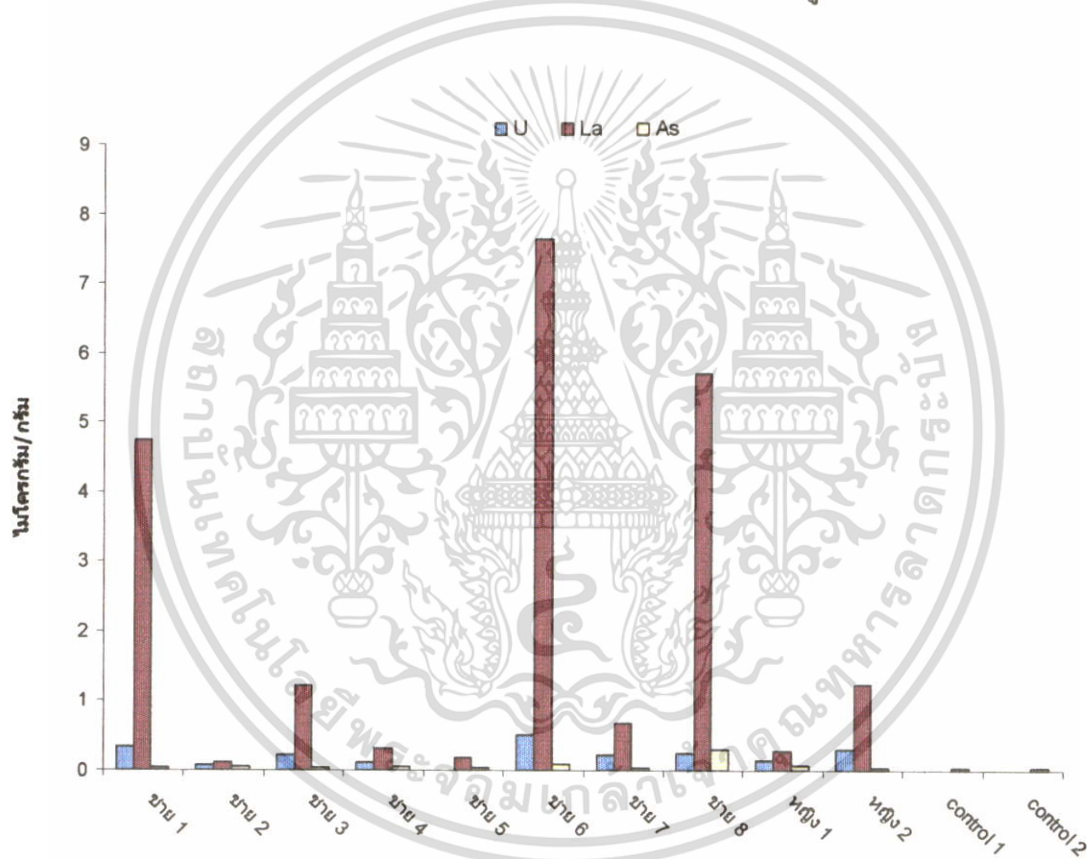
ตารางที่ 4.5.3 ความเข้มข้นของสารหนู จากการวิเคราะห์ตัวอย่างเก็บผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก โดยทำการเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546 – กุมภาพันธ์ 2547

คนที่	จำนวนครั้ง (n)	ช่วงความเข้มข้นของ สารหนู (ไมโครกรัม/กรัม)	ความเข้มข้นเฉลี่ยของ สารหนู (ไมโครกรัม/กรัม)
ชาย 1	9	0.014 <sup>a</sup> -0.032	0.309
ชาย 2	8	0.016 <sup>a</sup> -0.062	0.042
ชาย 3	8	0.019-0.077	0.032
ชาย 4	5	0.046-0.121	0.065
ชาย 5	7	0.023-0.039	0.033
ชาย 6	8	0.066-0.148	0.102
ชาย 7	7	0.019-0.065	0.042
ชาย 8	8	0.024-0.894	0.300
หญิง 1	7	0.013 <sup>a</sup> -0.102	0.054
หญิง 2	7	0.013 <sup>a</sup> -0.029	0.027
Control 1	3	0.025-0.036	0.029
Control 2	3	0.018 <sup>a</sup> -0.038 <sup>a</sup>	0.030 <sup>a</sup>

a = ค่าที่ได้ต่ำกว่าขีดจำกัดในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

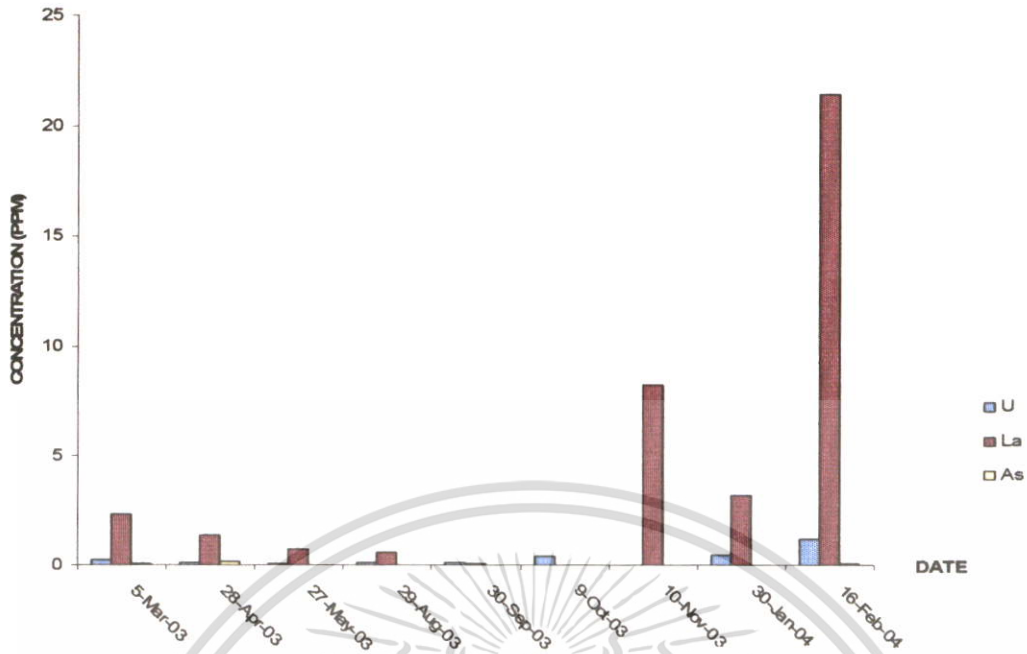
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเก็บที่เก็บมาจากผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก จากเดือน มีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547 พบว่ามีปริมาณของแลนทานัมในเส้นผู้ปฏิบัติงานอยู่ในช่วง 0.109-7.636 ไมโครกรัม/กรัม และมีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในช่วง 0.075-0.505 ไมโครกรัม/กรัม ซึ่งสูงกว่าผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับธาตุเหล่านี้ซึ่งมีความเข้มข้นของยูเรเนียมอยู่ในช่วง 0.002-0.062 ไมโครกรัม/กรัม และความเข้มข้นของแลนทานัมอยู่ในช่วง 0.012-0.030 ไมโครกรัม/กรัม ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ยูเรเนียมและแลนทานัมของผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับธาตุเหล่านี้มีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัดปริมาณ แต่ในกรณีของสารหนูพบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณสารหนูในเส้นของผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากจะอยู่ในช่วง 0.029-0.076 ไมโครกรัม/กรัม กับผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับสารหนูอยู่ในช่วง 0.026-0.036 ไมโครกรัม/กรัม จะพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน จะเห็นได้จากรูปที่ 4.5.1



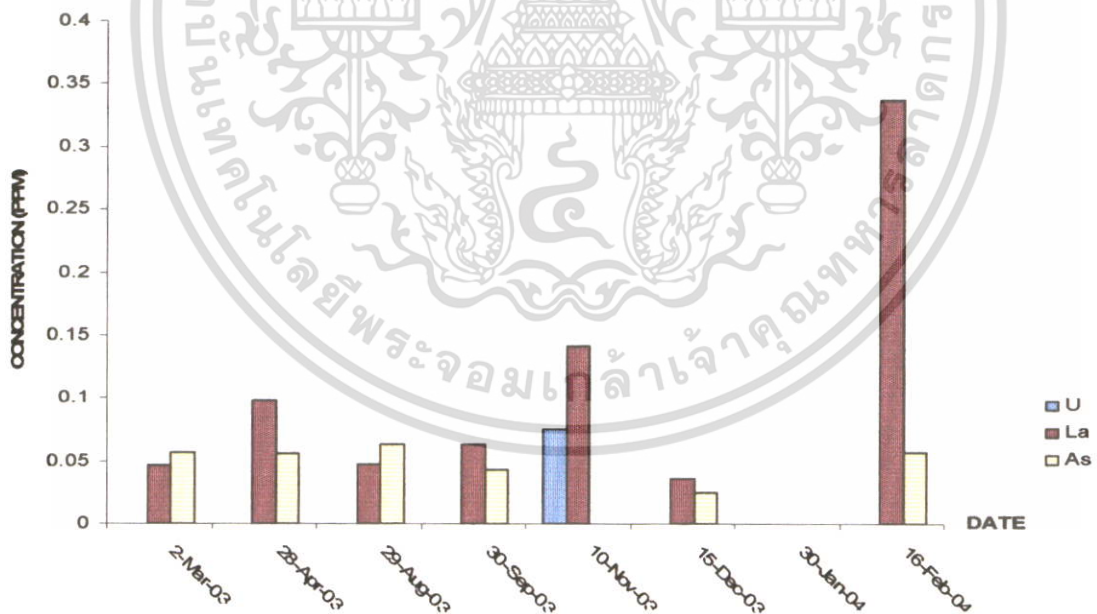
รูปที่ 4.5.1 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นเฉลี่ยของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บ โดยเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547

จากรูปที่ 4.5.2-4.5.9 และรูปที่ 4.5.10-4.5.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของ ยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 1-8 และผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 1-2 โดยเก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546-กุมภาพันธ์ 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

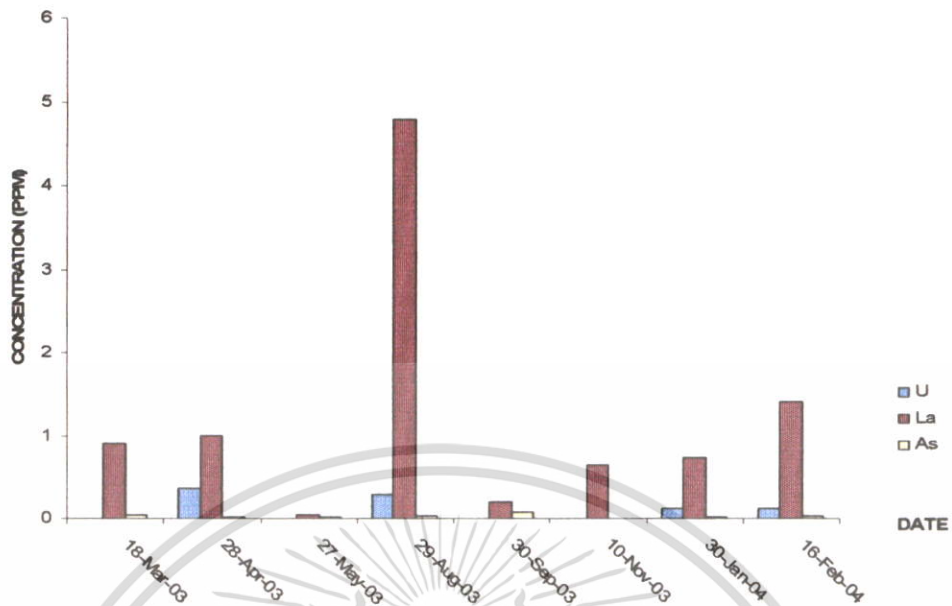


รูปที่ 4.5.2 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 1

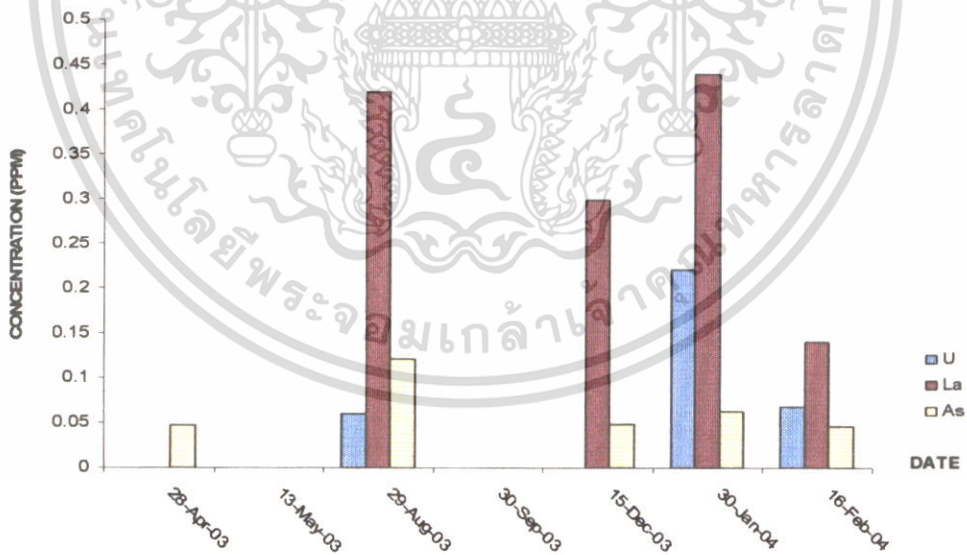


รูปที่ 4.5.3 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

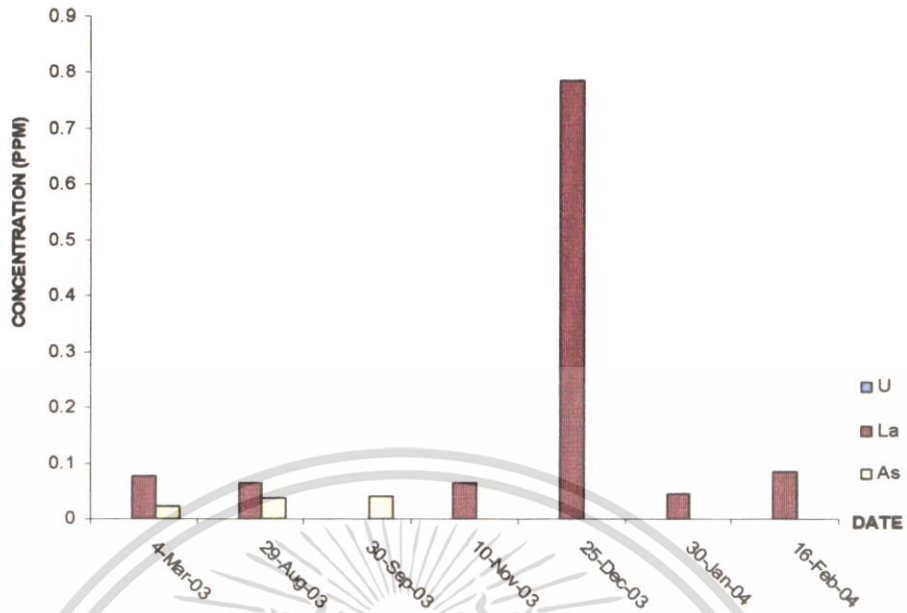


รูปที่ 4.5.4 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 3

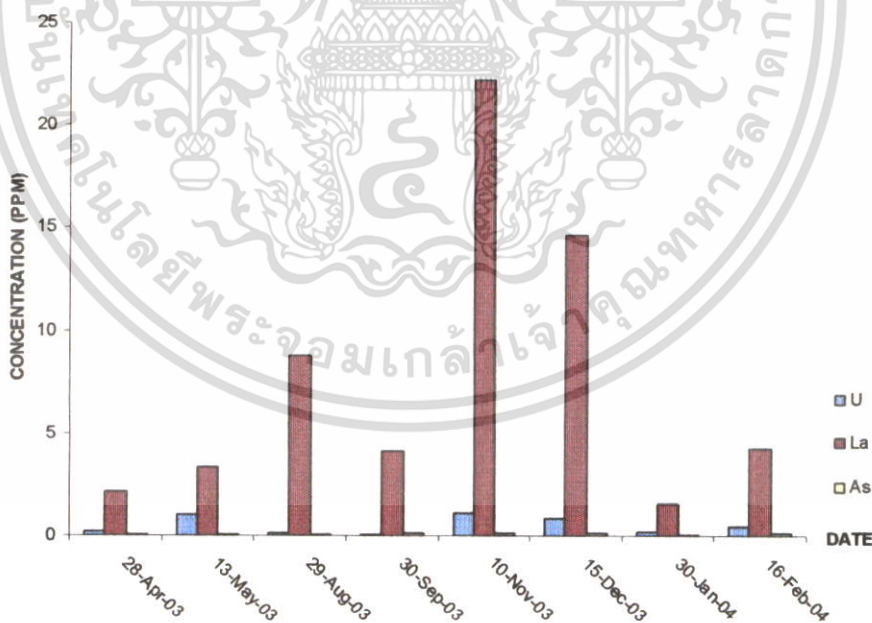


รูปที่ 4.5.5 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

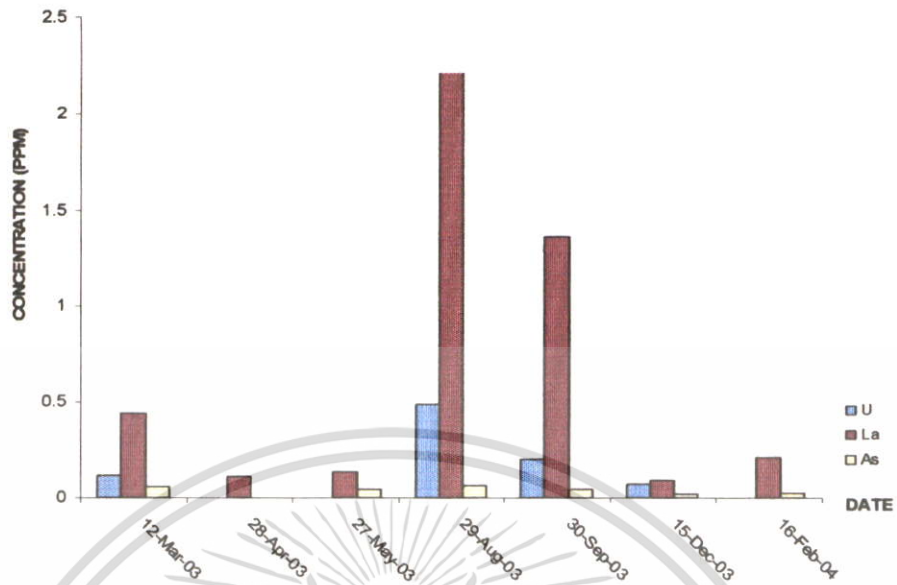


รูปที่ 4.5.6 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานรายคนที่ 5

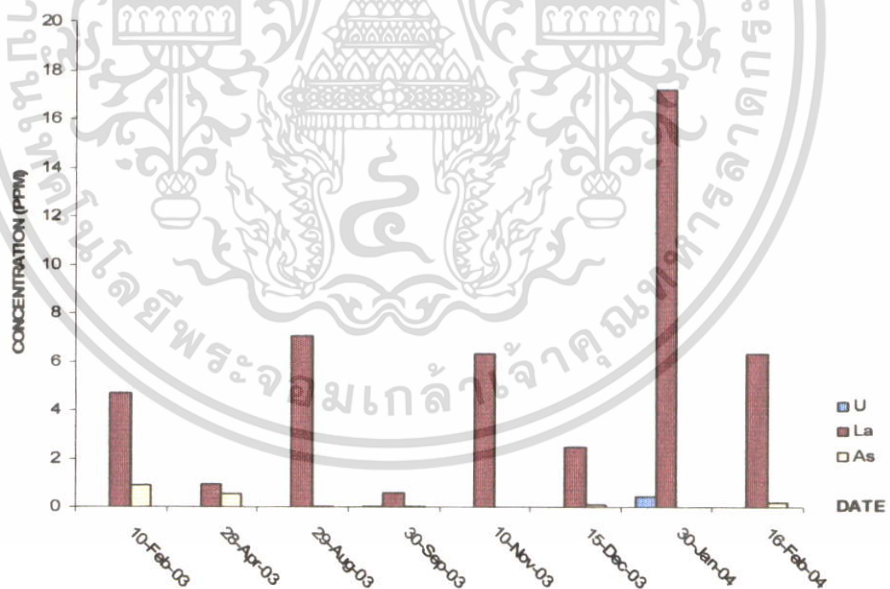


รูปที่ 4.5.7 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานรายคนที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

