

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

- ก.1 สมดุลกัมมันตรังสี
- ก.2 การคำนวณปริมาณรังสีต่อปี
- ก.3 การเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี
- ก.4 การคำนวณปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน
- ก.5 รายละเอียดสเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด
- ก.6 รายละเอียดโกลว์เคิร์ฟของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน
- ก.7 ใช้น้ำหนักสารอ้างอิงมาตรฐาน NIST (NIST SRM 1633b) กับ Granodiorite, Silver Plume, Colorado (GSP-2) และตัวอย่าง สำหรับเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอนโดยการอาบนิวตรอน
- ก.8 โครงสร้างผลึกออร์โทไควนซ์-แคลไซต์ ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก.1 สมดุลกัมมันตรังสี

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีนั้นจะเกิดการสลายตัวแบบต่อเนื่อง ในทางฟิสิกส์นิวเคลียร์ สมดุลแบบถาวร (Secular equilibrium) เป็นการสลายตัวอย่างต่อเนื่องของธาตุกัมมันตรังสี โดยสถานะที่ธาตุกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ลูกเท่ากับนิวไคลด์แม่ หลังจากผ่านการสลายตัวไประยะเวลาหนึ่งแสดงในรูปที่ ก.1.1

สมดุลกัมมันตรังสีแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์แม่มีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกมาก ประมาณ 10^4 เท่าหรือมากกว่าคือ

$$T_{1/2(A)} \gg T_{1/2(B)}$$

หรือ

$$\lambda_A \ll \lambda_B$$

โดย λ_A และ λ_B คือ ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี A และ B ที่ความสัมพันธ์กับค่าครึ่งชีวิต $T_{1/2(A)}$ และ $T_{1/2(B)}$ โดย $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$ ตามลำดับ และ N_A และ N_B คือ จำนวนอะตอมของธาตุ A และ B ที่เวลา t ใด ๆ

พิจารณาการสลายของธาตุกัมมันตรังสีแบบอนุกรมของนิวไคลด์แม่อย่างเดียว แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดนิวไคลด์ลูก B เพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกัน B ก็สลายต่อไปเป็น C และอื่นๆ จนในที่สุดเกิดสมดุล

เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของ B จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการสลายของ B ไปเป็น C เพิ่มขึ้นด้วยในที่สุดจะถึงจุดที่อัตราการเกิดของ B เท่ากับอัตราการสลายของ B ไปเป็น C เรียกสถานะนี้ว่า “สมดุลกัมมันตรังสี” คือ สมการ (ก.1.1) เท่ากับ (ก.1.2)

$$N_A^0 = \text{จำนวนอะตอมของ A ที่เวลาเริ่มต้น } t = 0$$

$$N_B^0 = \text{จำนวนอะตอมของ B ที่เวลาผ่านไป } t$$

เมื่อธาตุกัมมันตรังสี A เป็นนิวไคลด์แม่เริ่มต้นสลายตัวด้วยจำนวนอะตอม N_A เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t} \quad (\text{ก.1.1})$$

สมการ (ก.1.1) เป็นสมการการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแม่และการเกิดนิวไคลด์ลูก B เพิ่มขึ้น

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B$$

$$\frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t}$$

นำ $e^{\lambda_B t}$ คูณตลอดสมการจะได้

$$e^{\lambda_B t} \frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B e^{\lambda_B t} = \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} e^{\lambda_B t}$$

คูณตลอดสมการด้วย dt

$$\begin{aligned} e^{\lambda_B t} dN_B + \lambda_B N_B e^{\lambda_B t} dt &= \lambda_A N_A^0 e^{-\lambda_A t} e^{\lambda_B t} dt \\ d(N_B e^{\lambda_B t}) &= \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt \\ \int d(N_B e^{\lambda_B t}) &= \int \lambda_A N_A^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt \\ N_B e^{\lambda_B t} &= \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} + \text{constant} \end{aligned} \quad (ก.1.2)$$

เมื่อ $t = 0$

$$N_B = N_B^0$$

$$N_B^0 = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} + \text{constant}$$

$$\text{constant} = N_B^0 - \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A}$$

แทนค่า constant ในสมการ (ก.1.2) จะได้

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} - \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} + N_B^0$$

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} - 1) + N_B^0$$

นำ $e^{-\lambda_B t}$ คูณตลอดสมการจะได้

$$N_B e^{\lambda_B t} e^{-\lambda_B t} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} e^{-\lambda_B t} - 1 e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t}$$

$$N_B e^{\cancel{\lambda_B t}} e^{-\cancel{\lambda_B t}} = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{\cancel{\lambda_B t}} e^{-\lambda_A t} e^{-\cancel{\lambda_B t}} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t}$$

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t}$$

ถ้าที่เวลา $t = 0$ คือ ก่อนที่ A จะสลายตัว จำนวนนิวไคลด์ของ B เท่ากับศูนย์ คือ $N_B^0 = 0$ จะได้

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + (0) e^{-\lambda_B t}$$

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

และเนื่องจากค่าครึ่งชีวิตของ A มากกว่าครึ่งชีวิต B มาก ดังนั้น λ_A มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ λ_B นั่นคือ $\lambda_A \ll \lambda_B$ ดังนั้น $\lambda_B - \lambda_A \approx \lambda_B$ และ $e^{-\lambda_B t} \rightarrow 0$, จะได้

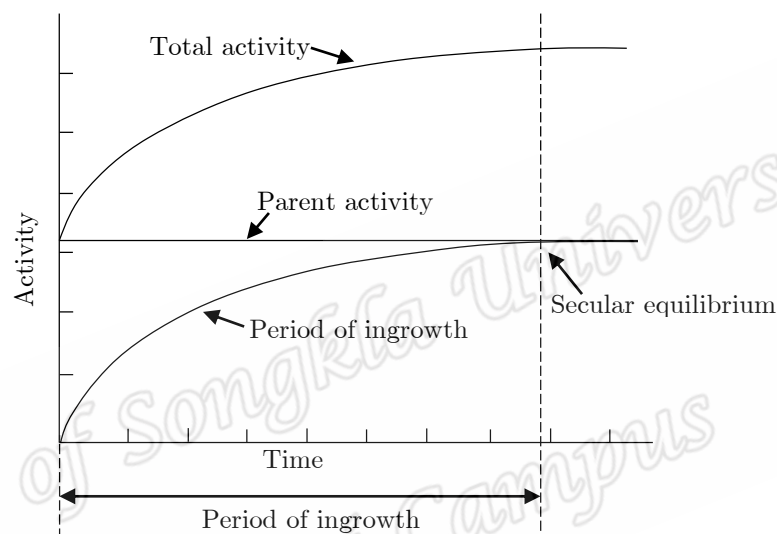
$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_A^0 e^{-\lambda_A t}$$

$$N_B = \frac{\lambda_A}{\lambda_B} N_A$$

เพราะฉะนั้น

$$\lambda_B N_B = \lambda_A N_A$$

รูปที่ ก.1.1 เป็นกราฟแสดงการสมดุลกัมมันตรังสีแบบถาวร จะเห็นได้ว่า กัมมันตภาพรังสีรวมหลังจากเกิดสมดุลกัมมันตรังสีแล้วเท่ากับผลบวกของกัมมันตภาพรังสีของ A และ B ซึ่งกัมมันตภาพรังสีของ A จะเท่ากับ B



รูปที่ ก.1.1 สมดุลแบบถาวรในการสลายตัวของธาตุกัมมันตภาพรังสี

ภาคผนวก ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose or Dose rate)

ปริมาณรังสีต่อปีของผลึกตัวอย่างคำนวณได้จากพลังงานรังสีที่ได้จากการสลายของธาตุ (E_i) ในหน่วย MeV อัตราการสลายตัวของธาตุ (λ_i) ในหน่วย a^{-1} และจำนวนอะตอมของธาตุ (N_i) ในหน่วย kg^{-1} ดังนี้

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \frac{\text{MeV}}{\text{kg}\cdot\text{a}} \quad (\text{ก.2.1})$$

$$= \sum \lambda_i N_i E_i \times 1.60218 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \times 10^{-6} \frac{\text{eV}}{\text{kg}\cdot\text{a}} \quad (\text{ก.2.2})$$

$$= 1.60218 \times 10^{-13} (\sum \lambda_i N_i E_i) \frac{\text{Gy}}{\text{a}} \\ = 1.60218 \times 10^{-10} (\sum \lambda_i N_i E_i) \quad [\text{mGy}/\text{a}] \quad (\text{ก.2.3})$$

เมื่อ $\lambda_i N_i$ คือ จำนวนการสลายตัวต่อปีสามารถคำนวณได้จากค่าครึ่งชีวิต $T_{1/2}$ ได้ดังนี้

$$\lambda_i N_i = \left(\ln \frac{2}{T_{1/2i}} \right) N_i = \left(\frac{0.69315}{T_{1/2i}} \right) N_i \quad (\text{ก.2.4})$$

ซึ่งค่า $T_{1/2}$ ของแต่ละนิวไคลด์แสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{238}U เขียนได้เป็น

$$\lambda_i N_i = \lambda_{i+1} N_{i+1} = \dots = \lambda_{238} N_{i(238)}$$

เมื่อ λ_{238} คือ อัตราการสลายตัวของธาตุ ^{238}U และ N_{238} คือ จำนวนอะตอมของธาตุ ^{238}U ในผลึก (kg^{-1}) สมการดังกล่าวเป็นสมการ “สมดุลกัมมันตรังสีแบบถาวร” ได้มาจากภาคผนวก ก.1 ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีของธาตุยูเรเนียม สามารถเขียนได้เป็น

$$D_U = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{238} N_{238} \sum E_{i(238)}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.2.5})$$

ค่า $T_{1/2}$ ของธาตุ ^{238}U คือ 4.468×10^9 a

$$\lambda_{238} = \frac{0.69315}{T_{1/2(238)}} = \frac{0.69135}{4.468 \times 10^{10} \text{ a}} = 1.55136 \times 10^{-10} \quad [1/\text{a}]$$

$$N_{238} = 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom / mole} \times \frac{1}{238.05 \text{ g / mole}} \times 1 \text{ mg} \times 10^{-30} \text{ g / mg}$$

$$= 2.5300 \times 10^{18}$$

ดังนั้น

$$D_U = (0.062879) \sum E_{i(238)} \quad [\text{mGy / a}]$$

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{232}Th เขียนได้เป็น

$$\lambda_i N_i = \lambda_{i+1} N_{i+1} = \dots = \lambda_{232} N_{232}$$

สมการ (2.19) ในหัวข้อ 2.9.4 คือ ปริมาณรังสีต่อปีของธาตุ ^{232}Th จำนวน 1 ppm (1 mg/kg) ดังนี้

$$D_{\text{Th}} = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{232} N_{232} \sum E_{i(232)}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.2.6})$$

ค่า $T_{1/2}$ ของธาตุ ^{232}U คือ 1.14×10^{10} a

$$\lambda_{232} = \frac{0.69315}{T_{1/2(232)}} = \frac{0.69135}{1.41 \times 10^{10}} = 0.491596 \times 10^{-10} \quad [1/\text{a}]$$

$$N_{232} = 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom / mole} \times \frac{1}{232.038 \text{ g / mole}} \times 1 \text{ mg} \times 10^{-30} \text{ g / mg}$$

$$= 2.56532 \times 10^{18}$$

ดังนั้น

$$D_{\text{Th}} = (0.02514) \sum E_{i(232)} \quad [\text{mGy / a}]$$

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{40}K เขียนได้เป็น

$$\lambda_i N_i = \lambda_{i+1} N_{i+1} = \dots = \lambda_{40} N_{40}$$

ปริมาณรังสีต่อปีของธาตุ ^{40}K จำนวน 1 ppm สามารถเขียนได้ดังนี้

$$D_K = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{40} N_{40} \sum E_{40}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.2.7})$$

ค่า $T_{1/2}$ ของธาตุ ^{40}K คือ 1.277×10^9 a

$$\lambda_{40} = \frac{0.69315}{T_{1/2(40)}} = \frac{0.69135}{1.277 \times 10^9} = 0.542796 \times 10^{-10} \quad [1 / \text{a}]$$

$$N_{40} = 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom / mole} \times \frac{1}{39.0983 \text{ g / mole}} \times 1 \text{ mg} \times 10^{-30} \text{ g / mg}$$

$$= 2.56532 \times 10^{18}$$

ดังนั้น

$$D_K = (0.02514) \sum E_{i(40)} \quad [\text{mGy / a}]$$

ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับธาตุ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K จำนวน 1 ppm สำหรับแต่ละรังสีอัลฟา เบต้า และแกมมา เขียนได้เป็น

$$D_U = (0.062879) \sum E_{i(238),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / a}] \quad (\text{ก.2.8})$$

$$D_{Th} = (0.02514) \sum E_{i(232),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / a}] \quad (\text{ก.2.9})$$

$$D_K = (0.02514) \sum E_{i(40),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / a}] \quad (\text{ก.2.10})$$

ตารางที่ ก.2.1 พลังงานรวมของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา ของอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุโพแทสเซียมตามธรรมชาติ

อนุกรม	พลังงาน (MeV)		
	$E_{\text{total}, \alpha}$	$E_{\text{total}, \beta}$	$E_{\text{total}, \gamma}$
^{238}U	42.806	2.270	1.753
^{232}Th	35.932	1.346	2.482
^{40}K	—	0.506	0.152

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณธาตุยูเรเนียมจำนวน 1 ppm จากพลังงานของรังสีแอลฟา 42.81 MeV ตามสมการ (ก.2.8) ได้ดังนี้

$$D_U = (0.062879) \sum E_\alpha$$

$$= 0.062879 \times 42.806$$

$$= 2.6916 \quad [\text{mGy / a}]$$

ข้อมูลตามตารางที่ ก.2.1 เป็นพลังงานทั้งหมดของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาของอนุกรมการสลายตัว ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ตามธรรมชาติ ปริมาณรังสีต่อปีที่ 1 ppm ของธาตุกัมมันตรังสีจะถูกคำนวณอยู่บนพื้นฐานของพลังงานดังกล่าวได้ค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.2.2 ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา ที่คำนวณได้จากสมการสมดุลกัมมันตรังสีของอนุกรมการสลายตัวของธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ตามธรรมชาติ

การสลายตัว	D_α (mGy/a)	D_β (mGy/a)	D_γ (mGy/a)
^{238}U (1 ppm)	2.692	0.143	0.110
^{232}Th (1 ppm)	0.737	0.028	0.051
^{40}K (%)	–	0.678	0.203

นำข้อมูลตามตารางที่ ก.2.2 มาคำนวณปริมาณรังสีต่อปีโดยอาศัยปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ได้ตามสมการ (ก.2.11 – ก.2.12)

$$D_\alpha = C_U D_{U-\alpha} + C_{Th} D_{Th-\alpha} \quad (\text{ก.2.11})$$

$$D_\beta = C_U D_{U-\beta} + C_{Th} D_{Th-\beta} + C_K D_{K-\beta} \quad (\text{ก.2.12})$$

$$D_\gamma = C_U D_{U-\gamma} + C_{Th} D_{Th-\gamma} + C_K D_{K-\gamma} \quad (\text{ก.2.13})$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

D คือ ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีชนิดต่าง ๆ

ค่าตามตารางที่ ก.2.2 นอกจากจะใช้สมการ (ก.2.11 – ก.2.12) ในการคำนวณค่าดังกล่าวแล้ว สามารถใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณ

$$D_\alpha = C_U (2.692) + C_{Th} (0.737) \quad (\text{ก.2.14})$$

$$D_\beta = C_U (0.143) + C_{Th} (0.028) + C_K (0.678) \quad (\text{ก.2.15})$$

$$D_\gamma = C_U (0.110) + C_{Th} (0.051) + C_K (0.203) \quad (\text{ก.2.16})$$

เมื่อ C_U , C_{Th} และ C_K เป็นปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมในหน่วย ppm และโพแทสเซียมในหน่วย % ที่ได้จากเทคนิค NAA

ตารางที่ ก.2.3 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียม ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและดินเผาไฟ จากแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหวาน จังหวัดสุล

ตัวอย่าง	^{40}K (%)	^{232}Th (ppm)	^{238}U (ppm)	ปริมาณน้ำ, W
SH1	0.220	3.265	1.700	0.00
SD1	1.400	15.716	3.114	0.00
F1	ND	15.600	5.612	0.05

ก.2.3.1 การคำนวณปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดคำนวณจากปริมาณรังสีต่อปีภายในและภายนอก โดยปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) เป็นผลมาจากรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ที่มีอยู่ในผลึกตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเองและปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (D_{ex}) เกิดจากรังสีที่มาจากองค์ประกอบที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวอย่าง

ค่าที่ได้ตามตารางที่ ก.2.3 นำไปแทนค่าในสมการ (ก.2.14 – ก.2.16) สามารถคำนวณหาค่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดได้ดังนี้

ปริมาณรังสีต่อปีภายใน

$$\begin{aligned} D_{in,\alpha} &= (1.700)(2.692) + (3.265)(0.737) \\ &= 6.982 \end{aligned} \quad \text{mGy / a}$$

$$\begin{aligned} D_{in,\beta} &= (1.700)(0.143) + (3.265)(0.028) + (0.220)(0.678) \\ &= 0.482 \end{aligned} \quad \text{mGy / a}$$

$$D_{in,\gamma} = 0 \quad \text{mGy / a}$$

ปริมาณรังสีต่อปีภายนอก

$$D_{ex,\alpha} = 0 \quad \text{mGy / a}$$

$$\begin{aligned} D_{ex,\beta} &= (3.114)(0.143) + (15.716)(0.028) + (1.400)(0.678) \\ &= 1.828 \end{aligned} \quad \text{mGy / a}$$

$$\begin{aligned} D_{ex,\gamma} &= (3.114)(0.110) + (15.716)(0.051) + (1.400)(0.203) \\ &= 1.428 \end{aligned} \quad \text{mGy / a}$$

ตารางที่ ก.2.4 ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) และปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (D_{ex})

ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (mGy/a)		ปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (mGy/a)	
$D_{in,\alpha}$	$D_{in,\beta}$	$D_{ex,\beta}$	$D_{ex,\gamma}$
6.983	0.482	1.828	1.428

ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาในตารางที่ ก.2.6 เป็นค่าทางอุดมคติหรือเป็นค่าที่ได้ 100 % โดยที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความชื้นหรือปริมาณของน้ำในตัวอย่าง แต่ในทางปฏิบัติปริมาณรังสีต่อปีจะถูกการลดทอนด้วยปริมาณน้ำหรือความชื้น ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณรังสีต่อปีที่มีปริมาณน้ำได้จากสมการ (ก.2.17 – ก.2.19) ได้ดังนี้

$$D'_\alpha = D_\alpha / [(1 + 1.49W) / (100 - W)] \quad (\text{ก.2.17})$$

$$D'_\beta = D_\beta / [(1 + 1.25W) / (100 - W)] \quad (\text{ก.2.18})$$

$$D'_\gamma = D_\gamma / [(1 + 1.14W) / (100 - W)] \quad (\text{ก.2.19})$$

ปริมาณรังสีต่อปีภายในที่มีปริมาณน้ำ

$$\begin{aligned} D'_{\text{in},\alpha} &= D_\alpha / [(1 + 1.49W) / (100 - W)] \\ &= 6.982 / [1 + 1.49(0) / (100 - 0)] \\ &= 0.070 \quad \text{mGy / a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D'_{\text{in},\beta} &= D_\beta / [(1 + 1.25W) / (100 - W)] \\ &= 0.482 / [(1 + 1.25(0) / (100 - 0)] \\ &= 0.482 \quad \text{mGy / a} \end{aligned}$$

$$D'_{\text{in},\gamma} = 0 \quad \text{mGy / a}$$

ปริมาณรังสีต่อปีภายนอกที่มีปริมาณน้ำ

$$D'_{\text{ex},\alpha} = 0 \quad \text{mGy / a}$$

$$\begin{aligned} D'_{\text{ex},\beta} &= D_\beta / [(1 + 1.25W) / (100 - W)] \\ &= 1.828 / [(1 + 1.25(0) / (100 - 0)] \\ &= 1.828 \quad \text{mGy / a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D'_{\text{ex},\gamma} &= D_\gamma / [(1 + 1.14W) / (100 - W)] \\ &= 1.428 / [(1 + 1.14(0) / (100 - 0)] \\ &= 1.428 \quad \text{mGy / a} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.2.5 ปริมาณรังสีต่อปีภายในที่มีปริมาณน้ำ (D'_{in}) และปริมาณรังสีต่อปีภายนอกที่มีปริมาณน้ำ (D'_{ex})

