



การหาอายุของตะกอนดินรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา
ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์
Sedimental Dating of Historical Wall, Songkhla Province
Using Thermoluminescence Technique

อุมมอัยมาน มะดีเยาะ
Ummuaiman Madiyah

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การหาอายุของตะกอนดินรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา
ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ผู้เขียน นางสาวอุมมอัยมาน มะดีเยาะ

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศ นาวารัตน์) (รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช ชิตตระกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ์) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศ นาวารัตน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พวงทิพย์ แก้วทับทิม)

.....กรรมการ
(ดร.สมหมาย ช่างเขียน)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้ารุ่งแสง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรณิศ นาวารัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นางสาวอุมมอัยมาน มะดีเยาะ)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นางสาวอุมมอัยมาน มะดีเยาะ)

นักศึกษา

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ชื่อวิทยานิพนธ์	การหาอายุของตะกอนดินรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์
ผู้เขียน	นางสาวอุมมุอัยมาน มะดีเยาะ
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

แหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา ทางภาคใต้ของประเทศไทย เป็นหนึ่งในพื้นที่ ซึ่งพบหลักฐานทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้มุ่งไปที่การหาอายุตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งผลจากการวัดพบว่าปริมาณรังสีสะสมต่อปีของตัวอย่าง SK012, SK013, SK016, SKTP1 และ SKTP2 เท่ากับ 64.595 ± 3.06 mGy/y, 55.892 ± 1.00 mGy/y, 68.251 ± 0.33 mGy/y, 77.085 ± 2.06 mGy/y และ 62.898 ± 1.47 mGy/y ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์หาค่าปริมาณโดสรังสีสะสมที่สอดคล้องอยู่ที่อุณหภูมิ 175°C ของตัวอย่าง SK012, SK013, SK016, SKTP1 และ SKTP2 ได้ 13.00 ± 0.88 Gy, 11.37 ± 1.54 Gy, 14.31 ± 0.35 Gy, 15.02 ± 0.28 Gy และ 13.60 ± 1.46 Gy ตามลำดับ ซึ่งผลการวัดดังกล่าวนำไปหาอายุของตัวอย่าง SK012, SK013, SK016, SKTP1 และ SKTP2 ได้ผลเป็น 201 ± 025 years, 203 ± 042 year, 210 ± 067 years, 195 ± 084 years และ 216 ± 023 years ตามลำดับ ผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการรายงานของสำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม ที่ได้รายงานอายุเฉลี่ยไว้ที่ 180 ± 36 years ด้วยเทคนิคคาร์บอน-14

Thesis Title	Sedimental Dating of Historical Wall, Songkhla Province Using Thermoluminescence Technique
Author	Miss Ummuaiman Madiyah
Major Program	Applied Physics
Academic Year	2017

ABSTRACT

Historical Wall located in Songkhla Province, Thailand is the one of many regions where plenty of archaeological evidence was discovered. This research concerned about the determination of the archaeological age of sediment collected at the Historical Wall by thermoluminescence technique. The measurement results showed that the average annual doses of SK012, SK013, SK016, SKTP1 and SKTP2 were 64.595 ± 3.06 mGy/y, 55.892 ± 1.00 mGy/y, 68.251 ± 0.33 mGy/y, 77.085 ± 2.06 mGy/y and 62.898 ± 1.47 mGy/y, respectively. While the analysis in terms of accumulative doses at 175°C displayed that SK012, SK013, SK016, SKTP1 and SKTP2 were 13.00 ± 0.88 Gy, 11.37 ± 1.54 Gy, 14.31 ± 0.35 Gy, 15.02 ± 0.28 Gy and 13.60 ± 1.46 Gy, respectively. The measurements were then used to deduce the archaeological age of SK012, SK013, SK016, SKTP1 and SKTP2. The outcome were 201 ± 025 years, 203 ± 042 years, 210 ± 067 years, 195 ± 084 years and 216 ± 023 years, respectively. The results were comparable to 180 ± 36 years as measured by using carbon 14 by the fine art department ministry of culture (Songkhla office).

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรณิศ นาวารัตน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิดารัตน์ วิชัยดิษฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้ง 2 ที่ให้คำแนะนำ ชี้แนะ แนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ คุณ มนูญ อ่องทวีสุข แผนกวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การช่วยเหลือด้านเครื่องมือในการทดสอบต่าง ๆ

ขอขอบคุณนักโบราณคดีและนายช่างสำรวจปฏิบัติงาน สำนักงานศิลปากรที่ 13 กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรมที่ช่วยสำรวจและเก็บตัวอย่างดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลา

ขอขอบคุณ ไชนั๊บ ดอเลาะ สำหรับการช่วยเหลือและคำแนะนำตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ขอขอบพระคุณบุคลากร รวมทั้งนักศึกษา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือ งานวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดมา อีกทั้งขอขอบคุณกำลังใจที่สำคัญจากครอบครัว และเพื่อน ๆ ที่น่ารักทุกคน ทำให้นี้ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือของการทำงานครั้งนี้

อุมมูอัยมาน มะดีเยาะ

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(12)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1.3 วัตถุประสงค์	9
บทที่ 2 ทฤษฎี	10
2.1 กระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	10
2.1.1 การดูดกลืนพลังงานจากการแผ่รังสีทางนิวเคลียร์	10
2.1.2 การกักพลังงานที่ดูดกลืนมา	10
2.1.3 กระบวนการสุดท้าย	10
2.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	12
2.3 การฉายรังสีแบบวิธีย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Additive dose method)	13
2.4 กราฟปรับเทียบ (Calibration Curve)	14
2.5 ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of Sediment)	15
2.5.1 กลุ่มแร่ควอทซ์ (Quartz)	15
2.5.2 กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar)	15
2.6 เครื่องมือวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	16
2.6.1 หัววัดชนิดหลอดทวิคูณแสง	16
2.6.2 ถาดความร้อนชนิดใช้ไฟฟ้า	16
2.7 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุวัสดุ	16
2.7.1 การกำหนดอายุวัสดุที่ได้รับความร้อน	16
2.7.2 การกำหนดอายุของตะกอนดิน	17
2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของตัววัดรังสี	19
2.9 การคัดเลือกสัญญาณที่มีความเสถียรตลอดช่วงอายุแร่	19

