

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการกำหนดอายุซากหอยน้ำจืด และดินเผาไฟ บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหานประกอบไปด้วยเนื้อหา ปรากฏการณ์การเรืองแสง แบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การจางหายของสัญญาณ การฉายรังสีแบบวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด กราฟเปรียบเทียบมาตรฐาน กฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ปริมาณรังสีต่อปี การวิเคราะห์โดยการออบรังสีนิวตรอน การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พื้นที่การศึกษา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ปรากฏการณ์การเรืองแสง

ปรากฏการณ์เรืองแสงในผลึกตัวอย่าง จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อผลึกตัวอย่างได้รับพลังงานจากภายนอก ซึ่งเป็นพลังงานจากการแผ่รังสีตามธรรมชาติ ปรากฏการณ์เรืองแสงดังกล่าวจะเกิดขึ้นหลังจากการดูดกลืนพลังงานไปแล้วช่วงระยะเวลาหนึ่ง เรียกเวลานี้ว่า เวลาเฉพาะ (Characteristic time,  $\tau_c$ ) ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขในการจัดแบ่งปรากฏการณ์เรืองแสงออกเป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

##### 2.1.1 เวลาเฉพาะน้อยกว่า $10^{-8}$

เมื่อ  $\tau_c < 10^{-8}$  s เรียก ปรากฏการณ์เรืองแสงที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลานี้ว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) โดยปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้น ขณะที่มีการกระตุ้นจากภายนอกมากระตุ้นเท่านั้น กล่าวคือ เมื่อมีการกระตุ้นก็จะเกิดการเรืองแสงทันทีทันใดในเวลา  $\tau_c < 10^{-8}$  s และการเรืองแสงจะหยุดทันทีเมื่อไม่มีการกระตุ้น

##### 2.1.2 เวลาเฉพาะมากกว่า $10^{-8}$

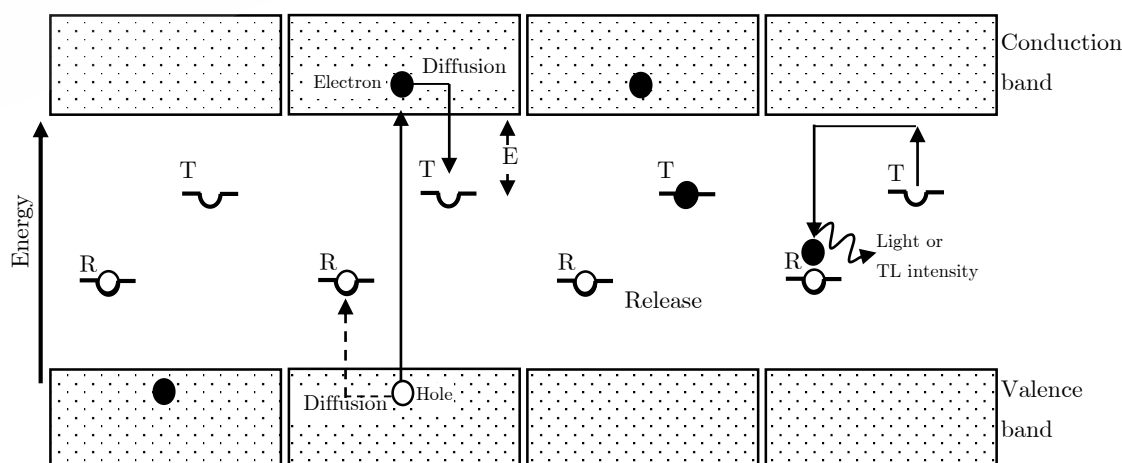
เมื่อ  $\tau_c > 10^{-8}$  s เรียกปรากฏการณ์เรืองแสงที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลานี้ว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) ซึ่งเมื่อผลึกตัวอย่างได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกจะค่อย ๆ เกิดการเรืองแสงก่อนที่จะถึงช่วงที่มีการเรืองแสงมากที่สุด เมื่อสิ้นสุดการกระตุ้นก็ยังคงมีการเรืองแสงออกมา และลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) ซึ่งปรากฏการณ์ฟอสฟอเรสเซนซ์สามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ Short-period ซึ่งมีค่า  $\tau_c < 10^{-4}$  s และ Long-period ซึ่งมีค่า  $\tau_c > 10^{-4}$  s เป็นช่วงเวลาของ  $\tau_c$  มีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นนาฬิกา ไปจนถึง

$4.6 \times 10^9$  y เรียกปรากฏการณ์เรืองแสงดังกล่าวว่า เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence, TL) ซึ่งปรากฏการณ์เรืองแสงแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะไม่มีการเรืองแสงขณะที่ถูกกระตุ้นหรือสิ้นสุดการกระตุ้นจนกว่าจะได้รับพลังงานความร้อนที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จึงจะทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้น (McKeever, 1995; ลำพูน, 2008)

## 2.2 แบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

การแผ่รังสีตามธรรมชาติ จากรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุกัมมันตรังสี เช่น ยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$  และ  $^{235}\text{U}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ในสิ่งแวดล้อม ทั้งจากรังสีคอสมิกรวมถึงการแผ่รังสีตามธรรมชาติจากผลึกตัวอย่างเอง ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับผลึกในตัวอย่างโบราณคดี ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ขึ้นในตัวอย่างที่เรียกว่า การได้รับปริมาณรังสี (Radiation exposure หรือ Dose) ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนในผลึกตัวอย่างได้รับพลังงาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในผลึกขึ้น เกิดเป็นกระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

กระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะต่างจากปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบอื่น ๆ ตรงที่ผลึกได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น รังสีส่งผลให้ผลึกมีการกักเก็บพลังงานไว้ในผลึก โดยช่วงเวลาที่ใช้ในการกักเก็บจะอยู่ในช่วงเวลาที่เป็วินาทีไปจนถึงปี จนกว่าจะได้รับการกระตุ้นจากความร้อนที่พอเหมาะจึงจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปแสงที่ตามองเห็น กระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์อธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีแถบพลังงาน (Energy band theory) จากแบบจำลองอย่างง่าย ได้แก่ แบบจำลองแถบพลังงาน (Energy band model) ในแบบจำลองนี้มีระดับพลังงานที่เกี่ยวข้อง 3 ระดับด้วยกัน คือ แถบวาเลนซ์ (Valence band) แถบการนำ (Conduction band) และแถบต้องห้าม (Forbidden band หรือ Energy gap) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ตามแบบจำลองแถบพลังงาน โดยวงกลมที่บัพแทนอิเล็กตรอน และวงกลมกลวงแทนโฮล (ปรับปรุงจาก Aitken, 1985)

ศูนย์กลาง (Center) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในผลึกเกิดจากความบกพร่องของผลึก เมื่อผลึกได้รับรังสีจากการแผ่รังสีตามธรรมชาติส่งผลให้เกิดกระบวนการไอออนไนเซชัน พลังงานที่ผลึกได้รับมีค่ามากกว่าแถบต้องห้าม อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับผลึกทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานเพียงพอที่จะสามารถข้ามแถบต้องห้ามไปอยู่ในแถบการนำ ส่งผลทำให้เกิดโฮลอิสระ (Free hole) ที่แถบวาเลนซ์ พร้อมกับมีโฮลอิสระถูกจับที่กับดักโฮล (Hole trap, H) โดยอิเล็กตรอนที่ข้ามแถบต้องห้ามไปอยู่ในแถบการนำมีผลต่างของพลังงานเป็น

$$E_c = E_c - E_v \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E_c$  คือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน  
 $E_c$  คือ ระดับพลังงานของแถบการนำ  
 $E_v$  คือ ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์

แถบการนำเป็นสถานะที่มีพลังงานสูงกว่า และไม่เสถียร ดังนั้น อิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งจึงพยายามกลับคืนสู่สถานะพื้นโดยทันทีทันใด ส่วนอิเล็กตรอนอีกจำนวนหนึ่งจะถูกจับไว้ที่สถานะกึ่งเสถียร (Metastable state) โดยจุดบกพร่องหรือกับดักอิเล็กตรอน (Trapping state, T) ซึ่งเป็นระดับชั้นพลังงานภายในแถบต้องห้าม อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบการนำ อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกจับอยู่ภายใต้เงื่อนไขของช่วงชีวิต (Life time) ไปจนกระทั่งผลึกได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อนที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากกับดัก และคายพลังงานออกมาในรูปของแสงที่ตามองเห็นแล้วกลับมาอยู่สถานะพื้นเช่นเดิม อิเล็กตรอน และโฮลดังกล่าวอาจรวมกันโดยผ่านศูนย์กลางการรวม (Recombination center, R) และมีการเรืองแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เกิดขึ้น

## 2.3 เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณแสงที่ผลึกตัวอย่างปล่อยออกมาเมื่อได้รับความร้อน โดยทำการแปลงสัญญาณ TL Intensity ให้อยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นคูอมบ์หรือเป็นหน่วย Arbitrary unit (a.u) หรือค่า Count โดยจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับอุณหภูมิที่ให้ความร้อน ลักษณะโดยทั่วไปของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ แสดงดังรูปที่ 2.2(a) ประกอบด้วยเครื่องมือสำคัญ ๆ ดังนี้

### 2.3.1 ส่วนควบคุมความร้อน

ส่วนควบคุมความร้อน (Temperature program) ได้แก่ เครื่องมือให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเรียกว่า แผ่นความร้อน (Heating system) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปกระตุ้นการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในหลุมกักเก็บ โดยผ่านสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ไปยังภาคความร้อนชนิดไฟฟ้า ซึ่งเป็นภาชนะใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัด จะมีระบบให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า และระบบควบคุม

อุณหภูมิด้วยลวดเทอร์โมคอปเปิล ในขณะที่ให้ความร้อนแก่ผลึกตัวอย่างจำเป็นต้องใช้ก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับผลึกตัวอย่างแทนการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศปกติที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งทำให้ผลการวัดผิดพลาด และเกิดการลุกไหม้ได้ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่เป็นผงขนาดเล็ก ส่วนใหญ่ ภาตใส่ตัวอย่างมักทำจากโลหะที่มีการเหนียวนำความร้อนที่ดี เช่น โลหะผสมนิเกิล-โครเมียม โลหะแทนทาลัมหรือโลหะสแตนเลส เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ภาตใส่ตัวอย่างเป็นแผ่นหนา ประมาณ 0.5 mm กว้าง 2 cm และยาว 4 cm โดยบริเวณกลางแผ่นจะเป็นเข้าสี่เหลี่ยมมุมโค้ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm เป็นที่ใส่ตัวอย่าง

### 2.3.2 ส่วนวัดปริมาณแสง

ส่วนวัดปริมาณแสง (Light detector) ได้แก่ เครื่องมือโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier, PMT) ซึ่งมีลักษณะเป็นหลอดแก้ว โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 – 8 cm ภายนอกของหลอดนี้จะเคลือบด้วยวัสดุสีดำ และบรรจุอยู่ในโลหะทรงกระบอกสีดำ ส่วนภายในหลอดประกอบด้วยแผ่นแคโทดที่เคลือบด้วยสารจำพวกโบอัลคาไล (Bialkaline photocathode) ซึ่งเคลือบด้วยสารโพแทสเซียม (Potassium) และซีเซียม (Caesium) หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จะติดตั้งอยู่เหนือที่ใส่ตัวอย่าง โดยมีฟิลเตอร์อยู่ระหว่างกลาง หลอดนี้จะทำหน้าที่วัดปริมาณของแสงที่สะท้อนจากตัวอย่างเป็นจำนวนโฟตอน (Photon) หรือวัดเป็น Count Per Second (cps) และแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งไปยังส่วนขยายสัญญาณ

### 2.3.3 ส่วนแปลงสัญญาณ

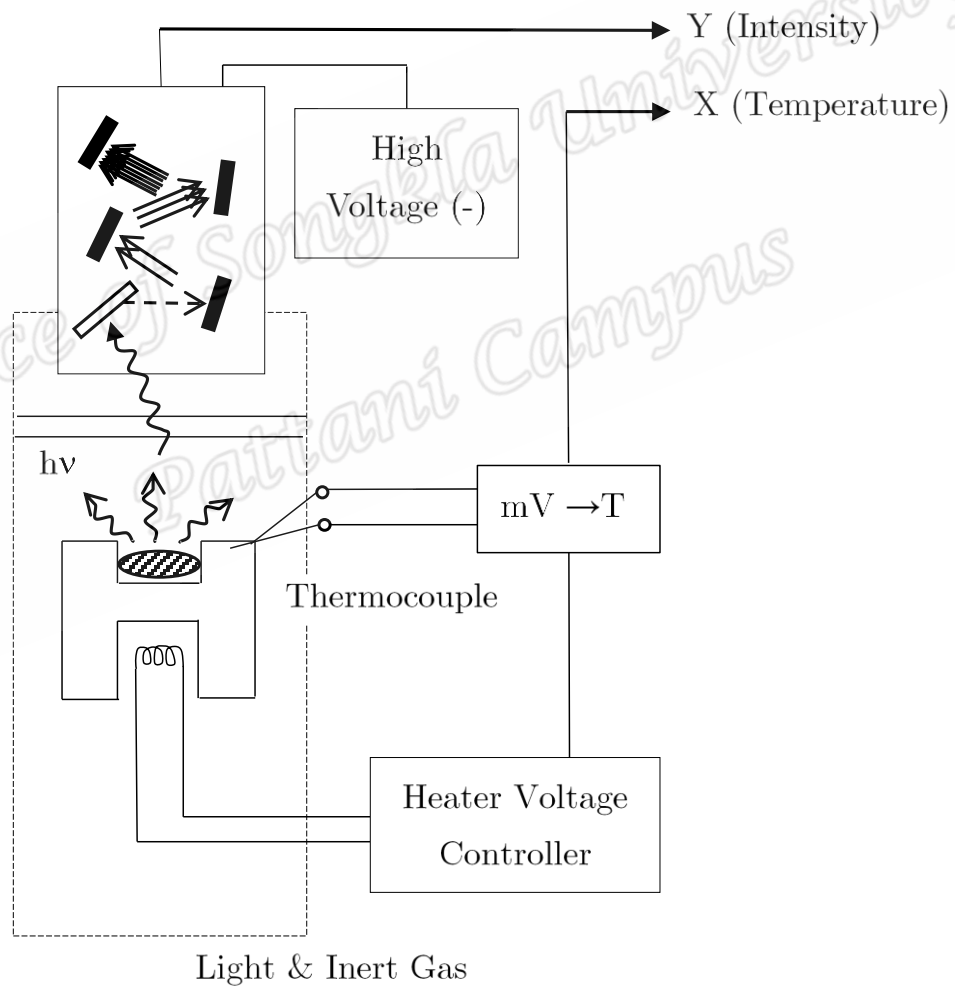
ปริมาณของความเข้มแสงที่ออกมา จากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จะถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณ (Pulse amplifier หรือ Electron amplifier) ผ่านเครื่อง Rate Meter ซึ่งแปลงสัญญาณหรือความถี่เป็นความเข้มของแสง และถูกบันทึกลงเครื่องบันทึก (Recorder) ในแกน Y ส่วนแกน X จะเป็นอุณหภูมิของตัวอย่างที่ได้รับจาก Heater ดังรูปที่ 2.2(b) ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิจะไม่เกิน 400 °C สำหรับตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และไม่เกิน 600 °C สำหรับตัวอย่างดินเผาไฟ

### 2.3.4 ระบบแสดงผล

ระบบแสดงผลจะแสดงผลหน้าจอของเครื่องวัดโดยตรงหรือส่งผ่านข้อมูลไปเก็บด้วยระบบคอมพิวเตอร์ แสดงผลออกมาในรูปโกลว์เคิร์ฟที่มีพื้นที่ใต้กราฟเป็นพลังงานรังสีที่สะสม



(a)



(b)

รูปที่ 2.2 ลักษณะทั่วไปของ (a) เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ รุ่น Harsho-3500  
 (b) ส่วนประกอบของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Ikeya, 1993)

## 2.4 โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

โกลว์เคิร์ฟเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL Intensity) กับคุณสมบัติที่ใช้ในการให้ความร้อน ถ้าอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) คงที่สม่ำเสมอกราฟที่ได้จะคล้ายกันมาก สามารถอธิบายค่า TL Intensity โดยใช้ทฤษฎีแรนดอลล์ และวิลคินส์ (Randall and Wilkins) ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลึกที่มีกับดักอิเล็กตรอน มีพลังงานความลึก (Energy depth, E) ของกับดักอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งอยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบการนำ ในขณะที่ผลึกนี้มีอุณหภูมิเท่ากับองศาเคลวิน พบว่า ความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดักอิเล็กตรอน (P) เป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$P = \frac{1}{\tau} = S e^{\frac{-E}{kT}} \quad (2.2)$$

เมื่อ P คือ ความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดักต่อหน่วยเวลา (s)

$\tau$  คือ ชั่วชีวิตของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกับดัก

k คือ Boltzman's Constant (โดยที่  $k = 1.381 \times 10^{-23}$  J/K;  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K)

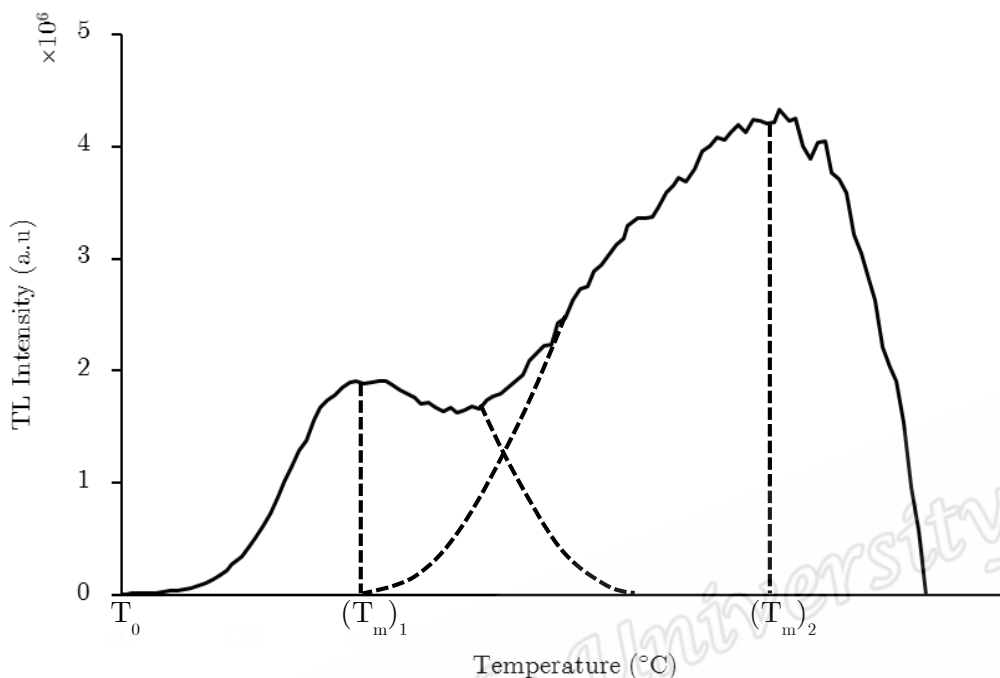
S คือ Frequency Factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผิดปกติตรงส่วนโครงสร้างของผลึก ( $s^{-1}$ )

E คือ พลังงานความลึกของกับดักอิเล็กตรอน (eV)

T คือ อุณหภูมิ (K)

จากสมการ (2.2) พบว่า ค่า K, E และ s จะมีคงที่ เมื่ออุณหภูมิ (T) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า p เพิ่มขึ้น และ  $\tau$  มีค่าลดลงไปด้วย ดังนั้น หากเพิ่มอุณหภูมิให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นเทียบกับเวลาโดยเริ่มจากอุณหภูมิห้อง จะทำให้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกดักจับมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุด ( $T_m$ ) ในขณะที่จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกับดักไว้ก็จะค่อย ๆ หมดลงในที่สุด ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ดังนั้น ค่าสูงสุดของเส้นโค้งสัมพันธ์ที่เรียกว่า พีค (Peak) ของ TL Intensity จะเห็นได้ ณ อุณหภูมิ  $T_m$  ซึ่งจะเรียกพีคนี้ว่า โกลว์เคิร์ฟ (Glow Curve) ดังรูปที่ 2.3 ถ้ามีหลุมกับดักมากกว่าหนึ่งจะทำให้เห็นโกลว์เคิร์ฟมากกว่าหนึ่งเช่นกัน





รูปที่ 2.3 โกลว์เคิร์ฟเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างดินเผาไฟที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.3 เป็นผลจากการให้ความร้อนแก่ผลึกตัวอย่างที่ได้รับรังสี ซึ่งมีกับดักอิเล็กตรอนจำนวน 2 หลุม อุณหภูมิของผลึกตัวอย่างเป็น  $T$  เมื่อได้รับความร้อนมากกระตุ้นส่งผลให้แสดงโกลว์เคิร์ฟออกมา 2 โกลว์เคิร์ฟที่  $(T_m)_1$  และ  $(T_m)_2$  การให้ความร้อนแก่ผลึกตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่า  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่งผลทำให้แสงอินฟราเรดจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กำเนิดความร้อนก่อให้เกิดความเข้มแสงที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลทำให้โกลว์เคิร์ฟเปลี่ยนแปลงไปได้แก่ อัตราการให้ความร้อน ขนาดรูปร่างลักษณะของโกลว์เคิร์ฟ ระดับของโดสรังสี ชนิดของรังสี เครื่องมือที่ใช้บันทึกโกลว์เคิร์ฟ