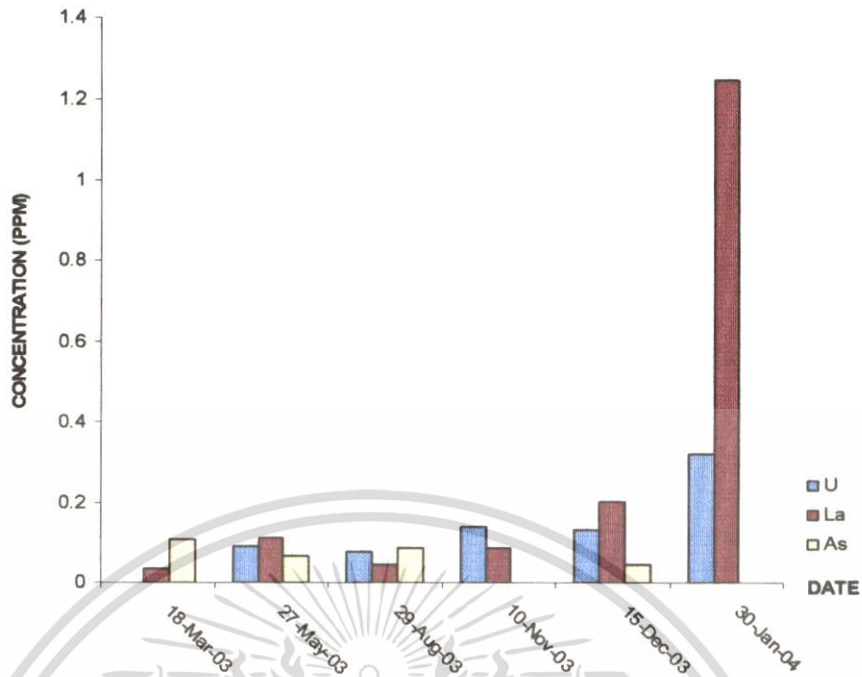


รูปที่ 4.5.8 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 7

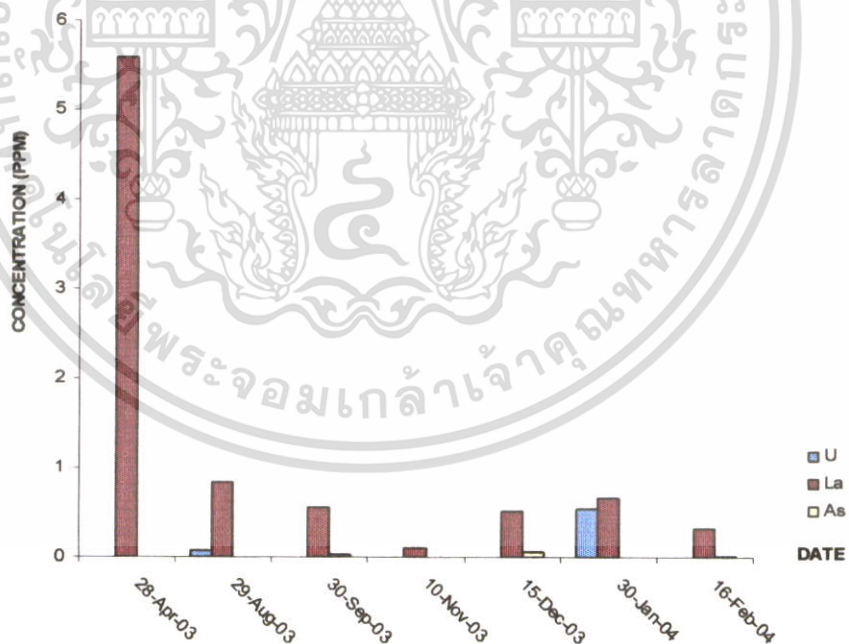


รูปที่ 4.5.9 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5.10 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 1



รูปที่ 4.5.11 เปรียบเทียบปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างเส้นที่สุ่มเก็บมาแต่ละบุคคลพบว่าชายคนที่ 1 ชายคนที่ 6 และชายคนที่ 8 จะมีปริมาณ แลนทานัมสูงกว่าบุคคลอื่นๆ เนื่องจากบุคคลทั้งสามนี้ทำหน้าที่ในหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับ การบดแร่ และย่อยโมนาไซต์ การตกตะกอน  $RE(OH)_3$  กรองตะกอน และการระเหย  $RE(OH)_3$  (ดูขั้นตอนการผลิตอย่างละเอียดในภาคผนวก ก.) ทำให้สารเหล่านี้สามารถเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนัง ทางหายใจ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดจากการหายใจเอาฝุ่นเข้าไป เมื่อสารเข้าสู่ร่างกายจะถูกดูดซึมสู่กระแสเลือด ก่อนไปยังอวัยวะต่างๆ ของร่างกาย และในที่สุดจะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ อุจจาระ บางส่วนจะสะสมอยู่ในเส้นและเส้นผม สำหรับการขับออกทางลมหายใจจะมีน้อยมาก เมื่อได้รับสารในวันแรก จะถูกขับออกทางปัสสาวะและหลังจาก 12 วัน ถ้าหากสารถูกขับออกไม่หมดจะไปสะสมที่เส้นผม เส้นกระดูก จากการศึกษาพบว่าเส้นนี้สามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ชีวภาพของสารพิษที่สะสมในร่างกายได้เนื่องจากสารพิษจะมาสะสมที่เส้น นอกจากนี้เส้นยังใช้เป็นตัวบ่งบอกสุขภาพของร่างกาย ข้อดีของการวิเคราะห์เส้น คือ การเก็บรักษา และการเตรียมตัวอย่างสามารถทำได้ง่าย เมื่อเปรียบเทียบกับซีรัมและเลือดซึ่งต้องทำการวิเคราะห์โดยทันที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในเส้นของผู้ปฏิบัติงานที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก จำนวน 10 คน เป็นผู้ปฏิบัติงานชายจำนวน 8 คน ผู้ปฏิบัติงานหญิง 2 คน ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน โดยอาบรังสีฟิเตอร์มันนิวตรอนที่ท่อ CA-2 ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว-1/1) ซึ่งมีความเข้มของนิวตรอนเท่ากับ  $1 \times 10^{11}$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้สลายตัว แล้วทำการตรวจวัดรังสีแกมมาที่พลังงาน 277.6, 1596.2 และ 559.1 keV ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์  $U^{238}(n,\gamma)Np^{239}$ ,  $La^{139}(n,\gamma)La^{140}$  และ  $As^{75}(n,\gamma)As^{76}$  ตามลำดับ ด้วยหัววัดแบบกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HpGe) ทำการคำนวณหาปริมาณสารโดยใช้วิธี comparison method พบว่ามีปริมาณของแลนทานัมในเส้นผู้ปฏิบัติงาน (0.109-7.636 ไมโครกรัม/กรัม) และปริมาณยูเรเนียม (0.075-0.505 ไมโครกรัม/กรัม) ซึ่งสูงกว่าผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับธาตุเหล่านี้ (ช่วงความเข้มข้นของแลนทานัม 0.012- 0.030 ไมโครกรัม/กรัม และช่วงความเข้มข้นของยูเรเนียม 0.002-0.062 ไมโครกรัม/กรัม) แต่ในกรณีของสารหนูพบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณในเส้นของผู้ปฏิบัติงาน (0.029-0.076 ไมโครกรัม/กรัม) กับผู้ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับ (0.026-0.036 ไมโครกรัม/กรัม) แล้วพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชันพบว่าเทคนิคนี้มีขีดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 0.068, 0.034 และ 0.019 ไมโครกรัม/กรัม สำหรับยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ตามลำดับ ความเที่ยงของการวัดยูเรเนียมที่ได้เท่ากับ 5.53 %RSD แลนทานัม เท่ากับ 5.35%RSD และสารหนูเท่ากับ 6.64%RSD จากการหาความแม่นยำของวิธีการซึ่งทำการตรวจสอบจาก certified reference materials (CRM) จะได้ว่าร้อยละการกลับคืนมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูเท่ากับ 106.26, 104.85 และ 97.39 ตามลำดับ

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเส้นสามารถนำมาเป็นตัวบ่งชี้ชีวภาพในการตรวจหายูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูที่สะสมอยู่ในร่างกายได้ ซึ่งข้อดีของการตรวจและวิเคราะห์เส้น คือ การเก็บรักษา และการเตรียมตัวอย่างสามารถทำได้ง่าย และรวดเร็ว จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชันนี้มีความแม่นยำและความเที่ยงสูง สามารถวิเคราะห์หาปริมาณของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูในตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ ในระดับไมโครกรัมได้ และเป็นวิธีที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการศึกษาที่ได้จะเห็นว่าผู้ปฏิบัติสามารถรับสารเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายได้อันเนื่องมาจากการทำงาน ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ควรปรับมาตรการแก้ไขปัญหาให้สอดคล้องกับสาเหตุ ความเสี่ยง และอันตรายจากการได้รับสาร การให้ความรู้แก่ผู้ปฏิบัติงาน และการป้องกันการรับสัมผัส

5.2.2 ควรมีแผนการเฝ้าระวังและผลกระทบต่อสุขภาพที่อาจเกิดขึ้น เพื่อให้มีการเก็บรวบรวมข้อมูลอย่างเป็นระบบ ให้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ และถูกต้องมากขึ้น ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์สถานการณ์ ขนาด และความรุนแรง ตลอดจนแนวโน้มของปัญหาได้อย่างถูกต้อง

5.2.3 ควรเก็บตัวอย่างเก็บมาทำการวิเคราะห์เพิ่ม เพื่อให้ได้ข้อมูลมากพอที่จะทำการศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของธาตุระหว่างอายุและเพศ เพื่อทำให้ผลการประเมินค่าระดับมูลฐานของธาตุถูกต้องยิ่งขึ้น

5.2.4 ในการวิเคราะห์ให้ได้ผลถูกต้อง ผู้ทำการวิเคราะห์จะต้องระมัดระวังในเรื่องของการอารังสี การปล่อยให้สารสลายตัว การวัดปริมาณรังสี (อาจจะวัดปริมาณรังสีที่พลังงานผิดตำแหน่ง เนื่องจาก calibrate ไม่ตรง) ตลอดจนการหาปริมาณจากพื้นที่ได้ก็จึงจะได้ผลดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] Maurice pinta. 1978. **Modern methods for trace element analysis**. Michigan: AnnArbor.
- [2] ณรงค์ ไชยสุต. 2541. **วิธีการวิเคราะห์โดยอนุกรม**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [3] Michael D. Glascock. (2003). **An Overview of Neutron Activation Analysis**. [online].  
Available : <http://www.missouri.edu/~glascock/naa.htm>
- [4] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2534. **หลักและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ**. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.
- [5] Korotev. (1996). **Advantages and Disadvantages of Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA)**. [online].  
Available : <http://www.epsc.wustl.edu/admin/resources/inaadvantages.html>
- [6] เล็บ (Nails). [online].  
Available : <http://www.cai.md.chula.ac.th/lesson4410/data/cutan.htm>
- [7] โครงสร้างของเล็บ - **Nail Anatomy**. [online].  
Available : <http://thailabonline.com/nail.htm>
- [8] Steve C. Sheppard, et. al. 2004. "Derivation of Ecotoxicity thresholds for uranium." **Journal of Environmental Radioactivity**. 1-25.
- [9] **Uranium (U)**. [online].  
Available : <http://www.lenntech.com/Periodic-chart-elements/U-en.htm>
- [10] Michael J. Barry and Barry J. Meehan. 2000. "The Acute and Chronic Toxicity of Lanthanum to *Daphnia carinata*." **Chemosphere**. 41: 1669-1674.
- [11] **Lanthanum (La)**. [online].  
Available : <http://www.lentech.com/periodic-chart-elements/La-en.html>
- [12] Michael F. Hughes. 2002. "Arsenic Toxicity and Potential Mechanisms of Action." **Toxicology Letters**. 133: 1-16.
- [13] **Arsenic (As)**. [online].  
Available : <http://www.lentech.com/periodic-chart-elements/As-en.html>
- [14] Atilla Ilhan, et. al. 2004. "The Comparison of Nail and Serum Trace Elements in Patients with Epilepsy and Healthy Subjects." **Progress in Neuro-Psychopharmacology & Biological Psychiatry**." 28: 99-104.

- [15] Badal Kumar Mandal, et. al. 2003. "Speciation of Arsenic in Human Nail and Hair from Arsenic-affected Area by HPLC-Inductively Coupled Argon Plasma Mass Spectrometry." **Toxicology and Applied Pharmacology**. 189: 73-83.
- [16] Ilia Rodushkin and Mikael D. Axelsson. 2000. "Application of Double Focusing Sector Field ICP-MS for Multielemental Characterization of Human Hair and Nails. Part I. Analytical methodology." **The Science of the Total Environment**. 250: 83-100.
- [17] Gautam Samanta, et. al. 1999. "Flow Injection Hydride Generation Atomic Absorption Spectrometry for Determination of Arsenic in Water and Biological Samples from Arsenic-affected Districts of West Bengal, India, and Bangladesh." **Microchemical Journal**. 62: 174-191.
- [18] Nichols, T. A. et. al. 1998. "The Study of Human Nails as an Intake Monitor for Arsenic using Neutron Activation Analysis." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 236: 51-56.
- [19] Baskett, C. K. et. al. 1995. "Investigation of The Appearance of Supplemental Enriched Se-76 Using The Human Nail as a Dietary Monitor." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 195: 97-108.
- [20] Xiao, L. et. al. 1995. "INAA of Elemental Contents in Fingernails of Esophageal Cancer Patients." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 195: 43-49.
- [21] Carolina M. Vecht-Hart, et. al. "Calcium and Magnesium in Human Toenails do not Reflect Bone Mineral Density." **Clinica Chimica Acta**. 236: 1-6.
- [22] Cheng, T.P. et. al. "Study of The Correlation of Trace Elements in Carpenters' Tonails." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 195: 31-42.
- [23] K. Chaudhary, et. al. 1995. "Trace Element Correlations with Age and Sex in Human Fingernails." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 195: 51-56.
- [24] Miriam Garland, et. al. 1993. "Toenail Trace Element Levels as Biomarkers: Reproducibility over a 6-Year Period." **Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention**. 2: 493-497.
- [25] Nagra, M. S. et. al. 1992. "A Study of Trace Elements In Scalp Hair and Fingernails of Industrial Workers of Ontario, Canada." **J. Radio. Nuclear. Chem.** 162 : 283-288.
- [26] Hunter, D.J. et. al. 1990. "Predictors of Selenium Concentration in Human Toenails." **American Journal of Epidemiology**. 132(1): 114-122.
- [27] Vance, D. E., et. al. 1989. "A Search for Lomgitudinal Variations in Trace Element Levels in Nails of Alzheimer's Disease Patients." **Biological Trace element Research**. 26(7): 461-470.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [28] I. Benischek-Huber and F. Benischek. 1985. "Correlation of Trace Metals in Hair and Nails."  
**IAEA-TECDOC-330**: 21-30.
- [29] Steven Morris, J. et. al. 1983. "Dietary Selenium in Human Toenails as an Indicator."  
**Biological trace element research**. 5: 529-537.
- [30] Nomenclature in Evaluation of Analytical Methods, Including Detection and Quantification  
 Capabilities (IUPAC Recommendation 1995). **Pure & appl. Chem.** 67:1699-1723.
- [31] **Monazite process**. [online].  
 Available : [http://www.oaep.go.th/rrdc/monazite\\_process.html](http://www.oaep.go.th/rrdc/monazite_process.html)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

# ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

### 1. ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก [31]

เป็นหน่วยงานในสังกัดสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จัดตั้งขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีโรงงานนำทางในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย เพื่อให้สามารถแยกผลผลิตธาตุหายากที่มีคุณค่าสูงสำหรับนำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมและผลพลอยได้ธาตุวิสตินิวเคลียร์ สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยด้านเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ของประเทศ นอกจากนี้ยังช่วยเสริมพัฒนาเทคโนโลยีการแปรสภาพแร่ในประเทศ



รูปที่ ก.1 ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก

ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายากมีการก่อสร้างแล้วเสร็จในปี 2538 มีเนื้อที่ประมาณ 30 ไร่ ตั้งอยู่ในบริเวณเขต โนนธานี ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก มีข้าราชการและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานประจำประมาณ 100 คน มีโครงสร้างประกอบด้วยงานต่าง ๆ 6 งาน คือ งานบริหารทั่วไป งานแปรสภาพแร่ งานยูเรเนียมและทอเรียม งานแร่เอิร์ท งานเคมีและควบคุมคุณภาพ และงานซ่อมบำรุงและบริการ

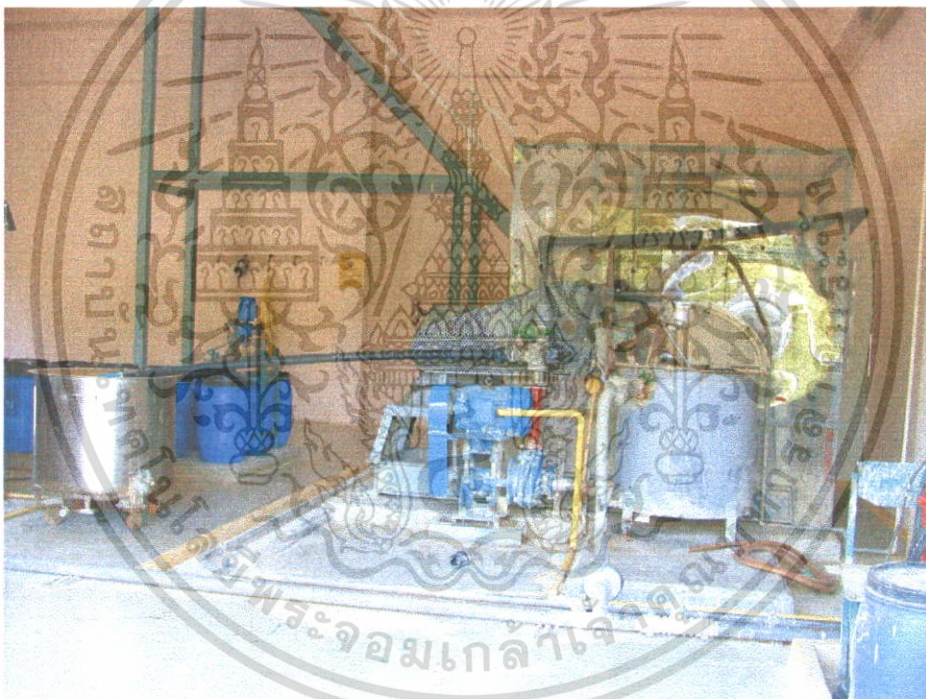
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. กระบวนการผลิต

ในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาธาตุหายาก ใช้โซดาไฟ (NaOH) เข้มข้นในการย่อยแร่โมนาไซต์ ซึ่งเรียกว่า กระบวนการด่าง (alkali process) กระบวนการผลิตประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ส่วน คือ ส่วนการแปรสภาพแร่ ส่วนการแยกวัสดุนิวเคลียร์ และส่วนการแยกธาตุหายาก

### 2.1 การแปรสภาพแร่

ขั้นตอนที่จัดเป็นหัวใจของกิจกรรมแปรสภาพแร่โมนาไซต์ ได้แก่ การบดแร่ให้ได้แร่โมนาไซต์ที่ละเอียดสามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนขนาด # 350 mesh อันเป็นการเพิ่มผิวสัมผัสของแร่โมนาไซต์ด้วยด่าง ช่วยให้การย่อยแร่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูงเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของแร่โมนาไซต์ ซึ่งมียูเรเนียมและโทเรียมเจือปนอยู่ด้วย เครื่องบดแร่ที่ใช้จึงได้รับการออกแบบเป็นเครื่องบดแร่ และคัดขนาดแร่แบบเปียก ดังรูป ก.2



รูปที่ ก.2 เครื่องบดและคัดขนาดแร่แบบเปียก

การย่อยแร่โมนาไซต์ด้วยโซดาไฟเข้มข้น (50% NaOH) และใช้อุณหภูมิสูง 140 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง ทำให้คุณสมบัติของแร่เปลี่ยนจากสารประกอบฟอสเฟตเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารประกอบนี้จะถูกแยกธาตุได้ง่ายขึ้น ด้วยกรรมวิธีทางเคมีธรรมดา ภายใต้อุณหภูมิปกติในขั้นนี้ จะได้ผลพลอยได้ คือ ไตรโซเดียมฟอสเฟต ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวแรกของกระบวนการ ดังรูป ก.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 ชุดย่อยแร่และผลิต ไครโซเดียมฟอสเฟต

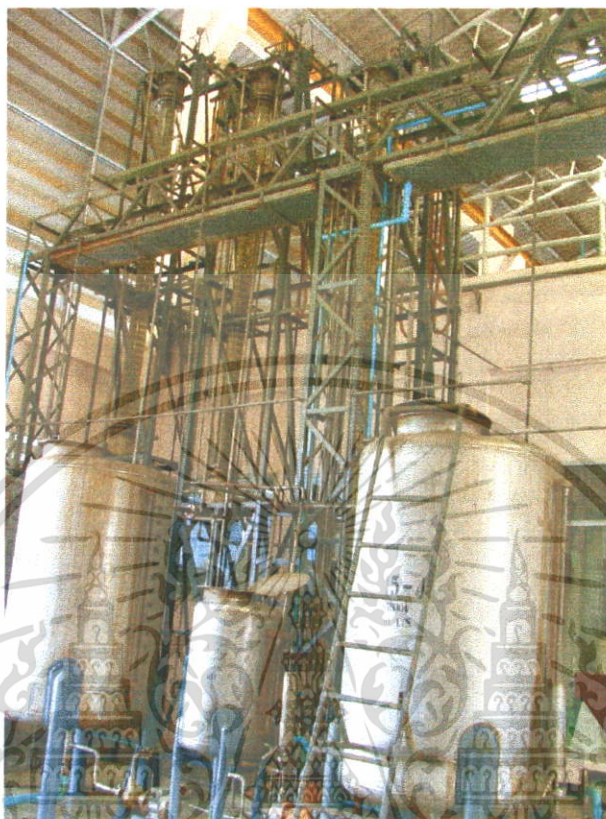
แร่ที่ผ่านการย่อยแล้ว จะประกอบด้วยสารประกอบ ไฮดรอกไซด์ของกลุ่มธาตุหายาก และยูเรเนียม ทอเรียม ซึ่งเมื่อนำไปละลายด้วยกรดเกลือ (HCl) และนำมาเลือกตกตะกอน (selective precipitation) ด้วยด่างเจือจาง (20% NaOH) ความเป็นกรดประมาณ 4.5 สารประกอบ ไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมจะถูกแยกออกจากกลุ่มธาตุหายาก พร้อมทั้งจะนำไปสกัดแยกยูเรเนียม และทอเรียมออกจากกัน สำหรับทำวัสดุนิวเคลียร์ต่อไป ส่วนกลุ่มธาตุหายากที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายกรดเกลือ จะถูกนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะกลุ่มหรือธาตุหายากเฉพาะตัวต่อไป

## 2.2 การแยกวัสดุนิวเคลียร์

กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลว (liquid-liquid extraction) อาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะระหว่างของเหลว 2 ชนิด ซึ่งจะแยกชั้นจากกัน โดยธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น น้ำกับน้ำมัน และคุณสมบัตินี้ถูกนำมาใช้ในการแยกยูเรเนียมและทอเรียมออกจากกันได้

สารประกอบ ไฮดรอกไซด์ของยูเรเนียมปนกับทอเรียมจากขั้นตอนแปรสภาพแร่จะถูกนำละลายด้วยกรดประติว ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นสารละลายชั้นน้ำ ส่วนสารละลายชั้นน้ำมันที่ใช้ ได้แก่ tributyl phosphate (TBP) เจือจางด้วยน้ำมันก๊าดในอัตราส่วน 5:95 โดยปริมาตร TBP มีคุณสมบัติพิเศษ ซึ่งจะละลายยูเรเนียมได้ดีกว่าทอเรียม เกิดการผสมตัวกับสารละลาย TBP แล้วปล่อยให้แยกชั้นออกจากกันตามธรรมชาติ ยูเรเนียมก็จะถูกละลายเข้าไปอยู่ในชั้นของ TBP ทั้งทอเรียมให้ยังคงละลายอยู่ในสารละลายกรดดินประ

สิวเช่นเดิม อุปกรณ์พิเศษที่กล่าวถึงนี้มีมากมายหลายแบบ แต่ที่เลือกนำมาใช้สกัดยูเรเนียมนี้ ได้แก่ pulsed perforated-palate column ดังรูป ก.4



รูปที่ ก.4 pulsed perforated-palate column

ยูเรเนียมที่สกัดได้จะถูกนำไปสกัดซ้ำอีกครั้งหนึ่งให้สะอาดที่สุด จากนั้นจึงตกตะกอนด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เป็นแอมโมเนียมไดยูเรเนต  $[(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7]$  หรือที่เรียกกันว่า “เค้กเหลือง”

ทอเรียมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายกรดอินทรีย์ อาจยังมีธาตุหายากปะปนอยู่บ้างเล็กน้อยและเพื่อให้ได้ทอเรียมสะอาด จึงต้องนำมาสกัดอีกครั้งหนึ่งด้วยสารละลาย TBP ในน้ำมันก๊าดในอัตราส่วน 40:60 โดยปริมาตร อุปกรณ์ที่ใช้สกัดในขั้นตอนนี้ เรียกว่า mixer settler ดังรูป ก.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 multistage mixer settler

### 2.3 การแยกธาตุหายาก

ภายหลังการแยกยูเรเนียมและโทเรียมออกไปจากกลุ่มธาตุหายากทั้งหมดแล้วยังจะมีสารกัมมันตรังสี ซึ่งเป็นผลผลิตจากการสลายตัวของยูเรเนียม และโทเรียมตกค้างอยู่บ้าง ดังนั้น ก่อนแยกธาตุหายากต่อไป จึงต้องแยกสารกัมมันตรังสีเหล่านั้นออกไป ซึ่งธาตุหลักในกลุ่มนี้ ได้แก่ เรเดียม (Ra) โดยให้ตกตะกอนร่วมกับแบเรียม แยกออกมาในรูปตะกอนซัลเฟต

การแยกธาตุหายากใช้กรรมวิธีสกัดด้วยของเหลวอัตรส่วนของ TBP : น้ำมันก๊าดเป็น 50:50 แบ่งการสกัดได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ

2.3.1 สกัดซีเรียม (Ce) ออกก่อนโดยใช้ mixer settler

2.3.2 สกัดธาตุหายากที่เหลือให้แยกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแลนทานัม (La) ปนกับเพรซีโอมิเดียม (Pr) และกลุ่มนีโอเดมิยมปนกับธาตุหายากตัวอื่นๆ ที่เหลืออยู่ ซึ่งส่วนใหญ่ ได้แก่ ธาตุหายากกลุ่มหนัก (heavy rare earth) มีหมายเลขอะตอมตั้งแต่ 64 ถึง 71 การสกัดใช้ pulsed perforated-plate column

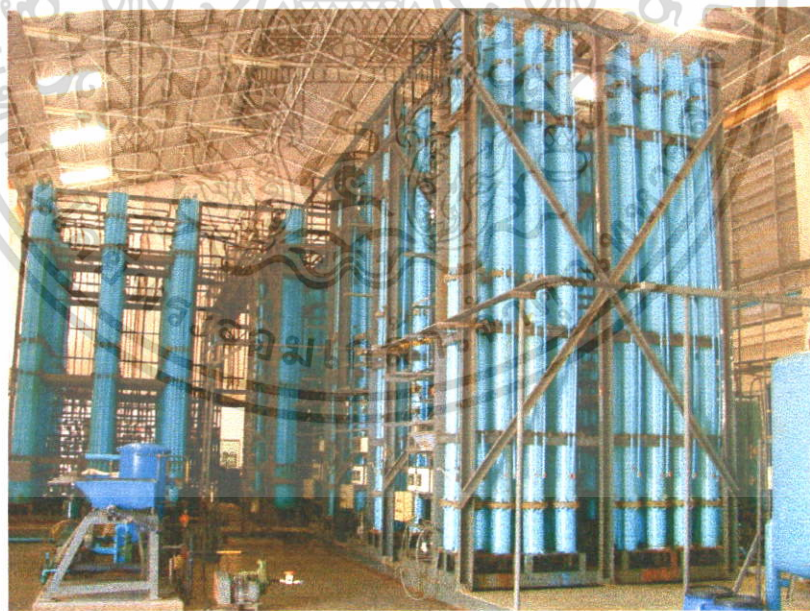
2.3.3 นำกลุ่มนีโอเดมิยมกับธาตุหายากอื่นที่เหลือมาสกัดด้วย pulsed perforated-plate column เพื่อแยกนีโอเดมิยมออกไป ส่วนธาตุหายากที่เหลือแบ่งเป็น 2 ส่วนๆ หนึ่งนำไปตกผลึกเป็นแรเอิร์ทคลอไรด์ผสม (mixed RECl<sub>3</sub>) ดังรูป ก.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.6 เครื่องต้มระเหยเรเออร์ทคลอไรด์ผสม

ซึ่งสามารถนำออกจำหน่ายได้ อีกส่วนหนึ่งนำไปแยกเป็นธาตุหายากเฉพาะตัวด้วยกรรมวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange chromatography) ด้วยกรรมวิธีนี้แม้จะใช้เวลานานแต่ธาตุหายากเฉพาะตัวที่ผลิตได้จะมีความบริสุทธิ์สูงและมีราคาสูงมาก ดังรูป ก.7



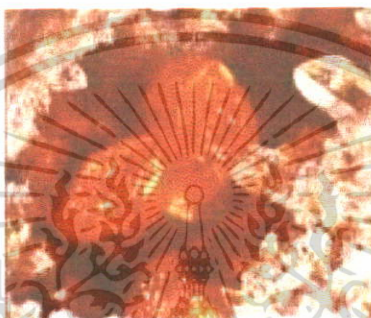
รูปที่ ก.7 ระบบ ion exchange chromatography

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข. แร่โมนาไซต์

### แร่โมนาไซต์ในประเทศไทย

แร่โมนาไซต์ (Monazite) เป็นแร่กัมมันตรังสี (Radioactive mineral) ชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มแร่ธาตุหายาก (Rare-earths) โดยมีธาตุทอเรียม และยูเรเนียม เป็นองค์ประกอบสำคัญ มีคุณสมบัติเด่นดังต่อไปนี้



รูปที่ ข.1 แร่โมนาไซต์

#### คุณสมบัติทางฟิสิกส์

เกิดอยู่ในระบบผลึก Monoclinic โดยผลึกที่พบมักมีขนาดเล็ก ส่วนใหญ่เป็นมวลเมสส์ไม่แสดงรูปผลึกหรือแสดงรูปผลึกไม่ชัดเจน มีสีเหลืองน้ำตาลเหลือง น้ำตาลแดง ส่วนใหญ่มักอมเขียวหรือบางครั้งเกือบขาว ความวาวของผิวแร่คล้ายขี้ผึ้งจนถึงคล้ายแก้ว โปร่งแสง ความถ่วงจำเพาะ 4.6-5.4 โดยเพิ่มขึ้นตามปริมาณธาตุทอเรียม ภายได้แสงอัลตราไวโอเล็ต คลื่นสั้นจะให้เห็นเขียวสามารถตรวจวัดกัมมันตรังสีได้ด้วยเครื่อง Geiger Counter หรือเครื่อง Survey Meter มีคุณสมบัติติดแม่เหล็กอย่างอ่อนและไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า

#### คุณสมบัติทางเคมี

สูตร  $(\text{Ce, La, Y, Th})\text{Po}_4$  ธาตุ Th ประกอบอยู่ในรูป  $\text{ThO}_2$  ตั้งแต่ 2-20% อัตราส่วนของ  $\text{Ce} : \text{La} \sim 1:1$ , Th มักแทนที่ Ce,La ได้เสมอ ตั้งแต่ ปริมาณเล็กน้อย ไปจนถึง 10-20% ของ  $\text{ThO}_2$  ส่วนธาตุ Y แทนที่ Ce,La ได้เล็กน้อย ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มักปนอยู่ด้วย และรวมอยู่ในรูป Thorite ( $\text{ThSiO}_4$ ) หัวแร่โมนาไซต์สะอาดจะมีผลวิเคราะห์ของ Rare-earth Oxides + Thoria (REO+ Thoria) ตั้งแต่ 55% ขึ้นไป

### กลุ่มแร่ธาตุหายากและแร่กัมมันตรังสี

- แร่ Xenotime (YPO<sub>4</sub>)
- แร่ Uraninite (UO<sub>2</sub>)
- แร่ Thorianite (ThO<sub>2</sub>)
- แร่ Monazite (Ce,La,Y,Th) PO<sub>4</sub>
- แร่ Thorite (ThSiO<sub>4</sub>)
- แร่ Bastnaesite (CeFCO<sub>3</sub>)

แร่โมนาไซต์โดยทั่วไป เกิดเป็นแร่ประกอบหินในหินอัคนี ชนิดหินแกรนิตและในหินแปรชนิดหินไนล์ บางครั้งพบแหล่งของแร่โมนาไซต์ในบริเวณ ที่มีหินดังกล่าวเป็นหินแม่ ซึ่งอาจมีมากพอจนกลายเป็นแหล่งแร่ที่สำคัญ โดยมีแร่อื่นๆ ที่เกิดร่วม ได้แก่ แร่ Xenotime, Zircon, Ilmenite, Samarskite, Apatite ฯลฯ ในประเทศไทยพบแร่โมนาไซต์อยู่ในแหล่งแร่ดีบุกเกือบทุกแห่ง ทั้งแหล่งลานแร่บนบกในทะเล และแหล่งสายคลาบนภูเขา โดยแหล่งลานแร่มักพบปริมาณของแร่โมนาไซต์ค่อนข้างสูงกว่าแหล่งสายคลา อย่างไรก็ตามความสมบูรณ์ของแร่โมนาไซต์ เมื่อเทียบกับแร่ดีบุกแล้วต่ำมาก จากตัวอย่างหลุมสำรวจอาจเจอแร่โมนาไซต์ ตั้งแต่เพียงร่องรอย (Trace) หรือในปริมาณที่ต่ำกว่า 0.001% ในขณะที่แร่ดีบุกมีความสมบูรณ์พอที่จะทำเหมืองได้ตั้งแต่ 0.012% ขึ้นไป หิวแร่ดีบุกขั้นต้น (Primary Concentrate) ที่กู้จากเหมืองจะพบแร่โมนาไซต์ในปริมาณที่สูงขึ้นพอสมควร โดยปกติหิวแร่ดีบุกขั้นต้นจะมีแร่ดีบุกอยู่ตั้งแต่ 10% จนไปถึง 70-80% และจะมีแร่โมนาไซต์ ตั้งแต่ 0.01% จนถึงสูงกว่า 1% อย่างไรก็ตาม ในขบวนการแต่งแร่จะมีการสูญเสียของแร่โมนาไซต์พร้อมแร่อื่นๆ ไปกับหางแร่หรือซีแร่ (Tailing) หลังจากแต่งแร่ดีบุกสะอาดออกไปแล้วจะเหลือมูลแร่หนักหรือแร่คละ (Amang) ซึ่งจะประกอบด้วยแร่ที่มีค่าหลายชนิด เป็นแร่พลอยได้จากแร่ดีบุกประกอบด้วย แร่ซีไนท์ โมนาไซต์ เซอร์คอน รูไทล์ อิลเมไนต์ โคลัมไบต์-แทนนาไลต์ ฯลฯ ผลผลิตแร่โมนาไซต์ที่สำคัญได้จากการนำมูลแร่ หรือแร่คละ ดังกล่าวมาผ่านกระบวนการแต่งแร่อีกต่อหนึ่ง ซึ่งโรงงานที่ผลิตแร่โมนาไซต์ ก็คือ โรงแต่งแร่ต่างๆ ในท้องที่ จังหวัดภูเก็ต พังงา และระนอง แหล่งแร่โมนาไซต์ที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งก็คือ แหล่งแร่ชายหาด (Beach Sand Deposit) ที่จังหวัดชุมพร ซึ่งมีการแต่งแร่เซอร์คอน และแร่โมนาไซต์เป็นแร่สำคัญ โดยแร่ดีบุกมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

### การแก้ค่า decay time

#### การแก้ค่า decay time

การแก้ค่า decay time ใช้ในกรณีวิเคราะห์ไอโซโทปที่มี half life สั้น (หน่วยเป็นนาทิจับ) ที่ อารังสีพร้อมกัน ค่าหนึ่งเดียวกัน ระยะเวลาในการอบและวัดรังสีเท่ากัน แต่เริ่มวัดไม่พร้อมกัน เพราะเครื่องวัดรังสีสามารถวัดได้ครั้งละ 1 ตัวอย่างเท่านั้น การวัดไอโซโทปรังสีแบบนี้ต้องใช้นาฬิกาจับเวลาด้วย โดยใช้สูตรดังนี้

$$A_0 = Ae^{\lambda t} \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ  $A_0$  = พื้นที่ได้ฟลักเริ่มต้น ( $t_0$ )

$A$  = พื้นที่ได้ฟลักที่วัดได้เวลา  $t$

$$\lambda = 0.693 / t_{1/2}$$

$t$  = ระยะเวลาที่เริ่มวัดตัวอย่างที่ 2, 3,...

ภาคผนวก ง.