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง		หน้า
บทที่ 2	2.10 ปฏิกริยาของรังสีแกมมากับหัววัดรังสี	20
	2.10.1 ปฏิกริยาโฟโตอิเล็กทริก	20
	2.10.2 ปฏิกริยาคอมพ์ตัน	20
	2.10.3 ปฏิกริยาการผลิตคู่	21
	2.11 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี	21
	2.11.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี	22
	2.12.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน	22
	2.10.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว	23
	2.10.4 ปริมาณรังสีสมมูล	23
	2.12 หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ	23
	2.13 ระบบหัววัดรังสี	24
	2.13.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง	26
	2.13.2 ภาชนะยาส่วหน้า	26
	2.13.3 ภาชนะยาส่วหลัก	26
	2.13.4 วงจรวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง	26
	2.14 คุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด	25
	2.14.1 รังสีแอลฟาหรืออนุภาคแอลฟา	25
	2.14.2 รังสีบีตาที่มีประจุบวกและมีมวลน้อย	25
	2.14.3 รังสีแกมมาและรังสีเอกซเรย์	26
	2.14.4 รังสีนิวตรอนหรืออนุภาคนิวตรอน	26
	2.15 กัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ	26
	2.16 พิสัย และสมบัติของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา	29
	2.16.1 รังสีแอลฟา	29
	2.16.2 รังสีเบต้า	30
	2.16.3 รังสีแกมมา	30
	2.17 ปริมาณรังสีภายใน และปริมาณรังสีภายนอก	30
	2.17.1 ปริมาณรังสีภายนอก	30
	2.17.2 ปริมาณรังสีภายใน	30
	2.18 การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	31
	2.19 สถานที่ตั้งที่เก็บตัวอย่างวิจัย	33

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ และวิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุและสารเคมี	37
3.1.1 กรดไฮโดรคลอริก	37
3.1.2 กรดไฮโดรฟลูออริก	37
3.1.3 กรดแอสติก	37
3.1.4 ของเหลวความถ่วงจำเพาะสูง	37
3.1.5 น้ำกลั่น	37
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.2.1 เครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ รุ่น Harshow-3500	37
3.2.2 ระบบฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60	37
3.2.3 สารรังสีมาตรฐาน (Standard Radiative source)	37
3.2.4 เครื่องชั่งอย่างละเอียด 0.0001 กรัม	37
3.2.5 เครื่องปั่นแยกเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)	37
3.2.6 เครื่องล้างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner)	37
3.2.7 ครกบดสาร (Mortar)	37
3.2.8 หลอดหยด (Dropper)	37
3.2.9 ปีกเกอร์ (Beaker)	37
3.2.10 ตะแกรงร่อนตัวอย่างขนาด 150 μm	37
3.3 วิธีการทดลอง	38
3.3.1 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง	38
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	42
3.3.3 การวัดปริมาณรังสีสะสมต่อปี	44
3.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของ ^{40}K ^{238}U และ ^{232}Th	45
3.3.5 ขั้นตอนการวัดปริมาณรังสีสะสม	45
3.3.6 ผลจากการวิเคราะห์หาค่าอายุ	47
3.3.7 การคำนวณหาค่าอายุ	47

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย	48
4.1 ผลการวัดปริมาณกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในตัวอย่าง	48
4.2 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีจากการวิเคราะห์โดยใช้หัววัดชนิด เจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)	49
4.3 ผลการคำนวณปริมาณรังสีต่อปี	49
4.4 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของแต่ละตัวอย่าง	50
4.4.1 กราฟ Glow Curve	50
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม โกลว์ฟิต	53
4.4.3 กราฟปรับเทียบ (Calibration Curve)	54
4.5 ผลการกำหนดอายุตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์ จังหวัดสงขลาด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	64
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	65
5.1 ลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	65
5.2 ปริมาณโดสรังสีสะสม (Accumulated dose)	65
5.3 ปริมาณโดสรังสีต่อปี (Annual dose)	66
5.4 อายุของตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลา	66
5.5 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก	71
ประวัติผู้เขียน	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 วิธีการกำหนดอายุตัวอย่างทางธรณีวิทยาและโบราณคดีชนิดต่างๆ (Aitken, 1990)	3
2.1 หน่วยของปริมาตรต่างๆทางรังสี	21
2.2 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม (Ikeya, 1993)	27
2.3 อนุกรมการสลายตัวพลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมทอเรียม (Ikeya, 1993)	28
3.1 ตำแหน่งตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่างในแต่ละหลุม	40
4.1 ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในตะกอนดิน	49
4.2 ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างตะกอนดิน	49
4.3 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK012 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่างๆ	55
4.4 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK013 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่างๆ	57
4.5 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK016 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่างๆ	59
4.6 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK016 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่างๆ	61
4.7 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SKTP2 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่างๆ	63
4.8 อายุของตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา	64
5.1 เปรียบเทียบของการหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับวิธีทางโบราณคดี	66

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ช่วงอายุโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Colman, Pierce, and Birkeland, 1987; Colman and Pierce, 2000).	2
1.2 ค่าความผิดพลาดโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุ	3
2.1 กระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (ที่มา: Aitken, 1985)	11
2.2 การตอบสนองของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างผลึกในแต่ละอุณหภูมิ	13
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับโดสรังสีแกมมาแบบวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (a) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (b) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบอิมตัว (Ikeya, 1993)	14
2.4 ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	16
2.5 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุวัสดุที่ได้รับความร้อน (Featers, 2003)	17
2.6 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุของตะกอนดิน โดยแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนที่ฝังตัวในหลุมกักเก็บและเวลา (Won-in, 2003)	18
2.7 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน	20
2.8 การเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตัน (Phil, 2010)	20
2.9 การเกิดปรากฏการณ์แพโรโปรดักชัน	21
2.10 หัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)	23
2.11 การสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา (Czarnecki, 2009)	25
2.12 การสลายตัวให้รังสีเบตา	25
2.13 การสลายตัวให้รังสีแกมมา	26
2.14 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีโพแทสเซียม	29
2.15 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, g/cm^3) ของควอทซ์	32
2.16 ผังเมืองโบราณสงขลาที่มีกำแพงโดยรอบ	33
2.17 ตำแหน่งที่ตั้งของกำแพงเมืองสงขลา	34
2.18 กำแพงเมืองสงขลาพังทลายบางส่วน	36
2.19 ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง	36
3.1 ตัวอย่างการเก็บตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา	38

สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.2 รายละเอียดการทำการชูดัชนีแหล่งโบราณคดี	39
3.3 แผนผังหลุมชูดัชนี	40
3.4 ลักษณะผนังชั้นดินของหลุมชูดัชนี	41
3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง	42
3.6 การเตรียมตัวอย่าง	43
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกับพลังงานต่าง ๆ	44
3.8 สเปกตรัมของสารรังสีมาตรฐาน ^{40}K , ^{238}U และ ^{232}Th	45
3.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Glow Fit	46
3.10 กราฟปรับเทียบ (Calibration Curve)	47
4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน ยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม	48
4.2 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอบรังสีของตัวอย่าง ตะกอนดิน (SK012) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา	50
4.3 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอบรังสีของตัวอย่าง ตะกอนดิน (SK013) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา	51
4.4 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอบรังสีของตัวอย่าง ตะกอนดิน (SK016) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา	51
4.5 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอบรังสีของตัวอย่าง ตะกอนดิน (SKTP1) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา	52
4.6 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอบรังสีของตัวอย่าง ตะกอนดิน (SKTP2) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา	52
4.7 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ Glow Curve ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิ เป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง	53
4.8 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK012 เมื่อ (a) $153\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$	54
4.9 ค่า AD ของตัวอย่าง SK012 ที่อุณหภูมิ $175\text{ }^{\circ}\text{C}$	55
4.10 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK013 เมื่อ (a) $153\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$	56
4.11 ค่า AD ของตัวอย่าง SK013 ที่อุณหภูมิ $175\text{ }^{\circ}\text{C}$	57
4.12 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK016 เมื่อ (a) $153\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b) $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c) $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ (d) $250\text{ }^{\circ}\text{C}$	58

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SKTP1 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C	60
4.15 ค่า AD ของตัวอย่าง SKTP1 ที่อุณหภูมิ 175 °C	61
4.16 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SKTP2 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C	62
4.17 การตอบสนองต่อการรับรังสีที่ระดับโดสต่างๆของตัวอย่าง SKTP2	63

Prince of Songkla University
Pattani Campus

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเคยเป็นแหล่งวิวัฒนาการของพืชและสัตว์ยุคดึกดำบรรพ์ ซึ่งเป็นแหล่งโบราณคดีที่พบว่ามนุษย์อาศัยอยู่มาตั้งแต่โลกดึกดำบรรพ์ จากหลักฐานสำคัญที่ค้นพบมีอายุเก่าแก่และจากเหตุการณ์ต่างๆ ในอดีตเกิดเป็นแหล่งโบราณคดีซึ่งมีเรื่องเล่าต่อ ๆ กันมาอย่างยาวนาน เรื่องเล่าดังกล่าวเกิดจากการบันทึกในอดีตและการสันนิษฐานของชาวบ้าน หรือจากกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ได้กลายเป็นประวัติศาสตร์ในปัจจุบันนี้ เช่นเดียวกันกับจังหวัดสงขลาที่มีแหล่งโบราณคดีมากมาย เช่น ป้อมของพระยาแขก เมืองสงขลาเก่า เมืองโบราณพังงายาง เป็นต้น กำแพงเมืองสงขลาถือเป็นโบราณสถานที่สำคัญของจังหวัดสงขลา อันเนื่องมาจากการย้ายศูนย์กลางเมืองสงขลาจากบริเวณตอนกลางคาบสมุทรสทิงพระ มาเป็นทางฝั่งตะวันออกของทะเลสาบสงขลา ในการย้ายเมืองดังกล่าว ได้สร้างกำแพงเมืองสงขลาเพื่อป้องกันข้าศึกจุกุกราน อีกทั้งเมืองสงขลาในสมัยนั้นเป็นเมืองศูนย์กลางทางการค้าขาย กำแพงเมืองสงขลาได้พังทลายลงบางส่วนจากภัยธรรมชาติในปลายปี พ.ศ. 2553 หลังจากนั้น 1 ปี สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา ได้ขุดค้นเพื่อตรวจสอบทางโบราณคดี ผู้วิจัยเห็นถึงความสำคัญในการวิเคราะห์หาค่าอายุตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองสงขลาเพื่อขยายองค์ความรู้ด้านประวัติความเป็นมาและรูปแบบศิลปกรรมกำแพงเมืองสงขลาซึ่งจะเป็นข้อมูลเชื่อมโยงทางประวัติศาสตร์ และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับประวัติศาสตร์ของเมืองสงขลา รวมถึงเป็นการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวเมืองสงขลาอีกด้วย

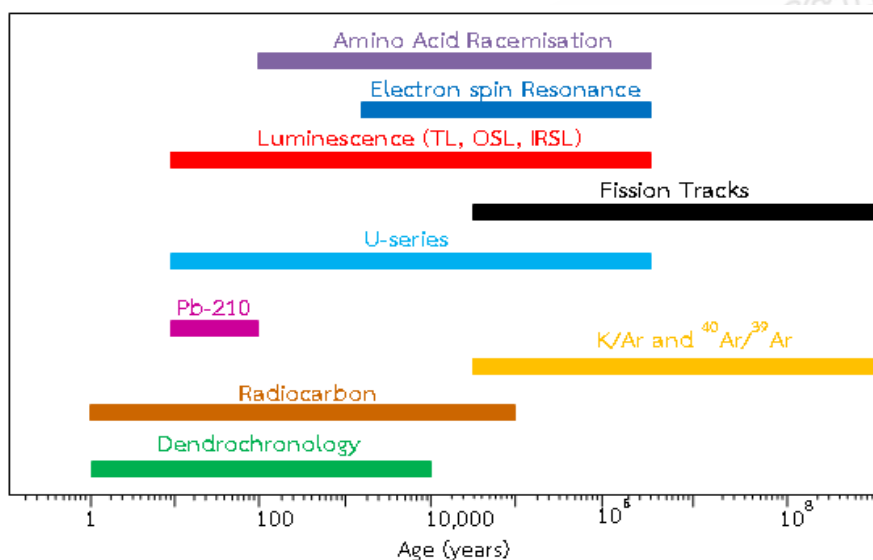
การนำเทคนิคการหาอายุทางวิทยาศาสตร์และกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทางนิวเคลียร์มาใช้จะทำให้การหาอายุได้เป็นที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เทคนิควิธีการกำหนดอายุตัวอย่างทางโบราณคดีและทางธรณีวิทยามีด้วยกันหลายเทคนิค เช่น เทคนิคการใช้คาร์บอน-14 (Radio carbon Dating), เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence Dating; TLD), เทคนิคการจัดเรียงตัวของแม่เหล็ก (Palaeomagnetic Dating), การนับวงปีต้นไม้ (Tree Ring or Dendro-chronology Dating), การกำหนดอายุโดยใช้แร่อบโซเดียน (Obsidian Dating), วิธีตรวจสอบอายุที่จมอยู่ในดิน (Varve Dating), วิธีวัดแบบสปินของอิเล็กตรอน (Electron Spin Resonance Dating; ESR), การกำหนดอายุโดยใช้โปแตสเซียม-อาร์กอน (Potassium-Argon Dating), วิธีนับรอยฟิชชัน (Fission Track Technique Dating)

