



การหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน
บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา
Thermoluminescence Dating of Freshwater Shells and Sediments
in Thudta Thudyai Historical Cave Songkhla Province

ดาวิยะห์ อาแด
Daweeyah Ardae

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Applied Physics

2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน
 บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ผู้เขียน นางสาวดาวิยะห์ อาแด

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ)

.....กรรมการ

(ดร.สุนารี บดีพงศ์)

.....กรรมการ

(ดร.สมหมาย ช่างเขียน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วน
ช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวดาวิยะห์ อาแด)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวดาวิยะห์ อาแด)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

วิทยานิพนธ์	การหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา
ผู้เขียน	นางสาวดาวิยะห์ อาแด
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

แหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ทางภาคใต้ของประเทศไทย เป็นหนึ่งพื้นที่ที่น่าสนใจ มีการขุดพบหลักฐานทางโบราณคดีจำนวนมาก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำหนดหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืด และตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ทำการศึกษาตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดินที่ขุดพบที่ระดับความลึกต่างกัน 3 ระดับ โดยทำการสกัดเพื่อให้ได้ผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์จากซากหอยน้ำจืด และผลึกควอทซ์จากตะกอนดิน ตามลำดับ แล้ววัดปริมาณรังสีสะสมและปริมาณรังสีต่อปีเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาอายุของซากหอยน้ำจืด และตะกอนดินจากการรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งไม่ปรากฏผลึกควอทซ์ในตัวอย่างตะกอนดิน จึงไม่สามารถนำไปวิเคราะห์หาอายุได้ และพบว่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่าง SH1, SH2 และ SH3 เท่ากับ 0.272 mGy/a, 0.277 mGy/a และ 0.297 mGy/a ตามลำดับ และปริมาณรังสีสะสมของ SH1, SH2 และ SH3 เท่ากับ 1.24 Gy, 2.81 Gy และ 2.75 Gy ตามลำดับ ผลการวัดนำไปคำนวณค่าอายุซากหอยน้ำจืด SH1, SH2 และ SH3 ได้เท่ากับ 4,543 ปี, 10,153 ปี และ 9,269 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของกรมศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรมรายงานผล คิดเป็นร้อยละความแตกต่างของอายุจากงานวิจัยกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคาร์บอน 14 เท่ากับ 31.27, 5.11 และ 8.50 ตามลำดับ

คำสำคัญ: เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซากหอยน้ำจืด แหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย

Thesis Title	Thermoluminescence Dating of Freshwater Shells and Sediments in Thudta Thudyai Historical Cave Songkhla Province
Author	Miss Daweeyah Ardae
Major Program	Applied Physics
Academic Year	2017

ABSTRACT

Thudta Thudyai Historical Cave Songkhla Province, southern Thailand is the attractive place that many antique objects were discovered. The research have focused on archaeological age from a freshwater shells and sediment samples obtained at different depths from the Thudta Thudyai Historical Cave by performing a thermoluminescence technique. The aragonite and calcite were extracted from the Freshwater Shells samples and quartz were extracted from the sediment samples. These samples then were used to measure an accumulated dose and an annual dose from radiation exposure in nature in order to estimate dating of the freshwater shells and Sediment samples. Quartz were not found in sediment samples therefore, age analysis could not be calculated. The annual dose of SH1, SH2 and SH3 was 0.272 mGy/a, 0.277 mGy/a and 0.297 mGy/a respectively, and the accumulated dose of SH1, SH2 and SH3 was 1.24 Gy, 2.81 Gy and 2.75 Gy, respectively. The results of SH1, SH2 and SH3 were calculated as 4,543 year, 10,153 year and 9,269 year respectively, according to the results of the research by the fine arts department ministry of culture (Songkhla). The different research by using carbon 14 samples of the former and current result can be calculated by percentage as 31.27, 5.11 and 8.50 respectively.

Keywords: thermoluminescence, freshwater shell, Thudta Thudyai Historical Cave

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางแก้ปัญหาต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ดร.สมหมาย ช่างเขียน ที่คอยคำแนะนำ ช่วยเหลือ และสนับสนุนงานวิจัย หน่วยวิจัยรังสีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี ขอขอบคุณ ดร.สุนารี บดีพงศ์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี สำหรับความช่วยเหลือด้านการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกตัวอย่าง ขอขอบคุณ ผศ.ดร. พวงทิพย์ แก้วทับทิม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณ คุณพรทิพย์ พันธโกวิท คุณศิริพร และคุณธนิสรา พุ่มผะกานักโบราณคดีชำนาญการและคุณเกียรติชัย สุทธิโชติ นายช่างสำรวจปฏิบัติการ สำนักศิลปะการที่ 13 กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรมที่ช่วยสำรวจและเก็บตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินจากแหล่งโบราณคดีถ้ำทวด ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ขอขอบคุณ คุณไชนับ ดอเลาะ นักศึกษาปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่คอยให้ปรึกษาแนะนำ ช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่

- 1) ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- 2) ทุนอุดหนุนงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ขอขอบพระคุณบุคลากร รวมทั้งนักศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือนงานวิจัยและอำนวยความสะดวก อีกทั้งขอขอบคุณกำลังใจที่สำคัญจากครอบครัวและเพื่อน ๆ ทุกคน ทำให้นี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ดาวิยะห์ อาแด

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(14)
สารบัญภาพ	(15)
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
1.3 วัตถุประสงค์	8
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	9
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	9
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)	10
2.1.1 การเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	10
2.1.2 การทำงานของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	12
2.1.3 โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	13
2.1.4 การตอบสนองความเข้มสัญญาณ TL Intensity	15
2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose)	17
2.2.1 ชนิดของกัมมันตรังสี	17
2.2.2 กระบวนการจับอเล็กตรอน	17
2.2.3 กระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใน	18
2.2.4 อนุกรมกัมมันตรังสี	18
2.2.5 การหาปริมาณรังสี ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ที่ได้มาในธรรมชาติ	21
2.2.6 ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดหาอายุของตัวอย่างซาก หอยน้ำจืดและตะกอนดิน	24

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีวิจัย	
3.1 การเก็บตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาอายุ	26
3.2 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)	32
3.2.1 สารเคมี วัสดุและสารเคมี	32
3.2.2 การเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบในซากหอยน้ำจืด	33
3.2.3 การเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบในตะกอนดิน	33
3.2.4 การฉายรังสีแกมมาผลึกซากหอยน้ำจืด	34
3.2.4 การวัดความเข้มแสง (TL Intensity)	34
3.2.5 ปริมาณรังสีสะสม	34
3.3 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose)	36
3.3.1 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์	36
3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง	36
3.3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่าง	37
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย	
4.1 ผลการเตรียมผลึกตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน	42
4.1.1 ตัวอย่างตะกอนดิน	42
4.1.2 ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด	43
4.2 ผลการวัดปริมาณรังสียูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในตัวอย่าง	43
4.3 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีจากการวิเคราะห์โดยห้ววัดรังสีแกมมา	44
4.4 ผลการคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose or Dose Rate; D)	46
4.4.1 ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด	46
4.5 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของตัวอย่างที่ขนาดต่างกัน	47
4.5.1 ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด	47
4.6 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของสัญญาณ TL Intensity ของซากหอยน้ำจืด	49
4.6.1 การตอบสนองของสัญญาณ TL Intensity ของซากหอยน้ำจืด	49
4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมโกลด์ฟิต	52
4.8 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration Curve)	54

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
4.9 ผลการกำหนดอายุของซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน บริเวณแหล่งโบราณคดี ถ้ำหวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	63
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	
5.1 ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	64
5.2 ปริมาณรังสีสะสม (AD) และปริมาณรังสีต่อปี (D)	65
5.3 อายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน	65
5.4 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก	86
ประวัติผู้เขียน	93

Prince of Songkla University
Pattani Campus

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	ประสิทธิภาพในการประยุกต์วิธีการกำหนดอายุกับตัวอย่างทางธรณีวิทยาและ โบราณคดีชนิดต่าง ๆ	5
2.1	อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า แกมมา และครึ่งชีวิตของ ธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม	19
2.2	อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า แกมมา และครึ่งชีวิตของ ธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม	20
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี และปริมาณรังสีต่อปี	23
3.1	การขุดค้นทางโบราณสถานถ้ำทวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา	30
3.2	รายละเอียดตัวอย่างที่นำมากำหนดหาอายุโดยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	31
4.1	ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในซากหอยน้ำจืด	45
4.2	ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด	45
4.3	ค่า Internal Dose Rate ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด	46
4.4	ค่า External Dose Rate ในสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด	47
4.5	ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับตัวอย่างซากหอยน้ำจืด	47
4.6	ผลการตอบสนองต่อรังสีของซากหอยน้ำจืดชนิดเดียว ที่ขนาดต่างกัน	49
4.7	ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ โดสต่าง ๆ	56
4.8	ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ โดสต่าง ๆ	59
4.9	ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับ โดสต่าง ๆ	62
4.10	อายุของซากหอยน้ำจืด บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา	63
5.1	เปรียบเทียบอายุตัวอย่างที่ระดับความลึกเดียวกันจากเทคนิคคาร์บอน-14 และเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของงานวิจัย	65

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ช่วงอายุโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่สามารถกำหนดได้ อย่างมีประสิทธิภาพ	4
1.2	ค่าความผิดพลาดโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่สามารถกำหนดได้	4
2.1	แบบจำลองของแถบพลังงานในกระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	11
2.2	ลักษณะทั่วไปของหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณการตอบสนอง เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	12
2.3	โกลว์เคิร์ฟเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิใน	14
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสี ที่ได้จากวิธี Additive Dose	15
2.5	แผนภาพแสดงการเกิดกระบวนการจับอิเล็กตรอน	17
2.6	แผนภาพแสดงการเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใน	18
2.7	สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการรับรังสีในสิ่งแวดล้อมของ U, Th และ K	21
3.1	แผนผังตำแหน่งหลุมขุดค้นแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา (a) แผนผังหลุมขุดค้น (b) ตำแหน่งหลุมขุดค้น	26
3.2	สภาพทั่วไปของแหล่งโบราณคดีและทางเข้าสู่แหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตาทวด ตวยาย จังหวัดสงขลา	28
3.3	แสดงตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ จากโบราณสถานถ้ำหวดตาทวด ตวยาย อ.สะบ้าย้อย จ.สงขลา (a) ซากหอยน้ำจืดที่ระดับต่าง ๆ (b) สิ่งแวดล้อม รอบซากหอยน้ำจืด	29
3.4	ภาพแสดงสเปกตรัมที่ปรากฏส่วนของการตอบสนองผลของโกลว์ฟิต	35
3.5	กราฟปรับเทียบมาตรฐานด้วยวิธีทาง Linear Extrapolation	35
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขช่อง กับพลังงานของรังสีด้วยระบบวัด รังสีแกมมา	37
3.7	กระบวนการเตรียมตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเพื่อวิเคราะห์อายุด้วยเทคนิค เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	39
3.8	แผนผังกระบวนการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินเพื่อวิเคราะห์เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	40
4.1	ผลการสกัดแยกควอทซ์ในตัวอย่างตะกอนดิน	42

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืด ธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K)	43
4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของสิ่งแวดล้อมรอบหอยน้ำจืด ธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K)	44
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียมกับตัวอย่าง	45
4.5 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อรังสีตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ขนาด 90 – 150 μm ที่ปริมาณรังสี 0 Gy และ 70 Gy	48
4.6 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อรังสีตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ขนาด 150 – 212 μm ที่ปริมาณรังสี 0 Gy และ 70 Gy	48
4.7 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH1	50
4.8 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH2	50
4.9 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH3	51
4.10 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของโกลว์เคิร์ฟ ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (a) SH1 (b) SH2 และ (c) SH3	52
4.11 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH1	54
4.12 ค่า TL Intensity (a.u) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 เมื่อ (a) 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 350 °C	55
4.13 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 ที่อุณหภูมิ 350 °C	56
4.14 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH2	57
4.15 ค่า TL Intensity (a.u) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 เมื่อ (a) 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 325 °C	58
4.16 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 ที่อุณหภูมิ 325 °C	59
4.17 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH3	60
4.18 ค่า TL Intensity (a.u) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 เมื่อ 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 325 °C	61
4.19 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 ที่อุณหภูมิ 325 °C	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันโลกมีวิวัฒนาการก้าวไกล แม้วัฒนธรรมต่าง ๆ บนโลกจะเปลี่ยนแปลงไปมาก แต่สิ่งที่ยังคงบอกเล่าประวัติศาสตร์ความเป็นมาในอดีตได้คงเป็นร่องรอยหลักฐานต่าง ๆ ที่พบตามสถานที่แห่งนั้น ข้อมูลจากร่องรอยหลักฐานที่ขุดพบตามแหล่งโบราณคดีต่าง ๆ ได้รับความสนใจทำให้นักโบราณคดีที่มีความเชี่ยวชาญในด้านวัตถุโบราณ ได้พัฒนาการสำรวจหลักฐานเพื่อนำมาวิเคราะห์บอกถึงที่มาและยุคสมัยเหล่านั้นยังคงเป็นไปอย่างต่อเนื่องและได้รับความนิยมนักมากขึ้น จนสามารถบอกถึงอายุสมัยของแหล่งแหล่งโบราณคดีรวมถึงวัตถุโบราณต่าง ๆ ได้และบันทึกไว้เป็นฐานข้อมูลของแหล่งโบราณคดีนั้น ในสมัยปัจจุบันนี้เทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น จึงมีการนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาใช้ประโยชน์ในการสนับสนุนความคิดของมนุษย์ในอดีตให้มีความแม่นยำเป็นไปตามหลักการและเหตุผล นอกจากนี้แล้วสำหรับภาคใต้ของประเทศไทยเป็นอีกพื้นที่ที่ขุดพบหลักฐานทางโบราณคดีและแหล่งโบราณคดีจำนวนมากที่ยังคงต้องการการยืนยันทางวิทยาศาสตร์เพื่อมาสนับสนุนความแม่นยำของข้อมูลมากขึ้น เช่นเดียวกับจังหวัดสงขลา จังหวัดสงขลาเป็นอีกหนึ่งพื้นที่ที่มีเรื่องราวทางประวัติศาสตร์ที่ต้องการการเผยแพร่ให้กับผู้ที่สนใจและเพื่อเป็นข้อมูลในการเติมเต็มส่วนที่ขาดหายไปทางประวัติศาสตร์ ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวของภาคใต้ได้ จากข้อมูลทางประวัติความเป็นมาของแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ตั้งอยู่ที่บ้านเกาะยาง หมู่ที่ 7 ตำบลเขาแดง อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา พบหลักฐานทางโบราณคดีจำนวนมาก อาทิเช่น เศษภาชนะเครื่องปั้นดินเผา รวมถึงซากสิ่งมีชีวิต จำพวกหอยน้ำจืด เป็นต้น

งานวิจัยนี้ทำการหาอายุของซากตัวอย่างหอยน้ำจืดและตะกอนดิน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ทางภาคใต้ของประเทศไทย ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ทั้งนี้การใช้เทคนิคดังกล่าวเหมาะกับตัวอย่างที่เป็นผลึก ซึ่งหลักฐานที่ได้ขุดพบจากแหล่งโบราณคดีเป็นเปลือกหอยและตะกอนดินโดยส่วนใหญ่ เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ตอบสนองได้ดีกับตัวอย่างที่เป็นผลึก ซึ่งเหมาะสมกับการเลือกใช้เทคนิคนี้มาในการกำหนดหาอายุ

ในปี ค.ศ. 1896 ถือเป็นจุดเริ่มของการเรียนวิทยาศาสตร์ด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ปีแอร์และมารี คิวรี (Pierre and Marie Curie) สนใจและศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดังกล่าว จนได้ข้อสรุปว่ากัมมันตรังสี (Radioactivity) ธาตุที่สามารถปล่อยรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น ยูเรเนียม เรียกว่าธาตุกัมมันตรังสี ต่อมาเออร์เนท รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) และคณะได้ค้นพบรังสีที่เปล่งออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีมีอยู่ 2 ชนิด คือรังสีแอลฟา (Alpha Rays) และรังสีบีตา (Beta Rays) ไม่นานปีแอร์ คิวรี และวิลลาร์ด (Willard) ก็ค้นพบรังสีที่สาม คือรังสีแกมมา (Gamma Rays) และยังสามารถเสนออีกว่าอนุภาคแอลฟาคือนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม พลังงานกัมมันตรังสีหรือเรียกง่าย ๆ ว่ากัมมันตรังสี ธาตุกัมมันตรังสีจะปลดปล่อยรังสีที่เป็นรังสีก่อไอออน (Ionizing Radiation) จากการวิเคราะห์พลังงานที่ได้สามารถแบ่งรังสีทางนิวเคลียร์ออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ รังสีประเภทอนุภาค เช่น แอลฟา เบต้า โปรตอน นิวตรอน และรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์

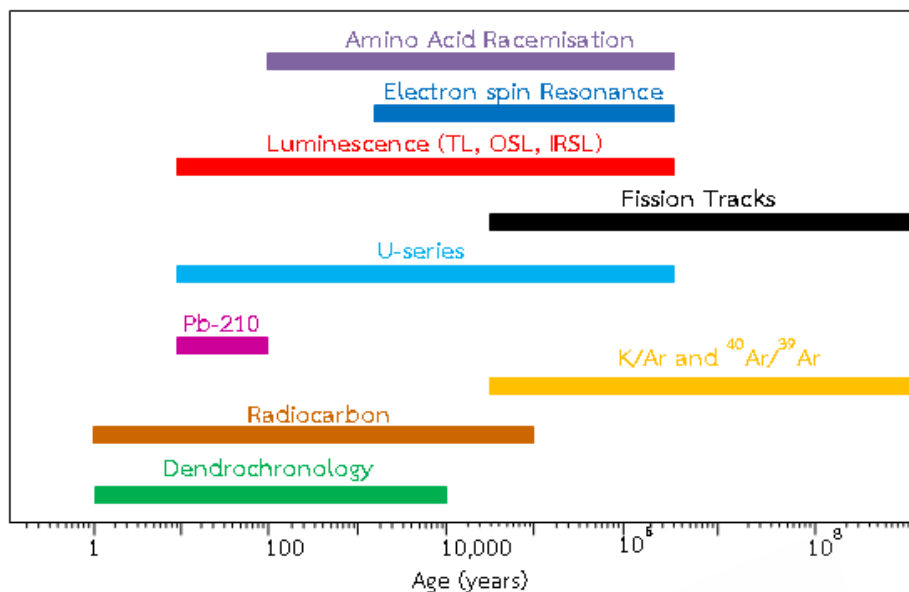
ในปี ค.ศ. 1905 เออร์เนท รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ชี้ให้เห็นว่ารังสีสามารถนำมาใช้ในการกำหนดหาอายุตัวอย่างทางโบราณคดีได้ (Archaeology) และทางธรณีวิทยา (Geological) ได้ ภายหลังจากจึงมีการพัฒนาวิธีการหาอายุของนักวิทยาศาสตร์ และเทคนิคที่สามารถประมาณค่าอายุหิน ซากสิ่งมีชีวิตโบราณได้ การกำหนดอายุทางโบราณคดี เป็นการหาช่วงระยะเวลาที่มนุษย์ในอดีตดำรงชีวิตอยู่ ตัวอย่างทางโบราณคดี และทางธรณีวิทยาสามารถวิเคราะห์หาอายุได้จากข้อมูลที่ถูกรับบันทึกในตัวอย่างที่รวบรวมได้จากแหล่งขุดค้นเหล่านั้น (ปรับปรุงจากไชนับ, 2557) การศึกษาหาอายุทางธรณีวิทยา สามารถหาได้ 2 ลักษณะ คือ

1. อายุเปรียบเทียบ (Relative Age) เป็นช่วงระยะเวลาอายุทางธรณีวิทยาโดยศึกษาจากชั้นหิน หรือการลำดับชั้นหิน ลักษณะทางธรณีวิทยา หรือเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาอื่น ๆ โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบสัมพันธ์ซึ่งกันและกันกับดัชนีต่าง ๆ รายงานวิชาการอื่น ๆ ที่พบในชั้นหิน เช่น หินจากซากดึกดำบรรพ์ต่าง ๆ ที่พบอยู่ในหินว่าเป็นสกุลและชนิดใด เป็นต้น ซึ่งศาสตร์นี้ต้องอาศัยการสังสมประสบการณ์และความเชี่ยวชาญสูง ทั้งนี้แทนที่จะบ่งบอกเป็นจำนวนปี แต่การบอกอายุของหินแบบนี้กลับบอกได้แต่เพียงว่า สิ่งไหนเกิดก่อนหรือหลัง อายุแก่กว่าหรืออ่อนกว่าหินหรือซากดึกดำบรรพ์อีกชุดหนึ่งเท่านั้น โดยอาศัยตำแหน่งการวางตัวของหินตะกอนเป็นตัวบ่งบอก (Index Fossil) เป็นส่วนใหญ่ เพราะชั้นหินตะกอนแต่ละชั้นจะต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งที่จะเกิดการทับถม เมื่อสามารถเรียงลำดับของหินตะกอนแต่ละชุดตามลำดับก็จะสามารถหาเวลาเปรียบเทียบได้

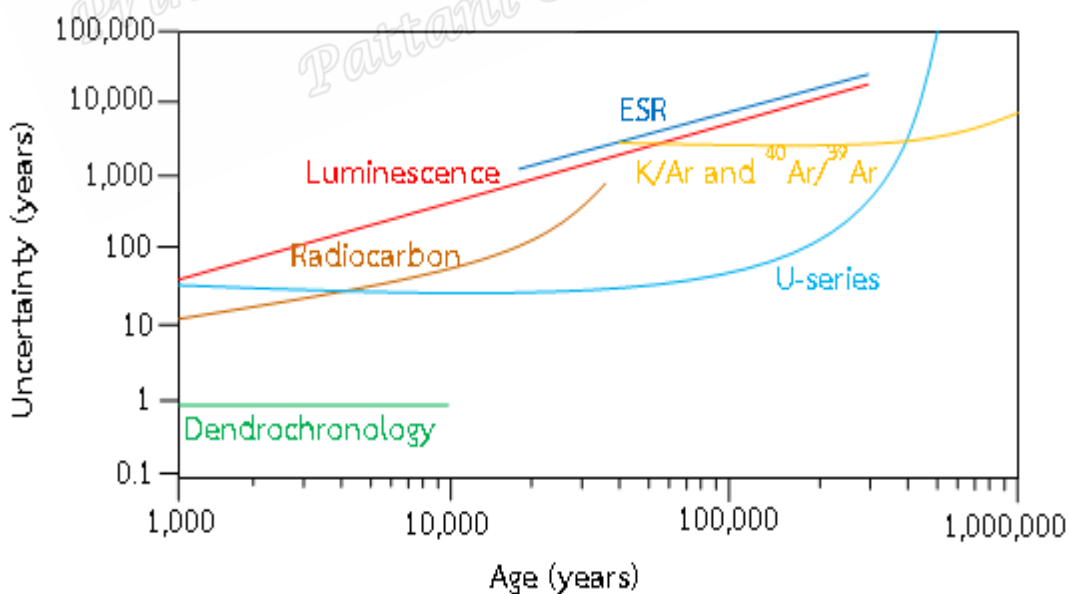
2. อายุสัมบูรณ์ (Absolute Age) เป็นระยะเวลาที่สามารถบ่งบอกอายุที่แน่นอนลงไป เช่น อายุซากดึกดำบรรพ์ของหินหรือวัตถุต่าง ๆ ที่สามารถหาได้ ลักษณะหรือเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาหาอายุ โดยทั่วไปหมายถึงการกำหนดหาอายุที่จากการวิเคราะห์และคำนวณหาได้จากไอโซโทป ของธาตุกัมมันตรังสีที่ปะปนประกอบอยู่ในหินหรือในซากดึกดำบรรพ์หรือวัตถุนั้น ๆ ขึ้นอยู่กับวิธีการและช่วงเวลาครึ่งชีวิต (Half life) ของธาตุนั้น ๆ เช่น C-14 มีครึ่งชีวิตเท่ากับ 5,730 ปี จะใช้กับหินหรือ Fossil โบราณคดี ที่มีอายุไม่เกิน 50,000 ปี ส่วน U-238 หรือ K-40 จะใช้หินที่มีอายุมาก ๆ ซึ่งมีวิธีการที่สลับซับซ้อน ใช้ทุนสูงและแร่ที่มีปริมาณรังสีมีปริมาณน้อยมาก วิธีการนี้เรียกว่า การตรวจหาอายุจากสารกัมมันตภาพรังสี (Radiometric Age Dating)

การกำหนดหาอายุวัตถุโบราณได้รับความสนใจมากขึ้น จึงมีกระบวนการพัฒนากันมากขึ้น กระบวนการตรวจหาอายุวัตถุโบราณมีหลายวิธีการ เช่น เทคนิคคาร์บอน-14 (Radiocarbon) เทคนิควัดการเปล่งแสง (Luminescence) เทคนิคภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (Archaeomagnetic or Palaeomagnetism) เทคนิคการนับวงปีต้นไม้ (Tree Ring or Dendro – Chronology) การกำหนดอายุโดยใช้แร่อบโซเดียน (Obsidian Dating) เทคนิคการตรวจสอบอายุที่จมอยู่ในดิน (Varve Dating) เทคนิคการวัดสปินของอิเล็กตรอน (Electron spin resonance dating) การกำหนดอายุโดยใช้โปแทสเซียม-อาร์กอน (Potassium – Argon Dating) เทคนิคการนับรอยฟิชชัน (Fission Track Technique) โดยวิธีการตรวจหาอายุในแต่ละวิธีการนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการเลือกใช้วิธีการตรวจหาอายุจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของตัวอย่างที่ศึกษา ในการเลือกใช้วิธีการกำหนดอายุกับชิ้นตัวอย่างที่ต้องการศึกษานั้น มีปัจจัยสำคัญ 3 ประการ ที่ควรคำนึงถึงดังนี้

1. ช่วงอายุที่เหมาะสม เนื่องจากการกำหนดอายุในแต่ละตัวอย่างนั้นสามารถใช้ในการกำหนดอายุอยู่ในช่วงอายุที่ต่างกัน สืบเนื่องจากข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค ดังภาพที่ 1.1
2. ค่าความผิดพลาด ทั้งนี้ในแต่ละวิธีนั้นมีค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่ายอมรับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด ดังภาพที่ 1.2
3. ตัวอย่างที่นำมาศึกษา เนื่องจากตัวอย่างทางโบราณคดีและทางธรณีวิทยามีโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดก็เหมาะกับเทคนิคการกำหนดอายุที่แตกต่างกันออกไป แสดงดังตารางที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ช่วงอายุโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุ ที่สามารถกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Modified from Colman, Preece and Birkeland ; Colman and Preece, 2000)



ภาพที่ 1.2 ค่าความผิดพลาดโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่สามารถกำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (http://www.rses.anu.edu.au/environment/eepages/eeDating/QuaternaryGeochronology/Quat_info.html)

ตารางที่ 1.1 ประสิทธิภาพในการประยุกต์วิธีการกำหนดอายุกับตัวอย่างทางธรณีวิทยาและโบราณคดีชนิดต่าง ๆ (Aitken, 1990)

Material	Dating method									
	Wood/Plant	Bones	Tooth Enamel	Shells	Corals	Sediments	Obsidian Glass	Volcanic	Burn Flint	Pottery
Amino Acid Racemisation		*	*	**						
Electron Spin Resonance			**	**	***			**	**	
Luminescence						***		*	***	***
Fission Tracks							***	***		
U-series		**	**	*	***	*		***		
K/Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$								***		
Radiocarbon	***	***	*	***		**				**
Dendrochronology	***									

หมายเหตุ: * หมายถึง ตัวอย่างนั้นไม่เหมาะสมกับการกำหนดอายุนั้น ๆ
 ** หมายถึง ผลการกำหนดอายุบางครั้งน่าพอใจและบางครั้งไม่น่าพอใจ
 *** หมายถึง ตัวอย่างนั้นสามารถกำหนดอายุกับวิธีการกำหนดอายุนั้น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือสูง

การกำหนดหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ นับว่าเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ ข้อจำกัดสำคัญของเทคนิคนี้ คือ สามารถกำหนดอายุจากการสะสมปริมาณรังสีได้จากตัวอย่างโดยตรง ซึ่งเทคนิคอื่น ๆ ยังเป็นการกำหนดอายุแบบสัมบูรณ์ อีกทั้งยังสามารถกำหนดอายุออกมาได้เป็นปีที่แน่นอน และแม่นยำ มีช่วงการกำหนดอายุที่กว้าง ตั้งแต่อายุในหลักร้อยจนถึงอายุหลักล้านปี ในการกำหนดหาอายุทางโบราณคดีของถ้ำทวดตา ทวดยาย ตำบลเขาแดง อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ในการกำหนดอายุตัวอย่างทางโบราณคดี เพื่อศึกษาเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์และเป็นการให้ความรู้กับผู้ที่สนใจ

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หลังจากเฮนรี เบ็กเคอเรล (Henri Becquerel) นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส ค้นพบการเปลี่ยนแปลงสีของกระจกถ่ายรูปเป็นสีดำ จนได้ข้อสรุปว่าสารประกอบยูเรเนียม จะเปล่งรังสีที่มีอำนาจทะลุวงออกมาได้ตลอดเวลา การค้นพบการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม (Uranium) ในปี ค.ศ. 1896 ถือเป็นจุดเริ่มของการเรียนวิทยาศาสตร์ด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ปีแอร์และมารี คูรี (Pierre and Marie Curie) สนใจและศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดังกล่าว จนได้ข้อสรุปว่ากัมมันตรังสี (Radioactivity) ธาตุที่สามารถปล่อยรังสีที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น ยูเรเนียม เรียกว่าธาตุกัมมันตรังสี ต่อมาเอิร์นเนท รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) และคณะได้ค้นพบรังสีที่เปล่งออกมาจากธาตุกัมมันตรังสีมีอยู่ 2 ชนิด คือรังสีแอลฟา (Alpha Rays) และรังสีบีตา (Beta Rays) ไม่นานปีแอร์ คูรี และวิลลาร์ด (Willard) ก็ค้นพบรังสีที่สาม คือรังสีแกมมา (Gamma Rays) และยังได้เสนออีกว่าอนุภาคแอลฟาคือนิวเคลียสของอะตอมฮีเลียม พลังงานกัมมันตรังสีหรือเรียกง่าย ๆ ว่ากัมมันตรังสี (พงศกร, 2548)