การคำนวณหาปริมาณธาตุ

การคำนวณหาปริมาณธาตุในตัวอย่าง ใช้สูตรดังนี้

$$M_1 = \frac{(A_1 \times W_2)}{(A_2 \times W_1)} \times M_2 \quad (\text{ง. 1})$$

เมื่อ  $W_1$  = น้ำหนักของสารตัวอย่าง

$W_2$  = น้ำหนักของสารมาตรฐาน

$A_1$  = ความแรงรังสี (Peak area) ของธาตุในตัวอย่าง

$A_2$  = ความแรงรังสี (Peak area) ของธาตุในสารมาตรฐาน

$M_1$  = ความเข้มข้นของธาตุในตัวอย่าง

$M_2$  = ความเข้มข้นของธาตุในสารมาตรฐาน

สาร	น้ำหนัก ตัวอย่าง (กรัม)	น้ำหนัก สารมาตรฐาน (กรัม)	ความเข้มข้น สารมาตรฐาน (ไมโครกรัม/กรัม)	พื้นที่ใต้พีค สารตัวอย่าง	พื้นที่ใต้พีค สารมาตรฐาน
ยูเรเนียม	0.0335	0.0333	2	762	1315
	0.0339	0.0333	2	717	1315
แลนทานัม	0.0335	0.0333	5	13661	1311
	0.0339	0.0333	5	15340	1311
สารหนู	0.0335	0.0333	2	141	2091
	0.0339	0.0333	2	142	2091

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาปริมาณยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนูโดยใช้สูตร

ยูเรเนียม

$$M_1 = \frac{762 \times 0.0333 \times 2}{1315 \times 0.0335} = 1.152$$

$$= \frac{717 \times 0.0333 \times 2}{1315 \times 0.0339} = 1.071$$

$$\text{เฉลี่ย} = \frac{1.152 + 1.071}{2} = 1.111 \text{ ไมโครกรัม/กรัม}$$

แลนทานัม

$$M_1 = \frac{13661 \times 0.0333 \times 5}{3226 \times 0.0335} = 20.584$$

$$= \frac{15340 \times 0.0333 \times 5}{3226 \times 0.0339} = 23.354$$

$$\text{เฉลี่ย} = \frac{20.584 + 23.354}{2} = 21.969 \text{ ไมโครกรัม/กรัม}$$

สารหนู

1. แก้ decay time

$$A = 141 e^{\frac{-0.693}{1578} (31)} = 142.93$$

$$A = 142 e^{\frac{-0.693}{1578} (64)} = 146$$

2. หาปริมาณ

$$M_1 = \frac{143 \times 0.0333 \times 2}{2091 \times 0.0335} = 0.135$$

$$= \frac{146 \times 0.0333 \times 2}{2091 \times 0.0335} = 0.138$$

$$\text{เฉลี่ย} = \frac{0.135 + 0.138}{2} = 0.136 \text{ ไมโครกรัม/กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่งเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547 ในแต่ละเดือนจะทำการวัดตัวอย่าง 2 ซ้ำ)

เดือน	ปริมาณยูเรเนียม (ไมโครกรัม/กรัม)											
	ชาย 1 (n=14)	ชาย 2 (n=2)	ชาย 3 (n=8)	ชาย 4 (n=4)	ชาย 5 (n=0)	ชาย 6 (n=16)	ชาย 7 (n=6)	ชาย 8 (n=2)	หญิง 1 (n=10)	หญิง 2 (n=4)	Control 1	Control 2
มีนาคม	0.252±0.053	ND	ND	-	-	-	0.114±0.654	ND	ND	-	-	-
เมษายน	0.125±0.116	ND	0.359±0.011	ND	ND	0.208±0.053	ND	-	-	ND	-	-
พฤษภาคม	ND	-	ND	-	-	1.065±0.017	ND	ND	0.045±0.038	-	-	-
มิถุนายน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
กรกฎาคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
สิงหาคม	0.104±0.011	ND	0.291±0.058	ND	ND	0.125±0.018	ND	-	0.075±0.047	0.067±0.021	ND	ND
กันยายน	0.113±0.012	ND	ND	-	ND	0.090±0.026	0.204±0.003	ND	-	ND	ND	ND
ตุลาคม	ND	-	-	-	-	-	-	ND	-	-	ND	ND
พฤศจิกายน	0.421±0.013	0.075±0.014	ND	ND	ND	1.111±0.057	-	ND	ND	ND	-	-
ธันวาคม	-	ND	-	ND	ND	0.823±0.141	0.069±0.014	ND	0.138±0.013	ND	-	-
มกราคม	0.475±0.012	ND	0.121±0.026	0.220±0.024	ND	0.180±0.021	-	ND	0.137±0.021	0.547±0.003	-	-
กุมภาพันธ์	1.180±0.045	ND	0.128±0.015	0.068±0.018	ND	0.441±0.073	ND	0.436±0.234	0.319±0.038	ND	-	-
								ND				
% RSD	120.512	33.066	65.625	47.692	-	82.772	47.286	66.50	73.049	94.285	-	-
SD	±0.366	±0.0002	±0.113	±0.114	-	±0.418	±0.061	±0.272	±0.103	±0.033	-	-

ND = Non detection

ตารางที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเลนทานัมในตัวอย่างเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547 ในแต่ละเดือนจะทำการวัดตัวอย่าง 2 ซ้ำ)

เดือน	ปริมาณเลนทานัม (ไมโครกรัม/กรัม)											
	ชาย 1 (n=16)	ชาย 2 (n=14)	ชาย 3 (n=16)	ชาย 4 (n=8)	ชาย 5 (n=12)	ชาย 6 (n=16)	ชาย 7 (n=12)	ชาย 8 (n=14)	หญิง 1 (n=12)	หญิง 2 (n=14)	Control 1	Control 2
มีนาคม	2.307±0.411	0.046±0.001	0.895±0.114	ND	0.077±0.021	-	0.440±0.034	-	ND	-	-	-
เมษายน	1.352±0.004	0.097±0.001	0.995±0.002	-	-	2.148±0.715	0.108±0.005	0.938±0.271	-	5.594±1.958	-	-
พฤษภาคม	0.747±0.012	-	0.041±0.009	-	-	3.343±0.308	ND	-	0.034±0.027	-	-	-
มิถุนายน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
กรกฎาคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
สิงหาคม	0.593±0.032	0.047±0.003	4.780±0.306	0.420±0.001	0.063±0.006	8.821±1.569	2.302±0.756	7.046±0.062	0.109±0.003	0.841±0.012	ND	ND
กันยายน	0.035±0.014	0.062±0.004	0.206±0.014	-	ND	4.129±0.178	1.361±0.009	0.603±0.111	-	0.556±0.341	ND	ND
ตุลาคม	ND	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ND	ND
พฤศจิกายน	8.240±0.235	0.141±0.021	0.646±0.030	-	0.064±0.028	22.201±1.631	-	6.320±2.173	0.043±0.016	0.100±0.003	-	-
ธันวาคม	-	0.035±0.005	-	0.298±0.006	0.783±0.416	14.609±1.596	0.089±0.367	2.454±0.262	0.088±0.084	0.518±0.009	-	-
มกราคม	3.191±0.098	ND	0.739±0.051	0.439±0.011	0.044±0.064	1.567±0.293	-	17.177±8.492	0.201±0.043	0.667±0.119	-	-
กุมภาพันธ์	21.419±0.185	0.337±0.037	1.398±0.159	0.140±0.012	0.084±0.119	4.276±1.811	0.208±0.017	6.341±0.338	1.245±0.174	0.321±0.006	-	-
%RSD	147.455	94.495	119.834	39.318	166.129	92.836	117.842	105.285	158.536	158.435	-	-
SD	±6.982	±0.103	±1.450	±0.127	±1.051	±7.089	±0.885	±5.996	±0.455	±1.944	-	-

ND = Non detection

ตารางที่ ง.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารหนูในตัวอย่างเก็บ (เก็บตัวอย่างระหว่างเดือนมีนาคม 2546- เดือนกุมภาพันธ์ 2547 ในแต่ละเดือนจะทำการวัดตัวอย่าง 2 ซ้ำ)

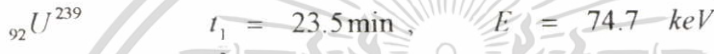
เดือน	ปริมาณสารหนู (ไมโครกรัม/กรัม)											
	ชาย 1 (n=18)	ชาย 2 (n=12)	ชาย 3 (n=14)	ชาย 4 (n=10)	ชาย 5 (n=4)	ชาย 6 (n=16)	ชาย 7 (n=10)	ชาย 8 (n=10)	หญิง 1 (n=8)	หญิง 2 (n=6)	Control1 (n=6)	Control 2 (n=6)
มีนาคม	0.030±0.015	0.056±0.002	0.045±0.02	-	ND	-	0.058±0.023	-	0.102±0.035	-	-	-
เมษายน	0.166±0.012	0.055±0.012	0.019±0.005	0.046±0.005	-	0.087±0.011	ND	0.534±0.005	-	ND	-	-
พฤษภาคม	0.020±0.019	-	0.019±0.006	-	-	0.075±0.009	0.042±0.001	-	ND	-	-	-
มิถุนายน	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
กรกฎาคม	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
สิงหาคม	0.019±0.003	0.062±0.007	0.025±0.011	0.121±0.021	0.0369±0.03	0.066±0.027	0.065±0.010	0.024±0.009	0.065±0.004	ND	0.025±0.003	0.038±0.01
กันยายน	0.026±0.013	0.042±0.002	0.077±0.002	-	0.0392±0.06	0.129±0.005	-	0.068±0.005	-	0.029±0.019	0.026±0.003	0.034±0.02
ตุลาคม	0.020±0.005	-	-	-	ND	-	-	-	-	-	0.036±0.003	0.036±0.006
พฤศจิกายน	0.025±0.003	ND	ND	-	ND	0.136±0.001	-	ND	0.088±0.016	ND	-	-
ธันวาคม	-	0.024±0.030	-	0.048±0.014	ND	0.148±0.021	0.019±0.020	0.084±0.049	ND	0.057±0.008	-	-
มกราคม	0.014±0.005	ND	0.020±0.009	0.062±0.009	ND	0.074±0.005	-	ND	0.045±0.035	ND	-	-
กุมภาพันธ์	0.032±0.010	0.057±0.006	0.024±0.016	0.046±0.001	ND	0.102±0.023	0.0259±0.002	0.196±0.025	ND	0.019±0.002	-	-
%RSD	120.512	33.066	65.625	47.692	47.368	31.372	50.000	120.598	40.941	57.142	21.439	48.809
SD	±6.982	±0.016	±0.021	±0.031	±0.018	±0.032	±0.021	±0.363	±0.030	±0.020	±0.00006	±0.015

ND = Non detection

ภาคผนวก จ.

สมการการเกิดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู

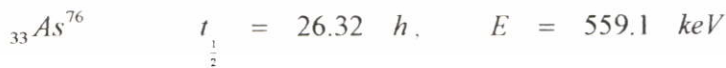
1. สมการการเกิดยูเรเนียม-239 ( ${}_{92}\text{U}^{239}$ )



2. สมการการเกิดแลนทานัม-140 ( ${}_{57}\text{La}^{140}$ )



3. สมการการเกิดอาร์เซนิก-76 ( ${}_{33}\text{As}^{76}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วิธีการทำ Regression analysis

### 1. Regression Analysis

สมการเส้นตรงสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ  $x$  กับตัวแปรตาม  $y$  คือ

$$y = a + bx \quad (ฉ.1)$$

$a$  คือ ค่า  $y$  เมื่อ  $x=0$  (intercept)

$b$  คือ ความชัน (slope) ของเส้นตรง

การเบี่ยงเบนของจุดแต่ละจุด  $(x_i, y_i)$  จากเส้นตรงในทิศทางของแกน  $y$  คือ

$$y_i - (a + bx_i) \quad (ฉ.2)$$

วิธีการทำ least square คือการหาค่า  $a$  และ  $b$  ที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของการเบี่ยงเบน ( $Q$ ) มีค่าน้อยที่สุด

$$Q = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (ฉ.3)$$

เมื่อ  $Q$  มีค่าน้อยที่สุด ค่าของ  $a$  และ  $b$  สามารถคำนวณได้จากการใช้ differential calculus ผลที่ได้คือ

$$\text{Intercept} = a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n} \quad (ฉ.4)$$

$$\text{Slope} = b = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (ฉ.5)$$

ค่า  $a$  และ  $b$  เป็นค่าที่คำนวณได้ตามหลักสถิติเหมือนค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจัดเป็นค่าจริง ตามปกติเราจะสนใจค่า slope ( $\beta$ ) และ intercept ( $\alpha$ ) ว่าควรมีค่าอยู่ในช่วงใดที่ทำให้โอกาสเป็นค่าจริงในระดับความมั่นใจต่างๆ

$$\alpha = a \pm ts \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (จ.6)$$

$$\beta = b \pm \frac{ts}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad (จ.7)$$

เมื่อ

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 - b^2 \sum (X_i - \bar{X})^2}{n-2}} \quad (จ.8)$$

ค่า t เปิดได้ในตาราง เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) และระดับความมั่นใจ (confidence level)

ตารางที่ จ.1 แสดงค่า t ที่ระดับความมั่นใจต่างๆ

Degree of freedom	t value for confidence level, %				
V	80	90	95	99	99.9
1	3.08	6.31	12.7	63.7	637
2	1.89	2.92	4.30	9.92	31.6
3	1.64	2.35	3.18	5.84	12.9
4	1.53	2.13	2.78	4.60	8.60
5	1.48	2.02	2.57	4.03	6.86
6	1.44	1.94	2.45	3.71	5.96
7	1.42	1.90	2.36	3.50	5.40
8	1.40	1.86	2.31	3.36	5.04
9	1.38	1.83	2.26	3.25	4.78
10	1.37	1.81	2.23	3.17	4.56
11	1.36	1.80	2.20	3.11	4.44
12	1.36	1.78	2.18	3.06	4.32
13	1.35	1.77	2.16	3.01	4.22
14	1.34	1.76	2.14	2.98	4.14
∞	1.29	1.64	1.96	2.58	3.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.1 การหา Regression analysis ของยูเรเนียม

ความเข้มข้น (ไมโครกรัม) ( $X_i$ )	สัญญาณที่วัดได้ ( $Y_i$ )
0.25	70
0.375	153
0.5	352
1	1179
1.25	1380
$\bar{X} = 0.482$	$\bar{Y} = 626.800$

$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$	$ Y_i - \bar{Y} $	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$ X_i - \bar{X}   Y_i - \bar{Y} $
0.425	0.180	556.800	310026.200	236.640
0.300	0.090	473.800	224486.400	142.140
0.175	0.030	274.800	75515.040	48.090
0.325	0.105	552.200	304924.800	179.456
0.575	0.330	753.200	567310.200	433.090
$\sum = 1.800$	0.737	2610.800	1482263	1039.425

$$b = \frac{1039.425}{0.7375} = 1409.389$$

$$a = 626.8 - (1409.389)(0.675) = -324.537$$

$$S = \sqrt{\frac{1482263 - (1409.389)^2(0.7375)}{5 - 3}}$$

$$S = 75.959$$

$$\beta = 1409.389 \pm \frac{(3.18)(75.959)}{\sqrt{0.7375}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\beta = 1409.389 \pm 281.296$$

$$\alpha = -324.537 \pm (3.18)(75.959) \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{(0.675)^2}{0.7375}}$$

$$\alpha = -324.537 \pm 218.331$$

### 1.2 การหา Regression analysis ของแผนทານัม

ความเข้มข้น (ไมโครกรัม) ( $X_i$ )		สัญญาณที่วัดได้ ( $Y_i$ )		
0.250		114		
0.375		159		
0.500		218		
1.00		473		
1.250		633		
$\bar{X} = 0.482$		$\bar{Y} = 319.400$		
$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$	$ Y_i - \bar{Y} $	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$ X_i - \bar{X}   Y_i - \bar{Y} $
0.425	0.180	205.400	42189.160	87.295
0.300	0.090	160.400	25728.160	48.120
0.175	0.030	101.400	10281.960	17.745
0.325	0.105	153.600	23592.960	49.920
0.575	0.330	313.600	98344.960	180.320
$\Sigma = 1.800$	0.737	934.400	200137.200	383.400

$$b = \frac{383.4}{319.4} = 519.864$$

$$a = 319.4 - (519.864)(0.675) = -31.508$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \sqrt{\frac{200137.2 - (519.864)^2(0.7325)}{5-2}}$$

$$S = 26.912$$

$$\beta = 519.864 \pm \frac{(3.18)(26.912)}{\sqrt{0.7325}}$$

$$\beta = 519.864 \pm 100.090$$

$$\alpha = -31.508 \pm (3.180)(26.912) \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{(0.675)^2}{0.7375}}$$

$$\alpha = -31.508 \pm 77.391$$

### 1.3 การหา Regression analysis ของสารหนู

ความเข้มข้น (ไมโครกรัม) ( $X_i$ )	สัญญาณที่วัดได้ ( $Y_i$ )
0.250	87
0.375	304
0.500	648
1.000	2155
1.250	2812
$\bar{X} = 0.482$	$\bar{Y} = 1201.200$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$	$ Y_i - \bar{Y} $	$(Y_i - \bar{Y})^2$	$ X_i - \bar{X}  Y_i - \bar{Y} $
0.425	0.180	1114.2	1241442	473.535
0.3	0.090	897.2	804967.8	269.16
0.175	0.030	553.2	306030.2	96.81
0.325	0.105	953.8	909734.4	309.985
0.575	0.330	1610.8	2594677	926.21
$\Sigma = 1.8$	0.7375	5129.2	5856851	2075.7

$$b = \frac{2075.7}{0.7375} = 2814.508$$

$$a = 1201.2 - (2814.508)(0.675) = -698.592$$

$$S = \sqrt{\frac{5856851 - (2814.508)^2(0.7375)}{5-2}}$$

$$S = 70.184$$

$$\beta = 2814.508 \pm \frac{(3.18)(70.184)}{\sqrt{0.7375}}$$

$$\beta = 2814.508 \pm 259.910$$

$$\alpha = -698.592 \pm (3.18)(70.184) \sqrt{\frac{1}{5} + \frac{(0.675)^2}{0.7375}}$$

$$\alpha = -698.592 \pm 201.831$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

# ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision)

### ความแม่นยำและความเที่ยง (Accuracy and Precision)

วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณที่ดีต้องให้ผลแม่นยำ และความเที่ยงสูง เทอมความแม่นยำและความเที่ยงจะต้องถูกรายงานในการวิเคราะห์ด้วยเสมอ ดังนั้นควรต้องทำความเข้าใจกับความหมายของเทอม 2 เทอมนี้

#### 1. ความแม่นยำ (Accuracy)

การวิเคราะห์ที่มีความแม่นยำ หมายถึง ผลการวิเคราะห์ที่ได้ คือ  $X_i$  หรือ  $\bar{X}$  มีค่าเท่ากับค่าจริง (true value,  $\mu$ ) ค่าความแม่นยำของผลการทดลองแสดงได้ในเทอมความผิดพลาดสัมบูรณ์ (absolute error)

$$\text{error} = X_i - \mu \text{ หรือ } \bar{X} - \mu$$

$$E = O - T \tag{ข.1}$$

เมื่อต้องการเปรียบเทียบความผิดพลาดระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน 2 วิธี ต้องใช้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$\text{Relative error} = \frac{\text{error}}{\mu} = \frac{\bar{X} - \mu}{\mu} \tag{ข.2}$$

$$\text{หรือ } R.E. = \frac{O - T}{T} \tag{ข.3}$$

$$\%R.E. = \frac{O - T}{T} \times 100 \tag{ข.4}$$

$O$  = ค่าที่วัดได้ (Observed value) =  $X_i$  หรือค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ =  $\bar{X}$

$T$  = ค่าจริง (True value) =  $\mu$

ในการตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการทดลองนี้ใช้วัสดุอ้างอิง SRM 77-A Uranium ore, SRM 1547 Peach leaves และ SRM 1566b Oyster tissue ของสถาบัน National Institute of Standards and