โดยในการเลือกใช้วิธีการกำหนดอายุวัสดุนั้น มีปัจจัยสำคัญที่ควรคำนึงถึง 3 ประการ ที่ควรคำนึงดังนี้

1.1.1 ช่วงอายุที่เหมาะสม เนื่องจากการกำหนดอายุในแต่ละตัวอย่างนั้นมีศักยภาพในการกำหนดอายุอยู่ในช่วงอายุที่ต่างกัน สืบเนื่องจากข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค ดังภาพที่ 1.1

1.1.2 ค่าความผิดพลาดในแต่ละวิธีนั้นมีความผิดพลาดที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่ายอมรับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด ดังภาพที่ 1.2

1.1.3 ตัวอย่างที่นำมาศึกษา เนื่องจากตัวอย่างทางโบราณคดีและทางธรณีวิทยามีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละชนิดก็เหมาะกับเทคนิคการกำหนดอายุที่แตกต่างกันออกไป ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 ช่วงอายุโดยประมาณในแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Colman, Pierce, and Birkeland, 1987; Colman and Pierce, 2000).

- หมายเหตุ: * หมายถึง วัสดุนั้นไม่เหมาะสมกับการกำหนดอายุนั้นๆ
 ** หมายถึง ผลการกำหนดอายุบางครั้งน่าพอใจและบางครั้งไม่น่าพอใจ
 *** หมายถึง วัสดุนั้นสามารถกำหนดอายุกับวิธีการกำหนดอายุนั้นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือสูง

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์นับว่าเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ แม้จะเป็นวิธีที่ซับซ้อนก็ตาม แต่ก็เป็นเรื่องใหม่สำหรับงานด้านธรณีและโบราณคดีในประเทศไทย ข้อดีของการกำหนดอายุด้วยเทคนิคนี้คือ สามารถกำหนดอายุของการรับปริมาณรังสีสะสมได้จากตัวอย่างโดยตรง ซึ่งต่างจากเทคนิคอื่นและยังเป็นการกำหนดอายุโดยตรง และช่วงอายุที่กำหนดได้ ตั้งแต่ตัวอย่างที่มีอายุน้อยๆ ในหลักร้อยปีไปจนถึงหลักล้านปี ด้วยเหตุดังกล่าวผู้ทำวิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญของการกำหนดอายุตัวอย่างทางโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา ด้วยข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิคการกำหนดอายุที่แตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นด้านวัสดุที่สามารถใช้ในการกำหนดอายุหรือช่วงอายุของแต่ละเทคนิค อีกทั้งตัวอย่างทางโบราณคดีในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างละเอียดรอบคอบและมีความน่าเชื่อถือเท่าที่ควร จึงมีความสนใจจะศึกษาเทคนิควิธีการดังกล่าวและนำมาใช้ให้เกิดการพัฒนาด้านโบราณคดีและด้านธรณีวิทยาในอนาคต อันเป็นการให้ความรู้กับผู้ที่สนใจ และจะได้ตรวจสอบความถูกต้อง ความน่าเชื่อถือสำหรับข้อมูลทางด้านโบราณคดี (Archaeology) และทางธรณีวิทยา (Geological specimens) ของประเทศให้มีมาตรฐานสากลเพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีความเป็นไปได้ที่ถูกทำการจดบันทึกครั้งแรกโดย Robert Boyle ในปี ค.ศ. 1663 (McKeever, 1985) จากการเรืองแสงของเพชรขณะได้รับความร้อนจากนั้นในปี ค.ศ. 1895 พบว่าเริ่มมีการนิยามคำว่า “Thermoluminescence” ขึ้นมาใช้แทนกระบวนการที่ค้นพบโดยมีหลักฐานเช่นจากงานของ Wiedeman & Schmidt การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เริ่มมีมากในช่วงปี ค.ศ. 1940-1950 เช่นงานของ Randall & Wilkins, Garlick & Gibson เป็นต้น

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ พบว่ามีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้กับงานด้านต่างๆ ดังต่อไปนี้

สมหมาย และพวงพิทย์ (2545) การหาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผาด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ทำการวิเคราะห์หาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผาบริเวณเมืองโบราณยะรัง อ.ยะรัง จ.ปัตตานี โดยขึ้นตัวอย่างเป็นสลุปดินเผาและอิฐจากแหล่งขุดค้นทางโบราณคดี บ้านจาและหมายเลข 3 ทำการบดตัวอย่างให้มีขนาด 100-300 μ กัดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก 48 % แยกผลึกที่ไม่ต้องการออกโดยวิธีตกตะกอนในของเหลว ความถ่วงจำเพาะสูง ล้างทำความสะอาดผลึกควอทซ์ที่ได้นำไปอ่านการสะสมรังสีจากธรรมชาติด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Harshow, 2000) ผลการวัดปริมาณการปลดปล่อยแสงเมื่อผลึกถูกเผาจนร้อนที่อุณหภูมิสูงสุด 400 °C สลุปมีการสะสมรังสี 810 แรต และอิฐมีการสะสมรังสี 753 rad จากแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์ 60 นำตัวอย่างที่อาบรังสีแต่ละอย่างที่ทำรังสีแต่ละตัวอย่างอ่านค่าด้วยเครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดยทำการวัดค่าในห้องมืด ผลการวัดเมื่อสอบเทียบกับกราฟการอาบรังสีผลึกดังกล่าวกับรังสีแกมมา รังสีที่ผลึกได้รับจากธรรมชาติเป็น 1.4 ± 0.04 rad/y คำนวณหาอายุของสลุปและอิฐได้เท่ากับ 579 ± 17 y และ 538 ± 15 y ตามลำดับ เมื่อนำผลการวิจัยไปเปรียบเทียบกับวิธีการ ^{14}C dating แล้วผลไม่ต่างกัน แสดงว่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถใช้ในการกำหนดอายุได้