#### 2.4.1 อัตราการให้ความร้อน

การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนแก่ผลึกตัวอย่าง จะมีผลต่อโกลว์เคิร์ฟอย่างมาก กล่าวคือ ถ้าเพิ่มอัตราการให้ความร้อนขึ้นเป็นสองเท่าจะทำให้ความสูงของพีคลดลงเป็นสองเท่า แสดงดังรูปที่ 2.4

#### 2.4.2 ขนาดรูปร่างลักษณะของโกลว์เคิร์ฟ

เมื่อนำตัวอย่างวางบนภาตใส่ตัวอย่างของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ผลึกตัวอย่างบางส่วนที่สัมผัสกับความร้อนจะได้รับความร้อนก่อน ส่วนที่อยู่ห่างออกไปจะได้รับความร้อนจากการนำความร้อน ดังนั้น จะเห็นว่าขนาด รูปร่าง และสภาพการนำความร้อนของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีผลต่อโกลว์เคิร์ฟอย่างมาก

### 2.4.3 ระดับของโดสรังสี (Level of exposure)

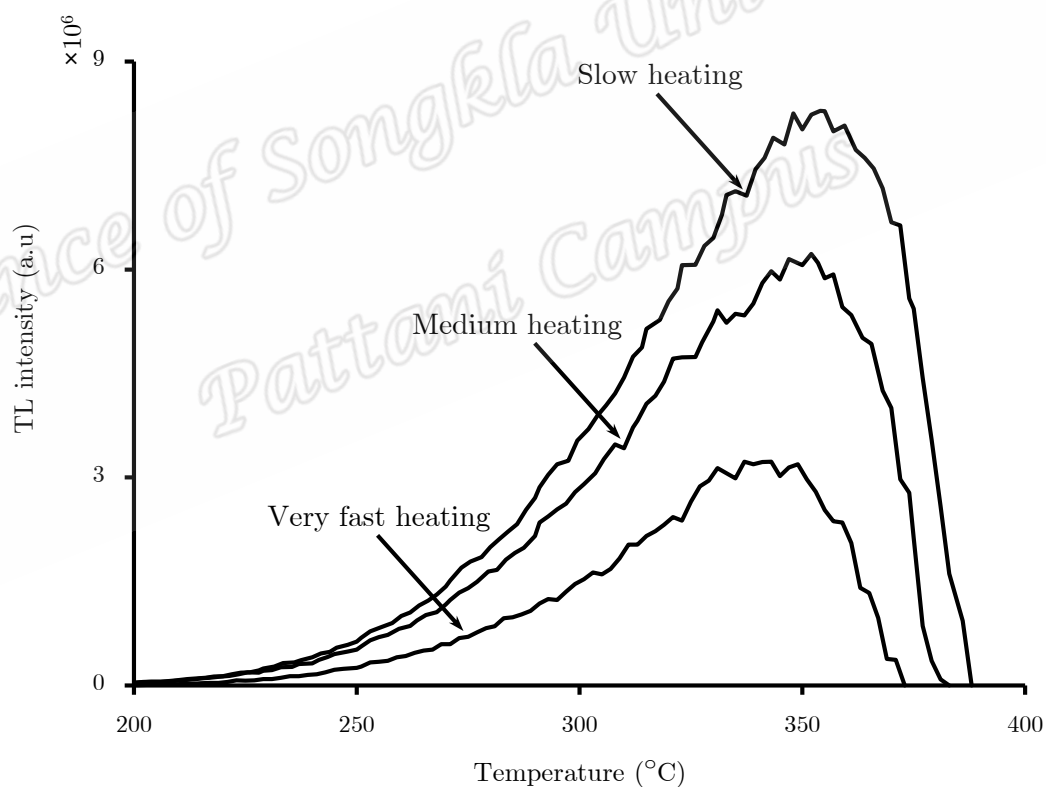
โดสรังสีที่ผลึกตัวอย่างได้รับจะมีผลต่อโกลว์เคิร์ฟด้วยเพราะกับดักต่าง ๆ จะไม่เอี่ยมตัวที่ปริมาณรังสีระดับเดียวกันดังรูปที่ 2.5

### 2.4.4 ชนิดของรังสี (Type of radiation)

เมื่อผลึกตัวอย่างได้รับรังสีต่างชนิดกันจะให้โกลว์เคิร์ฟที่มีรูปร่างต่างกันด้วย ดังรูปที่ 2.6

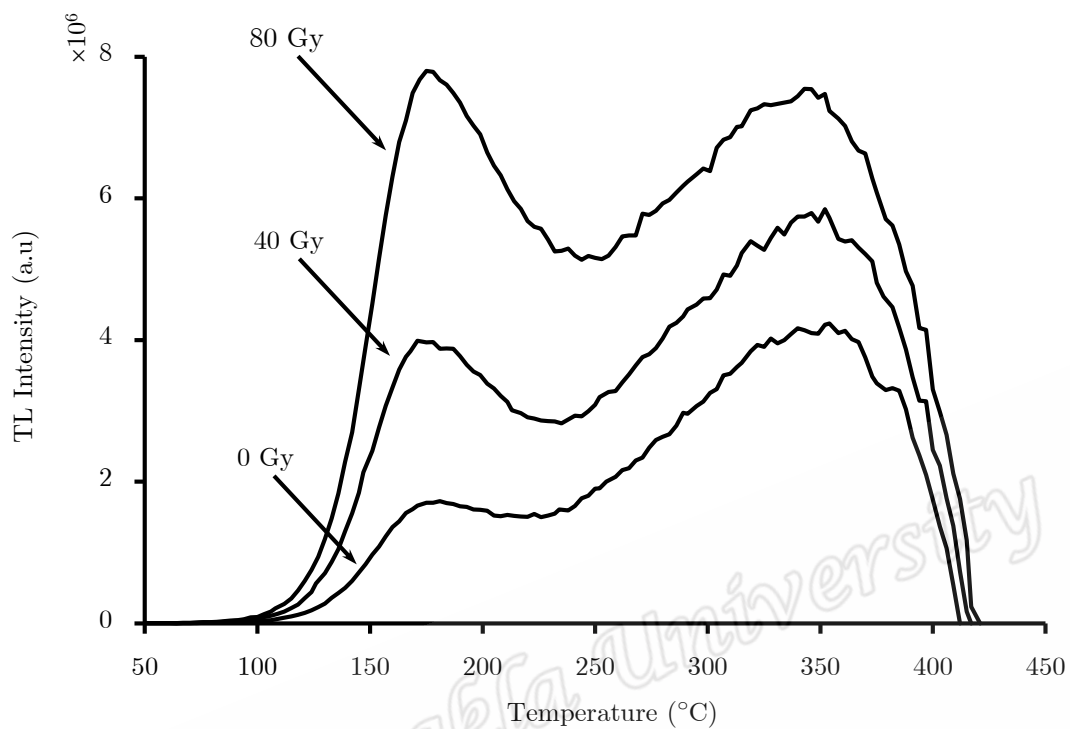
### 2.4.5 เครื่องมือที่ใช้บันทึกโกลว์เคิร์ฟ (Recording instrument)

ถ้าเครื่องมืออยู่ในสภาพที่ผิดปกติ เช่น เทอร์โมคัปเปิลทำงานผิดปกติ หากไม่มีการปรับเทียบอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลที่ให้กับภาตรองให้ความร้อนอาจทำให้ตำแหน่งอุณหภูมิของพีคหลักผิดไป

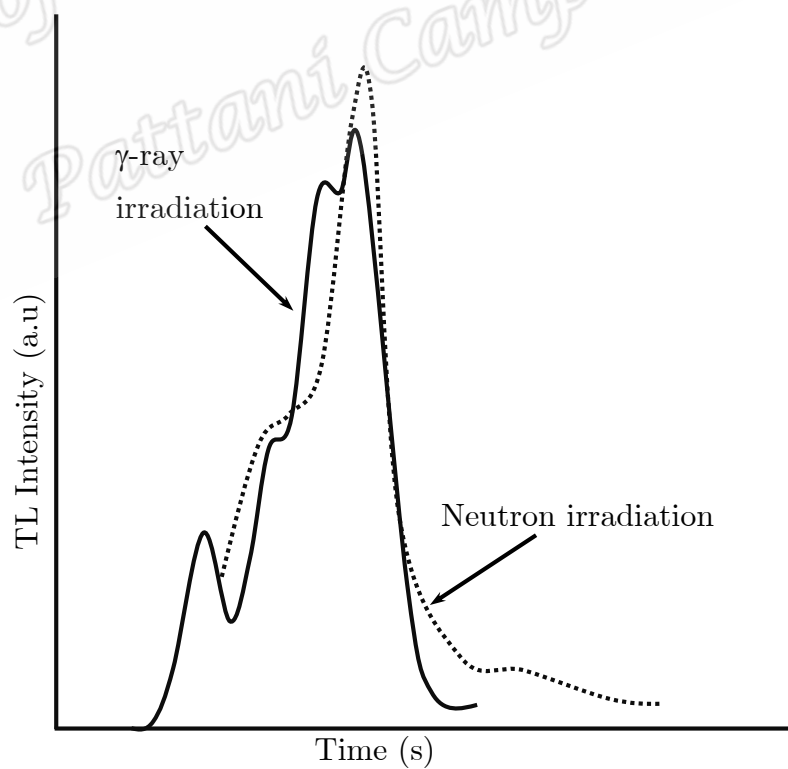


รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของโกลว์เคิร์ฟ





รูปที่ 2.5 ผลของระดับโดสรังสีที่มีผลต่อโกลว์เคิร์ฟของตัวอย่างดินเผาไฟ



รูปที่ 2.6 โกลว์เคิร์ฟของลิเทียมฟลูออไรด์ ซึ่งนำไปฉายรังสีนิวตรอน และรังสีแกมมา (ลำพูน, 2008)

ดังนั้น ถ้ากล่าวถึงโกลว์เคิร์ฟปกติจะหมายถึง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับ อุณหภูมิ เนื่องจากผลึกตัวอย่างได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิภายนอกอยู่ตลอดเวลา และถ้าเลือกพีคที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเกินไปก็จะมีการรบกวนจากรังสีอินฟราเรด ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ในการวัดมี อุณหภูมิสูง ดังนั้น โกลว์เคิร์ฟที่ดีจะต้องมีพีคอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะไม่ถูกรบกวนจาก อุณหภูมิห้อง และไม่สูงเกินไปจนเกิดปัญหาในการออกแบบ โดยทั่วไปต้องใช้พีคที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิ หนึ่งที่เหมือนกัน ซึ่งพีคดังกล่าวมาจากผลึกตัวอย่างธรรมชาติ และผลึกที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา มาของตัวอย่างเดียวกัน ในทางปฏิบัติมักใช้พีคที่อุณหภูมิที่สูงกว่า เนื่องจากพีคที่อุณหภูมิสูงมี ความเสถียรภาพดีกว่าพีคที่อุณหภูมิต่ำเลือก

## 2.5 การจางหายของสัญญาณ (Fading)

เสถียรภาพของข้อมูลมีความสำคัญมากในการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งต้องทำงานเกี่ยวข้องกับเวลาหรือการวัดรังสีเป็นเวลานาน ๆ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกจับไว้ใน กับดักอิเล็กตรอนมีระดับพลังงาน และค่าชั่วชีวิตที่แตกต่างกัน เปรียบเสมือนหลุมที่มีความตื้นลึก ต่างกัน ดังนั้น โกลว์เคิร์ฟของผลึกตัวอย่างจึงแสดงพีคของสัญญาณได้หลายพีค และเกิดที่ อุณหภูมิต่างกัน พีคที่อุณหภูมิต่ำเป็นพีคที่ไม่เสถียรเกิดจากกับดักที่พลังงานต่ำ อิเล็กตรอนที่ถูก กักเก็บในหลุมกับดักอิเล็กตรอนสามารถหลุดหลบหนีไปได้อเองที่อุณหภูมิห้อง ทำให้สัญญาณที่อ่านได้ ลดลงตามสมการที่ 2.2 เรียกว่า Fading พบว่าค่าชั่วชีวิตจะแปรผันกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่สูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มโอกาสในการหลบหนีของอิเล็กตรอนออกจากกับดัก ดังนั้น การใช้ข้อมูลจากการทดลองวัดรังสีเป็นเวลานานจึงควรเลือกข้อมูลบริเวณที่ระดับพลังงานสูง ๆ ที่มีเสถียรภาพเพื่อหลีกเลี่ยงการ Fading ของข้อมูล

## 2.6 การฉายรังสีแบบวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Additive dose method)

วิธี Additive Dose เป็นการฉายรังสีเพิ่มเข้าไปในผลึกตัวอย่าง ทำโดยการฉายรังสีแกมมาจาก ต้นกำเนิดรังสี Co – 60 ในระดับโดสต่ำแล้วเพิ่มระดับโดสขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL intensity) ต่อหนึ่ง หน่วยโดสรังสีหรือเรียกว่า “ผลการตอบสนองของผลึกตัวอย่างต่อรังสี”

วิธี Additive Dose ส่งผลให้ TL Intensity มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นปฏิภาคกับระดับโดสรังสีที่ได้รับ (Q) มีค่าเท่ากับผลคูณของโดสรังสีที่ได้จากวิธี Additive Dose (D') และเวลาการฉายรังสี (t') จะได้  $Q = D' \cdot t'$  ดังรูปที่ 2.7(a)

ถ้ากำหนดให้  $AD = Dt$  และเมื่อ  $Q = D't'$  จะได้

$$I = I_0 \left(1 + \frac{Q}{AD}\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $I_0$  และ  $I$  คือ ความเข้มสัญญาณก่อน และหลังการอาบรังสี

Q คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากวิธี Additive Dose ที่เวลา  $t'$

AD คือ ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose)

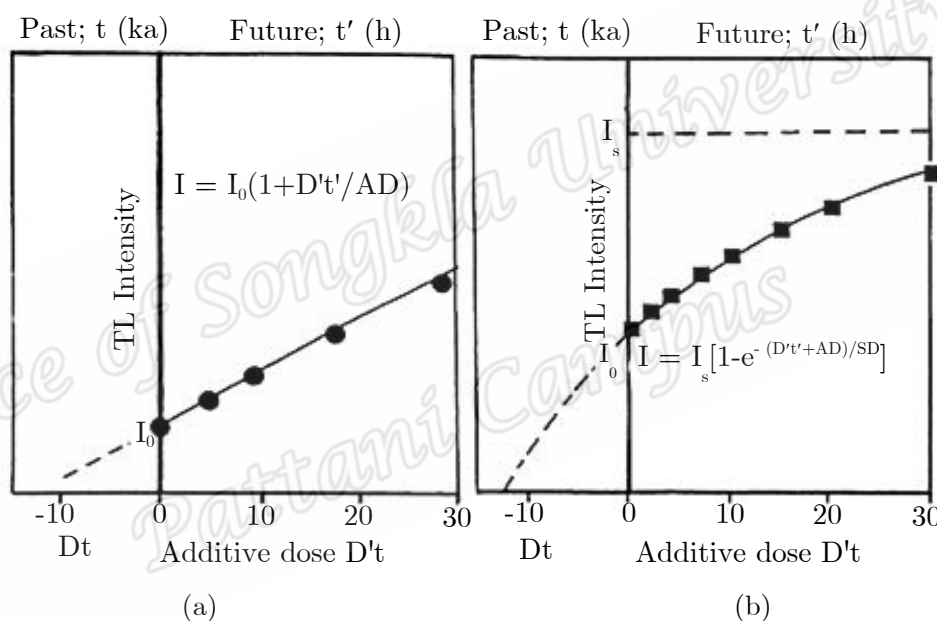
กรณีความเข้มกับอุณหภูมิมีแนวโน้มเป็นแบบอิมิตัว (รูปที่ 2.7(b)) จะได้

$$I = I_s(1 - e^{-(D't'+AD)/SD}) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $I_s$  คือ ความเข้มขั้นที่อิมิตัว

SD คือ ปริมาณการอาบรังสีที่อิมิตัว และมีค่าเท่ากับการอาบรังสี  $D'$

และชั่วชีวิต (Life time) ที่เกิดการอิมิตัว  $\tau'_s$



รูปที่ 2.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับโดสรังสีแกมมาแบบวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (a) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (b) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบอิมิตัว (Ikeya, 1993)

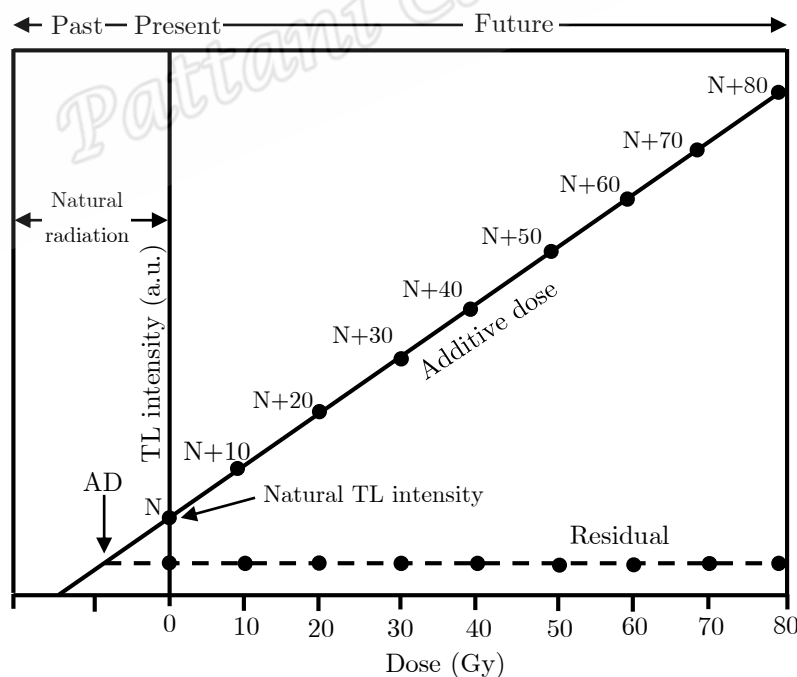
รูปที่ 2.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสีที่ได้จากวิธี Additive Dose จะมีแนวโน้มความสัมพันธ์ 2 แบบ คือ แบบเชิงเส้น และแบบอิมิตัว กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสี มีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น (รูปที่ 2.7(a)) ในกรณีที่หลุมกับดักอิเล็กตรอนสามารถบรรจุอิเล็กตรอนในหลุมได้อีกหรือสามารถบรรจุอิเล็กตรอนเพิ่มอีกได้เป็นระยะเวลานาน กรณีที่เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสี แล้วมีแนวโน้มเป็นแบบอิมิตัว (รูปที่ 2.7(b)) ก็ต่อเมื่อหลุมกับดักอิเล็กตรอนเต็ม

เนื่องจากหลุมกับดักอิเล็กตรอนมีขีดจำกัดในการรับอิเล็กตรอน พอถึงจุด ๆ หนึ่งกับดักอิเล็กตรอนเต็ม แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสีจะเกิดการอ้อมตัว

## 2.7 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration curve)

เนื่องจากการวัดปริมาณรังสีด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นระบบการวัดที่พัฒนาเพื่อการใช้งานฟิสิกส์สุขภาพ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ในสาขาอื่น ๆ วิธีการพื้นฐานในการตรวจวัดปริมาณรังสีก็ยังคงเดิม โดยระบบการวัดปริมาณโดสรังสีวิธีนี้จะไม่สามารถทราบปริมาณโดสรังสีโดยตรงแต่จะเป็นปริมาณความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมา ดังนั้น ระบบการวัดแบบนี้จึงต้องทำการปรับเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นจากผลึกตัวอย่างของวัสดุชนิดเดียวกัน

งานวิจัยนี้สร้างกราฟเพื่อหาปริมาณรังสีสะสม ทำโดยนำตัวอย่างที่รับรังสีจากธรรมชาติ (Unknown) ไปฉายรังสีแบบ Additive Dose แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีไปอ่านค่า TL Intensity ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ นำค่าที่ได้มาสร้างกราฟซึ่งไม่ผ่านจุดตัดแกน โดยที่  $X = 0$  คือ ค่า TL Intensity ของตัวอย่างที่ได้จากธรรมชาติ ดังนั้น กราฟมาตรฐานคือ กราฟการปรับเทียบปริมาณรังสีสะสมจากธรรมชาติ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity ในแกน x กับโดสรังสีแบบ Additive Dose ในแกน y และค่าคงเหลือจากการอบแสงแดด เมื่อพิตกราฟจะได้สมการซึ่งอยู่ในรูป  $y = y_0 + ax$  ต่อเส้นกราฟตัดแกน x ที่  $y = \text{TL Intensity Residual}$  และ x คือ ปริมาณรังสีสะสมหรือค่า AD ดังรูป



รูปที่ 2.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสี (Dose) จากกระบวนการ Additive Dose และ Residual จากการอบแสงแดด

## 2.8 กฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ธาตุกัมมันตรังสีจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพของนิวเคลียสอยู่ตลอดเวลา เพื่อที่จะได้ธาตุใหม่ซึ่งมีนิวเคลียสที่เสถียร ในการเปลี่ยนสภาพนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีจะพบว่ามีนิวเคลียสของธาตุใหม่เกิดขึ้น พร้อมกับปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาเสมอ เราเรียกกระบวนการนี้ว่า การสลายกัมมันตรังสี (Radioactive decay) หรือเรียกว่า การสลาย (Decay) จากสมมติฐานของรัทเทอร์ฟอร์ดและชอดดิกกล่าวว่า ธาตุกัมมันตรังสีสลายให้ธาตุใหม่โดยปล่อยอนุภาคแอลฟา อนุภาคเบต้า แกมมา ธาตุใหม่ที่ได้จะมีสมบัติทางเคมีต่างไปจากธาตุเดิม และธาตุใหม่อาจเป็นธาตุกัมมันตรังสีก็ได้ การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี ไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมภายนอกนิวเคลียส เช่น อุณหภูมิ ความดัน ทุกนิวเคลียสมีโอกาสสลายได้เท่า ๆ กัน แต่บอกไม่ได้ว่านิวเคลียสใดสลายก่อนหรือหลัง