ปริมาณรังสีต่อปีภายในที่มีปริมาณน้ำ (D'_{in})		ปริมาณรังสีต่อปีภายนอกที่มีปริมาณน้ำ (D'_{ex})	
$D'_{\text{in},\alpha}$	$D'_{\text{in},\beta}$	$D'_{\text{ex},\beta}$	$D'_{\text{ex},\gamma}$
0.070	0.482	1.828	1.428

การคำนวณปริมาณรังสีต่อปีสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ อัตราการลดทอนความสามารถการกระตุ้นของขนาดตะกอน ความชื้นหรือปริมาณของน้ำในตัวอย่างตามธรรมชาติ รวมถึงการพิจารณาประสิทธิภาพของจุดบกพร่องในผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่เกิดจาก อนุภาคแอลฟา เบต้า และรังสีแกมมา นั่นคือ

ค่าคงที่ k เนื่องจากอนุภาคแอลฟามีพิสัยแค่ช่วงสั้น ๆ ประมาณ $20 \mu\text{m}$ ส่วนใหญ่เราจะละเว้นค่า k สำหรับอนุภาคแอลฟา จะพิจารณาเฉพาะค่า k อนุภาคเบต้าและรังสีแกมมามีค่าเท่ากับ 1 ($k_\beta = k_\gamma = 1$) ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_{\text{In}} = kD'_{\text{In}, \alpha} + D'_{\text{In}, \beta}$$

$$D_{\text{Ex}} = D'_{\text{Ex}, \beta} + D'_{\text{Ex}, \gamma} + D_{\text{cos}}$$

$$\text{เมื่อ } k_\alpha = \frac{AD_\gamma}{AD_\alpha} = 0.05$$

$$k_\beta = k_\gamma = 1$$

เนื่องจากตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่นำมาหาอายุ เก็บรวบรวมมาจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปี (D) ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด นอกจากวิเคราะห์ได้จากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ ยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ยังวิเคราะห์รังสีคอสมิก ซึ่งมาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแลกซี โดยรังสีคอสมิกจะถูกควบคุมโดยเส้นละติจูด ลองจิจูด ระดับความสูงและระดับความลึกของตัวอย่าง เขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$D_{\text{In}} = 0.05(0.070) + (0.482)$$

$$= 0.485$$

mGy / a

$$D_{\text{Ex}} = 1.828 + 1.428 + 0.170$$

$$= 3.425$$

mGy / a

$$D = D_{\text{In}} + D_{\text{Ex}}$$

$$= 0.485 + 3.425$$

$$= 3.911$$

mGy / a

ก.2.3.2 การคำนวณปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินเผาไฟ

ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินเผาไฟคำนวณได้จากปริมาณรังสีต่อปีภายในและภายนอกเช่นเดียวกับตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สำหรับตัวอย่างดินเผาไฟเราจะถือว่า ธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่สม่ำเสมอในทุก ๆ ตัวอย่าง พลังงานที่รังสีปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนโดยตัวอย่าง ดังนั้น เราอาจจะพิจารณาว่าขนาดของตัวอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เราสามารถมองข้ามไม่นำปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (D_{ex}) มาพิจารณาเพื่อคำนวณค่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินเผาไฟ ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) พิจารณาได้จากปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีจากการสลายตัวของอนุกรม ^{238}U และ ^{238}Th และรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมาจากการแผ่รังสีตามธรรมชาติของธาตุ ^{40}K

ความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตารางที่ ก.2.3 นำไปแทนค่าในสมการ (ก.2.14 – ก.2.16) เพื่อหาปริมาณรังสีต่อปีได้ดังนี้

$$D_{\alpha} = (5.61)(2.692) + (15.60)(0.737) \\ = 26.604 \quad \text{mGy / a}$$

$$D_{\beta} = (5.61)(0.143) + (15.60)(0.028) + (0)(0.678) \\ = 1.232 \quad \text{mGy / a}$$

$$D_{\gamma} = (5.61)(0.110) + (15.60)(0.051) + (0)(0.203) \\ = 1.413 \quad \text{mGy / a}$$

ตารางที่ ก.2.6 ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา

ตัวอย่าง	ปริมาณรังสีต่อปี (mGy/a)		
	แอลฟา	เบต้า	แกมมา
F1	26.604	1.232	1.413

ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาในตารางที่ ก.2.6 เป็นค่าทางอุดมคติหรือเป็นค่าที่ได้ 100 % โดยที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความชื้นหรือปริมาณของน้ำในตัวอย่าง แต่ในทางปฏิบัติปริมาณรังสีต่อปีจะถูกการลดทอนด้วยปริมาณน้ำหรือความชื้น ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณรังสีต่อปีที่มีปริมาณน้ำได้จากสมการ (ก.2.17 – ก.2.19) ได้ดังนี้

$$D'_{\alpha} = D_{\alpha} / [(1 + 1.49W / (100 - W))] \\ = 26.604 / [1 + 1.49(0.05) / (100 - 0.05)] \\ = 0.247 \quad \text{mGy / a}$$

$$D'_{\beta} = D_{\beta} / [(1 + 1.25W / (100 - W))] \\ = 1.232 / [1 + 1.25(0.05) / (100 - 0.05)] \\ = 1.231 \quad \text{mGy / a}$$

$$D'_{\gamma} = D_{\gamma} / [(1 + 1.14W / (100 - W))] \\ = 1.413 / [1 + 1.14(0.05) / (100 - 0.05)] \\ = 1.412 \quad \text{mGy / a}$$

ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินเผาไฟคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$D = D_{in} + D_{cos} \quad (ก.2.20)$$

$$= kD'_{\alpha} + D'_{\beta} + D'_{\gamma} + D_{cos} \quad (ก.2.21)$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{AD_{\gamma}}{AD_{\alpha}}$$

ค่าคงที่ k หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแอลฟา (AD_{α}) และรังสีแกมมา (AD_{γ}) ในงานวิจัยนี้เหลือใช้ค่า k เท่ากับ 0.15 ตามงานวิจัยของ Voinchet *et al.* (2004) สมการ (ก.2.21) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= 0.15(0.247) + 1.231 + 1.412 + 0.161 \\ &= 2.841 \end{aligned} \quad \text{mGy / a}$$

ภาคผนวก ก.3. การเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

สำหรับการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของไอโซโทปเสถียร จะมีไอโซโทปกัมมันตรังสีเกิดขึ้น โดยมีอัตราการเกิดดังสมการ

$$P = N\sigma\phi \quad (ก.3.1)$$

เมื่อ P คือ อัตราการเกิดของไอโซโทปกัมมันตรังสี

N คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปเสถียร

σ คือ ภาคตัดขวางของนิวตรอน (barn)

โดย 1 barn เท่ากับ 10^{-24} cm^2

ϕ คือ ฟลักซ์ของนิวตรอน มีหน่วยเป็น $n/\text{cm}^2/\text{s}$

สำหรับจำนวนอะตอมไอโซโทปเสถียรมีค่าดังนี้

$$N = \frac{N_A Wf}{M} \quad (ก.3.2)$$

เมื่อ N_A คือ จำนวนของอาโวกาโดร (Avogadro's number)
มีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

W คือ มวลของธาตุ (g)

f คือ สัดส่วนของไอโซโทปเสถียรที่มีอยู่ในธรรมชาติ (Isotopic abundance)

M คือ มวลอะตอมของธาตุนั้น ๆ

เมื่อมีไอโซโทปกัมมันตรังสีเกิดขึ้น ไอโซโทปกัมมันตรังสีนั้นจะมีอัตราการสลายตัวดังนี้

$$\text{อัตราการสลายตัว} = \lambda N^*$$

เมื่อ λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัว (Decay constant) ของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น มีค่าเท่ากับ $0.693 / T_{1/2}$ (s^{-1})

$T_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้น (s)

N^* คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี

ดังนั้น ปริมาณที่เหลืออยู่ของไอโซโทปกัมมันตรังสี เมื่อเวลาใด ๆ หาได้จากสมการ

$$\frac{dN^*}{dt} = P - \lambda N^* \quad (\text{ก.3.3})$$

$$\frac{dN^*}{(P - \lambda N^*)} = dt \quad (\text{ก.3.4})$$

อินทิเกรตสมการ (ก.3.4) จะได้

$$\int_0^{N^*} \frac{dN^*}{(P - \lambda N^*)} = \int_0^t dt$$

$$-\frac{1}{\lambda} \int_0^{N^*} \frac{(P - \lambda N^*)}{(P - \lambda N^*)} = \int_0^t dt$$

$$-\frac{1}{\lambda} [\ln(P - \lambda N^*) - \ln P] = t$$

$$\ln \frac{(P - \lambda N^*)}{P} = \lambda t$$

$$\frac{(P - \lambda N^*)}{P} = e^{\lambda t}$$

$$(P - \lambda N^*) = P e^{\lambda t}$$

$$P - P e^{\lambda t} = \lambda N^*$$

$$\lambda N^* = P(1 - e^{\lambda t}) \quad (\text{ก.3.5})$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการอาบนิวตรอน (s)

N^* คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เวลา t

แทนค่า P จากสมการ (ก.3.1) ลงในสมการ (ก.3.5) จะได้

$$\lambda N^* = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{ก.3.6})$$

ถ้ากำหนดให้ A_0 คือ กัมมันตภาพเริ่มต้นของการอบนิวตรอนมีค่าเท่ากับ λN^* มีหน่วยเป็น อะตอมต่อวินาที (atom/s) จากสมการ (ก.3.6) สามารถเขียนได้ในรูป

$$A_0 = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{ก.3.7})$$

ถ้า A_t คือ กัมมันตภาพที่เวลา T ใด ๆ ภายหลังสิ้นสุดการอบนิวตรอน ซึ่งมีค่าเท่ากับ $A_0 e^{-\lambda t}$ นั่นคือ

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

$$A_0 = \frac{A_t}{e^{-\lambda t}}$$

จากสมการ (ก.3.7) แทนค่า จะได้ A_0 จะได้

$$A_t = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})e^{-\lambda t} \quad (\text{ก.3.8})$$

เมื่อ t คือ เวลาที่ใช้ในการสลายตัว มีหน่วยเป็น s แทนค่า N จากสมการ (ก.3.2) ลงใน สมการ (ก.3.8) จะได้

$$A_t = \frac{N_A W f \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t}}{M} \quad (\text{ก.3.9})$$

ในตัวอย่างสารมาตรฐาน

$$A_{\text{std}} = \frac{N_A W_{\text{std}} f \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t}}{M} \quad (\text{ก.3.10})$$

ในตัวอย่างใด ๆ

$$A_{\text{sam}} = \frac{N_A W_{\text{sam}} f \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t}) e^{-\lambda t}}{M} \quad (\text{ก.3.11})$$

ภาคผนวก ก.4. การคำนวณปริมาณธาตุจากการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอน

เมื่อนำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานเข้าอบรังสีนิวตรอนพร้อม ๆ กันในตำแหน่งและเวลา เดียวกัน ความแรงรังสีที่เวลาเริ่มต้นของไอโซโทปรังสีจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$A_0 = \frac{W N_A f \sigma \phi}{M} (1 - e^{-\lambda t_1}) \quad (\text{ก.4.1})$$

$$\text{เมื่อ } \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

เมื่อ A_0 คือ เมื่อความแรงรังสีที่เวลาเริ่มต้นที่ $t = 0$ (s)

W คือ น้ำหนักของธาตุตัวอย่าง (g)

N_A คือ เลขอาโวกาโดรเท่ากับ 6.02×10^{23} (atom/mol)

f คือ สัดส่วนร้อยละของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้นๆ ในธรรมชาติ (% abundance)

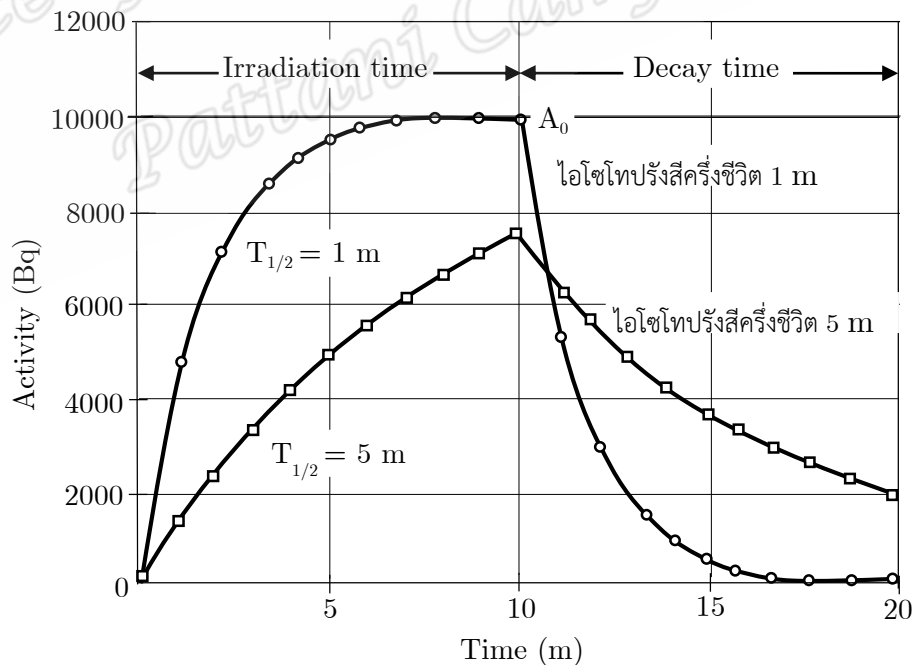
- σ คือ ค่าความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ
(Neutron cross section, barn)
- ϕ คือ ความเข้มของนิวตรอน (Neutron flux) ($n \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
- M คือ น้ำหนักอะตอมของธาตุ
- λ คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี
- $T_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิต
- t_i คือ เวลาที่ใช้ในการอบรังสีนิวตรอน (s)

เมื่อปล่อยให้ไอโซโทปรังสีสลายตัวระยะเวลาหนึ่ง หลังหยุดการอบนิวตรอนความแรงรังสี $A(t)$ ของไอโซโทปรังสีจะลดลง ตามเวลาในการสลายตัว (Cooling time, t_c) แบบเอ็กโปเนนเชียล เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$A = A_0 e^{-\lambda t_c} \quad (\text{ก.4.2})$$

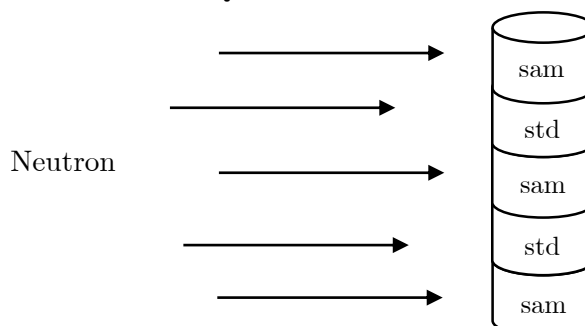
$$A = \frac{WN_A f \sigma \phi}{M} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_i}\right) e^{-\lambda t_c} \quad (\text{ก.4.3})$$

ไอโซโทปรังสีจะมีความแรงรังสีสูงขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลตามเวลาที่ใช้ในการอบนิวตรอน ไอโซโทปรังสีจะสลายตัวทำให้ความแรงรังสีลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล เมื่อหยุดการอบนิวตรอน ไอโซโทปรังสีที่มีครึ่งชีวิตสั้นจะมีความแรงรังสีเพิ่มขึ้นเร็วกว่าและสลายตัวลดลงเร็วกว่าไอโซโทปรังสีที่มีครึ่งชีวิตยาว



รูปที่ ก.4.1 ไอโซโทปรังสีจะมีความแรงรังสีสูงขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลและลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล

ตามที่ได้กล่าวไปแล้วงานวิจัยนี้เลือกศึกษาปริมาณยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียม โดยการอบนิวตรอนแบบไม่ทำลายตัวอย่าง ทำโดยใช้หลักการเปรียบเทียบตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานเข้าอับรังสีพร้อมกันดังรูป



รูปที่ ก.4.2 การวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอนทดลองโดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน

ความแรงรังสีของสารตัวอย่าง

$$A_{\text{sam}} = \frac{W_{\text{sam}} N_A f_{\text{sam}} \sigma_{\text{sam}} \phi_{\text{sam}}}{M_{\text{sam}}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{sam}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{sam}}} \quad (\text{ก.4.4})$$

ความแรงรังสีของสารอ้างอิงมาตรฐาน

$$A_{\text{std}} = \frac{W_{\text{std}} N_A f_{\text{std}} \sigma_{\text{std}} \phi_{\text{std}}}{M_{\text{std}}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{std}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{std}}} \quad (\text{ก.4.5})$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานพบว่ามีความแตกต่าง ๆ เช่น f, N_A, σ, t และ M เท่ากัน นำสมการก่อนอบนิวตรอน (ก.4.4) และหลังอบนิวตรอน (ก.4.5) มาหารกัน ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} = \frac{\frac{W_{\text{sam}} N_A f_{\text{sam}} \sigma_{\text{sam}} \phi_{\text{sam}}}{M_{\text{sam}}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{sam}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{sam}}}}{\frac{W_{\text{std}} N_A f_{\text{std}} \sigma_{\text{std}} \phi_{\text{std}}}{M_{\text{std}}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{std}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{std}}}}$$

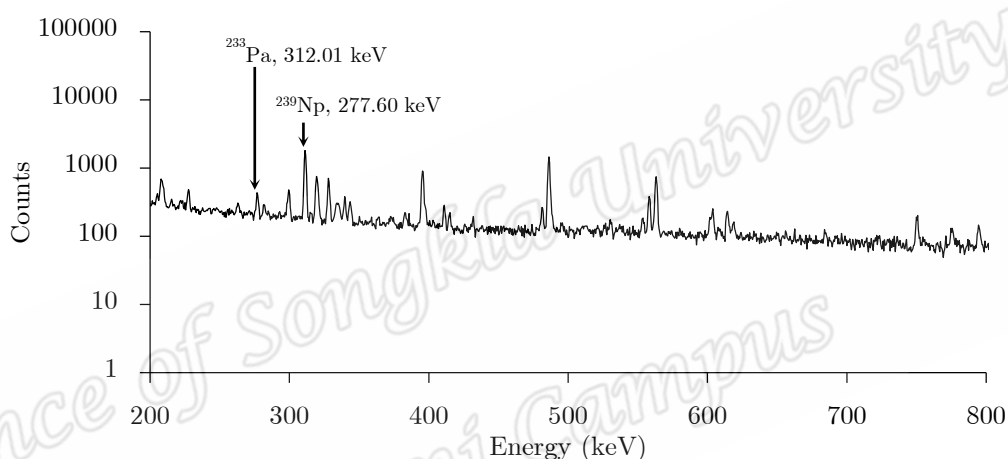
$$\frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} = \frac{W_{\text{sam}} N_A f_{\text{sam}} \sigma_{\text{sam}} \phi_{\text{sam}}}{M_{\text{sam}}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{sam}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{sam}}} \times \frac{M_{\text{std}}}{W_{\text{std}} N_A f_{\text{std}} \sigma_{\text{std}} \phi_{\text{std}} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{std}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{std}}}}$$

เมื่อ $f_{\text{sam}} = f_{\text{std}}, \sigma_{\text{sam}} = \sigma_{\text{std}}, \phi_{\text{sam}} = \phi_{\text{std}}$ และ $M_{\text{sam}} = M_{\text{std}}$ จะได้สมการ

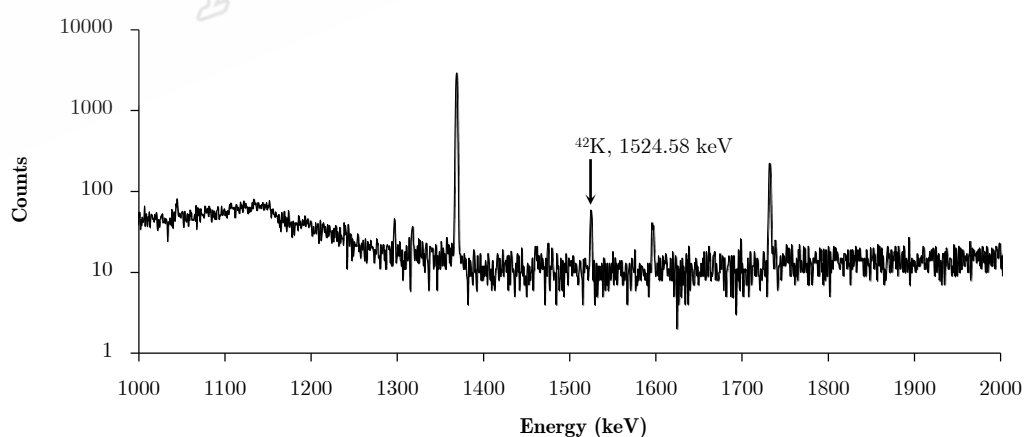
$$\frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} = \frac{W_{\text{sam}} N_A f \sigma \phi \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{sam}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{sam}}}}{M_{\text{sam}}} \times \frac{M_{\text{std}}}{W_{\text{std}} N_A f \sigma \phi \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t_{\text{std}}}\right) e^{-\lambda t_{\text{std}}}}$$

$$\frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} = \frac{W_{\text{sam}} e^{-\lambda t_{\text{sam}}}}{W_{\text{std}} e^{-\lambda t_{\text{std}}}} \quad (\text{ก.4.6})$$

ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) โดยการอบนิวตรอนของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด ได้จากการวิเคราะห์ความแรงรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{239}Np , ^{233}Pa และ ^{42}K ที่พลังงาน 277.60, 312.01 และ 1524.58 keV ตามลำดับ ความแรงรังสีดังกล่าวสามารถวัดโดยใช้ระบบวัดรังสีแกมมา ผลการวัดจะได้แถบของค่านับวัดพลังงานของรังสี เรียกว่า “สเปกตรัมรังสีแกมมา” รังสีแกมมาแต่ละพลังงานที่วัดได้ เรียกว่า โฟโตพีค (Photo peak) จำนวนนับวัดบนพื้นที่ของโฟโตพีคมีค่าแปรผันตามความแรงรังสี



รูปที่ ก.4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมในตะกอนดินที่พลังงาน 277.60 และ 312.01 keV ตามลำดับ



รูปที่ ก.4.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุโพแทสเซียมในตะกอนดินที่พลังงาน 1524.58 keV

ค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ (ϵ) ของหัววัดรังสีหาได้จากสมการ (ก.4.7) เมื่อ R คือ จำนวนนับวัดหรือพื้นที่สุทธิใต้โฟโตพีคที่พลังงานของรังสีแกมมาของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์

$$\varepsilon = \frac{R}{A \times I \times t_c} \quad (\text{ก.4.7})$$

$$R = \varepsilon \times A \times I \times t_c$$

$$\frac{R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} = \frac{\varepsilon \times A_{\text{sam}} \times I \times t_c}{\varepsilon \times A_{\text{std}} \times I \times t_c}$$

ดังนั้น

$$\frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} = \frac{R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} \quad (\text{ก.4.8})$$

แทนสมการ (ก.4.8) ในสมการ (ก.4.6) จะได้

$$\frac{R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} = \frac{W_{\text{sam}} e^{-\lambda t_{\text{sam}}}}{W_{\text{std}} e^{-\lambda t_{\text{std}}}} \quad (\text{ก.4.9})$$

$$W_{\text{sam}} = \frac{W_{\text{std}} R_{\text{sam}} e^{-\lambda(t_{\text{std}} - t_{\text{sam}})}}{R_{\text{std}}} \quad (\text{ก.4.10})$$

ในกรณีที่ใช้ไอโซโทปครึ่งชีวิตที่มีอายุครึ่งชีวิตยาว $e^{-\lambda(t_{\text{std}} - t_{\text{sam}})}$ จะมีค่าประมาณ 1 ดังนั้น สมการ (ก.4.10) เขียนใหม่ได้เป็น

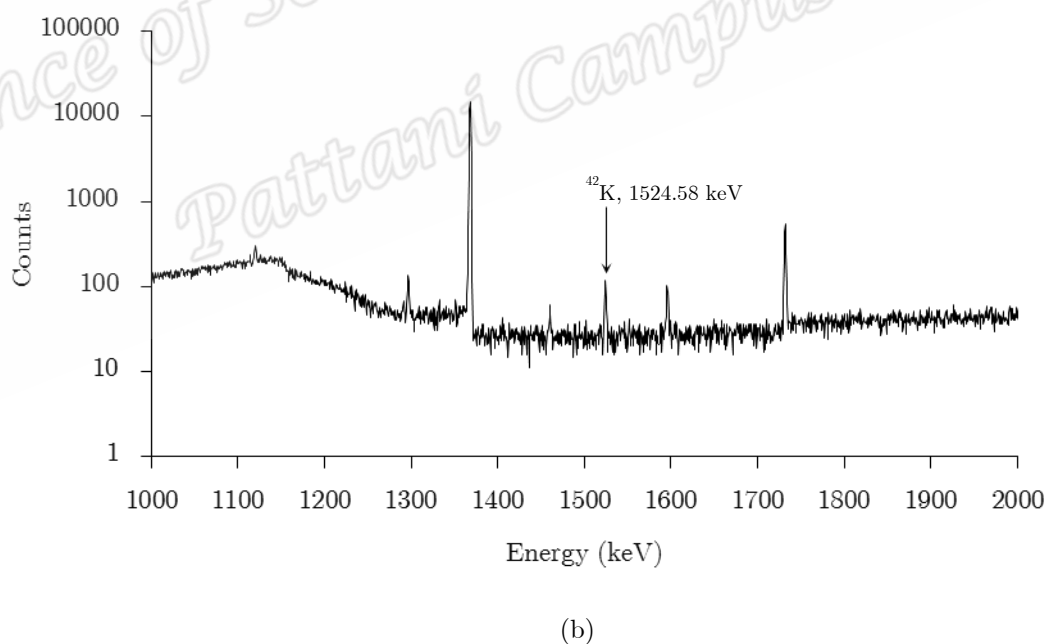
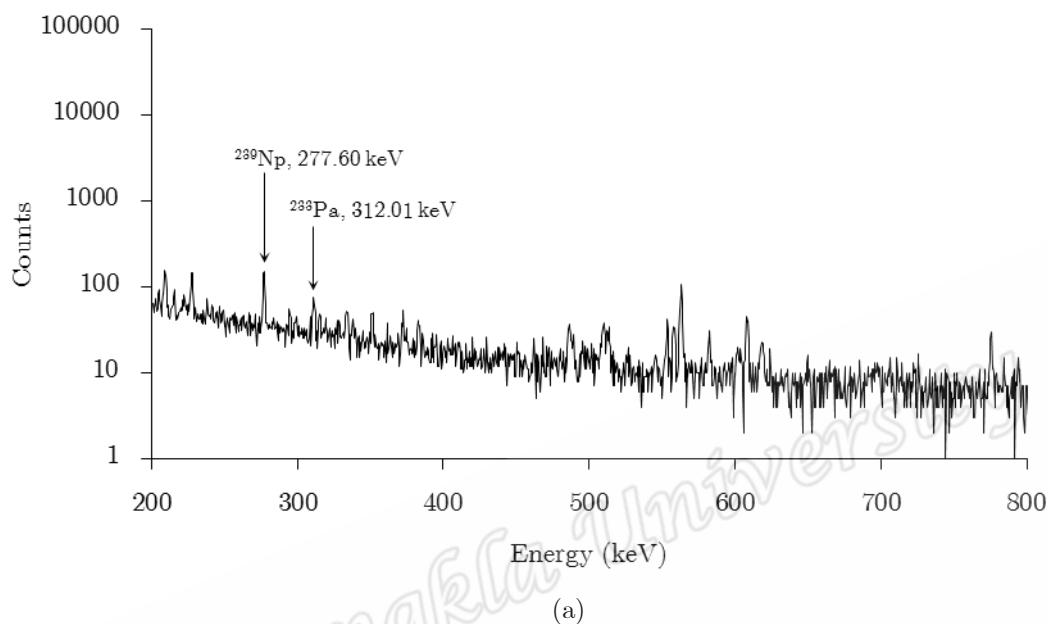
$$W_{\text{sam}} = \frac{W_{\text{std}} R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} \quad (\text{ก.4.11})$$

หรือ

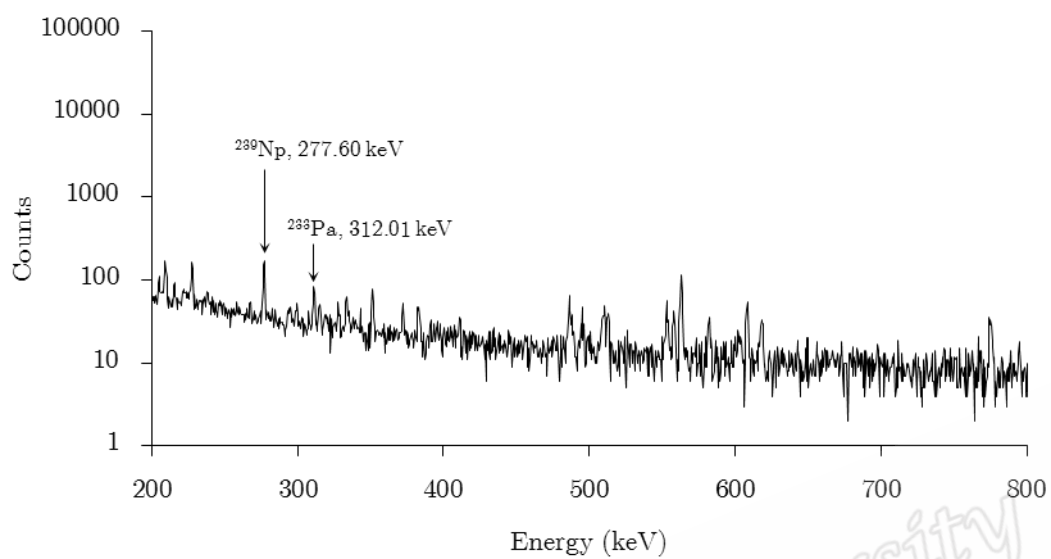
$$\frac{W_{\text{sam}}}{W_{\text{std}}} = \frac{R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} \quad (\text{ก.4.12})$$

เมื่อ	W_{sam}	คือ	ความเข้มข้นของธาตุหรือน้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง
	W_{std}	คือ	ความเข้มข้นของธาตุหรือน้ำหนักของธาตุในสารอ้างอิงมาตรฐาน
	R_{sam}	คือ	ปริมาณรังสีหรือพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่าง
	R_{std}	คือ	ปริมาณรังสีหรือพื้นที่ใต้พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน

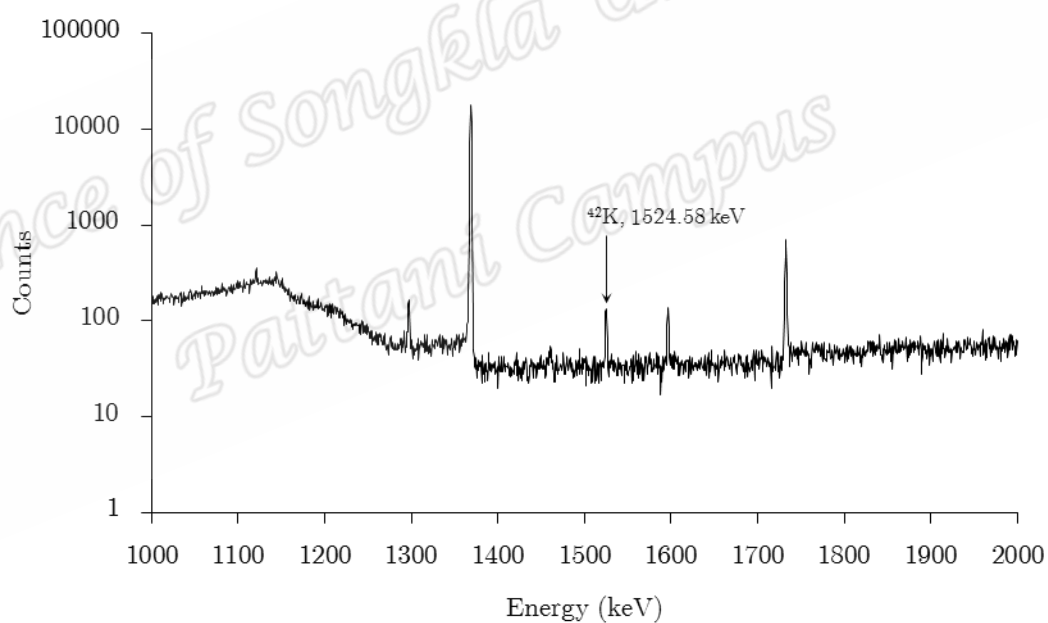
ภาคผนวก ก.5 รายละเอียดสเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด



รูปที่ ก.5.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH1 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

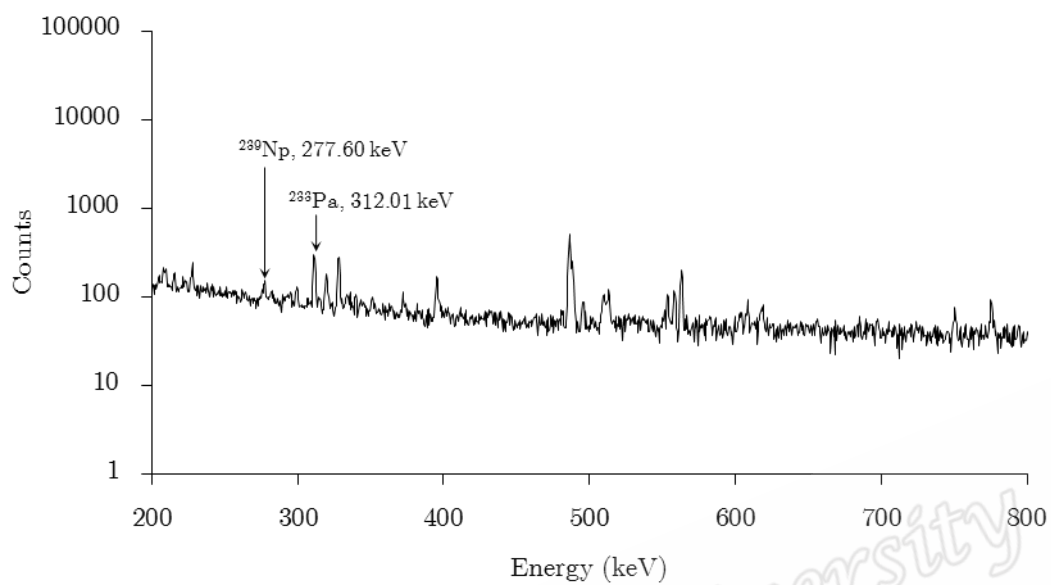


(a)

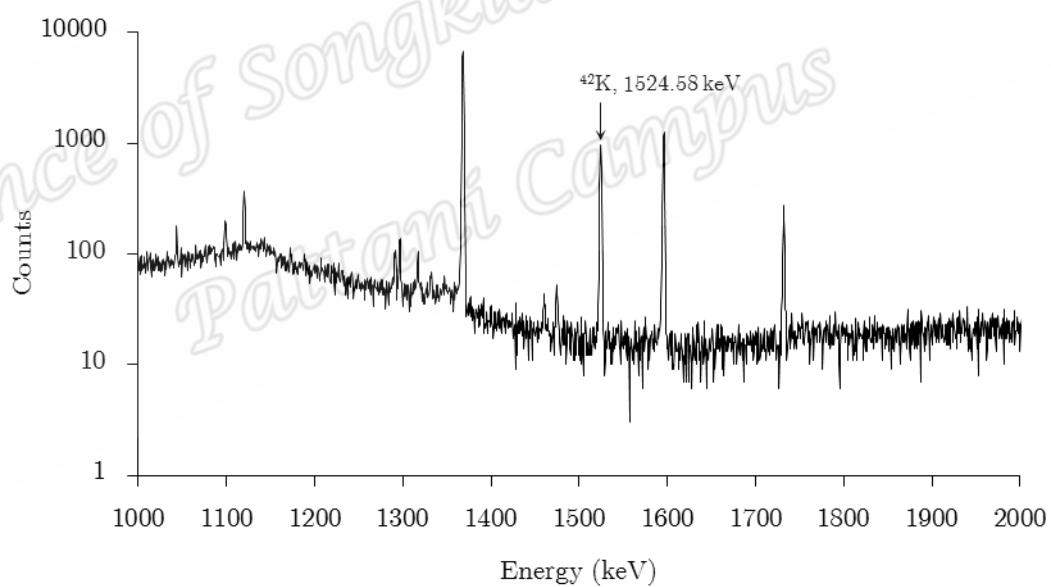


(b)

รูปที่ ก.5.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH2 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

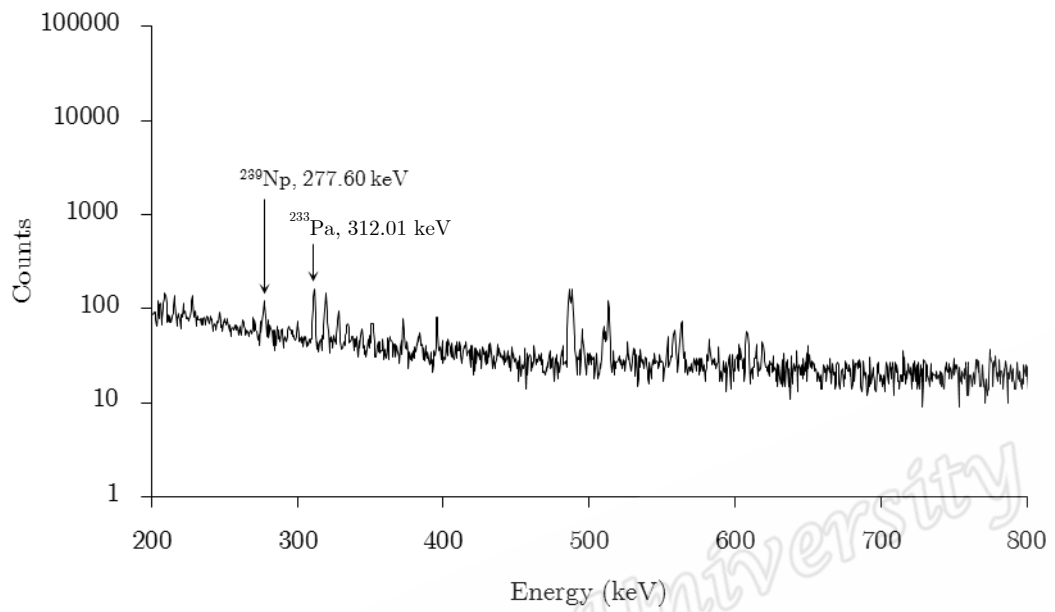


(a)

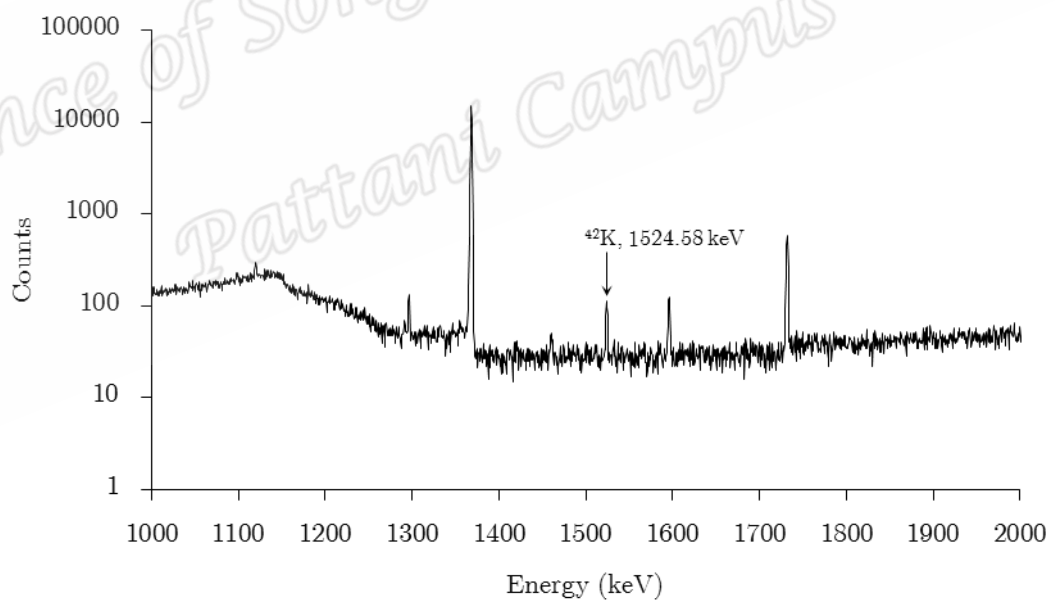


(b)

รูปที่ ก.5.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH3 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