ศิริพงษ์ (2547) ศึกษาการหาอายุของอิฐจากกำแพงเมืองเชียงใหม่โบราณ โดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เป็นการหาอายุของอิฐจากกำแพงเมืองเชียงใหม่ด้วยวิธีการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดยอายุอิฐหาจากปริมาณรังสีสะสมของอิฐจากรังสีคอสมิกและสารกัมมันตรังสีที่ปะปนอยู่ในก้อนอิฐ วัดปริมาณรังสีสะสมจากเม็ดแร่เฟลด์สปาร์ ขนาด 200-900 μ ในก้อนอิฐกำแพงด้วยเครื่องวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โดยหัววัดรังสี TLD-300 วัดเป็นระยะเวลา 3 เดือน พบปริมาณรังสีต่อปีเท่ากับ 0.33 ± 0.07 cGy ใช้ปริมาณรังสีสะสมของอิฐและปริมาณรังสีต่อปีที่อิฐได้รับมาคำนวณอายุของอิฐ พบว่าอายุของอิฐจากกำแพงชั้นล่างก่อนต่างๆ คำนวณอายุได้ 600 ± 172 y และ 842 ± 227 y ส่วนอิฐจากกำแพงชั้นล่างก่อนต่างๆ คำนวณอายุเฉลี่ยได้ประมาณ 1127 ± 288 y และ 1112 ± 263 y คำนวณหาอายุเฉลี่ย จากการศึกษานี้

สรุปได้ว่า กำแพงเมืองเชียงแสนแต่ละชั้นถูกสร้างขึ้นในเวลาที่แตกต่างกัน โดยกำแพงเมืองชั้นล่างถูกสร้างก่อนชั้นบนประมาณ 400 y

สันติ (2547) ได้วิเคราะห์หาอายุตะกอนยุคควอเทอร์นารี ด้วยวิธีเปล่งแสงความร้อนและวิธีคาร์บอน-14 เทคนิคที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย 2 เทคนิค คือ ชนิดโททัลลิสซ์และรีเจเนอเรชันผลจากการวิจัยบ่งชี้ว่าปริมาณรังสีที่มีอยู่ในตัวอย่างตะกอนให้ค่าแตกต่างกันในแต่ละเทคนิค จากการประมวลผลพบว่า อายุที่กำหนดได้จากวิธีเปล่งแสงความร้อน และวิธีคาร์บอน -14 ให้ค่าอายุด้วยค่าที่ใกล้เคียงกัน การกำหนดอายุด้วยวิธีเปล่งแสงความร้อนมีข้อดีมากกว่ากำหนดอายุด้วยวิธีคาร์บอน -14 ในข้อจำกัดของช่วงอายุที่แต่ละวิธีนั้นสามารถกำหนดได้ โดยที่การหาอายุด้วยวิธีคาร์บอน -14 มีประสิทธิภาพเพียงช่วงอายุ 0-45,000 y ในขณะที่วิธีเปล่งแสงความร้อนนั้นสามารถกำหนดอายุได้ถึง 2 My ในตัวอย่างตะกอน และ 0.7 My ในตัวอย่างอุลทกมณี

รุสมาตี (2552) ศึกษาคุณสมบัติทางเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของทรายชายหาดจากฝั่งทะเลตะวันตกและตะวันออกของภาคใต้ประเทศไทยเพื่อประโยชน์ในการใช้ตรวจวัดปริมาณการรับรังสี (dosimeter) ผลของโกลว์เคฟิที่ได้ให้ผลแตกต่างกันขึ้นกับสารประกอบที่ปนเปื้อนในทราย เป็นการศึกษาคุณสมบัติการปลดปล่อยแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างทรายอาบรังสีจากแหล่งตัวอย่างฝั่งทะเลตะวันตกและตะวันออกของประเทศไทย ได้ศึกษาจากการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ในตัวอย่างทรายให้ผลที่ต่างกันสาเหตุมาจากมีสิ่งเจือปนแตกต่างกัน โดยสิ่งเจือปนที่ตรวจพบจากการวิเคราะห์ด้วยเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันคือเฟลสปาร์ ($KAlSi_3O_8$) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เมื่อวิเคราะห์ทรายตัวอย่างด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ มีธาตุองค์ประกอบแตกต่างกันในบางพื้นที่ และผลึกเจือปนทำให้ผลการวัดที่ได้มีค่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะตัวอย่างทรายจากหาดป่าตอง จ.ภูเก็ต (PK001) มีค่าแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ 1000 เท่าของค่าที่วัดได้จากซิลิกอนไดออกไซด์ และสรุปได้ว่าทรายสามารถใช้เป็นหัววัดรังสีปริมาณสูงได้เฉพาะในช่วงที่กราฟให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงเท่านั้น โดยค่าแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของควอเทอร์นารีได้จากยอดพีคที่อุณหภูมิ $220^{\circ}C$ และกราฟความสัมพันธ์ของค่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสีที่ตรวจวัดเป็นค่าเฉพาะของทรายจากแต่ละแหล่ง จากงานวิจัยพบว่าที่ปริมาณการอาบรังสีสูงๆ จะมีผลให้ค่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิ $220^{\circ}C$ ลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนที่กักเก็บในค่าอุณหภูมิดังกล่าวและไปเพิ่มอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บที่อุณหภูมิการวัด $390^{\circ}C$ มากขึ้นผลของกราฟที่อุณหภูมิ $220^{\circ}C$ จึงตกลงไป ส่วนสาเหตุของสารปนเปื้อนที่ได้กล่าวไว้จะอยู่ภายในผลึกควอเทอร์นารีโดยตรงหรือเป็นเพียงของผสมที่ไม่ได้คัดแยกออกจะต้องทำการศึกษาต่อไป เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้การคัดแยกสิ่งปนเปื้อนด้วยสายตาและล้างตัวอย่างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเท่านั้น นอกจากนี้ผลการวัดที่ได้จากงานวิจัยนี้ให้ผลสอดคล้องกับการวัดค่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ในตัวอย่างทรายอาบรังสีที่คัดแยกได้จากตะกอนน้ำทิ้งที่ผ่านการอาบรังสีเพื่อฆ่าจุลินทรีย์ตามงานวิจัยของ Benny and Bhatt (1996) ซึ่งอาบรังสีแกมมาจากโคบอลต์ 60 ที่โดสรังสี 6 kGy ซึ่งให้ค่าอุณหภูมิของยอดสเปคตรัมที่ $220^{\circ}C$ เช่นเดียวกันและยืนยันด้วยงานวิจัยของ Benny and Bhatt (1997) ซึ่งวิจัยยอดสเปคตรัมที่ $220^{\circ}C$ จากตัวอย่างควอเทอร์นารีที่คัดแยกจากทรายและถูกปรับสภาพให้มีความไวรังสี (sensitization)