เทคนิคการกำหนดอายุที่ใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ค่อนข้างมีหลากหลายวิธีการ เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) เป็นเทคนิคหนึ่งที่เป็นที่นิยมและได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน ทั้งนี้การพัฒนาสำหรับเทคนิคการกำหนดอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ได้เริ่มต้นขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1960 ซึ่งที่ผ่านมาจะปรากฏงานที่ใช้ศึกษาด้วยเทคนิคกระบวนการนี้เป็นตัวอย่างงานประเภทเครื่องปั้นดินเผา รวมถึงงานที่เป็นดินเผาไฟอื่น ๆ ด้วยนอกจากนี้แล้วยังมีการสำรวจเพิ่มเติมเกี่ยวกับใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการกำหนดอายุ ได้แก่ งานประเภทที่มีองค์ประกอบเป็นพวกควอทซ์ เฟลสปาร์ ซิลิเกต หรือพวกแร่ต่าง ๆ จึงเกิดการพัฒนามาเรื่อย ๆ และนำมาประยุกต์ใช้กับการกำหนดอายุสำหรับงานด้านศิลปะและโบราณคดีขึ้น ซึ่งพบว่างานส่วนใหญ่จะเป็นงานที่จัดว่าเป็นพวกเซรามิกซ์ ในระหว่างนั้นเมื่อปี ค.ศ. 1970 มีงานวิจัยที่ใช้กำหนดอายุด้วยวิธีนี้กับงานด้านศิลปะโบราณจำพวกเครื่องปั้นดินเผา และถือว่าเทคนิคนี้เป็นวิธีการกำหนดอายุที่อยู่ในขั้นสูงอีกวิธีการหนึ่ง (Sutton and Zimmerman, 1976) เมื่อวิธีการกำหนดอายุเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ได้รับความสนใจมากขึ้นนี้ จึงมีผู้ให้ความสนใจเข้ามาศึกษาและไขข้อปัญหาความเข้าใจที่ค่อนข้างซับซ้อนให้กระจ่างขึ้น ส่งผลให้การพัฒนาด้านวิธีการนี้กับงานที่หลากหลายอย่างกว้างขวางขึ้นทั้งนี้พบงานที่ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นงานที่เกิดจากการอบหรือเผาเป็นส่วนใหญ่ ทำให้เป็นที่แน่ใจและมีความเป็นไปได้ว่าวิธีการกำหนดอายุวัตถุโบราณวิธีการนี้เหมาะสมกับงานจำพวกเครื่องปั้นดินเผาที่ประกอบขึ้นจากวัสดุที่ทนความร้อนและทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้อย่างเช่นพวกตะกอนหิน (Wintle and

Huntley, 1980; Singvi *et al*, 1982; Debenham, 1985; Smith, 1988; Van Es *et al.*, 2000) การพัฒนากระบวนการดำเนินงานไปอย่างต่อเนื่อง แม้แต่ในประเทศไทยมีงานวิจัยเกี่ยวกับหาอายุด้วยเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของโบราณสถานคดีและโบราณวัตถุด้วย (สมหมาย, 2555) และพบงานวิจัยที่ถูกเผยแพร่เป็นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นถึงความสนใจและได้รับความนิยมน ในการพัฒนาและแก้ไขวิธีการ เพื่อลดข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เคยเกิดขึ้นในอดีตรวมถึงเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่กว้างขวางต่อไปในอนาคตข้างหน้าได้

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เหมาะกับงานที่มีโครงสร้างเป็นผลึกในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกจำพวกควอทซ์ เฟลด์สปาร์ และในตัวอย่างแร่อื่น ๆ ที่มีคุณสมบัติความเป็นสารเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์หรือสารเรืองแสงได้ ซึ่งงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศจำนวนมากปรากฏหลักฐานและข้อมูลที่ศึกษาว่าเป็นงานหรือตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับงานด้านธรณีวิทยา ในปี 2000 เมื่อ Hutt *et al.*(2000) ได้ศึกษาการกำหนดอายุของแร่ควอทซ์จากเศษอิฐของโบสถ์ Somara ในประเทศฟินแลนด์ ต่อมา Sekkina *et al.* (2002) มีการศึกษาวิธีการหาค่าปริมาณรังสีสะสมด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของเครื่องปั้นดินเผาในไซปรัส ประเทศอียิปต์ และในปีเดียวกันยังมี Sekkina *et al.* (2002) วิจัยเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับงานด้านธรณีวิทยาและด้านโบราณคดี และ Galli *et al.* (2006) ศึกษาการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของเม็ดควอทซ์ละเอียดของงานเซรามิกโบราณ ในปีถัดมา Veronese *et al.* (2007) ศึกษาการกำหนดหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของ mikveh ในเมือง Ichenhausen ประเทศเยอรมัน และในปีเดียวกัน GeLian *et al.* (2008) ทำงานวิจัยที่ใช้รัฐเป็นตัวอย่าง ในปีถัดไป WeiDa (2009) ศึกษาวิธีการในกระบวนการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ที่มีกระบวนการหลัก 2 กระบวนการมาตรฐาน คือ fine-grain technique และ quartz inclusion technique ที่ถือว่าเหมาะสมกับชิ้นงานประเภทเครื่องปั้นดินเผาและงานศิลปวัตถุพวกเซรามิก ในขณะที่ Song *et al.* (2009) ทำการศึกษาผลการปลดปล่อยแสงสีแดงของแร่ควอตซ์ที่ได้จาก 2 ตัวอย่างจากต้นกำเนิดภูเขาไฟ คือ Yuda sample จาก Iwate และ Tazawa sample จาก Akita ที่ประเทศญี่ปุ่น

ในปีต่อมา Ya *et al.* (2010) ศึกษาการพัฒนาวิธีการหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของเครื่องปั้นดินเผาโบราณ ซึ่งได้เสนอวิธีการใช้ TLD K detector ในการหาอายุเพื่อพัฒนาถึงกระบวนการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ พบว่าการกำหนดหาอายุโดยใช้ TLD K detector สามารถหาอายุตัวอย่างได้รวมถึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานอีกด้วย และในปีเดียวกัน Khaswneh *et al.* (2010) มีการศึกษาการกำหนดอายุของโบราณสถาน Tell Al-Husn ทางตอนเหนือของประเทศจอร์แดนจากวัตถุพวกเครื่องปั้นดินเผาที่ขุดได้ใน 2 ช่วงเวลา โดย

เทคนิคการกำหนดอายุเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ พบว่าการคำนวณหาอายุของเครื่องปั้นดินเผา สามารถทราบอายุที่แน่นอนคือมีอายุราวประมาณ 1560-1200 ปีก่อนคริสตกาล และการขุดค้นช่วงที่ 2 มีอายุประมาณ 1410-1340 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นอายุที่ได้รับการยืนยันถึงผลการคำนวณที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำ ซึ่งจากงานวิจัยที่เริ่มจะให้ความถูกต้องและแม่นยำของผลการศึกษามากขึ้นนี้เอง เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จึงได้รับการยอมรับและให้ความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน สืบเนื่องจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเริ่มมีมากขึ้นในแต่ละปี และ Pailoplee *et al.* (2010) ถึงความน่าจะเป็นของวิธีการกำหนดอายุเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการตรวจสอบอิฐเผาโบราณที่เกี่ยวข้องกับโบราณสถานที่ ThungTuk พบว่าผลการวัดหาอายุของอิฐมีช่วงอายุที่ต่างกัน 2 ช่วงอายุนั้นคือ 840-15000 ปีก่อนคริสตกาล และ 2800 ปีก่อนคริสตกาล

Michel de Brito *et al.* (2012) ศึกษาผลการเปรียบเทียบการตอบสนองสัญญาณ TL จากลักษณะที่หลากหลายของแร่ควอตซ์ในธรรมชาติของประเทศบราซิล พบว่าช่วงอุณหภูมิของการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของแร่ควอตซ์แต่ละสี มีบางช่วงอุณหภูมิที่มีการตอบสนองที่ตรงกัน และบางช่วงอุณหภูมิของการตอบสนองที่แตกต่างกัน เกิดจากโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกันของแร่ควอตซ์แต่ละสี หลายงานวิจัยยืนยันได้ว่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เหมาะกับตัวอย่างประเภทเครื่องปั้นดินเผา ด้วยเหตุผลที่เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เหมาะสมกับตัวอย่างประเภทผลึก และมีช่วงของการกำหนดอายุที่กว้างจึงได้มีการนำเอาความรู้ในส่วนนี้มาประยุกต์กับการกำหนดอายุทางธรณีวิทยาได้

1.3 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน เพื่อนำไปสู่การหาปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD)

1.3.2 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปีของยูเรเนียม (^{238}U), ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน จากการวิเคราะห์ด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI

1.3.3 เพื่อวิเคราะห์อายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตา หวดยาย จังหวัดสงขลา

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สํารวจและเก็บตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตาทวดยาย ตำบลเขาแดง อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา

1.4.2 ศึกษาการเตรียมตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินเพื่อวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องอ่านโมลัมมิเนสเซนซ์

1.4.3 ศึกษาการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลัมมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน เพื่อวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)

1.4.4 วิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose) ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI

1.4.5 วิเคราะห์หาอายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินของแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตาทวดยาย ตำบลเขาแดง อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา

1.4.6 ศึกษาหลักการกำหนดอายุของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินด้วยวิธีเทอร์โมลัมมิเนสเซนซ์

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบอิทธิพลขององค์ประกอบของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินที่มีผลต่อการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลัมมิเนสเซนซ์

1.5.2 เป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการกำหนดอายุเทอร์โมลัมมิเนสเซนซ์ให้ดียิ่งขึ้น

1.5.3 ทราบค่าอายุที่แม่นยำได้จากเทคนิคการกำหนดอายุเทอร์โมลัมมิเนสเซนซ์

1.5.4 สามารถเป็นแหล่งข้อมูลในการศึกษาการกำหนดอายุกับผู้ที่ศึกษาได้

1.5.5 สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยให้แก่ผู้ที่สนใจศึกษา

บทที่ 2

ทฤษฎี

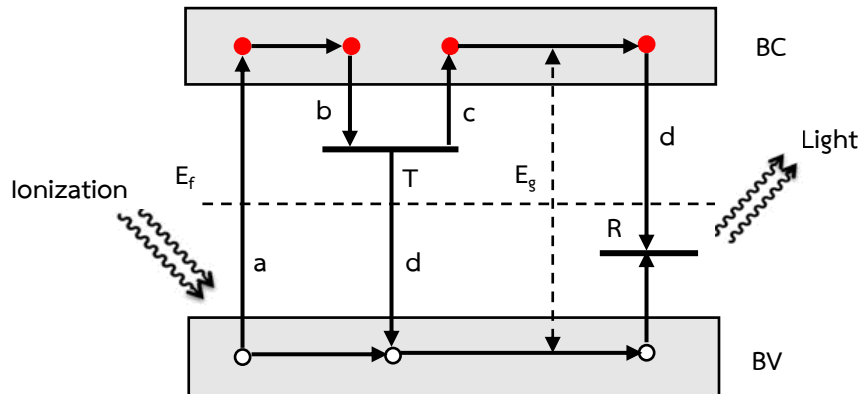
ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการกำหนดหาอายุซากหอยน้ำจืด และตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose) การเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การทำงานของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การตอบสนองสัญญาณความเข้มแสง (TL Intensity) การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD)

เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence) เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงของสารบางชนิดเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งปรากฏการณ์เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์นี้หรือบางครั้งเรียกว่าปรากฏการณ์การเรืองแสง จะเกิดเมื่อสารได้รับรังสีและดูดกลืนพลังงานจากรังสีไว้ ทำให้อิเล็กตรอนส่วนหนึ่งหลุดออกมา และบางส่วนจะถูกจับไว้ในผลึกที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์ เมื่อนำมากระตุ้นด้วยความร้อน อิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกปลดปล่อยออกมาพร้อมทั้งคายพลังงานในรูปของแสง

2.1.1 การเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เป็นเทคนิคกระบวนการที่ใช้ความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่วัตถุปลดปล่อยรังสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตาสามารถมองเห็น (Visible light) ได้ เมื่อผลึกอาบด้วยรังสีที่ก่อไอออนจนอิเล็กตรอนในผลึกมีค่าพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานในชั้นเวเลนซ์แบนด์ (Valence Band) อิเล็กตรอนจะแพร่ขึ้นไปอยู่ในชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) และถูกดักจับไว้ในหลุมกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ปริมาณของอิเล็กตรอนในหลุมกับดักจะเป็นปฏิกิริยากับปริมาณรังสีที่ได้รับ และเมื่อนำผลึกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในหลุมกับดักมากระตุ้นด้วยความร้อน ทำให้อิเล็กตรอนในหลุมกับดักหลุด และกลับสู่ชั้นเวเลนซ์แบนด์อีกครั้ง พร้อมกับปลดปล่อยแสงในช่วงที่ตามองเห็น อธิบายได้โดยทฤษฎีแถบพลังงาน (Energy Band Theory) จากแบบจำลองการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แบบจำลองของแถบพลังงานในกระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์
(ปรับปรุงจาก Aitken, 1985)

ศูนย์กลางของกับดัก (Center of the Trap, T) ที่เกิดขึ้นในผลึกเกิดจากความบกพร่องของผลึก ซึ่งเมื่อผลึกได้รับปริมาณรังสีจากการแผ่รังสีในธรรมชาติ จะส่งผลทำให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน พลังงานที่ผลึกได้รับมีค่าพลังงานมากกว่าแถบต้องห้าม อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับผลึกทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ได้รับพลังงานเพียงพอที่จะสามารถข้ามแถบต้องห้ามไปอยู่ในแถบการนำได้ ส่งผลให้เกิดโฮลอิสระ (Free Hole) ที่แถบวาเลนซ์ พร้อมกับมีโฮลอิสระถูกดักจับกับกับดักโฮล (Hole Trap, H) โดยอิเล็กตรอนที่ข้ามแถบต้องห้ามไปอยู่ในแถบการนำมีผลต่างของพลังงานเป็น

$$E_e = E_c - E_v$$

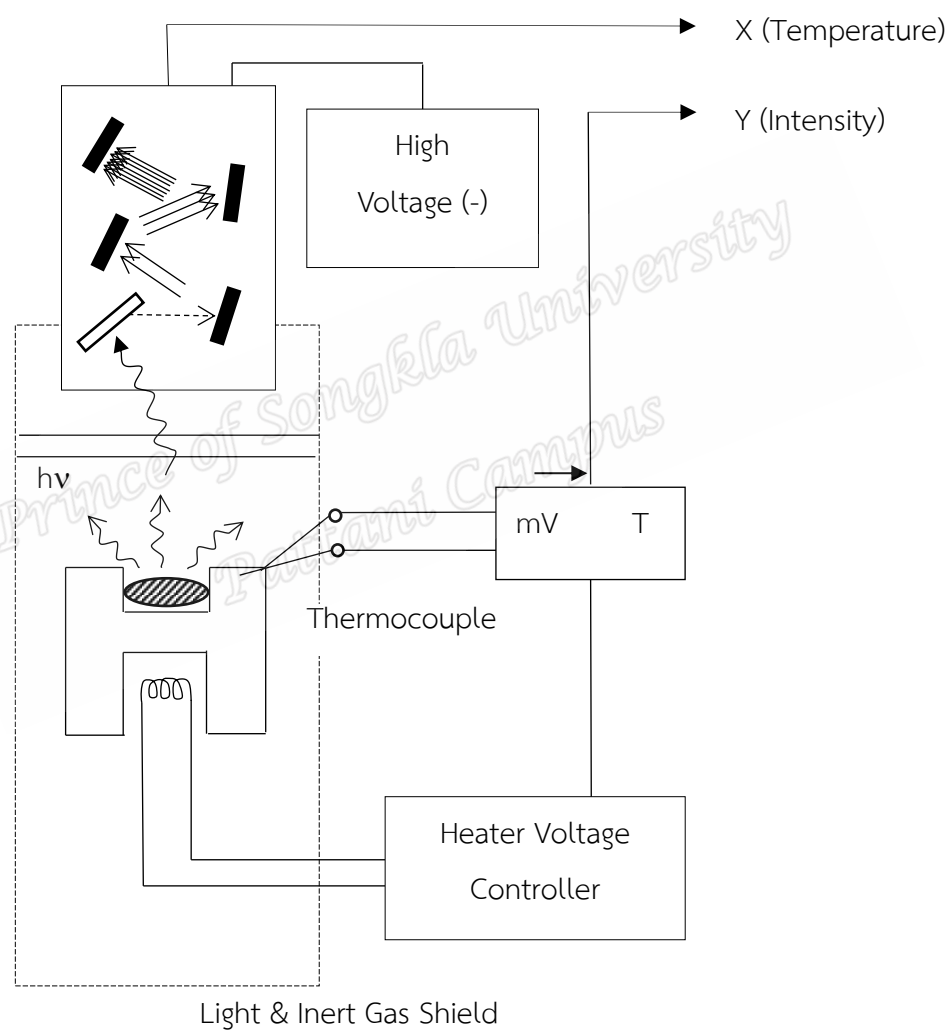
(2.1)

เมื่อ	E_e	คือ	ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน
	E_c	คือ	ระดับพลังงานของแถบนำ
	E_v	คือ	ระดับพลังงานของแถบวาเลนซ์

เมื่อมีอิเล็กตรอนบางส่วนอยู่ในแถบการนำ ซึ่งอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำจะมีพลังงานสูงกว่า จึงอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร อิเล็กตรอนจึงพยายามที่จะกลับคืนสู่ชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าในชั้นสถานะพื้น แต่จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนถูกดักจับไว้ที่สถานะกึ่งเสถียร จึงมีอิเล็กตรอนบางส่วนถูกดักจับไว้กับกับดักอิเล็กตรอน (Trap) ในแถบต้องห้าม และอยู่ต่อไปกระทั่งมีการกระตุ้นด้วยความร้อนมากพอที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากหลุมกับดัก และคายพลังงานออกมาในรูปของแสงที่ตามองเห็น ซึ่งอิเล็กตรอนและโฮลดังกล่าวจะรวมกันอีกครั้งที่ศูนย์กลางการรวมตัว (Recombination center, R) และเกิดการเรืองแสงขึ้นตามกระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

2.1.2 การทำงานของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณความเข้มแสง (TL Intensity) ผลึกตัวอย่างปลดปล่อยออกมาขณะเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน ภายหลังจากกระตุ้นด้วยความร้อน โดยการเปลี่ยนรูปของความเข้มสัญญาณ TL ให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าในค่า Count แสดงการทำงานดังภาพที่ 2.2 (ปรับปรุงจากไชนับ, 2557)



ภาพที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Ikeya, 1993)

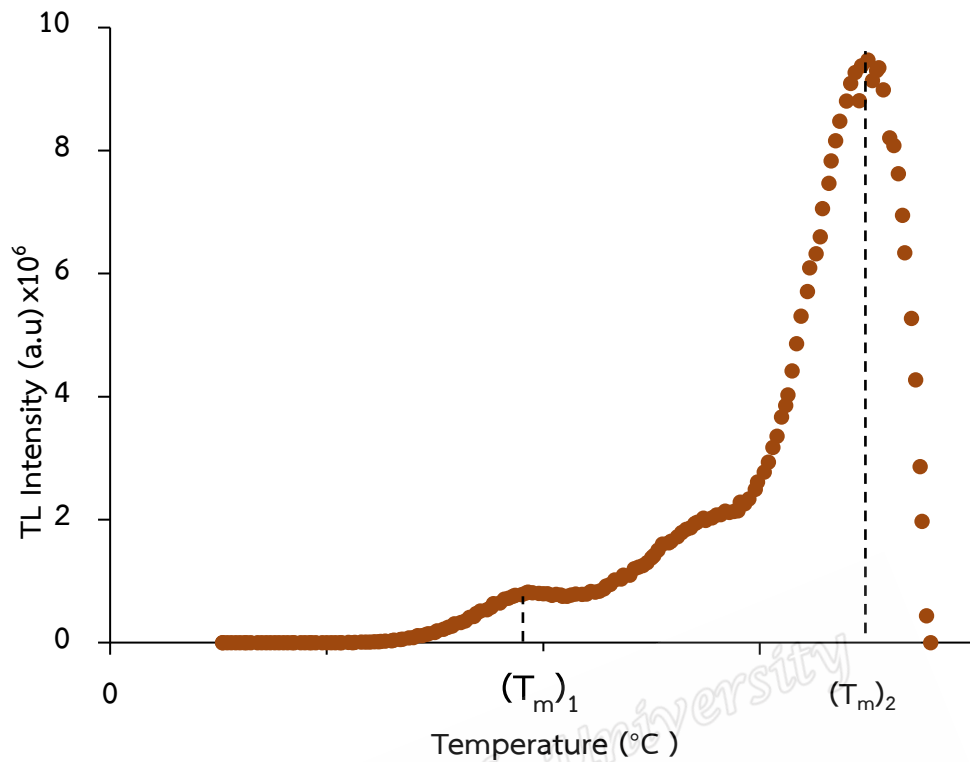
2.1.3 โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

โกลว์เคิร์ฟเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (TL Intensity) ที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ กับคุณสมบัติที่ใช้ในการให้ความร้อน ถ้าอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) คงที่สม่ำเสมอกราฟที่ได้จะมีความคล้ายคลึงกันมาก ซึ่งสามารถอธิบายปริมาณความเข้มสัญญาณ TL ได้ โดยใช้ทฤษฎีแรนดอลล์ และวิลคินส์ (Randall and Wilkoms) ดังนี้ เมื่อพิจารณาผลึกที่มีกับดักอิเล็กตรอน มีพลังงานความลึก (Energy Depth, E) ของกับดักอิเล็กตรอนในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งอยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบการนำในขณะที่อุณหภูมิเท่ากับองศาเคลวิน พบว่าความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดักอิเล็กตรอน (P) เป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$P = \frac{1}{\tau} = se \frac{E}{kT} \quad (2.2)$$

เมื่อ	P	คือ	ความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดักต่อหน่วยเวลา (s)
	τ	คือ	ชั่วชีวิตของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกับดัก
	k	คือ	Boltzan's Constant (โดยที่ $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K} ; 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)
	s	คือ	Frequency Factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผิดปกติตรงส่วนโครงสร้างของผลึก (s^{-1})
	E	คือ	พลังงานความลึกของกับดักอิเล็กตรอน (eV)
	T	คือ	อุณหภูมิ (K)

จากสมการ (2.1) พบว่า ค่า K, E และ s จะมีค่าคงที่ เมื่ออุณหภูมิ (T) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า P เพิ่มขึ้น และ τ มีค่าลดลง ดังนั้น หากเพิ่มอุณหภูมิให้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นเทียบกับเวลา โดยเริ่มจากอุณหภูมิห้อง จะทำให้อัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกดักจับมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิสูงสุด (T_m) ในขณะที่จำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกับดักไว้จะค่อย ๆ หมดลงในที่สุด ความเข้มแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอน ดังนั้นค่าสูงสุดของเส้นโค้งสัมพันธ์ที่เรียกว่า พีค (Peak) ของสัญญาณ TL จะเห็นได้ว่า ณ อุณหภูมิ T_m ซึ่งจะเรียกพีคนี้ว่าโกลว์เคิร์ฟ (Glow Curve) ดังภาพที่ 2.3 ถ้ามีหลุมกับดักมากกว่าหนึ่งจะทำให้เห็นโกลว์เคิร์ฟมากกว่าหนึ่งเช่นกัน



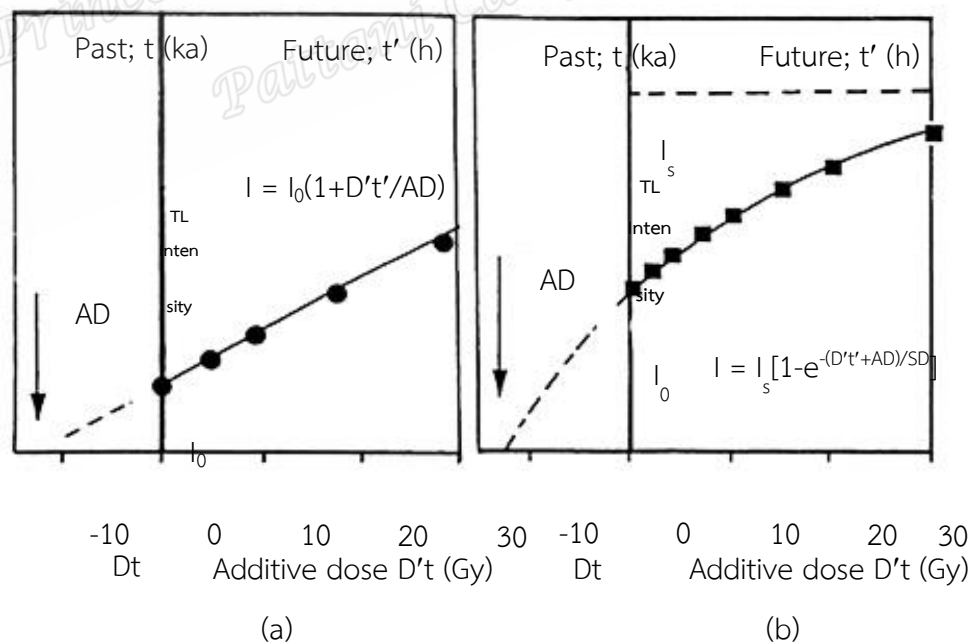
ภาพที่ 2.3 โกลว์เคิร์ฟเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิในการตอบสนอง

จากภาพที่ 2.3 เป็นผลจากการให้ความร้อนแก่ลึกดตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ได้รับรังสี ซึ่งมีกับดักอิเล็กตรอนจำนวน 2 หลุม อุณหภูมิของผลึกดตัวอย่างเป็น T เมื่อได้รับความร้อนมากระตุ้นส่งผลให้แสดงโกลว์เคิร์ฟออกมา 2 โกลว์เคิร์ฟที่ $(T_m)_1$ และ $(T_m)_2$ การให้ความร้อนแก่ลึกดตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงกว่า $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้ทำให้แสงอินฟราเรดจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กำเนิดความร้อนก่อให้เกิดความเข้มแสงที่สามารถตรวจวัดได้ ซึ่งปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลทำให้โกลว์เคิร์ฟเปลี่ยนแปลงไปได้แก่ อัตราการให้ความร้อน ขนาดรูปร่างลักษณะของโกลว์เคิร์ฟ ระดับของโดสรังสีชนิดของรังสี เครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกโกลว์เคิร์ฟ

ดังนั้น ถ้ากล่าวถึงโกลว์เคิร์ฟปกติจะหมายถึง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับอุณหภูมิ เนื่องจากผลึกดตัวอย่างได้รับการกระตุ้นจากอุณหภูมิภายนอกอยู่ตลอดเวลา และถ้าเลือกพีคที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อรังสีอินฟราเรด ซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ในการวัดนั้นมีอุณหภูมิที่สูงเกินไป ดังนั้นโกลว์เคิร์ฟที่ดีจะต้องอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะไม่รบกวนจากอุณหภูมิห้อง และไม่สูงเกินไปจนเกิดปัญหาในการออกแบบ โดยทั่วไปต้องใช้พีคที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งที่เหมือนกัน ซึ่งพีคดังกล่าวมาจากผลึกดตัวอย่างธรรมชาติ และผลึคที่ผ่านการฉายรังสี

2.1.4 การตอบสนองของสัญญาณ TL Intensity

เมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ วัดปริมาณแสง (TL Intensity) ที่ออกมา ณ อุณหภูมิต่าง ๆ นำค่าที่ได้เขียนกราฟระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิที่ตอบสนองจะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “Glow-Curve” โดยความสูงของจุดสูงสุด (Peak) หรือพื้นที่ใต้กราฟจะมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับโดยจุดตัดแกน x ซึ่งแสดงภาพที่ 2.4 ได้จากการเขียนกราฟระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสีที่ได้จากวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Additive Dose) มีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบอิมิตัวกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสีมีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น (ภาพที่ 2.4a) ในกรณีที่หลุมกับดักอิเล็กตรอนลึกซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนในหลุมได้จำนวนมากหรือบรรจุอิเล็กตรอนได้เป็นระยะเวลานาน กรณีที่เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสี ส่งผลให้กราฟมีแนวโน้มเป็นแบบอิมิตัว (ภาพที่ 2.4b) หลุมกับดักอิเล็กตรอนตื้นซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนเข้าไปในหลุมได้น้อย พอถึงจุด ๆ หนึ่งที่หลุมกับดักเต็ม แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสีจะเกิดช่วงอิมิตัว



ภาพที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับโดสรังสีแกมมาที่ได้จากวิธี Additive Dose (a) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (b) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบอิมิตัว (Ikeya, 1993)

โดยส่วนใหญ่แล้วการอาบรังสีเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างจะใช้วิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Additive Dose) ซึ่งอาบด้วยรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60 ในระดับปริมาณรังสีต่ำ ๆ แล้วเพิ่มระดับปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและเป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ได้รับ (Q) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของปริมาณรังสีที่ได้จากวิธี Additive (D') และเวลาการอาบรังสี (t') ได้ว่า $Q = D't'$ จากกราฟความสัมพันธ์ภาพที่ 2.4a กำหนดให้ $AD = Dt$ และเมื่อ $Q = D't'$ จะได้

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

เมื่อ	I_0 และ I คือ	ความเข้มสัญญาณก่อนและหลังการอาบรังสี
	Q คือ	ปริมาณรังสีที่ได้รับจากวิธี Additive ที่เวลา t'
	AD คือ	ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)

กรณีความเข้มกับอนุกรมมีแนวโน้มเป็นแบบอิมิตัว (รูปที่ 2.4b) จะได้

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

เมื่อ	I_s คือ	ความเข้มขั้นที่อิมิตัว
	SD คือ	ปริมาณการอาบรังสีช่วงที่อิมิตัว ซึ่งมีค่าเท่ากับการอาบรังสี D' และชั่วชีวิต (lifetime) ที่เกิดการอิมิตัว τ_s'

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD) ซึ่งหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 2.4 กับปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual Dose, D) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการรับรังสีในธรรมชาติ นั่นคือ การกำหนดอายุสามารถคำนวณจากสมการที่ (2.6) (Ikeya, 1993)

$$\text{Age}(y) = \frac{\text{Accumulated Dose(Gy)}}{\text{Annual Dose(Gy/y)}} = \frac{AD}{D} \quad (2.5)$$

จากสมการความสัมพันธ์ของการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่หาจากปริมาณรังสีสะสม (AD) และปริมาณรังสีต่อปี (D) นำไปสู่วิธีการวิเคราะห์หาทั้งสองส่วนต่อไป

2.2 การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose, D)

ค่าปริมาณรังสีต่อปี วิเคราะห์ได้จากการรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งนอกจากรังสีคอสมิกที่มาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแลกซีแล้ว ยังมีรังสีจากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) โดยที่ไอโซโทปรังสีเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาวจึงยังปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบัน

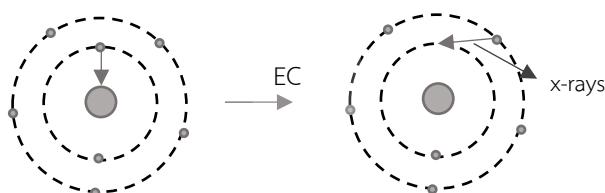
โดยการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ค่าปริมาณรังสีต่อปี ซึ่งเกิดจากการที่ผลึกได้รับรังสีตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive) จากไอโซโทปรังสีในชุดอนุกรม ^{238}U และ ^{232}Th และไอโซโทปกัมมันตรังสีของ ^{40}K รวมไปถึงรังสีคอสมิก ส่งผลให้เกิดการสะสมพลังงานในผลึกซึ่งสามารถตรวจวัดในห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างในพื้นที่ขุดพบ วิเคราะห์โดยใช้ระบบวัดรังสีแกมมา เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในตัวอย่าง

2.2.1 ชนิดของกัมมันตรังสี

การแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) ซึ่งได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีเบต้า และรังสีแกมมา โดยรังสีแกมมาแตกตัวเป็นไอออนได้ดีที่สุด