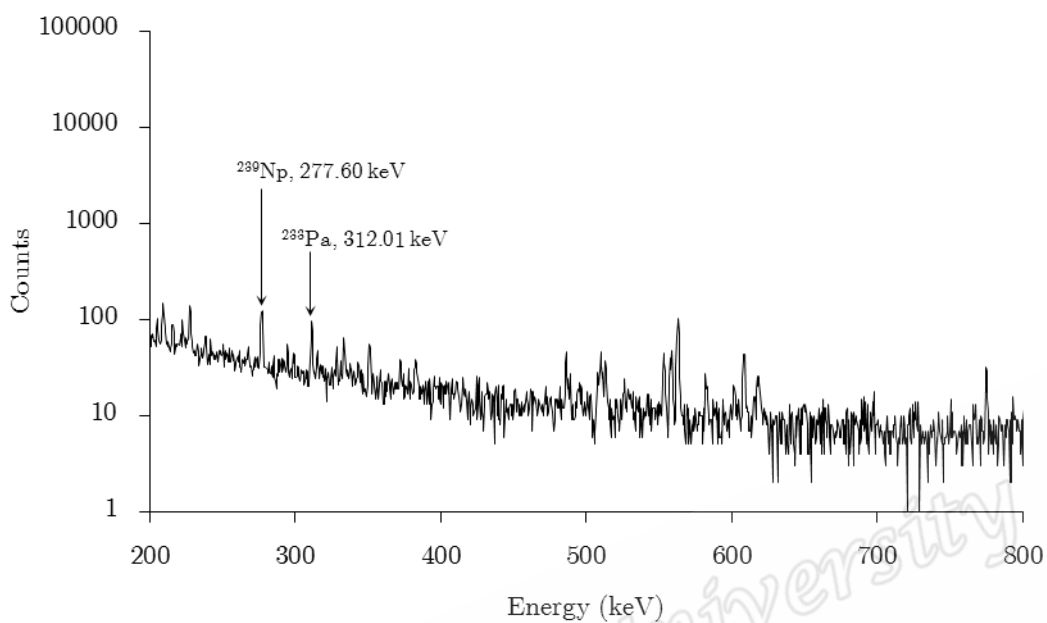


(a)

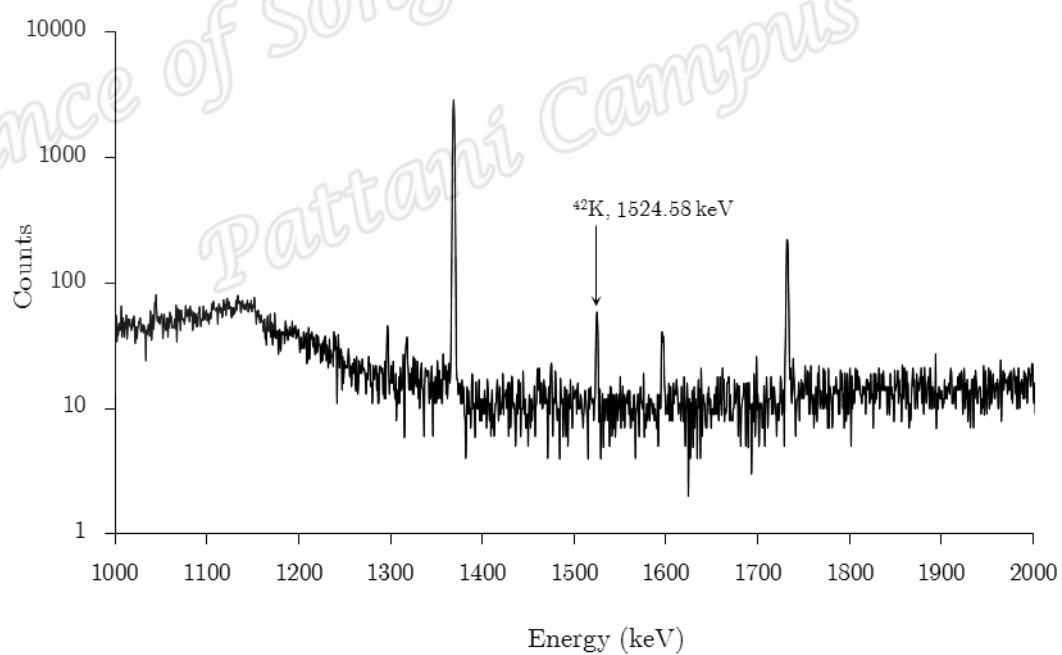


(b)

รูปที่ ก.5.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH4 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

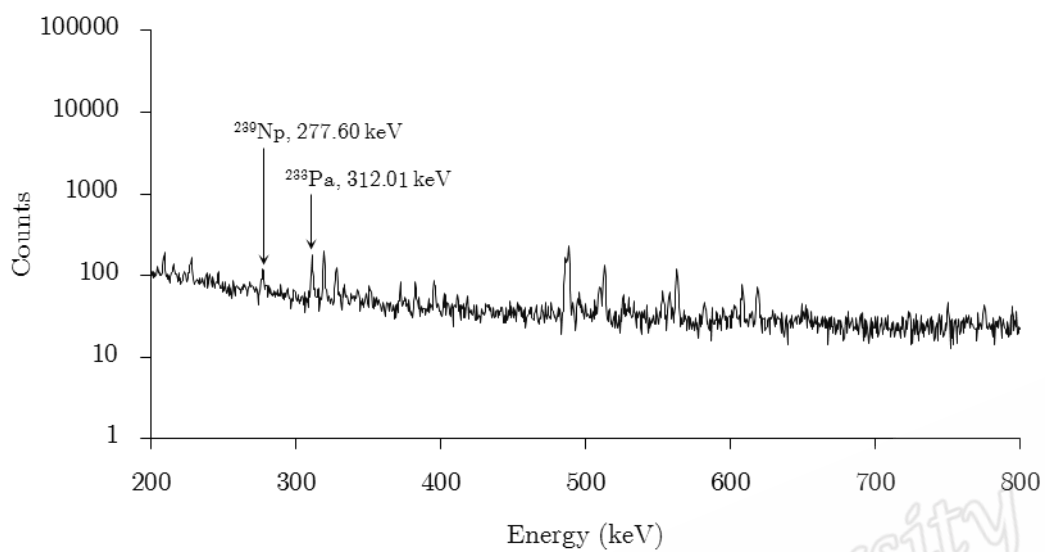


(a)

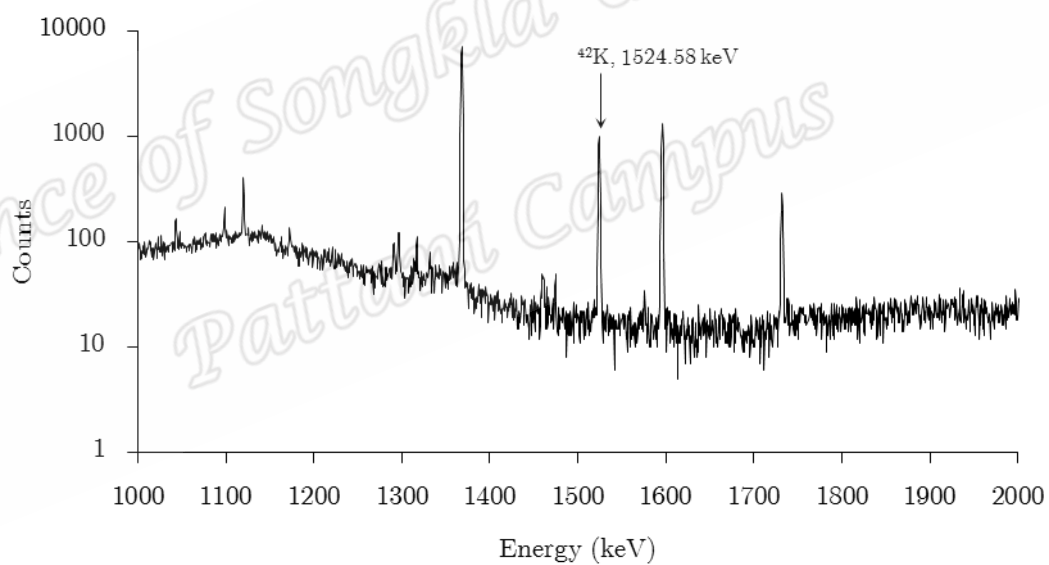


(b)

รูปที่ ก.5.5 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH5 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

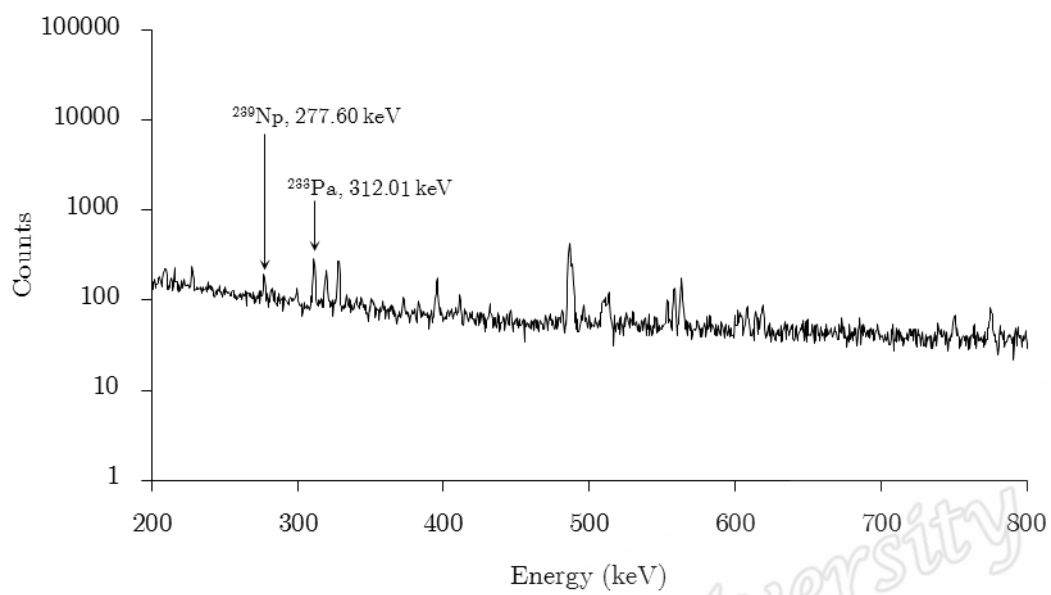


(a)

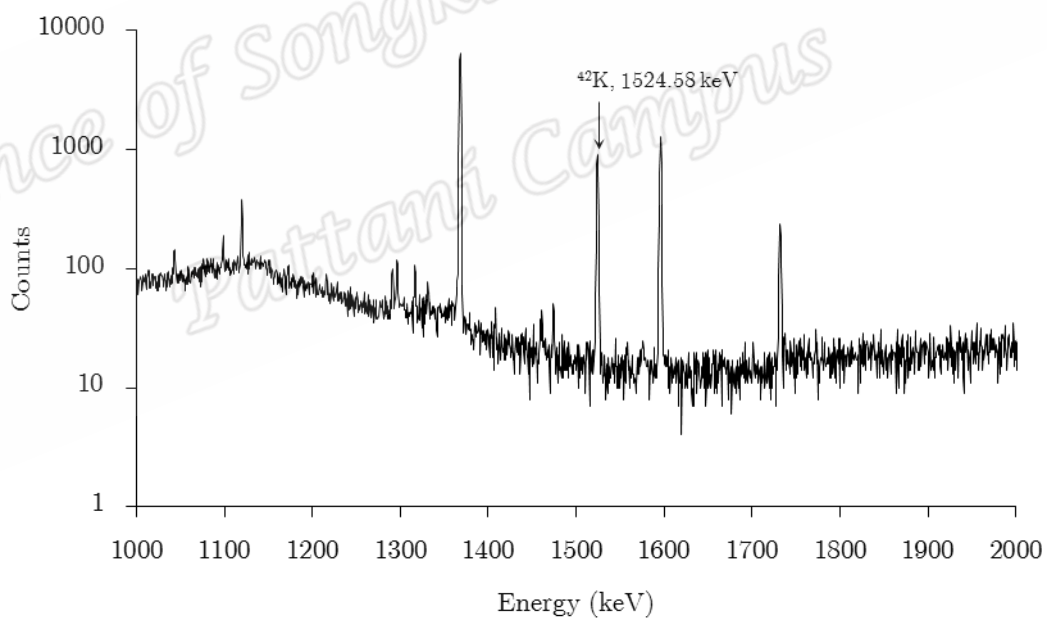


(b)

รูปที่ ก.5.6 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH6 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

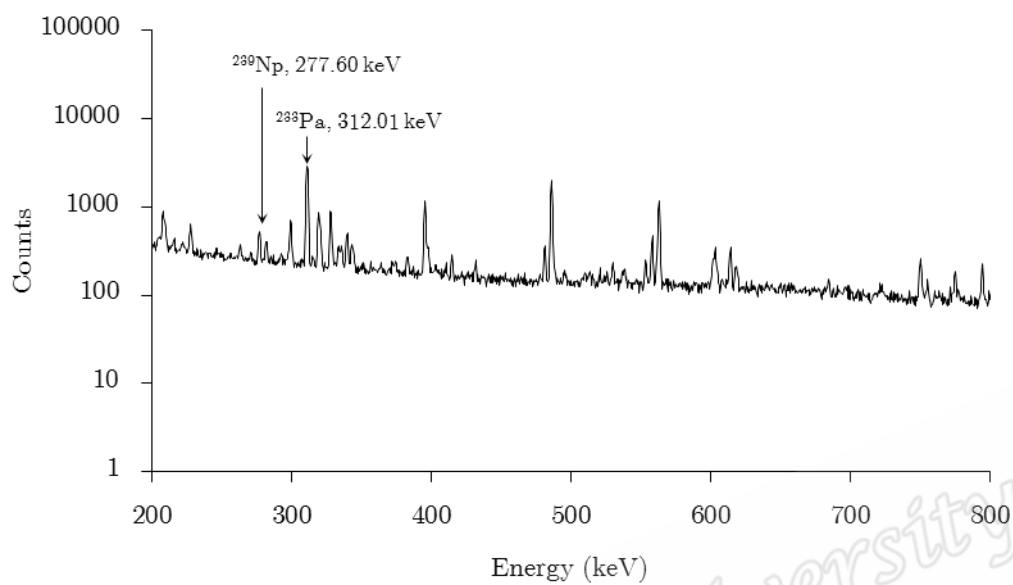


(a)

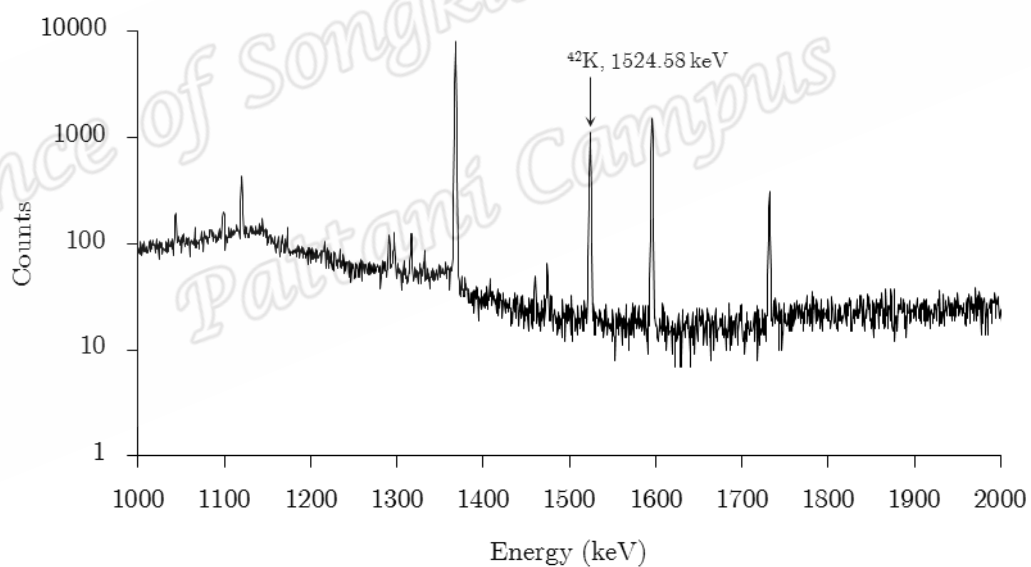


(b)

รูปที่ ก.5.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืดหอย SH7 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

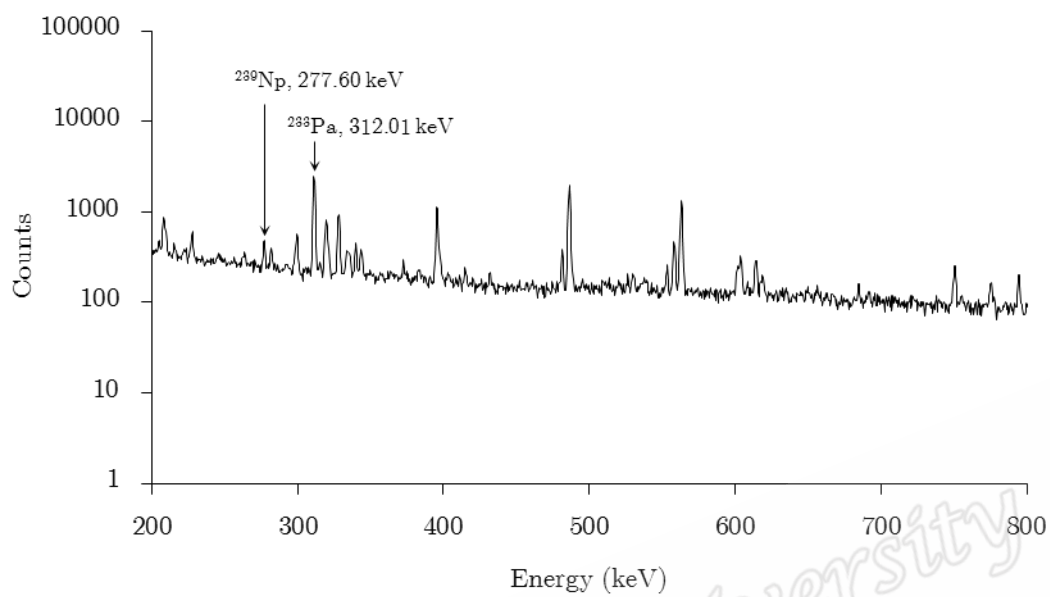


(a)

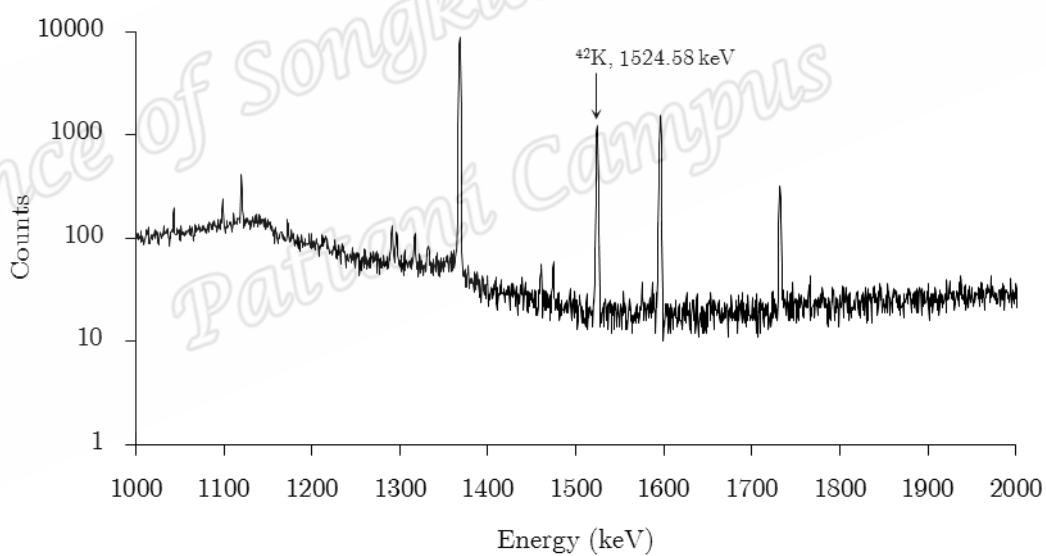


(b)

รูปที่ ก.5.8 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD1 (a) ธาตุยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียม

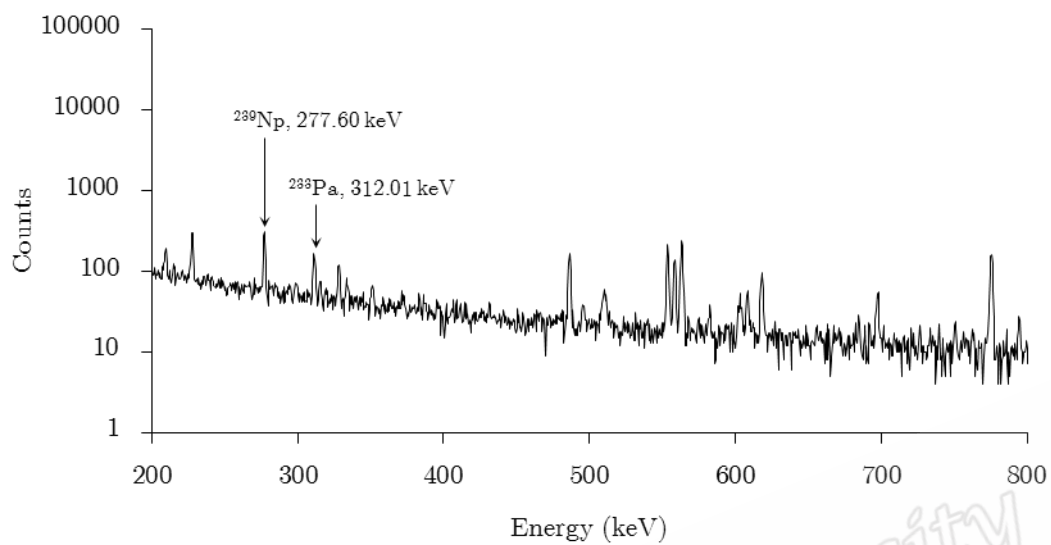


(a)

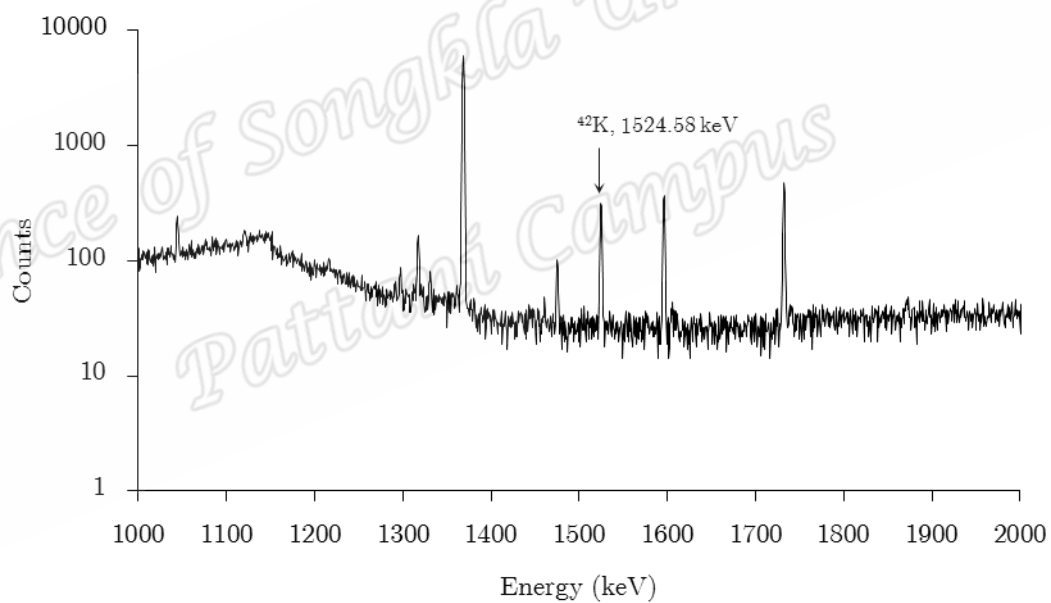


(b)

รูปที่ ก.5.9 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD2 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม

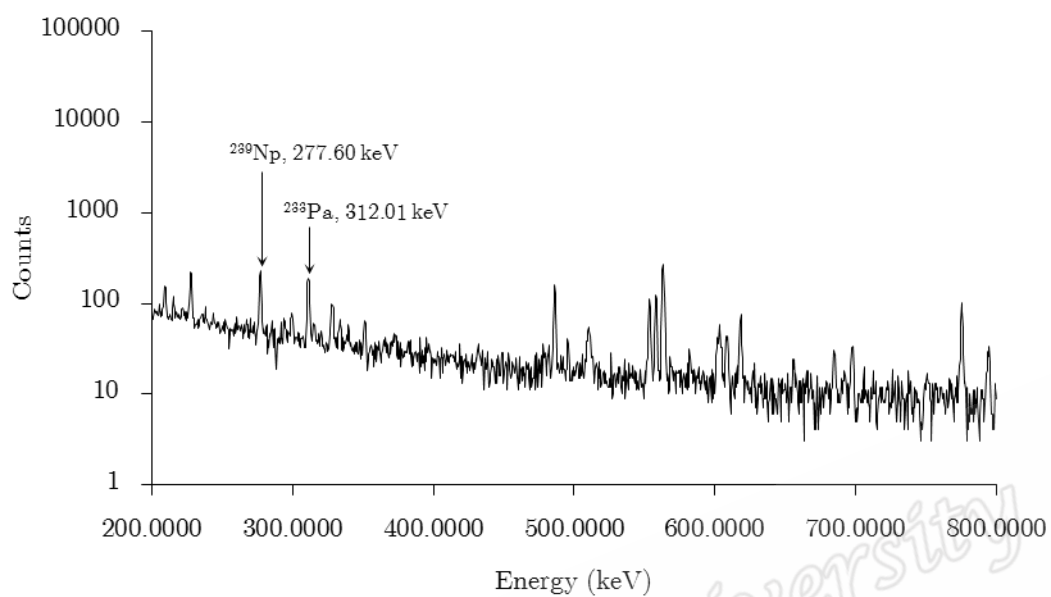


(a)

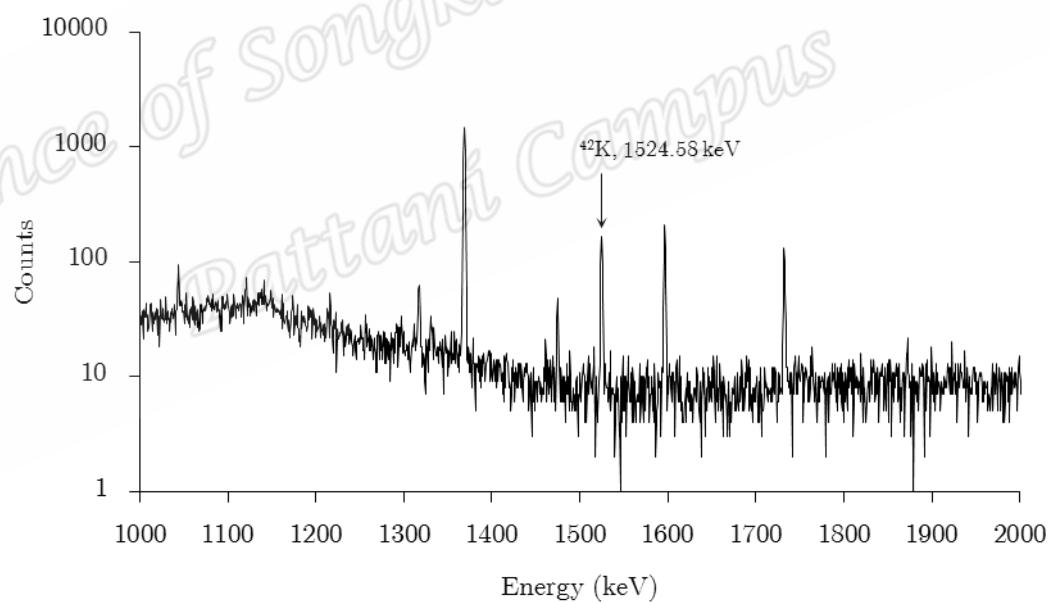


(b)

รูปที่ ก.5.10 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD3 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม

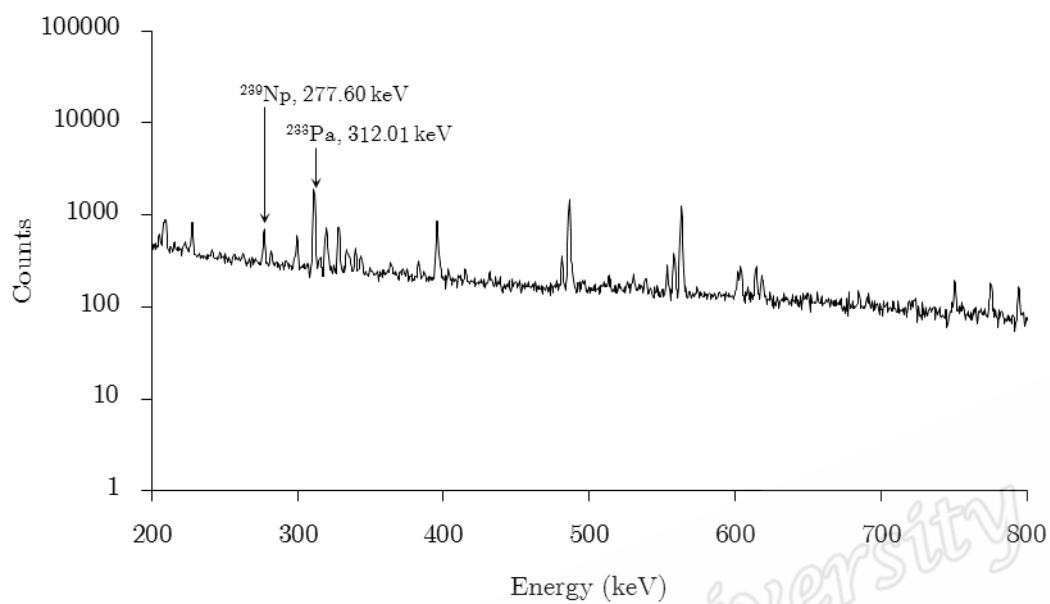


(a)

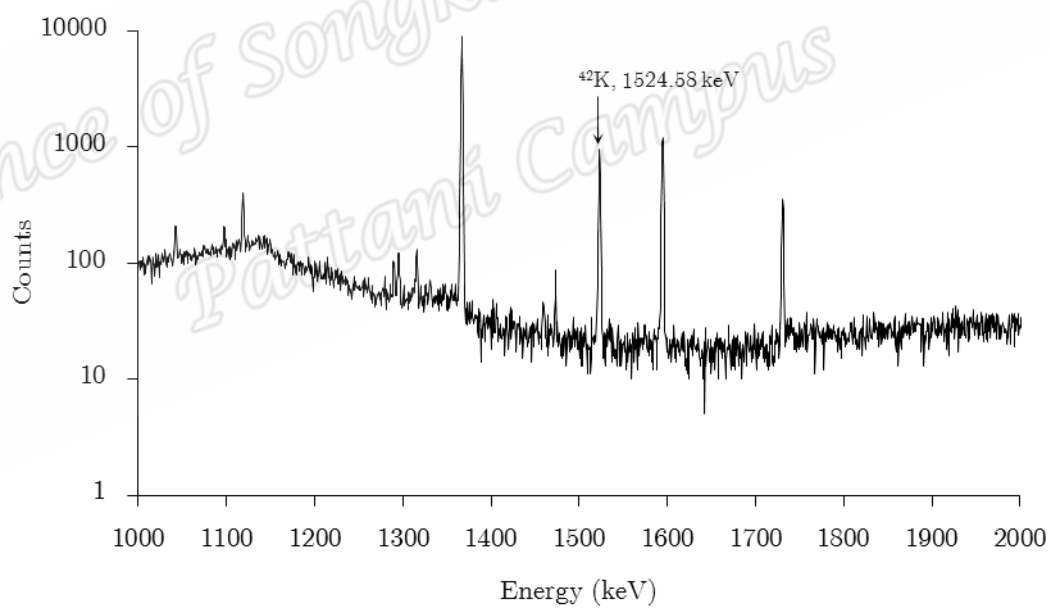


(b)

รูปที่ ก.5.11 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD4 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม

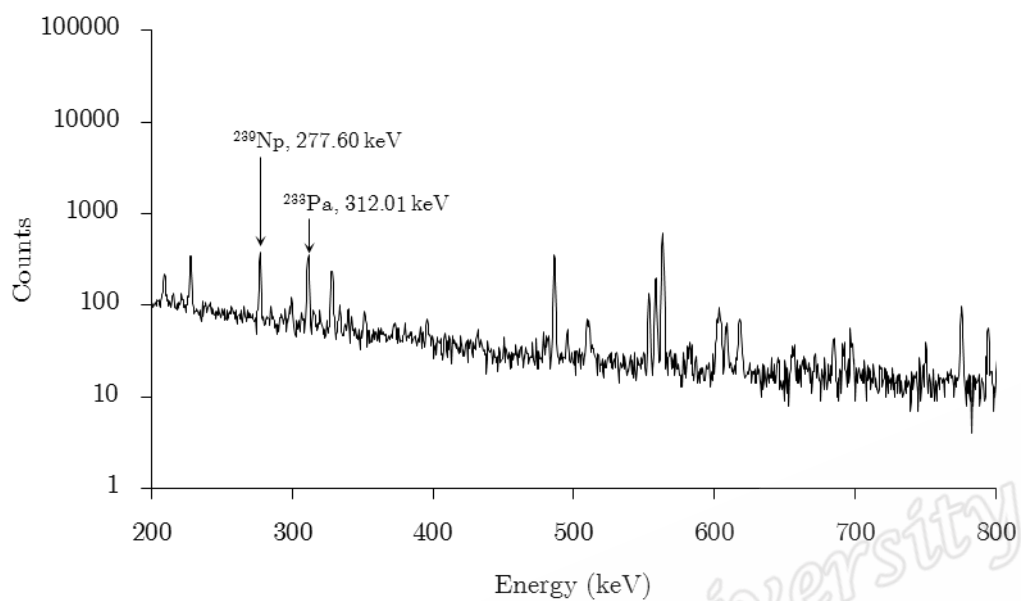


(a)

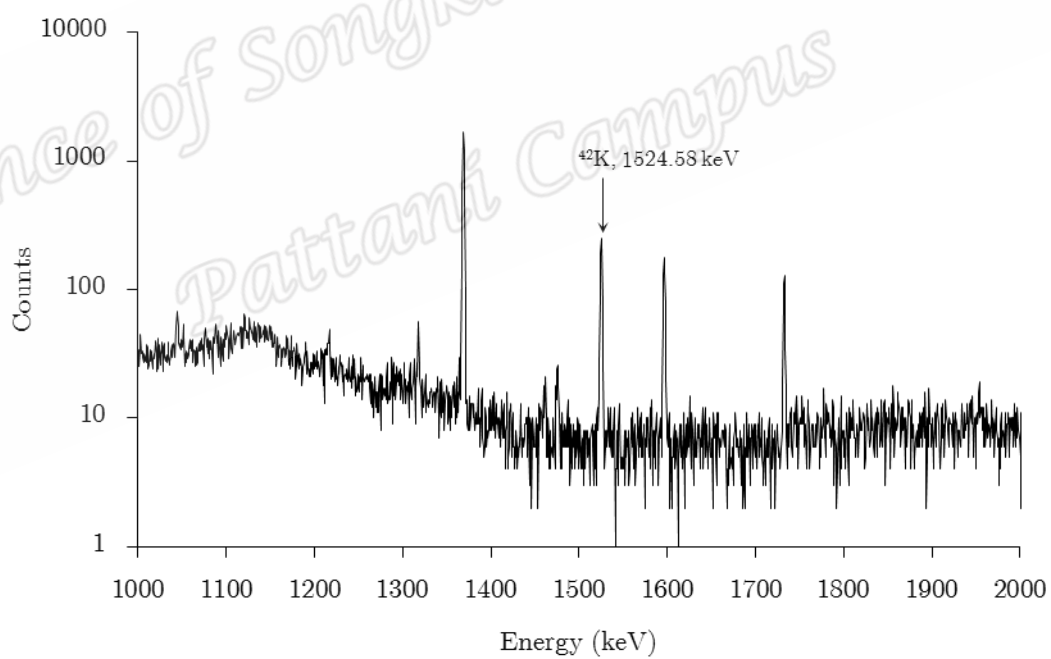


(b)

รูปที่ ก.5.12 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD5 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม

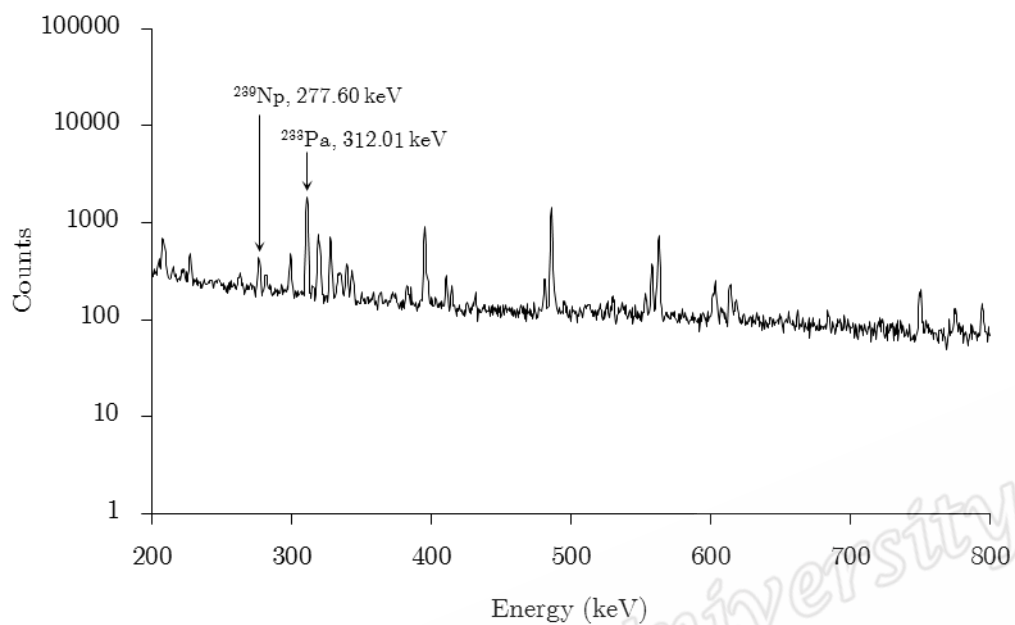


(a)

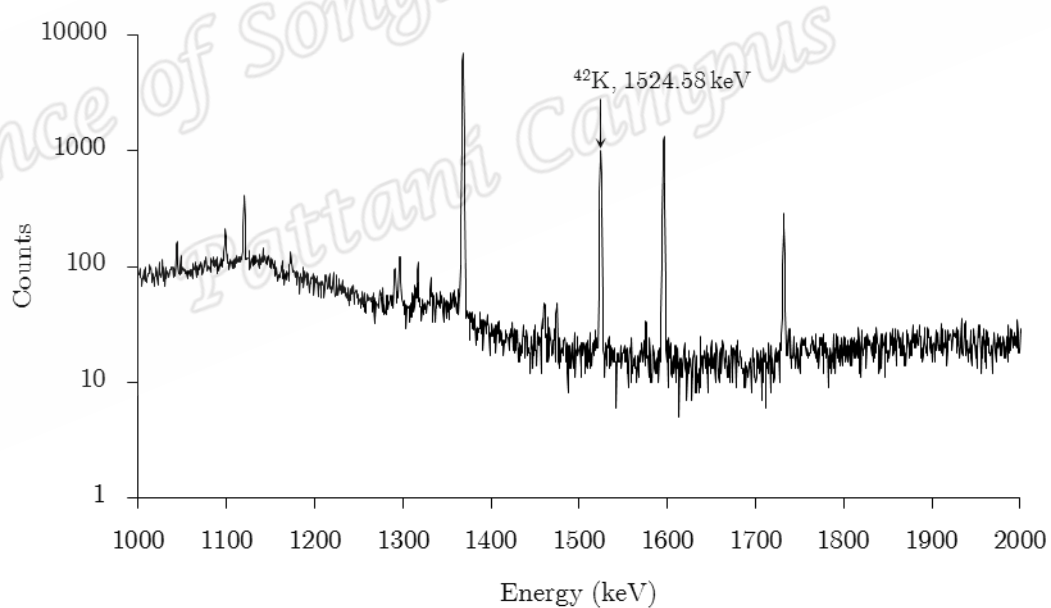


(b)

รูปที่ ก.5.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD6 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม



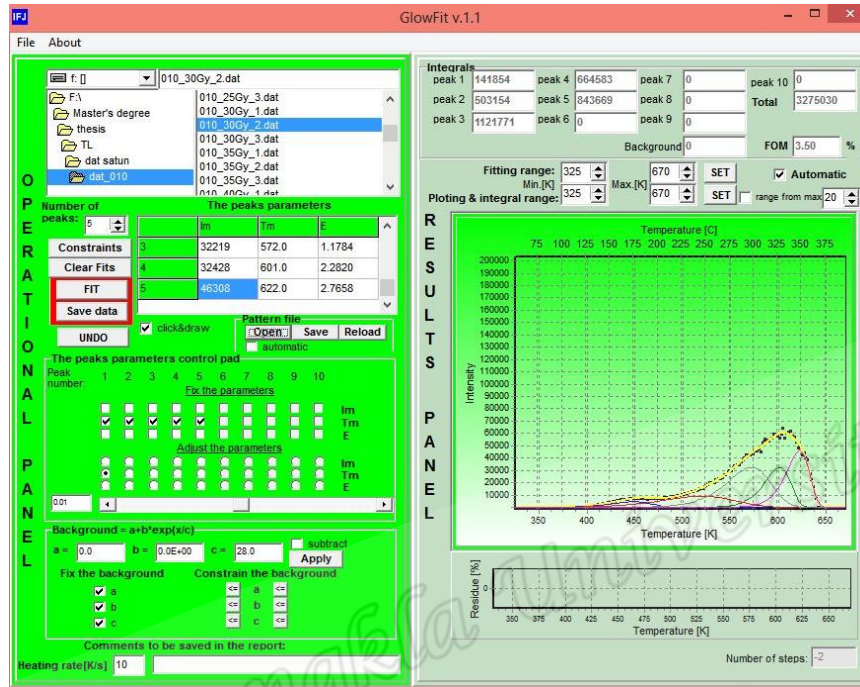
(a)



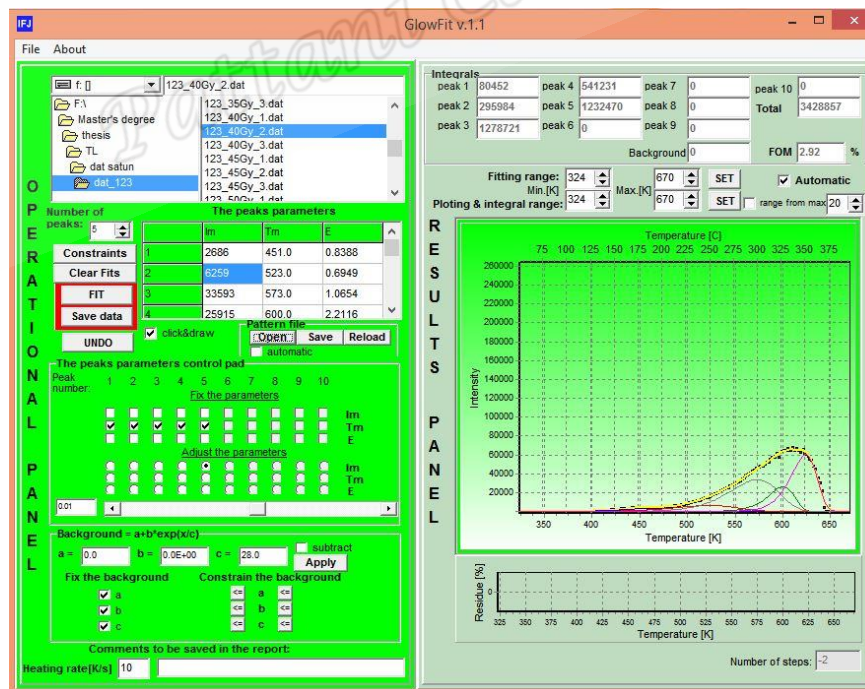
(b)

รูปที่ ก.5.14 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบหอย SD7 ของ (a) ธาตุยูเรเนียม และทอเรียม (b) โพแทสเซียม

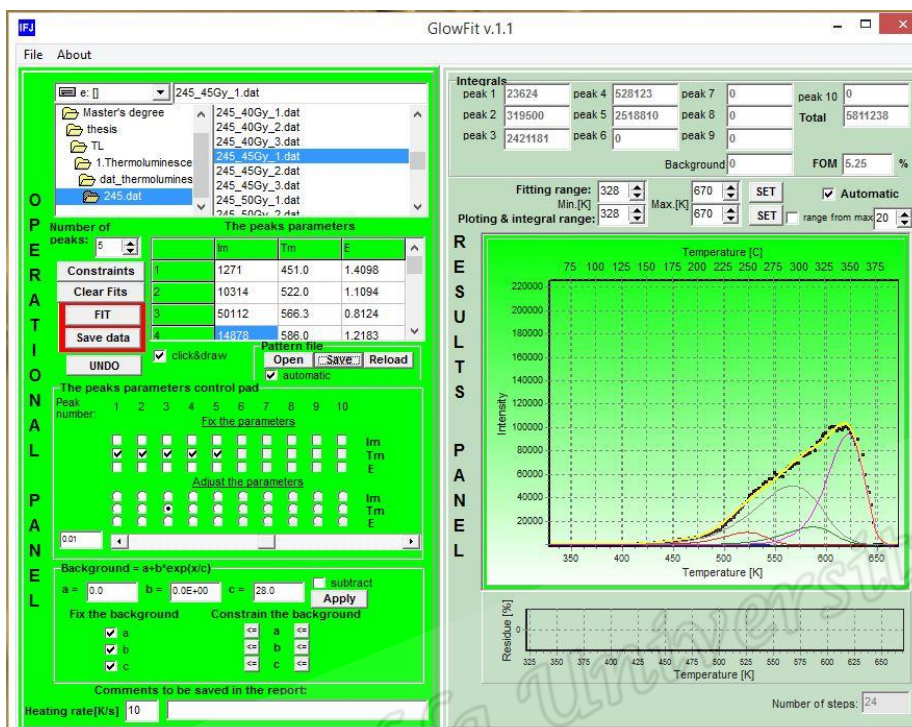
ภาคผนวก ก.6. รายละเอียดโดสรีร์ฟของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและดินเผาไฟ



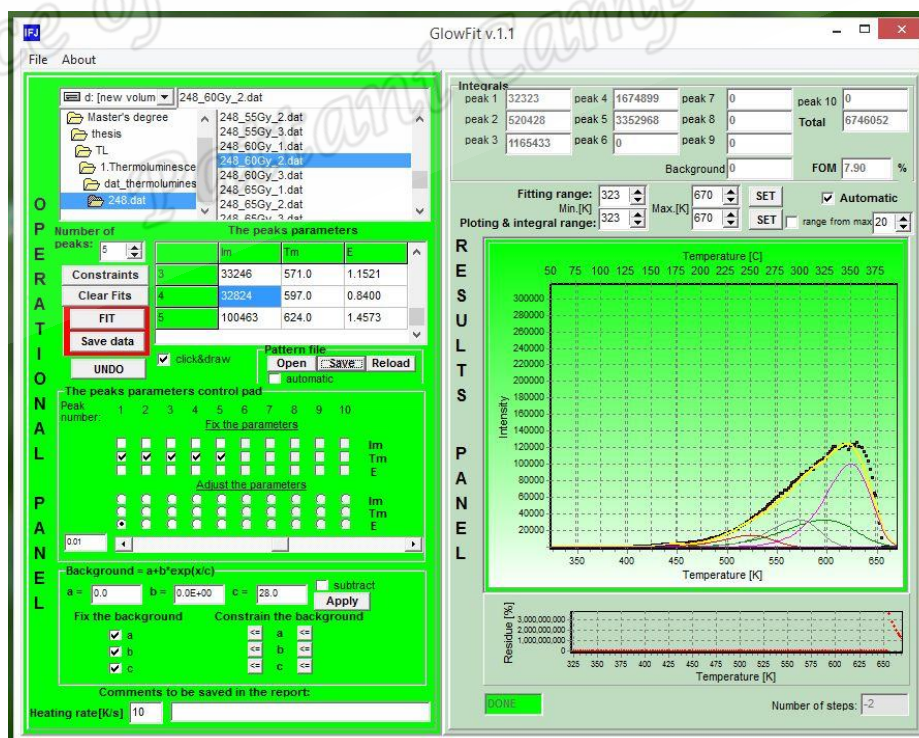
รูปที่ ก.6.1 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH1



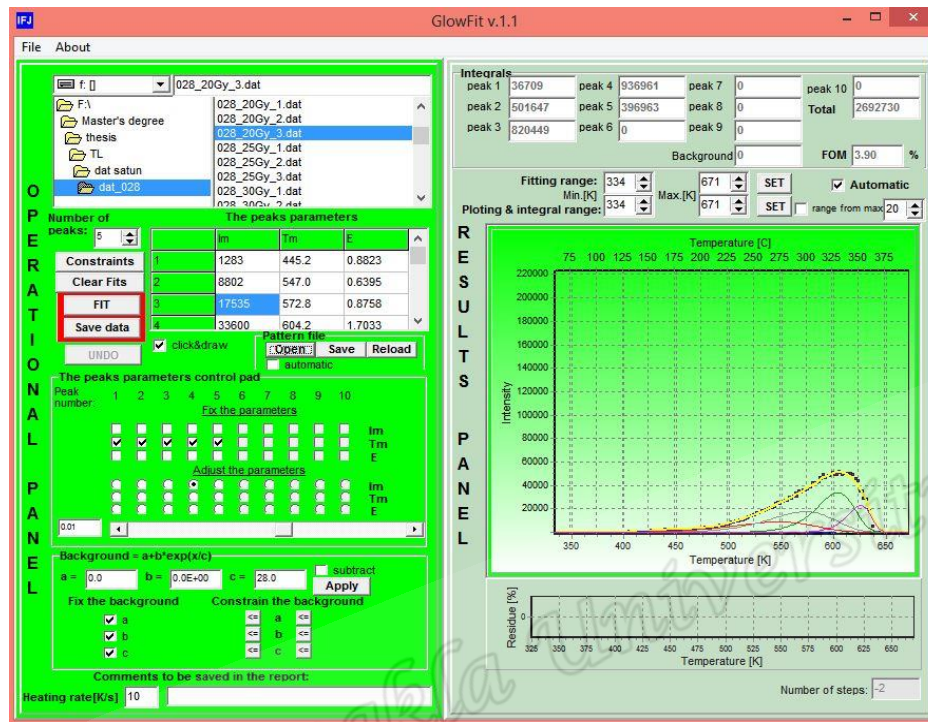
รูปที่ ก.6.2 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH2



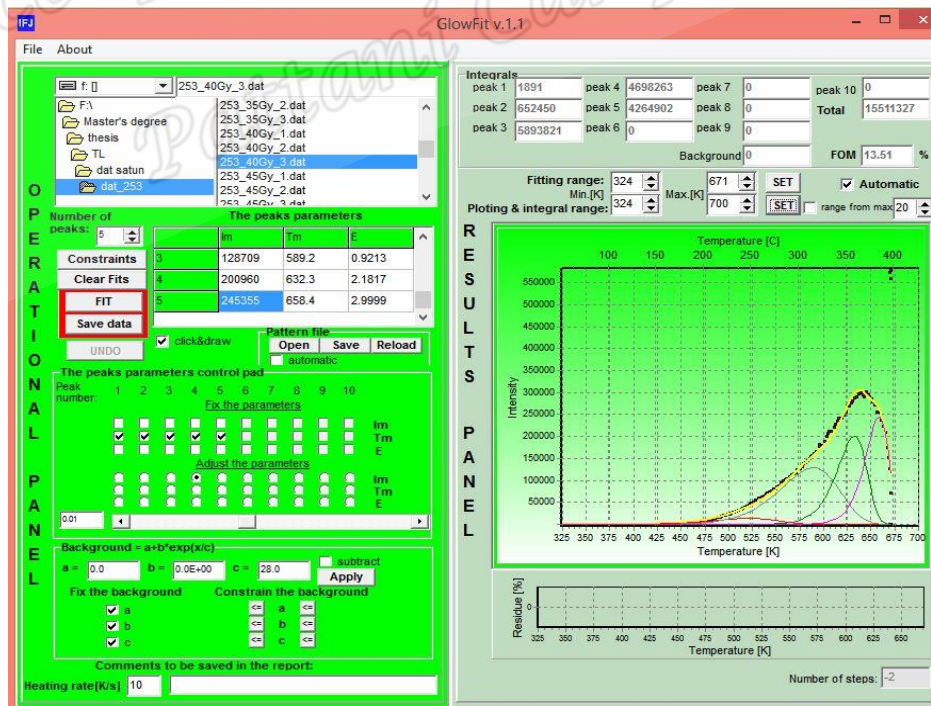
รูปที่ ก.6.3 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH3



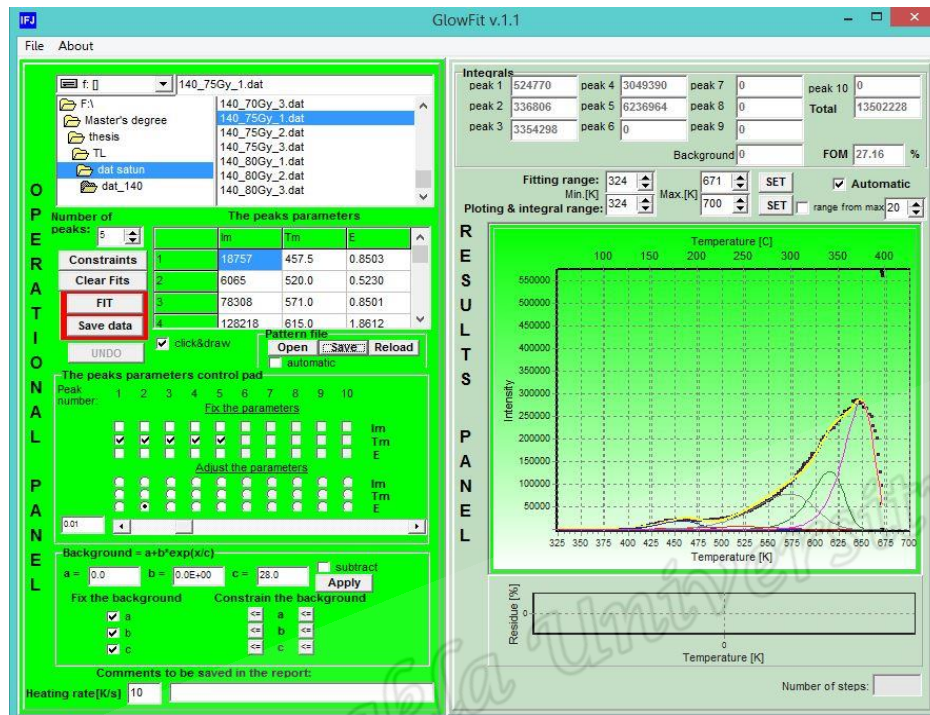
รูปที่ ก.6.4 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH4



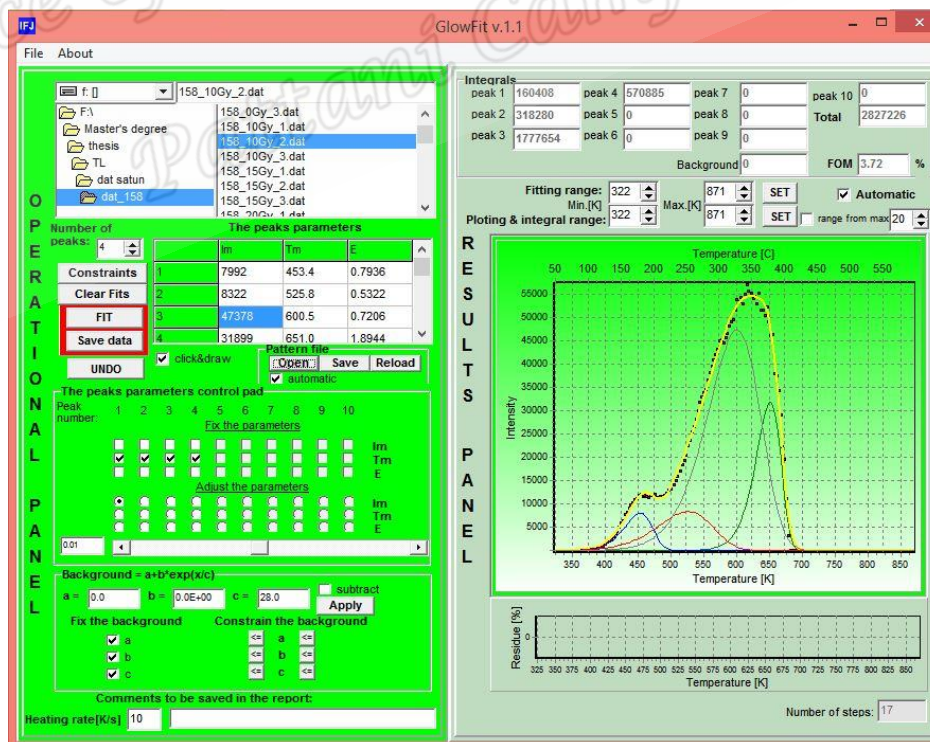
รูปที่ ก.6.5 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอนุหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH5



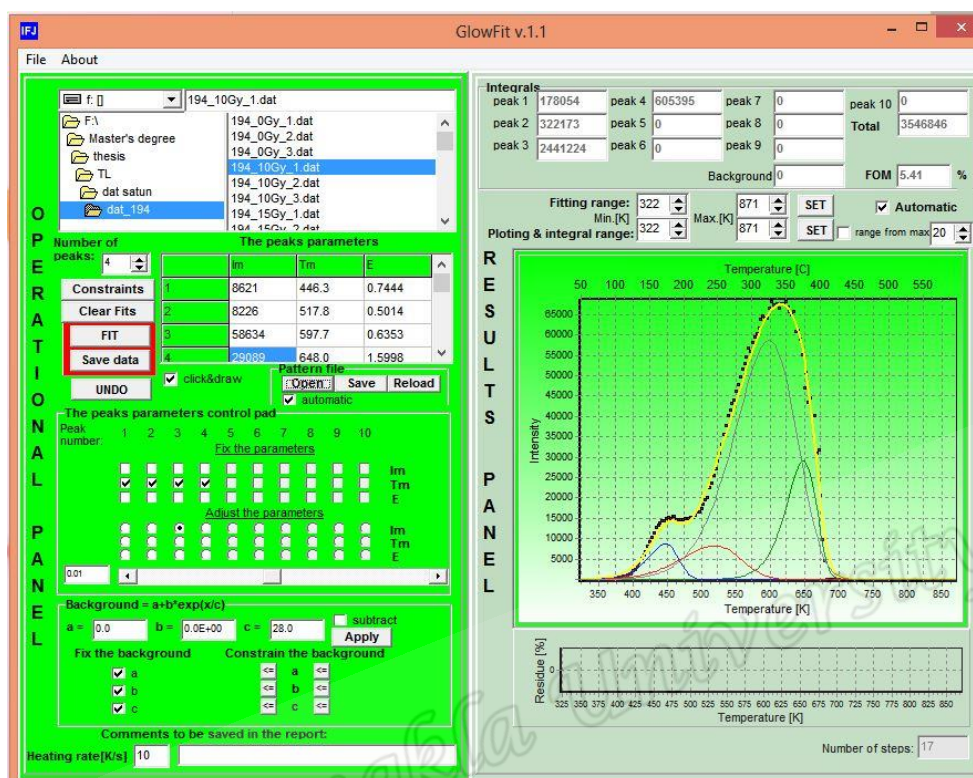
รูปที่ ก.6.6 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอนุหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH6



รูปที่ ก.6.7 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH7



รูปที่ ก.6.8 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง S1



รูปที่ ก.6.9 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอนุกรมเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง S2

ภาคผนวก ก.6. น้ำหนักสารอ้างอิงมาตรฐาน NIST (NIST SRM 1633b) กับ Granodiorite, Silver Plume, Colorado (GSP-2) และตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอนโดยการอบนิวตรอน

ตารางที่ ก.6.1 น้ำหนักตัวอย่างซากหอยน้ำจืดใช้วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอน

รหัสตัวอย่าง	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)		
		1	2	3
A	#010	0.22532	0.22686	0.25354
B	#028	0.25522	0.22766	0.22047
C	#123	0.22800	0.24275	0.24112
F	#140	0.25418	0.24111	0.26274
I	#245	0.24909	0.25163	0.27071
J	#248	0.27025	0.23158	0.24508
K	#253	0.27949	0.22298	0.23564

ตารางที่ ก.6.2 น้ำหนักตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืดใช้วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอน

รหัสตัวอย่าง	ตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)		
		1	2	3
P	#010	0.24274	0.25766	0.25074
Q	#028	0.25372	0.24566	0.23245
R	#123	0.24670	0.26804	0.25194
U	#140	0.26507	0.26767	0.25564
X	#245	0.24753	0.20342	0.24936
Y	#248	0.23233	0.24200	0.23275
Z	#253	0.21223	0.20546	0.21635

ตารางที่ ก.6.3 น้ำหนักสารอ้างอิงมาตรฐาน NIST SRM 1633b (NIST) ใช้วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)
St1A	145.98
St1B	138.78
St1C	138.97
St1F	149.32
St1I	143.59
St1J	148.91
St1P	143.29

ตารางที่ ก.6.4 น้ำหนักสารมาตรฐาน Granodiorite, Silver Plume, Colorado (GSP-2) ใช้วิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

รหัสตัวอย่าง	น้ำหนัก (g)
St2A	205.46
St2B	146.26
St2E	138.44
St2H	140.60
St2I	148.68
St2P	136.62
St2J	148.68

ตารางที่ ก.6.5 การกำหนดรหัสตัวอย่างใช้อาบรังสี

ลำดับที่	รหัสตัวอย่าง	
	ซากหอยน้ำจืด	สิ่งแวดล้อมรอบหอย
1	#010 → A	#010 → P
2	#028 → B	#028 → Q
3	#123 → C	#123 → R
6	#140 → F	#140 → U
9	#245 → I	#245 → X
10	#248 → J	#248 → Y
11	#253 → K	#253 → Z

ภาคผนวก ก.8. โครงสร้างผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ก.8.1 ผลึกอราโกไนท์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

Date: 25/6/2014 Time: 13:30:55

File: CO2

User:

Name and formula

Reference code: 00-041-1475
 Mineral name: Aragonite
 PDF index name: Calcium Carbonate
 Empirical formula: CCaO_3
 Chemical formula: CaCO_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Orthorhombic
 Space group: Pmcn
 Space group number: 62

a (?): 4.9623
 b (?): 7.9680
 c (?): 5.7439
 Alpha (?): 90.0000
 Beta (?): 90.0000
 Gamma (?): 90.0000

Calculated density (g/cm^3): 2.93
 Measured density (g/cm^3): 2.95
 Volume of cell (10^6 pm^3): 227.11
 Z: 4.00
 RIR: 1.00

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
 Mineral
 Cement and Hydration Product
 Common Phase
 Educational pattern
 Pharmaceutical
 Superconducting Material
 Quality: Star (S)

Comments

Color: Colorless
 General comments: Optical data on specimen from Bilin, Bohemia, Czechoslovakia.
 Sample source: Specimen from Sefrou, Morocco.
 Analysis: Microprobe analyses (wt.%): major Ca, and trace Sr($\ll 1$).
 Optical data: $A=1.5300, B=1.6810, Q=1.6854, \text{Sign}=-, 2V=18(\text{calc.})$
 Additional pattern: To replace 5-453 and validated by calculated pattern 24-25.
 See ICSD 15194 (PDF 71-2392); ICSD 34308 (PDF 76-606).