สารีพีะ และธิดารัตน์ (2552) ได้ศึกษาผลการตอบสนองต่อการรับรังสีและการหาอายุ ด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในผลึกแร่ควอทซ์ที่มีอายุแตกต่างกันได้นำตัวอย่างทางโบราณคดีที่สถานที่ต่างกันซึ่งแต่ละตัวอย่างจะมีผลึกควอทซ์เป็นองค์ประกอบ เช่น 1.ชุดดินห้วยหลวงบริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 2.ศิลาแลงบริเวณปราสาทกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร 3.ศิลาแลงบริเวณปราสาทเมืองสิงห์ จังหวัดสิงห์บุรี 4.หินภูเขาไฟ จังหวัดลำปาง 5.อิฐบริเวณวังจะบังติกอ จังหวัดปัตตานี 6.อิฐบริเวณมัสยิดกรือเซะ จังหวัดปัตตานี เมื่อได้ผลึกควอทซ์แล้ว นำตัวอย่างไปอบรังสีแกมมา ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนที่ระดับอุณหภูมิสูงสุด 600°C ซึ่งจะอบรังสีปริมาณต่างๆกัน ได้แก่ อิฐจากมัสยิดกรือเซะอายุประมาณ 300 y จะบังติกออายุประมาณ 200 y หินภูเขาไฟลำปางอายุในช่วง 300-100 My ดินบริเวณเหมืองแม่เมาะอายุในช่วงประมาณล้านปี อายุประมาณ 1.8 - 0.01 My และศิลาแลงจากโบราณสถานกำแพงเพชรและเมืองสิงห์ ซึ่งมีอายุของศิลาประมาณ 5000 y จากผลการทดลองพบว่าจากการวิเคราะห์ดินบริเวณเมืองแม่เมาะ (SR) มีค่าสะสม 890 ± 199 Gy และ 480 ± 107 Gy และค่าอายุ 0.30 ± 0.06 Ma และ 0.16 ± 0.03 My ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สอดคล้องกับการค่าประมาณโดยวิธีทางธรณีวิทยา ซึ่งข้อมูลอยู่ในยุค Pleistocene อายุประมาณ 1.8 - 0.01 My

Hutt and Goksu (2000) ศึกษาการหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของแร่ควอทซ์ ที่อุณหภูมิ 210°C จากเศษอิฐที่บรรจุในเครื่องสักรະที่อยู่ในโบสถ์ Somero ประเทศฟินแลนด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบบางส่วนของอาคารก่อสร้าง นำมาใช้สำหรับการตรวจวัดรังสีทางโบราณคดี เพื่อหาอายุอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่มีส่วนประกอบของคอสมิก และอัตราปริมาณรังสีเบต้าของอิฐ การหาความแม่นยำของการวัด ด้วยวิธี TL และเทียบกับอายุทางโบราณคดีที่หวังไว้ การศึกษาทางโบราณคดีที่อุณหภูมิ 210°C จะสอดคล้องกับการหาอายุในช่วงอายุ 750 - 2000 y ที่อุณหภูมิ 210°C ซึ่งสอดคล้องกับอายุเฉลี่ยทางธรณีวิทยาของตัวอย่าง ประมาณ 450-500 y จากการศึกษาการกำหนดอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ มีความแตกต่างกัน อาจเกิดจากก่อนอิฐในการสร้างรูปแบบที่ต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดซึมน้ำที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ที่ได้ชี้ให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิ 210°C สามารถนำมาใช้ในทางโบราณคดี ในภูมิภาคที่มีการล้อมรอบอุณหภูมิเฉลี่ยต่อปี ประมาณ (4-5) $^{\circ}\text{C}$

Smith and Casey (2002) การใช้เทคโนโลยีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL โดยตรงในช่วงก่อนยุคเหล็กในเมือง Gambaga Escarpment ประเทศ Ghana การหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ของเม็ดควอทซ์ที่ได้จากผนังของโรงถลุงเหล็กสามโรง อยู่ในสถานที่ Birimi จากอายุ $1,080 \pm 70$ และ 1090 ± 60 y ในขณะที่โรงถลุงเหล็กที่สามมีอายุประมาณ 1600 ± 100 y

Veronese and Goksu (2007) ศึกษาการหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่อ่างอาบน้ำในพิธึศาสนายิว ในเมือง Ichenhausen ประเทศเยอรมนี การหาอายุทางโบราณคดีได้รับการคำนวณแบบซ้ำหลายๆตัว และใช้เทคนิคการหาอายุที่สกัดได้จากผลึกควอทซ์จากอิฐโดยใช้วิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ด้วยคำนวณผลของอัตราปริมาณรังสีต่อปีในผลึก โดยเก็บอิฐสามก้อนจากผนังทางด้านทิศเหนือ, ทิศตะวันออก และทางทิศใต้ของชั้นใต้ดินที่ได้ถูกเขย่ง โดยใช้วิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ที่อ่างอาบน้ำในพิธึศาสนายิวเป็น