2.2.2 กระบวนการจับอิเล็กตรอน

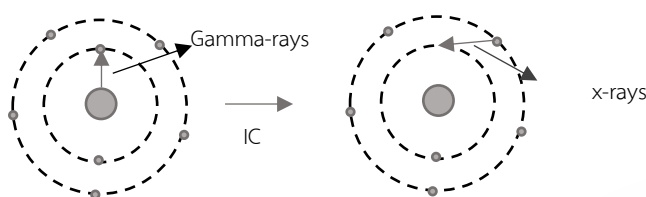
นิวเคลียสที่มีอิเล็กตรอนน้อยเกินไปสามารถที่จะเพิ่มจำนวนนิวตรอนได้ โดยกระบวนการจับอิเล็กตรอน (Electron Capture, EC) กระบวนการนี้อิเล็กตรอนจะถูกจับเข้าไปในนิวเคลียส และอิเล็กตรอนวงนอกจะกระโดดเข้ามาแทนที่ ซึ่งพลังงานส่วนต่างจะถูกปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์เรย์ (X-rays) และเรียกเอ็กซ์เรย์ที่เกิดขึ้นขึ้นนี้ว่า รังสีเอ็กซ์เรย์เฉพาะ (Characteristic X-rays)



ภาพที่ 2.5 แผนภาพแสดงการเกิดกระบวนการจับอิเล็กตรอน (ปรับปรุงจากพงศกร, 2548)

2.2.3 กระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใน (Internal conversion, IC)

นิวเคลียสที่อยู่ในสถานะกระตุ้นเมื่อกลับมาอยู่ในสถานะพื้น จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา ซึ่งรังสีแกมมานี้อาจไปชนกับอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ในวงโคจรของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นวงนอกจะมีโอกาสหลุดง่ายกว่า และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาในกระบวนการนี้ว่า คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน (Conversion Electron)



ภาพที่ 2.6 แผนภาพแสดงการเกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงภายใน (ปรับปรุงจากพงศกร, 2548)

2.2.4 อนุกรมกัมมันตรังสี

เมื่อนิวเคลียสกัมมันตรังสีที่เป็นต้นกำเนิดรังสีการสลายตัวต่อเนื่อง จนได้นิวเคลียสสุดท้ายที่เสถียรการสลายเป็นลำดับนี้เรียกว่า “อนุกรมกัมมันตรังสี” (Radioactivity Series) ดังนี้

2.2.4.1 อนุกรมทอเรียม (Thorium Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เริ่มต้นสำหรับอนุกรมนี้ คือ ^{232}Th มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ ^{208}Pb นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้ ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n$

2.2.4.2 อนุกรมเนปทูเนียม (Neptunium Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้ คือ ^{241}Pu นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้ ได้แก่ นิวเคลียสกัมมันตรังสีที่มีเลขมวลเท่ากับ $4n+1$ แต่เนื่องจาก ^{241}Pu มีครึ่งชีวิต 14.4 ปี และนิวไคลด์ส่วนใหญ่ที่เกิดจากการสลายตัวในอนุกรมนี้ครึ่งชีวิตไม่ยาวนานนัก ปัจจุบันไม่พบอนุกรมนี้

2.2.4.3 อนุกรมยูเรเนียม (Uranium Series) นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมนี้ มีเลขมวลเท่ากับ $4n+2$ นิวไคลด์เริ่มต้นอนุกรมนี้คือ ^{238}U มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ ^{206}Pb

2.2.4.4 อนุกรมแอกทิเนียม (Actinium Series) มีนิวไคลด์กัมมันตรังสีเริ่มต้นในอนุกรมนี้คือ ^{235}U มีการสลายตัวต่อเนื่องจนกระทั่งได้นิวไคลด์เสถียร คือ ^{207}Pb นิวไคลด์กัมมันตรังสีในอนุกรมชุดนี้ มีเลขมวลเท่ากับ $4n+3$ (พงศกร, 2548)

ตารางที่ 2.1 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า แกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุ
กัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม (Ikeya, 1993)

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

ตารางที่ 2.2 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า แกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุ
กัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม (Ikeya, 1993)

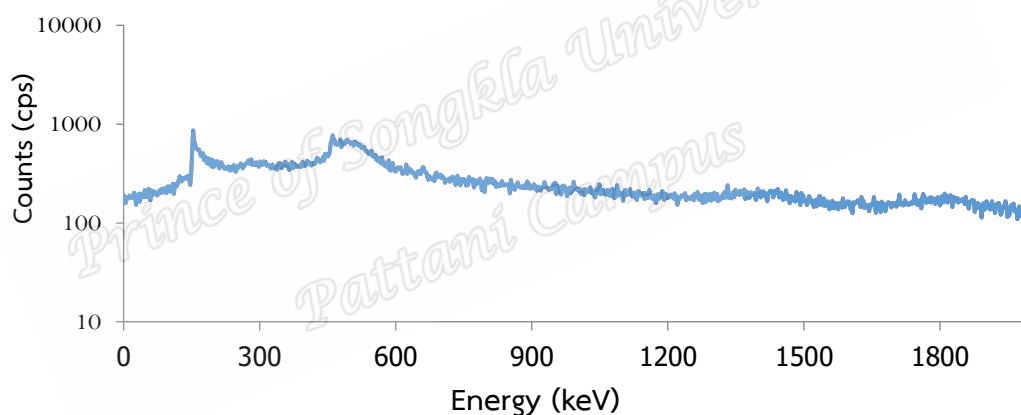
เลขอะตอม (Z)	นิวไคลด์	การ สลายตัว	ครึ่งชีวิต($T_{1/2}$)	พลังงาน (MeV)		
				E_{α}	E_{β}	E_{γ}
90	^{232}Th	α	1.14×10^{10} a	4.010 3.952	0.0104	0.00130
88	^{228}Ra	β	5.75 a		0.0104	
89	^{228}Ac	β	6.31 hr		0.4516	0.92870
90	^{228}Th	α	1.913 a	5.396	0.0184	0.00322
88	^{224}Ra	α	3.66 d	5.674	0.0021	0.00989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

ค่าปริมาณรังสีต่อปีดังกล่าวข้างต้น วิเคราะห์ได้จากการรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งนอกจากรังสีคอสมิกที่มาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแลกซีแล้ว ยังมีรังสีจากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) โดยที่ไอโซโทปรังสีเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาวจึงยังปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบัน

2.2.5 การหาปริมาณ ^{238}U และ ^{232}Th และ ^{40}K ที่ได้มาในธรรมชาติ

โดยการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ค่าปริมาณรังสีต่อปี เกิดจากการที่ผลึกได้รับรังสีตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Radioactive) จากไอโซโทปรังสีในชุดอนุกรม ^{238}U และ ^{232}Th และไอโซโทปกัมมันตรังสีของ ^{40}K รวมไปถึงรังสีคอสมิก ส่งผลให้เกิดการสะสมพลังงานในผลึกซึ่งสามารถตรวจวัดในห้องปฏิบัติการจากตัวอย่างในพื้นที่ชุดค้น วิเคราะห์โดยระบบวัดรังสีแกมมา ผลการวัดจะได้แถบของค่านับวัดพลังงานของรังสี เรียกว่า “สเปกตรัมรังสีแกมมา” รังสีแกมมาแต่ละพลังงานที่วัดได้ เรียกว่า โฟโตพีค (Photopeak) ค่านับวัดบนพื้นที่ของโฟโตพีค มีค่าแปรผันตามกัมมันตภาพรังสี

$$\text{Activity} = \frac{\text{Photo Peak Area}}{\text{Efficiency}} \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.7 สเปกตรัมรังสีแกมมาจากการรับรังสีในสิ่งแวดล้อมของ U, Th และ K ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ผลการวัดที่ได้จากโฟโตพีคที่พลังงานรังสีแกมมาของธาตุแต่ละชนิด นำมาแทนค่าความสัมพันธ์ของโฟโตพีคจากตัวอย่างกับสารมาตรฐานกับปริมาณของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และปริมาณธาตุในสารมาตรฐานดังสมการที่ (2.6)

จากค่าความเข้มข้นรังสีที่ได้จากการวิเคราะห์ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ในตัวอย่างดังภาพที่ 2.7 การคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีที่ตัวผลึกได้รับจากรังสีในสิ่งแวดล้อม คำนวณโดยอาศัยพลังงานการสลายตัวของกัมมันตรังสีตามสมการต่อไปนี้

ค่าปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose, D) ของผลึกตัวอย่างวิเคราะห์หาได้จากพลังงานรังสีที่ได้จากการสลายตัวของธาตุ (E_i) ในหน่วยเมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ อัตราการสลายตัวของธาตุ (λ_i) ในหน่วย a^{-1} และจำนวนอะตอมของธาตุ (N_i) ในหน่วย kg^{-1} ดังนี้

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \left[\frac{\text{MeV}}{\text{kg} \cdot \text{a}} \right] \quad (2.8)$$

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \times 1.60218 \times 10^{-19} \left[\frac{\text{J}}{\text{eV}} \times 10^{-6} \frac{\text{eV}}{\text{kg} \cdot \text{a}} \right] \quad (2.9)$$

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

$$= 1.60218 \times 10^{-10} (\sum \lambda_i N_i E_i) \left[\frac{\text{mGy}}{\text{a}} \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ $\lambda_i N_i$ คือ อัตราการสลายตัวต่อปีสามารถคำนวณได้จากครึ่งชีวิต (half-life, $T_{1/2}$) ได้ดังนี้

$$\lambda_i N_i = \left[\frac{0.69315}{T_{1/2}} \right] N_i \quad (2.11)$$

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

จากสมการที่ (10) กำหนดให้ตัวอย่างธาตุ ^{238}U อยู่ 1 ppm (1 mg/kg) พบว่า

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

$$= 0.062879 \times \sum E_i \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า Annual Dose ของธาตุ ^{238}U อยู่ 1 ppm สำหรับตัวอย่างมีธาตุ ^{232}Th อยู่ 1 ppm (1 mg/kg) พบว่า

$$D = 0.020514 \times \sum E_i \quad (2.13)$$

สมการที่ (2.13) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า Annual Dose ของธาตุ ^{232}Th ที่ 1 ppm ซึ่งสมการที่ (2.12) และ (2.13) จะแสดงอย่างละเอียดในภาคผนวก ก.3 โดย สมการที่ (2.12) เป็นสมการที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า Annual Dose ของธาตุ ^{238}U อยู่ 1 ppm

ในการสลายตัวตามธรรมชาติของอนุกรม ^{238}U และ ^{232}Th จะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา เบต้า และรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ ตามตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ ทั้งนี้การสลายตัวดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีของอนุภาคแอลฟา เบต้า และแกมมา จากพลังงานการสลายตัวของอนุภาคในอัตราส่วน 1 ppm หรือ 1% ของธาตุกัมมันตรังสี แสดงผลดังตารางที่ 2.3 ซึ่งจะอธิบายให้ละเอียดในภาคผนวก ก.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี และปริมาณรังสีต่อปี (Ikeya, 1993)

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

ซึ่งค่าที่แสดงในตารางนำมาแทนค่าเพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีของแอลฟา เบต้า และแกมมา ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$D_{\alpha} = C_{\text{U}}D_{\text{U-}\alpha} + C_{\text{Th}}D_{\text{Th-}\alpha} \quad (2.14)$$

$$D_{\beta} = C_{\text{U}}D_{\text{U-}\beta} + C_{\text{Th}}D_{\text{Th-}\beta} + C_{\text{K}}D_{\text{K-}\beta} \quad (2.15)$$

$$D_{\gamma} = C_{\text{U}}D_{\text{U-}\gamma} + C_{\text{Th}}D_{\text{Th-}\gamma} + C_{\text{K}}D_{\text{K-}\gamma} \quad (2.16)$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

D คือ ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีชนิดต่าง ๆ

หาค่าปริมาณรังสีต่อปีได้จาก

$$D = kD_{\alpha} + D_{\beta} + D_{\gamma} \quad (2.17)$$

โดยค่าคงที่ k สำหรับอนุภาคแอลฟาและอนุภาคเบต้า หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแกมมา (AD_γ) กับปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแอลฟา (AD_α) กับ

$$\text{โดยที่} \quad k = \frac{AD_\gamma}{AD_\alpha} \quad (2.18)$$

เมื่อ k คือ ค่าแก้ที่เกิดจากการฉายรังสี
 AD คือ ปริมาณรังสีสะสม

2.2.6 ปริมาณรังสีต่อปีของการกำหนดหาอายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน

ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน จะได้รับปริมาณรังสีจากธรรมชาติจากธาตุในดิน และจากรังสีที่แผ่ออกมาจากธาตุในซากหอยน้ำจืดเอง จึงถือเป็นปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดหาอายุซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินต่อไป

2.2.6.1 ปริมาณรังสีภายใน (Internal Dose, D_{in})

ปริมาณรังสีภายในได้มาจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในผลึกซากหอยน้ำจืดในรัศมี 3 เซนติเมตรของอนุภาคแอลฟา ในในรัศมี 3 มิลลิเมตรของอนุภาคแอลฟา

$$D_{in} = kD_{in,\alpha} + D_{in,\beta} \quad (2.19)$$

2.2.6.2 ปริมาณรังสีภายนอก (External Dose, D_{ex})

ปริมาณรังสีภายนอกได้มาจากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในผลึกซากหอยน้ำจืดในรัศมี 30 เซนติเมตรของอนุภาคแกมมา ในในรัศมี 3 เซนติเมตรของอนุภาคเบต้า

$$D_{Ex} = D_{ex,\beta} + D_{ex,\gamma} \quad (2.20)$$

ดังนั้น นอกจากปริมาณรังสีต่อปีจะคำนวณได้จากปริมาณรังสีภายในกับปริมาณรังสีภายนอกแล้ว ยังต้องคำนวณโดยรวมปริมาณรังสีคอสมิกที่ได้จากโปรแกรมคำนวณ ซึ่งถูกควบคุมด้วย

ตำแหน่งเส้นละติจูดและลองจิจูดของพื้นที่ที่คำนวณหาปริมาณรังสีนั้นด้วย จึงได้สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีต่อปีของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินได้ดังนี้

$$D = D_{in} + D_{ex} + D_{cos} = kD_{in,\alpha} + D_{in,\beta} + D_{ex,\beta} + D_{ex,\gamma} + D_{cos} \quad (2.21)$$

ทั้งนี้เมื่อได้ส่วนของปริมาณรังสีต่อปีแล้ว ก็สามารถนำไปคำนวณอายุของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินจากความสัมพันธ์ของการกำหนดหาอายุในสมการที่ (2.5) เพื่อให้ได้อายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน

Prince of Songkla University
Pattani Campus

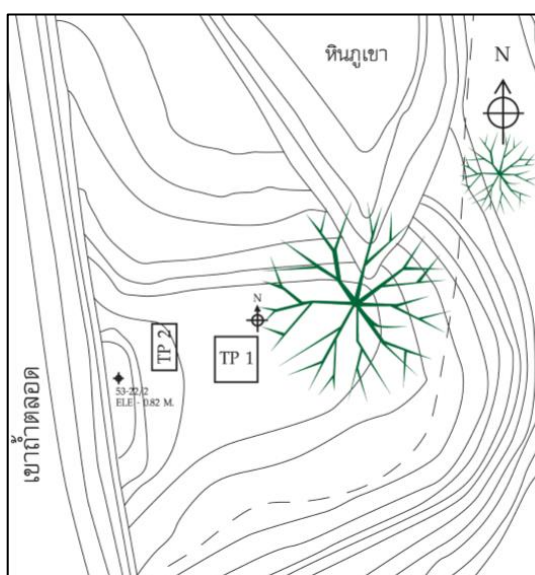
บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัยที่ใช้ในงานวิจัย ที่ใช้สำหรับการเตรียมตัวอย่างงานวิจัย รวมถึงการวิเคราะห์ผลตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน เพื่อหาอายุของแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตา หวดยาย จังหวัดสงขลา นอกจากนี้บทนี้ยังกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนการวัดปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose) ขั้นตอนการคำนวณหาปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual Dose) โดยใช้ปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) จากการวิเคราะห์ผลด้วยหัววัดรังสีแกมมา ซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.1 การเก็บตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์หาอายุ

ทางกรมศิลปากรที่ 13 สงขลา ได้ทำงานขุดค้นพบหลักฐานที่อยู่ในบริเวณแหล่งโบราณคดีในหลายพื้นที่ของจังหวัดสงขลา เมื่อปี ค.ศ. 2010 ได้ทำการเก็บตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดินจากการขุดค้นแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตา หวดยาย จังหวัดสงขลา ขุดค้นตามระดับชั้นดินสมมติ (Arbitrary layer) ดังภาพที่ 3.1a และ 3.1b



(a)



(b)

ภาพที่ 3.1 แผนที่ตำแหน่งหลุมขุดค้นแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา (a) แผนที่หลุมขุดค้น (b) ตำแหน่งหลุมขุดค้น (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2010)



(a)



(b)

ภาพที่ 3.2 สภาพทั่วไปของแหล่งโบราณคดีและทางเข้าสู่แหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา (a) สภาพทั่วไปของแหล่งโบราณคดี (b) ทางเข้าสู่แหล่งโบราณคดี (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2010)



(a)



(b)

ภาพที่ 3.3 แสดงตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และสิ่งแวดล้อมโดยรอบ จากโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย อ.สะบ้าย้อย จ.สงขลา (a) ซากหอยน้ำจืดที่ และ (b) สิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลากรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม, 2010)

ตารางที่ 3.1 การขุดค้นแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ลำดับที่	ชั้นดินสมมติ (Level)	ระดับความลึก (cm)
1	ระดับชั้นผิวดิน	0 - 50
2	ระดับชั้นดินที่ 1	50 - 60
3	ระดับชั้นดินที่ 2	60 - 70
4	ระดับชั้นดินที่ 3	70 - 80
5	ระดับชั้นดินที่ 4	80 - 90
6	ระดับชั้นดินที่ 5	90 - 100
7	ระดับชั้นดินที่ 6	100 - 110
8	ระดับชั้นดินที่ 7	110 - 120
9	ระดับชั้นดินที่ 8	120 - 130
10	ระดับชั้นดินที่ 9	130 - 140
11	ระดับชั้นดินที่ 10	140 - 150
12	ระดับชั้นดินที่ 11	150 - 160
13	ระดับชั้นดินที่ 12	160 - 170
14	ระดับชั้นดินที่ 13	170 - 180
15	ระดับชั้นดินที่ 14	180 - 190
16	ระดับชั้นดินที่ 15	190 - 200
17	ระดับชั้นดินที่ 16	200 - 210
18	ระดับชั้นดินที่ 17	210 - 220
19	ระดับชั้นดินที่ 18	220 - 230
20	ระดับชั้นดินที่ 19	230 - 240
21	ระดับชั้นดินที่ 20	240 - 250
22	ระดับชั้นดินที่ 21	250 - 260
23	ระดับชั้นดินที่ 22	260 - 270
24	ระดับชั้นดินที่ 23	270 - 280

ลำดับที่	ชั้นดินสมมติ (Level)	ระดับความลึก (cm)
25	ระดับชั้นดินที่ 24	280 – 290
26	ระดับชั้นดินที่ 25	290 – 300
27	ระดับชั้นดินที่ 26	300 – 310
28	ระดับชั้นดินที่ 27	310 – 320
29	ระดับชั้นดินที่ 28	320 – 330
30	ระดับชั้นดินที่ 29	330 – 380

งานวิจัยนี้เลือกเฉพาะตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (Freshwater Shells) พร้อมสิ่งที่อยู่รอบซากหอยน้ำจืด (Surroundings of Freshwater Shells) ซึ่งแทนสัญลักษณ์ด้วย SH และ SD ตามลำดับ และตะกอนดิน (Sediment) ซึ่งแทนสัญลักษณ์ด้วย S โดยทำการเลือกตัวอย่างที่ระดับความลึกต่างกัน 3 ระดับ ประกอบด้วยที่ระดับความลึก 50 – 60 cm (Level 1), 80 – 90 cm (Level 4), 90 – 100 cm (Level 5) ประกอบด้วยตัวอย่าง SH1, SH2, SH3 และ S1, S2 และ S3 เพื่อใช้ในการกำหนดหาอายุ ประกอบด้วยตัวอย่าง ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างที่นำมากำหนดหาอายุโดยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ลำดับที่	ระดับความลึก (cm)	ชั้นดินสมมติ	รหัสชุดค้น	รหัสสแล็บ
1	50 - 60	Level 1	No.038 - TY'2010 - TP1 Freshwater Shell	SH1
2	80 - 90	Level 4	No.082 - TY'2010 - TP1 Freshwater Shell	SH2
3	90 - 100	Level 5	No.006 - TY'2010 - TP1 Freshwater Shell	SH3
4	50 - 60	Level 1	No.364 - TY'2010 - TP1 ตัวอย่างดินใน Profile	S1
5	80 - 90	Level 4	No.370 - TY'2010 - TP1 ตัวอย่างดินใน Profile	S2
7	90 - 100	Level 5	No.368 - TY'2010 - TP1 ตัวอย่างดินใน Profile	S3

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)

3.2.1 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)

3.2.1.2 กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric Acid, HF)

3.2.1.3 กรดน้ำส้ม (Acetic Acid)

3.2.1.4 อะซิโตน (Acetone)

3.2.1.5 เตตระโบรมออีเทน (Tetrabromoethane)

3.2.1.6 ไดโพรพิลีนไกลคอล (Dipropylene Glycol)

3.2.1.7 ของเหลวความหนาแน่นสูง (Heavy Liquid)

3.2.1.8 ซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน (Freshwater Shell and Sediment)

3.2.1.9 เครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ รุ่น Harshow-3500 (Thermoluminescence Reader Model 3500)

3.2.1.10 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60

3.2.1.11 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ความละเอียด 1×10^4 g (Digital Scale 1×10^4 g)

3.2.1.12 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

3.2.1.13 เครื่องล้างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner)

3.2.1.14 ครกบดสาร (Mortar)

3.2.1.15 หลอดหยด (Dropper)

3.2.1.16 ปีกเกอร์ (Beaker)

3.2.1.17 ตะแกรงร่อนขนาด 90 และ 150 μm (Sieve size 90 and 150 μm)

3.2.1.18 น้ำกลั่น (Distilled Water)

3.2.1.19 กระดาษกรอง (Filter Paper)

3.2.2 การเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบของซากหอยน้ำจืด

3.2.2.1 เริ่มนำตัวอย่างซากหอยน้ำจืดทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ที่ความถี่สูงกว่า 20,000 Hz

3.2.2.2 แช่ตัวอย่างในกรด HCl ที่มีความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำสะอาดประมาณ 3 - 4 ครั้งหรือล้างจนน้ำใส ตามด้วยน้ำกลั่นและรอนจนกระทั่งตัวอย่างแห้ง

3.2.2.3 นำตัวอย่างมาบดและร่อนให้ได้ขนาด 90 – 150 μm ผ่านตะแกรงร่อน

3.2.2.4 นำตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ผ่านตะแกรงร่อน มาแช่ด้วยกรดอะซิติก (Acetic Acid) ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 3 นาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่น ซึ่งทุกขั้นตอนที่กล่าวมานั้น จะทำการทดลองในห้องมืด (ภายใต้แสงสีแดง)

3.2.2.5 นำตัวอย่างเก็บไว้จนแห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกน้ำหนัก 20 mg และนำไปอาบรังสีด้วยรังสีแกมมาจากต้นกำเนิด Co-60 แบบ Additive Dose เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อรังสีด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ นำไปสู่การหาปริมาณรังสีสะสมต่อไป

3.2.3 การเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบตะกอนดิน

3.2.3.1 นำตะกอนดินล้างทำความสะอาดในห้องมืด ส่วนที่สองล้างทำความสะอาดในที่รับแสงปกติเพื่อตรวจวัดปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose)

3.2.3.2 ล้างตะกอนดิน ภายใต้แสงสีแดงด้วยน้ำจนสะอาดเห็นน้ำใส จึงนำตัวอย่างมากัดกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ประมาณ 40 นาที เพื่อลบล้างคาร์บอเนตและสารอินทรีย์ เทกรดออกแล้วล้างตัวอย่างด้วยน้ำ

3.2.3.3 ล้างผลึกเพื่อขจัดสิ่งเจือปน และขจัดผิวเม็ดทรายด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ 40 นาที ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ประมาณ 40 นาที เพื่อละลายฟลูออไรด์ที่อาจเหลืออยู่ ล้างน้ำและน้ำกลั่น

3.2.3.4 นำตัวอย่างผึ่งให้แห้ง นำมาคัดแยกควอทซ์ด้วยของเหลวความหนาแน่นสูงเตรียมจากเตตระโบรโมอีเทน และไดโพรพีลีนไกลคอล ล้างด้วยน้ำและน้ำกลั่นอะซิโตนทิ้งไว้จนแห้ง บรรจุใส่ถุงพลาสติกน้ำหนัก 20 mg และอาบรังสีแกมมาจากต้นกำเนิด Co-60 เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

3.2.4 การฉายรังสีแกมมาผลึกซากหอยน้ำจืด

บรรจุตัวอย่างซากหอยน้ำจืด ใส่ถุงพลาสติกให้ได้น้ำหนัก 20 mg ปิดปากถุงให้เรียบร้อย ใส่ในกล่องฟิล์ม ป้องกันการได้รับผลกระทบจากแสงแดด จัดส่งตัวอย่างเพื่อทำการฉายรังสีแกมมา จากต้นกำเนิด Co-60 แบบ Additive Dose ทั้งนี้ตัวอย่างประกอบด้วยตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสีเพิ่ม (0 Gy) และตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีเพิ่มเติมจากรังสีที่ได้รับในธรรมชาติ ที่ระดับการโดสรังสี 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 Gy เพื่อใช้ในการศึกษาผลการตอบสนองต่อรังสีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ แล้วนำไปใช้ในการหาปริมาณรังสีสะสมต่อไป

3.2.5 การวัดความเข้มแสง (TL Intensity) ในซากหอยน้ำจืด

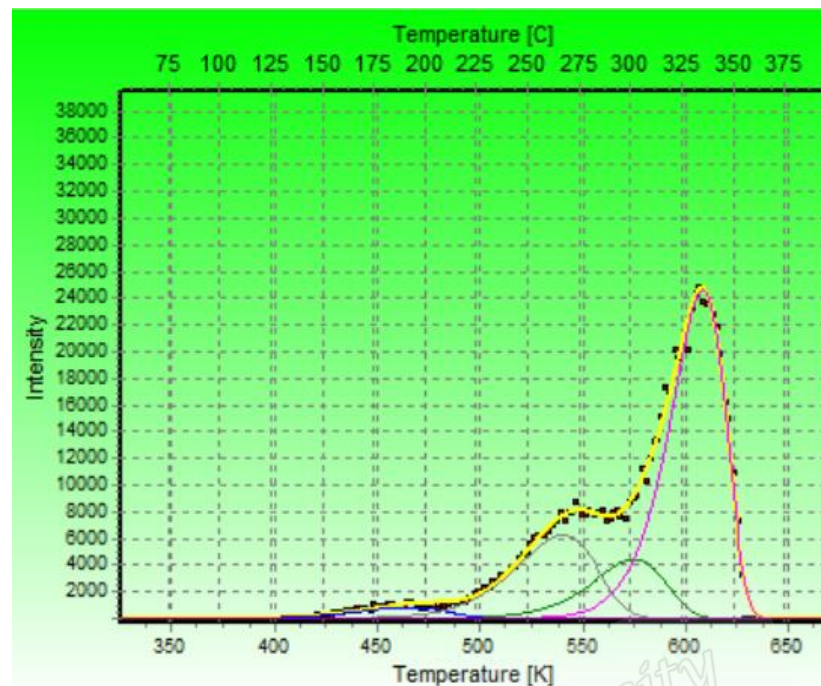
ในขั้นตอนนี้ทำการทดสอบผลึกตัวอย่างของซากหอยน้ำจืดที่ได้รับโดสรังสีในธรรมชาติ (0 Gy) แล้วนำตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีเพิ่มเติมจากรังสีที่ได้รับในธรรมชาติ ที่ระดับการโดสรังสี 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 Gy วิเคราะห์ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ภายใต้แก๊สไนโตรเจน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 850 โวลต์ โดยตัวอย่างซากหอยน้ำจืด จะทำการทดสอบที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 5 °C/s โดยตั้งให้อุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างหอยที่ 400 °C บันทึกผลการทดสอบการวัดสัญญาณ TL

3.2.6 ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD)

3.2.6.1 นำตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินที่ผ่านการอาบรังสี (Additive Dose) ไปทดสอบ ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

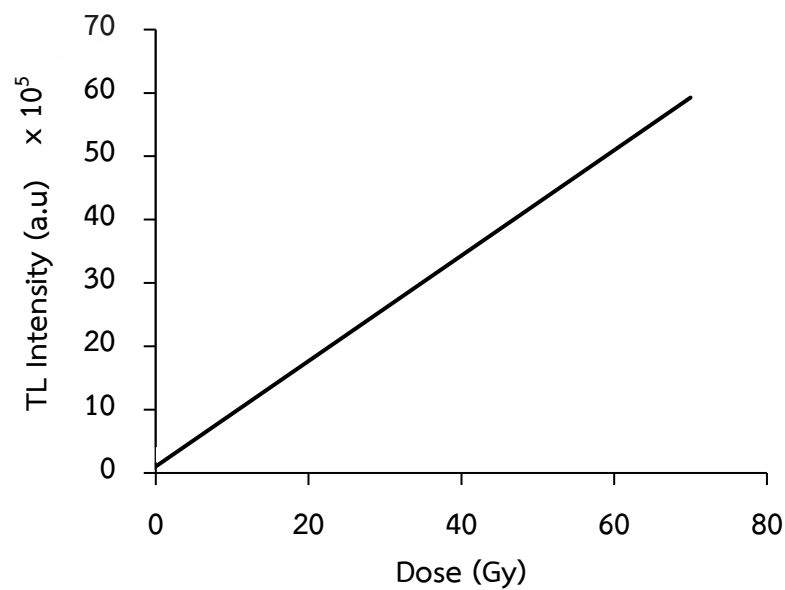
3.2.6.2 แล้วนำผลการทดสอบที่ได้ เข้าเครื่องอ่านค่าด้วยโปรแกรมโกลว์ฟิต ซึ่งจะแสดงออกมาเป็นกราฟโกลว์เคิร์ฟ แสดงออกมาเป็นสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิตอบสนอง

3.2.6.3 จากนั้นวิเคราะห์เลือกพีคที่ตอบสนองที่อุณหภูมิ 325 °C และ 350 °C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ตอบสนองที่มีเสถียรภาพที่สุด เพื่อใช้ในการกำหนดหาอายุต่อไป



ภาพที่ 3.4 ภาพแสดงสเปกตรัมที่ปรากฏส่วนของการตอบสนองผลของโกล์วฟิต

3.2.6.4 นำค่า TL Intensity ของแต่ละอุณหภูมิที่ได้ เขียนกราฟเปรียบเทียบมาตรฐาน ด้วยวิธี Linear Extrapolation ภาพที่ 3.4 โดยให้แกน x คือค่า TL Intensity (a.u.) และแกน y คือ ระดับการโดสรังสีที่ระดับต่าง ๆ (Gy)



ภาพที่ 3.5 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐานด้วยวิธีทาง Linear Extrapolation

3.2.6.5 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity (au.) และระดับการโดสรังสีจะ ได้สมการเส้นตรงแสดงดัง สมการที่ 3.1 ซึ่งจุดตัดแกน y คือค่าปริมาณรังสีสะสม (AD) นำค่าที่ได้ไป คำนวณหาอายุต่อไป

$$y = y_0 + ax \quad (3.1)$$

3.3 การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual Dose) โดยหัววัดรังสีแกมมา