Date: 25/6/2014 Time: 13:30:55

File: CO2

User:

Structure: Jarosch, D., Heger, G., *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.*, **35**, 127, (1986)Optical data: *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed.*, **II**, 182, (1951)**Peak list**

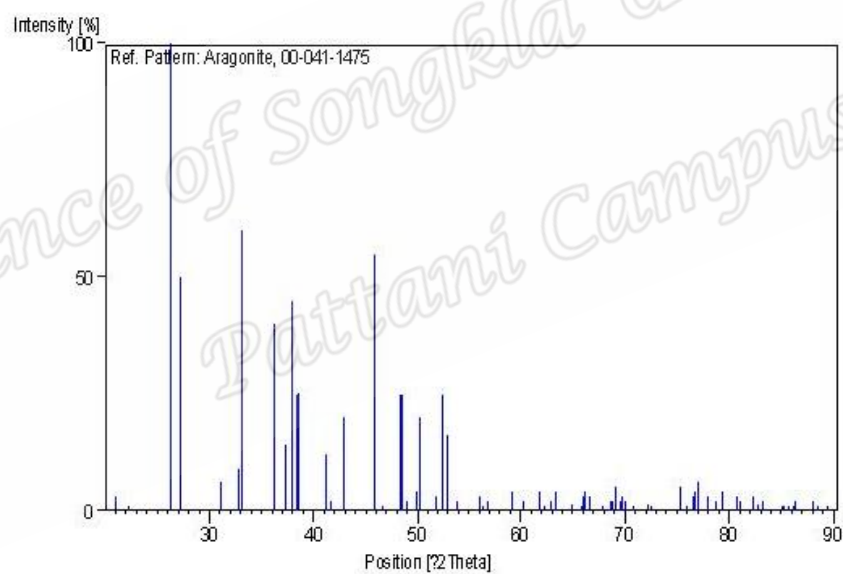
No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	4.21200	21.075	3.0
2	0	2	0	3.98400	22.297	1.0
3	1	1	1	3.39700	26.213	100.0
4	0	2	1	3.27400	27.216	50.0
5	0	0	2	2.87200	31.116	6.0
6	1	2	1	2.73300	32.741	9.0
7	0	1	2	2.70200	33.128	60.0
8	2	0	0	2.48100	36.176	40.0
9	0	3	1	2.41100	37.265	14.0
10	1	1	2	2.37300	37.884	45.0
11	1	3	0	2.34200	38.405	25.0
12	0	2	2	2.33000	38.610	25.0
13	2	1	1	2.19000	41.187	12.0
14	1	3	1	2.16800	41.624	2.0
15	1	2	2	2.10800	42.867	20.0
16	2	2	1	1.97740	45.853	55.0
17	0	3	2	1.95000	46.535	1.0
18	0	4	1	1.88210	48.319	25.0
19	2	0	2	1.87750	48.445	25.0
20	0	1	3	1.86160	48.886	2.0
21	2	1	2	1.82750	49.859	4.0
22	1	3	2	1.81490	50.229	20.0
23	1	4	1	1.75980	51.917	3.0
24	1	1	3	1.74300	52.455	25.0
25	2	3	1	1.72900	52.913	12.0
26	0	2	3	1.72570	53.022	16.0
27	2	2	2	1.69840	53.943	2.0
28	0	4	2	1.63690	56.145	3.0
29	1	2	3	1.63000	56.403	1.0
30	3	1	0	1.61980	56.791	2.0
31	3	1	1	1.55880	59.229	4.0
32	0	5	1	1.53570	60.211	2.0
33	2	4	1	1.49930	61.831	4.0
34	2	1	3	1.48910	62.302	1.0
35	3	2	1	1.47640	62.898	2.0
36	1	5	1	1.46720	63.338	4.0
37	0	0	4	1.43600	64.881	1.0
38	2	2	3	1.41670	65.876	1.0
39	0	1	4	1.41320	66.060	3.0
40	3	1	2	1.41070	66.192	4.0
41	3	3	0	1.40400	66.548	3.0
42	0	4	3	1.38040	67.839	1.0
43	2	4	2	1.36630	68.636	2.0
44	3	3	1	1.36390	68.774	2.0
45	1	1	4	1.35920	69.045	5.0
46	0	2	4	1.35070	69.542	2.0
47	3	2	2	1.34870	69.660	3.0
48	1	5	2	1.34160	70.082	2.0
49	1	4	3	1.32900	70.846	1.0

Date: 25/6/2014 Time: 13:30:55

File: CO2

User

54	2	0	4	1.24270	76.612	3.0
55	4	0	0	1.24060	76.765	4.0
56	3	1	3	1.23650	77.066	6.0
57	0	5	3	1.22450	77.964	3.0
58	2	5	2	1.21490	78.698	2.0
59	2	4	3	1.20590	79.401	4.0
60	1	5	3	1.18900	80.760	3.0
61	2	2	4	1.18640	80.974	2.0
62	1	6	2	1.17110	82.258	3.0
63	0	4	4	1.16420	82.853	1.0
64	4	2	1	1.16000	83.219	2.0
65	4	0	2	1.13890	85.119	1.0
66	0	1	5	1.13700	85.295	1.0
67	3	3	3	1.13230	85.734	1.0
68	4	1	2	1.12740	86.197	1.0
69	2	3	4	1.12560	86.368	2.0
70	1	7	0	1.10890	87.999	2.0
71	0	2	5	1.10350	88.542	1.0
72	4	2	2	1.09500	89.412	1.0

Stick Pattern

ก.8.2 ผลึกแคลไซต์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

Date: 25/6/2014 Time: 13:28:51

File: CO2

User

Name and formula

Reference code: 00-005-0586
 Mineral name: Calcite, syn
 PDF index name: Calcium Carbonate
 Empirical formula: CCaO_3
 Chemical formula: CaCO_3

Crystallographic parameters

Crystal system: Rhombohedral
 Space group: R-3c
 Space group number: 167

a (?): 4.9890
 b (?): 4.9890
 c (?): 17.0620
 Alpha (?): 90.0000
 Beta (?): 90.0000
 Gamma (?): 120.0000

Calculated density (g/cm^3): 2.71
 Measured density (g/cm^3): 2.71
 Volume of cell (10^6 pm^3): 367.78
 Z: 6.00

RIR: 2.00

Subfiles and Quality

Subfiles: Inorganic
 Mineral
 Cement and Hydration Product
 Common Phase
 Educational pattern
 Forensic
 NBS pattern
 Pharmaceutical
 Superconducting Material
 Quality: Star (S)

Comments

Color: Colorless
 General comments: Other form; aragonite.
 Pattern reviewed by Parks, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA, *ICDD Grant-in-Aid*(1992).
 Agrees well with experimental and calculated patterns.
 Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.

Date: 25/6/2014 Time: 13:28:51

File: CO2

User:

ICSD 73446 (PDF 81-2027); ICSD 79673 (PDF 83-577); ICSD 79674 (PDF 83-578).
 Temperature: Pattern taken at 26 C.

References

Primary reference: Swanson, Fuyat., *Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539* II, 51, (1953)
 Optical data: *Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., II, 142*

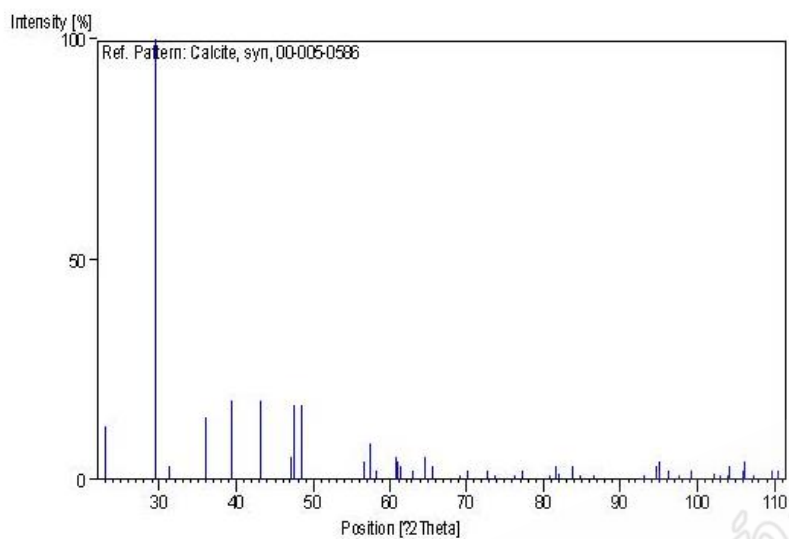
Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	2	3.86000	23.022	12.0
2	1	0	4	3.03500	29.406	100.0
3	0	0	6	2.84500	31.418	3.0
4	1	1	0	2.49500	35.966	14.0
5	1	1	3	2.28500	39.402	18.0
6	2	0	2	2.09500	43.146	18.0
7	0	2	4	1.92700	47.124	5.0
8	0	1	8	1.91300	47.490	17.0
9	1	1	6	1.87500	48.514	17.0
10	2	1	1	1.62600	56.555	4.0
11	1	2	2	1.60400	57.402	8.0
12	1	0	10	1.58700	58.075	2.0
13	2	1	4	1.52500	60.678	5.0
14	2	0	8	1.51800	60.987	4.0
15	1	1	9	1.51000	61.345	3.0
16	1	2	5	1.47300	63.060	2.0
17	3	0	0	1.44000	64.678	5.0
18	0	0	12	1.42200	65.599	3.0
19	2	1	7	1.35600	69.231	1.0
20	0	2	10	1.33900	70.238	2.0
21	1	2	8	1.29700	72.870	2.0
22	3	0	6	1.28400	73.729	1.0
23	2	2	0	1.24700	76.300	1.0
24	1	1	12	1.23500	77.177	2.0
25	3	1	2	1.18690	80.933	1.0
26	2	1	10	1.17950	81.547	3.0
27	0	1	14	1.17280	82.113	1.0
28	1	3	4	1.15380	83.767	3.0
29	2	2	6	1.14250	84.788	1.0
30	1	2	11	1.12440	86.483	1.0
31	2	0	14	1.06130	93.072	1.0
32	4	0	4	1.04730	94.701	3.0
33	3	1	8	1.04470	95.011	4.0
34	1	0	16	1.03520	96.165	2.0
35	2	1	13	1.02340	97.647	1.0
36	3	0	12	1.01180	99.161	2.0
37	3	2	1	0.98950	102.242	1.0
38	2	3	2	0.98460	102.952	1.0
39	1	3	10	0.97820	103.899	1.0
40	1	2	14	0.97670	104.124	3.0
41	3	2	4	0.96550	105.846	2.0
42	0	4	8	0.96360	106.145	4.0
43	0	2	16	0.95620	107.334	1.0
44	4	1	0	0.94290	109.561	2.0

Date: 25/6/2014 Time: 13:28:51

File: CO2

User:



Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลการวิจัย

- ข.1 บทคัดย่อ (Abstract) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์แบบโปสเตอร์ในงานประชุม The 3rd International Fisheries Symposium ระหว่างวันที่ 28 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 30 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2556
- ข.2 นิพนธ์ต้นฉบับ (Manuscript) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์แบบบรรยายในงานการประชุมวิชาการประจำปี 2556 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างวันที่ 3 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2556 ถึงวันที่ 4 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2556

Prince of Songkla University
Pattani Campus

1-p-28

RADIATION DOSE RESPONSE OF FRESHWATER SHELLS FROM KHOWHARN CAVE SATUN PROVINCE BY THERMOLUMINESCENCE

Sainap Doloh*, Sommai Changkian, Tidarut Vichaidid
Applied Physics Division, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Mueang,
Pattani Province, 94000 Thailand
Email: oilphy@gmail.com and anisah32@hotmail.com

We studied the crystal structure by X-ray Diffraction (XRD) and the Thermoluminescence properties of gamma irradiated freshwater shells from Khowharn Cave in Satun province at level 2 (70-80 cm.dt), 3 (80-90 cm.dt), 4 (90-100 cm.dt). The samples were irradiated with gamma rays from Co-60 at dose 10 Gy-80 Gy. The thermoluminescence properties of samples were read with a Harshaw 3500 TL Reader, temperature rate of 5 °C/s until maximum at 400 °C in nitrogen gas atmosphere. The results from x-ray diffraction (XRD) of freshwater shells showed that crystals have aragonite structure and the thermoluminescence displayed for freshwater sensitivity peaked at 340, 370, and 375 °C, respectively.

การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในซากหอยน้ำจืด
บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหวน จังหวัดสตูล โดยการอาบนิวตรอน
Determination of U, Th and K of Freshwater Fossil Shells in Khow Harn Cave
Historical Satun Province by Neutron Activation Analysis (NAA)

ไชนับ ดอเลาะ^{1*} อิดารัตน์ วิชัยดิษฐ¹ สมหมาย ช่างเขียน¹ พรทิพย์ พันธุ์โกวิท² ศิริพร สังข์ศิริ²
ธนิสร พุ่มพะกา² เกียรติชัย สุทธิโชติ² วิเชียร รตนธงชัย³ ศศิพันธุ์ คณะวิรัตน์³
และเจตรจันทร์ จันทร์นุ้ย³

Sainap Doloh^{1*}, Tidarut Vichaidid¹, Sommai Changkian¹, Pornthip Puntukowit²
Siriporn Sankhiran², Thanisra Phumpaka², Kiattichai suthichot², Wichian Ratanatongchai³
Sasiphan Kaweerat³ and Jatechan Channuie³

¹หลักสูตรสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัตตานี 94000

²สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม สงขลา 90100

³สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ 10900

¹Program in Applied physics, Faculty of Science and Technology, Prince of Songkla University, Pattani, Thailand 94000

²FineArts 13 Department, Songkla, Thailand 90100

³Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Bangkok, Thailand 10900

*Corresponding author: anisah32@hotmail.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ ของซากหอยน้ำจืดบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหวนจังหวัดสตูล เป็นแหล่งประวัติศาสตร์ที่มีการขุดพบตัวอย่างทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีโดยการอาบนิวตรอน (Neutron Activation Analysis, NAA) และวัดรังสีแกมมา (Gamma-ray spectrometry) ใช้สารอ้างอิงมาตรฐานที่ได้รับการรับรองจาก NIST (NIST SRM 1633b) โดยวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีหลักในธรรมชาติ คือ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) ในซากหอยน้ำจืด ซึ่งได้จากการอาบตัวอย่างด้วยนิวตรอน แล้ววิเคราะห์ความแรงของรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ²³⁹Np, ²³³Pa และ ⁴²K ที่พลังงาน 277.60, 312.01 และ 1524.58 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ พบว่า ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดมีค่าปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 0.61-2.51, 1.45-10.80 มก.ต่อกก. และ 0.03-0.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สามารถนำข้อมูลไปใช้ประกอบการหาอายุ ของซากหอยน้ำจืดบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหวนจังหวัดสตูล ซึ่งจะนำไปสู่ข้อมูลทางประวัติศาสตร์ได้

คำสำคัญ: ซากหอยน้ำจืด แหล่งโบราณคดี ถ้ำเขาหวน การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน
ระบบวัดรังสีแกมมา

Abstract

Analysis of the natural radioactivity content of freshwater fossil shells collected from Khow Harn cave historical in Satun province, a historical site that has unearthed a lot archaeological samples is presented. The sample has been determined by using gamma spectrometry together with neutron activation analysis technique (NAA). This analysis technique was adopted by activating NIST standard reference materials (NIST SRM 1633b) and sediment matrices at the same condition before measuring them at the specific time schedule. Most of natural radioactive elements are members of uranium, thorium and from non-series nuclides, mainly potassium. The sample is activated with neutrons, causing the elements to form radioactive isotopes, and then analyze the strength of the gamma radiation decay of radioactive isotopes ^{239}Np , ^{233}Pa and ^{42}K to energy 277.60, 312.01 and 1524.58 (keV), respectively. The concentrations of uranium, thorium, and potassium in samples can be achieved by this technique and found to be in the range of 0.61-2.51, 1.45-10.80 mg/kg, and 0.03 to 0.92%, respectively. The data can lead to determine the age of freshwater fossil in Khow Harn cave historical Satun province.