ของโบสท์เก่าหรือถูกสร้างขึ้นในระหว่างการก่อสร้างบ้าน โดยทั่วไปตามธรรมชาติและเกิดการเรืองแสงของกราฟ glow curve ของสัญญาณ TL จากแร่ควอตซ์ที่ได้จากอิฐ นำไปเทียบกับ TL ค่าสูงสุดของอุณหภูมิต่ำ TL ไม่อยู่ในเส้นโค้งเรืองแสง กลุ่มตัวอย่างถูกอุ่นถึงอุณหภูมิ 170 °C อัตราความร้อน (2 °C/S) โดยการเปรียบเทียบรูปร่างของกราฟ glow curve แสงธรรมชาติกับรูปทรงของสารเติมแต่งที่สอดคล้องกับปริมาณรังสี 1.55 Gy ความร้อน ที่มีความเสถียรภาพ (ช่วงอุณหภูมิทั้งสองเส้นโค้งอัตราส่วนคงที่) สำหรับการวิเคราะห์คือ 280-350 °C. ผลของ D_{TL} การคำนวณผลรวมทั้งหมดมีความไม่แน่นอนในการคำนวณโดยคำนึงถึงทั้งข้อผิดพลาดและความไม่แน่นอนทางสถิติเทียบแหล่งรังสีเบต้าประมาณเท่ากับ 3% สำหรับอิฐ ผลสุดท้ายของการหาอายุด้วยวิธี TL การคำนวณหาอายุ อัตราปริมาณรังสีเนื่องจากรังสีคอสมิกได้รับการพิจารณาเท่ากับ 0.22 ± 0.01 mGy/y (Prescott and Hutton (1988) จากค่าเฉลี่ยของค่าสามค่าที่สอดคล้องกับแต่ละในปริมาณน้ำของ situ, อายุประมาณ 1797 ± 11 y การลดทอนเท่ากับ 1772 ± 16 y ได้มาจากการคำนวณได้ ดังนั้นพิจารณาจากน้ำอิมตัวสิ่งแวดล้อม หลักความไม่แน่นอนในการหาอายุของ TL เป็นเพราะความไม่แน่นอนในปริมาณน้ำของอิฐ ดังนั้นการแก้ไขปริมาณน้ำถูกนำมาใช้ในการคำนวณช่วงอายุที่เป็นไปได้ของอิฐ ผลจากการวัดรังสีด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL ในช่วงของอายุระหว่าง 1797 ± 11 y และ 1772 ± 16 y การคำนวณอัตราปริมาณรังสี สมมติว่าอิฐที่มีประมาณ 3% และน้ำ 15% ตามลำดับ

Vichaidid et al. (2008) ได้ศึกษาการกำหนดอายุของแร่อะราโกไนท์จากซากเปลือกหอยน้ำจืดในดินที่ตกตะกอนล่างสุด จากโรงงานไฟฟ้าเหมืองแม่เมาะ ทำการทดลองวิธี ESR พบว่าใช้งานสัญญาณที่ $g = 2.0016$ สอดคล้องกับ CO_2 จะรับปริมาณรังสีในธรรมชาติที่จะได้รับ ESR พบว่าอายุของแร่อะราโกไนท์จากซากเปลือกหอยประมาณ 11.32 ± 1.02 My ผลที่แสดงให้เห็นว่าอายุ ESR อยู่ในช่วงของยุคกลาง

Vaijapurkar et al. (1997) ได้ปลดปล่อยแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างทรายจาก Rajasthan ซึ่งวัดปริมาณรังสีแกมมา โดยดูลักษณะของโกลว์เคิฟมาเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐานระหว่าง 0.05-5.00 kGy

Kiyotaka et al. (1992) ก่อนหน้านี้มีการตรวจสอบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จากเปลือกหอยแคลไซต์, Pecten Pectinidae (Notovota) Albicans (Schroter) และพบว่าการหาเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นไปได้สำหรับฟอสซิลหอยแคลไซต์ของ Albicans ได้ค่าอายุ 5×10^5 y การทำงานในปัจจุบันเราสามารถตรวจสอบการปล่อยสเปกตรัม TL และกราฟการเรืองแสง โดยพบว่าใน 5 ชนิดแรกที่ได้พบในตระกูล Pectinidae หมายความว่าหาอายุด้วยเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถขยายไปยังชนิดอื่นๆได้ นอกจากนี้ในปัจจุบันได้ค้นพบฟอสซิลหอยของผลึกแคลไซต์ที่มีอายุมากกว่า 5×10^5 y ที่ผ่านมาและมีขอบเขตในการหาอายุที่สามารถหาได้ 6×10^5 y เท่านั้น

Polikreti et al. (2002) ได้ศึกษาการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างหิน พบว่าผลการวัด TL Peak ที่อุณหภูมิ 290 °C เหมาะสมที่สุด

Soika and Delin (2000) ศึกษาผลของปริมาณรังสีจากโกลว์เคฟของผลึกบริสุทธิ์ และผงผลึก หลังจากฉายรังสีแกมมาของ Co-60 จะมีปริมาณรังสีต่างกันหรือกล่าวได้ว่าผลของรังสีที่แตกต่างกันจะนำไปสู่ลักษณะโกลว์เคฟที่มีรูปร่างปริมาณความแรงต่างกัน

Vaijapurkar et al. (1997) ได้ศึกษาการปลดปล่อยแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างทรายจาก Rajasthan ซึ่งวัดปริมาณรังสีแกมมา โดยดูลักษณะของโกลว์เคฟมาเปรียบเทียบกับแหล่งกำเนิดรังสีมาตรฐานระหว่าง 0.05-5.00 kGy

Polikreti et al. (2003) ได้ศึกษาเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL peak ของวัตถุหินอ่อน พบว่า peak ที่ 290°C ได้เลือกเป็น peak ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งยอดนี้จะปรากฏเกือบทุกประเภทในหินอ่อนทั่วไปในสมัยโบราณซึ่งคำนวณอายุได้ประมาณ 2570 ± 410 y