ถ้ากำหนดให้  $N$  คือ จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ขณะเวลา  $t$  และ  $\Delta N$  คือ จำนวนนิวเคลียสที่สลายไปในช่วงเวลา  $\Delta t$  นับจาก  $t$  ดังนั้น  $\Delta N / \Delta t$  แสดงจำนวนนิวเคลียสที่สลายไปใน 1 หน่วยเวลา ก็คือ อัตราการสลายของนิวเคลียส ณ เวลา  $t$  นั้นเอง จากสมมติฐานของรัทเทอร์ฟอร์ด และชอดดิกอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีจะแปรผันตามจำนวนนิวเคลียสหรืออะตอมที่มีอยู่เดิมในขณะนั้น

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\lambda$  เป็นค่าคงตัวการสลาย (Decay constant) หรือโอกาสที่นิวเคลียสสลายตัวได้ใน 1 วินาที มีหน่วย  $s^{-1}$  และเครื่องหมายลบแสดงการลดลงของจำนวนนิวเคลียสกัมมันตรังสี ถ้าช่วงเวลา  $\Delta t$  มีค่าน้อยมาก ( $\Delta t$  มีค่าเข้าใกล้ 0) จะเขียนสมการ (2.5) ได้ดังนี้

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (2.6)$$

ให้  $N_0$  เป็นจำนวนอะตอมที่มีอยู่เดิม เมื่อเริ่มต้นที่เวลา  $t = 0$  สมการ (2.6) จะได้

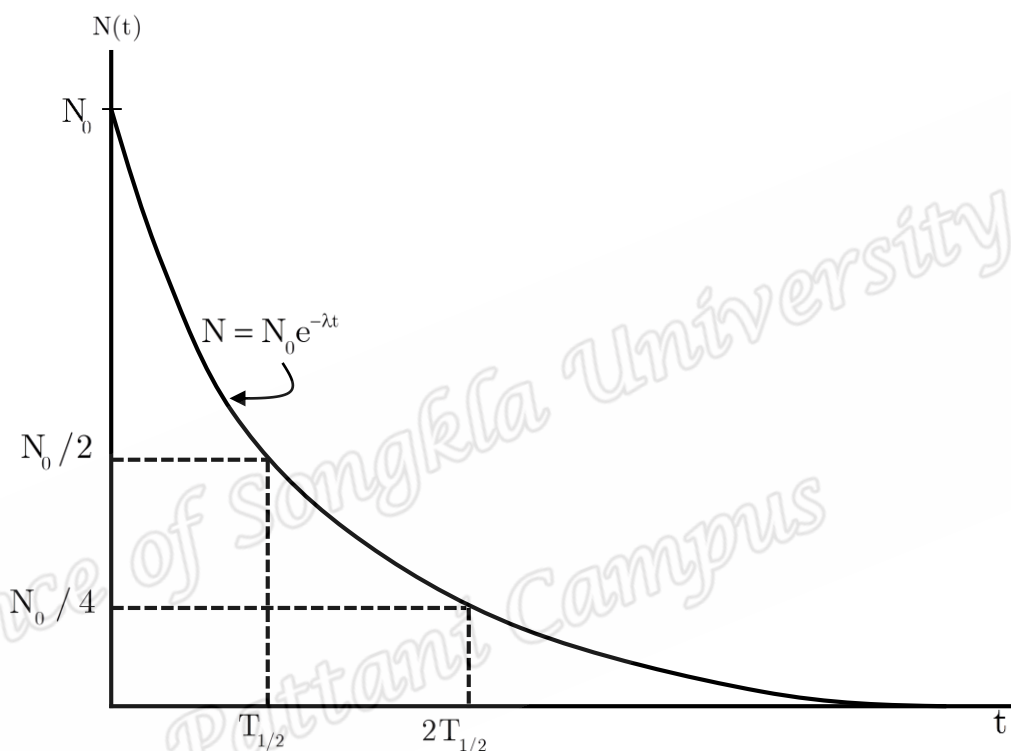
$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

สมการ (2.7) เรียกว่า กฎการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี (Law of radioactive decay) เมื่อนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $N$  และ  $t$  จะได้กราฟดังรูป 2.11



รูปที่ 2.9 การลดจำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ณ เวลาต่าง ๆ

จากรูป  $T_{1/2}$  คือ ค่าครึ่งชีวิต (Half life) ของธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่จำนวนนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสีสลายจนเหลือครึ่งหนึ่งของจำนวนเริ่มต้น เช่น เริ่มต้นด้วยจำนวนนิวเคลียส  $N_0$  มีครึ่งชีวิต  $T_{1/2}$

เมื่อเวลาผ่านไป  $T_{1/2}$  เหลือจำนวนนิวเคลียส  $N_0/2$

เมื่อเวลาผ่านไป  $2T_{1/2}$  เหลือจำนวนนิวเคลียส  $N_0/4$

เมื่อเวลาผ่านไป  $3T_{1/2}$  เหลือจำนวนนิวเคลียส  $N_0/8$

ครึ่งชีวิตกับค่าคงตัวการสลายมีความสัมพันธ์กันเป็นไปตามสมการ (2.7) เมื่อเวลาผ่านไป  $T_{1/2}$  จำนวนนิวเคลียสเหลือ  $N_0/2$  ดังนั้น

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{N_0}{N_0} e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{e^{-\lambda T_{1/2}}} = 2$$

$$2 = e^{\lambda T_{1/2}}$$

จากนิยาม log จะได้ว่า

$$\ln 2 = \lambda T_{1/2}$$

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

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการวัดเพื่อหาจำนวนนิวเคลียสโดยตรงทำได้ยาก ดังนั้น การศึกษาการสลายของธาตุกัมมันตรังสีจากสมการ (2.7) โดยตรงจึงไม่สะดวกในทางปฏิบัติ แต่ถ้าแทนสมการ (2.6) ในสมการ (2.7) พบว่า

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda(N_0 e^{-\lambda t}) \quad (2.10)$$

จากสมการ (2.10) ถ้ากำหนดให้  $A_0$  และ  $A$  เป็นอัตราการสลายของธาตุกัมมันตรังสีที่เริ่มต้นที่  $t = 0$  และเวลา  $t$  ใด ๆ ตามลำดับ หรือ “กัมมันตภาพ” หรือ “ความแรงรังสี (Activity)” จะได้

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

$$A = -\lambda N \quad (2.11)$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (2.12)$$

## 2.9 ปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose or Dose rate)

### 2.9.1 การเปรียบเทียบปริมาณ และหน่วย

เมื่อรังสีเกิดปฏิกิริยากับผลึกตัวอย่างจะเกิดการถ่ายเทพลังงานให้กับผลึกตัวอย่าง ปริมาณของพลังงานต่อน้ำหนักที่ผลึกตัวอย่างดูดกลืนไว้ เรียกว่า การดูดกลืนรังสี (Absorbed dose)



มีหน่วยเป็น เกรย์ (Gray, Gy) ปริมาณรังสี 1 Gy เทียบเท่ากับพลังงานของรังสี 1 J ที่วัสดุตัวอย่าง น้ำหนัก 1 kg ดูดกลืนเอาไว้ โดยปริมาณรังสีที่ได้รับ 1 Gy เทียบเท่ากับ 100 rad ดังนี้

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kgGy} = 100 \text{ rad}$$

ส่วนพลังงานของรังสี จะใช้หน่วยวัดเป็น อิเล็กตรอนโวลต์ (Electronvolts, eV) พลังงาน 1 eV มีค่าน้อยมาก โดยทั่วไปจะใช้หน่วยเป็นจำนวนเท่าของอิเล็กตรอนโวลต์ ได้แก่ กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Kiloelectron, keV) และเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (Megaelectronvolt, MeV) สำหรับหน่วยการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในระดับสากล ค่าอายุที่ได้จะมีหน่วย ปี (year, y หรือ annum, a) กรณีตัวอย่างที่กำหนดอายุถูกทับถมมาเป็นเวลานานอายุจะมีค่ามาก ออกมาในหน่วย กิโลแอนนี (Kiloannee, ka) เมกะแอนนี (Megaannee, Ma) และจิกะแอนนี (Gigaannee, Ga)

### 2.9.2 กัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ

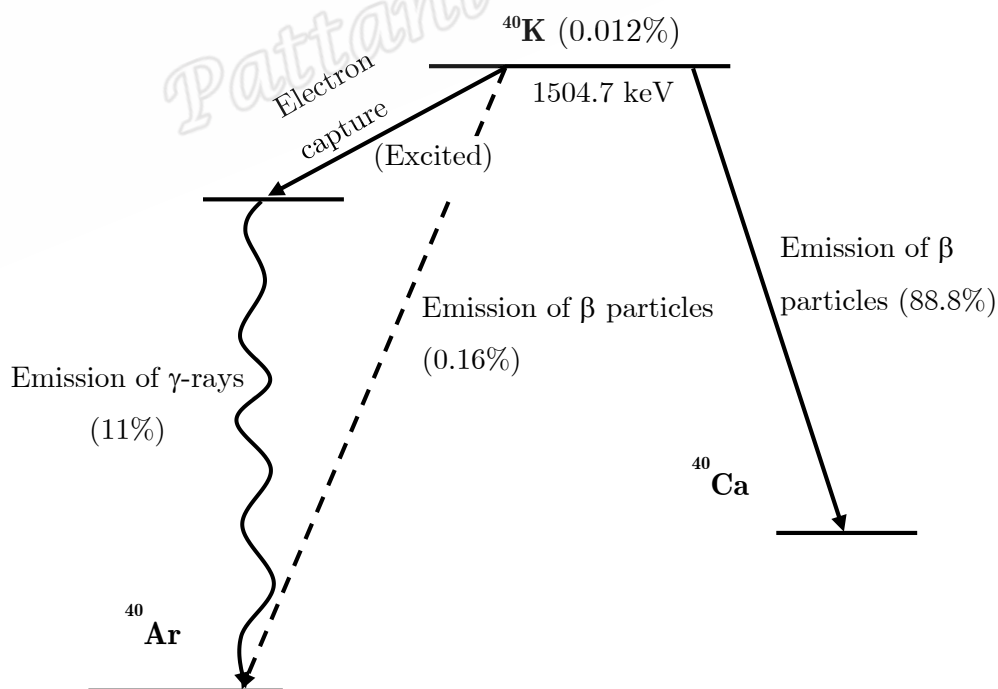
รังสีต่าง ๆ จะถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งด้วยกัน เช่น รังสีจากนอกโลกซึ่งเรียก รังสีคอสมิก โดยแหล่งกำเนิดที่ใหญ่ที่สุดของรังสีนี้ คือ ดวงอาทิตย์ ส่วนรังสีจากโลก ได้แก่ การแผ่รังสีตามธรรมชาติจากไอโซโทปของธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ ซึ่งมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นส่วนประกอบของโลกได้แก่ ดิน หิน น้ำ และแก๊ส เช่น ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) ยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ไอโซโทปกัมมันตรังสีเหล่านี้จะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิศาสตร์ ธาตุดังกล่าวจะสลายตัวตามหลักครึ่งชีวิต (Half life) และในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่าง ๆ กันในรูปของรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ยูเรเนียม และทอเรียมเป็นไอโซโทปรังสีที่มีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นห่วงโซ่เรียกว่า “อนุกรม” และจะไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปที่เสถียร ดังตารางที่ 2.1 – 2.2 สำหรับ  $^{40}\text{K}$  มีอยู่ในธรรมชาติ 0.012% มีค่าครึ่งชีวิต  $1.277 \times 10^9$  y สลายให้อนุภาคเบตาที่มีค่าครึ่งชีวิต  $1.4 \times 10^9$  y กลายเป็น  $^{40}\text{Ca}$  ให้พลังงาน 1.311 MeV และเกิดปฏิกิริยาการจับอิเล็กตรอน (Electron capture) กลายเป็น  $^{40}\text{Ar}$  ที่ครึ่งชีวิต  $1.19 \times 10^{10}$  y และปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 1.460 MeV ซึ่งมีอัตราการสลายตัวดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้ ยังมีรังสีบางส่วนที่มาจากนอกโลกที่เรียกว่ารังสีคอสมิก โดยแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สุดของรังสีนี้คือดวงอาทิตย์แต่เป็นส่วนน้อย รังสีที่มีการสัมผัสกับผลึกตัวอย่างนี้สามารถแปลงเป็นปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose) ได้ โดยวิเคราะห์จากปริมาณยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่จะนำไปใช้ประโยชน์กับการกำหนดอายุวัตถุทางด้านโบราณคดี และธรณีวิทยาด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ตารางที่ 2.1 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม (Ikeya, 1993)

เลขอะตอม (Z)	นิวไคลด์	การสลายตัว	ครึ่งชีวิต ( $T_{1/2}$ )	พลังงาน (MeV)		
				$E_{\alpha}$	$E_{\beta}$	$E_{\gamma}$
92	$^{238}\text{U}$	$\alpha$	$4.468 \times 10^9$ a	4.198 4.149	0.00815	0.00136
90	$^{234}\text{Th}$	$\beta$	24.1 d		0.0506 0.0249	0.00935
91	$^{234}\text{Pa}$	$\beta$	1.17 m		0.8253	0.018
92	$^{234}\text{U}$	$\alpha$	$2.45 \times 10^5$ a	4.773 4.721	0.011	0.00172
90	$^{230}\text{Th}$	$\alpha$	$7.70 \times 10^4$ a	4.688	0.0127	0.00154
				4.621		
88	$^{226}\text{Ra}$	$\alpha$	1602 a	4.785	0.0034	0.00674
				4.602		
86	$^{222}\text{Rn}$	$\alpha$	3.8235 d	5.490		
84	$^{218}\text{Po}$	$\alpha, \beta$	3.05 m	6.003	0.0705	
82	$^{214}\text{Pb}$	$\beta$	26.8 m		0.2072	0.2486
					0.2274	
83	$^{214}\text{Bi}$	$\alpha, \beta$	19.9 m		0.6482	0.6093
84	$^{214}\text{Po}$	$\alpha$	$1.64 \times 10^{-4}$ s	7.685		0.00008
82	$^{210}\text{Pb}$	$\beta$	22.3 a		0.0042	0.013
					0.0161	
83	$^{210}\text{Bi}$	$\alpha, \beta$	5.01 d		0.3889	
84	$^{210}\text{Po}$	$\alpha$	138.4 d	5.297		
82	$^{206}\text{Pb}$	stable				
$E_{\text{total, } \alpha, \beta, \gamma}$				42.81	2.27	1.753

ตารางที่ 2.2 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมทอเรียม (Ikeya, 1993)

เลขอะตอม (Z)	นิวไคลด์	การสลายตัว	ครึ่งชีวิต ( $T_{1/2}$ )	พลังงาน (MeV)		
				$E_\alpha$	$E_\beta$	$E_\gamma$
90	$^{232}\text{Th}$	$\alpha$	$1.14 \times 10^{10}$ a	4.010 3.952	0.0104	0.00130
88	$^{228}\text{Ra}$	$\beta$	5.75 a		0.0104	
89	$^{228}\text{Ac}$	$\beta$	6.31 hr		0.4516	0.92870
90	$^{228}\text{Th}$	$\alpha$	1.913 a	5.396	0.0184	0.00322
88	$^{224}\text{Ra}$	$\alpha$	3.66 d	5.674	0.0021	0.00989
86	$^{220}\text{Rn}$	$\alpha$	55.6 s	6.282		0.54970
84	$^{216}\text{Po}$	$\alpha$	0.15 s	6.779		0.8060
82	$^{212}\text{Pb}$	$\beta$	10.64 hr		0.1702	0.14810
83	$^{212}\text{Bi}$	$\alpha, \beta$	60.6 m	2.172	0.4667	0.18460
84	$^{212}\text{Po}$	$\alpha$	$0.307 \times 10^6$ s	5.633		
81	$^{208}\text{Tl}$	$\beta$	3.07 m		0.2147	1.20589
82	$^{208}\text{Pb}$	stable				
$E_{\text{total, } \alpha, \beta, \gamma}$				35.932	1.3462	2.4860



รูปที่ 2.10 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีโพแทสเซียม (Goffer, 2007)

### 2.9.3 พิสัย และสมบัติของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา

เมื่อเกิดการสลายตัวของกัมมันตรังสีตามธรรมชาติส่งผลให้ปลดปล่อยรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกตัวอย่าง จะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในผลึกตัวอย่าง ก่อเกิดจุดบกพร่องที่ทำให้อิเล็กตรอนสะสมตัวในกับดักอิเล็กตรอน การวัดพลังงานของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาที่วิ่งผ่านผลึกตัวอย่างนี้ มักจะวัดพิสัยที่รังสีสามารถวิ่งผ่านไปในผลึกตัวอย่าง สำหรับพิสัยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาในตัวอย่างที่มีความหนาแน่น ( $\rho$ ) เท่ากับ  $2.6 \text{ kg/m}^3$  แสดงดังรูปที่ 2.11

#### 2.9.3.1 รังสีเบต้า

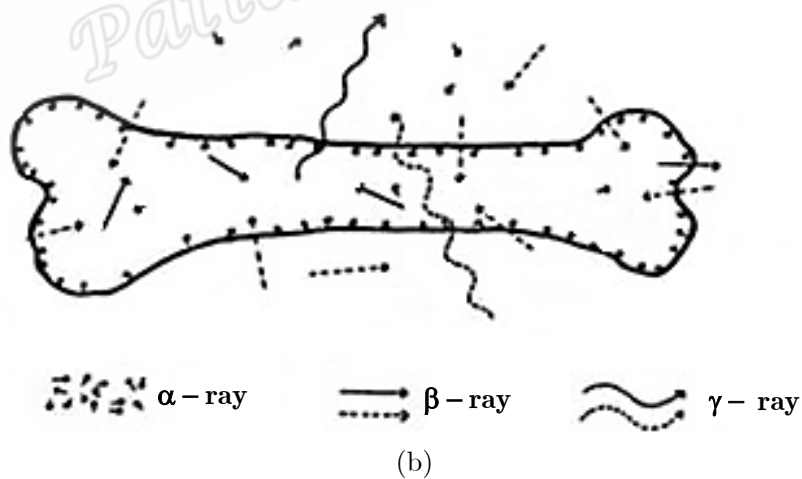
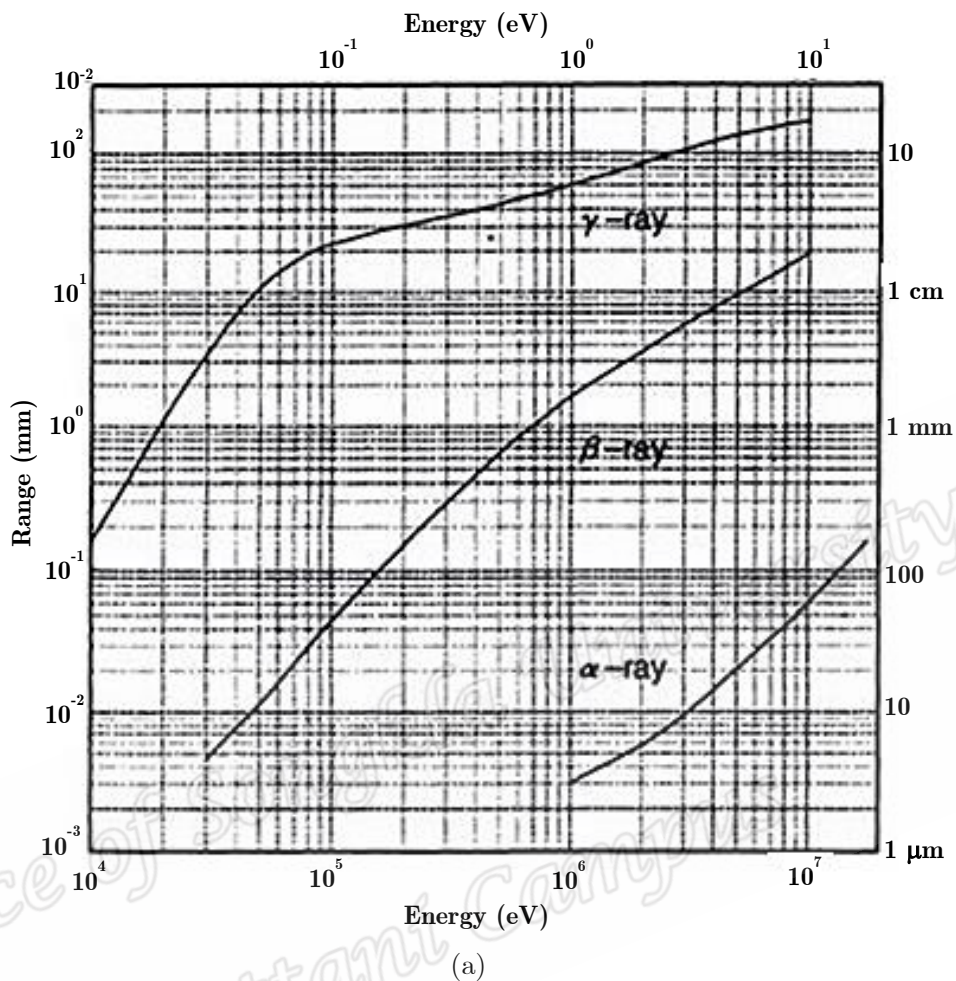
รังสีเบต้ามีสมบัติเหมือนอิเล็กตรอน มีความเร็วเท่ากับแสง มีอำนาจทะลุทะลวงปานกลาง พิสัยของรังสีเบต้าจะแปรผันตามพลังงาน และวัสดุตัวกลางที่รังสีเคลื่อนที่ผ่าน เช่นเดียวกับรังสีแอลฟา เกิดไอออไนซ์ต่ำ มีความเร็วใกล้เคียงแสง อำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีแอลฟา สำหรับรังสีเบต้าพลังงานประมาณ  $0.5 - 1.0 \text{ MeV}$  มีพิสัยประมาณ  $0.7 - 1.5 \text{ mm}$  และอำนาจทะลุทะลวงสูงสุด  $2 - 40 \text{ mm}$  เมื่อเคลื่อนที่ผ่านไปในวัสดุตัวกลางที่ฝังตัวอยู่ในดินจะเกิดการลดทอนความสามารถในการทะลุทะลวงประมาณ  $2 \text{ mm}$