3.3.1 สารเคมี วัสดุและอุปกรณ์

3.3.1.1 ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (Freshwater shell) พร้อมสิ่งที่อยู่รอบซากหอยน้ำจืด (Surroundings of freshwater) และตะกอนดิน (Sediment)

3.3.1.2 สารรังสีมาตรฐาน (ซีเซียม-137 และโคบอลต์-60)

3.3.1.3 กระจุกสำหรับบรรจุสารตัวอย่าง

3.3.1.4 เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับวัด และวิเคราะห์ผล

3.3.1.5 เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีแกมมา (Gamma Ray Spectrometer)

3.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.2.1 นำตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สิ่งแวดล้อมรอบตัวหอย และตะกอนดิน มาบดให้ได้ ขนาดตัวอย่างที่ขนาดเดียวกัน ผ่านการร่อนให้ได้ขนาด 90 – 150 μm

3.3.2.2 บรรจุตัวอย่างในกระจุก ในแต่ละกระจุกให้ได้ตัวอย่างมวลเท่ากับ 125 g ปิดผนึก ตัวอย่างให้สนิท มิดชิด จากนั้นทำการพันด้วยสก็อตเทปดำที่ฝาอีกครั้งหนึ่ง

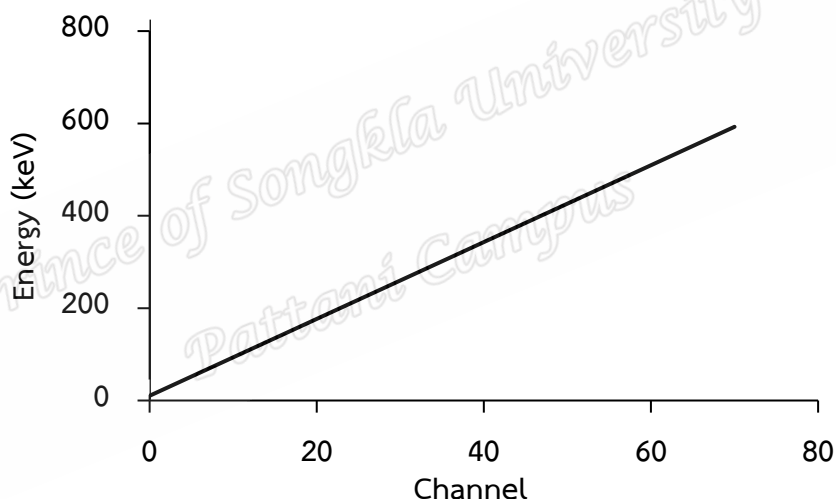
3.3.2.3 เก็บกระจุกตัวอย่างไว้เป็นระยะเวลา 1 เดือน ก่อนทำการวัดปริมาณรังสีใน ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สิ่งแวดล้อมรอบตัวหอย และตะกอนดินที่สนใจ ได้แก่ ยูเรเนียม ทอเรียม และ โปแทสเซียม

3.3.2.4 โดยทำการวัดค่ากัมมันตภาพรังสีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สิ่งแวดล้อม รอบตัวหอย และตะกอนดิน โดยหัววัดรังสีแกมมา ซึ่งกำหนดให้ทำการวัดแต่ละตัวอย่างเป็นเวลานาน 10 ชั่วโมง จำนวน 3 ซ้ำทุกตัวอย่าง

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่าง

3.3.3.1 ในส่วนของการปรับเทียบพลังงานของหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI ซึ่งก่อนทำการตรวจวัดทุกครั้ง จะต้องทำการปรับเทียบพลังงานของหัววัด โดยการวัดจากแหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐาน 2 ชนิด คือ ซีเซียม-137 ที่พลังงาน 661.6 keV โคบอลต์-60 ที่ระดับพลังงาน 1172.3 กับ 1332.5 keV เพื่อให้หมายเลขช่องของเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer) ของแต่ละยอดฟิคไอโซโทปสัมพันธ์กับค่าพลังงานของแต่ละไอโซโทปมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น

3.3.3.2 จากนั้นสเปกตรัมรังสีแกมมาในแต่ละไอโซโทปจะถูกโดยหัววัดรังสีแกมมา หัววัดจะส่งเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง และทำการวิเคราะห์สัญญาณโดยโปรแกรมสำเร็จรูป Genie 2000



ภาพที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขช่อง กับพลังงานของรังสีด้วยระบบวัดรังสีแกมมา

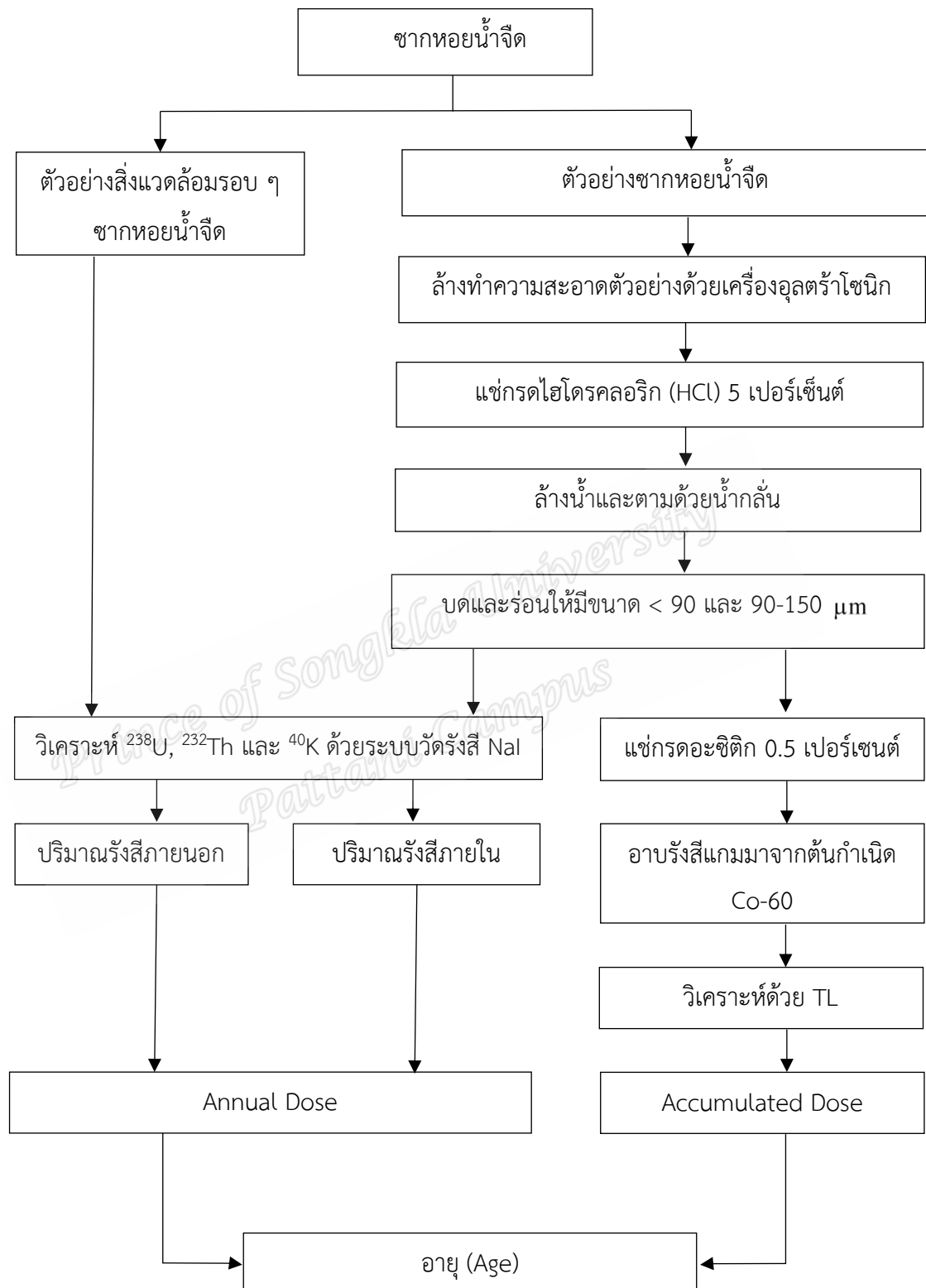
3.3.3.3 วัดรังสีแกมมาโดยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI ผลการวัดที่ได้เป็นค่านับวัดพลังงานของรังสีแสดงผลออกมาเป็นสเปกตรัม

3.3.3.3 นำสเปกตรัมของตัวอย่างที่ได้ ไปหาพื้นที่ใต้ฟิคที่พลังงาน 1764.5, 510, 1460 keV และ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมจากความแรงของรังสีแกมมาที่สลายของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{214}Bi , ^{208}Tl และ ^{40}K ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปีของแอลฟา เบต้า และแกมมา ได้จากสมการ (2.14), (2.15) และ (2.16)

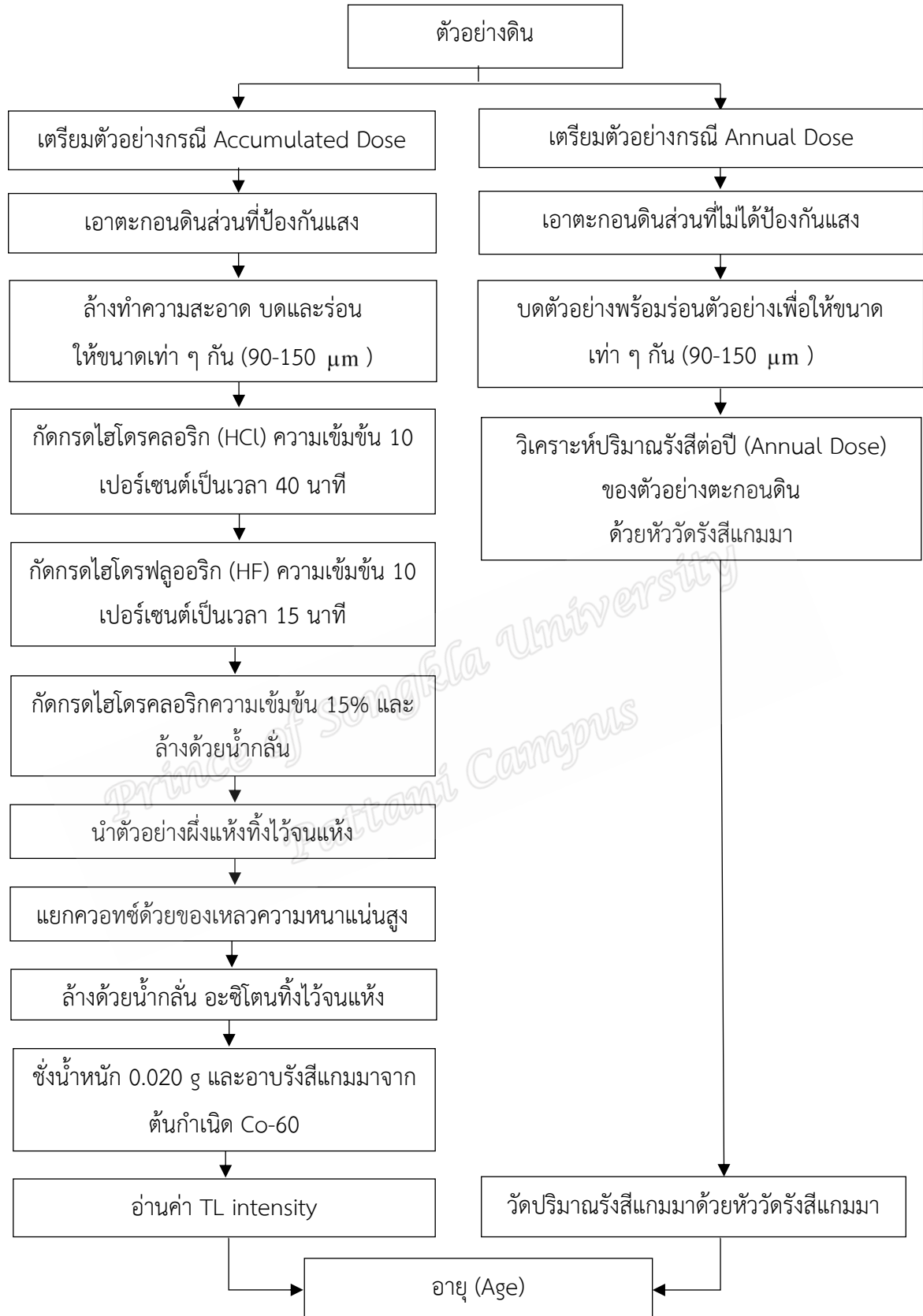
3.3.3.4 นำปริมาณความเข้มข้นยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) ในหน่วย ppm และ โพแทสเซียม (^{40}K) ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน นำมาคำนวณค่า Internal Annual Dose และ External Annual Dose ตามลำดับ แทนค่าดังกล่าวเพื่อหาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose) ของซากหอยน้ำจืดตามสมการที่ (2.21) โดยใช้ค่าคงที่ k เท่ากับ 0.05 ตามงานวิจัยของ Schellman *et al.* (2008)

3.3.4.4 กระบวนการเตรียมตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน ไปจนกระทั่งการ กำหนดหาอายุดังภาพที่ 3.7 และ 3.8

Prince of Songkla University
Pattani Campus



ภาพที่ 3.7 กระบวนการเตรียมตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเพื่อวิเคราะห์อายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์



ภาพที่ 3.8 แผนผังกระบวนการเตรียมตัวอย่างตะกอนดินเพื่อวิเคราะห์เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

จากกระบวนการเตรียมตัวอย่างข้างต้น นำไปสู่การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD) กับปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual Dose, D) ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ปริมาณทั้งสองนี้ เพื่อนำไปสู่การกำหนดหาอายุต่อไป

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 4

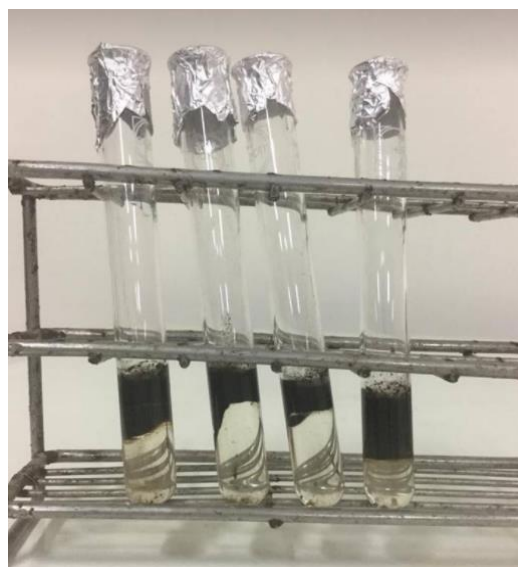
ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการตอบสนองต่อรังสีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาอายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน แหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมผลึกตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน

4.1.1 ตัวอย่างตะกอนดิน

จากการการเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบตะกอนดินจากบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา เพื่อนำมาสกัดแยกผลึกให้ได้ผลึกควอทซ์ พบว่าตัวอย่างตะกอนดิน S1, S2 และ S3 ไม่ปรากฏผลึกควอทซ์ในตัวอย่างตะกอนดินดังภาพ 4.1 จึงไม่มีผลึกที่จะให้ในการทดสอบการตอบสนองต่อรังสีของผลึกควอทซ์ ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์



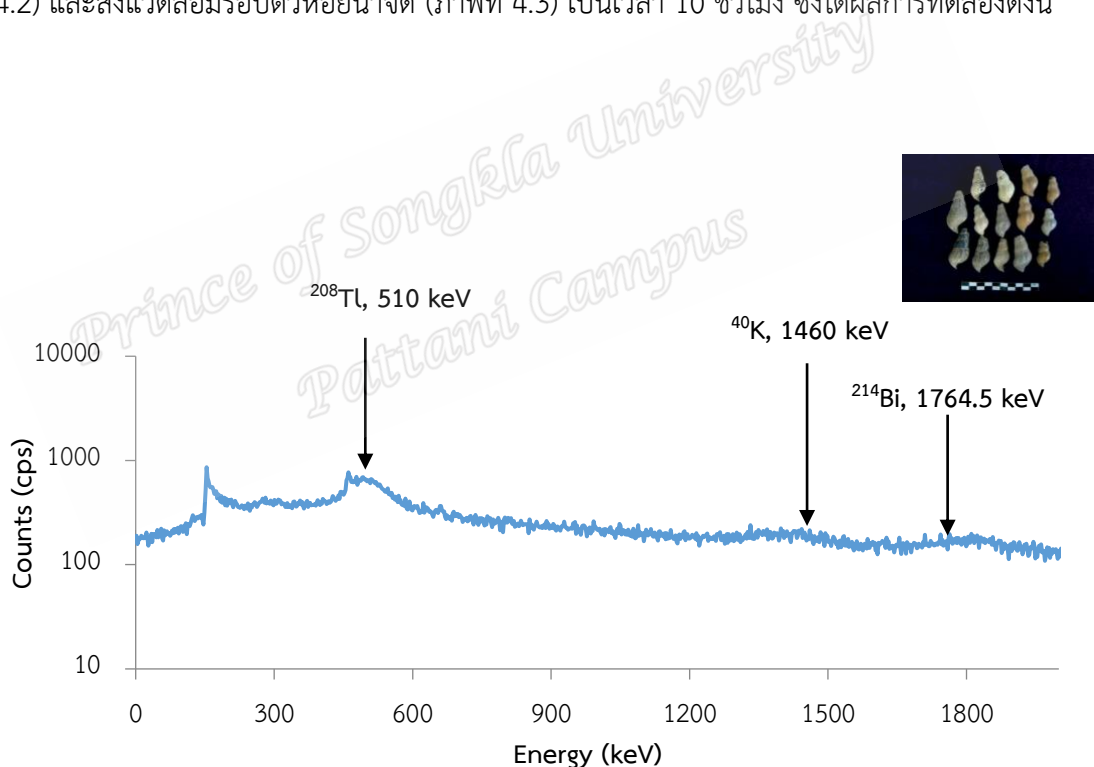
ภาพที่ 4.1 ผลการสกัดแยกควอทซ์ในตัวอย่างตะกอนดิน

4.1.2 ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

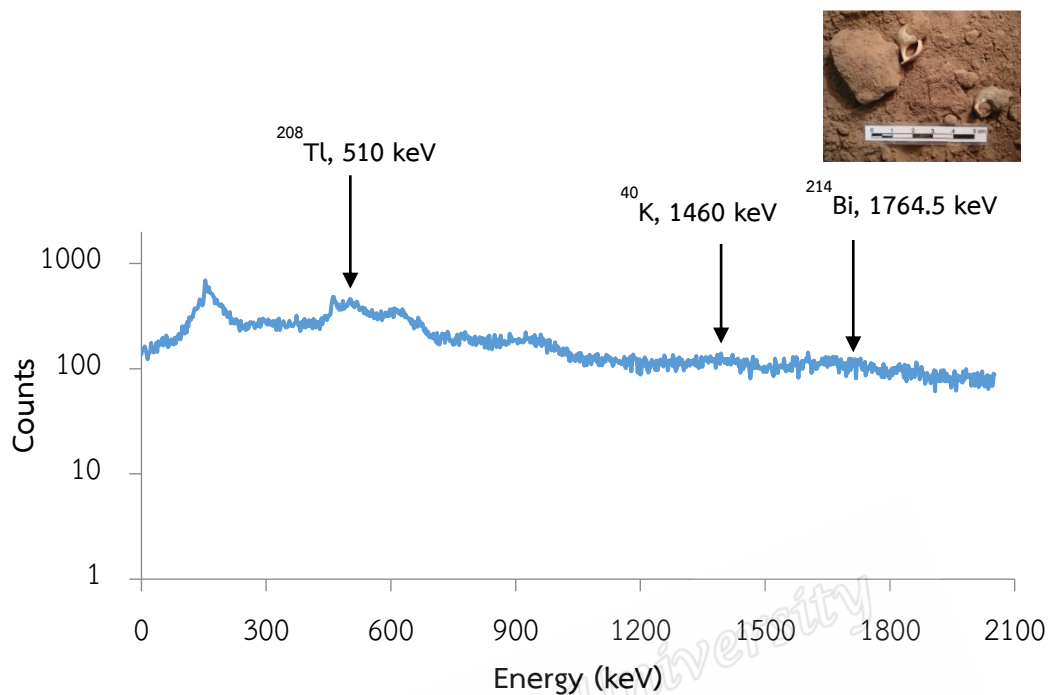
จากการเตรียมผลึกที่เป็นองค์ประกอบของซากหอยน้ำจืด พบว่าโครงสร้างผลึกของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1, SH2 และ SH3 เป็นทั้งผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.1

4.2 ผลการวัดปริมาณรังสียูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในตัวอย่าง

จากการนำตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด บดจนละเอียดจนตัวอย่างมีขนาดเท่ากัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) โดยใช้การตรวจวัดจากหัววัดรังสีแกมมาของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (ภาพที่ 4.2) และสิ่งแวดล้อมรอบตัวหอยน้ำจืด (ภาพที่ 4.3) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาของซากหอยน้ำจืด ธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K)



ภาพที่ 4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของสิ่งแวดล้อมรอบหอยน้ำจืด ชาติยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K)

4.3 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีจากการวิเคราะห์โดยหัววัดรังสีแกมมา

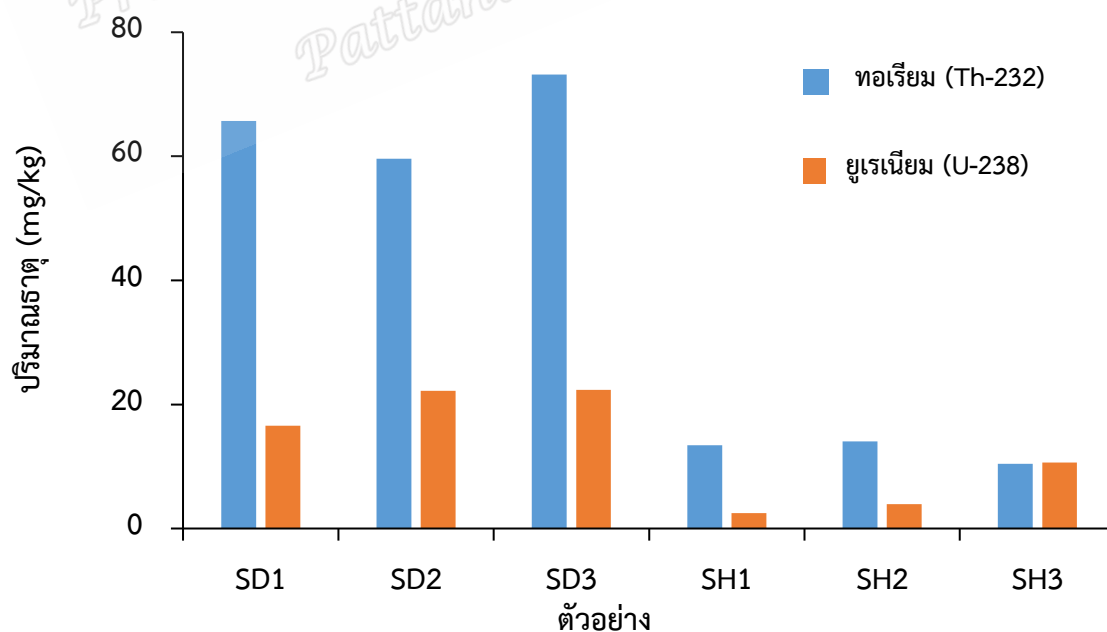
นำสเปกตรัมของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด สิ่งแวดล้อมรอบหอยน้ำจืด ดังภาพที่ 4.2 – 4.3 มาวิเคราะห์ความแรงของรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{214}Bi , ^{208}Tl และ ^{40}K ที่พลังงาน 1764.5, 510 และ 1460 keV ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) โดยใช้หลักการเปรียบเทียบจำนวนนับรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐาน ซึ่งทราบปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจแน่นอน พบว่าได้ผลการวิจัยออกมาตามตาราง 4.1 – 4.2

ตารางที่ 4.1 ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในซากหอยน้ำจืด

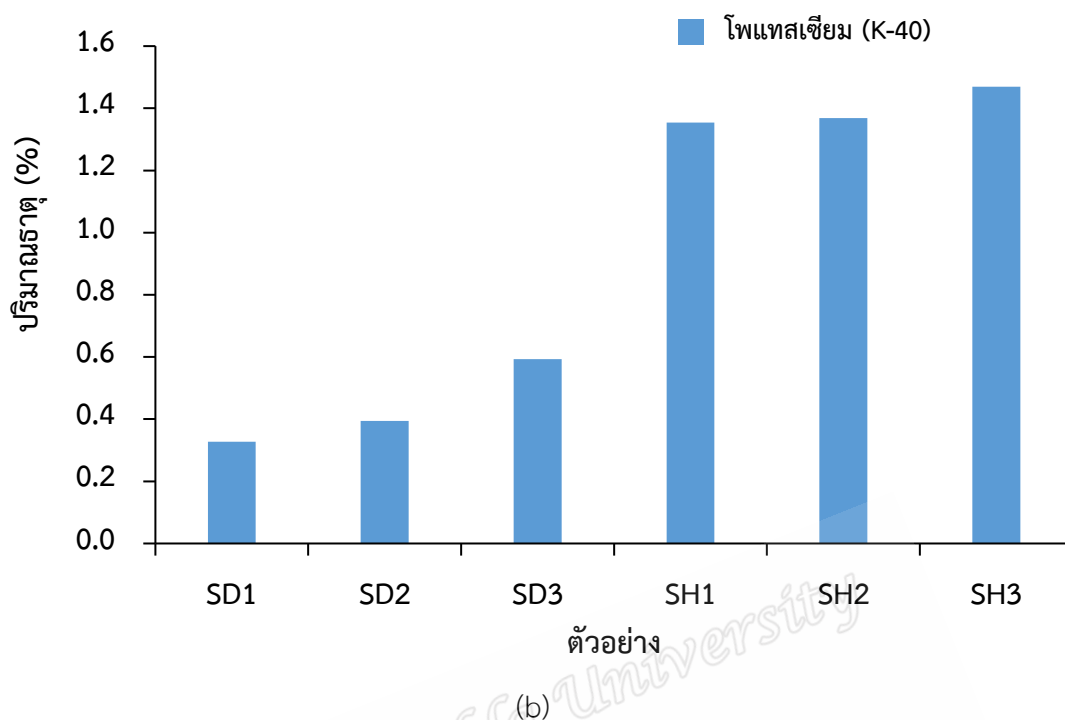
ตัวอย่าง (ความลึก, cm)	^{238}U (ppm)	^{232}Th (ppm)	^{40}K (%)
SH1 (50 - 60)	2.51 ± 0.14	13.44 ± 0.00	1.53 ± 0.03
SH2 (80 - 90)	3.93 ± 0.13	14.06 ± 0.12	1.37 ± 0.10
SH3 (90 - 100)	10.61 ± 3.71	10.43 ± 0.09	1.47 ± 0.22

ตารางที่ 4.2 ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด

ตัวอย่าง (ความลึก, cm)	^{238}U (ppm)	^{232}Th (ppm)	^{40}K (%)
SD1 (50 - 60)	16.55 ± 4.58	65.70 ± 0.08	0.33 ± 0.08
SD2 (80 - 90)	22.20 ± 6.50	59.61 ± 0.96	0.39 ± 0.07
SD3 (90 - 100)	22.37 ± 2.65	73.20 ± 3.04	0.59 ± 0.02



(a)



ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง (a) ปริมาณยูเรเนียมและทอเรียม (b) โพแทสเซียมกับตัวอย่าง

4.4 ผลการคำนวณปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose หรือ Does Rate, D)

4.4.1 ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ผลการวิจัยที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในการตรวจวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด นำไปคำนวณค่า Internal Dose Rate (D_{in}) และตัวอย่างสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืดนำไปคำนวณค่า External Dose Rate (D_{ex}) นำไปสู่การคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose, D) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3 – 4.5

ตารางที่ 4.3 ค่า Internal Dose Rate ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ตัวอย่าง (ความลึก cm)	D_{α} (mGy/a)	D_{β} (mGy/a)	D_{in} (mGy/a)
SH1 (50 - 60)	16.65	0.74	0.016
SH2 (80 - 90)	20.95	0.96	0.010
SH3 (90 - 100)	36.26	1.84	0.018

ตารางที่ 4.4 ค่า External Dose Rate ในสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด

ตัวอย่าง (ความลึก cm)	D_{β} (mGy/a)	D_{γ} (mGy/a)	D_{ex} (mGy/a)
SD1 (50 - 60)	4.23	5.15	0.257
SD2 (80 - 90)	4.89	5.53	0.267
SD3 (90 - 100)	5.29	6.25	0.278

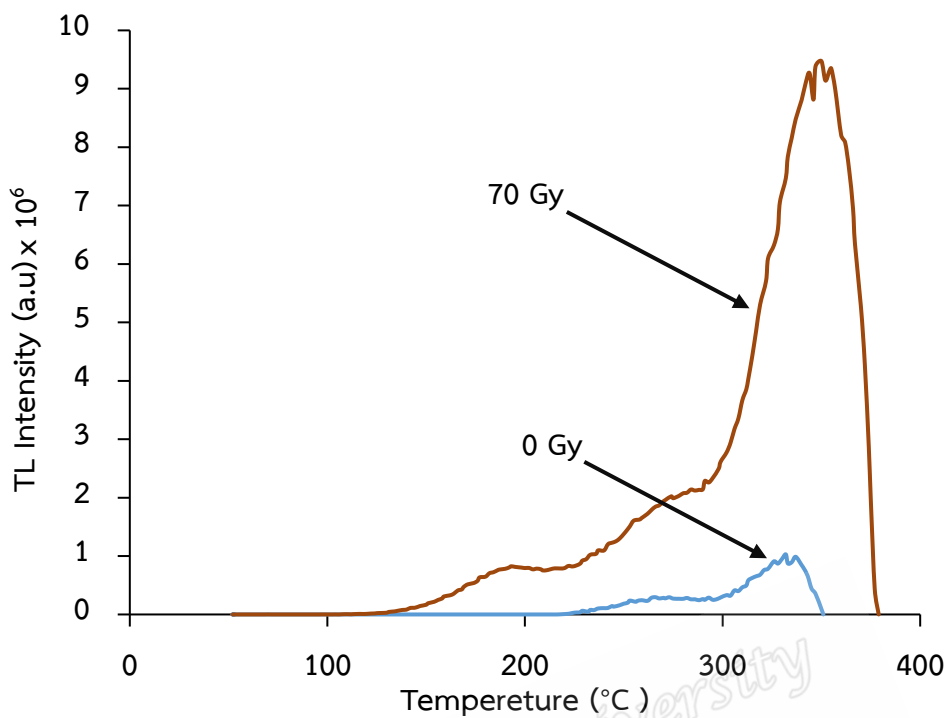
ตารางที่ 4.5 ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

ตัวอย่าง (ความลึก cm)	D_{in} (mGy/a)	D_{ex} (mGy/a)	D (mGy/a)
SH1 (50 - 60)	0.016	0.257	0.272
SH2 (80 - 90)	0.010	0.267	0.277
SH3 (90 - 100)	0.018	0.278	0.297