Keywords: freshwater fossil, Khow Harn cave historical, neutron activation analysis, gamma spectrometry

คำนำ

ประเทศไทยเคยเป็นแหล่งวิวัฒนาการของพืชและสัตว์ยุคดึกดำบรรพ์ ซึ่งเป็นแหล่งโบราณคดีที่พบว่ามีมนุษย์อาศัยอยู่มาตั้งแต่โลกดึกดำบรรพ์ มีการค้นพบหลักฐานสำคัญที่มีอายุเก่าแก่จากเหตุการณ์ต่างๆ ในอดีตเกิดเป็นแหล่งโบราณคดีซึ่งมีเรื่องเล่าต่อๆ กันมาอย่างยาวนาน เรื่องเล่าดังกล่าวอาจเกิดจากการบันทึกในอดีตอาจเกิดจากการสันนิษฐานของชาวบ้าน หรือจากกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และกลายเป็นประวัติศาสตร์ในปัจจุบันนี้ เช่นเดียวกับจังหวัดสตูลในภาคใต้ของประเทศไทยเป็นหนึ่งในพื้นที่ซึ่งมีการพบหลักฐานทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นแหล่งท่องเที่ยวระดับต้นๆ ของประเทศไทย เมื่อไม่นานมานี้ แหล่งโบราณคดีถ้าเขาหนาดได้มีการขุดพบชุมชนสมัยก่อนประวัติศาสตร์ ตัวอย่างที่พบประกอบด้วย ฟอสซิลหอยน้ำจืดและเศษภาชนะเครื่องปั้นดินเผาบางส่วน แหล่งโบราณคดีถ้าเขาหนาดตั้งอยู่ที่ หมู่ 7 บ้านบุเกิตยามู ตำบลควนโดน อำเภอควนโดน จังหวัดสตูล (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2553) การค้นพบสิ่งของดังกล่าวนับเป็นหลักฐานที่สามารถเชื่อมโยงเหตุการณ์ในอดีตได้เป็นอย่างดี หากมีการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) เพื่อหาปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) (Ikeya, 1993) จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาอายุโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ค่าอายุที่น่าเชื่อถือเพื่อเป็นข้อมูลที่เชื่อมโยงทางประวัติศาสตร์จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับประวัติศาสตร์ของประเทศไทย รวมถึงเป็นการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวของจังหวัดทางภาคใต้อีกด้วย

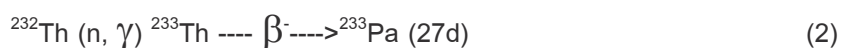
เนื่องจากว่าตัวอย่าง อาทิเช่น ตัวอย่างหอยนั้นเมื่ออยู่ที่ใต้ดินจะได้รับปริมาณรังสี (Dose) จากรังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินและรังสีธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในหอยที่มาจากอัตร

การแผ่กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมโลก ได้แก่ ธาตุยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียม ซึ่งทั้ง 3 ธาตุนี้จะสลายตัวตามหลักครึ่งชีวิต (Half-life) ซึ่งธาตุเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาว จึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบันและในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่างๆ กันในรูปของรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ยูเรเนียมและทอเรียมเป็นไอโซโทปรังสีที่มีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นห่วงโซ่เรียกว่าอนุกรมและจะไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปที่เสถียรมีอยู่ 4 อนุกรม (Table 1) สำหรับอนุกรมเนปทูเนียมมีครึ่งชีวิตสั้นมากเมื่อเทียบกับอายุของเอกภพ ซึ่งมีอายุประมาณ 10^{10} ปี ดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่จะพบนิวเคลียสที่เป็นสมาชิกในอนุกรมนี้ในธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีรังสีบางส่วนที่ได้รับจากภายนอกโลกหรืออวกาศ เช่น รังสีคอสมิก (Cosmic ray) แต่เป็นส่วนน้อย รังสีที่มีการสัมผัสกับผลิตภัณฑ์อย่างนี้สามารถแปลงเป็นปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) ได้ โดยวิเคราะห์จากปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์กับการกำหนดอายุวัตถุทางด้านโบราณคดีและธรณีวิทยาด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Ikeya, 1993)

Table 1 The natural radioactive series (Ikeya, 1993)

Series	Nuclide	Half Life (year)	Product of decay
Uranium	^{238}U	4.47×10^9	^{206}Pb
Actinium	^{235}U	7.04×10^8	^{207}Pb
Thorium	^{232}Th	1.41×10^{10}	^{208}Pb
Neptunium	^{237}Np	2.14×10^6	^{209}Pb

การหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างด้วยวิธีทางเทคนิคต่างๆ เช่น วิธี Neutron activation analysis (NAA) โดยใช้เครื่อง Gamma spectrometer วัดรังสีแกมมาหรือวิธี Inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) (ศุภกิจ, 2549) โดยในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาจากวิธีการอาบนิวตรอน (Neutron activation analysis; NAA) ใช้หลักการเปรียบเทียบตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐาน (Standard reference materials) ซึ่งทราบปริมาณธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมที่สนใจแน่นอน ถือได้ว่าวิธีการอาบนิวตรอนเป็นเทคนิคหนึ่งที่เหมาะใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ทำได้โดยการนำตัวอย่างไปอาบด้วยรังสีนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ทำให้เกิดอันตรกิริยากับตัวอย่างเมื่ออะตอมของไอโซโทปเสถียรได้รับนิวตรอนจะกลายเป็นไอโซโทปที่เป็นธาตุกัมมันตรังสีซึ่งปล่อยรังสีแกมมาออกมา ไอโซโทปรังสีที่เกิดจากการอาบนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมเกิดอันตรกิริยา ดังนี้



เทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน อาศัยการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุ จากคุณสมบัติของไอโซโทปรังสีหนึ่งๆ ซึ่งมีครึ่งชีวิตและพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา จากปริมาณรังสีที่วัดได้ โดยระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณสารรังสีมาตรฐานของธาตุนั้นๆ ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ทำให้ทราบปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจได้ (อุษณี, 2553) โดยสามารถคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุโดยใช้สมการที่ 4

$$\frac{W_{\text{sam}}}{W_{\text{std}}} = \frac{A_{\text{sam}}}{A_{\text{std}}} \quad (4)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณรังสีของสารอ้างอิงมาตรฐาน (std) และสารตัวอย่าง (sam)

W คือ ความเข้มข้นของธาตุในสารอ้างอิงมาตรฐาน (std) และสารตัวอย่าง (sam)

จากค่าปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมที่คำนวณได้ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (mg/kg) ส่วนธาตุโพแทสเซียมที่คำนวณได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ (%) นำไปคำนวณหาปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) ที่นำเสนอโดย Ikeya ในงานวิจัยนี้จะกล่าวเฉพาะการหาค่าปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม โดยการอาบนิวตรอนและวัดรังสีแกมมาเพียงอย่างเดียว ข้อดีของวิธีนี้คือ เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการวัดและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ อาทิเช่น ตัวอย่างทางโบราณคดี ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในส่วนได้เป็นอย่างดีและแม่นยำ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนทางเคมีและใช้เวลาในการวิเคราะห์จนได้ค่า Annual dose สั้นกว่าวิธีอื่นๆ ยกเว้นวิธีวัดในพื้นที่โดยตรงเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอนและวัดรังสีแกมมา เพื่อนำไปหาค่าปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) ในการหาอายุต่อไป และยังได้กรรมวิธีในการวิเคราะห์ธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ในซากหอยน้ำจืดจากแหล่งโบราณคดีถ้าเขาหวนจังหวัดสตูล เพื่อเป็นแนวทางให้แก่ผู้ค้นคว้าวิจัยในงานแขนงนี้ได้ทราบถึงเทคนิคการวิเคราะห์อีกหนึ่งวิธีอันอาจจะนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยได้

Table 2 The used important nuclear data from neutron activation of U, Th and K. (El-Ghawi *et al.*, 2005; Soliman, 2006; Tidarut *et al.*, 2008)

Element	Isotope	Half Life	Energies of emitted Gamma ray (keV)	%of emission
U	^{239}Np	2.55 d	277.60	14.1
Th	^{233}Pa	27.4 d	312.01	33.7
K	^{42}K	12.36 h	1524.58	17.9

อุปกรณ์และวิธีการ

การเก็บตัวอย่าง

ตัวอย่างซากหอยน้ำจืดได้มาจากแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหานจังหวัดสตูล โดยกรมสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา ทำการขุดค้นในปี พ.ศ. 2553 จากหลุมขุดค้นจำนวน 1 หลุม มีขนาด 4 เมตร ด้านกว้างขนาด 2 เมตร ขุดค้นตามระดับชั้นดินสมมติ (Arbitrary layer) โดยกำหนดชั้นดินแต่ละชั้นมีระดับความลึกห่างกันชั้นละ 10 เซนติเมตร อุปกรณ์ที่ใช้ในการขุดค้นใช้เครื่องมือหนักและเครื่องมือเบา เช่น เกรียง จอบ เสียม ฯลฯ ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นการทับถมทางโบราณคดี แผนผังการขุดค้นแสดงได้ดัง Figure 1

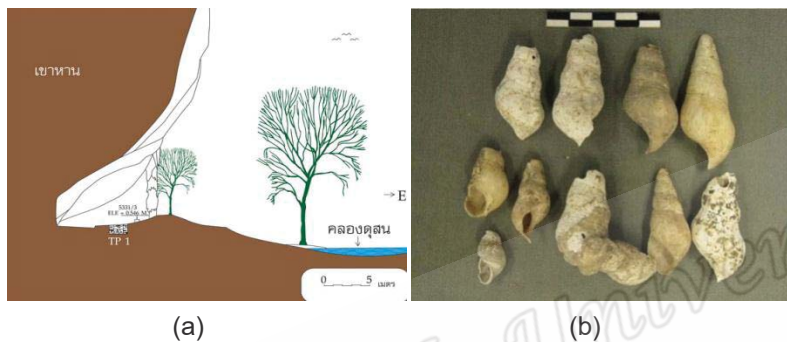


Figure 1 (a) Showing location of the Khoharn Cave Historical Satun Province (b) Characteristic of sample in Khoharn Cave Historical Satun Province (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2553)

การเตรียมตัวอย่าง

เก็บและรวบรวมตัวอย่างซากหอยน้ำจืดจากแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหานจังหวัดสตูล จำนวน 15 ตัวอย่าง ล้างทำความสะอาดจนแน่ใจว่าไม่มีเศษดินเหลือติดอยู่ อบตัวอย่างจนแห้งสนิทที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปบดจนละเอียดสม่ำเสมอขนาด 0-90 ไมโครเมตร โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจะต้องบรรจุอยู่ในภาชนะที่สะอาดเพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อนใดๆ (El-Ghawi *et al.*, 2005) ซึ่งน้ำหนักสารมาตรฐาน NIST (NIST SRM 1633b) และตัวอย่างประมาณ 150 มก. และ 250 มก. ตามลำดับ ใส่ลงในหลอดบรรจุตัวอย่างทำด้วยพอลิเอทิลีน (Polyethylene) ที่มีรูปทรงเรขาคณิตที่เหมือนกัน ปิดฝาหลอดให้สนิทด้วยความร้อน กำหนดรหัสและเขียนหมายเลขกำกับ

การอบรังสี

นำตัวอย่างและสารอ้างอิงมาตรฐานที่เรียงสลับกันบรรจุในกระบอกลวดพลาสติกไปอบรังสีนิวตรอน ชุดครึ่งชีวิตยาวจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์พร้อมกันเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ปลดตัวอย่างที่ผ่านการอบรังสีให้สลายตัวเป็นเวลานาน 2 วัน นำไปวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมและปลดปล่อยให้สลายตัวเป็นเวลานาน 4 วัน นำไปวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียมจากการวัดปริมาณรังสีแกมมาเป็นเวลา 10 นาที ด้วยระบบวัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium; HPGe)

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่าง

นำสเปกตรัมของสารตัวอย่าง (Figure 2 และ Figure 3) ไปวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคที่พลังงาน 277.60, 312.01 และ 1524.58 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุ ^{239}Np , ^{233}Pa และ ^{42}K โดยใช้หลักการเปรียบเทียบจำนวนนับรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานซึ่งทราบปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจแน่นอนตามสมการที่ (4)

ผลการวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้วิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) โดยการอาบนิวตรอนและวัดรังสีแกมมา (Limsuwan *et al.*, 2011) ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด ทำการวิเคราะห์ความแรงของรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{239}Np , ^{233}Pa และ ^{42}K ที่พลังงาน 277.60, 312.01 และ 1524.58 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ได้ผลการทดลองดังนี้ (Table 3, Figure 2 และ Figure 3)

Table 3 Concentrations of U, Th and K in samples

No.	Sample	U-238 (mg/kg)	Th-232 (mg/kg)	K-40 (%)
1	TR' 2010 TP:T1 Level 2 (70-80 cm.dt) no. 010	1.70±0.66	3.27±0.46	0.19±0.08
2	TR' 2010 TP1:T2 Level 2 (70-80 cm.dt) no.123	0.96±0.16	3.15±0.28	0.92±1.15
3	TR' 2010 TP1:T2E Level 2 (70-80 cm.dt) no. 245	1.04±0.44	2.09±0.68	0.09±0.01
4	TR' 2010 TP1:T3E Level 2 (70-80 cm.dt) no.248	0.92±0.23	3.01±0.25	0.04±0.01
5	TR' 2010 TP1:T1 Level 3 (80-90 cm.dt) no.028	0.93±0.14	3.02±0.08	0.08±0.05
6	TR' 2010 TP1:T2 Level 3 (80-90 cm.dt) no.134	1.03±0.81	4.67±2.17	0.04±0.01
7	TR' 2010 TP1:T3 Level 3 (80-90 cm.dt) no.137	2.51±1.67	10.80±1.42	0.16±0.02
8	TR' 2010 TP1:T2E Level 3 (80-90 cm.dt) no.259	0.69±0.23	1.45±0.36	0.04±0.02
9	TR' 2010 TP1:T2W Level 3 (80-90 cm.dt) no.256	1.80±0.50	3.83±0.49	0.13±0.01
10	TR' 2010 TP1:T3W Level 3 (80-90 cm.dt) no.253	0.61±0.18	1.98±0.40	0.05±0.01
11	TR' 2010 TP1:T3E Level 3 (80-90 cm.dt) no. 261	0.85±0.42	3.29±0.49	0.07±0.02
12	TR' 2010 TP1:T3 Level 4 (90-100 cm.dt) no.140	1.03±0.16	2.62±0.40	0.11±0.01
13	TR 2010 TP1:T3W Level 4 (90-100 cm.dt) no. 270	1.08±0.52	4.18±0.15	0.03±0.01
14	TR'2010 TP1:T3 Level 8 (130-140 cm.dt) no.183	0.68±0.14	1.66±0.36	0.08±0.01
15	TR 2010 TP1:T3 Level 10 (150-160 cm.dt) no.206	1.22±0.40	2.47±0.02	0.05±0.01

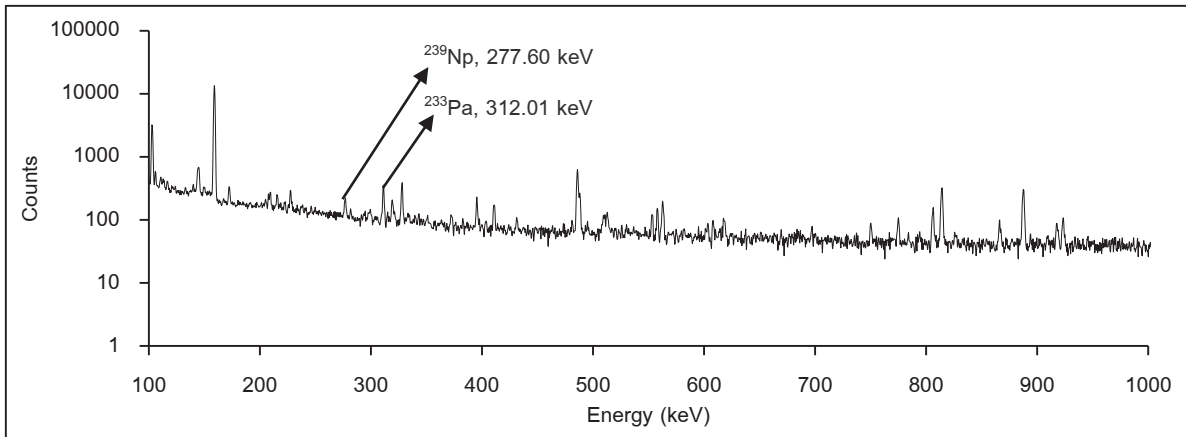


Figure 2 Gamma spectra for radioactive elements U and Th in samples

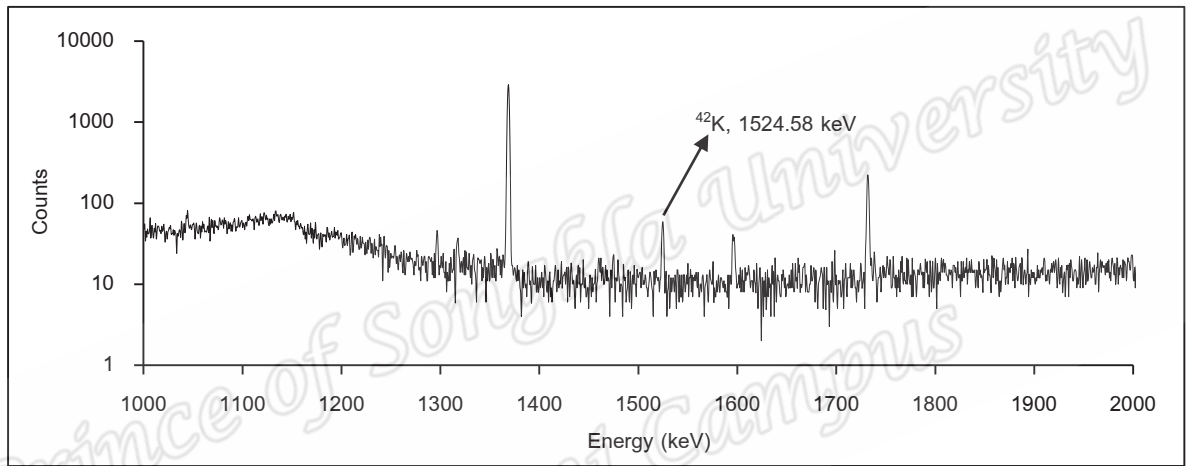


Figure 3 Gamma spectra for radioactive elements K in samples

วิจารณ์ผลการวิจัย

จากผลการทดลอง (Table 3) แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีด้วยเทคนิค NAA นี้ มีความน่าเชื่อถือเนื่องจากการวิเคราะห์เทียบกับสารมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์พบปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมต่ำสุดมีค่า 0.61 มก.ต่อ กก 1.45 มก.ต่อกก. และ 0.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวอย่างมาตรฐาน NIST (NIST SRM 1633b) ผลที่ได้พบว่า จากการวัดโดยระบบวัดรังสีแกมมาชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงดังกล่าว สามารถวัดสเปกตรัมของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมได้อย่างชัดเจน และสามารถนำผลที่ได้ไปสู่อายุของตัวอย่างซึ่งเป็นข้อมูลทางประวัติศาสตร์ได้

สรุปผลการวิจัย

จากตัวอย่างซากหอยน้ำจืดจำนวน 15 ตัวอย่าง ซึ่งเก็บและรวบรวมจากแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหอน จังหวัดสตูล เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ด้วยเทคนิคการอาบนิวตรอนและระบบวัดรังสีแกมมา ผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดมีค่าปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม อยู่ในช่วง 0.61-2.51 มก.ต่อกก 1.45-10.80 มก.ต่อกก. และ 0.03-0.92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ยิ่งไปกว่านั้น ยังเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างวิจัยที่มีปริมาณกัมมันตภาพรังสีน้อยและมีจำนวนจำกัด ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณตัวอย่างและให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุดเพื่อความแม่นยำในการนำไปหาอายุต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ดร. ธีรรัตน์ วิชยดิษฐ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณ คุณวิเชียร รัตนธงชัย คุณศศิพันธุ์ คณะวิรัตน์ และคุณเจตรจันทร์ จันทร์นุ้ย สังกัดกลุ่มวิจัยและพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ช่วยเหลือในด้าน การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในซากหอยน้ำจืด โดยการอาบนิวตรอน และอีกหลายท่านที่ไม่สามารถกล่าวได้ครบในที่นี้

ขอบคุณ คุณพรทิพย์ พันธุ์โกวิท คุณศิริพร สังข์หิรัญ และคุณธนิสรา พุ่มพะกา นักโบราณคดีชำนาญการ และคุณเกียรติชัย สุทธิโชติ นายช่างสำรวจปฏิบัติการ สำนักศิลปากรที่ 13 กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม ที่ช่วยกรุณาสำรวจและเก็บตัวอย่างซากหอยน้ำจืดจากแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหอน จังหวัดสตูลให้

ขอขอบคุณ ดร. สมหมาย ช่างเขียน หน่วยวิจัยรังสีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี รวมถึงพี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดมา ท้ายนี้ขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในงานครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ศุภกิจ อรรถบุตร. 2549. การกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิด

โดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 180 น.

สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม. 2553. รายงานผลการดำเนินงาน

ในโครงการวิจัยการตั้งถิ่นฐานและการดำรงชีวิตและแรกเริ่มประวัติศาสตร์ในเขต

จังหวัดสตูล และสตูลระยะที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา: จหก. ทรีโอ ครีเอชั่น. 245 น.

อุษณี เกิดพันธ์. 2553. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ในดินชุดทางดงและสันทรายโดยเทคนิค

นิวตรอนแอคติเวชันและเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 140 น.

- El-Ghawi, U.M., M.M. Bejey, S.M. Al-Fakhri, A.A. Al-Sadeq and K.K. Doubali. 2005. Analysis of libyan arable soils by means of thermal and epithermal NAA. **The Arabian Journal for Science and Engineering** 30: 147-153.
- Hubert, L.O. 2001. Calibration standard for use in gamma spectrometry and luminescence dating. **Methods and Applications of Absolute Chronology** 20: 31-38.
- Ikeya, M. 1993. **New Applications of Electron Spin Resonance Dating, Dosimetry and Microscopy**. Singapore: World Scientific. 447 p.
- Soliman, N. F. 2006. Investigation of an Egyptian Alabaster Ore by Measuring its Natural Radioactivity and by NAA using K_0 Standardization and comparator Methods. **Nuclear and Radiation Physics**.1(1): 31-40.
- Tidarut, V., S. Thongchai, S. Natnalin, O. Chutima and L. Pichet. 2008. Determination of U, Th and K in sediments and fossil Ccollected from Mae Moh Mine using gamma-ray spectrometry and neutron activation analysis (NAA). **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 42: 333-339.
- Limsuwan, S., T. Vichaidid and P. Limsuwan. 2011. ESR dating of laterite from Ban Tha Ta Suea, Kanchanaburi, Thailand. **Applied Radiation and Isotopes** 69: 545-549.