#### 2.9.3.2 รังสีแอลฟา

รังสีแอลฟามีสมบัติเป็นอนุภาค บางครั้งจึงเรียกว่าอนุภาคแอลฟา (Alpha particle) ซึ่งมีความเร็วต่ำ และมวลมาก มีอำนาจทะลุทะลวงต่ำ พิสัยของรังสีแอลฟาจะแปรผันตามพลังงาน และวัสดุตัวกลางที่รังสีเคลื่อนที่ผ่าน สำหรับรังสีแอลฟาที่มีพลังงาน  $4 - 5 \text{ MeV}$  มีพิสัยประมาณ  $15 - 20 \text{ }\mu\text{m}$  เมื่อรังสีแอลฟาผ่านเข้าไปในผลึกตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา เนื่องจากการไอออไนซ์ทำให้เกิดจุดบกพร่องบางส่วนขึ้นในผลึก ผ่านการถ่ายโอนพลังงานทั้งจากการชนแบบยืดหยุ่น และการชนแบบไม่ยืดหยุ่น แต่ส่วนใหญ่จะเกิดการถ่ายโอนพลังงานจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น พิสัยของรังสีแอลฟาประมาณ  $10 - 20 \text{ }\mu\text{m}$  เมื่อผ่านวัสดุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด  $2 - 10 \text{ nm}$  ส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงปลายของพิสัยจะมีอัตราการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อหน่วยระยะทางที่รังสีเคลื่อนที่ ( $dE/dx$ ) หรือพลังงานหยุดยั้งสูง ดังนั้น สำหรับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่รังสีแอลฟาจะไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ จะมีผลต่อผิวภายนอกของตัวอย่างเท่านั้น

#### 2.9.3.3 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่มีสมบัติของอนุภาค กล่าวคือไม่มีมวล และไม่มีประจุแต่มีพลังงานมากที่สุด มีอำนาจทะลุทะลวงสูงที่สุด รังสีแกมมาพลังงาน  $1.2 \text{ MeV}$  มีพิสัยประมาณ  $6 - 9 \text{ cm}$  และอำนาจทะลุทะลวงสูงสุด  $20 - 30 \text{ cm}$  พิสัยของรังสีแกมมาในพื้นดินประมาณ  $40 \text{ cm}$  ระยะขนาดนี้เป็นผลให้รังสีแกมมามาจากสิ่งแวดล้อมเป็นส่วนใหญ่ มากกว่ามาจากตัวอย่างที่ฝังอยู่ในดิน



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างแผนผัง (a) พิสัยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ในหน่วย MeV ของรังสีตามธรรมชาติ (b) พิสัยของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา จากการฉายรังสีภายใน (ลูกศรทึบ) และภายนอกใน (ลูกศรประ) ของกระดูกที่ถูกฝัง อยู่ในดิน (Ikeya, 1993)

### 2.9.4 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปี

หลังจากเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจะนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยการอบนิวตรอนฟลักซ์ที่ได้ของธาตุยูเรเนียม และทอเรียมมีหน่วยความเข้มข้นเป็น mg/kg หรือ ppm ส่วนธาตุโพแทสเซียมมีหน่วยความเข้มข้นเป็นเปอร์เซ็นต์ (%) ทำการแปลงค่าที่ได้เป็นหน่วย Gy ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ปริมาณรังสีต่อปีของผลึกตัวอย่างคำนวณได้จากพลังงานรังสีที่ได้จากการสลายของธาตุ ( $E_i$ ) ในหน่วยเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ อัตราการสลายตัวของธาตุ ( $\lambda_i$ ) ในหน่วย  $a^{-1}$  และจำนวนอะตอมของธาตุ ( $N_i$ ) ในหน่วย  $kg^{-1}$  ดังนี้

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{kg}\cdot\text{a}} \right] \quad (2.13)$$

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \times 1.60218 \times 10^{-19} \left[ \frac{\text{J}}{\text{eV}} \times 10^{-6} \frac{\text{eV}}{\text{kg}\cdot\text{a}} \right] \quad (2.14)$$

$$= 1.60218 \times 10^{-19} (\sum \lambda_i N_i E_i) \left[ \frac{\text{Gy}}{\text{a}} \right] \\ = 1.60218 \times 10^{-10} (\sum \lambda_i N_i E_i) \left[ \text{mGy} / \text{a} \right] \quad (2.15)$$

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

$$\lambda_i N_i = \left( \ln \frac{2}{T_{1/2i}} \right) N_i = \left( \frac{0.69315}{T_{1/2i}} \right) N_i \quad (2.16)$$

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

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสี (ภาคผนวก ก.1) ของ  $^{238}\text{U}$  เขียนได้เป็น

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_{i+1} N_{i+1} = \dots = \lambda_{38} N_{38} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\lambda_{38}$  คือ อัตราการสลายตัวของธาตุ  $^{238}\text{U}$  และ  $N_{38}$  คือ จำนวนอะตอมของธาตุ  $^{238}\text{U}$  ในผลึก ( $kg^{-1}$ ) ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีสามารถเขียนได้เป็น

$$D = 1.60218 \times 10^{-10} (\sum \lambda_i N_i E_i) \quad [\text{mGy} / \text{a}]$$

กำหนดให้ตัวอย่างมีธาตุ  $^{238}\text{U}$  อยู่ 1 ppm (1 mg/kg) พบว่า

$$D = 0.062879 \times \sum E_i \quad (2.18)$$

สมการ (2.18) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า Dose rate ของธาตุ  $^{238}\text{U}$  ที่ 1 ppm



สำหรับตัวอย่างมีธาตุ  $^{232}\text{Th}$  อยู่ 1 ppm (1 mg/kg) พบว่า

$$D = 0.020514 \times \sum E_i \quad (2.19)$$

สมการ (2.19) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการคำนวณปริมาณรังสีต่อปีของธาตุ  $^{232}\text{Th}$  ที่ 1 ppm โดยสมการ (2.18) และ (2.19) จะแสดงอย่างละเอียดในภาพผนวก ก.2.

ในการสลายตัวตามธรรมชาติของอนุกรม  $^{238}\text{U}$  และ  $^{232}\text{Th}$  จะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา เบต้า และรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ ซึ่งจากการสลายตัวของอนุกรมดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณค่าปริมาณรังสีต่อปีของอนุภาคแอลฟา เบต้า และแกมมา จากพลังงานการสลายตัวของแต่ละอนุภาคในอัตราส่วนต่อ 1 ppm หรือ 1% ของธาตุกัมมันตรังสี ได้ผลดังตารางที่ 2.3 (ผลที่ได้นี้จะอธิบายให้ละเอียดในภาพผนวก ก.2.)

**ตารางที่ 2.3** ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี และปริมาณรังสีต่อปี (Ikeya, 1993)

การสลายตัว	ปริมาณรังสีต่อปี (mGy/a)		
	แอลฟา	เบต้า	แกมมา
$^{238}\text{U}$ (1 ppm)	2.6916	0.14273	0.1102
$^{232}\text{Th}$ (1 ppm)	0.7371	0.02762	0.05092
$^{40}\text{K}$ (%)	-	0.67805	0.20287

ค่าตามตารางที่ 2.3 จะนำไปแทนเพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีของแอลฟา เบต้า และแกมมา ได้จากสมการต่อไปนี้

$$D_\alpha = C_U D_{U-\alpha} + C_{Th} D_{Th-\alpha} \quad (2.20)$$

$$D_\beta = C_U D_{U-\beta} + C_{Th} D_{Th-\beta} + C_K D_{K-\beta} \quad (2.21)$$

$$D_\gamma = C_U D_{U-\gamma} + C_{Th} D_{Th-\gamma} + C_K D_{K-\gamma} \quad (2.22)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

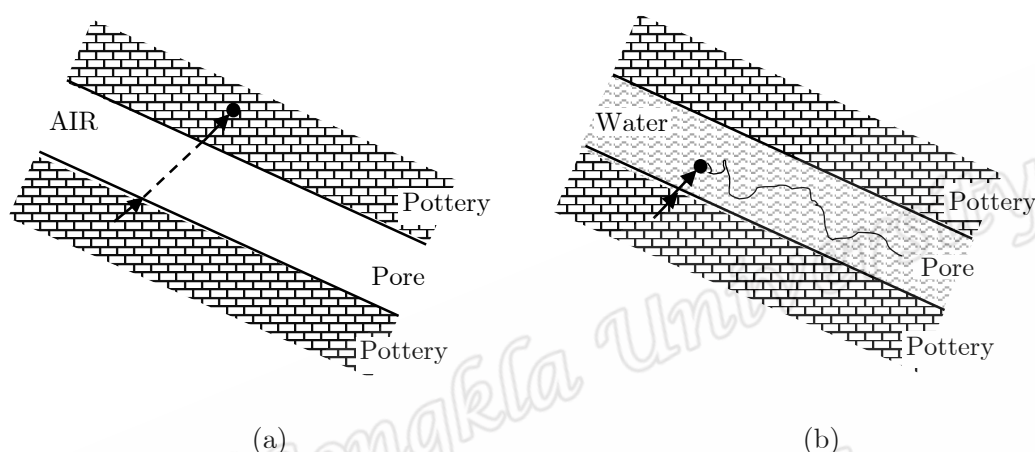
D คือ ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีชนิดต่าง ๆ

### 2.9.5 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการลดทอนรังสี

ปริมาณรังสีต่อปีตามตารางที่ 2.3 เป็นค่าทางอุดมคติ หรือเป็นค่าที่ได้ 100% โดยที่ไม่ได้รับผลกระทบ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแต่อย่างใด แต่ในทางปฏิบัติสาเหตุของการลดทอนของปริมาณรังสีต่อปีนั้นมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากขนาดของผงตะกอน และการลดทอนอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในดินตามธรรมชาติ เป็นต้น



เนื่องจากอนุภาคต่าง ๆ ที่เป็นตัวกระตุ้นอิเล็กตรอน เช่น อนุภาคแอลฟา อนุภาคเบต้า และรังสีแกมมา ในแต่ละอนุภาคนั้นมีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ในระยะ 3 cm ในขณะที่อนุภาคแอลฟามีความสามารถในการทะลุทะลวงเพียง 0.3 mm เท่านั้น ดังนั้นหากพิจารณาเฉพาะสิ่งแวดล้อมในระยะรัศมี 30 cm โดยมีตัวอย่างเป็นจุดศูนย์กลาง รังสีแกมมาจะมีประสิทธิภาพการทะลุทะลวงได้ 100% ในขณะที่อนุภาคเบต้า และแอลฟาถูกกลทอนไปตามขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น



รูปที่ 2.12 การลดทอนความสามารถในการทะลุทะลวงของอนุภาคกัมมันตภาพรังสีเนื่องจากความชื้นในตัวอย่าง (a) ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของอนุภาค เมื่อไม่ผ่านตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (b) ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของอนุภาค เมื่อผ่านตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ (ศุภกิจ, 2006)

นอกจากอัตราการลดทอนความสามารถในการกระตุ้นอันเนื่องมาจากสาเหตุของขนาดตะกอนแล้วยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างคือ ปริมาณความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างขณะอยู่ตามธรรมชาติ (Water content, W) ซึ่งหมายถึง ปริมาณน้ำหรือความชื้นคิดเป็นร้อยละที่อยู่ในช่องว่างของดิน ซึ่งประสิทธิภาพการลดทอนจะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละอนุภาค (แอลฟา 50%, เบต้า 25% และแกมมา 14%) ดังรูป 2.12 สามารถหาปริมาณของน้ำ (W) ในตัวอย่างหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$W = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (2.23)$$

เมื่อ W คือ ปริมาณของน้ำในตัวอย่าง  
 $W_w$  คือ น้ำหนักตัวอย่างเปียก  
 $W_d$  คือ น้ำหนักตัวอย่างแห้ง

ซึ่ง Ikeya (1993) ได้นำเสนอการคำนวณปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาที่มีปริมาณของน้ำ ( $D'_\alpha$ ,  $D'_\beta$  และ  $D'_\gamma$ ) ในตัวอย่าง สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$D'_\alpha = \frac{D_\alpha}{\left[ \frac{1 + 1.49 W}{(100 - W)} \right]} \quad (2.24)$$

$$D'_\beta = \frac{D_\beta}{\left[ \frac{1 + 1.25 W}{(100 - W)} \right]} \quad (2.25)$$

$$D'_\gamma = \frac{D_\gamma}{\left[ \frac{1 + 1.14 W}{(100 - W)} \right]} \quad (2.26)$$

ในการคำนวณปริมาณรังสีต่อปีสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ อัตราการลดทอนความสามารถการกระตุ้นของขนาดตะกอน ความชื้นหรือปริมาณของน้ำในตัวอย่างตามธรรมชาติ รวมถึงการพิจารณาประสิทธิภาพของจุดบกพร่องในผลึกตัวอย่างที่เกิดจาก อนุภาคแอลฟา เบต้า และรังสีแกมมา นั่นคือ ค่าคงที่  $k$  ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับผลึกตัวอย่าง ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีหรือ  $D$  สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D = k_\alpha D'_\alpha + k_\beta D'_\beta + k_\gamma D'_\gamma \quad (2.27)$$

ส่วนใหญ่เราจะละเว้นค่า  $k$  สำหรับอนุภาคเบต้า และรังสีแกมมาเพราะมีค่าเท่ากับ 1 ( $k_\beta = k_\gamma = 1$ ) ดังนั้น สมการ (2.27) จะกลายเป็น

$$D = kD_\alpha + D_\beta + D_\gamma \quad (2.28)$$

โดยค่าคงที่  $k$  สำหรับอนุภาคแอลฟาและอนุภาคเบต้า หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแกมมา ( $AD_\gamma$ ) กับปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแอลฟา ( $AD_\alpha$ ) ดังนี้

$$k = \frac{AD_\gamma}{AD_\alpha} \quad (2.29)$$

### 2.9.6 ปริมาณรังสีภายใน (Internal dose) และปริมาณรังสีภายนอก (External dose)

การดูดกลืนรังสีสำหรับวัสดุที่ถูกฝังอยู่ในดินจะได้รับปริมาณรังสีได้จากรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาตามธรรมชาติ ซึ่งขึ้นกับขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ตามธรรมชาติ นั้น ๆ ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของแอลฟา และเบต้าประมาณ 40 – 60  $\mu\text{m}$  และ 2 – 4 mm ตามลำดับ ในขณะที่ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของรังสีแกมมาประมาณ 20 – 30 cm ดังนั้น ประสิทธิภาพ

การทะลุทะลวงของอนุภาคแอลฟา เบต้า และรังสีแกมมาต่อตัวอย่าง ที่เอื้อให้เกิดความเสียหายจะมีค่าจำกัดตามไปด้วย

### 2.9.6.1 รังสีแอลฟา

อัตราปริมาณรังสีแอลฟาภายใน (Internal  $\alpha$ -Dose Rate,  $D_{in, \alpha}$ ) รังสีแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำมาก สามารถวิ่งผ่านแค่ผิวหนังตัวอย่างได้ไม่กี่ไมโครเมตร สำหรับปริมาณรังสีแอลฟาภายนอก (External  $\alpha$ -Dose,  $D_{ex, \alpha}$ ) ก็ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผิวหนังตัวอย่างไม่กี่  $\mu\text{m}$  ซึ่งถือว่าน้อยมาก ๆ และสามารถลบผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากรังสีแอลฟานี้ได้ด้วยกรด

### 2.9.6.2 รังสีเบต้า

อัตราปริมาณรังสีเบต้าภายใน (Internal  $\beta$ -Dose Rate,  $D_{in, \beta}$ ) รังสีเบต้าภายในจะมีผลต่อตัวอย่าง และสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ไปอีกในระยะ 1 mm ในขณะที่โดสรังสีเบต้าภายนอก (External  $\beta$ -Dose) จะส่งผลให้เกิดความเสียหายเฉพาะพื้นผิวตัวอย่างประมาณ 1 mm ดังนั้น ผลกระทบที่เกิดจากรังสีแอลฟาต้องพิจารณาทั้งภายใน และภายนอกพื้นผิวตัวอย่างประมาณ 0.5 – 1 mm

### 2.9.6.3 รังสีแกมมา

ตามที่กล่าวไปแล้วพิสัยของรังสีแกมมาในธรรมชาติประมาณ 10 cm หากพิจารณาในสภาพแวดล้อมภายนอกเป็นกลุ่ม และไม่จำกัด (พิจารณามากกว่า 30 cm จากตำแหน่งชุ่มตัวอย่าง) โดยกำหนดให้กัมมันตรังสีอยู่ในสภาวะสมดุลพบว่า ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแกมมา ( $D_\gamma$ ) สามารถคำนวณได้จากการสลายตัวของธาตุตามธรรมชาติของ  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  และ  $^{40}\text{K}$  ของผิวนอกของดิน และต้องคิดผลกระทบที่เกิดจากรังสีคอสมิก ( $D_{\text{cos}}$ ) เช่นเดียวกับการคำนวณอัตราปริมาณรังสีภายนอก (External Dose Rate,  $D_{\text{ex}}$ )

## 2.9.7 ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และดินเผาไฟ

ตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเมื่ออยู่ใต้ดินตามธรรมชาติจะได้รับปริมาณรังสีจากธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดิน และรังสีธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในซากหอยน้ำจืดเอง ซึ่งเราถือว่าปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุซากหอยน้ำจืดจะพิจารณาจาก

### 2.9.7.1 ปริมาณรังสีภายนอก (External dose, $D_{\text{Ex}}$ )

ปริมาณรังสีภายนอกได้มาจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินในรัศมี 30 cm ของอนุภาคแกมมา และในรัศมี 3 cm ของอนุภาคเบต้า

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

### 2.9.7.2 ปริมาณรังสีภายใน (Internal dose, $D_{in}$ )

ปริมาณรังสีภายในนั้นได้มาจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในผลึกซากหอยน้ำจืดในรัศมี 3 cm ของอนุภาคเบต้า และในรัศมี 0.3 mm ของอนุภาคแอลฟา

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

ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีนอกจากปริมาณรังสีภายนอกและปริมาณรังสีภายในจะต้องพิจารณาวิเคราะห์รังสีคอสมิกซึ่งได้จากโปรแกรมคำนวณ โดยรังสีคอสมิกจะถูกควบคุมด้วยเส้นละติจูด ลองจิจูด ระดับความสูงและความลึกของผลึกตัวอย่าง ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุของซากหอยน้ำจืดเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$D = D_{in} + D_{ex} + D_{cos} = kD'_{in, \alpha} + D'_{in, \beta} + D'_{ex, \beta} + D'_{ex, \gamma} + D_{cos} \quad (2.30)$$

สำหรับตัวอย่างดินเผาไฟพิจารณาปริมาณรังสีต่อปีจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวอย่างตามธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดิน และจากธาตุในดินเผาไฟเอง ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีของดินเผาไฟคำนวณได้จากปริมาณรังสีต่อปีภายใน และภายนอกเช่นเดียวกับตัวอย่างซากหอยน้ำจืด เพียงแต่ดินเผาไฟเราจะถือว่า ธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่เสมอสม่ำเสมอในทุก ๆ ตัวอย่าง พลังงานที่รังสีปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนโดยตัวอย่าง ดังนั้น เราอาจจะพิจารณาว่าขนาดของตัวอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เราสามารถมองข้ามไม่นำปริมาณรังสีต่อปีภายนอก ( $D_{ex}$ ) มาพิจารณาเพื่อคำนวณค่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินเผาไฟ ปริมาณรังสีต่อปีภายใน ( $D_{in}$ ) พิจารณาได้จากปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีจากการสลายตัวของอนุกรม  $^{238}\text{U}$  และ  $^{238}\text{Th}$  ได้แก่รังสีแอลฟาและเบต้า รังสีแกมมาจากการแผ่รังสีตามธรรมชาติของธาตุ  $^{40}\text{K}$  และรังสีคอสมิก ซึ่งมาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแลกซีซึ่งได้จากโปรแกรมคำนวณ ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุของดินเผาไฟเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