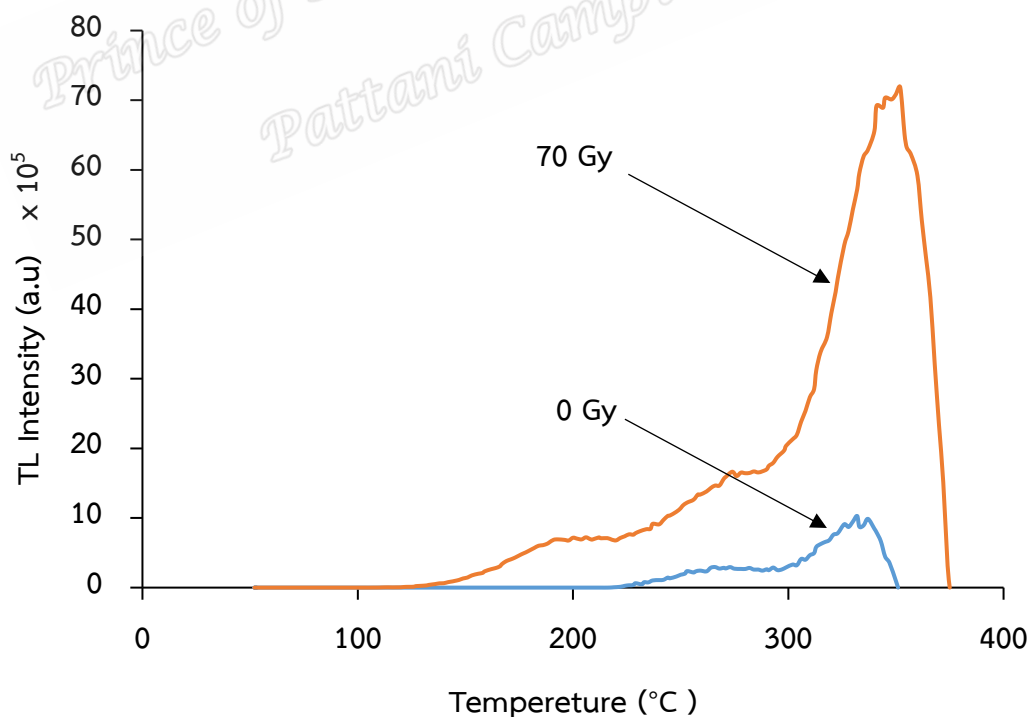
4.5 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของตัวอย่างที่ขนาดต่างกัน

4.5.1 ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกของซากหอยน้ำจืด โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคชั่น พบว่าโครงสร้างผลึกของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเป็นทั้งผลึกออร์ทอโรอิมบิก-แคลไซต์ อธิบายอย่างละเอียดในภาคผนวก ก.1 สำหรับผลึกออร์ทอโรอิมบิก (Orthorhombic) ส่วนแคลไซต์มีรูปแบบผลึกเป็นแบบ รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) (ไซนับ, 2557) ผลการตอบสนองต่อรังสีของผลึกซากหอยน้ำจืดชนิดเดียวกัน ที่ขนาดต่างกัน ซึ่งแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL Intensity) กับอุณหภูมิ (Temperature) ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อรังสีตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ขนาด 0 – 90 μm ที่ปริมาณรังสี 0 Gy และ 70 Gy



ภาพที่ 4.6 เปรียบเทียบการตอบสนองต่อรังสีตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ขนาด 90 - 150 μm ที่ปริมาณรังสี 0 Gy และ 70 Gy

จากผลการทดลองภาพที่ 4.5 – 4.6 พบว่า ผลการตอบสนองต่อรังสีของผลึกซากหอยน้ำจืดชนิดเดียวกัน ที่ขนาดต่างกัน ที่ขนาด 0 – 90 μm และ 90 - 150 μm น ซึ่งแสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL Intensity) กับอุณหภูมิ (Temperature) ได้ผลการทดลองดังนี้การตอบสนองต่อรังสีตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ตอบสนองต่อรังสีได้ดีช่วงอุณหภูมิเดียวกันที่ 150°C - 350 °C สอดคล้องกับอุณหภูมิการตอบสนองในช่วง 200 - 400 °C ของผลึกของเปลือกหอยในงานวิจัยของ Ziegelmann *et al.* (1999) และ Ijaz *et al.* (2008)

จากผลการตอบสนองที่ระดับความลึกต่างกันสามารถสรุปผลอุณหภูมิการตอบสนองได้ดังตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่ามีตำแหน่งการตอบสนองที่อุณหภูมิที่ดีต่างกันและยังพบอีกว่าสัญญาณ TL Intensity ของการตอบสนองที่วัดด้วยสียงที่วัดด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างหอยน้ำจืดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการรับรังสีจากสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานานก็จะส่งผลให้ปริมาณของอิเล็กตรอนสะสมเป็นจำนวนมากขึ้นตามระยะเวลา ส่งผลให้ความเข้มแสงของการตอบสนองที่วัดได้ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะมากขึ้นด้วย

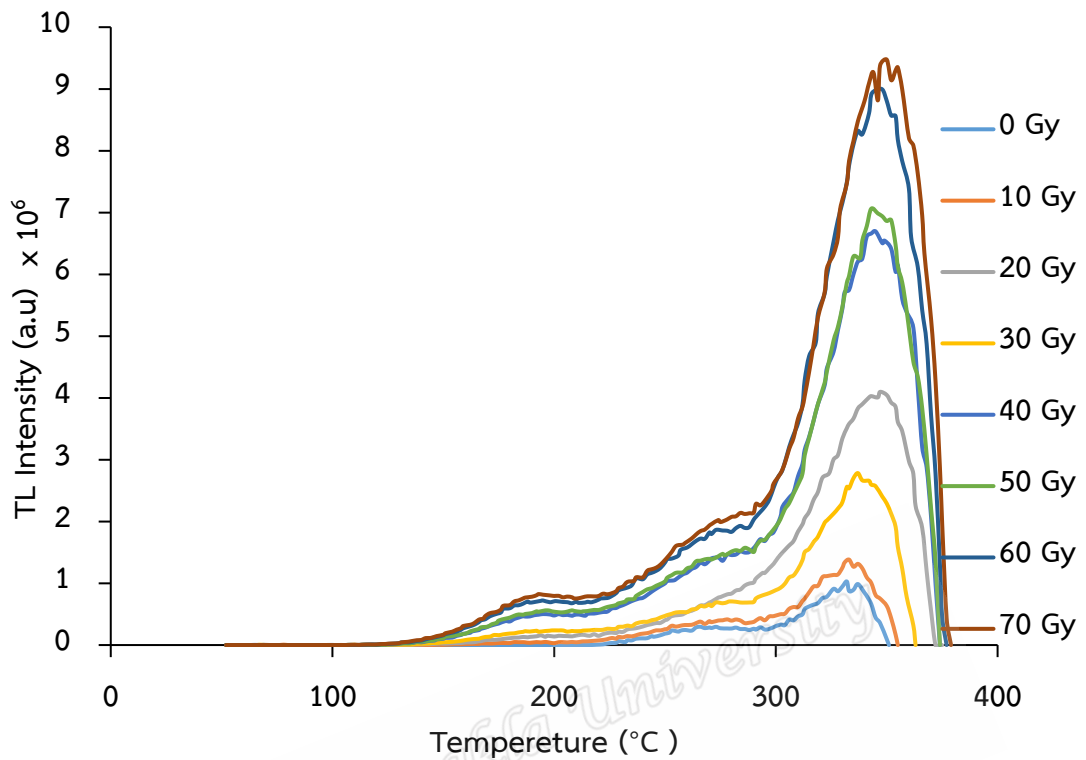
ตารางที่ 4.6 ผลการตอบสนองต่อรังสีของซากหอยน้ำจืดชนิดเดียว ที่ขนาดต่างกัน

ขนาดของซากหอยน้ำจืด (μm)	ช่วงอุณหภูมิตอบสนอง (°C)
0 - 90	150 - 350 °C
90 - 150	150 - 350 °C

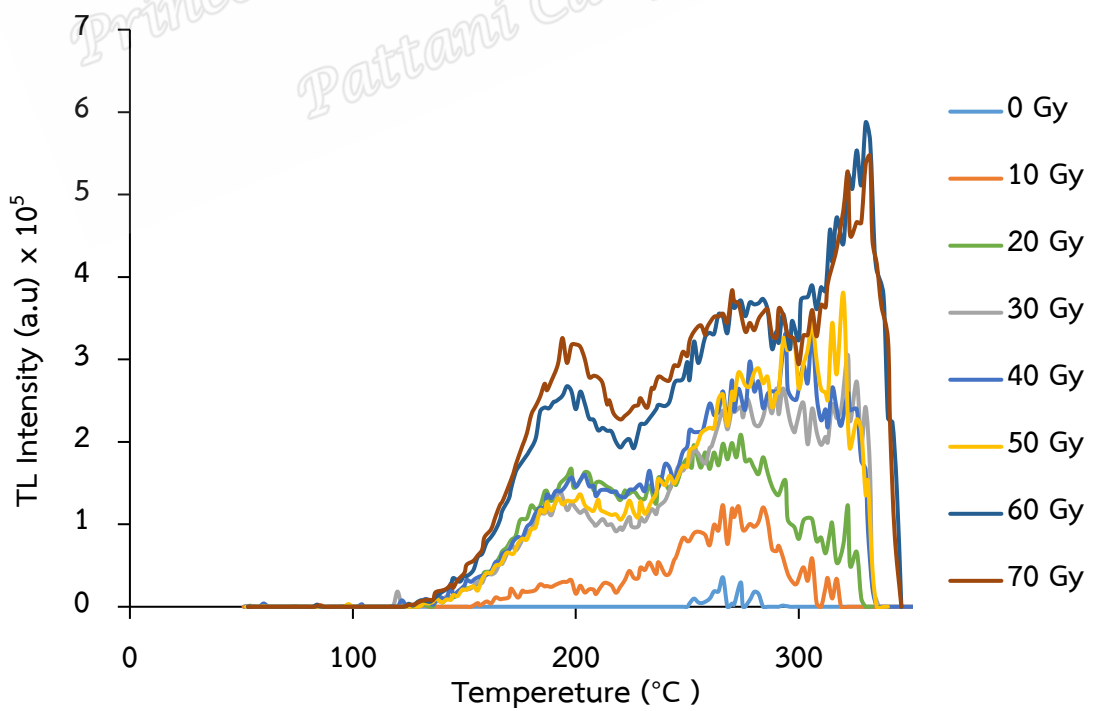
4.6 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของสัญญาณ TL Intensity ในตัวอย่างชนิดเดียวกัน

4.6.1 การตอบสนองของสัญญาณ TL Intensity ของซากหอยน้ำจืด

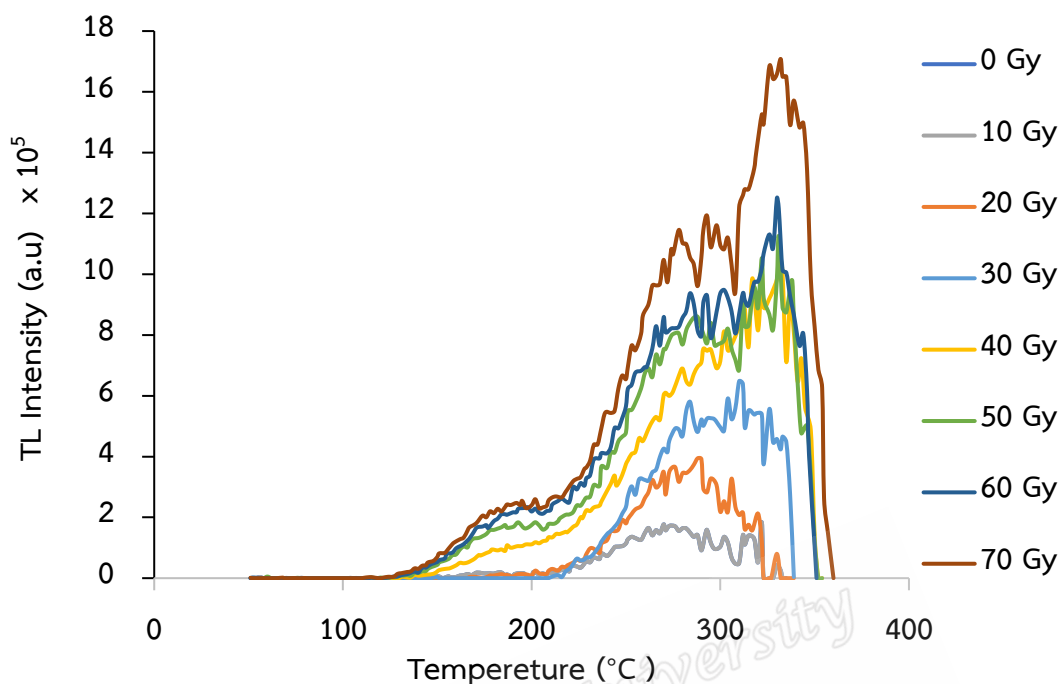
ตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ผ่านการอาบรังสีแกมมาแบบ Additive Dose สามารถนำไปวิเคราะห์ผลเพื่อหาผลการตอบสนองของสัญญาณ TL Intensity ด้วยเครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดชนิดเดียวกันที่ระดับความลึกต่างกัน พบว่าได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.7 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH1



ภาพที่ 4.8 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH2

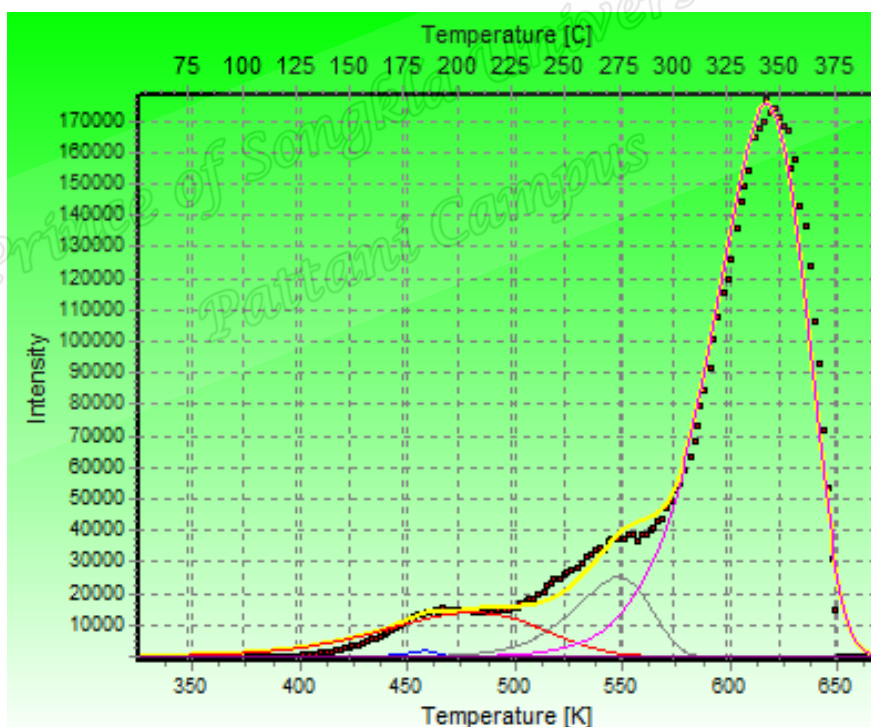


ภาพที่ 4.9 โกลว์เคิร์ฟของ TL Intensity เมื่อได้รับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ในตัวอย่าง SH3

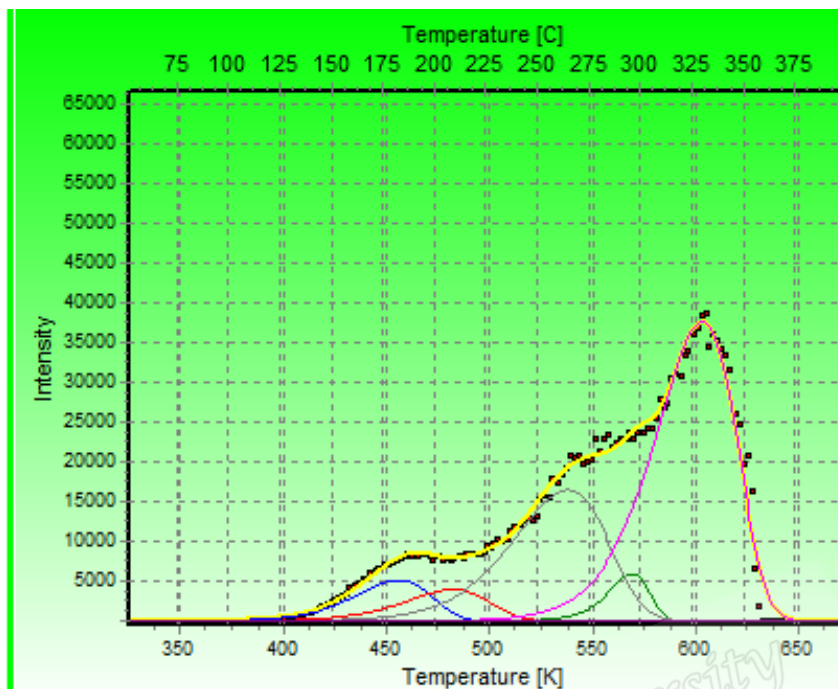
จากการศึกษาผลการตอบสนองต่อรังสีเพื่อวัด TL Intensity ของตัวอย่างที่รับรังสีจากธรรมชาติและตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาแบบ Additive Dose ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะได้กราฟสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอุณหภูมิการตอบสนอง ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่าโกลว์เคิร์ฟ ดังภาพที่ 4.7 – 4.9 พบว่าความเข้มแสงของการตอบสนองที่วัดจะแปรผันตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ ตัวอย่างที่ผ่านการรับโดสรังสีที่ระดับมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณอิเล็กตรอนมากขึ้นตามไปด้วย

4.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมโกลว์ฟิต

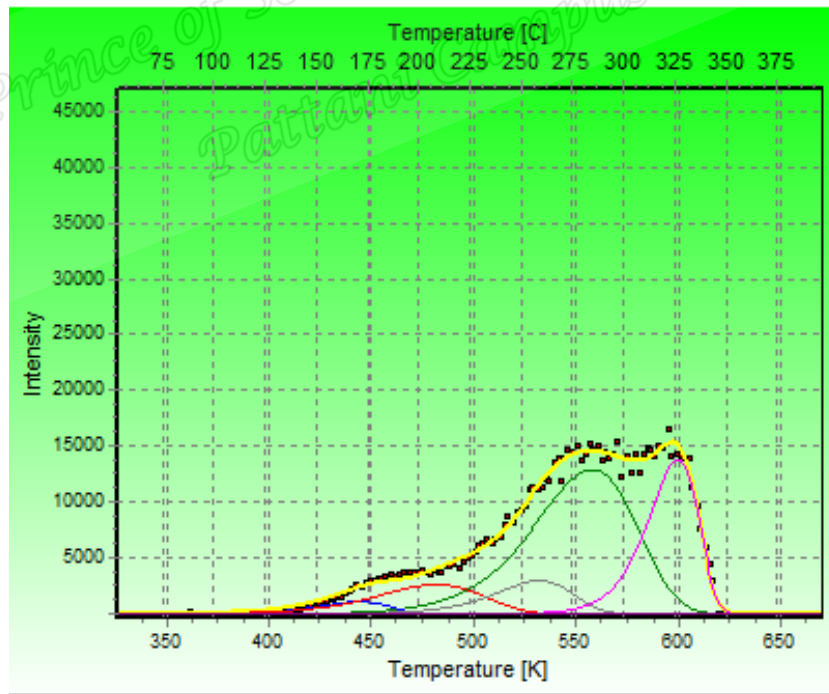
เมื่อนำค่า TL Intensity มาหารด้วยน้ำหนักตัวอย่างจะได้ค่า TL Intensity ในหน่วย Arbitrary Unit (a.u) แล้วเข้าโปรแกรมโกลว์ฟิต พบว่าสเปกตรัมที่ประกอบไปด้วยสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นองค์ประกอบ ซึ่งสัญญาณการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดสอดคล้องไปด้วย 5 อุณหภูมิ คือ 175 °C, 210 °C, 275 °C, 300 °C และ 350 °C ดังภาพที่ 4.10a และตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดสอดคล้องไปด้วย 5 อุณหภูมิ คือ 175 °C, 210 °C, 275 °C, 300 °C, 325 °C ดังภาพที่ 4.10b และ 4.10c ในงานวิจัยนี้เลือก TL Intensity ที่อุณหภูมิการตอบสนอง 350 °C และ 325 °C ในการหาอายุของตัวอย่าง เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวมีความเสถียรมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอื่น ๆ ดังกล่าว เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ Accumulated Dose ในแต่ละตัวอย่าง



(a)



(b)

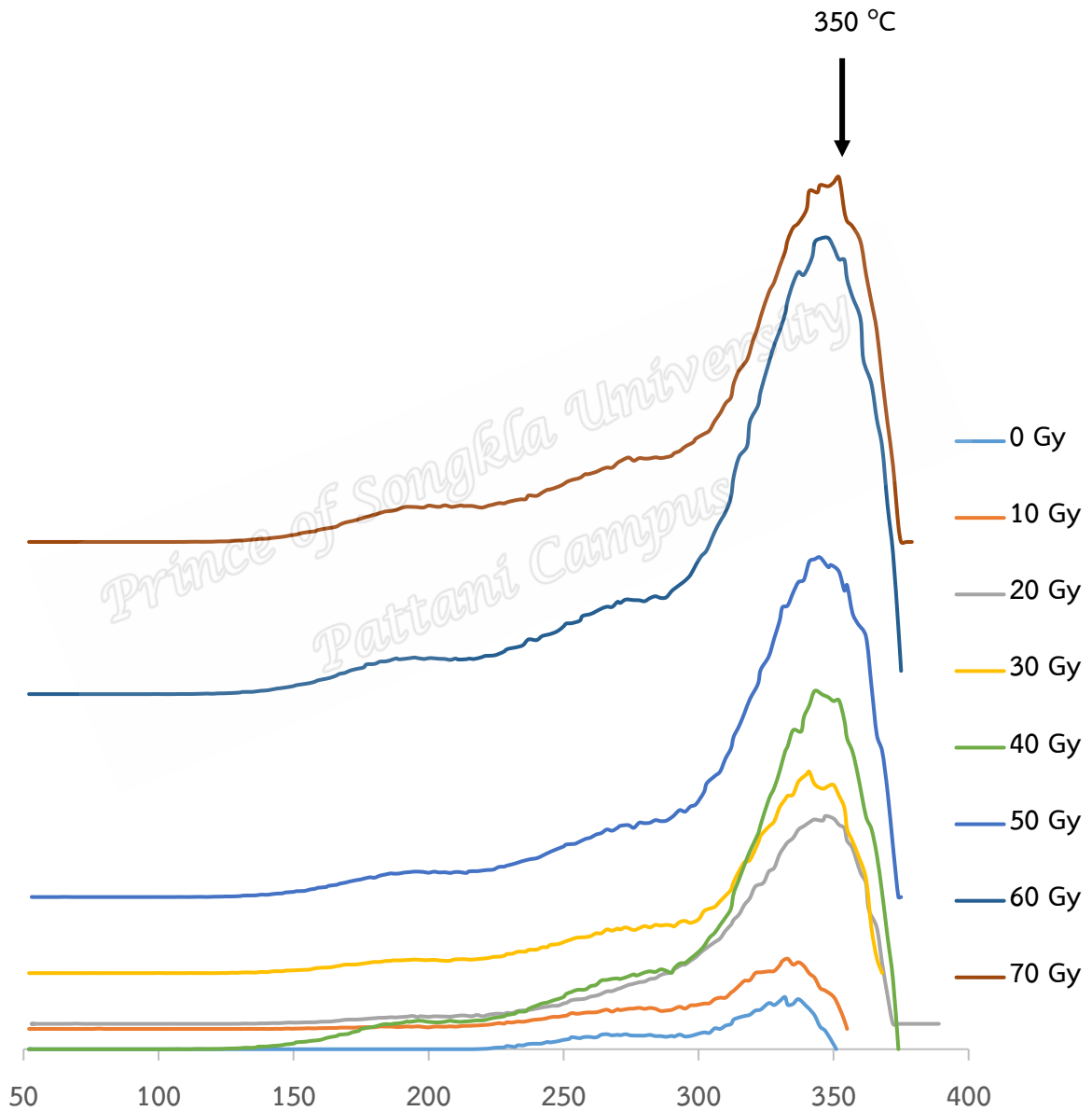


(c)

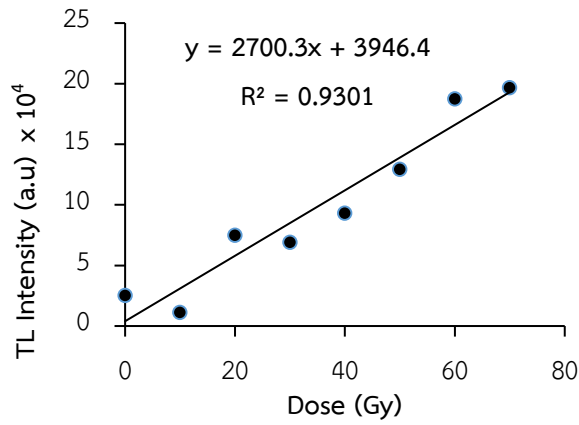
ภาพที่ 4.10 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของโกลว์เคิร์ฟ ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (a) SH1 (b) SH2 และ (c) SH3

4.8 กราฟเปรียบเทียบมาตรฐาน (Calibration Curve)

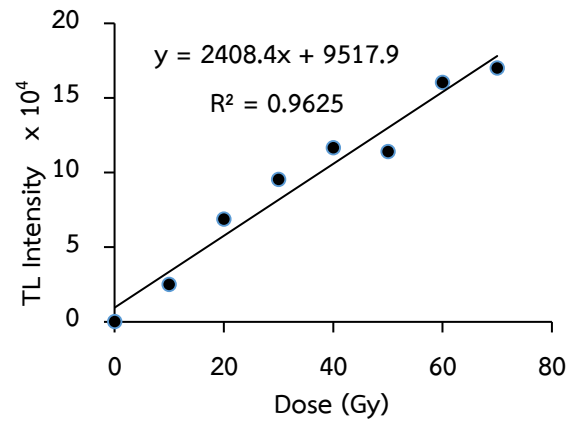
เมื่อนำค่า TL Intensity (a.u) ที่แต่ละอุณหภูมิ ซึ่งอ่านได้จากโปรแกรมโกลด์ฟิต เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานได้ผลดังนี้



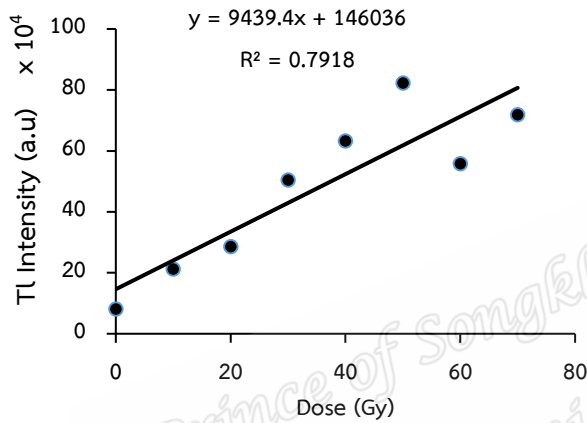
ภาพที่ 4.11 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH1



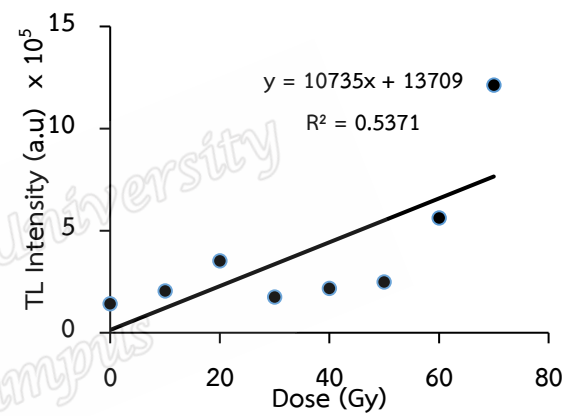
(a)



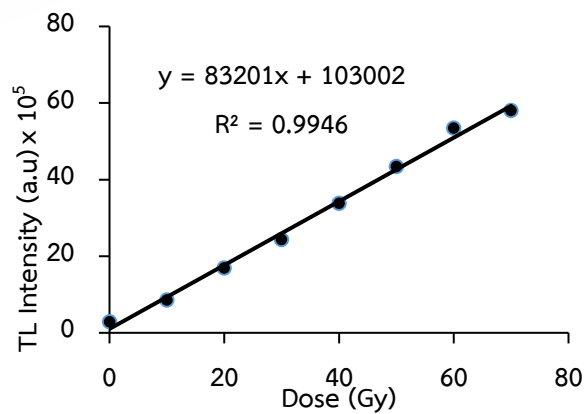
(b)



(c)

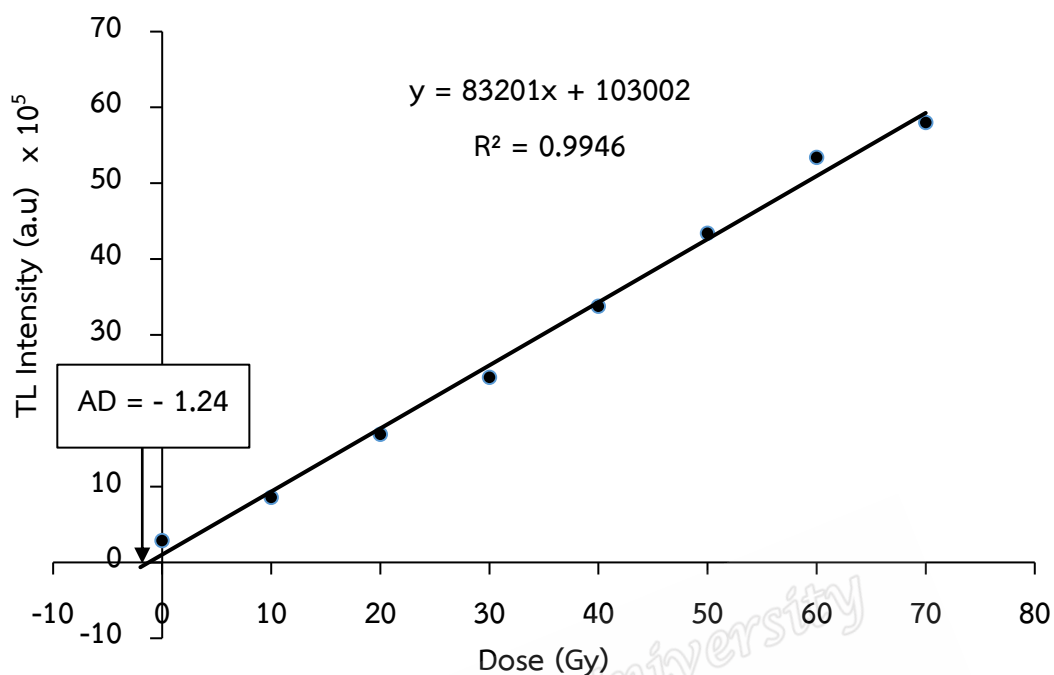


(d)



(e)