Technology (NIST) สำหรับยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ตามลำดับ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมของธาตุแต่ละตัว

ตารางที่ ข.1 ผลการศึกษาความแม่นยำ (Accuracy)

สาร	ค่าที่ได้ (ไมโครกรัม/กรัม)	ค่าจริง (ไมโครกรัม/กรัม)
ยูเรเนียม	$10.626 \pm 0.402$	10
แลนทานัม	$9.437 \pm 0.297$	9
สารหนู	$7.451 \pm 0.808$	$7.650 \pm 0.650$

N = 5 ครั้ง

### การคำนวณค่าความแม่นยำ

$$\text{ยูเรเนียม} \quad \%R.E. = \frac{10.626 - 10}{10} \times 100 = 6.200\%$$

$$\text{แลนทานัม} \quad \%R.E. = \frac{9.437 - 9}{9} \times 100 = 4.851\%$$

$$\text{สารหนู} \quad \%R.E. = \frac{7.451 - 7.65}{7.65} \times 100 = 2.601\%$$

### 2. ความเที่ยง (Precision)

ความเที่ยงของการวัด สามารถแสดงได้ด้วยค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนในการวัด ถ้าค่าที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนน้อย แสดงว่ามีค่าแน่นอนสูง สำหรับความแน่นอนของค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) ในการวัด  $n$  ครั้ง สามารถรายงานเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{N - k}} \quad (\text{ข.5})$$

ถ้าต้องการเปรียบเทียบความเที่ยงระหว่างวิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน 2 วิธี ต้องใช้ค่าร้อยละของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD)

$$\%RSD = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (\text{ข.6})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการศึกษาความเที่ยง (Precision)

ครั้งที่ทำการวัด	พื้นที่ได้พักของ		
	ยูเรเนียม	แพลนทานัม	สารหนู
1	476	519	677
2	548	511	618
3	500	511	642
4	547	508	653
5	510	533	688
6	522	550	748
7	571	543	623
8	510	565	677
9	507	588	709
10	495	576	608
เฉลี่ย ( $\bar{X}$ )	518.600	540.400	664.300

## 2.1 การคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของยูเรเนียม

$X_i$	$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$
476	42.600	1814.760
548	29.600	864.360
500	18.600	345.960
547	28.400	806.560
510	8.600	73.960
522	3.400	11.560
571	52.400	2745.760
510	8.600	73.960
507	11.600	134.560
495	23.600	556.960
		$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 7428.400$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{X} = 518.600$$

$$S = \sqrt{\frac{7428.4}{10-1}} = 28.729$$

$$\%RSD = \frac{28.729}{518.6} \times 100 = 5.530\%$$

## 2.2 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของแลนทานัม

$X_i$	$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$
519	21.400	457.960
511	29.400	864.360
511	29.400	864.360
508	32.400	1049.760
533	7.400	54.760
550	9.600	92.160
543	2.600	6.760
565	24.600	605.160
588	47.600	2265.760
576	35.600	1267.360
		$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 7528.400$

$$\bar{X} = 540.400$$

$$S = \sqrt{\frac{7528.4}{10-1}} = 28.922$$

$$\%RSD = \frac{28.922}{540.400} \times 100 = 5.350\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ของสารหนู

$X_i$	$ X_i - \bar{X} $	$(X_i - \bar{X})^2$
677	12.700	161.290
618	46.300	2143.690
642	22.300	497.290
653	11.300	127.690
688	23.700	561.690
748	83.700	7005.690
623	41.300	1705.690
677	12.700	161.290
709	44.700	1998.090
608	56.300	3169.960
		$\sum (X_i - \bar{X})^2 = 17532.100$

$$\bar{X} = 664.300$$

$$S = \sqrt{\frac{17532.1}{10-1}} = 44.136$$

$$\%RSD = \frac{44.136}{664.3} \times 100 = 6.640\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

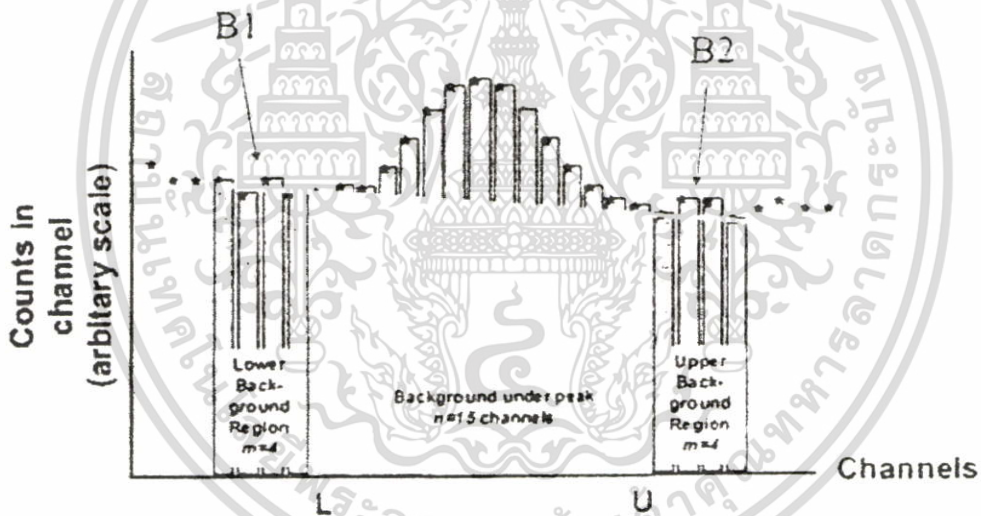
### การหาขีดจำกัดของการตรวจวัด (Detection Limit)

ในการทดสอบและคำนวณเพื่อหาขีดจำกัดในการตรวจวัดนั้น ทำการทดสอบสภาวะที่เหมาะสมของสารแต่ละชนิด โดยทำการคำนวณตามวิธี International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ของเทคนิคนิวตรอนแอคทีเวชัน ดังสมการต่อไปนี้ [30]

$$L_d = 2.71 + 3.29 \sqrt{B(1 + n/2m)}$$

โดยที่  $B = (B_1 + B_2) n / 2m$

ผังรูปที่ 1



รูปที่ ข.1 แสดงการหาขีดจำกัดในการตรวจวัดจากพื้นที่ที่ฟิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. แสดงวิธีการหาขีดจำกัดการตรวจวัด (detection limit)

สารมาตรฐาน 5 ไมโครกรัม/กรัม	พื้นที่ใต้พีค
ยูเรเนียม	3950
แลนทานัม	2526
สารหนู	8051

2. คำนวณ  $L_d$  ในตัวอย่าง นำค่าที่ได้มาเทียบกับพื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐาน

## 2.1 การหาขีดจำกัดการตรวจวัดของยูเรเนียม

$$B = \frac{119 \times 5}{4} = 148.750$$

$$L_d = 2.71 + 3.29 \sqrt{148.75(1 + 5/4)} = 47.570$$

พื้นที่ใต้พีคของยูเรเนียม 3950 CPS มีเนื้อสารอยู่ 5 ไมโครกรัม/กรัม  
 ถ้าพื้นที่ใต้พีคของยูเรเนียม 47.570 CPS มีเนื้อสารอยู่  $\frac{5 \times 47.57}{3950} = 0.060$  ไมโครกรัม/กรัม

## 2.2 การหาขีดจำกัดการตรวจวัดของแลนทานัม

$$B = \frac{6 \times 5}{4} = 7.500$$

$$L_d = 2.71 + 3.29 \sqrt{7.5(1 + 5/4)} = 16.220$$

พื้นที่ใต้พีคของแลนทานัม 2526 CPS มีเนื้อสารอยู่ 5 ไมโครกรัม/กรัม  
 ถ้าพื้นที่ใต้พีคของแลนทานัม 16.220 CPS มีเนื้อสารอยู่  $\frac{16.22 \times 5}{2526} = 0.032$  ไมโครกรัม/กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3. การหาขีดจำกัดการตรวจวัดของสารหนู

$$B = \frac{64 \times 4}{4} = 64$$

$$L_d = 2.71 + 3.29\sqrt{64(1+4/4)} = 39.930$$

พื้นที่ใต้พีคของสารหนู 8051 CPS มีเนื้อสารอยู่ 5 ไมโครกรัม/กรัม  
 ถ้าพื้นที่ใต้พีคของสารหนู 39.930 CPS มีเนื้อสารอยู่  $\frac{39.93 \times 5}{8051} = 0.024$  ไมโครกรัม/กรัม

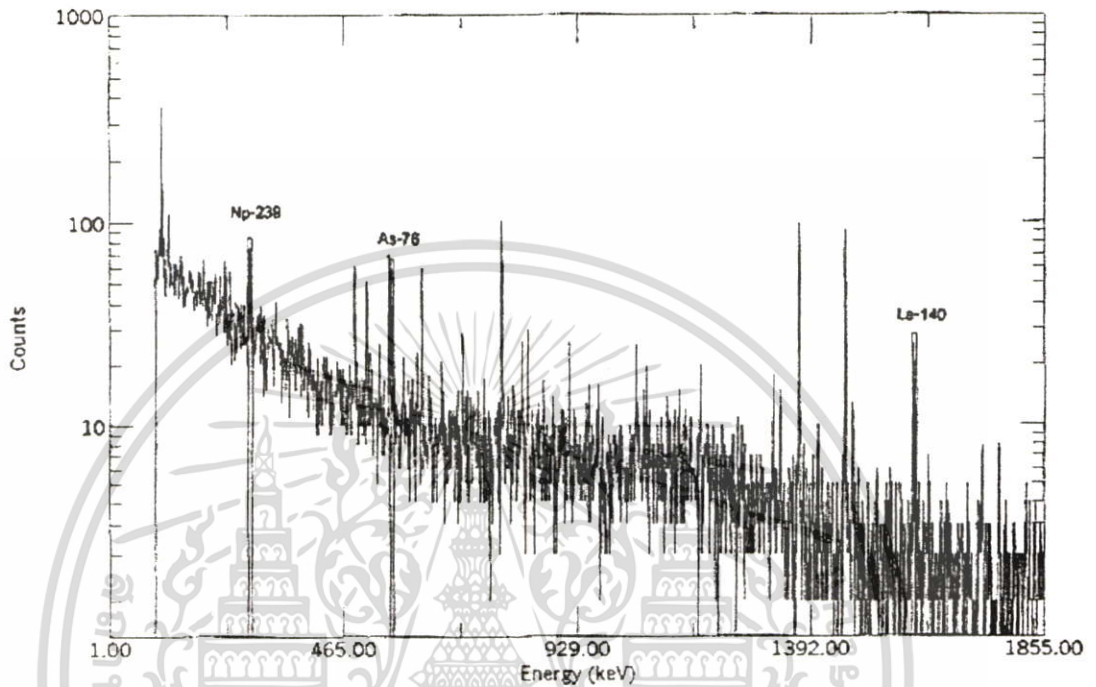
ตารางที่ ข.1 ค่าขีดจำกัดในการตรวจวัดยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู (n=10)

ครั้งที่	U (µg/g)	La (µg/g)	As (µg/g)
1	0.060	0.032	0.024
2	0.088	0.032	0.018
3	0.078	0.03	0.019
4	0.045	0.044	0.021
5	0.063	0.036	0.016
6	0.081	0.028	0.018
7	0.068	0.025	0.017
8	0.059	0.042	0.018
9	0.062	0.044	0.021
10	0.077	0.032	0.021
เฉลี่ย	0.068	0.034	0.019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

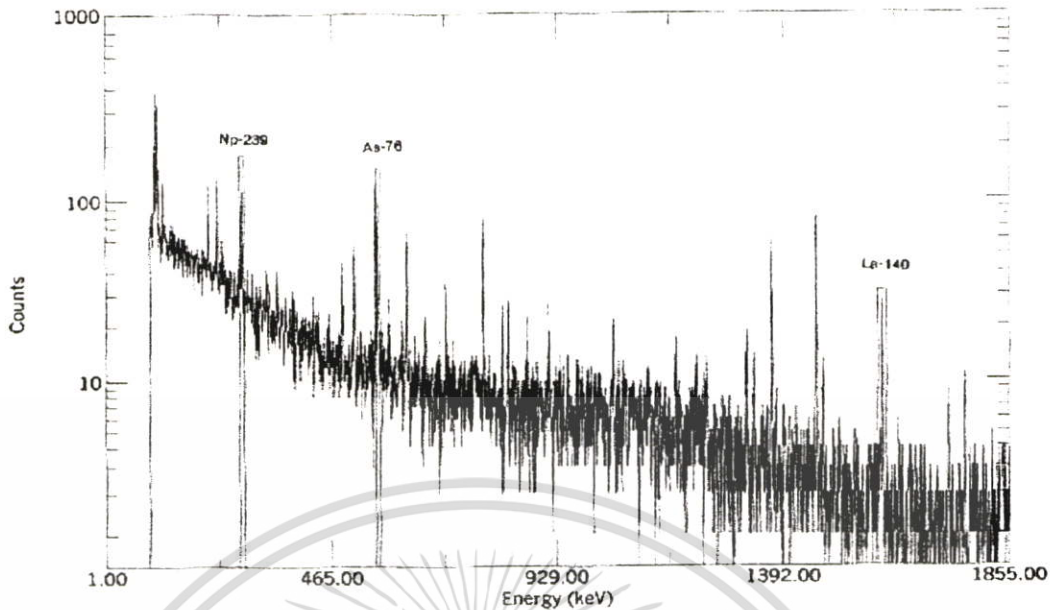
ภาคผนวก ฉ.

## สเปกตรัมของรังสีแกมมา

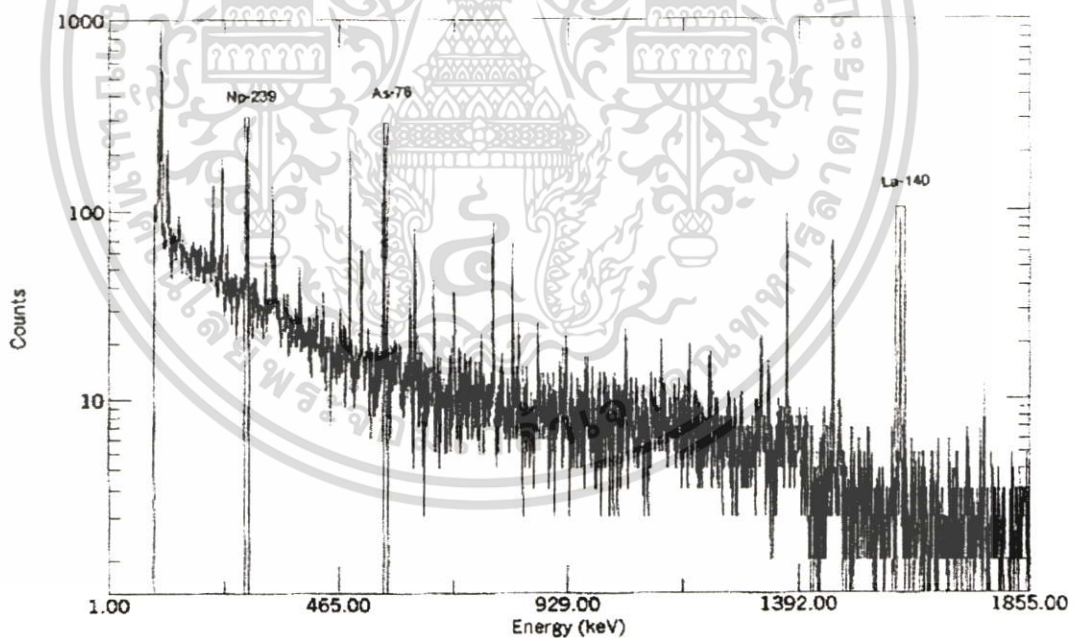


รูปที่ ฉ.1 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสสารหนู 0.250 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

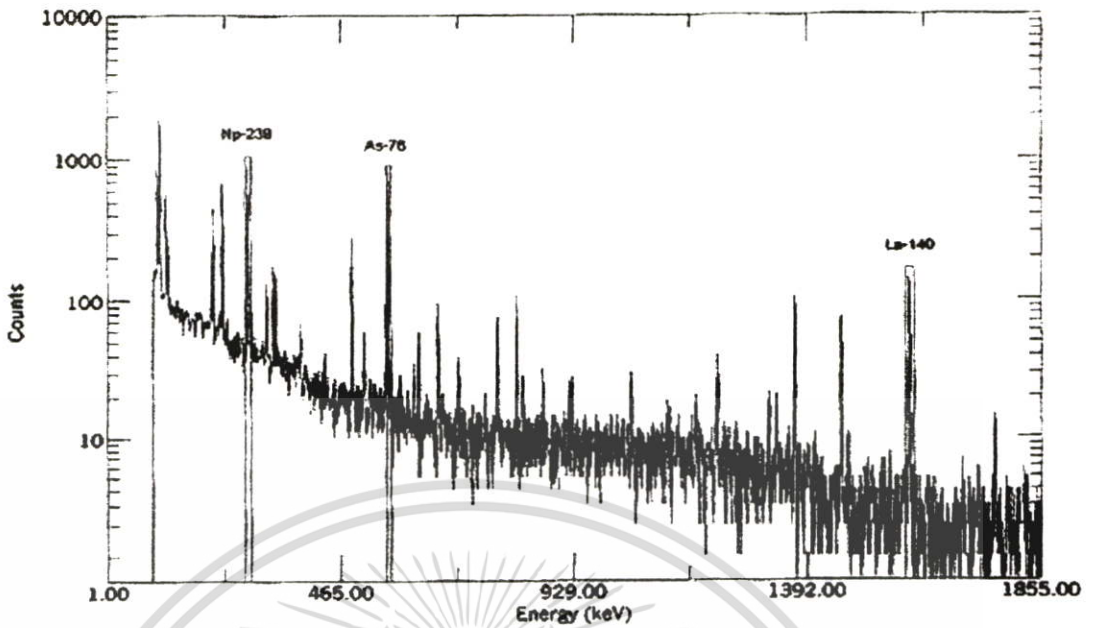


รูปที่ ๓.๒ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู 0.375 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร หลังจากอบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

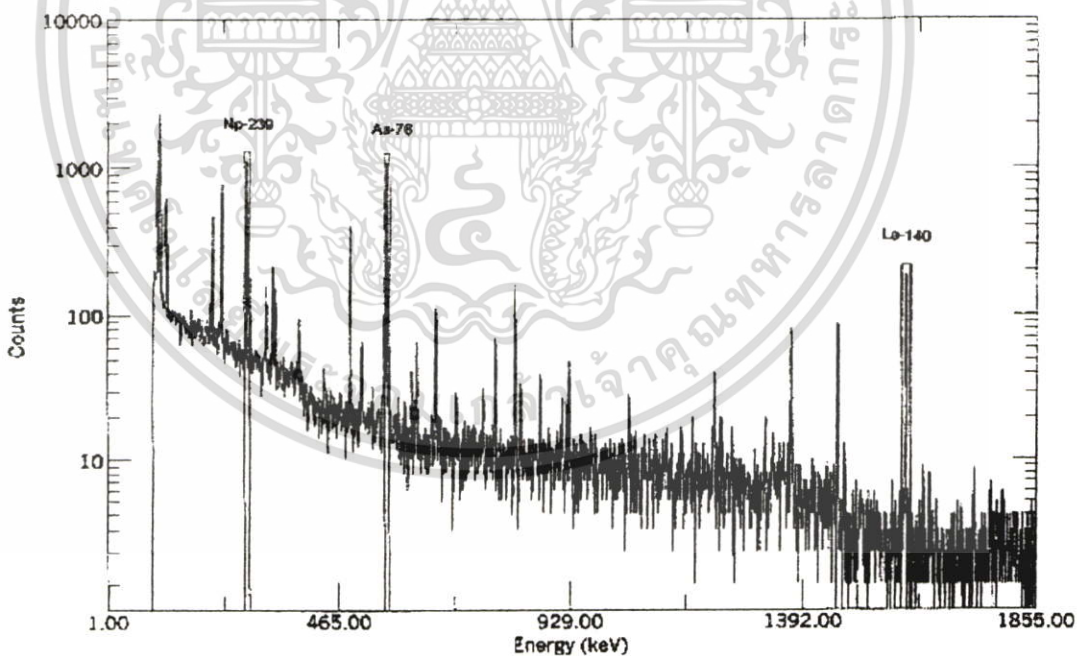


รูปที่ ๓.๓ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู 0.500 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร หลังจากอบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