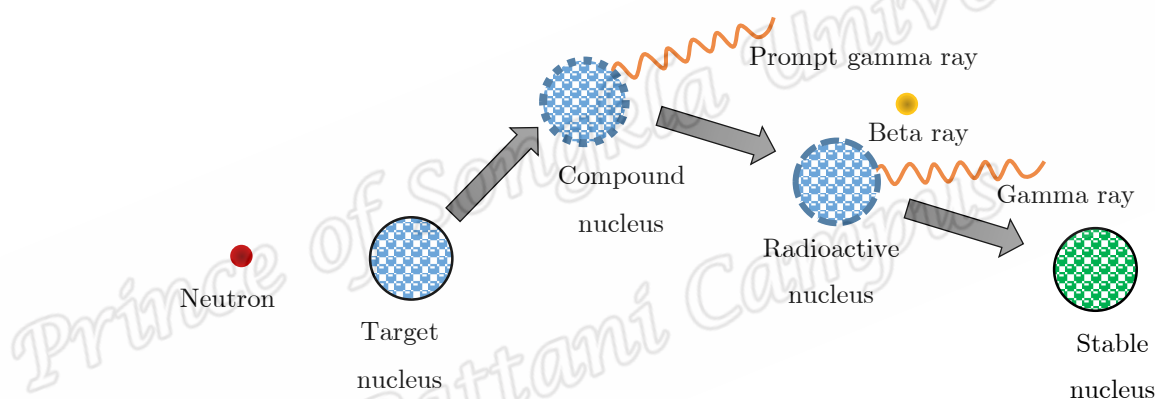
$$\begin{aligned} D &= D_{in} + D_{cos} \\ &= kD'_{\alpha} + D'_{\beta} + D'_{\gamma} + D_{cos} \end{aligned} \quad (2.31)$$

## 2.10 การวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน

การวิเคราะห์ธาตุโดยการอาบนิวตรอน ผู้ค้นพบเป็นคนแรกคือ Georg Hevesy และ Hilde Levi เมื่อปี พ.ศ. 2479 ใช้เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของดิสโพรเซียม (Dysprosium) และยูโรเปียม (Europium) ชนิดของรังสี พลังงานของรังสี และค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทปกัมมันตรังสี การวิเคราะห์ที่สนใจว่า รังสีที่สลายออกมาจากไอโซโทปกัมมันตรังสีเป็นรังสีอะไร มีพลังงานเท่าไร และมีค่าครึ่งชีวิตเท่าใด สามารถที่จะบอกได้ว่าเป็นไอโซโทปของธาตุตัวใด การวิเคราะห์ในลักษณะนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ” และการวิเคราะห์ที่สนใจไอโซโทปกัมมันตรังสีว่ามีกัมมันตภาพเท่าใด เกิด

จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ชนิดใด มีคุณสมบัติทางนิวเคลียร์ของการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างไร จากกัมมันตภาพที่วัดได้ ทำให้สามารถทราบปริมาณของไอโซโทปเริ่มต้นได้ เรียกการวิเคราะห์นี้ว่า “การวิเคราะห์เชิงปริมาณ”

การวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน เป็นการวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักของปรากฏการณ์ทางนิวเคลียร์คือ เมื่อนำสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มาอาบรังสีด้วยอนุภาคนิวตรอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในนิวเคลียสของอะตอมของธาตุนั้น ๆ เกิดเป็นไอโซโทปรังสีจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของธาตุในสารตัวอย่าง ซึ่งอาจจะเกิดจากปฏิกิริยานิวตรอน-นิวตรอน ( $n, n$ ) ปฏิกิริยานิวตรอน-โปรตอน ( $n, p$ ) ปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา ( $n, \gamma$ ) หรือปฏิกิริยาอื่น ๆ โดยปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมานับว่ามีความสำคัญมากในการวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอนในงานวิจัยนี้ ไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือค่าครึ่งชีวิตชนิดของรังสี และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมา ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้ทราบได้ว่าเป็นไอโซโทปรังสีของธาตุใด



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยานิวตรอน - แกมมา ( $n, \gamma$ ) จากการวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน (ปรับปรุงจาก Glascock, 2014)

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการอาบนิวตรอนในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีถือได้ว่าเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับกันในปัจจุบัน เพื่อคำนวณหาปริมาณ Annual Dose ตามสมการ (2.45) และ (2.46) สำหรับการหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างทำได้ด้วยวิธีทางเทคนิคต่าง ๆ เช่น วิธีการวิเคราะห์โดยการอาบรังสีนิวตรอน (Neutron activation analysis, NAA) โดยใช้ระบบวัดรังสีแกมมาหรือวิธี Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

### 2.10.1 การเกิด และการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

เนื่องจากอัตราการทำให้เกิดไอโซโทปกัมมันตรังสีขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมของธาตุรวมทั้งสัดส่วนของปริมาณของธาตุนั้นที่มีอยู่ในธรรมชาติ ความสามารถในการจับนิวตรอน และความเข้มข้นของนิวตรอนที่ใช้ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = N\sigma\phi \quad (2.32)$$

- เมื่อ  $P$  คือ อัตราการเกิดไอโซโทปกัมมันตรังสี  
 $N$  คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน แล้วเกิดเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสี  
 $\sigma$  คือ ค่าความสามารถในการจับนิวตรอนของธาตุ (Neutron cross section) มีหน่วยเป็น barn  
 $\phi$  คือ ความเข้มของฟลักซ์นิวตรอน (Neutron flux) หน่วยเป็น  $n/cm^2/s^{-1}$

ส่วนอัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี ที่เกิดขึ้นจากการอาบรังสีนิวตรอน สามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$\text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} = \text{อัตราการเกิด} - \text{อัตราการสลายตัว}$$

$$\frac{d}{dt}N(t) = P - \lambda N(t) \quad (2.33)$$

- เมื่อ  $\frac{d}{dt}N(t)$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เวลาใด ๆ  
 $\lambda$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี  
 $N(t)$  คือ จำนวนอะตอมของไอโซโทปกัมมันตรังสี ณ เวลาใด ๆ  
 $\lambda N(t)$  คือ อัตราการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ณ เวลาใด ๆ  
 $t$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน

ถ้าอินทิเกรตสมการ (2.33) จะได้

$$N(t) = \frac{P}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $t$  เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีนิวตรอน

$$\lambda N(t) = P(1 - e^{-\lambda t})$$

เมื่อความแรงรังสีที่เวลา  $t$  ใด ๆ  $A(t) = \lambda N(t)$  ดังนั้นจะได้

$$A(t) = P(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.35)$$

เมื่อแทนค่า  $P$  จากสมการ (2.32) ลงในสมการ (2.34) และ (2.35) จะได้

$$N(t) = \frac{N\sigma\phi}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.36)$$

$$A(t) = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.37)$$

$$\text{แต่ } N = \frac{WN_A f}{M}$$

- เมื่อ W คือ น้ำหนักของธาตุตัวอย่าง (g)  
 $N_A$  คือ เลขอาโวกาโดรเท่ากับ  $6.02 \times 10^{23}$  atom/mol  
 f คือ สัดส่วนร้อยละของไอโซโทปเสถียรของธาตุนั้น ๆ ในธรรมชาติ (% abundance)  
 M คือ น้ำหนักอะตอมของธาตุ

ดังนั้น จากสมการ (2.37) เขียนใหม่ได้ว่า

$$A(t) = \frac{WN_A f \sigma \phi}{M} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.38)$$

$$A(t) = \frac{WN_A f \sigma \phi}{M} \left(1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t}\right)$$

$$W = \frac{MA(t)}{N_A f \sigma \phi (1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t})} \quad (2.39)$$

$$W = \frac{MA(t)}{6.02 \times 10^{23} \cdot f \sigma \phi (1 - e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t})}$$

สมการ (2.38) จะอธิบายโดยละเอียดอีกทีในภาคผนวก ก.3

## 2.10.2 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

การวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอนสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่างกับแบบทำลายสารตัวอย่างมีรายละเอียดดังนี้

### 2.10.2.1 การวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่าง

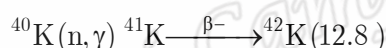
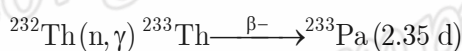
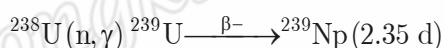
การวิเคราะห์แบบทำลายตัวอย่างหรือการวิเคราะห์นิวตรอนโดยผ่านกรรมวิธีการแยกทางเคมี (Radiochemical Neutron Activation Analysis, RNAA) เป็นการวิเคราะห์ที่ต้องนำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานมาผ่านกระบวนการทางเคมีเพื่อแยกชนิดของธาตุที่ต้องการออกมาก่อนหลังจากอาบรังสีนิวตรอนแล้ว จึงวัดความแรงของรังสีของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงมาตรฐาน กรรมวิธีทางเคมีที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การกลั่น การสกัด การตกตะกอน การทำละลาย และการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น



### 2.10.2.2 การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง

การวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่างหรือการวิเคราะห์นิวตรอนโดยใช้เครื่องมือนับรังสี (Instrumental Neutron Activation, INAA) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้หลักการเปรียบเทียบตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐาน (Standard reference materials) เข้าอาบรังสีพร้อมกัน แล้ววัดความแรงรังสีแกมมาของไอโซโทปรังสีของธาตุที่ต้องการทราบปริมาณเปรียบเทียบกับสารอ้างอิงมาตรฐานโดยตรง โดยการวัดปริมาณจำเป็นต้องใช้เครื่องมือนับรังสีที่สามารถแสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาตามขนาดพลังงานต่าง ๆ ได้ ดังนั้น เมื่อวัดค่าความเข้มของรังสีที่เกิดขึ้นก็จะสามารถคำนวณปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ โดยอาศัยสมการ 2.38 และ 2.39

แต่ในทางปฏิบัติจริงการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารตัวอย่างนิยมใช้วิธีที่ 2 ใช้หลักการเปรียบเทียบตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐานงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีที่ 2 เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ทำได้โดยการนำตัวอย่างไปอาบด้วยรังสีนิวตรอนแบบชุดครึ่งชีวิตยาวจากต้นกำเนิดนิวตรอน ด้วยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทำให้เกิดอันตรกิริยากับตัวอย่าง เมื่ออะตอมของไอโซโทปเสถียรได้รับนิวตรอนจะกลายเป็นไอโซโทปที่เป็นธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งปล่อยรังสีแกมมาออกมา ไอโซโทปรังสีที่เกิดจากการอาบนิวตรอนเพื่อวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมเกิดอันตรกิริยาดังนี้



**ตารางที่ 2.4** สมบัติทางนิวเคลียร์ และข้อมูลเกี่ยวกับการอาบนิวตรอนของไอโซโทปยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม (El-Ghawi *et al.*, 2005; Soliman, 2006; Vichaidid *et al.*, 2008)

ธาตุ	นิวไคลด์กัมมันตรังสี	ครึ่งชีวิต	พลังงานรังสีแกมมาที่ปลดปล่อย (keV)	ปริมาณที่เกิดในธรรมชาติ (%)
$^{238}\text{U}$	$^{239}\text{Np}$	2.55 d	277.60	14.1
$^{232}\text{Th}$	$^{233}\text{Pa}$	27.4 d	312.01	33.7
$^{40}\text{K}$	$^{42}\text{K}$	12.36 hr	1524.58	17.9

เมื่อนำสารตัวอย่าง และสารอ้างอิงมาตรฐานเข้าอาบรังสีนิวตรอนพร้อม ๆ กันในตำแหน่ง และเวลาเดียวกัน แล้วทำการวัดความแรงของรังสีด้วยระบบวัดรังสีแกมมา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณสารอ้างอิงมาตรฐานของธาตุนั้น ๆ ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ทำให้ทราบปริมาณของธาตุที่สนใจได้ (อุษณี, 2010) สำหรับการหาปริมาณธาตุต่าง ๆ โดยวิธีการอาบนิวตรอนนี้เมื่อปล่อยให้อิโซโทปรังสีสลายตัวระยะเวลาหนึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.40) โดยจะกล่าวที่มาของสมการอย่างละเอียดในภาคผนวก ก.4 ต่อไป

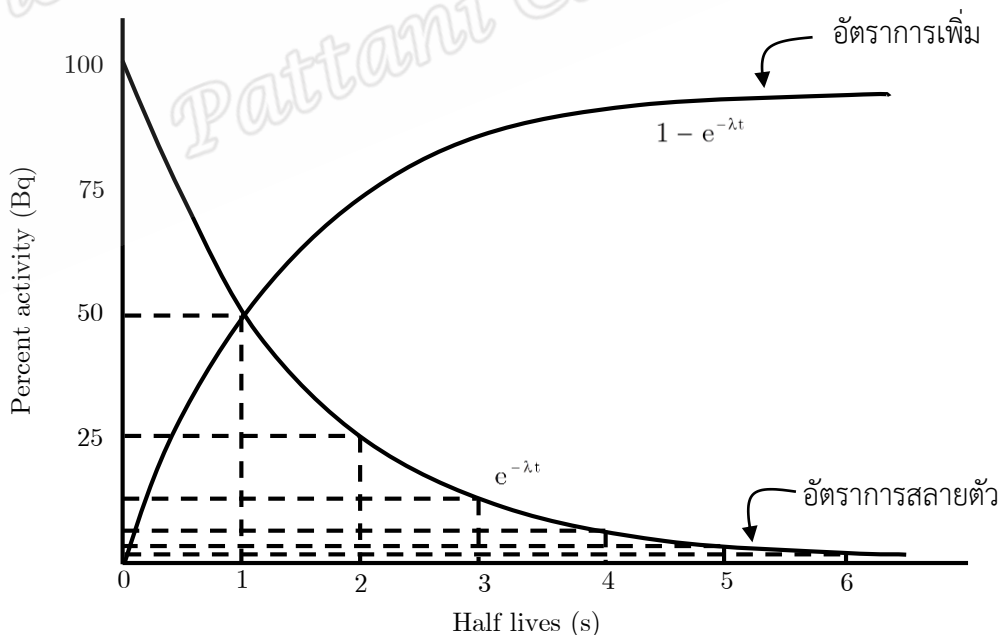
$$\frac{W_{\text{sam}}}{W_{\text{std}}} = \frac{R_{\text{sam}}}{R_{\text{std}}} \quad (2.40)$$

- เมื่อ  $W_{\text{sam}}$  คือ ความเข้มข้นของธาตุหรือน้ำหนักของธาตุในสารตัวอย่าง  
 $W_{\text{std}}$  คือ ความเข้มข้นของธาตุหรือน้ำหนักของธาตุในสารอ้างอิงมาตรฐาน  
 $R_{\text{sam}}$  คือ ปริมาณรังสีหรือพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่าง  
 $R_{\text{std}}$  คือ ปริมาณรังสีหรือพื้นที่ใต้พีคของสารอ้างอิงมาตรฐาน

## 2.10.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์โดยการอบนิวตรอน

### 2.10.3.1 ระยะเวลาในการอบรังสี (Irradiation time)

ในการอบรังสีควรเลือกช่วงเวลาในการอบให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์มากที่สุดแต่ใช้เวลาให้น้อยที่สุด เพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย ช่วงเวลาที่ใช้ในการอบรังสีพิจารณาจากแฟกเตอร์ของ  $(1 - e^{-\lambda t})$  ในสมการ (2.38) ซึ่งเทอมนี้จะมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 จนถึง 1 จะเกิดปฏิกิริยามากที่สุดเมื่อแฟกเตอร์ดังกล่าวเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 ถ้าเวลาที่ใช้ในการอบรังสีประมาณ 5 – 6 เท่า ของครึ่งชีวิต แฟกเตอร์ของ  $(1 - e^{-\lambda t})$  เรียกว่า “Saturation Factor” นี้จะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นจุดที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับอัตราการสลายตัว และถ้าเพิ่มเวลาการอบรังสีขึ้นไปอีกจะไม่ทำให้ความแรงรังสีมีค่าเพิ่มขึ้นอีกต่อไป แสดงความสัมพันธ์ของการเกิดสารกัมมันตรังสีกับเวลาการอบรังสี และการสลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสีดังในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงรังสีกับเวลาในการอบรังสี (ศตภิชช์, 2543)

### 2.10.3.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการปล่อยให้สารกัมมันตรังสีสลายตัวก่อนการวัด (Cooling time)

ระยะเวลาดังกล่าวนี้ควรพิจารณาให้เหมาะสมกับการวัดธาตุที่สนใจ กล่าวคือ ในกรณีที่มีการรบกวนจากสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ อาจมีการทิ้งไว้เป็นเวลานาน ๆ เพื่อให้สารรบกวนสลายตัวหมดไป แต่ในทางปฏิบัติ ควรเป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และในกรณีที่สารกัมมันตรังสีหรือสารตัวอย่างที่วัดมีความเข้มข้นของสารรังสีแกมมาสูงเกินไป ควรปล่อยให้ทิ้งไว้ช่วงเวลาหนึ่งก่อนเพื่อไม่ให้ค่าของ Dead Time ของเครื่องวัดสูงมากเกินไป

### 2.10.3.3 ฟลักซ์นิวตรอน

ฟลักซ์นิวตรอนที่ใช้ในการอาบรังสี ควรใช้ฟลักซ์ที่มีค่าสูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพราะจะทำให้ความแรงรังสีมีค่าสูง ทำให้การวิเคราะห์หามีค่าถูกต้อง และแม่นยำสูงขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ฟลักซ์นิวตรอนในช่วง  $2.3 - 5.9 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2/\text{s}$

### 2.10.3.4 ค่าความสามารถในการจับนิวตรอน

ควรเลือกปฏิกิริยาการเกิดสารกัมมันตรังสีที่มีค่าความสามารถในการจับนิวตรอนมากที่สุด เพื่อให้มีค่าความแรงรังสีมากที่สุด โดยทั่วไปแล้วค่าความสามารถในการจับนิวตรอนของปฏิกิริยานิวตรอน-แกมมา ( $n, \gamma$ ) อาบด้วยเทอร์มอลนิวตรอนจะมีค่ามาก จึงนิยมใช้เทอร์มอลนิวตรอนในการอาบรังสี

### 2.10.4 พลังงานของนิวตรอน

สามารถแบ่งพลังงานของนิวตรอน โดยใช้ระดับพลังงานเป็นเกณฑ์ได้ 3 ชนิด ด้วยกัน คือ เทอร์มอลนิวตรอน (Thermal neutron) อีพิเทอร์มอลนิวตรอน (Epithermal neutron) นิวตรอนพลังงานสูง (Fast Neutron)

#### 2.10.4.1 เทอร์มอลนิวตรอน

เทอร์มอลนิวตรอนหรือนิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutron) จะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง  $0.01 - 0.3 \text{ eV}$

#### 2.10.4.2 อีพิเทอร์มอลนิวตรอน

อีพิเทอร์มอลนิวตรอน (Epithermal neutron) ได้แก่ นิวตรอนที่มีพลังงานอยู่ในช่วง  $0.3 - 1000 \text{ eV}$

#### 2.10.4.3 นิวตรอนพลังงานสูง

นิวตรอนพลังงานสูง (Fast neutron) ได้แก่ นิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่  $1 \text{ eV}$  ขึ้นไป

### 2.10.5 ระบบวัดรังสีแกมมา (Gamma spectrometry)

ระบบการวัดที่เรียกว่า “แกมมาสเปกโทรเมทรี” เป็นอุปกรณ์การนับวัดรังสีเฉพาะปริมาณรังสีแกมมาที่มากกระทบหัววัด ซึ่งต้องทราบพลังงานของรังสีแกมมา และลักษณะการถ่ายเทพลังงานให้กับหัววัดจากสเปกตรัมพลังงาน ก่อนที่จะเข้าใจการทำงานของหัววัดรังสี

จำเป็นต้องเข้าใจลักษณะเฉพาะของรังสีที่ต้องการวัด และการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับผลึกตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.10.5.1. การสลายตัวให้รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียส หลังจากการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาหรือสลายตัวให้อนุภาคเบต้า โดยนิวเคลียสยังอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) เมื่อกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า “รังสีแกมมา” และอาจเกิดกระบวนการอื่นตามมาอีก เช่น การเปลี่ยนผันภายใน (Internal conversion) และการผลิตคู่ภายใน (Internal pair creation) โดยการสลายตัวให้รังสีแกมมาของนิวเคลียสเกิดจากการย้ายสถานะจากสถานะพลังงานสูง ( $E_i$ ) มาสู่สถานะต่ำกว่า ( $E_f$ ) พลังงานรังสีแกมมาจึงมาจากผลต่างของพลังงานระหว่างสองสถานะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าเป็นไปตามสมการ (2.41)

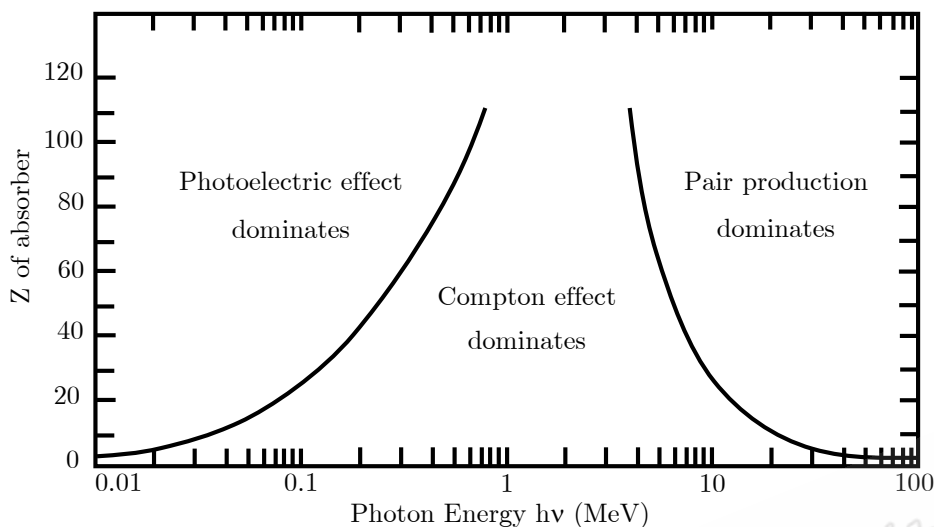
$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad (2.41)$$

เมื่อ  $\nu$  คือ ความถี่ของรังสีแกมมา (Hz)