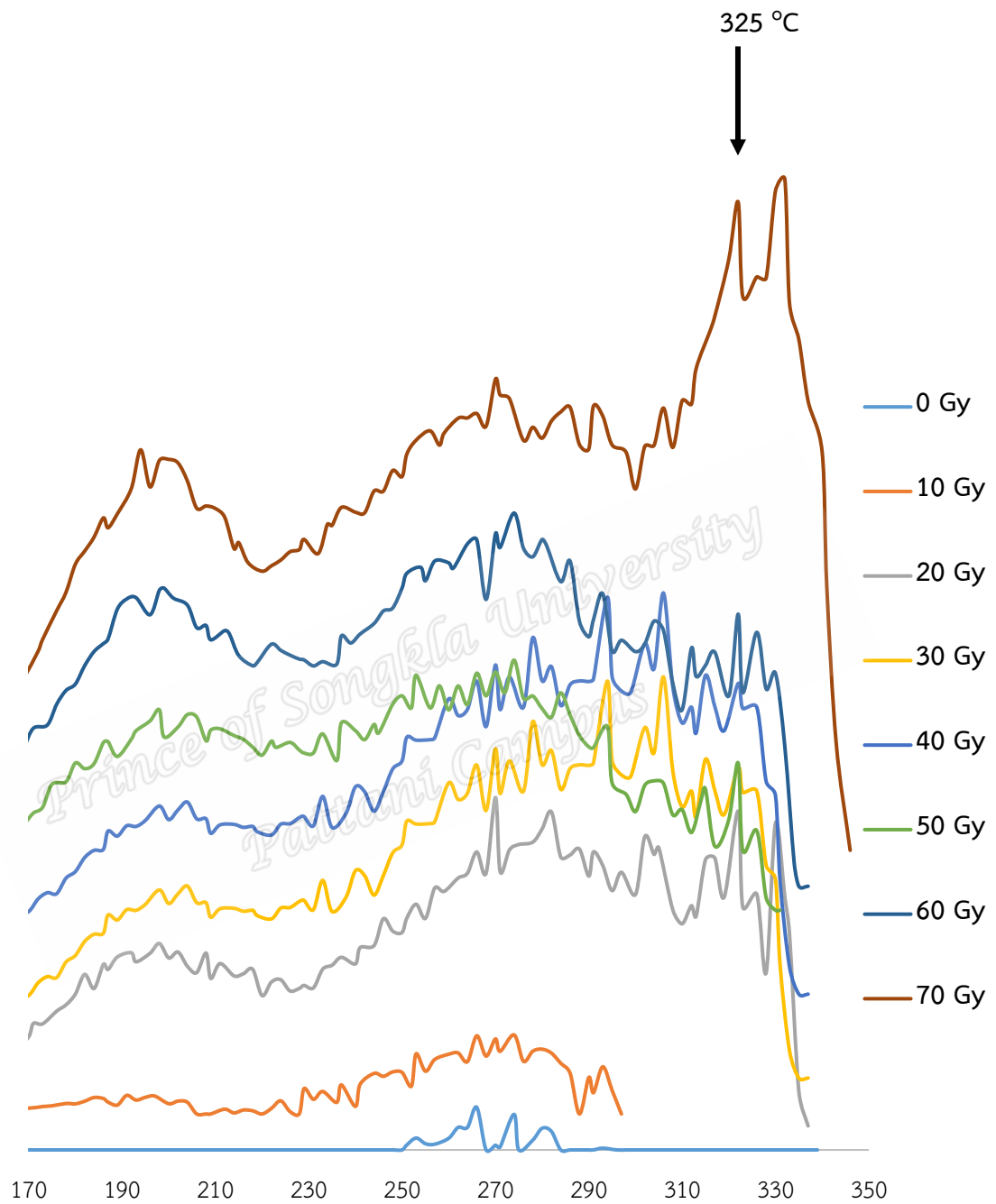
ภาพที่ 4.12 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 เมื่อ (a) 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 350 °C



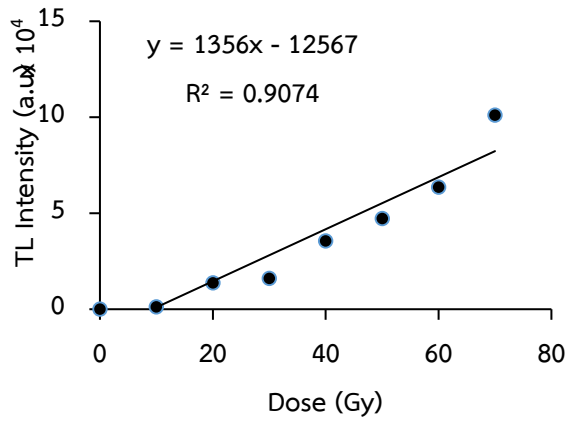
ภาพที่ 4.13 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 ที่อุณหภูมิ 350 °C

ตารางที่ 4.7 ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH1 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

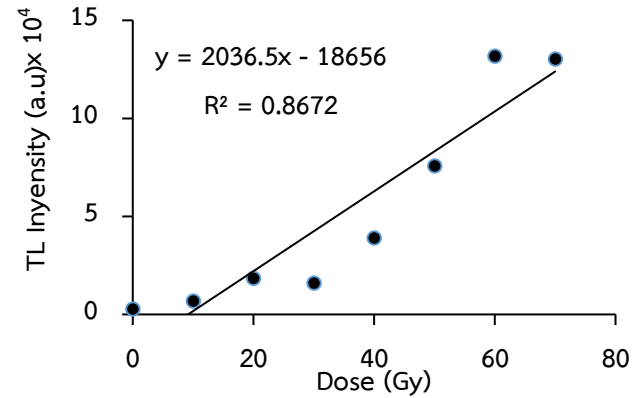
Dose (Gy)	TL Intensity (A.U)				
	175 °C	210 °C	275 °C	300 °C	350 °C
0	25196	54	80147	142155	287646
10	11380	25058	211994	204870	856875
20	75093	68854	285529	352689	1686504
30	69168	95406	504287	174245	2438016
40	93193	116691	631817	216894	3374457
50	129373	114058	822061	248704	4337475
60	187563	160381	557699	562560	5338742
70	196694	169985	717778	1213320	5800486



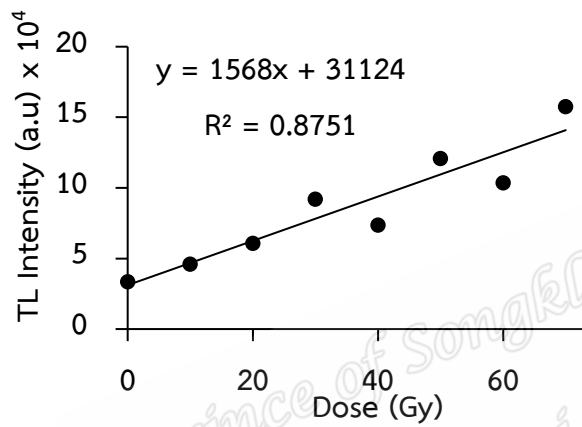
ภาพที่ 4.14 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH2



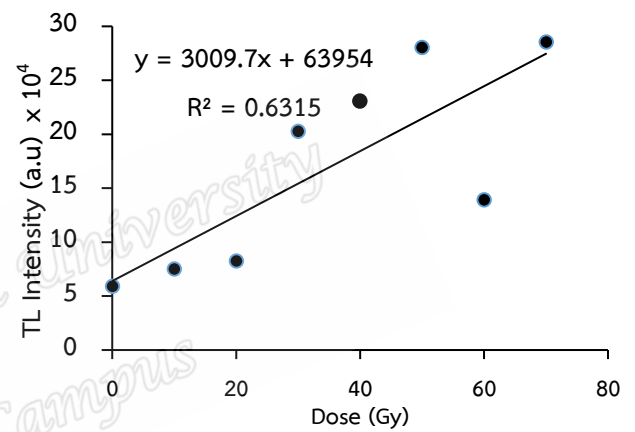
(a)



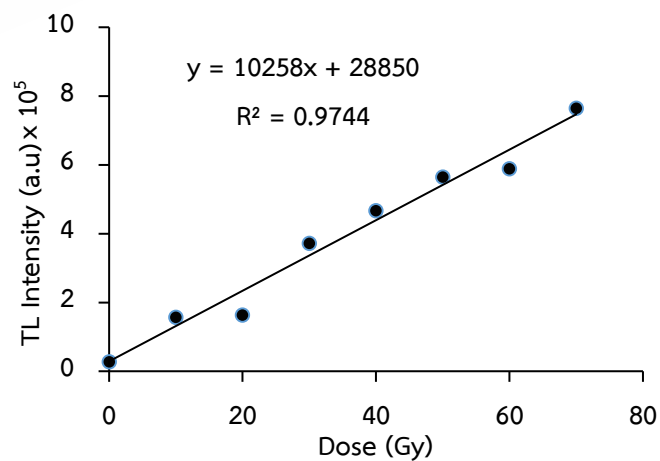
(b)



(c)

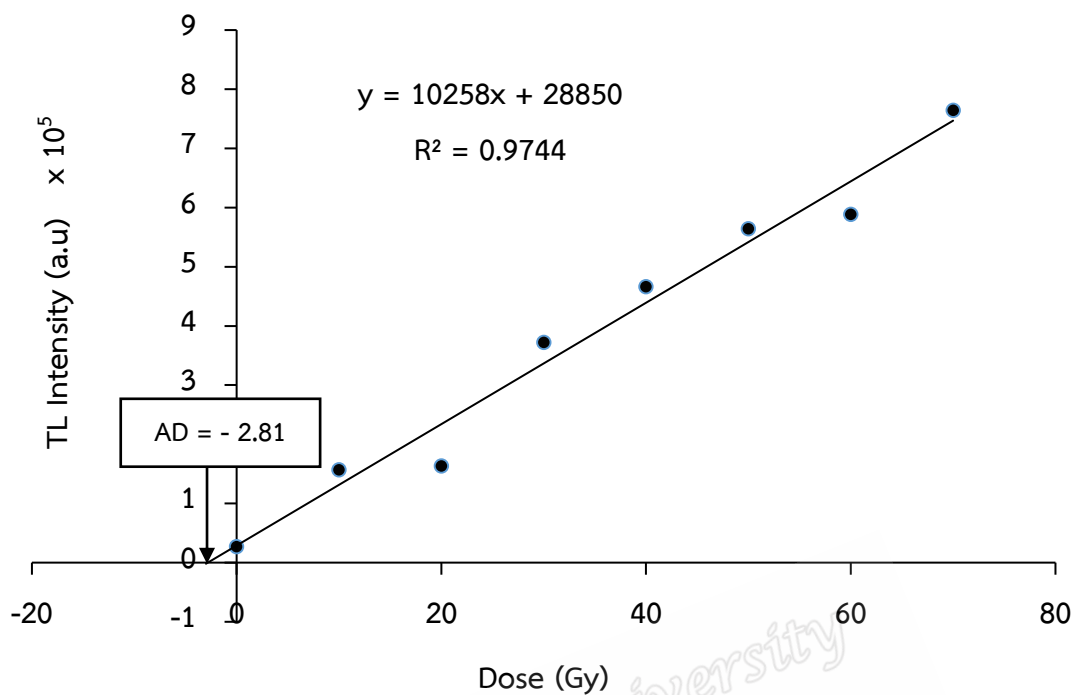


(d)



(e)

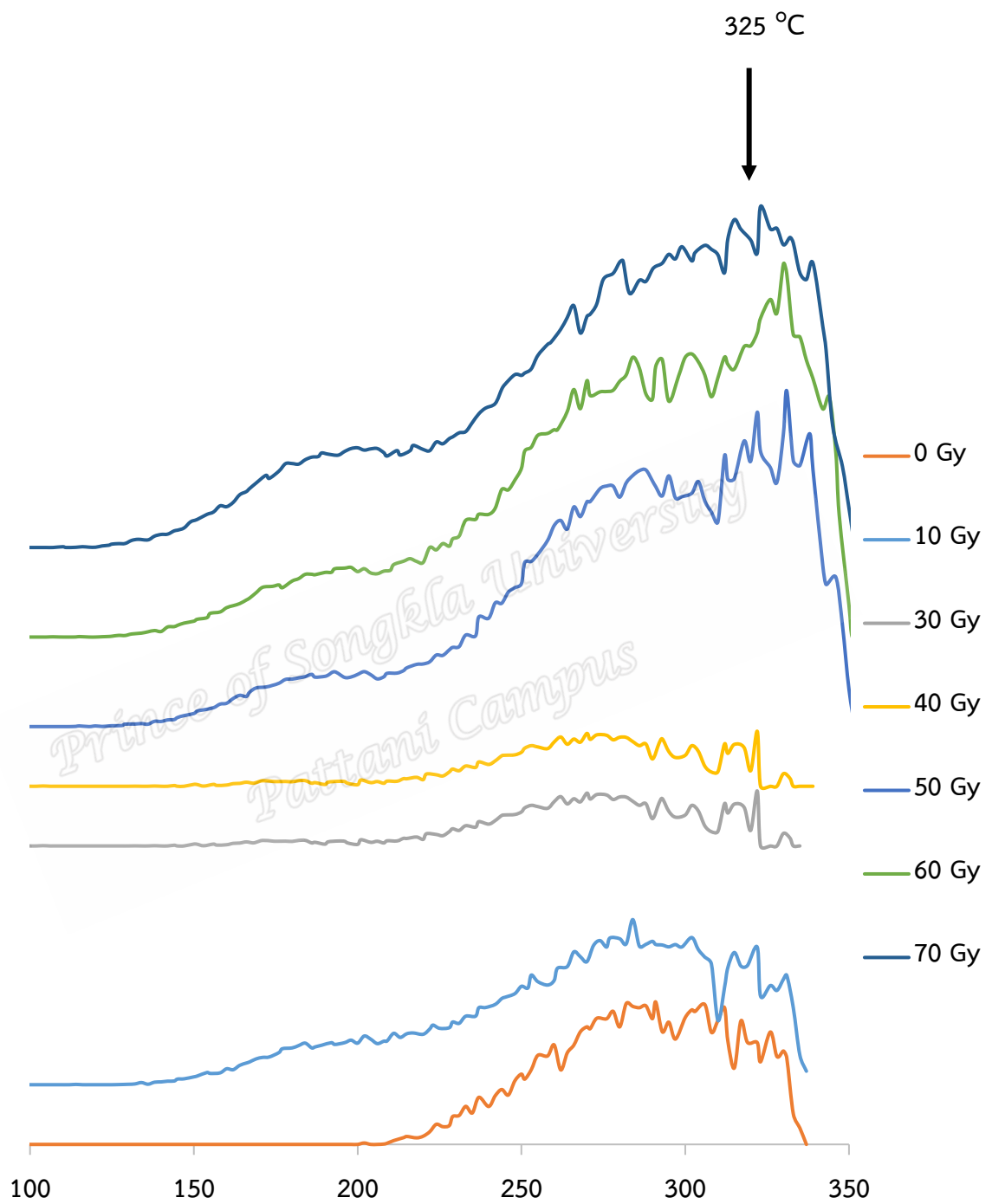
ภาพที่ 4.15 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 เมื่อ (a) 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 325 °C



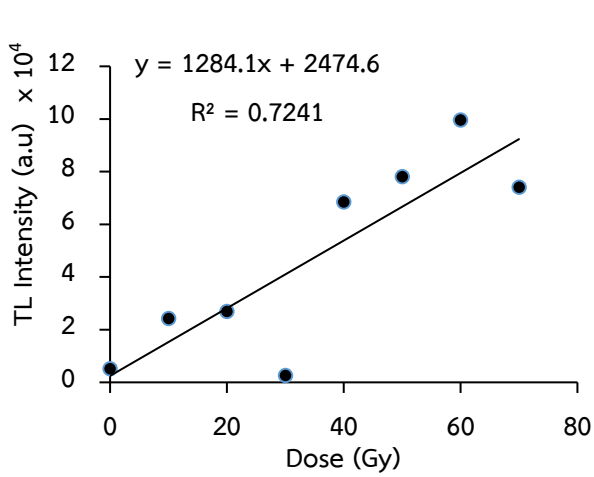
ภาพที่ 4.16 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 ที่อุณหภูมิ 325 °C

ตารางที่ 4.8 ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH2 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

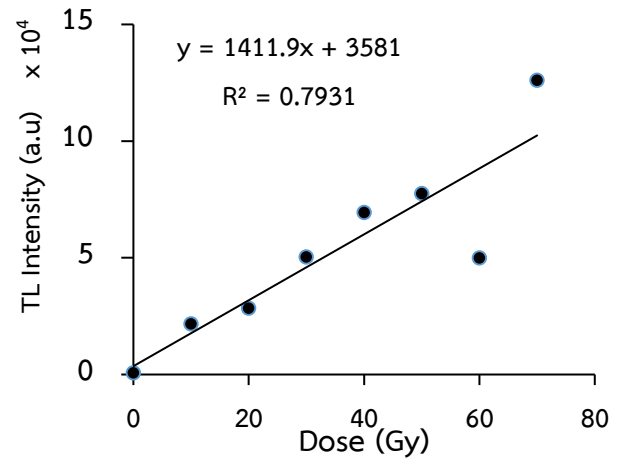
Dose (Gy)	TL Intensity (A.U)				
	175 °C	210 °C	275 °C	300 °C	325 °C
0	141.0	2858.7	33620.3	194558.0	27228
10	1370.7	6910.0	46046.0	610060.7	156760
20	13746.3	18528.5	60738.3	7330.7	163279
30	16124.3	15976.5	91955.3	12088.3	371933
40	35599.0	38959.0	73688.0	8496.3	466544
50	47307.0	75700.0	120850.0	76908.0	564399
60	63635.7	131809.0	103659.3	145657.7	588422
70	101223.0	130244.0	157475.5	96347.7	764399



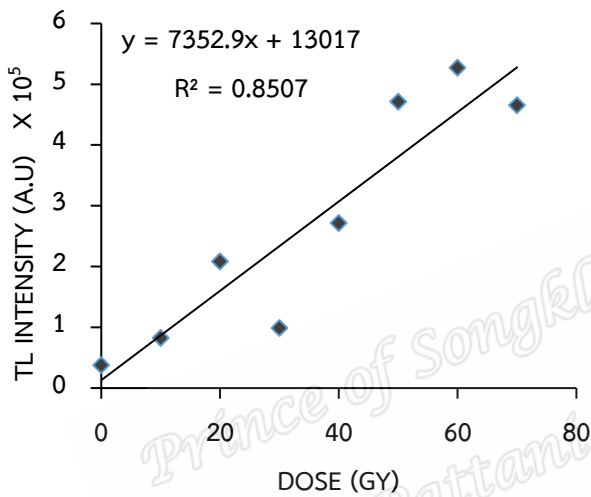
ภาพที่ 4.17 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับการโดสต่าง ๆ ของตัวอย่าง SH3



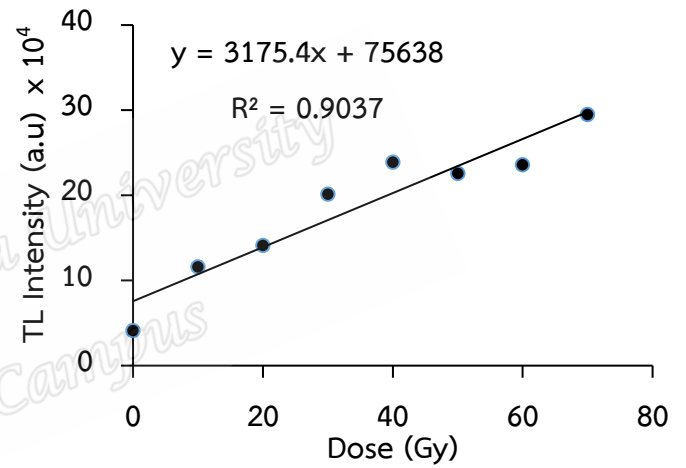
(a)



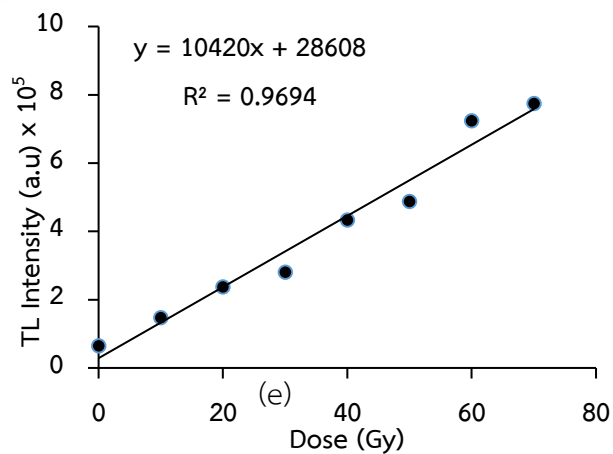
(b)



(c)

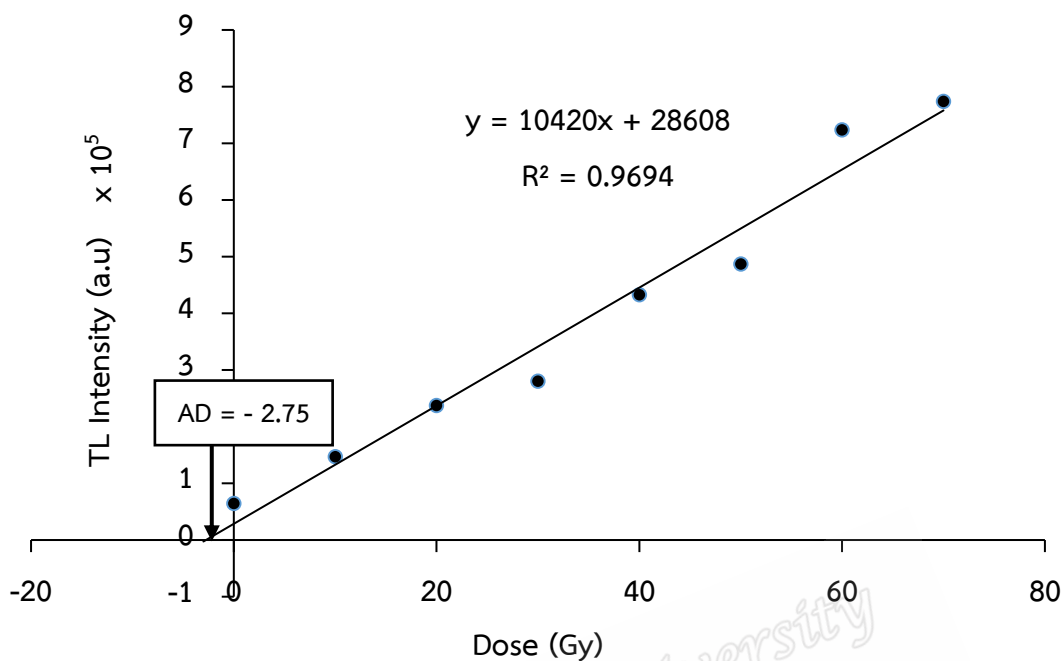


(d)



(e)

ภาพที่ 4.18 ค่า TL Intensity (a.u) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 เมื่อ (a) 175 °C (b) 210 °C (c) 275 °C (d) 300 °C (e) 325 °C



ภาพที่ 4.19 ค่า AD ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 ที่อุณหภูมิ 325 °C

ตารางที่ 4.9 ค่า TL Intensity ตัวอย่างซากหอยน้ำจืด SH3 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

Dose (Gy)	TL Intensity (A.U)				
	175 °C	210 °C	275 °C	300 °C	325 °C
0	5167	655	37903	41181	64296
10	24240	21695	82562	115741	147216
20	26964	28329	208343	140903	237079
30	2660	50374	98813	201188	280435
40	68537	69330	271434	238997	432627
50	78058	77546	471579	225760	487127
60	99577	49957	526987	235635	723692
70	74135	126097	465330	294828	774046

4.9 ผลการกำหนดอายุของซากหอยน้ำจืดและตะกอนดิน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำ ทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และปริมาณรังสีต่อปีจากผลของการวิเคราะห์หาปริมาณยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดด้วยหัววัดรังสีแกมมา เพื่อนำไปวิเคราะห์หาอายุตามสมการที่ 2.5 ได้ผลการหาอายุดังตารางที่ 4.10 และไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างตะกอนดินด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ได้ เนื่องจากไม่ปรากฏผลลึกลับควอทซ์ จึงไม่สามารถนำไปกำหนดหาอายุได้

ตารางที่ 4.10 อายุของซากหอยน้ำจืด บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ตัวอย่าง (ความลึก, cm)	D(mGy/a)	AD(Gy)	อายุ (a)
SH1 (50-60)	0.272	1.24	4,543
SH2 (80-90)	0.277	2.81	10,153
SH3 (90-100)	0.297	2.75	9,269

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการหาอายุซากตัวอย่างหอยน้ำจืดและตะกอนดิน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ทางภาคใต้ของประเทศไทย ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ จากรายงานสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม เกี่ยวกับประวัติการตั้งถิ่นฐานในเขตจังหวัดสงขลา และสตูลในระยะที่ 2 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดหาอายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและตะกอนดินจากข้อมูล 2 ส่วน คือส่วนที่หนึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และส่วนที่สองการหาปริมาณรังสีต่อปีจากการตรวจวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม นำผลที่ได้สองส่วนไปคำนวณหาอายุซากหลักฐานหอยน้ำจืดและตะกอนดิน

5.1 ลักษณะการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

จากการนำผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ที่ได้จากการสกัดตัวอย่างซากหอยน้ำจืดฉายรังสีแกมมา และอ่านค่าการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์พบว่า ปริมาณของ TL Intensity แปรผันตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ และพบตำแหน่งอุณหภูมิการตอบสนองของผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ของตัวอย่าง SH1 ที่ 175 °C, 210 °C, 275 °C, 300 °C และ 350 °C และตำแหน่งอุณหภูมิการตอบสนองของผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ของตัวอย่าง SH2, SH3 ที่คือ 175 °C, 210 °C, 275 °C, 300 °C, 325 °C ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการตอบสนองในช่วง 200 – 400 °C ของผลึกอราโกไนท์-แคลไซต์ของตัวอย่างเปลือกหอยในงานวิจัยของ Ziegelmann *et al.* (1999) และ Ijaz *et al.* (2008) และการตอบสนองของ TL Intensity ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาดังกล่าวมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

5.2 ปริมาณรังสีสะสม (AD) และปริมาณรังสีต่อปี (D)

จากการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่าง SH1 ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ 350 °C และตัวอย่าง SH2, SH3 ที่ 325 °C พบว่า ซากหอยน้ำจืดประกอบด้วยตัวอย่าง SH1, SH2 และ SH3 วิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมได้เท่ากับ 1.24 Gy, 2.81 Gy และ 2.75 Gy ตามลำดับ และวิเคราะห์ผลปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด ซึ่งวิเคราะห์จากปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ด้วยหัววัดรังสีแกมมา และรังสีคอสมิกจากชั้นบรรยากาศ พบว่าตัวอย่าง SH1, SH2 และ SH3 มีปริมาณรังสีต่อปีเท่ากับ 0.272 mGy/a, 0.277 mGy/a และ 0.297 mGy/a ตามลำดับ

5.3 อายุของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน

ผลการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมและปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่ประกอบด้วยตัวอย่าง SH1, SH2 และ SH3 ข้อมูลวิเคราะห์หาอายุของตัวอย่างได้เท่ากับ 4,543 ปี, 10,153 ปี และ 9,269 ตามลำดับ ในส่วนการหาอายุของตัวอย่างตะกอนดินของงานวิจัยนี้ไม่สามารถหาได้ จึงใช้อายุที่วิเคราะห์ได้ของซากหอยน้ำจืดด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มาเปรียบเทียบกับอายุที่วิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคคาร์บอน-14 เท่านั้น ซึ่งผลงานวิจัยที่ได้ใกล้เคียงกัน

งานวิจัยข้างต้นสรุปได้ว่า ซากหอยน้ำจืดมีอายุเฉลี่ยแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานข้อมูลอายุทางโบราณคดีของสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม ด้วยเทคนิคคาร์บอน-14 ดังตารางที่ 5.1 ค่าอายุที่ได้จากการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมสำหรับการหาอายุทางโบราณคดี

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบอายุตัวอย่างที่ระดับความลึกเดียวกันจากเทคนิคคาร์บอน-14 และเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของงานวิจัย

sample	ความลึก (cm)	อายุ (ปี)		เปอร์เซ็นต์ ค่าความแตกต่าง
		C-14	TL	
SH1	50-60	6,610 ± 1,140	4,543	31.27
SH2	80-90	10,700 ± 570	10,153	5.11
SH3	90-100	10,130 ± 540	9,269	8.50

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 ในกระบวนการทดสอบตัวอย่างควรทำการทดสอบอย่างต่อเนื่อง โดยเรียงระดับการทดสอบตามระดับการโครงสร้างสี เพื่อหลีกเลี่ยงการจางหายของอิเล็กตรอน

5.4.2 ควรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณอายุและค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อความสะดวกรวดเร็ว และความน่าเชื่อถือของข้อมูลในการกำหนดหาอายุด้วย

5.4.3 ในการแยกผลึกควอตซ์ของตัวอย่างตะกอนดิน ไม่พบควอตซ์จากตัวอย่างตะกอนดินที่ขุดพบเลย จึงไม่สามารถนำมากำหนดหาอายุได้

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บรรณานุกรม

- ไชนับ ดอเลาะ. 2557. การหาอายุของซากหอยน้ำจืดและดินเผาไฟบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำเขาหอน จังหวัดสตูลด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 37-39
- พงศกร สุวรรณเดชา. 2548. ฟิสิกส์นิวเคลียร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, 37-39
- สมหมาย ช่างเขียนและพวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2540. การหาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผา โดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์บริเวณโบราณยะรัง อำเภอยะรัง จังหวัดปัตตานี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม. 2553. รายงานผลการดำเนินงานใน โครงการวิจัยการตั้งถิ่นฐานและการดำรงชีวิต และแรกเริ่มประวัติศาสตร์ในเขตจังหวัด สงขลาและสตูลระยะที่ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1, จทก. ตรีโอ คีเอชั่น, สงขลา, หน้า 245-246.
- Aitken, M.J. 1985. Thermoluminescence dating. Academic Press, London, pp. 351.
- Aitken, M.J. 1990. Science-based dating in archaeology. London: Longman, pp. 274.
- Arnold, L. J., Duval, M., Falguères, C., Bahain, J. J. and Demuroa, M. 2011. Portable Gamma spectrometry with cerium-doped lanthanum bromide scintillators: Suitability assessments for luminescence and electron spin resonance dating applications. Journal of Radiation Measurements, 47(1), 6-8.
- Colman, S.M. and Pierce, K.L. 2000. Classification of quaternary geochronologic methods. In J.S. Nolles, J.M. Sowers, and W.R. Littis (eds.) Quaternary Geochronology: Methods and Application. Washington D.C, Quaternary Research, 28(2), 314-319.
- Colman, S.M., Pierce, K.L. and Birkeland, P.W. 1987. Suggested terminology for quaternary dating methods, Quaternary Research, 28(2), 314-319.
- De Brito, T. and Watanabe, S. 2012. A comparative study of the thermoluminescence properties of several varieties of Brazilian natural quartz. Journal of Luminescence. 132(10), 2684-2692.
- Ghawi, El, U. M., Bejey, M. M., Al-Fakhri, S. M., Al-Sadeq, A. A. and Doubali. K. K. 2005. Analysis of Libyan arable soils by means of thermal and epithermal NAA. The Arabian Journal for Science and Engineering, 30(1), 147-153.