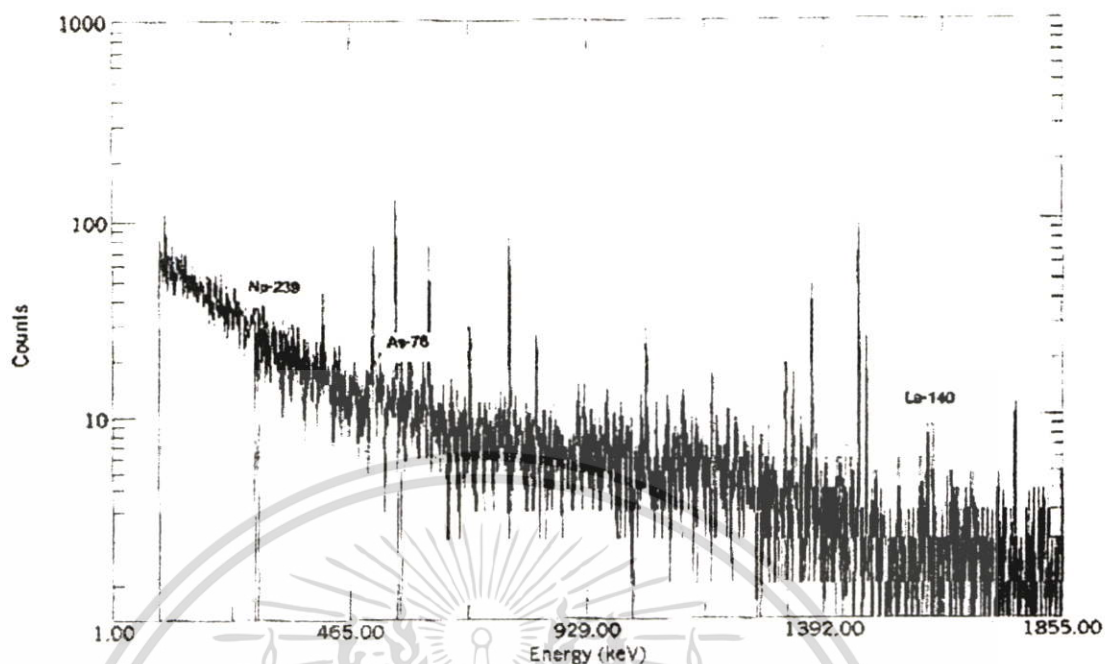


รูปที่ ๓.4 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสาร์หนู 1 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

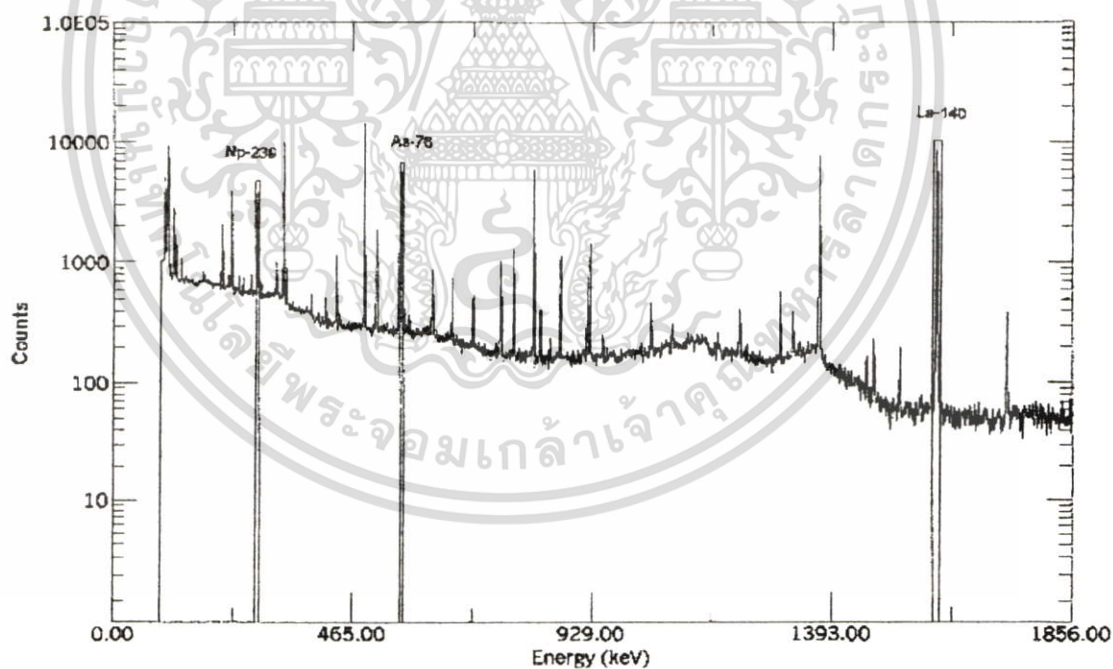


รูปที่ ๓.5 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสาร์หนู 1.250 ไมโครกรัม/250 ไมโครลิตร หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

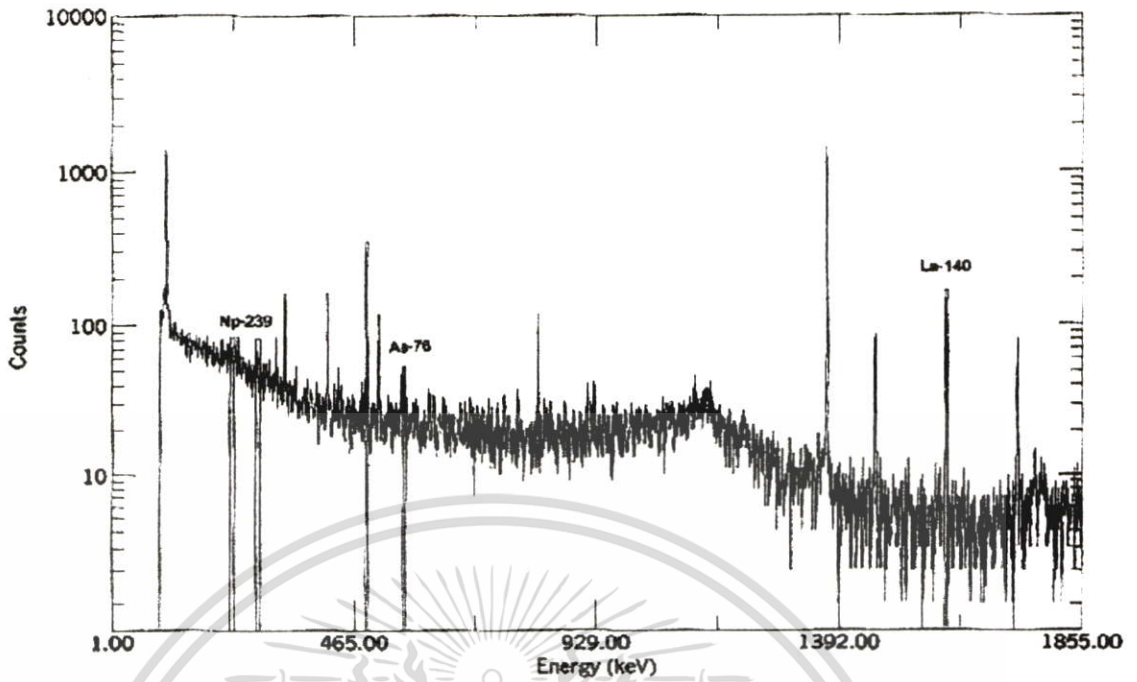


รูปที่ ๖.๖ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของแหล่งตัวอย่างหลังจากอบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

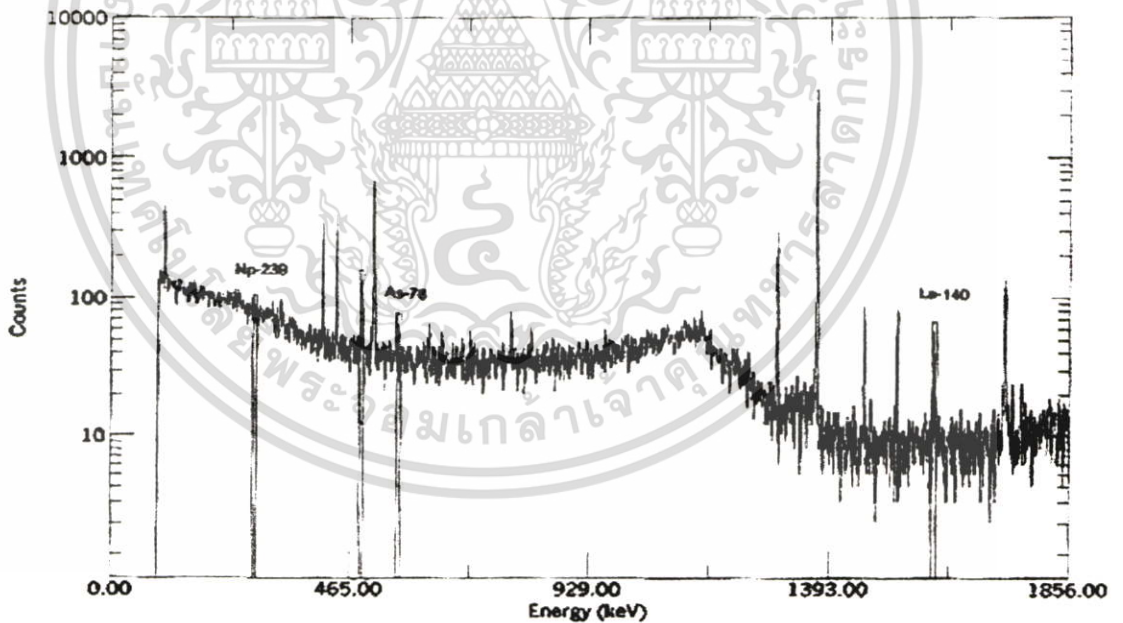


รูปที่ ๖.๗ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาของยูเรเนียม แลนทานัม และสารหนู ที่ความเข้มข้น 2, 5 และ 2 ไมโครกรัม/กรัม ตามลำดับ หลังจากอบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

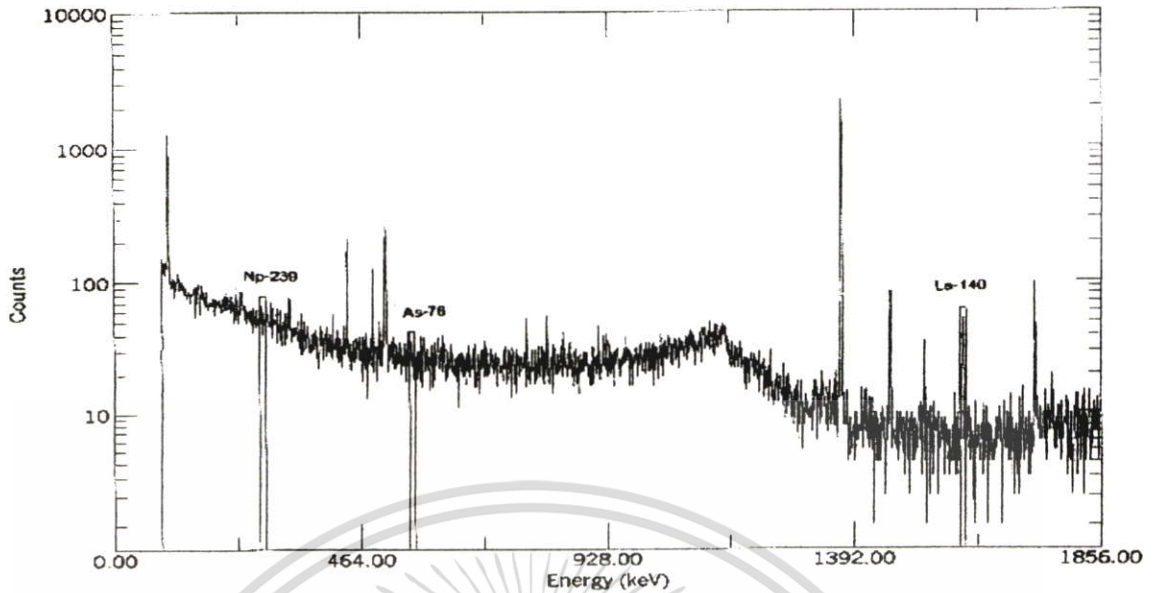


รูปที่ ๘.8 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเส้นของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 1 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

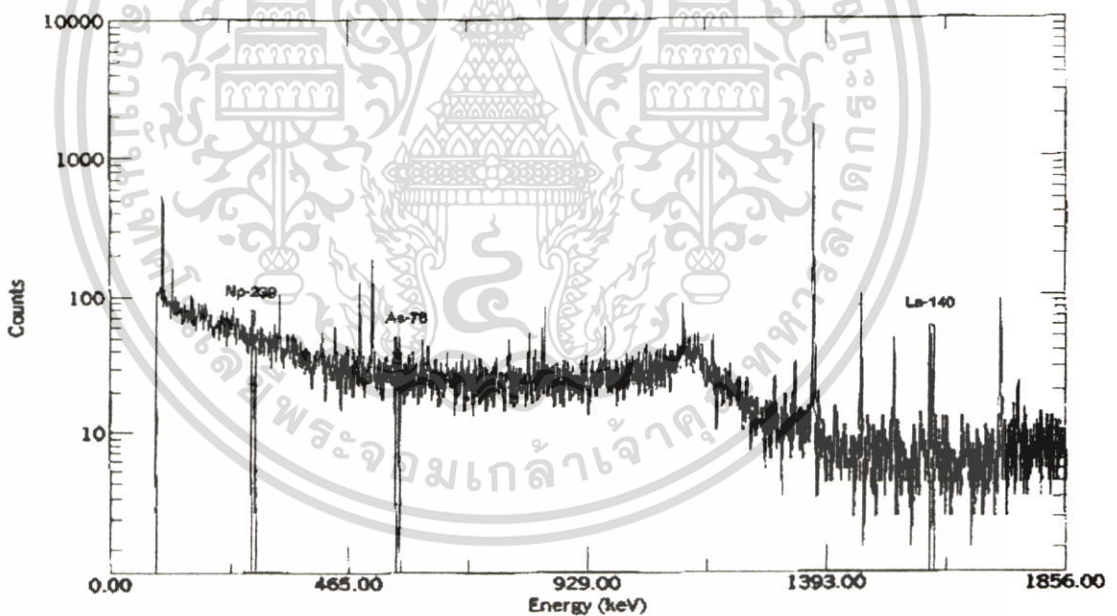


รูปที่ ๘.9 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเส้นของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 2 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

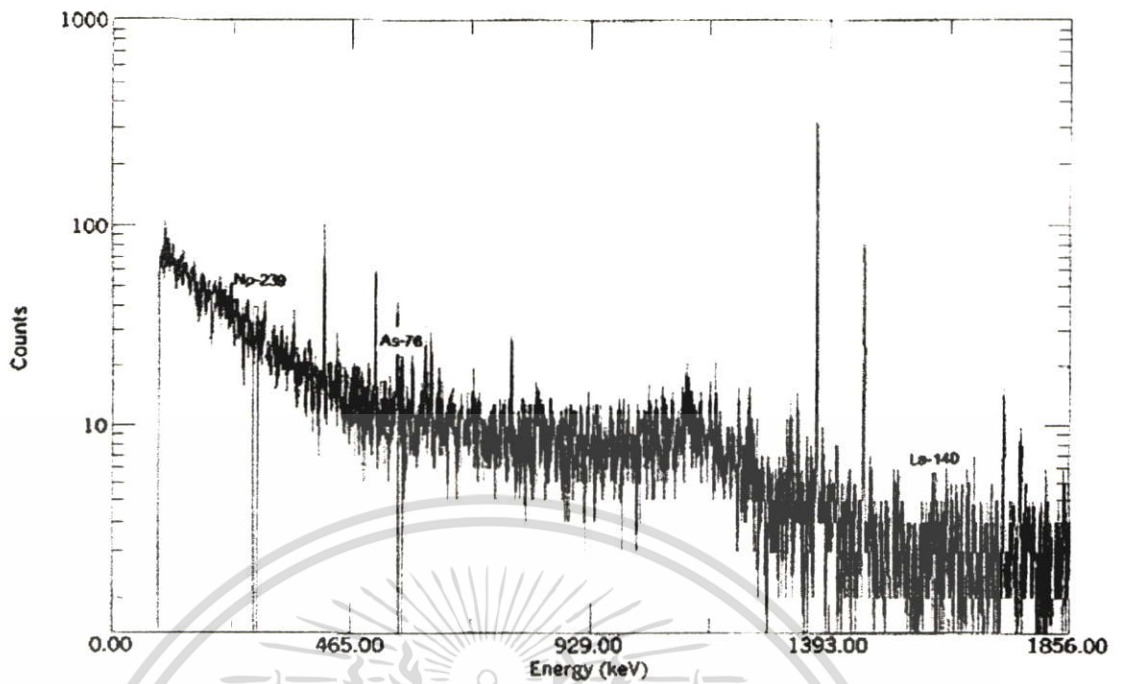


รูปที่ ๑.10 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 3 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

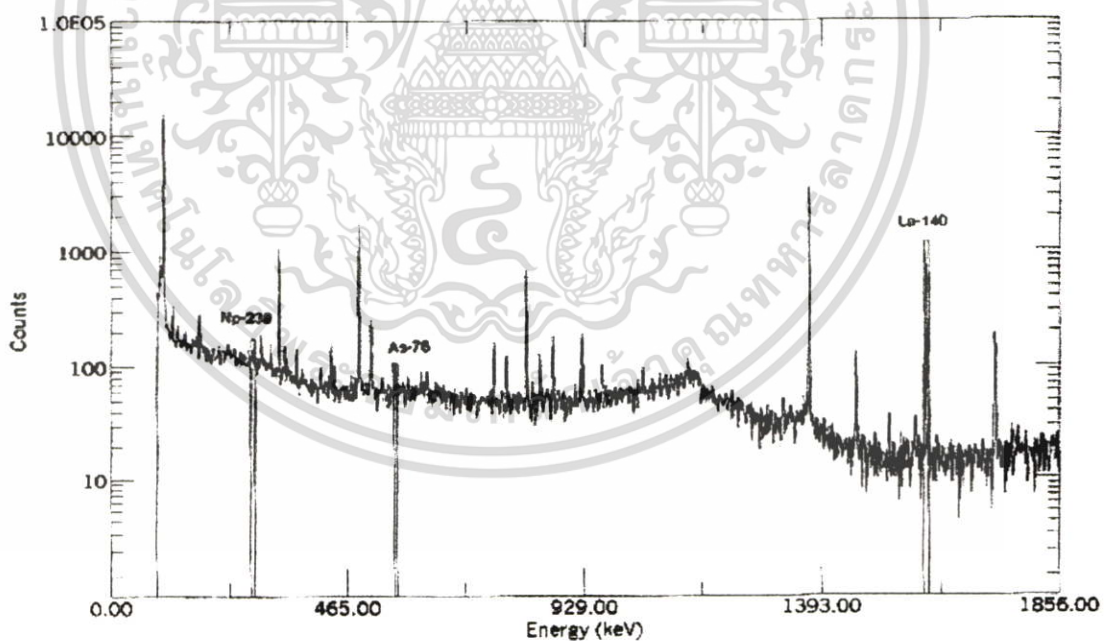


รูปที่ ๑.11 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 4 หลังจากอาบรังสี นิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