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.02 \times 10^{-34}$  J/s

### 2.10.5.2. การวัดรังสีแกมมา

เนื่องจากรังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ภายในนิวเคลียส มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) แผ่ออกมาในรูปโพตอนหรือควอนตัมของพลังงาน เคลื่อนที่ในอากาศด้วยความเร็วแสงคือ  $2.998 \times 10^8$  m/s ไม่มีประจุไฟฟ้า ไม่มีมวล ดังนั้นการวัดรังสีแกมมาจึงต้องอาศัยผลของอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับผลึกตัวอย่าง เมื่อรังสีแกมมาวิ่งเข้าชนกับผลึกตัวอย่าง อาจเกิดการชนกับนิวเคลียส อิเล็กตรอนหรือสนามรอบนิวเคลียส หลังชนจะเกิดกระบวนการสูญเสียพลังงาน ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดอันตรกิริยาคือพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของผลึกตัวอย่าง เนื่องจากอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับผลึกตัวอย่างมีหลายกระบวนการ เนื่องจากพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของนิวเคลียสอยู่ในพิสัยตั้งแต่ 0.01 – 100 MeV ดังนั้น กระบวนการสูญเสียพลังงานมีเพียง 3 แบบเท่านั้นที่มีบทบาทสำคัญในการวัดรังสีคือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน (Pair production) ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering effect) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะเกิดได้ดีกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำในช่วง 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV ส่วนปรากฏการณ์ผลิตผลคู่จะเกิดกับรังสีแกมมาพลังงาน 1.02 MeV ขึ้นไป และปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตันจะเกิดกับรังสีแกมมาพลังงาน 0.1 MeV ถึง 10 MeV แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.15



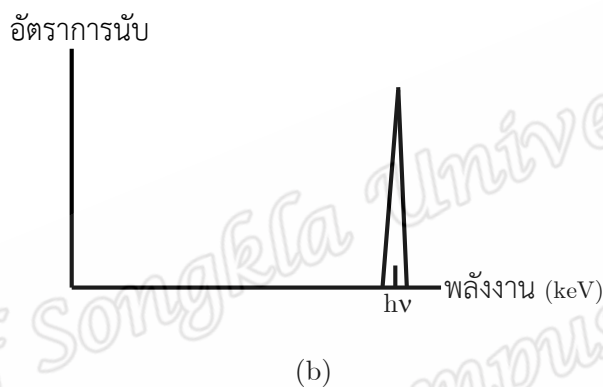
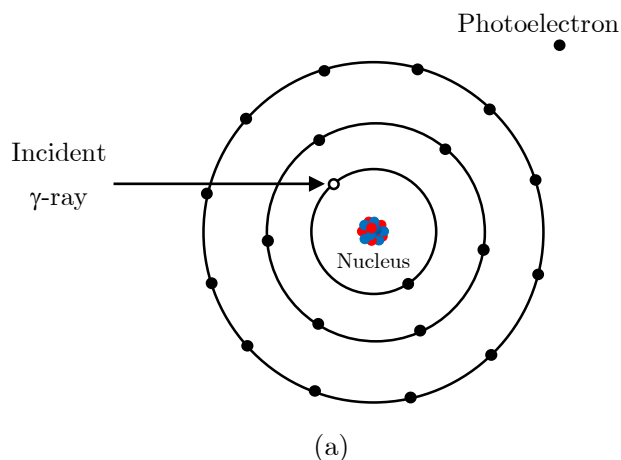
**รูปที่ 2.15** โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน และปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Helmuth, 1998)

ในงานวิจัยนี้วัดรังสีแกมมาในช่วงพลังงาน 0.2776 – 1.5247 keV ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะเกิดกระบวนการสูญเสียพลังงานทั้ง 3 แบบดังกล่าว

1) ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์นี้โอกาสเกิดได้ดีเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำในช่วงประมาณ 0.01 – 0.5 MeV ทำอันตรกิริยากับสารที่มีเลขเชิงอะตอมสูง ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมากระทบสารแล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน หากพลังงานที่ถ่ายเทให้สูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy,  $E_b$ ) ของอิเล็กตรอนวงนั้น อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอะตอมได้ เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า “โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)” โดยมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีแกมมา ( $h\nu$ ) กับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนดังสมการ (2.42)

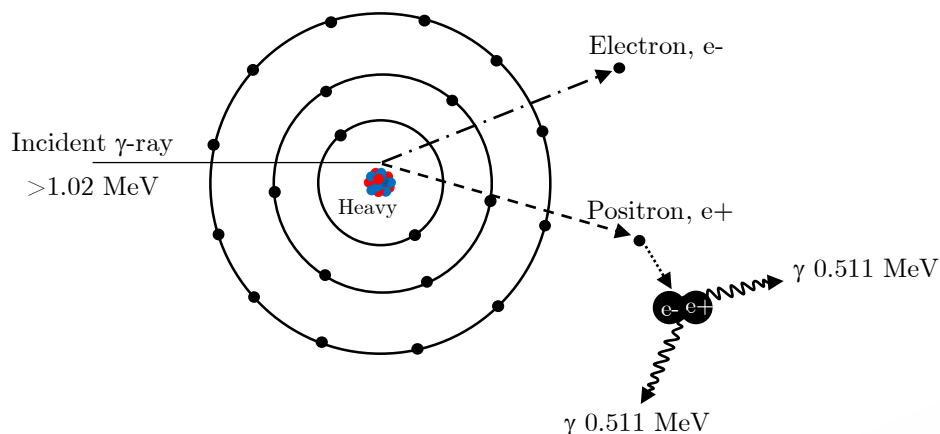
$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.42)$$

ถ้าไม่มีการสูญเสียของอิเล็กตรอนผลรวมของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะมีค่าเกือบเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาที่ตกกระทบ ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.16(b) พิกที่ได้เป็นพิกเดียวแทนพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาที่ตกกระทบ

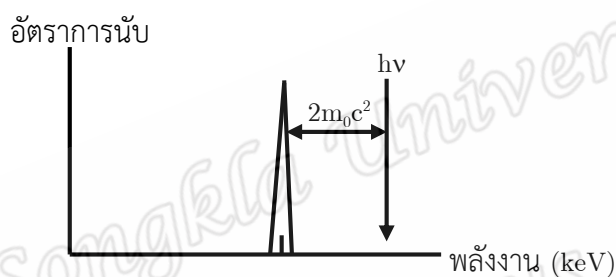


**รูปที่ 2.16** ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (a) ลักษณะของปรากฏการณ์และ (b) พิกที่ได้จากการดักคลื่น (ปรับปรุงจาก Helmut, 1998)

2) ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน (Pair production) อันตรกิริยานี้เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงผ่านเข้าไปในนิวเคลียส รังสีแกมมาที่ตกกระทบจะถูกดักคลื่นพลังงานทั้งหมดเปลี่ยนเป็นอนุภาคอิเล็กตรอน และโพซิตรอน เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอน และโพซิตรอนเทียบเท่ากับพลังงาน 1.02 MeV ดังนั้นโฟตอนต้องมีพลังงานอย่างน้อย 1.02 MeV หากพลังงานมากกว่า 1.02 MeV พลังงานส่วนเกินนี้จะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน และโพซิตรอน อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นสามารถทำปฏิกิริยาได้อีกเช่นทำให้อะตอมใกล้เคียงแตกตัวเป็นคู่อิออนหรืออยู่ในสถานะกระตุ้น ส่วนโพซิตรอนจะรวมกับอิเล็กตรอนตัวอื่น แล้วเปลี่ยนเป็น 2 โฟตอนที่มีพลังงาน 0.511 MeV (พลังงานที่เทียบเท่ามวลของอิเล็กตรอนหนึ่งอนุภาค) เรียกว่าการเกิดแอนนิฮิเลชัน (Annihilation) เวลาในการรวมตัวนี้สั้นมาก อาจกล่าวได้ว่าการเกิดแอนนิฮิเลชันนี้จะเกิดพร้อม ๆ กับปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.17(a) ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอนมีโอกาสเกิดได้มากขึ้นเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้น และมีโอกาสเกิดมากขึ้นเมื่อทำอันตรกิริยากับสสารที่มีเลขเชิงอะตอมสูง



(a)



(b)

รูปที่ 2.17 ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน (a) ลักษณะของปรากฏการณ์ และ (b) พิกที่ได้จากอันตรกิริยาการผลิตผลคู่อิเล็กตรอน (ปรับปรุงจาก Helmut, 1998)

3) ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering effect) ปรากฏการณ์นี้รังสีแกมมาพลังงานปานกลางเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอม รังสีแกมมาที่พุ่งชนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรในทิศทางทำมุม  $\phi$  กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของรังสีแกมมาเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่า “คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron)” และรังสีแกมมาที่สูญเสียพลังงานไปบางส่วนก็จะกระเจิงทำมุม  $\theta$  กับทิศทางเดิม โดยพลังงานของอิเล็กตรอน ( $E_{e^-}$ ) ที่หลุดออกไปมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานเริ่มต้นของรังสีแกมมา ( $h\nu$ ) กับพลังงานของรังสีแกมมา ( $h\nu'$ ) ที่กระเจิงออกไปดังสมการ (2.43)

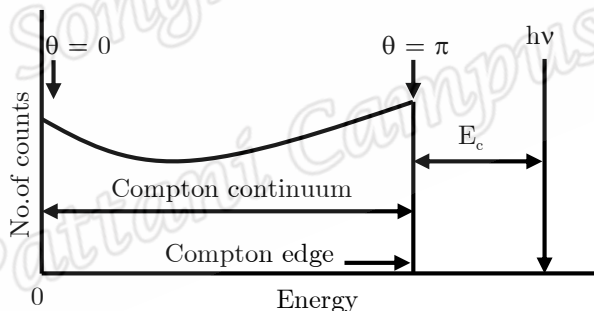
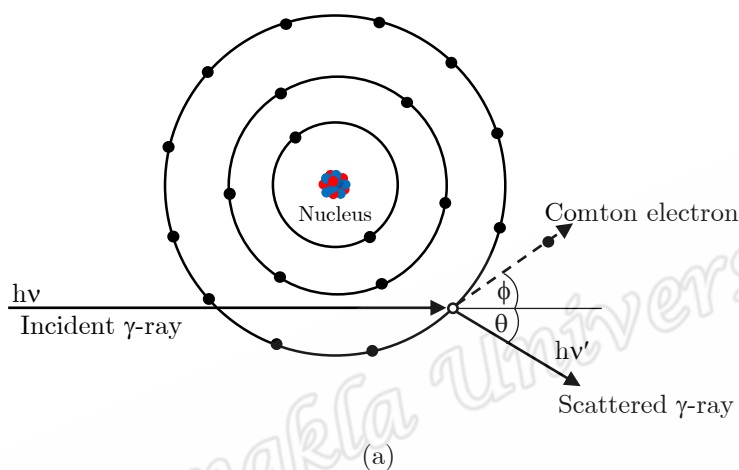
$$E_{e^-} = h\nu - h\nu' \quad (2.43)$$

จึงถือว่าการเกิดอันตรกิริยานี้เป็นการชนแบบยืดหยุ่น พลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิงออกมาเป็นไปตามสมการ (2.44)



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.44)$$

เมื่อ  $m_0c^2$  คือ ค่าพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอนเท่ากับ 0.511 MeV  
 $\theta$  คือ มุมกระเจิงของรังสีแกมมา



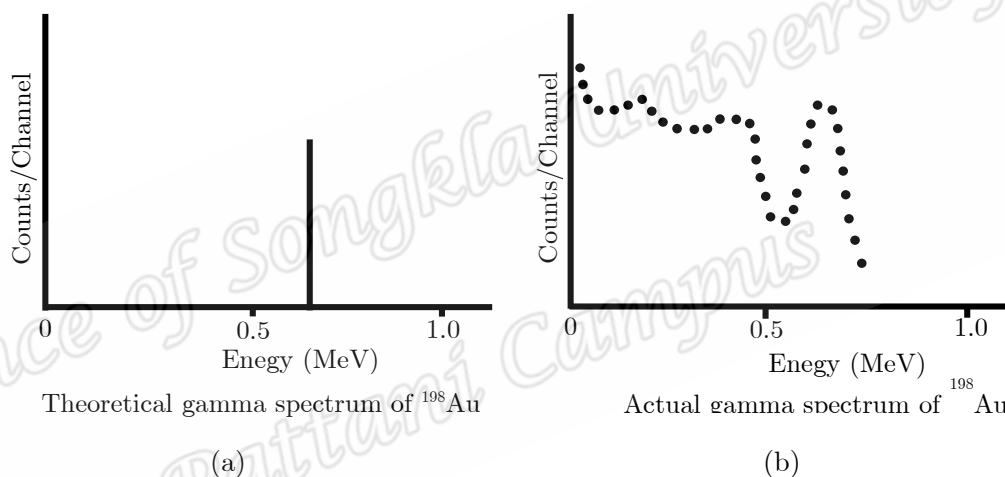
(b)

**รูปที่ 2.18** ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (a) ทิศทางการเคลื่อนที่ของรังสีแกมมา  
 (b) การกระจายพลังงานของคอมป์ตันอิเล็กตรอน (ปรับปรุงจาก Helmuth, 1998)

ถ้ามุมของการกระเจิงทุกมุมปรากฏในหัววัด พลังงานของอิเล็กตรอนที่ได้จะมีค่าต่อเนื่องคือตั้งแต่ 0 ถึงพลังงานสูงสุด  $\pi$  ดังรูปที่ 2.18 เมื่อ  $E_c$  คือช่องว่างระหว่างพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่กระเจิงกับพลังงานของรังสีแกมมาที่ตกกระทบ อันตรกิริยานี้เกิดขึ้นได้ดีเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง (0.5 – 3.5 MeV) ถ้าพลังงานโฟตอนที่กระเจิงออกไปมีพลังงานมากพอ ก็อาจเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้ต่อไป ส่วนคอมป์ตันอิเล็กตรอนนั้นจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาที่กระทบ ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน และพลังงานของรังสีแกมมาที่กระเจิง หากคอมป์ตันอิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์มากพอก็อาจทำอันตรกิริยาต่อไปอีก

### 2.10.5.3. สเปกตรัมรังสีแกมมา

การเกิดสเปกตรัมของรังสีแกมมา สัมพันธ์กับอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับหัววัด อันได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน และปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน รังสีแกมมาพลังงานต่ำมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้มาก และเมื่อมีพลังงานสูงขึ้นก็จะมีโอกาสเกิดปรากฏการณ์ผลิตผลคู่อิเล็กตรอน และปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมพ์ตันเพิ่มขึ้น ในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก รังสีแกมมาจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับสสารทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม หากหัววัดสามารถดูดกลืนพลังงานรังสีแกมมา และอิเล็กตรอนไว้ได้ทั้งหมด ไม่ว่าจะเกิดอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวหรือหลายครั้งก็ตามจะได้สัญญาณออกมาเทียบเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมา ตัวอย่างเช่น วัดรังสีแกมมาของ  $^{137}\text{Cs}$  ให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV ภายใต้เงื่อนไข 3 ข้อคือ หัววัดดูดกลืนรังสีแกมมาได้ทั้งหมด ไม่มีรังสีอื่น ๆ เข้าสู่หัววัด ไม่มีสัญญาณรบกวนใด ๆ เกิดขึ้นจากหลอดทวีคูณแสง



รูปที่ 2.19 สเปกตรัมรังสีแกมมาของ  $^{137}\text{Cs}$  (a) สเปกตรัมที่เกิดตามทฤษฎี (b) สเปกตรัมที่เกิดขึ้นตามจริงในห้องปฏิบัติการ (นวลฉวี, 2553)

สเปกตรัมรังสีแกมมาจะปรากฏเส้น 3 เส้น ที่แสดงถึงพลังงานรังสีแกมมา 3 ค่าดังรูปที่ 2.19(a) สเปกตรัมที่แสดงพลังงานของรังสีแกมมาเรียกว่า โฟโตพีค (Photo peak) หรือ พีคพลังงานเต็ม (Full energy peak) จำนวนของโฟโตพีคขึ้นกับพลังงานรังสีแกมมา ดังนั้น  $^{137}\text{Cs}$  ให้ 1 โฟโตพีค แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถวัดสเปกตรัมรังสีแกมมาได้ตามเงื่อนไข 3 ข้อที่กล่าวมาได้ เนื่องจากอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นภายในหัววัดค่อนข้างซับซ้อน ขึ้นกับพลังงานของรังสี ขนาดหัววัด และชนิดของหัววัด สเปกตรัมที่ได้จึงปรากฏผลของอันตรกิริยาอื่น ๆ มากมายดังรูปที่ 2.19(b)

### 2.10.5.4. ระบบวัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

ระบบวัดรังสีแกมมาในงานวิจัยนี้ใช้ระบบวัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ที่มีโครงสร้างชนิดโคแอกเซียล (Coaxial) หัววัดแบบนี้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก และมีช่องโหว่ตรงกลาง หัววัดชนิดโคแอกเซียล

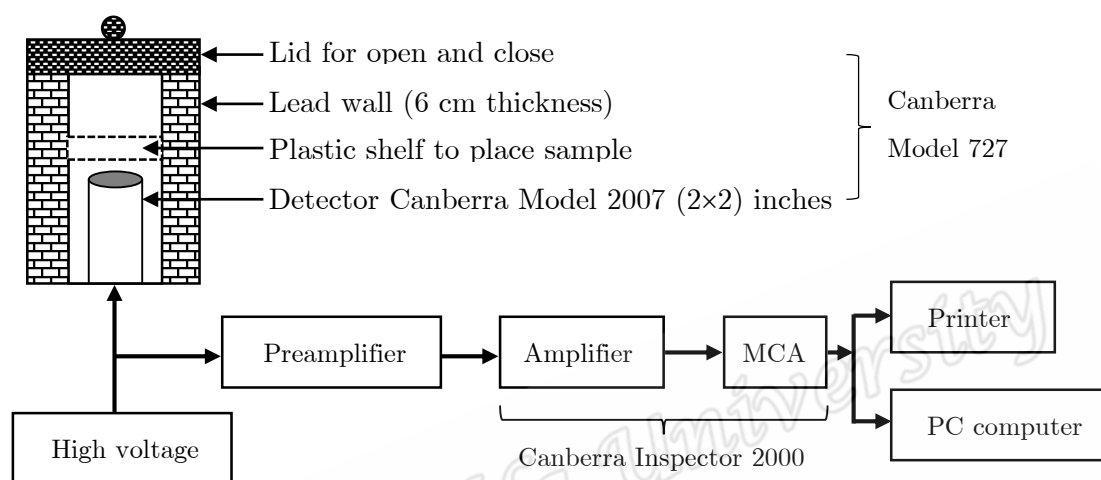
เหมาะสำหรับใช้วัดรังสีในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดรังสีจากสภาวะแวดล้อมในปริมาณมาก ทำขึ้นจากผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอกที่ผิวด้านนอกจะแพรร่ด้วยลิเทียม ส่วนด้านในปลุกไอออนของโบรอน เรียกหัววัดรังสีชนิดพี (P – type) หรือเป็นผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอกซึ่งแพรร่ด้วยลิเทียมไว้ที่ผิวด้านใน ส่วนด้านนอกปลุกไอออนของโบรอนเรียก หัววัดชนิดเอ็น (N – type) ที่มีคุณภาพสูงมาก โครงสร้างอะตอมสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงต้องการอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากหัววัดเจอร์มาเนียมมีช่องว่าง (Energy gap) แคบประมาณ 0.7 อิเล็กตรอนโวลต์ นั่นคือการทำงานของหัววัดเจอร์มาเนียมทุกชนิดไม่สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้อง เพราะอุณหภูมิห้องมีค่าสูงพอที่จะเหนี่ยวนำให้ช่องว่างพลังงานเกิดกระแสรั่วไหล (Leakage current)



รูปที่ 2.20 หัววัดสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

ดังนั้น การดำเนินการวัดรังสีด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมต้องทำให้อุณหภูมิของหัววัดต่ำลงเพื่อลดกระแสรั่วไหลดังกล่าว ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ส่งผลให้ความสามารถในการแยกพลังงาน (Energy resolution) มีค่าน้อยลง เพื่อที่จะรักษาผลึกหัววัดจึงต้องแช่ไว้ในสภาวะไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ Dewar ซึ่งเป็นฉนวนดังรูปที่ 2.20 หัววัดจะบรรจุในอุปกรณ์หล่อเย็นซึ่งเป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันอุณหภูมิจากอากาศที่แวดล้อมถ่ายเทเข้าไป หัววัดจะติดตั้งด้านบนของ Dewar ซึ่งบรรจุไนโตรเจนเหลว หลักการทำงานโดยย่อของหัววัดแบบเจอร์มาเนียม คือ เมื่อรังสีแกมมาเข้าไปในผลึกหัววัด จะส่งผลให้เกิดไอออนที่มีประจุบวก และประจุลบ ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮลที่มีจำนวนเท่า ๆ กัน และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าสองขั้วมาต่อเข้ากับผลึกคนละด้านจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ทำให้ผลึกนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้นก็จะถูกดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับพลังงานที่สูญเสียไปในผลึก และเมื่อต่อ

หัววัดแบบเจอร์มาเนียมนี้เข้ากับระบบขยายสัญญาณ และ MCA ดังรูปที่ 2.21 ก็จะสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีได้ ข้อมูลที่ตรวจวัดออกมาจะอยู่ในรูปกราฟที่เขียนขึ้นระหว่างจำนวนช่องของ MCA และจำนวนช่องนับที่นับได้จากหัววัดในแต่ละช่องของ MCA เรียกว่าสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา



รูปที่ 2.21 ระบบการวัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา และอุปกรณ์ที่สำคัญ (พวงทิพย์, 2545)