- GeLian, G., ShunSheng, L., Bin, X., WeiDong, S. and HUANG BaoLin. 2008. Spectral study on feldspar thermoluminescence process. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*. 51(3), 225-231.
- Horowitz, Y.S., Horowitz, A., Oster, L., Marino, S., Datz, H. and Margaliot, M. 2008. Investigation of the ionisation density dependence of the glow curve characteristics of LiF:Mg,Ti (TLD-100). *Radiation Protection Dosimetry*, 131(4), 406-415.
- Hutt, G., Goksu, H.Y., Jaek, I. and Hiekkanen, M. 2000. Luminescence dating of Somero sacristy, SW Finland using the 210°C TL peak of quartz. *Quaternary Science Reviews*. 20(1), 773-777.
- Ikeya, M. 1993. *New Application of Electron Spin Resonance Dating. Dosimetry and Microscopy*. Singapore: World Scientific, Singapore, pp 447.
- Khasswneh, R., al-muheisen, Z. and Abd-Allah R. 2010. Thermoluminescence dating of pottery objects from Tell Al-Husn, northern Jordan. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 11(1), 41-49.
- Komarova Ya, M., Aluker N, L., Bobrov V, V. and Sorokina, N. 2010. Thermoluminescent Dating of Archaeological Pottery. *Inorganic Materials*. 47(5), 544-548.
- Pailolee, S., Chaisuwan, S., takashima, I., Won-In, K. and punyaCharusiri. 2010. Dating Ancient remain by thermoluminescence: Implication of Incompletely Burnt Bricks. *Bulletin of Earth Sciences of Thailand (BEST)*. 3(2), 1-9.
- Schellmann, G., Beerten, K., Radtke, U. 2008. Electron spin resonance ESR dating of Quaternary materials, *Eiszeitalter and Gegenwart-Quaternary Science Journal*. 57, 150-178.
- SEKKINA, M.A., EL FIKI, M.A., NOSSAIR, S.A. and KHALIL, N.R. 2002. Thermoluminescence archaeological dating of pottery in the egyptian pyramids zone. *Ceramics-Silikaty* . 47(3), 94-99.
- Song, K., Yun, K. and GeunHong, D. 2009. Radiation response of thermoluminescence glow peaks separated using a glow curve fitting method for red Emission from quartz. *Radiation Measurements*. 44(5-6), 611-614.

Veronese, I., Goksu, H.Y., Schwenk, P. and Herzing, F. 2007. Thermoluminescence dating of a mikveh in Ichenhausen, Germany. *Journal of Environmental Radioactivity*. 99(4), 621-630.

WeiDa, W. 2009. Study and progress of the thermoluminescence dating of the ancient pottery and porcelain. *Sci China Ser E-Tech Sci*. 52(6), 1613-1640.

Ziegelmann, B., Bogl, K.W. and Schreiber, G.A. 1990. TL and ESR signals of mollusk shell-correlations and suitability for the detection of irradiated foods. *Radiation Physics and Chemistry*. 54, 413-423.

*Prince of Songkla University
Pattani Campus*

ภาคผนวก

Prince of Songkhla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก

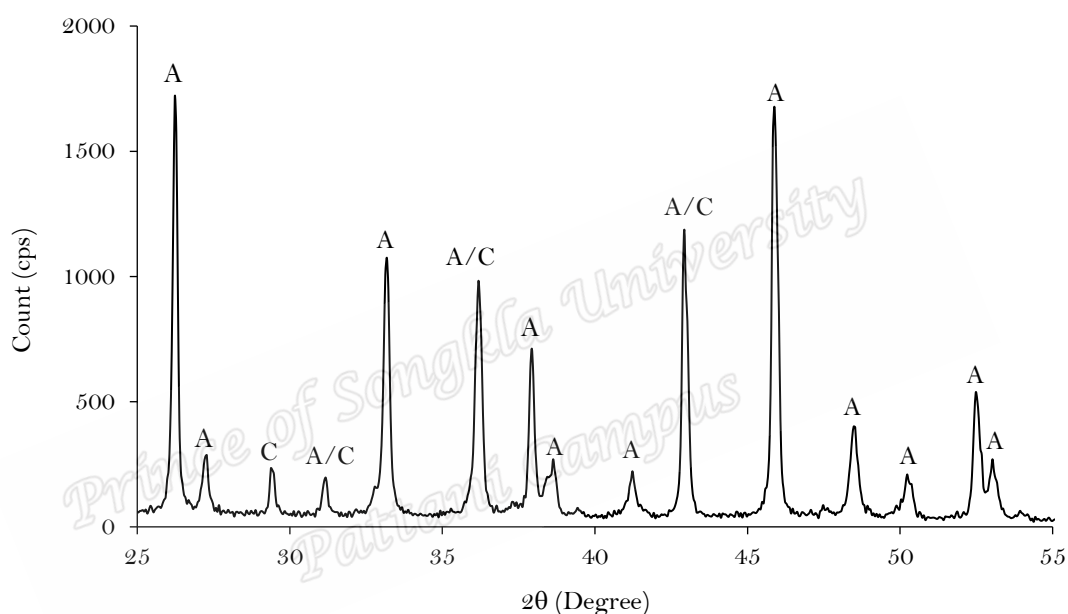
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

- ก.1 ผลึกอโรโกไนท์ - แคลไซต์
- ก.2 สมดุลกัมมันตรังสี
- ก.3 การคำนวณปริมาณรังสีต่อปี
- ก.4 การเกิดและการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี
- ก.5 รายละเอียดโกลว์เคิร์ฟของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก ก.1 โครงสร้างผลึกออรากไนท์-แคลไซต์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

โครงสร้างผลึกของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเป็นทั้งผลึกออรากไนท์-แคลไซต์ แสดงได้ดังภาพที่ ก.1.1 สำหรับผลึกออรากไนท์มีรูปแบบเป็น ออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) ส่วนแคลไซต์มีรูปแบบผลึกเป็นแบบ รอมโบฮีดรัล (Rhombohedral) ด้วยการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟเฟรคชัน



ภาพที่ ก.1.1 โครงสร้างผลึกออรากไนท์ - แคลไซต์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด (Aragonite, A; Calcite, C)

ภาคผนวก ก.2 สมดุลกัมมันตรังสี

การสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีนั้นจะเกิดการสลายตัวขึ้นแบบต่อเนื่อง ในทางฟิสิกส์ นิวเคลียร์สมดุลแบบถาวร (Secular Equilibrium) เป็นการสลายต่อเนื่องของธาตุกัมมันตรังสี โดยสถานะที่ธาตุกัมมันตรังสีของนิวไคลด์ลูกเท่ากับนิวไคลด์แม่ หลังจากผ่านการสลายตัวไประยะเวลาหนึ่งแสดงดังภาพที่ ก.2.1

สมดุลงัมมันตรังสีแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ ครึ่งชีวิตของนิวไคลด์มีค่ามากกว่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์ลูกมาก 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

พิจารณาการสลายของธาตุกัมมันตรังสีแบบอนุกรมของนิวไคลด์แม่อย่างเดี่ยว แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดนิวไคลด์ลูก B เพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกัน B ก็สลายต่อไปเป็น C และอื่น ๆ จนในที่สุดเกิดสมดุล

เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณ B จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้อัตราการสลายตัวของ B ไปเป็น C เรียกสถานะนี้ว่า “สมดุลงัมมันตรังสี” คือ สมการ (ก.2.1) เท่ากับ (ก.2.2)

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

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

เมื่อธาตุกัมมันตรังสี A เป็นนิวไคลด์แม่เริ่มต้นสลายตัวด้วยจำนวนอะตอม N_A เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$N_A = N_A^0 e^{-\lambda_A t} \quad (\text{ก.2.1})$$

สมการ (ก.2.1) เป็นสมการสลายตัวของนิวไคลด์กัมมันตรังสีแม่และการเกิดนิวไคลด์ลูก B เพิ่มขึ้น

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

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

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

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

นำ $e^{\lambda_B t}$ คูณตลอดสมการจะได้

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

คูณตลอดสมการด้วย dt

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

$$\begin{aligned}
 d(N_B e^{\lambda_B t}) &= \lambda_A N^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt \\
 \int d(N_B e^{\lambda_B t}) &= \int \lambda_A N^0 e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt \\
 N_B e^{\lambda_B t} &= \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} + \text{constant} \quad (\text{ก.3.2})
 \end{aligned}$$

เมื่อ $t = 0$

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

แทนค่า constant ในสมการ (ก.3.2) จะได้

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

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

$$\begin{aligned}
 N_B e^{\lambda_B t} e^{-\lambda_B t} &= \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} e^{-\lambda_B t} - 1) + N_B^0 e^{-\lambda_B t} \\
 N_B e^{\cancel{\lambda_B t}} e^{-\cancel{\lambda_B t}} &= \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} e^{-\cancel{\lambda_B t}} - 1) + N_B^0 e^{-\lambda_B t} \\
 N_B &= \frac{\lambda_A N_A^0}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + N_B^0 e^{-\lambda_B t}
 \end{aligned}$$

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

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

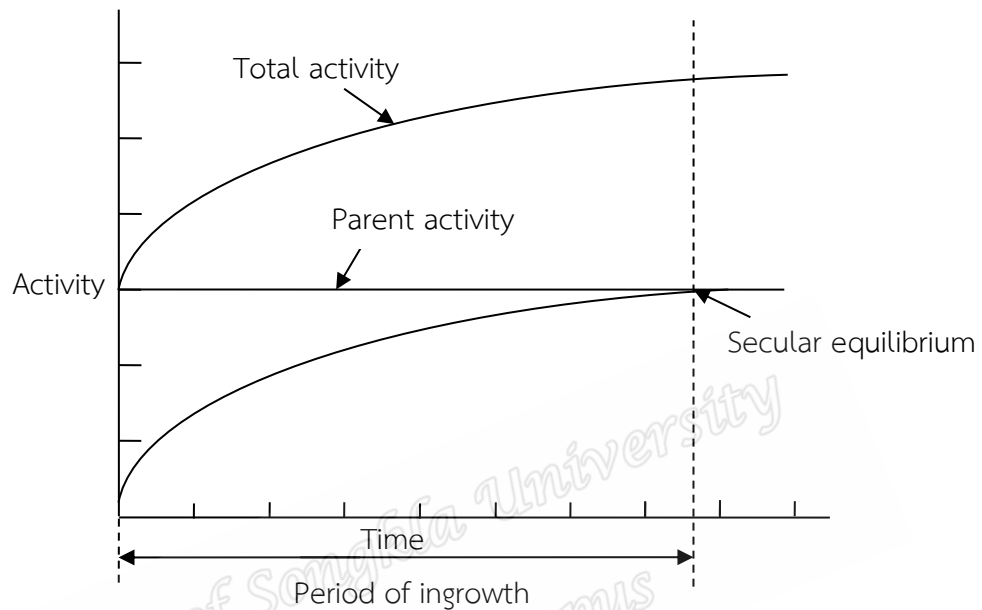
และเนื่องจากค่าครึ่งชีวิต A มากกว่าครึ่งชีวิต B มาก ดังนั้น λ_A มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ λ_B นั่นคือ $\lambda_A \ll \lambda_B$ ดังนั้น $\lambda_B - \lambda_A \approx \lambda_B$ และ $e^{-\lambda_B t} \rightarrow 0$, จะได้

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

เพราะฉะนั้น

$$\lambda_B N_B = \lambda_A N_A$$

ภาพที่ ก.2.1 เป็นกราฟแสดงการสมดุลกัมมันตรังสีแบบถาวร กัมมันตรังสีภาพรังสีรวมหลังจากเกิดสมดุลกัมมันตรังสีแล้วเท่ากับผลบวกของกัมมันตภาพรังสีของ A และ B ซึ่งกัมมันตรังสีของ A จะเท่ากับ B



ภาพที่ ก.2.1 สมดุลแบบถาวรในการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี

ภาคผนวก ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปี (Annual Dose or Dose Rate)

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

$$D = \sum \lambda_i N_i E_i \frac{\text{MeV}}{\text{kg} \cdot a} \quad (\text{ก.3.1})$$

$$= \sum \lambda_i N_i E_i \times 1.60218 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \times 10^{-6} \frac{\text{eV}}{\text{kg} \cdot a} \quad (\text{ก.3.2})$$

$$= 1.60218 \times 10^{-13} (\sum \lambda_i N_i E_i) \frac{\text{Gy}}{a} \quad (\text{ก.3.3})$$

$$= 1.60218 \times 10^{-10} (\sum \lambda_i N_i E_i) \frac{\text{mGy}}{a}$$

เมื่อ $\lambda_i N_i$ คือ จำนวนการสลายตัวต่อปีสามารถคำนวณได้จากครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) ดังนี้

$$\lambda_i N_i = \left(\frac{0.69315}{T_{1/2}} \right) N_i \quad (\text{ก.3.4})$$

ซึ่งค่า $T_{1/2}$ ของแต่ละนิวไคลด์แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{238}U เขียนได้เป็น

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

เมื่อ λ_{238} คือ อัตราการสลายตัวของธาตุ ^{238}U และ N_{238} คือ จำนวนอะตอมของธาตุ ^{238}U ในผลึก (kg^{-1}) สมการดังกล่าวเป็นสมการ “สมการกัมมันตรังสีแบบถาวร” ได้มาจากภาคผนวก ก.2 ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีของธาตุยูเรเนียม สามารถเขียนได้เป็น

$$D_U = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{238} N_{238} \Sigma E_{238}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.5})$$

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

$$\lambda_{238} = \frac{0.69315}{T_{1/2(238)}} = \frac{0.69315}{4.468 \times 10^9 \text{ a}} = 1.55136 \times 10^{-10} [1/\text{a}]$$

$$\begin{aligned} N_{238} &= 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom/mole} \times \frac{1}{238.05 \text{ g/mole}} \times 1 \times 10^{-3} \text{ g} \\ &= 2.52980 \times 10^{18} \text{ atom} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad D_U &= 1.60218 \times 10^{-10} \times 1.55136 \times 10^{-10} \times 2.52980 \times 10^{18} \times \Sigma E_{238} \\ &= (0.062879) \Sigma E_{238} \quad [\text{mGy/a}] \end{aligned}$$

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{232}Th เขียนได้เป็น

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

เมื่อ λ_{232} คือ อัตราการสลายตัวของธาตุ ^{232}Th และ N_{232} คือ จำนวนอะตอมของธาตุ ^{232}Th ในผลึก (kg^{-1}) สมการดังกล่าวเป็นสมการ “สมการกัมมันตรังสีแบบถาวร” ได้มาจากภาคผนวก ก.3 ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีของธาตุยูเรเนียม สามารถเขียนได้เป็น

$$D_{\text{Th}} = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{232} N_{232} \Sigma E_{232}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.6})$$

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

$$\lambda_{232} = \frac{0.69315}{T_{1/2(232)}} = \frac{0.69315}{1.14 \times 10^{10} \text{ a}} = 6.08026 \times 10^{-11} [1/\text{a}]$$

$$\begin{aligned} N_{232} &= 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom/mole} \times \frac{1}{232.038 \text{ g/mole}} \times 1 \times 10^{-3} \text{ g} \\ &= 2.59534 \times 10^{18} \text{ atom} \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad D_{\text{Th}} = 1.60218 \times 10^{-10} \times 6.08026 \times 10^{-11} \times 2.59534 \times 10^{18} \times \Sigma E_{232}$$

$$= (0.020514) \Sigma E_{232} \quad [\text{mGy/a}]$$

สำหรับสมการสมดุลกัมมันตรังสีของ ^{40}K เขียนได้เป็น

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_{i+1} N_{i+1} = \dots = \lambda_{40} N_{40}$$

เมื่อ λ_{40} คือ อัตราการสลายตัวของธาตุ ^{40}K และ N_{40} คือ จำนวนอะตอมของธาตุ ^{40}K ในผลึก (kg^{-1}) สมการดังกล่าวเป็นสมการ “สมการกัมมันตรังสีแบบถาวร” ได้มาจากภาคผนวก ก.3 ดังนั้นปริมาณรังสีต่อปีของธาตุยูเรเนียม สามารถเขียนได้เป็น

$$D_K = 1.60218 \times 10^{-10} (\lambda_{40} N_{40} \Sigma E_{40}) \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.7})$$

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

$$\lambda_{40} = \frac{0.69315}{T_{1/2(40)}} = \frac{0.69315}{1.277 \times 10^9 \text{ a}} = 5.42796 \times 10^{-10} \text{ [1/a]}$$

$$N_{40} = 6.02218 \times 10^{23} \text{ atom/mole} \times \frac{1}{39.0983 \text{ g/mole}} \times 1 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$= 1.54027 \times 10^{19} \text{ atom}$$

ดังนั้น

$$D_K = 1.60218 \times 10^{-10} \times 0.542796 \times 10^{-9} \times 1.54027 \times 10^{19} \times \Sigma E_{232}$$

$$= (0.02541) \Sigma E_{232} \quad [\text{mGy/a}]$$

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

$$D_U = (0.06288) \Sigma E_{238,(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.8})$$

$$D_{Th} = (0.02514) \Sigma E_{232,(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.9})$$

$$D_K = (0.02541) \Sigma E_{40,(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy/a}] \quad (\text{ก.3.10})$$

ตารางที่ ก.3.1 พลังงานรวมของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา ของอนุกรมการสลายตัวของยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมตามธรรมชาติ

อนุกรม	พลังงาน (MeV)		
	$E_{\text{tot},\alpha}$	$E_{\text{tot},\beta}$	$E_{\text{tot},\gamma}$
^{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.3.8) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} D_U &= (0.06288) \Sigma E_{238,(\alpha,\beta,\gamma)} \\ &= 0.06288 \times 42.81 \\ &= 2.6916 \quad \text{[mGy/a]} \end{aligned}$$

ข้อมูลตามตาราง ก.4.1 เป็นพลังงานทั้งหมดของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาของอนุกรมการสลายตัวของ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ตามธรรมชาติ ปริมาณรังสีต่อปีที่ 1 ppm ของธาตุกัมมันตรังสีจะถูกคำนวณอยู่บนพื้นฐานของพลังงานดังกล่าวได้ค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.3.2 ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา ที่คำนวณได้จากสมการสมดุลกัมมันตรังสีของอนุกรมการสลายตัวของธาตุ ยูเรเนียม (^{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

นำข้อมูลจากตาราง ก.3.2 มาคำนวณปริมาณรังสีต่อปีโดยอาศัยปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ได้ตามสมการ (ก.4.11 – ก.4.13)

$$D_\alpha = C_U D_{U-\alpha} + C_{Th} D_{Th-\alpha} \quad (\text{ก.3.11})$$

$$D_\beta = C_U D_{U-\beta} + C_{Th} D_{Th-\beta} + C_K D_{K-\beta} \quad (\text{ก.3.12})$$

$$D_\gamma = C_U D_{U-\gamma} + C_{Th} D_{Th-\gamma} + C_K D_{K-\gamma} \quad (\text{ก.3.13})$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ
D คือ ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีชนิดต่าง ๆ

ค่าตามตารางที่ ก.3.2 จะใช้สมการ (ก.3.11 – ก.3.13) ในการคำนวณค่าดังกล่าว ได้ดังนี้

$$D_{\alpha} = C_U(2.692) + C_{Th}(0.737) \quad (\text{ก.3.14})$$

$$D_{\beta} = C_U(0.143) + C_{Th}(0.028) + C_K(0.678) \quad (\text{ก.3.15})$$

$$D_{\gamma} = C_U(0.110) + C_{Th}(0.051) + C_K(0.203) \quad (\text{ก.3.16})$$

เมื่อค่า C_U , C_{Th} และ D_K เป็นปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม และทอเรียมในหน่วย ppm และโพแทสเซียมในหน่วย % ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยหัววัดรังสีแกมมาชนิด NaI

ตารางที่ ก.3.3 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืด และตะกอนดิน จากแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ตัวอย่าง	^{40}K (%)	^{232}Th (ppm)	^{238}U (ppm)
SH1	2.51	13.44	1.53
SH2	3.93	14.06	1.37
SH3	10.16	10.43	1.47
SD1	16.55	65.70	0.33
SD2	22.20	59.61	0.39
SD3	22.37	73.20	0.59

ก.3.3.1 การคำนวณปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด

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

ค่าที่ได้ตามตารางที่ ก.3.3 นำไปแทนค่าสมการ (ก.3.14 – ก.3.16) สามารถคำนวณหาค่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดได้ดังนี้

ปริมาณรังสีต่อปีภายใน

$$\begin{aligned} D_{in,\alpha} &= (1.53)(2.692) + (13.44)(0.737) \\ &= 14.024 \quad \text{mGy/a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{in,\beta} &= (1.53)(0.143) + (13.44)(0.028) + (2.51)(0.0678) \\ &= 0.765 \quad \text{mGy/a} \end{aligned}$$

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

ปริมาณรังสีต่อปีภายนอก

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

$$\begin{aligned} D_{ex,\beta} &= (0.33)(0.143) + (65.70)(0.028) + (16.55)(0.0678) \\ &= 3.009 \quad \text{mGy/a} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} D_{ex,\gamma} &= (0.33)(0.110) + (65.70)(0.051) + (16.55)(0.203) \\ &= 6.747 \quad \text{mGy/a} \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.3.4 ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) และปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (D_{ex})

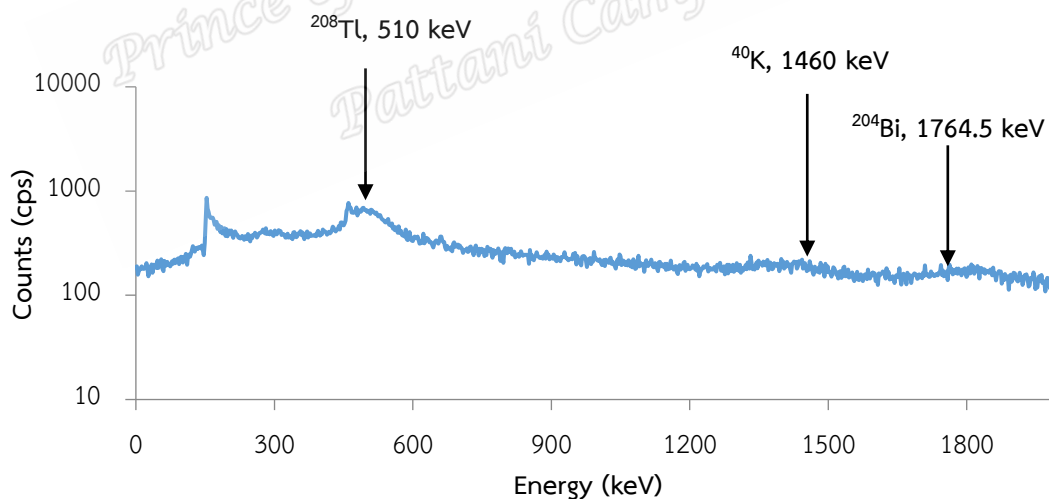
ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (mGy/a)		ปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (mGy/a)	
$D_{in,\alpha}$	$D_{in,\beta}$	$D_{ex,\beta}$	$D_{ex,\gamma}$
14.024	0.765	3.009	6.747

เนื่องจากตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่นำมาหาอายุ เก็บรวบรวมมาจากสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปี (D) ของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด นอกจากวิเคราะห์ได้จากไอโซโทปรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำหนดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ ยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และ โพแทสเซียม (^{40}K) ยังวิเคราะห์รังสีคอสมิก ซึ่งมาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแลกซี โดยรังสีคอสมิกจะถูกควบคุมโดยเส้นละติจูด ลองติจูด ระดับความสูงและระดับความลึกของตัวอย่าง เขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} D_{in} &= 14.024 + 0.765 \\ &= 14.789 \quad \text{mGy/a} \end{aligned}$$

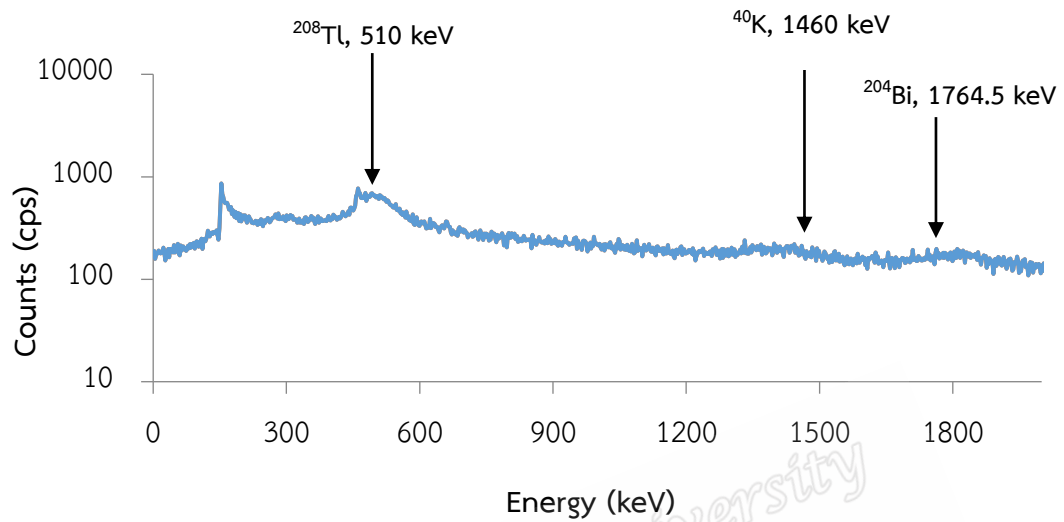
$$\begin{aligned}
 D_{\text{ex}} &= 3.009 + 6.747 \\
 &= 9.756 && \text{mGy/a} \\
 D &= D_{\text{in}} + D_{\text{ex}} && \text{mGy/a} \\
 &= 14.789 + 9.756 \\
 &= 24.545 && \text{mGy/a}
 \end{aligned}$$

ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) โดยการวัดรังสีด้วยหัววัดรังสีแกมมา จากการวิเคราะห์ความแรงรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{214}Bi , ^{208}Tl และ ^{40}K ที่พลังงาน 1764.5, 510 และ 1460 keV ตามลำดับ ความแรงของรังสีดังกล่าวสามารถวัดโดยใช้หัววัดรังสีแกมมา ผลการวัดจะได้แถบของค่านับวัดพลังงานของรังสี เรียกว่า “สเปกตรัมรังสีแกมมา” รังสีแกมมาแต่ละพลังงานที่วัดได้ เรียกว่า โฟโตพีค (Photo Peak) จำนวนนับวัดบนพื้นที่ของโฟโตพีคมีค่าแปรผันตามความแรงรังสี

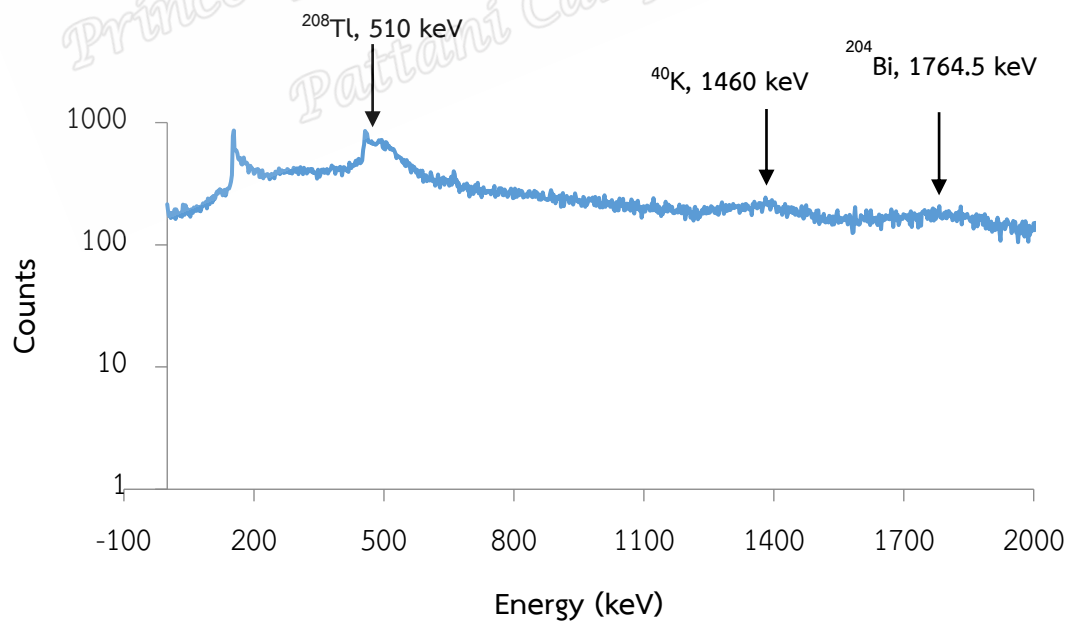


ภาพที่ ก.3.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในซากหอยน้ำจืดที่พลังงาน 1764.5 MeV, 510 MeV และ 1460 keV ตามลำดับ

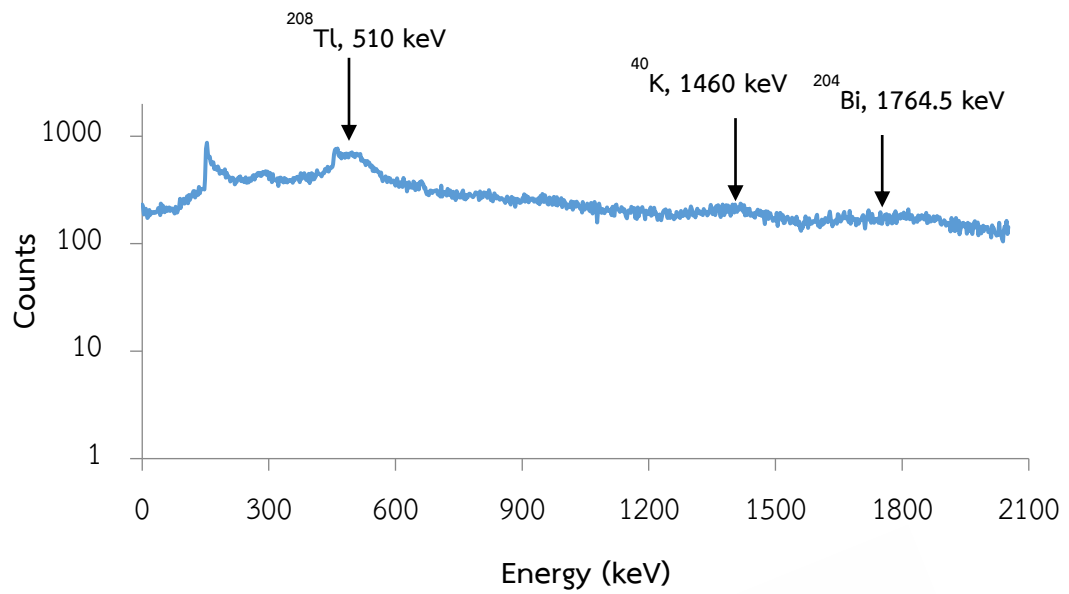
ภาคผนวก ก.4 รายละเอียดสเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างซากหอยน้ำจืดและสิ่งแวดล้อมรอบซากหอยน้ำจืด