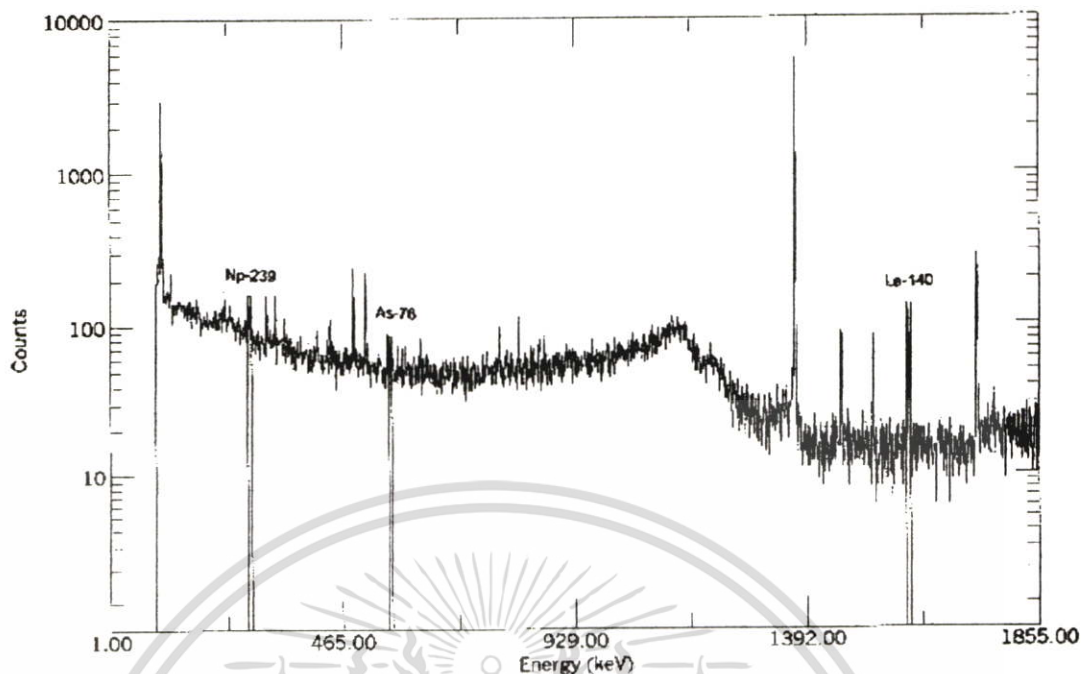


รูปที่ ๑๒.12 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 5 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

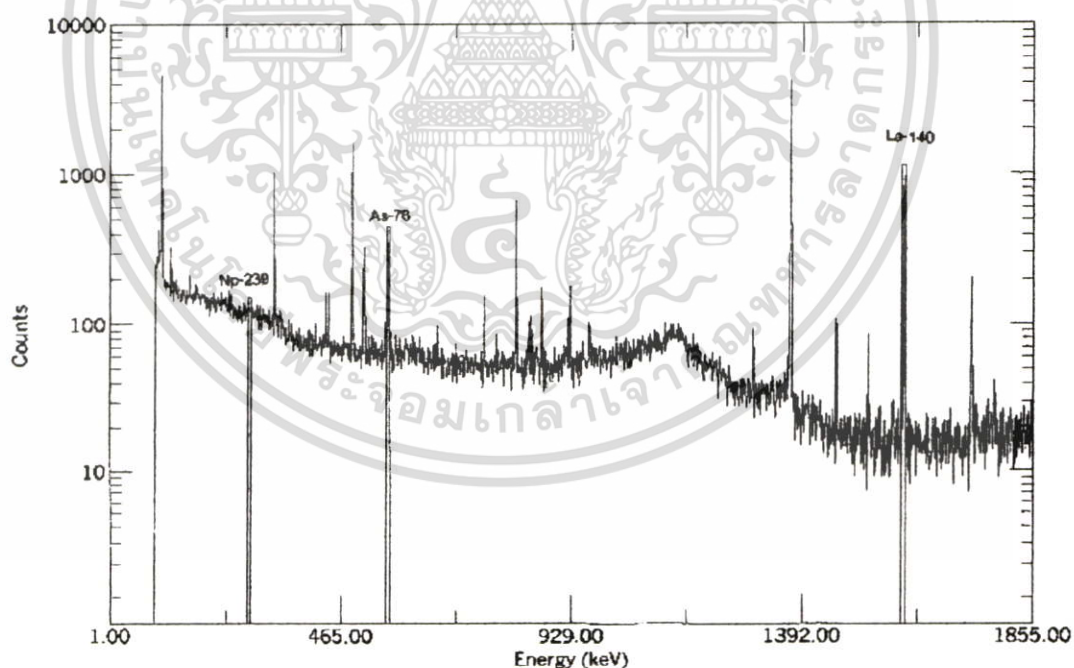


รูปที่ ๑๒.13 แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเก็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 6 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

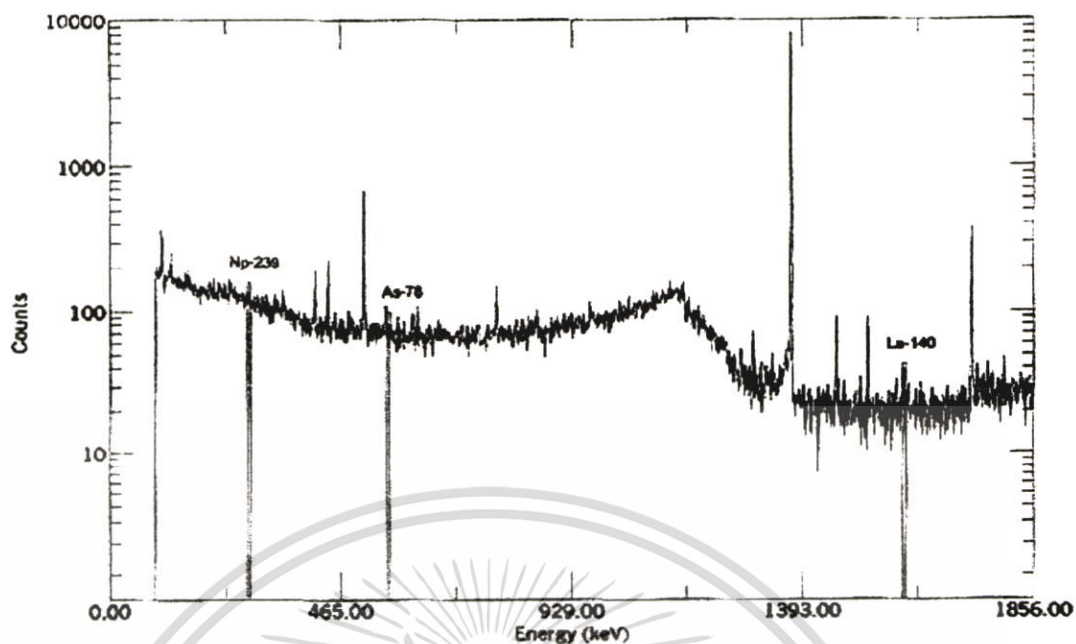


รูปที่ ๑๔ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 7 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

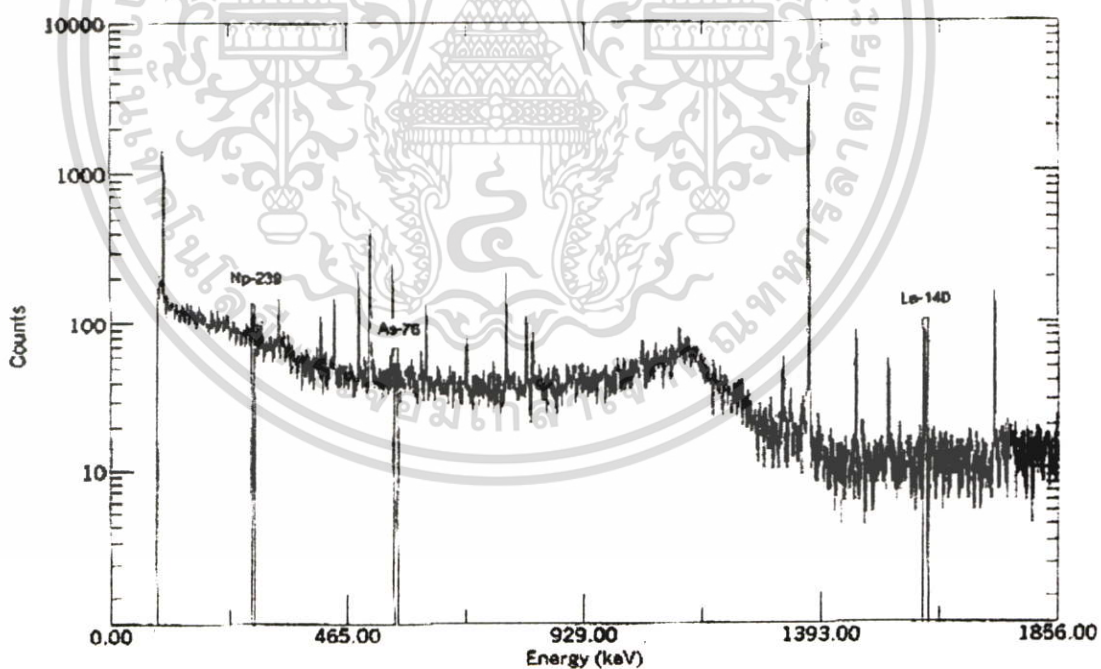


รูปที่ ๑๕ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานชายคนที่ 8 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

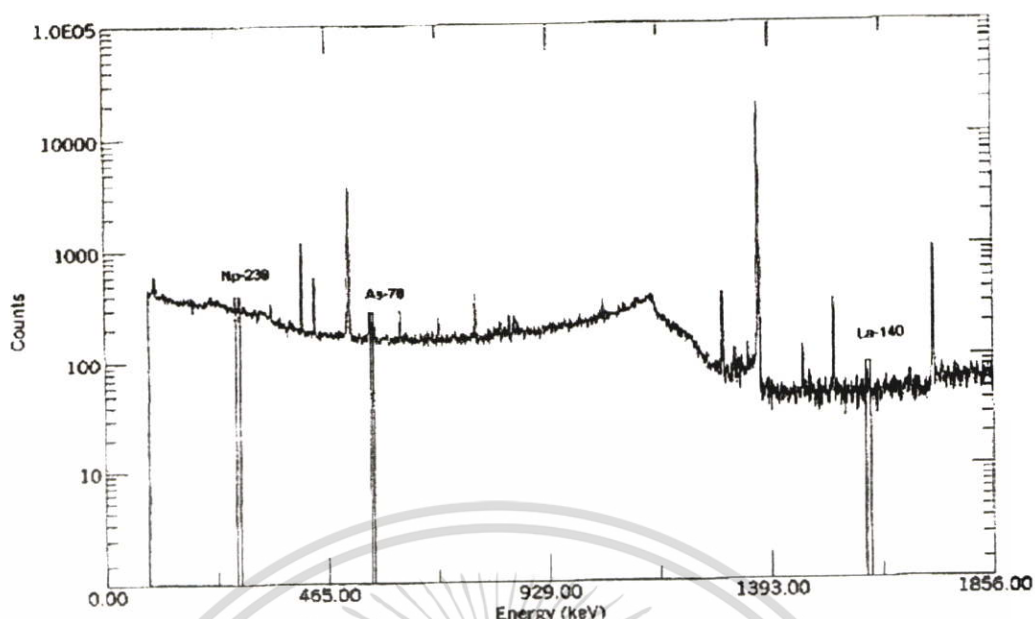


รูปที่ ๑๖ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 1 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

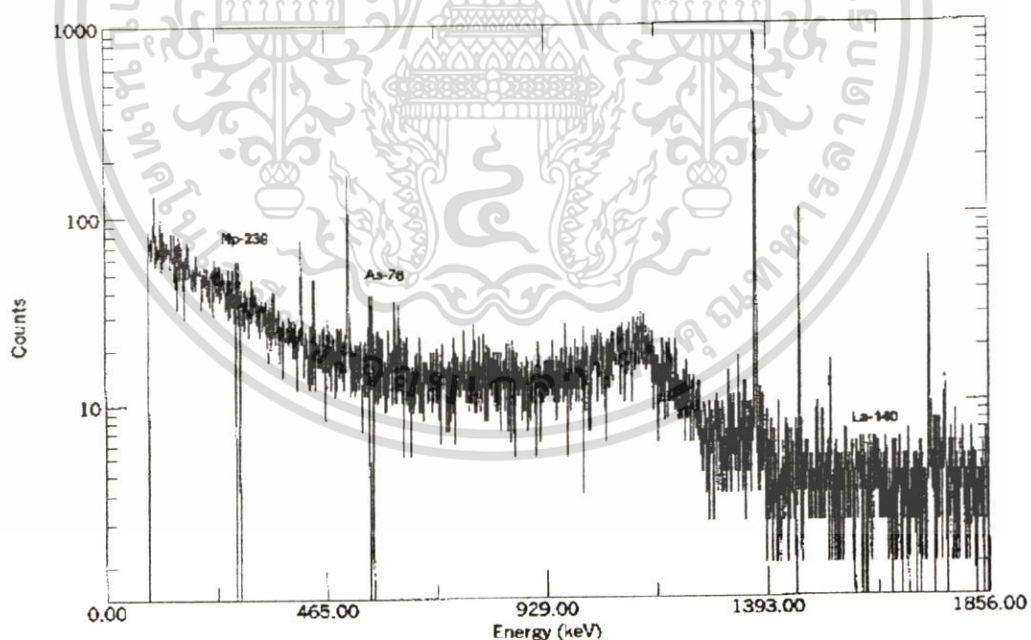


รูปที่ ๑๗ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ปฏิบัติงานหญิงคนที่ 2 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑๘ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม แลนทานัม และสาร์หนู คนที่ 1 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที



รูปที่ ๑๙ แสดงสเปกตรัมรังสีแกมมาจากตัวอย่างเล็บของผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องกับยูเรเนียม แลนทานัม และสาร์หนู คนที่ 2 หลังจากอาบรังสีนิวตรอนนาน 10 ชั่วโมง และปล่อยให้สลายตัวนาน 12 ชั่วโมง ใช้เวลาในการวัดรังสีนาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ญ

## Certificate of Analysis

National Institute of Standards & Technology

## Certificate of Analysis

Standard Reference Material 1547

Peach Leaves

Table 1. Certified Concentrations of Constituent Elements

Element	Concentration, wt. percent	
Calcium	1.56	± 0.02
Magnesium	0.432	± 0.008
Nitrogen (Total)	2.94	± 0.12
Phosphorus	0.137	± 0.007
Potassium	2.43	± 0.03

Element	Concentration, $\mu\text{g/g}$	Element	Concentration, $\mu\text{g/g}$
Aluminum	249 ± 8	Mercury	0.031 ± 0.007
Arsenic	0.060 ± 0.018	Molybdenum	0.060 ± 0.008
Barium	124 ± 4	Nickel	0.69 ± 0.09
Boron	29 ± 2	Rubidium	19.7 ± 1.2
Cadmium	0.026 ± 0.003	Selenium	0.120 ± 0.009
Chlorine	360 ± 19	Sodium	24 ± 2
Copper	3.7 ± 0.4	Strontium	53 ± 4
Iron	218 ± 14	Vanadium	0.37 ± 0.03
Lead	0.87 ± 0.03	Zinc	17.9 ± 0.4
Manganese	98 ± 3		

Table 2. Noncertified Concentrations of Constituent Elements

Element	Concentration, wt. percent
Nitrogen (Kjeldahl)	(2.96)
Sulfur	(0.2)

Element	Concentration, $\mu\text{g/g}$	Element	Concentration, $\mu\text{g/g}$
Antimony	(0.02)	Lanthanum	(9)
Bromine	(11)	Neodymium	(7)
Cerium	(10)	Samarium	(1)
Chromium	(1)	Scandium	(0.04)
Cobalt	(0.07)	Terbium	(0.1)
Europium	(0.17)	Thorium	(0.05)
Gadolinium	(1)	Tin	(< 0.2)
Iodine	(0.3)	Uranium	(0.015)
		Ytterbium	(0.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNITED STATES ATOMIC ENERGY COMMISSION  
NEW BRUNSWICK LABORATORY  
CERTIFICATE OF ANALYSIS

ANALYZED SAMPLE NO. 77-A  
URANIUM ORE

Uranium 0.0010 Per Cent\*

This material was made by mixing weighed quantities of a 1% uranium material with dunite. The 1% sample was similarly prepared from pitchblende ore (U = 58.26% and dunite. Radium and uranium analyses of the original pitchblende showed a ratio of  $3.44 \times 10^{-7} \frac{\text{gm Ra.}}{\text{gm U}}$ .

\*Chemical analyses for uranium were performed on several bottles of the final preparation giving the result shown above with an absolute standard deviation of 0.00009%.

*Carleton D. Bingham*  
Carleton D. Bingham  
Director

New Brunswick, New Jersey  
April 8, 1971

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



National Institute of Standards & Technology

## Certificate of Analysis

Standard Reference Material® 1566b

Oyster Tissue

This Standard Reference Material (SRM) is intended primarily for use in evaluating analytical methods and instruments used for the determination of the concentrations of selected elements and proximates, selected fatty acids, total dietary fiber, as well as the caloric content in marine bivalve tissue, foods, or similar materials. A unit of SRM 1566b contains approximately 25 g of freeze-dried oyster tissue.

**Certified Concentrations of Constituent Elements:** Certified values for 22 elements and for methylmercury are provided in Table 1. A NIST certified value is a value for which NIST has the highest confidence in its accuracy in that all known or suspected sources of bias have been fully investigated or accounted for by NIST. Certified values are based on results obtained by a single primary method with confirmation by other methods, or with two or more critically evaluated independent methods [1]. The certified value for sulfur is the result of a single NIST method. All other certified values are weighted means of results obtained using two or more independent methods.

**Reference Concentration Values:** Reference values are noncertified values that are the best estimates of the true values; however, the values do not meet NIST criteria for certification. Such values are provided with associated uncertainties that may reflect only measurement precision, may not include all sources of uncertainty, or may reflect a lack of sufficient statistical agreement among multiple analytical methods. Reference values for elemental concentrations are provided in Table 2. Reference values for proximates, nitrogen, total dietary fiber, selected fatty acids, and caloric content are provided in Table 3.

**Information Concentration Values:** Information concentration values for selected fatty acids are provided in Table 4. These are noncertified values with no reported uncertainties as there is insufficient information to assess uncertainties. The information values are given to provide additional characterization of the material, and are not recommended for use to monitor or assess analytical performance.

**Expiration of Certification:** The certification of this SRM lot is valid until 01 June 2010, within the measurement uncertainties specified, provided the SRM is handled and stored in accordance with the instructions given in this certificate. However, the certification is nullified if the SRM is contaminated or modified.

**Maintenance of SRM Certification:** NIST will monitor this SRM over the period of certification. If substantive changes occur that affect the certification prior to the expiration of this certificate, NIST will notify the purchaser. Return of the attached registration card will facilitate notification.