## 2.11 การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์อาศัยหลักการสะสมปริมาณรังสีจากสิ่งแวดล้อมของผลึกตัวอย่าง แล้วเปลี่ยนปริมาณรังสีดังกล่าวออกมาในรูปของแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เรียกแสงที่ปลดปล่อยนี้ว่าปริมาณความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL intensity) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose) ที่ผลึกตัวอย่างได้รับตลอดช่วงเวลานับตั้งแต่ผลึกตัวอย่างอยู่ในธรรมชาติหรือครั้งสุดท้ายที่ผลึกตัวอย่างถูกกระตุ้น (การที่ตัวอย่างอยู่ในธรรมชาติเมื่อถูกกระตุ้นหรือถูกเผาเปรียบเสมือนลบปริมาณรังสีที่สะสมเดิมทิ้งแล้วตั้งต้นสะสมใหม่อีกครั้ง)

ดังนั้น การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose, AD) ซึ่งได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสีแบบ Additive Dose และการอาบแสงแดด ในรูปที่ 2.8 ปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose, D) ของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้าง วิเคราะห์ได้จาก การรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งนอกจากรังสีคอสมิกในชั้นบรรยากาศที่มาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์ และกาแลกซีแล้ว ยังมีรังสีจากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ และไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ ยูเรเนียม ( $^{238}\text{U}$ ) ทอเรียม ( $^{232}\text{Th}$ ) และโพแทสเซียม ( $^{40}\text{K}$ ) โดยที่ไอโซโทปรังสีเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาว จึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบัน เราก็สามารถคำนวณอายุของตัวอย่างได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Age (y)} = \frac{\text{AD (Gy)}}{\text{D (Gy/y)}} \quad (2.45)$$

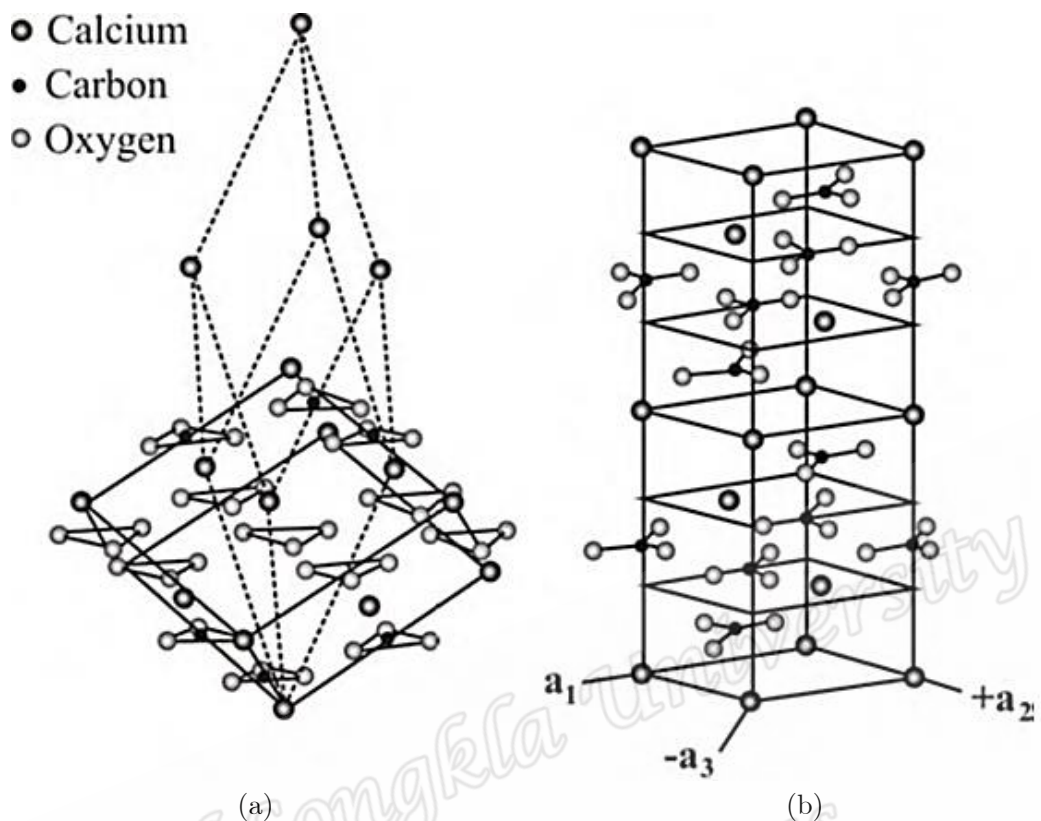
จากสมการ (2.45) ค่าปริมาณรังสีสะสมคือปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัวอยู่ในกับดักอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีในบริเวณรอบสิ่งแวดล้อม และปริมาณรังสีต่อปี คือ อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้างตัวอย่าง จากธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม โพแทสเซียม และรังสีคอสมิกจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการกำหนดอายุตัวอย่างได้ดังนี้

### 2.11.1 ชากของสิ่งมีชีวิตในอดีต (Fossil)

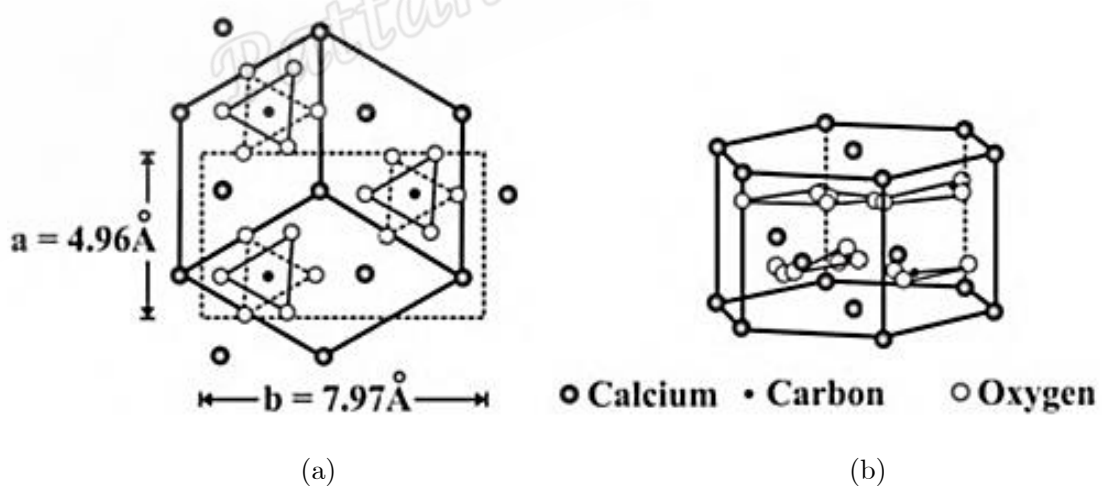
ชากของสิ่งมีชีวิตในอดีต (Fossil) เช่น ชากพืช ปลา หอย ไตโนเสาร์ บางชนิดสูญพันธุ์ไปแล้ว บางชนิดยังมีวิวัฒนาการต่อจนถึงปัจจุบัน เช่น ชากหอยตะเกียง (Brachiopod) ที่สูญพันธุ์ไปแล้ว และชากปะการังมีมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในการกำหนดอายุของชากสิ่งมีชีวิตนั้น กระบวนการเริ่มต้นจากการเกิดเป็นชากสิ่งมีชีวิต และมีการสะสมตัวของอิเล็กตรอนจนกระทั่งชากสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นถูกฝังในบริเวณนั้น ๆ เป็นเวลานาน ดังนั้น เมื่อมาถึงปัจจุบันปริมาณอิเล็กตรอนที่มีในชากสิ่งมีชีวิตจะสะท้อนถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมนับตั้งแต่เริ่มเป็นชากสิ่งมีชีวิตจนถึงปัจจุบัน ในชากหอยมีส่วนประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ที่ประกอบขึ้นมาจากโครงสร้างผลึกอะราโกไนท์ (Aragonite) และแคลไซต์ (Calcite)

สำหรับโครงสร้างผลึกแคลไซต์มีรูปร่างอยู่ในระบบสามแกนราบ (Hexagonal system) มักเป็นรูปหกเหลี่ยมยาว ยอดแหลมหรือมีรูปขนนกเป็ดกุ่ม โดยทั่วไปผลึกที่พบมีหลายแบบแตกต่างกันไป และมักซับซ้อนมาก โดยมีฟอร์มผลึกมากกว่า 300 ฟอร์ม ที่สำคัญคือ prismatic, rhombohedral, scalenohedral และฟอร์มผสมระหว่างฟอร์มต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.24 แคลไซต์ที่บริสุทธิ์จะมีสีขาวบางแทบมองไม่เห็นสี ถ้าไม่บริสุทธิ์จะพบสีอื่นเจือจางอยู่บาง เช่น เทา แดง เขียว น้ำเงิน เหลือง ถ้าบริสุทธิ์จะมี  $\text{CaO}$  อยู่ 56% และ  $\text{CO}_2$  อยู่ 44% โดยมี  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  เข้าแทนที่  $\text{Ca}$  บางส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกอะราโกไนท์มีรูปร่างอยู่ในระบบสามแกนต่าง (Orthorhombic system) เป็นผลึกไตรสัณฐานกับแคลไซต์และวาเทอไรต์ อะราโกไนต์ส่วนใหญ่มักบริสุทธิ์แต่อาจมี  $\text{Sr}$  และ  $\text{Pb}$  เข้ามาแทนที่  $\text{Ca}$  บางเล็กน้อย อะราโกไนต์จะมีความเสถียรน้อยกว่าแร่แคลไซต์ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ และเป็นผลึกไม่สามัญ โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกอะราโกไนต์เป็นพีระมิดรูปเข็มที่มีปลายเป็นฟอร์มไตพีระมิด ผลึกรูปแบน ผลึกรูปแผ่นบนระนาบ และผลึกแผ่นแบบแอกซะโกนอลเทียม ดังรูปที่ 2.4 แร่แคลไซต์สามารถเปลี่ยนเป็นแร่อะราโกไนต์ได้ โดยเกิดจากความดัน และอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปดังรูปที่ 2.25 จะทราบว่าผลึกประกอบขึ้นจากโครงสร้างอะราโกไนต์หรือแคลไซต์ได้จากวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD)

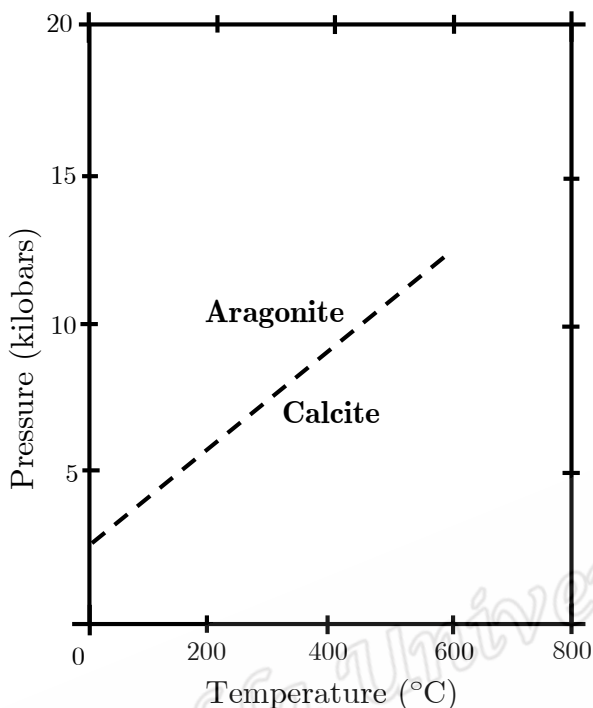




รูปที่ 2.22 โครงสร้างผลึก Calcite ที่มีรูปผลึก (a) แบบรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) (b) แบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) (Ikeya, 1993)



รูปที่ 2.23 โครงสร้างผลึก Aragonite ที่มีรูปผลึก (a) แบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) (b) เมื่อนำระนาบมาต่อกันเป็นทรงแปดหน้า (Ikeya, 1993)

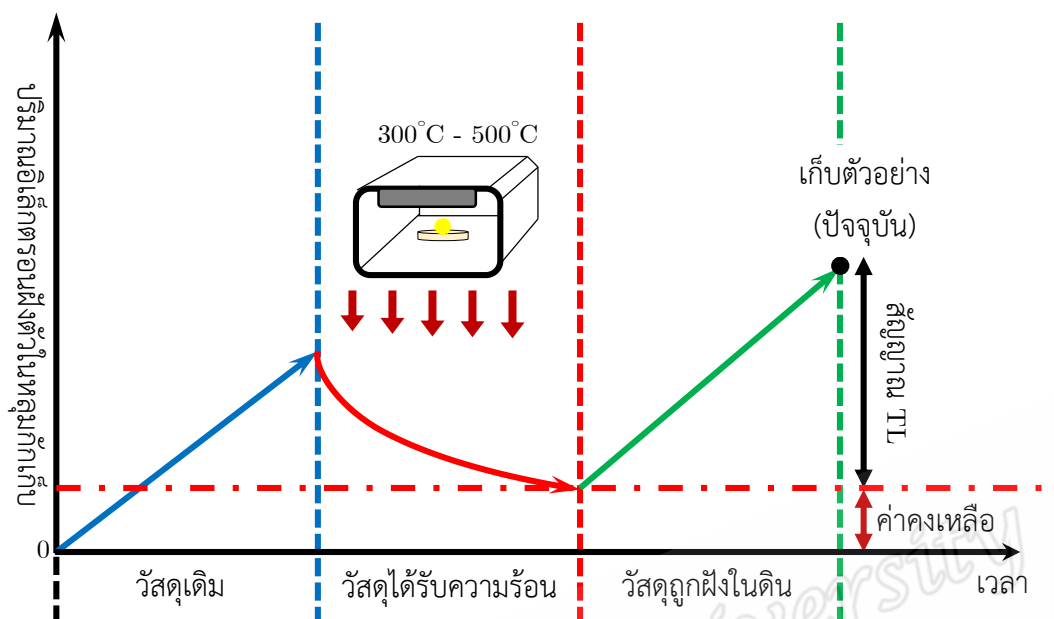


รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงของผลึกอะราโกไนต์ และแคลไซต์ โดยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความดัน (Quick Books Docstoc, 2013)

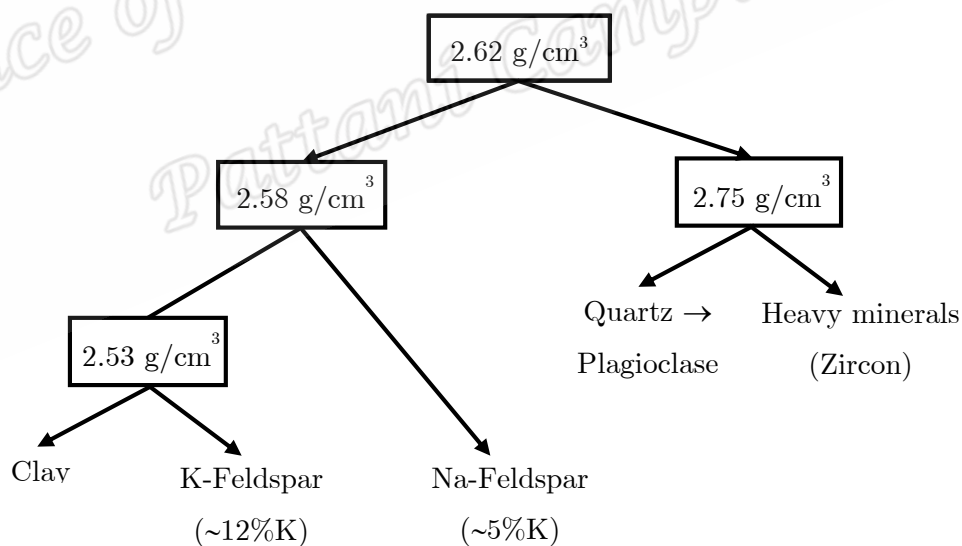
### 2.11.2 วัสดุที่ได้รับความร้อน (Flint)

วัสดุที่ได้รับความร้อน (Flint) เช่น ดินเผาไฟ หินทราย หินอัคนี หินแปร อิฐ และถ้วยชามสังคโลกทางโบราณคดี ลาวาที่กลายเป็นหินอัคนี หินดั้งเดิมที่ถูกแปรสภาพด้วยความดัน และอุณหภูมิสูง อิฐ และถ้วยชามสังคโลกที่ถูกเผาในระหว่างกระบวนการผลิต เป็นต้น ตัวอย่างชนิดนี้เมื่ออยู่ตามธรรมชาติจะเกิดการสะสมอิเล็กตรอนอยู่ตลอดเวลาตามปัจจัยของเวลา และอัตราการแผ่กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ จนถึงช่วงเวลาหนึ่งตัวอย่างนั้นได้รับความร้อนอุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  (Feathers, 20003) ขึ้นไป ส่งผลต่อตัวอย่างที่มีอิเล็กตรอนสะสมตัวอยู่ถูกปลดปล่อยออกไป จากนั้นตัวอย่างดังกล่าวเริ่มต้นสะสมอิเล็กตรอนใหม่อีกครั้งจนถึงวันที่นำตัวอย่างมาตรวจวัดเพื่อใช้ในการกำหนดอายุ ดังนั้น เมื่อนำผลึกตัวอย่างที่มีอิเล็กตรอนสะสมตัวในกับดักอิเล็กตรอนมาอ่านค่า TL Intensity ด้วยเครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จึงมีค่าเทียบเคียงได้กับปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่างไม่นับตั้งแต่ตัวอย่างนั้นได้รับความร้อนครั้งสุดท้ายจนถึงปัจจุบัน การที่ตัวอย่างถูกเผาด้วยความร้อนในทางทฤษฎีคาดว่าจะสามารถลบล้างปริมาณอิเล็กตรอนที่มีอยู่เดิมจนหมด แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากยังคงมีปริมาณอิเล็กตรอน (TL intensity) หลงเหลืออยู่ สัญญาณที่เหลืออยู่นี้ เรียกว่า ค่าคงเหลือ (Residual) ดังนั้น ในการกำหนดอายุตัวอย่าง เราจึงต้องนำค่า Residual นี้มาพิจารณาเพื่อหักลบออกจากค่าที่เราวัดได้ เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดแสดงได้ดังรูปที่ 2.25





รูปที่ 2.25 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุของตัวอย่าง โดยแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนที่ฝังตัวในหลุมกักเก็บ และเวลา (ปรับปรุงจาก Won-in, 2003)



รูปที่ 2.26 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity,  $\text{g/cm}^3$ ) ของควอทซ์ (Aitken, 1985)

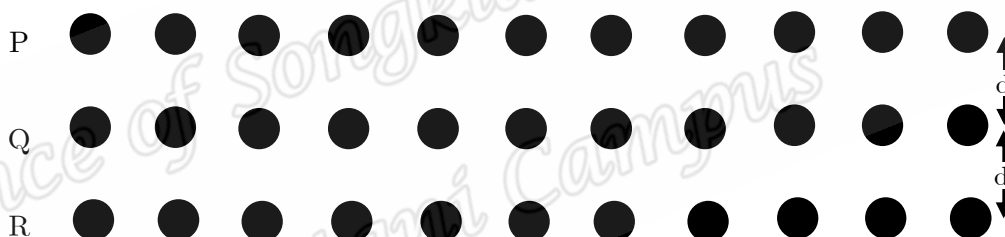
งานวิจัยนี้ทำการกำหนดอายุตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และดินเผาไฟ เริ่มต้นจากการสกัดผิวด้านนอกของตัวอย่างออก โดยการกัดกรด และคัดเลือกขนาดตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างซากหอยน้ำจืดจะทำการศึกษาโครงสร้างของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเป็นแบบใด สำหรับตัวอย่างดินซีเมนต์ และดินเผาไฟ ทำโดยการสกัด

ผลึกควอทซ์จากตัวอย่างดินซีเมนต์ และดินเผาไฟ ด้วยวิธีใช้ของเหลวความถี่จำเพาะสูง โดยอาศัยความถี่จำเพาะที่แตกต่างของสารเพื่อแยกสารออกจากกัน ดังรูปที่ 2.26

## 2.12 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง เป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง โดยตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบ (Pattern) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากันด้วย

สารตัวอย่างที่เป็นผลึกจะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $d$  ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งระยะห่าง  $d$  จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึก



รูปที่ 2.27 โครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบ

ในปี ค.ศ.1912 W.L. Bragg ได้เสนอกฎของแบกก์ (Bragg's law) อธิบายการเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีผ่านชั้นอิเล็กตรอนในผลึก โดยเสนอแนวคิดบนพื้นฐานของการสะท้อนของรังสีเอกซ์ว่า ผลึกประกอบไปด้วยชั้นหรือระนาบของอะตอมซึ่งสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน หากความแตกต่างระหว่างทางเดินคลื่น (Path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ คลื่นจะสะท้อนออกไปดังรูปที่ 2.30 รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบผิวหน้าของผลึกด้วยมุม  $\theta$  โดย P, Q และ R แทนระนาบของผลึกที่มีระยะห่างระหว่างระนาบเป็น  $d$  โดยระนาบ P สะท้อนรังสี AX เป็นรังสีสะท้อน AD และจะเห็นได้ว่าทางเดินของลำแสง BYE ยาวกว่าทางเดินของลำแสง AXD เป็นระยะทาง  $GY+YH$  โดยเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างทางเดินคลื่นเป็นไปตามสมการ (2.2) ดังนี้