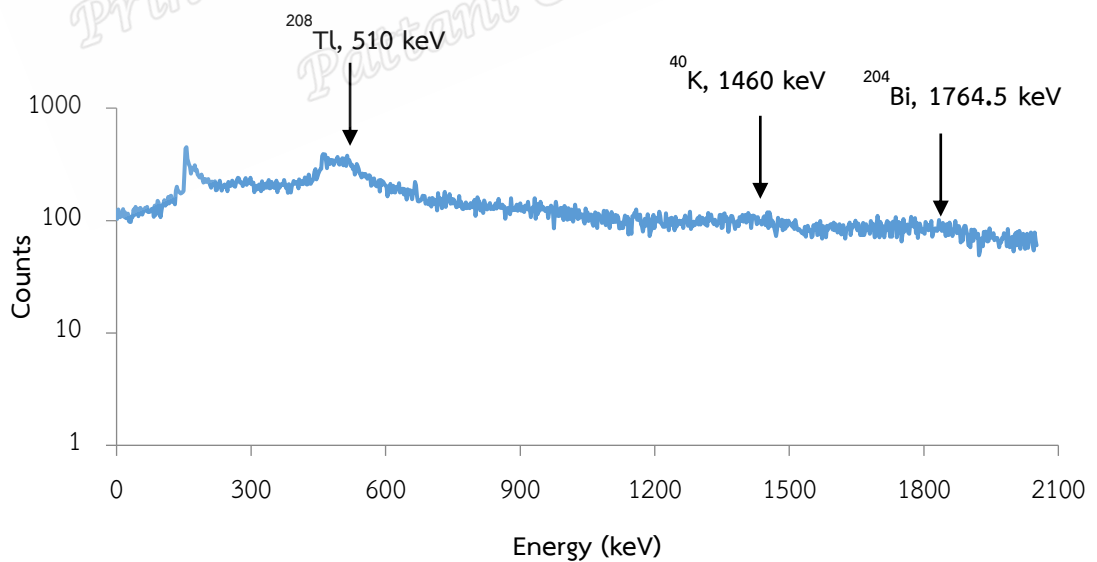
ภาพที่ ก.4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SH1



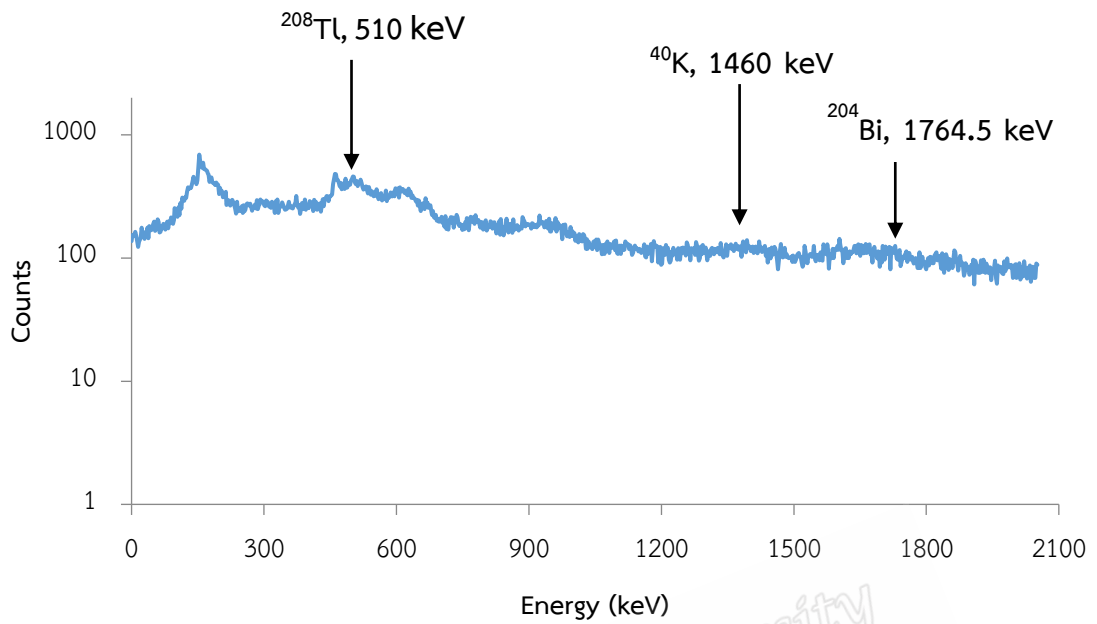
ภาพที่ ก.4.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SH2



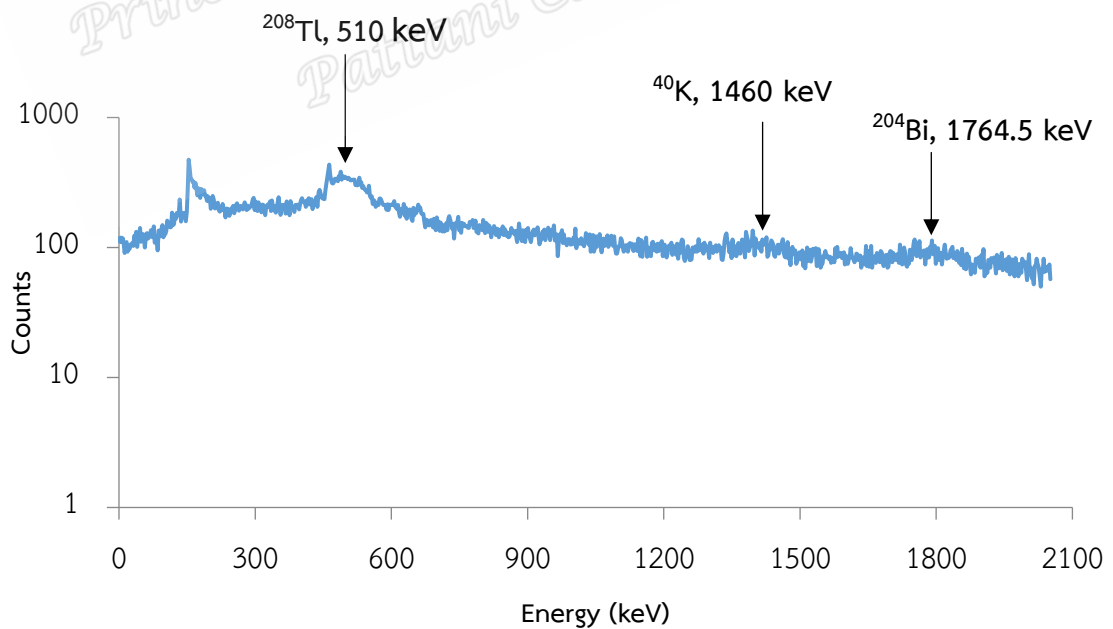
ภาพที่ ก.4.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SH3



ภาพที่ ก.4.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SD1

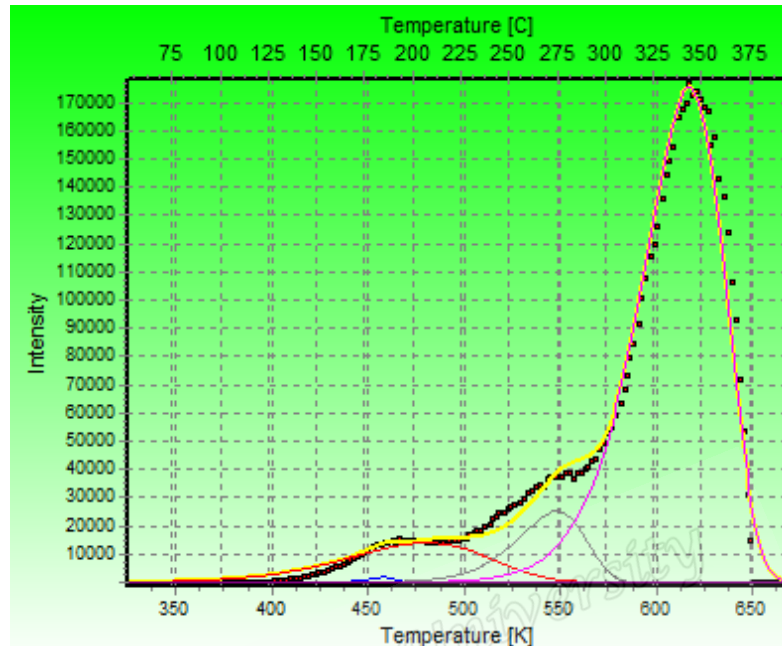


ภาพที่ ก.4.5 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SD2

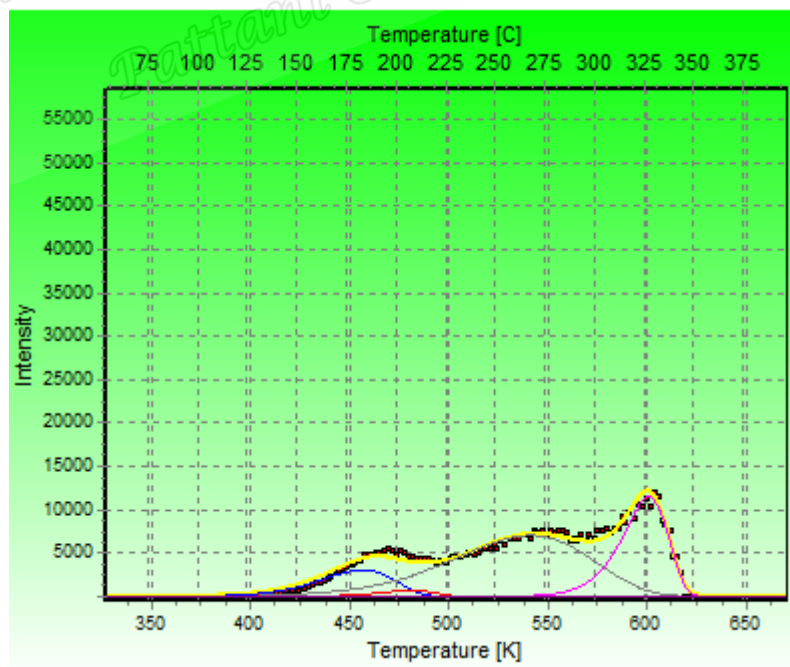


ภาพที่ ก.4.6 สเปกตรัมรังสีแกมมาของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมใน SD3

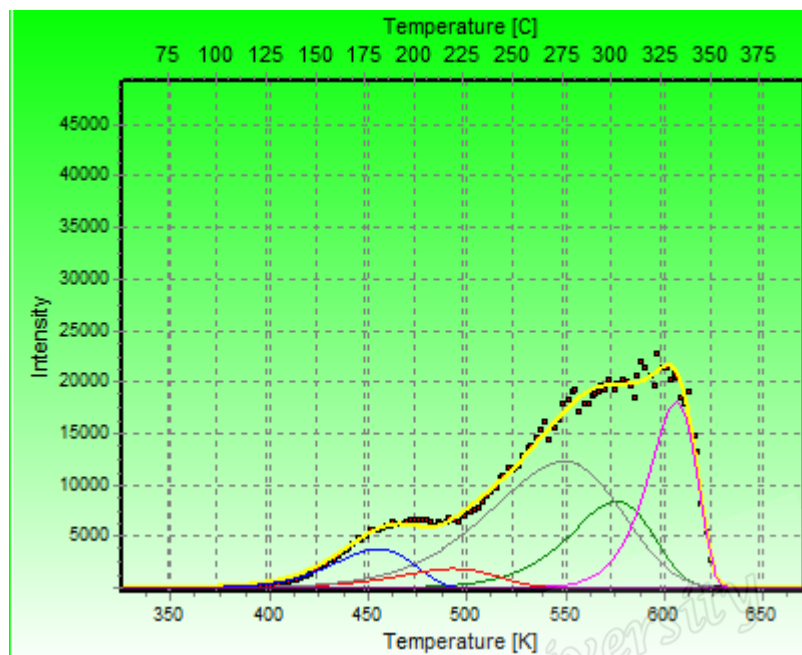
ภาคผนวก ก.5 รายละเอียดโพลีเมอร์ไฟฟ้าของตัวอย่างซากหอยน้ำจืด



ภาพที่ ก.5.1 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH1



ภาพที่ ก.5.2 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH2



ภาพที่ ก.5.3 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SH3

ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

- ข.1 บทคัดย่อ (Abstract) จากการเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์แบบ บรรยายในงานการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 5 “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อขับเคลื่อนสู่ประเทศไทย 4.0” ประจำปี 2560 ณ โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพมหานคร วันที่ 25 พฤษภาคม 2560

Prince of Songkla University
Pattani Campus

การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (AD) ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ของซากหอยน้ำจืดที่ขนาดต่างกัน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา

ดาเวียห์ อาแด* และ อิดารัตน์ วิชัยดิษฐ์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

*ผู้ประสานงานหลัก อีเมล: daweeyahardae@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสม(AD) ของซากหอยน้ำจืดที่มีขนาดต่างกัน ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำทวดตา ทวดยาย จังหวัดสงขลา ในประเทศไทย เลือกช่วงอุณหภูมิในการทดสอบสองที่ดีที่สุดที่ 350°C ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างหอยขนาด 90 -150 ไมครอน มีปริมาณรังสีสะสม(AD) ที่ -3.2 เกรย์ และตัวอย่างหอยขนาด 150 -212 ไมครอน มีปริมาณรังสีสะสม(AD) ที่ -3.5 เกรย์ สรุปได้ว่าปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างหอยน้ำจืดทั้งสองขนาดมีค่าไม่แตกต่างกัน คิดเป็นร้อยละความแตกต่าง 4.3

คำสำคัญ: เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ หอย ปริมาณรังสีสะสม ขนาดต่างกัน

The Analysis of Accumulated Dose(AD) by Thermoluminescence Technique Of Freshwater Shells with Different Sizes From Tughute Ta Tughute Yai Historical Cave at Songkhla Province

Daweeyah Ardae*, Tidarut Vichaidid

Applied physics, Science and technology

Prince of Songkla University, Pattani 94000, THAILAND.

Daweeyah Ardae E-mail: daweeyahardae@gmail.com

Abstract

The present paper analyzed Accumulated Dose(AD) by Thermoluminescence technique of Freshwater Shells with different sizes from Tughute Ta Tughute Yai Historical cave at Songkhla province Thailand. The selection of the temperature response at 350°C . The results obtained from thermoluminescence reader were shown the different rang of the results, 90–150 micron showed AD is -3.2 Gy and 150–212 micron showed AD is -3.5 Gy. Those two percentage difference AD is 4.3 percentage.

Keywords: Thermoluminescence , Shells, Accumulated Dose, different sizes

1. บทนำ

ในปัจจุบันการกระบวนกรทางวิทยาศาสตร์เริ่มเข้ามามีบทบาทอย่างมากในการใช้อธิบายความรู้ความเข้าใจให้กับมนุษย์เราในปัจจุบันและในอนาคตที่ข่าวสารจะมีการเปลี่ยนแปลงในเชิงของการอธิบายด้วยหลักการและเหตุผลกันมากขึ้น ซึ่งแตกต่างไปจากอดีตที่ใช้วิธีการคาดคะเนมากกว่ากระบวนการที่แน่นอน งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ใช้หลักการเหตุผลทางวิทยาศาสตร์มาประกอบการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างหอยน้ำจืดที่เก็บได้ในบริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตาวทยา จังหวัดสงขลา ซึ่งตั้งอยู่ที่บ้านเกาะยาง หมู่ 7 ตำบลเขาแดง อำเภอสะบ้าย้อย จังหวัดสงขลา โดยผลการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมนี้สามารถวิเคราะห์หาได้จากเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Ikeya, 1993) ซึ่งยังถือว่าเทคนิคนี้ยังเป็นเทคนิคที่มีผู้เผยแพร่ยังไม่มากและเหมาะสมกับตัวอย่างประเภทที่มีองค์ประกอบของแร่ควอตซ์อยู่ โดยตัวอย่างเหล่านี้เป็นหลักฐานที่พบได้ตามแหล่งศึกษาโบราณคดีต่าง ๆ ของประเทศไทยได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้หลักการจากเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์นี้จะไปสนับสนุนข้อมูลประกอบจากการศึกษาทางโบราณคดีได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุผลนี้เองที่ได้มีการนำเอาความรู้ในส่วนนี้มาประยุกต์ร่วมกับงานด้านเทคโนโลยีที่คาดว่าจะมีการพัฒนาอย่างก้าวไกลในอนาคต ในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดเพื่อนำไปสู่การหาปริมาณรังสีสะสมต่อไป โดยสนใจการเปรียบเทียบปริมาณรังสีสะสมในตัวอย่างต่างขนาด เพื่อแสดงให้เห็นว่าสามารถเลือกข้อมูลได้จากทั้งสองขนาดในการหาปริมาณรังสีสะสมเพื่อใช้ในการกำหนดอายุ

งานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศทั่วโลกจำนวนมากปรากฏหลักฐานและข้อมูลที่ศึกษาว่าเป็นงานหรือตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับงานด้านธรณีวิทยา เช่นมีการศึกษาวิธีการหาปริมาณรังสีสะสมด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของเครื่องปั้นดินเผาในโซนปริมิต ประเทศอียิปต์โดย SEKKINA et al. (2002) ข้อมูลจากงานวิจัยที่เป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับงานด้านธรณีวิทยาและด้านโบราณคดี อีกทั้งยังมีงานวิจัยการศึกษาการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของเม็ดคาร์บอนที่ละเอียดของงานเซรามิกโบราณโดย Galli et al. (2006) และ Weida, W. (2009) ยังสนับสนุนการใช้เทคนิคนี้สำหรับชิ้นงานที่เป็นพวกคาร์บอนอีกด้วย ซึ่งปัจจุบันเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ให้ผลที่ได้รับที่ยืนยันถึงผลการคำนวณที่มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำ เมื่อไม่นานมานี้งานวิจัยการศึกษาผลการเปรียบเทียบการตอบสนองสัญญาณ TL จากลักษณะที่หลากหลายของแร่ควอตซ์ในธรรมชาติของประเทศบราซิลโดย Michel de Brito and Watanabe (2012) พบว่าช่วงอุณหภูมิของการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของแร่ควอตซ์แต่ละสี มีบางช่วงอุณหภูมิที่มีการตอบสนองที่ตรงกัน และบางช่วงอุณหภูมิของการตอบสนองที่แตกต่างกัน เกิดจากโครงสร้างของผลึกที่แตกต่างกันของแร่ควอตซ์แต่ละสี พบว่ามีงานวิจัยจำนวนมากที่สนับสนุนการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมที่เป็นส่วนสำคัญในการกำหนดอายุในตัวอย่างซากหอยน้ำจืดที่มีแร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบเหมาะสมกับเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมในการนำข้อมูลนี้ไปใช้ในการกำหนดอายุต่อไปได้ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ D'Oca et al. (2008) ที่แสดงการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมในพวกเครื่องเคลือบด้วย เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่วัดผลปล่อยรังสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น เมื่อผลึกอบด้วยรังสีที่ก่อไอออนจนอิเล็กตรอนในผลึกมีค่าพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานในชั้นเวเลนซ์แบนด์ (Valence band) อิเล็กตรอนจะแพร่ขึ้นไปอยู่ในชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction band) และถูกดักจับไว้ในหลุมกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ปริมาณของอิเล็กตรอนในหลุมกับดักจะเป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ได้รับและเมื่อนำผลึกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในหลุมกับดักมากระตุ้นด้วยความร้อน ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในหลุมกับดักหลุด ออกมาและกลับสู่ชั้นเวเลนซ์แบนด์อีกครั้ง พร้อมกับปลดปล่อยแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light)

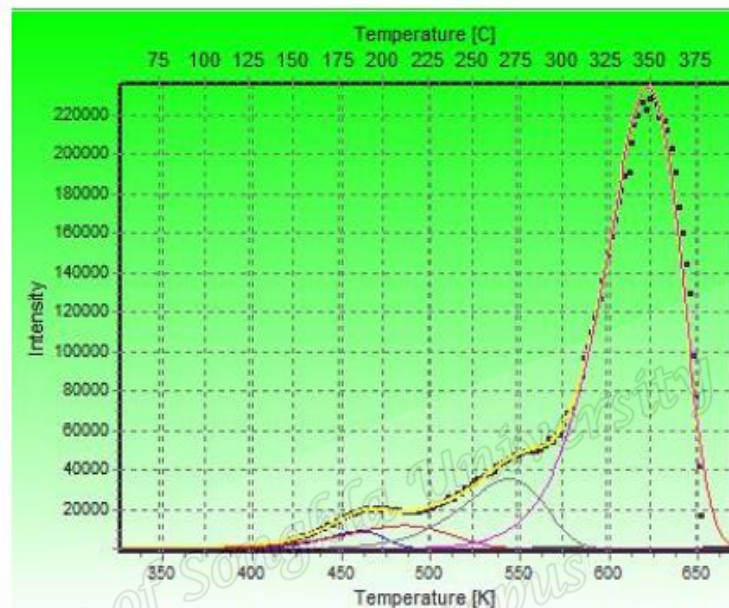
ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม(Accumulated Dose, AD) ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดที่ขนาดต่างกัน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตาวทยา จังหวัดสงขลาด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เพื่อนำผลการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม ในการกำหนดอายุต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

เก็บตัวอย่างซากหอยที่ใช้ในการหาปริมาณรังสีสะสม โดยสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากรกระทรวงวัฒนธรรม จากนั้นนำตัวอย่างซากหอยทำความสะอาด แช่ในกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl) ทำการบดตัวอย่างหอยที่แห้งแล้วด้วยครกบด ร่อนผ่านตะแกรงร่อน ให้มีขนาด 90-150 ไมครอน และ 150-212 ไมครอน อาบริ่งสีแถมมาจากต้นกำเนิด Co-60 จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (AD) ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของตัวอย่างหอยทั้งสองขนาด พบว่าอุณหภูมิที่ตอบสนองได้ดีอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ 350° ซึ่งได้จากการนำผลของการตอบสนองด้วยสัญญาณ TL ของตัวอย่างหอยแต่ละขนาด เข้าโปรแกรมโกลว์ฟิต ในการอ่านค่า TL intensity ของแต่ละอุณหภูมิ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกช่วงการตอบสนองของอุณหภูมิที่ 350° เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม(AD)

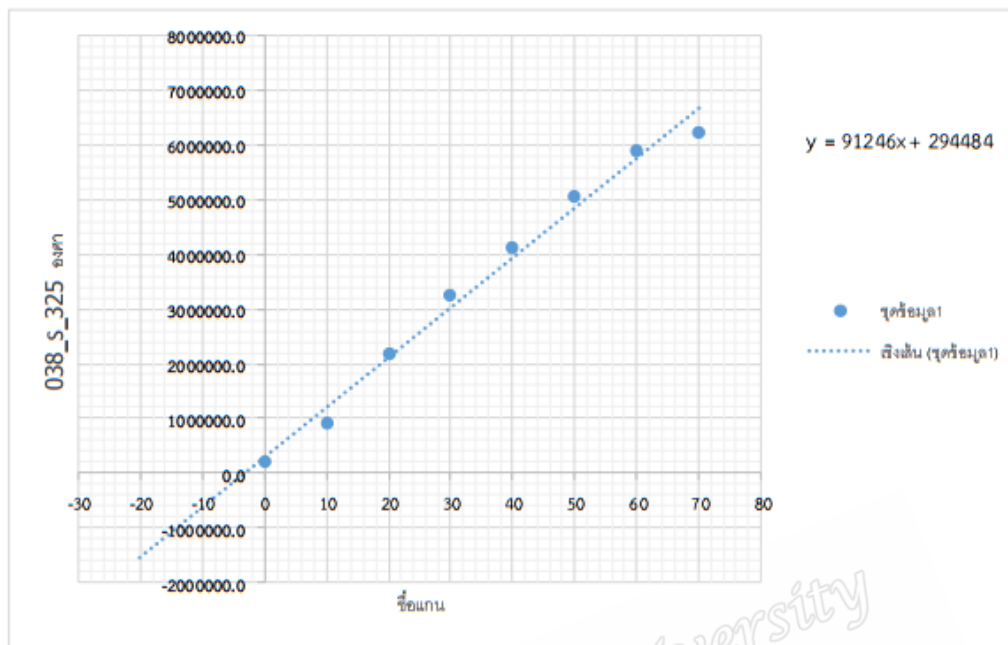


รูปที่ 1 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนที่แสดงผลของโกลว์ฟิต

จากนั้นนำค่าความเข้มแสงสัญญาณ TL ของแต่ละปริมาณการโดสรังสีที่ได้ เขียนกราฟเชิงเส้น แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TL intensity (au.) กับปริมาณการโดสรังสีแกมมา (Gy) ที่อุณหภูมิ 350° โดยให้แกน x แสดงค่าโดสรังสีแกมมาต่าง ๆ (Gy) และให้แกน y แสดงค่า TL intensity (au.) ดังรูปที่ 2 และ 3 ทั้งนี้กราฟเส้นตรงที่ได้สามารถวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟที่ได้ ทั้งนี้ผลของจุดตัดแกน x ที่ได้นำไปใช้ในการหาปริมาณรังสีสะสมต่อไป

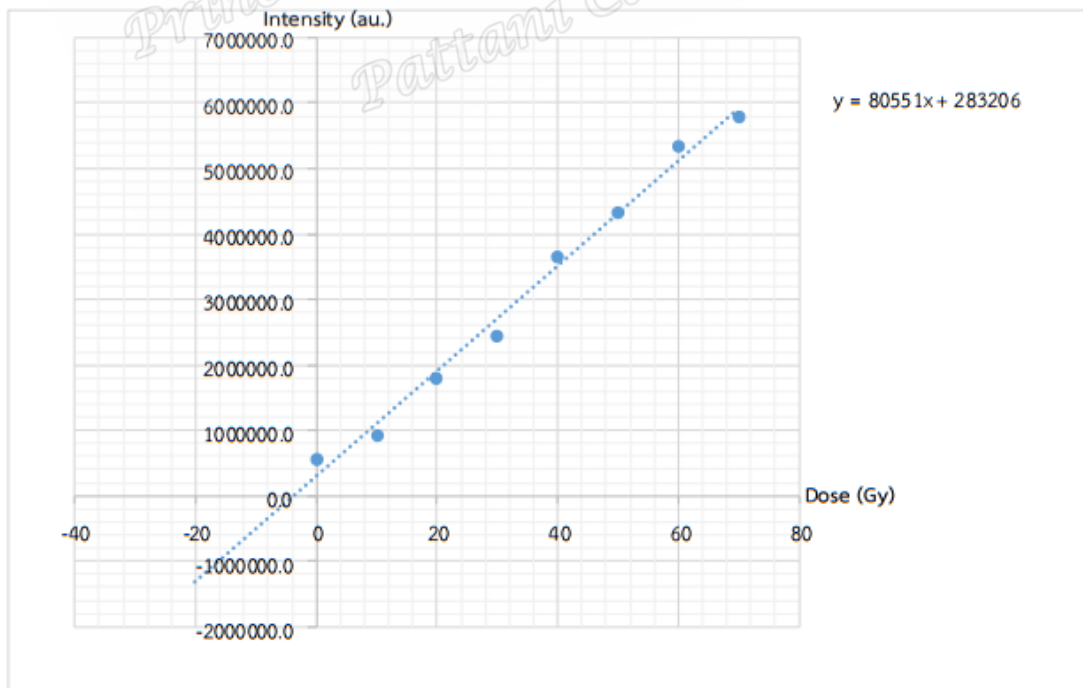
ที่อุณหภูมิ 350°

Intensity (au.)



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับความเข้มสัญญาณ TL ของตัวอย่างหอยขนาด 90-150 ไมครอน

ที่อุณหภูมิ 350°



รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Dose กับความเข้มสัญญาณ TL ของตัวอย่างหอยขนาด 150-212 ไมครอน

เมื่อนำผลการวิเคราะห์ตัวอย่างหอยจากความสัมพันธ์ระหว่าง TL intensity (au.) กับปริมาณการโดสรังสีแกมมา (Gy) ที่อุณหภูมิ 350° เพื่อหาค่า AD พบว่ากราฟเส้นตรงของตัวอย่างหอยที่ขนาด 90-150 ไมครอน มีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงสมการ $y = 91246x + 294484$ และกราฟเส้นตรงของตัวอย่างหอยที่ขนาด 150-212 ไมครอน มีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงสมการ $y = 80551x + 283206$

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose, AD) ของตัวอย่างหอย

ขนาดตัวอย่าง (ไมครอน)	ค่า AD (Gy)
90-150	-3.23
150-212	-3.52

จากสมการของกราฟที่ได้ข้างต้นของตัวอย่างหอยทั้งสองขนาด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า AD ได้ดังตารางที่ 3 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ค่า AD ของตัวอย่างทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกัน คิดเป็นร้อยละความแตกต่างที่ 4.3 โดยปริมาณรังสีสะสมที่ได้ของทั้งสองขนาดเป็นช่วงขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการศึกษากำหนดอายุตัวอย่างต่อไป

4. สรุป

จากการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างหอยขนาด 90-150 ไมครอน และ 150-212 ไมครอน ซึ่งเลือกช่วงอุณหภูมิในการตอบสนองที่ดีที่สุดที่ 350°C ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างหอยขนาด 90-150 ไมครอน มีค่า AD ที่ -3.2 เกรย์ และตัวอย่างหอยขนาด 150-212 ไมครอน มีค่า AD ที่ -3.5 เกรย์ คิดเป็นร้อยละความแตกต่างที่ 4.3 โดยปริมาณรังสีสะสมที่ได้ของทั้งสองขนาดเป็นช่วงขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมต่อการศึกษากำหนดอายุตัวอย่างต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จาก ผศ.ดร. อติรัตน์ วิชัยดิษฐ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ไข ปัญหาต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนงานวิจัยนี้ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณนักโบราณคดีชำนาญการและนายช่างสำรวจปฏิบัติงาน สำนักศิลปากรที่ 13 กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม ที่ช่วยกรุณาสำรวจและเก็บตัวอย่างซากหอยน้ำจืดบริเวณ งบประมาณคดีถ้ำหวดตา หวดยาย จังหวัดสงขลา

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยรังสีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานี ที่ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี รวมถึงพี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงาน ตลอดมา ท้ายนี้ขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในงานครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] De Brito, T. and Watanabe, S. 2012. A comparative study of the thermoluminescence properties of several varieties of Brazilian natural quartz. *Journal of Luminescence*. 132(10), 2684-2692.
- [2] D'Oca, M.C., Bartolotta, A., Cammilleri, C., Giuffida, S., Parlato A. and Di Stefano V. 2008. The additive dose method for dose estimation in irradiation oregano by thermoluminescence technique. *Food Control* 20(3), 304-306.
- [3] Galli, Marco Martini, Cinzia Montanari, Laura Panzeri and Emanuela Sibilia, 2006. TL of fine-grain samples from quartz-rich archaeological ceramics : Dosimetry using the 110 and 210°C TL peaks. *Radiation Measurements*, 41 ,1009-1014.
- [4] Ikeya, M. 1993. New Applications of Electron Spin Resonance Dating. *Dosimetry and Microscopy*. Singapore: World Scientific.
- [5] SEKKINA, M.A., EL FIKI, M.A., NOSSAIR, S.A. and KHALIL, N.R. 2002. Thermoluminescence archaeological dating of pottery in the egyptian pyramids zone. *Ceramics-Silikaty* . 47(3), 94-99.

การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 5
ASTC2017: The 5th Academic Science and Technology Conference 2017
วันที่ 25 พฤษภาคม 2560

- [6] WeiDa, W. 2009. Study and progress of the thermoluminescence dating of the ancient pottery and porcelain. *Sci China Ser E-Tech Sci.* 52(6), 1613-1640.

*Prince of Songkla University
Pattani Campus*

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวดาวิยะห์ อาแด

รหัสนักศึกษา 5520320806

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ศึกษาศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา

1. ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ทุนอุดหนุนงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ดาวิยะห์ อาแด และธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ. 2560. การวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสม (AD) ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดที่ขนาดต่างกัน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตา หวดยาย จังหวัดสงขลา. การประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 5. โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพมหานคร, กรุงเทพมหานคร, 25 พฤษภาคม 2560, 243-248.