The coordination of the technical measurements leading to the certification of this SRM was performed by R.R. Greenberg of the NIST Analytical Chemistry Division. Coordination of technical measurements of organic compounds and methylmercury leading to certified, reference, and information values was performed by K.E. Sharpless and S.A. Wise of the NIST Analytical Chemistry Division.

The NIST analysts and cooperating laboratories that participated in the characterization of this SRM are listed in Appendix A.

The support aspects involved in the preparation, certification, and issuance of this SRM were coordinated through the NIST Standard Reference Materials Program by J.C. Colbert.

Willie E. May, Chief  
Analytical Chemistry Division

Gaithersburg, MD 20899  
Certificate Issue Date: 17 January 2001

Nancy M. Trahey, Chief  
Standard Reference Materials Program

SRM 1566b

Page 1 of 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of the oyster tissue material was performed by B.J. Porter of the NIST Analytical Chemistry Division, and M.P. Cronise, C.N. Fales, and D.G. Friend of the NIST Standard Reference Materials Program.

The statistical analysis of the data was performed by J.H. Yen, L.M. Gill, and M.S. Levenson of the NIST Statistical Engineering Division.

#### NOTICE AND WARNING TO USERS

**Storage:** The material should be kept in its original bottle, tightly closed, and stored in a desiccator over magnesium perchlorate  $Mg(ClO_4)_2$ , at temperatures between 10 °C to 30 °C. It should NOT be exposed to intense sources of radiation, including ultraviolet light or sunlight.

**Use:** A minimum sample mass of 250 mg of material is necessary for any certified value in Table 1 to be valid within the stated uncertainty. This amount of material should be on a dry-mass basis (see Instructions for Drying). The contents of the bottle should be shaken well before each use, closed tightly immediately after use, and stored as described above.

**Instructions for Drying:** Prior to removal of subsamples for elemental analysis, the contents of the bottle should be thoroughly mixed. Before the mass determination, samples of SRM 1566b must be dried to constant mass by one of the following procedures:

1. Drying at room temperature for at least 5 d over  $Mg(ClO_4)_2$  in a desiccator.
2. Vacuum drying at room temperature for at least 24 h at a pressure of approximately 30 Pa (0.2 mm Hg) using a cold trap.
3. Freeze drying for at least 5 d at a pressure of approximately 30 Pa (0.2 mm Hg).

The analyst should ascertain that the material has indeed reached constant mass. Although the above procedures have been generally sufficient, in a few instances the time needed to reach constant mass was longer than listed above. If the constituents of interest are volatile, a separate subsample of the oyster tissue should be removed from the bottle at the time of analysis and dried to determine the concentration on a dry-mass basis.

#### SOURCE, PREPARATION, AND ANALYSIS<sup>1</sup>

**Source and Preparation of Material:** The oysters (*Crassostrea virginica*, an American Eastern oyster) used for the preparation of SRM 1566b were purchased from Bon Secour Fisheries, Inc., Bon Secour, AL. The oysters were collected from the Gulf of Mexico, shucked, rinsed twice to remove sediment and shells, packed and sealed in polyethylene bags, and frozen. The frozen oysters and fluids were shipped in styrofoam coolers containing dry ice to NIST. At NIST, the oysters and fluids were ground in a Robot-Coupe Vertical Cutter Mixer that was equipped with a stainless steel bowl and titanium blades. The oyster tissue was blended for 100 s into a slurry; approximately 5 kg of slurry was poured into each of 40 specially cleaned aluminum trays outfitted with temperature probes, and frozen at -20 °C. The trays were taken to a large freeze-drying facility at the Frederick Cancer Research and Development Center, Natural Products Group in Frederick, MD. The freeze-dryer's initial temperature was -45 °C and gradually increased to a temperature of 10 °C over a period of five days. The freeze-dried material was stored at -20 °C, then broken into smaller pieces, blended in the Robot-Coupe Mixer, jet milled, and homogenized in a V-blender for 30 min to 40 min. The material was radiation sterilized (<sup>60</sup>Co) at Neutron Products, Inc., Dickerson, MD, for approximately 5 h at 3 Mrad and then aliquoted into amber bottles.

#### Description of Calculations Used in Value Assignment

##### A. Certified Values and Their Uncertainties

##### Sulfur

The certified value of sulfur is the result of a single NIST method, thermal ionization mass spectrometry (TIMS), with confirmation by a second NIST method. Its uncertainty is expressed as an expanded uncertainty,  $U$ , and is calculated as  $U = k u_c$ . The quantity,  $u_c$ , is the combined standard uncertainty calculated according to the ISO Guide [2] that accounts for the combined components of uncertainty for the method at one standard deviation. The coverage factor,  $k$ , is determined from the Student's  $t$ -distribution corresponding to five degrees of freedom and a 95 % prediction interval.

<sup>1</sup>Certain commercial equipment, instrumentation, or materials are identified in this certificate to specify adequately the experimental procedure. Such identification does not imply recommendation or endorsement by the NIST, nor does it imply that the materials or equipment identified are necessarily the best available for the purpose.

## Methylmercury

The results for methylmercury are expressed as mg/kg mercury. The certified value is the mean of results from four different laboratory analyses of SRM 1566b using four different analytical methods. The expanded uncertainty in the certified value is equal to  $U = k u_c$  where  $u_c$  is the combined standard uncertainty calculated according to the ISO Guide [2] and  $k$  is the coverage factor. The value,  $u_c$ , is intended to represent, at the level of one standard deviation, the combined effect of all the uncertainties in the certified value. Here,  $u_c$  is given by the standard error of the mean of the four analyses. The coverage factor,  $k$ , is determined from the Student's  $t$ -distribution corresponding to three degrees of freedom and 95 % confidence for each analyte.

## All Other Elements

All other certified values are weighted means of results from two or more analytical methods. For these certified values, the uncertainty is calculated as  $U = k u_c + B$ . The quantity,  $u_c$ , is the combined standard uncertainty calculated according to the ISO Guide [2], which accounts for the combined effect of the within variance for all methods at one standard deviation. The coverage factor,  $k$ , is determined from the Student's  $t$ -distribution corresponding to the appropriate associated degrees of freedom and 95 % confidence for each element. The term,  $B$ , is a bias adjustment for the difference between methods which is the maximum difference between the certified value and the method means [3]. Because of heterogeneity, the uncertainty associated with calcium and thorium takes the form of a prediction interval.

Table 1. Certified Concentration Values of SRM 1566b<sup>1</sup>

Element	Mass Fraction (%)	Element	Mass Fraction (%)
Calcium <sup>a,b</sup>	0.0838 ± 0.0020	Potassium <sup>k,l,k</sup>	0.652 ± 0.009
Chlorine <sup>a,b</sup>	0.514 ± 0.010	Sodium <sup>b,a</sup>	0.3297 ± 0.0053
Magnesium <sup>c,m</sup>	0.1085 ± 0.0023	Sulfur <sup>d,i</sup>	0.6887 ± 0.0140
Element	Mass Fraction (mg/kg)	Element	Mass Fraction (mg/kg)
Aluminum <sup>k,l</sup>	197.2 ± 6.0	Mercury <sup>a,n</sup> (total)	0.0371 ± 0.0013
Arsenic <sup>k,l</sup>	7.65 ± 0.65	Methylmercury <sup>a,p,q,r</sup> (as mercury)	0.0132 ± 0.0007
Cadmium <sup>k,b</sup>	2.48 ± 0.08	Nickel <sup>k,l</sup>	1.04 ± 0.09
Cobalt <sup>d</sup>	0.371 ± 0.009	Rubidium <sup>k,m</sup>	3.262 ± 0.145
Copper <sup>k,m</sup>	71.6 ± 1.6	Selenium <sup>k,l</sup>	2.06 ± 0.15
Iron <sup>k,m</sup>	205.8 ± 6.8	Silver <sup>k,l</sup>	0.666 ± 0.009
Lead <sup>c</sup>	0.308 ± 0.009	Thorium <sup>c,d</sup>	0.0367 ± 0.0043
Manganese <sup>c,m</sup>	18.5 ± 0.2	Vanadium <sup>c,d</sup>	0.577 ± 0.023
		Zinc <sup>f</sup>	1 424 ± 46

<sup>1</sup> Dry-mass basis<sup>2</sup> Analytical Methods:<sup>a</sup> Cold vapor atomic absorption spectrometry at NIST<sup>b</sup> Flame atomic emission spectrometry at NIST<sup>c</sup> Isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST<sup>d</sup> Isotope dilution thermal ionization mass spectrometry at NIST<sup>e</sup> Inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST<sup>f</sup> Inductively coupled plasma optical emission spectrometry at NIST<sup>g</sup> Neutron activation analysis (instrumental) at NIST<sup>h</sup> Neutron activation analysis (radiochemical) at NIST<sup>i</sup> Prompt gamma activation analysis at NIST<sup>j</sup> Electrothermal atomic absorption spectrometry at National Research Council of Canada (NRCC)<sup>k</sup> Isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry at NRCC<sup>l</sup> Inductively coupled plasma mass spectrometry at NRCC<sup>m</sup> Inductively coupled plasma optical emission spectrometry at NRCC<sup>n</sup> Neutron activation analysis (radiochemical) at Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia<sup>o</sup> Gas chromatography with atomic emission detection at NIST<sup>p</sup> Gas chromatography with atomic fluorescence detection at Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia<sup>q</sup> Cold vapor atomic absorption spectrometry at Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia<sup>r</sup> Cold vapor atomic absorption spectrometry at Research Centre Jülich, Jülich, Germany

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2. Reference Concentration Values of SRM 1566b<sup>1</sup>

These concentrations are provided as reference values because the results have not been confirmed by an independent analytical technique as required for certification; therefore unrecognized bias may exist for some measurands in this matrix.

Element	Mass Fraction (%)		
Nitrogen <sup>a</sup>	7.6 ± 0.4		
Element	Mass Fraction (mg/kg)	Element	Mass Fraction (mg/kg)
Antimony <sup>b</sup>	0.011 ± 0.002	Strontium <sup>c</sup>	6.8 ± 0.2
Barium <sup>d</sup>	8.6 ± 0.3	Tin <sup>c</sup>	0.031 ± 0.008
Boron <sup>a</sup>	4.5 ± 1.9	Uranium <sup>d</sup>	0.2550 ± 0.0014
Hydrogen <sup>a</sup>	7.2 ± 0.4		

<sup>1</sup> Dry-mass basis

<sup>2</sup> Analytical Methods:

<sup>a</sup> Prompt gamma activation analysis at NIST

<sup>b</sup> Neutron activation analysis (instrumental) at NIST

<sup>c</sup> Inductively coupled plasma mass spectrometry at NIST

<sup>d</sup> Isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry at NRCC, Ottawa, Canada

Table 3. Reference Concentration Values of Proximates, Nitrogen, Total Dietary Fiber, Selected Fatty Acids (as Triglycerides) and Calories in SRM 1566b

These concentrations are provided as reference values because the results have not been confirmed by an independent analytical technique as required for certification; therefore unrecognized bias may exist for some measurands in this matrix.

Constituent	Mass Fraction as received (%) <sup>a</sup>	Mass Fraction dry-mass basis (%) <sup>a</sup>
Moisture	4.6 ± 3.6	0 (by definition)
Solids	95.4 ± 3.6	100 (by definition)
Carbohydrates	43.4 ± 3.2	45.4 ± 1.7
Ash	3.87 ± 0.09	4.05 ± 0.15
Fat	5.5 ± 1.2	5.8 ± 1.1
Protein <sup>b</sup>	42.6 ± 1.3	44.7 ± 2.6
Protein Nitrogen <sup>b</sup>	6.82 ± 0.20	7.16 ± 0.42
Total Dietary Fiber	6.5 ± 1.6	6.8 ± 1.4
Caloric Content <sup>c</sup>	(394 ± 20) kcal/100 g	(412.7 ± 5.9) kcal/100 g
Tetradecanoic Acid (C14:0) (Myristic Acid)	0.403 ± 0.075	0.421 ± 0.057
Pentadecanoic Acid (C15:0)	0.079 ± 0.016	0.083 ± 0.013
Hexadecanoic Acid (C16:0) (Palmitic Acid)	2.16 ± 0.20	2.27 ± 0.15
(Z)-9-Hexadecenoic Acid (C16:1) (Palmitoleic Acid)	0.362 ± 0.064	0.379 ± 0.063
Heptadecanoic Acid (C17:0) (Margaric Acid)	0.168 ± 0.022	0.178 ± 0.023
Octadecanoic Acid (C18:0) (Stearic Acid)	0.424 ± 0.054	0.444 ± 0.041
(Z)-9-Octadecenoic Acid (C18:1) (Oleic Acid)	0.86 ± 0.20	0.90 ± 0.21
(all-Z)-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic Acid (C20:5) (Tinnodonic Acid)	0.065 ± 0.012	0.068 ± 0.014

<sup>a</sup> Each reference value, expressed as a mass fraction of the material on an as-received or dry-mass basis, for the above measurands is an equally weighted mean of results from the cooperating laboratories listed in Appendix A. Each of four laboratories analyzed one portion from each of three bottles of SRM 1566b using their routine methods. Determinations were performed on the material "as received," with conversion of results to a dry mass basis using moisture values determined by the four laboratories on separate subsamples taken from each of the three bottles. The uncertainty in the reference values is expressed as an expanded uncertainty,  $U$ , at the 95 % level of confidence, and is calculated according to the method described in the ISO Guide [2]. The expanded uncertainty is calculated as,  $U = k u_c$ , where,  $u_c$  is intended to represent, at the level of one standard deviation, the combined effect of between-laboratory and within-laboratory components of uncertainty. The coverage factor,  $k$ , is determined from the Student's  $t$ -distribution corresponding to the appropriate associated degrees of freedom and 95 % confidence for each analyte. Analytical methodology information is provided in Table 5.

<sup>b</sup> The protein concentration was calculated from the nitrogen values reported by the laboratories using a conversion factor of 6.25. The value for protein is the mean of the individual protein calculations. If the mean nitrogen values above are used for calculation, the mean protein concentrations are 42.6 % and 44.7 % on a wet mass and dry mass basis, respectively.

<sup>c</sup> The value for caloric content is the mean of the individual caloric calculations. If the mean proximate values are used for calculation, with caloric equivalents of 9, 4, and 4 for fat, protein, and carbohydrate, respectively, the mean caloric content is 394 kcal/100 g and 412.7 kcal/100 g on an as-received and dry-mass basis, respectively.

Table 4. Information Concentration Values of Selected Fatty Acids (as Triglycerides)

These concentrations are provided as information values only because the disagreement among the results was greater than expected for reference values or because results were reported by a limited number of laboratories. The data for these information values are not of sufficient quality or quantity to adequately assign uncertainties.

Fatty Acid	Mass Fraction, as received (%) <sup>a</sup>	Mass Fraction, dry-mass basis (%) <sup>b</sup>
(E)-9-Octadecenoic Acid (C18:1) (Elaidic Acid)	0.16	0.17
(Z,Z)-9,12-Octadecadienoic Acid (C18:2) (Linoleic Acid)	0.097	0.10
(all Z)-5,8,11,14-Eicosatetraenoic Acid (C20:4) (Arachidonic Acid)	0.029	0.031
Docosanoic Acid (C22:0) (Behenic Acid)	0.017	0.018
Tetracosanoic Acid (C24:0) (Lignoceric Acid)	0.022	0.023

<sup>a</sup> Each information value, reported on an as-received and dry-mass basis, is the equally weighted mean of results reported by the laboratories shown in Appendix A. These values are based on results from determinations by two to four of the laboratories and are included to provide additional characterization of the material; no uncertainties are provided. Analytical methodology information is provided in Table 5.

<sup>b</sup> Determinations were performed on the material "as received," with conversion of results to a dry-mass basis using moisture values determined by the four laboratories on separate subsamples taken from each of three bottles.

Table 5. Analytical Methods Used by Collaborating Laboratories for the Determination of Proximates, Fatty Acids, Calories, and Total Dietary Fiber in SRM 1566b

Ash	mass loss after ignition in a muffle furnace
Calories	calculated: [(9 × fat) + (4 × protein) + (4 × carbohydrate)]
Carbohydrate	calculated: [solids – (protein + fat + ash)]
Fat	sum of individual fatty acids
Fatty acids	hydrolysis followed by gas chromatography
Moisture	mass loss after drying in a vacuum oven (3 laboratories) or forced-air oven (1 laboratory)
Protein nitrogen	Dumas (1 laboratory); modified Dumas (1 laboratory); Kjeldahl (2 laboratories)
Protein	calculated from nitrogen using a factor of 6.25
Solids	calculated: (sample mass – moisture)
Total dietary fiber	enzymatic gravimetry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## REFERENCES

- [1] May, W., Parris, R., Beck, C., Fassett, J., Greenberg, R., Guenther, F., Kramer, G., Wise, S., Gills, T., Colbert, J., Gettings, R., and MacDonald, B., "Definitions of Terms and Modes Used at NIST for Value-Assignment of Reference Materials for Chemical Measurements," NIST Special Publication 260-136, January 2000; available at [http://www.cstl.nist.gov/nist\\_839/srminfo.html](http://www.cstl.nist.gov/nist_839/srminfo.html).
- [2] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISBN 92-67-10188-9, 1st Ed. ISO, Geneva, Switzerland, 1993; see also Taylor, B.N. and Kuyatt, C.E., *Guidelines for Evaluating and Expressing Uncertainty of NIST Measurement Results*, NIST Technical Note 1297, U.S. Government Printing Office, Washington DC, (1994); available at <http://physics.nist.gov/Pubs/>.
- [3] Schiller, S. and Eberhardt, K., "Combining Data from Independent Chemical Analysis Methods," *Spectrochimica Acta*, 46B, No. 12, pp. 1607-1613, (1991).



*Users of this SRM should ensure that the certificate in their possession is current. This can be accomplished by contacting the SRM Program at: telephone (301) 975-6776; fax (301) 926-4751; e-mail [srminfo@nist.gov](mailto:srminfo@nist.gov); or via the Internet <http://www.nist.gov/srm>.*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Appendix A

## NIST Analysts, Analytical Chemistry Division, National Institute of Standards and Technology

B. Buchler	E.A. Mackey
T.A. Butler	J.L. Mann
R. Demiralp	K.E. Murphy
M.S. Epstein	M.S. Rearick
M.E. Howard	S. Tutschku
W.R. Kelly	R.D. Vocke, Jr.
R.M. Lindstrom	L.L. Yu
S.E. Long	

## Collaborating Laboratories and Analysts for Elemental Determinations

Analytical Chemistry Division, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, V. Boyko, J. Lam, S. Willie, and L. Yang

Jožef Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia - H. Akagi, V. Fajon, M. Horvat, K. Jereb, and M. Logar  
Research Center Jülich, Jülich, Germany - H. Emons and K. May

## Collaborating Laboratories for Proximates, Fatty Acids, Total Dietary Fiber, and Calorie Determinations

Covance Laboratories, Madison, WI, USA  
Lancaster Laboratories, Lancaster, PA, USA  
Medallion Laboratories, Minneapolis, MN, USA  
Southern Testing and Research Laboratories, Wilson, NC, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	สุภลักษณ์ คงศรี
วัน เดือน ปีเกิด	6 พฤศจิกายน 2523 ที่ จ.ขอนแก่น
ที่อยู่	152 ซ.ลาดพร้าว 87 ถ.ลาดพร้าว เขตวังทองหลาง แขวงวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310 โทร.02-5384133, 09-4494575
E-mail address	kung_s@hotmail.com
ประวัติการศึกษา	2541-2545 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม 2536-2541 มัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย ร.ขอนแก่นวิทยายน จ.ขอนแก่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้