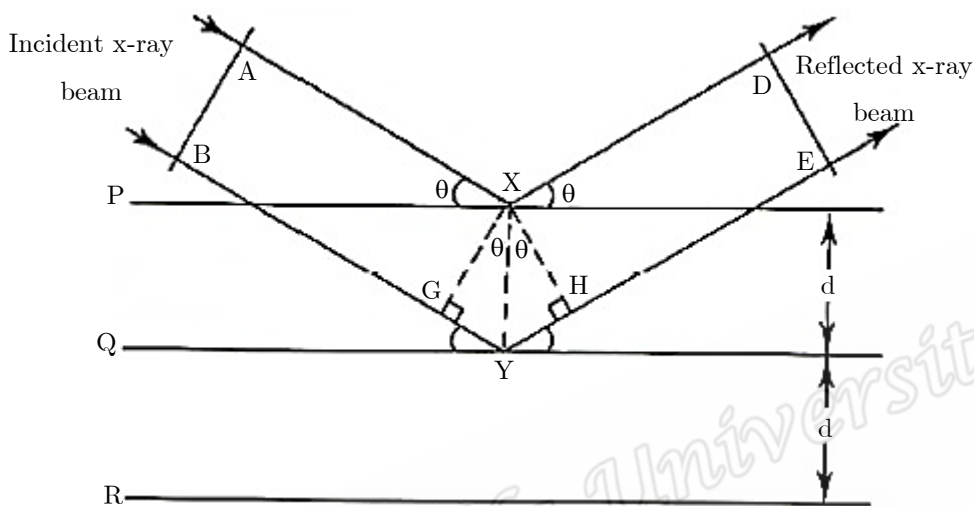
$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.46)$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างชั้นอะตอม

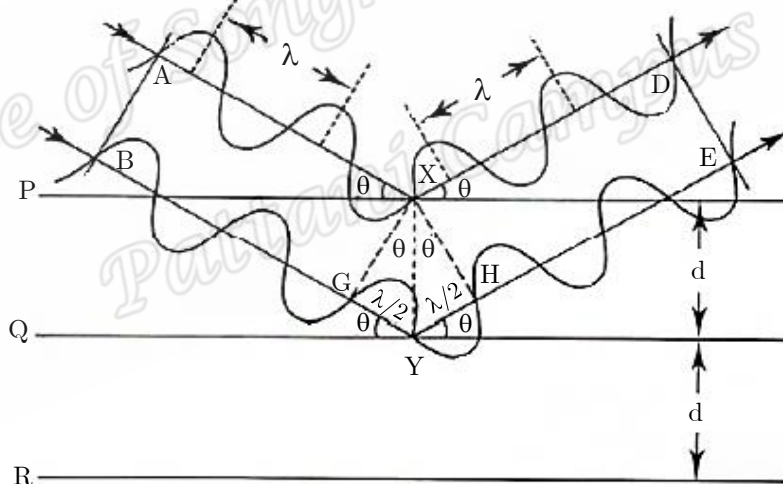
$\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่ทำกับผิวหน้าผลึก

$n$  คือ เลขจำนวนเต็ม

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์



(a)



(b)

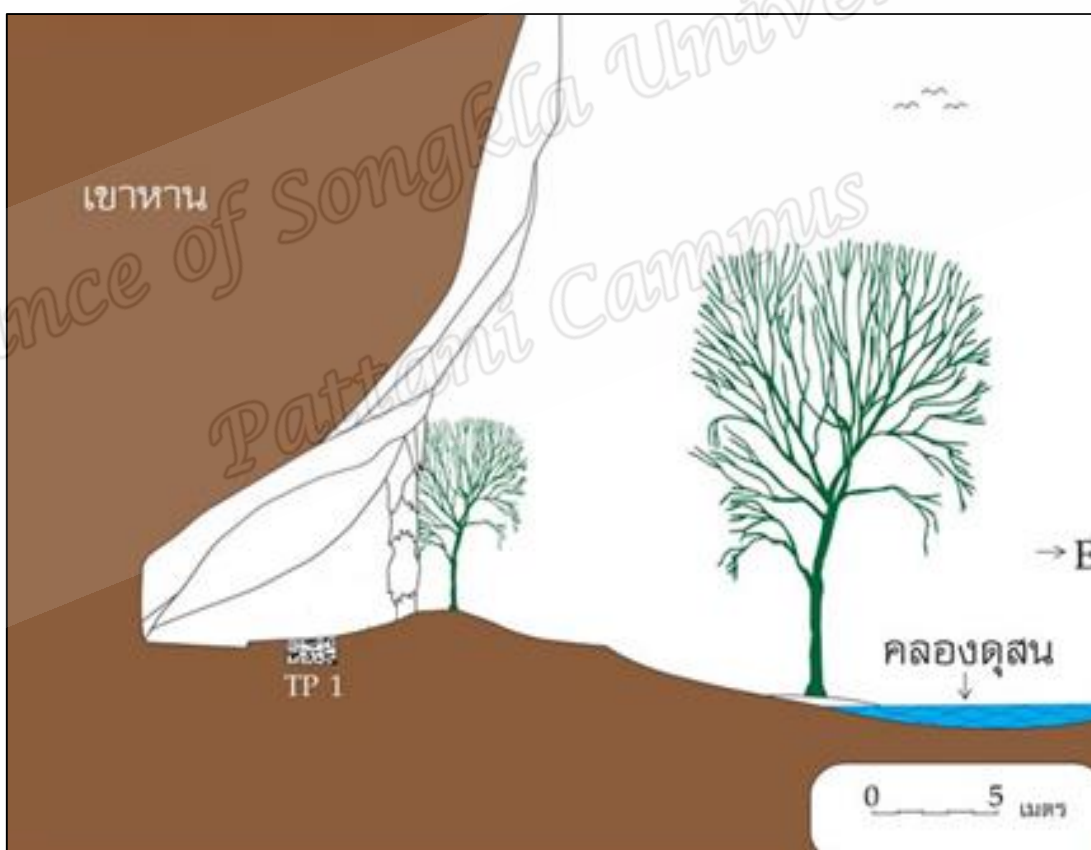
รูปที่ 2.28 เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีผ่านชั้นอิเล็กตรอนในผลึกตามกฎของแบร็ก (สุธรรม, 2554)

### 2.13 พื้นที่การศึกษา

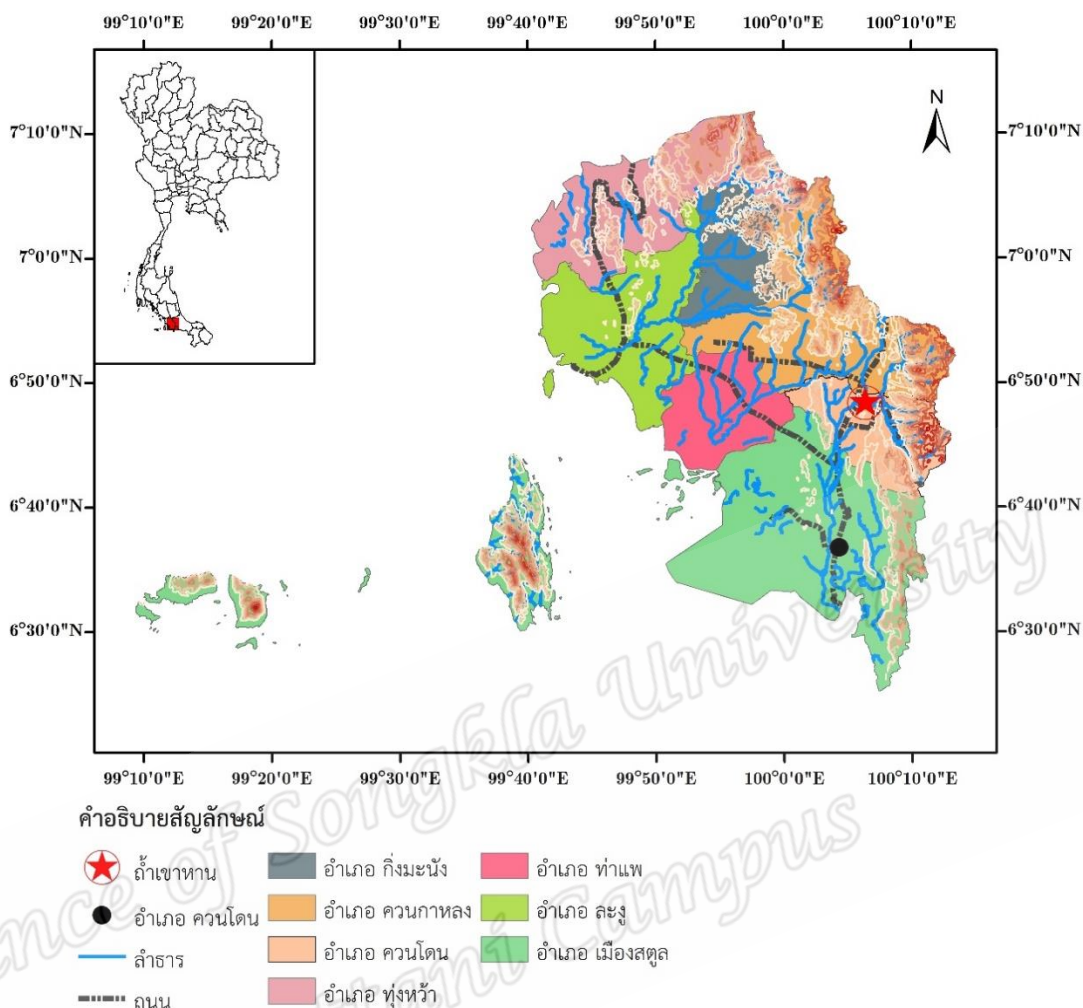
ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และดินที่ได้รับความร้อนได้มาจากแหล่งโบราณคดีถ้าเขาหาที่ตั้งอยู่ ที่หมู่ 7 บ้านป่าไต่ระโระ ตำบลควนโดน อำเภอควนโดน จังหวัดสตูล (รูปที่ 2.30) โดยกรมสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลาทำการขุดค้นในวันที่ 27 พฤษภาคม 2553 จากหลุมขุดค้นจำนวน 1 หลุม มีขนาด 4 m ด้านกว้างขนาด 2 m ขุดค้นตามระดับชั้นดินสมมติ (Arbitrary layer) โดยกำหนด

ชั้นดินแต่ละชั้นมีระดับความลึกห่างกันชั้นละ 10 cm อุปกรณ์ที่ใช้ในการขุดค้นใช้เครื่องมือหนัก และเครื่องมือเบา เช่น เกรียง จอบ เสียม ฯลฯ ขึ้นอยู่กับสภาพของชั้นการทับถมทางโบราณคดี แผนผังการขุดค้นแสดงได้ดังรูป 2.29

ถ้าเขาหันตั้งอยู่ในสภาพพื้นที่เขา และภูเขาหินปูน (Hill and mountain) มีเพิงผาขนาดยาวประมาณ 30 m กว้างประมาณ 16 m สูงจากระดับน้ำทะเล 46 m ตั้งอยู่ในตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ 47-0622176 E 0752398 N อาณาเขตทางทิศเหนือติดกับเพิงผา และป่าธรรมชาติ ทางทิศใต้ติดกับเพิงผา และป่าธรรมชาติ ทางทิศตะวันออกติดกับป่าธรรมชาติ และสวนยางพารา และทางทิศตะวันตกติดกับเพิงผา สภาพของแหล่งโบราณคดีในปัจจุบันถูกรบกวนโดยกิจกรรมการขุดซี้ค้ำคาวของชาวบ้าน จากการสำรวจบริเวณผิวดินอยู่ในสภาพดั้งเดิม และไม่ถูกรบกวนหรือถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยเฉพาะหน้าดินบริเวณพื้นที่ใต้เพิงผา พบหลักฐานหลากหลายประเภทกระจายตัวปะปนกับดินค่อนข้างหนาแน่น เช่น เศษภาชนะดินเผาประเภทเนื้อดิน (Earthenware) กระจุกสัตว์ เปลือกหอย ชิ้นส่วนสะเก็ดหิน และเครื่องมือหิน



รูปที่ 2.29 แผนผังการขุดค้นแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหัน จังหวัดสตูล (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลากรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2010)



รูปที่ 2.30 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหวาน จังหวัดสตูล

## 2.14 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1905 ลอร์ดรัทเทอร์ฟอร์ด (Lord Ernest Rutherford) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษเป็นผู้ที่ชี้ให้เห็นว่ากัมมันตรังสี สามารถนำมาใช้กำหนดอายุตัวอย่างทางโบราณคดี และทางธรณีวิทยาได้ ภายหลังจากวิทยาศาสตร์มีการพัฒนาวิธี และเทคนิคที่สามารถประมาณค่าหาอายุตัวอย่างทางโบราณคดีจากปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 457 ปีที่แล้ว นักวิทยาศาสตร์คนแรกที่พบ และอธิบายปรากฏการณ์นี้ คือ Gesner (1555) ต่อมา Daniels และคณะ (1953) ได้มีการแนะนำให้ใช้เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เป็นเครื่องมือในการวิจัยเกี่ยวกับการกำหนดอายุ อีก 2 – 3 ปีต่อมาเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ถูกนำไปใช้ในการกำหนดอายุเซรามิก โดย Grogler *et al.* (1958) หลังจากนั้นไม่นาน Boyle (1664) เป็นคนแรกซึ่งทดลองเกี่ยวกับเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เรื่องราวต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับปรากฏการณ์ดังกล่าวในยุคนั้นได้ถูกรวบรวม และเผยแพร่โดย Harvey (1957) จนกระทั่งในช่วง ค.ศ. 1985 – 1998 Aitken เป็นผู้



รวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับลูมิเนสเซนซ์ และนับว่าเป็นช่วงของการเริ่มนำปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์มา ใช้กับการหาอายุ กล่าวได้ว่าการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีการปรับแต่ง และมีการพัฒนาการมาเป็นเวลา 50 ปี ยิ่งไปกว่านั้น เทคนิคนี้ยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนมาถึงปัจจุบัน และในอนาคตต่อไป สังเกตได้จากงานวิจัยที่ยังคงเผยแพร่อย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ วัสดุที่ใช้ในการกำหนดอายุส่วนใหญ่จะเป็น ผลึกในธรรมชาติโดยเฉพาะอย่างยิ่งควอทซ์ (Quartz) และเฟลสปาร์ (Feldspars) หรือในตัวอย่าง แร่อื่น ๆ ที่มีสมบัติเป็นสารเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งอาจจะเป็นตัวอย่างทางธรณีหรือทางโบราณคดี ดังเช่น Liritzus (2000) ได้เผยแพร่เกี่ยวกับการพัฒนาเทคนิค และวิธีการกำหนดอายุของตะกอนดิน ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และเทคนิคออปติคอลลีสมูเลตเตดลูมิเนสเซนซ์ (Optical Stimulated luminescence) หรือการใช้แสงกระตุ้นให้เกิดลูมิเนสเซนซ์ ในขณะที่ Hubert *et al.* (2000) คำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีของตะกอนดินบริเวณ Kepa Kujawaka ใน โปแลนด์ ด้วยระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งไม่ต่างกับในอีกหลาย ๆ ประเทศที่ใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างทางธรณีวิทยา อาทิเช่น Chen and Li (2000) ศึกษาผลการตอบสนองของควอทซ์เพื่อนำไปสู่การหาอายุด้วย เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ต่อมา Han *et al.* (2001) ได้เผยแพร่งานวิจัยเกี่ยวกับการกำหนดอายุด้วย เทคนิคนี้ โดยใช้วิธี Additive Alpha Dose กับตัวอย่าง Granitic Quartz ในฮ่องกง และศึกษา เพิ่มเติมเกี่ยวกับเวลาในการใช้ HF สกัดตัวอย่าง เพื่อกำจัดปริมาณรังสีสะสมที่ผิวด้านนอกของ ควอทซ์ที่เกิดจากอนุภาคแอลฟา ในปีเดียวกันนั้น Koukouvelas *et al.* (2000) เป็นกลุ่มหนึ่งที่ศึกษา เกี่ยวกับตัวอย่างทางธรณีโดยนำเทคนิคนี้มาใช้หาอายุรอยเลื่อน Eliki ในประเทศกรีซ เพื่ออธิบาย เหตุการณ์ทางธรณีที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้น

ถัดมา Vora *et al.* (2002) ได้ลำดับเหตุการณ์ต่าง ๆ ทางวัฒนธรรมของเกาะ Bet Dwarka ที่ประเทศอินเดีย โดยใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์อายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งได้อายุอยู่ใน ช่วง 830 – 3,870 ปีก่อนคริสตกาล และในปีเดียวกันนี้ Takashima *et al.* (2002) ได้เผยแพร่ว่า การเลือกตัวอย่างเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และได้ใช้ เทคนิคนี้กับการกำหนดอายุของ Volcanic Rocks ของประเทศญี่ปุ่น เพื่อเป็นการตรวจสอบอายุ ทางธรณี และที่ประเทศฟินแลนด์ Eskola *et al.* (2003) พัฒนาเทคนิคนี้เพื่อกำหนดอายุหินชายฝั่ง บริเวณทางเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีอายุถึงสามล้านปีก่อนคริสตกาล

จากงานวิจัยที่เผยแพร่จำนวนมากเกี่ยวกับการกำหนดอายุด้วยเทคนิคนี้พบว่า ไม่เพียงแต่ การนำไปใช้กับตัวอย่างทางธรณีเท่านั้น แต่ยังสามารถวิเคราะห์กับตัวอย่างทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก เช่น การกำหนดอายุเครื่องปั้นดินเผาหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีมนุษย์ยุคหินใช้ในการดำรงชีวิต อาทิ Heated Flint และเมื่อ Martini *et al.* (2001) นำเทคนิคนี้กำหนดอายุ Heated Flint ของมนุษย์ในยุคหินทางตอนเหนือของประเทศอิตาลี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Richter and Krbetschek (2006) และ Richer *et al.* (2007) ได้ปรับปรุง และพัฒนาเทคนิคนี้กับการกำหนดอายุของ Heated Flint ใน เยอรมันนี้ เพื่อเป็นข้อมูลในการอธิบายวิวัฒนาการของมนุษย์ในยุคหิน นอกจากนี้ยังมีการเผยแพร่งานวิจัยเกี่ยวกับงานทางโบราณคดีในตัวอย่างอื่น ๆ เช่น Kuzmin *et al.* (2004) ใช้การกำหนดอายุ

ด้วยเทคนิคนี้กับเครื่องปั้นดินเผาในรัสเซีย พบว่าตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผาดังกล่าวมีอายุประมาณ 10,000 ปีก่อนคริสตกาล เพื่อเชื่อมโยงเรื่องราวต่าง ๆ ของประวัติศาสตร์รัสเซีย และพบว่าจนถึงปัจจุบันเทคนิค เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ก็ยังคงมีความน่าเชื่อถือสำหรับการกำหนดอายุในตัวอย่างต่าง ๆ อย่างเช่น ในปี 2009 Thomas หาอายุของ Beachrock ในฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของอินเดียโดยใช้เทคนิคดังกล่าว พบอายุอยู่ในช่วง 4.3 – 2,000 ปี

แต่การศึกษา และค้นคว้าข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในประเทศไทย เทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้กับงานด้านธรณีวิทยาหรือโบราณคดีน้อยมาก โดยส่วนใหญ่เป็นงานที่วิเคราะห์อายุโดยอาศัยการตอบสนองของผลึกแร่ควอตซ์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในชั้นตัวอย่างทางโบราณคดี เช่น งานวิจัยของสมหมาย และพวงทิพย์ เมื่อ พ.ศ. 1997 วิเคราะห์หาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผา โดยชั้นตัวอย่างเป็นสภูปดินเผา และอิฐจากแหล่งโบราณคดียะรัง จังหวัดปัตตานี พบว่าตัวอย่างดังกล่าวมีอายุประมาณ  $579 \pm 17$  ปี และ  $538 \pm 15$  ปี หลังจากนั้นไม่นานในปี พ.ศ. 2004 ศิริพงษ์ และคณะ ทำการวิจัยเช่นเดียวกับสมหมายโดยหาอายุของอิฐจากกำแพงเมืองเชียงแสน พบว่าอายุของอิฐชั้นบนจากกำแพงเมืองแสนจากอิฐก้อนต่าง ๆ คำนวณอายุได้  $600 \pm 172$  ปี และ  $842 \pm 227$  ปี ส่วนอิฐกำแพงชั้นล่างก้อนต่าง ๆ คำนวณอายุเฉลี่ยได้ประมาณ  $1127 \pm 228$  ปี และ  $1112 \pm 263$  ปี จากการศึกษาครั้งนี้ ศิริพงษ์สรุปว่ากำแพงเมืองเชียงแสนแต่ละชั้นถูกสร้างขึ้นในเวลาแตกต่างกัน โดยกำแพงเมืองชั้นล่างถูกสร้างก่อนชั้นบนประมาณ 400 ปี และในปีเดียวกันนั้นงานวิจัยของสันติ ซึ่งวิเคราะห์หาอายุตะกอนยุคควอเตอร์นารี ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และเทคนิคคาร์บอน-14 ผลการวิเคราะห์พบว่าอายุที่กำหนดได้จากทั้งสองให้ค่าอายุใกล้เคียงกัน เพียงแต่การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีข้อดีมากกว่าการกำหนดอายุด้วยเทคนิคคาร์บอน-14 โดยที่การหาอายุด้วยเทคนิคคาร์บอน-14 มีประสิทธิภาพเพียงช่วงอายุ 0 – 45,000 ปี โดยที่เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์นั้นสามารถกำหนดอายุได้ถึง 2 ล้านปีในตัวอย่างตะกอน

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการนำเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มาใช้ในการกำหนดอายุในประเทศไทยมีน้อยมาก ในขณะที่ประเทศอื่น ๆ นำเทคนิคนี้มาใช้กับงานด้านดังกล่าวอย่างกว้างขวางและยังคงพัฒนาอย่างต่อเนื่อง