Xiao et al. (2010) ได้หาอายุทางโบราณคดีสมัยหินใหม่ของแม่น้ำแยงซีในประเทศจีนโดยใช้ตะกอนและตัวอย่างดินเผาที่มีอายุ 5.4 ± 0.3 และ 5.1 ± 0.3 ka ตามลำดับ

Pinnioja and Lindberg (1998) ได้ทำการศึกษาพบว่าการเลื่อนลงของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างพริกที่มีการอบรังสีแกมมาเมื่อตัวอย่างอบรังสีที่ศึกษาเก็บเป็นเวลานาน

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 เพื่อศึกษาเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการกำหนดอายุตะกอนดิน
- 1.3.2 เพื่อวิเคราะห์อายุตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา
- 1.3.3 เพื่อเปรียบเทียบอายุของตะกอนดินที่วัดได้ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับวิธีทางโบราณคดี

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งในส่วนของทฤษฎีจะประกอบด้วย กระบวนการการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เครื่องมือวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุวัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของตัววัดรังสี การคัดเลือกสัญญาณที่มีความเสถียรตลอดช่วงอายุแร่ ปฏิกิริยาของรังสีแกมมา กับหัววัดรังสี หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ระบบหัววัดรังสี คุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด แหล่งกำเนิดรังสี สถานที่ตั้งตัวอย่างวิจัย โดยในแต่ละหัวข้อ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ คือการเรืองแสงของสารที่มีสมบัติเป็นฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งการเรืองแสงเป็นผลสืบเนื่องมาจากการดูดกลืนหรือการกักเก็บพลังงานจากการรับรังสีของสารเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์นั่นเอง อาจแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการย่อยคือ

2.1.1 การดูดกลืนพลังงาน เกิดจากการแผ่รังสีทางนิวเคลียร์ คือ การไอออไนซ์ของสารเนื่องจากสารได้รับหรือถูกฉายรังสี ซึ่งขนาดหรือปริมาณของการถูกไอออไนซ์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสารและชนิดของรังสี

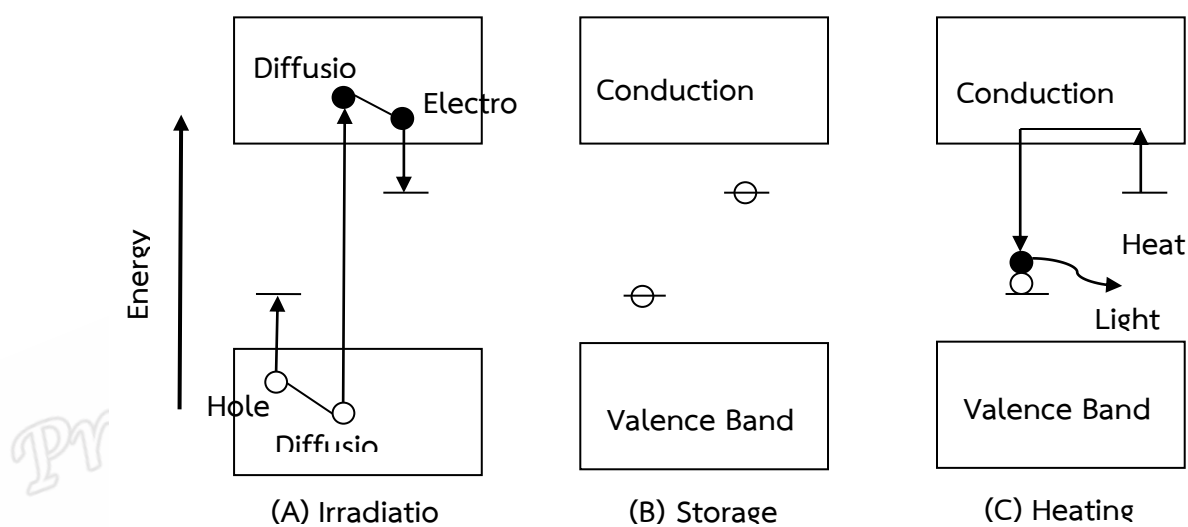
2.1.2 การกักพลังงานที่ดูดกลืน เกิดจากอิเล็กตรอนส่วนหนึ่งจากที่ถูกไอออไนซ์จะถูกดักที่จุดบกพร่องในโครงสร้างผลึกของสารนั้นๆ การดักอิเล็กตรอนนี้หมายถึงการกักเก็บพลังงานของผลึกนั้นเอง

2.1.3 กระบวนสุดท้าย เกิดจากการปลดปล่อยพลังงานที่ถูกกักเก็บ เมื่อให้ความร้อนแก่สารเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ การเพิ่มปริมาณการสั่นของแลตทิซในผลึก มีผลทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดจากกับดัก อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาส่วนหนึ่งจะเกิดการรวมตัวกับไอออนหรือโฮลที่ศูนย์กลางการเปล่งแสง แล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง (ศิริพงษ์, 2547)

การเกิดลูมิเนสเซนซ์ เป็นกระบวนการที่วัตถุปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น โดยที่ควอทซ์ เฟสปาร์ และเครื่องปั้นดินเผา หรือวัสดุอื่นๆซึ่งผ่านการฉายด้วยรังสีที่ก่อไอออน (Ionizing Radiation) จนอิเล็กตรอนในผลึกมีพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานในเวเลนซ์แบนด์ อิเล็กตรอนก็จะแพร่ขึ้นไปอยู่ในชั้นคอนดักชันแบนด์และถูกดักจับไว้ในหลุมกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ปริมาณของอิเล็กตรอนในหลุมกับดักจะเป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ได้รับ และเมื่อนำผลึกที่มีอิเล็กตรอน

อยู่ในหลุมกับดักมากกระตุ้นด้วยความร้อน ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในหลุมกับดักหลุดออกมาและกลับสู่ชั้นเวเลนซ์แบนด์โดยการปลดปล่อยรังสีในรูปแสงที่ตามองเห็น ถ้าพลังงานภายนอกที่ทำให้อิเล็กตรอนกลับสู่ชั้นเวเลนซ์แบนด์คือความร้อนหลักการนี้จะเรียกว่า Thermoluminescence (TL) โดยสามารถวิเคราะห์ค่าอายุได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose; AD) ของช่วงอายุกับปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose; D) (Hutt and Goksu, 2000)

$$\text{Age} = \frac{\text{Accumulated dose}}{\text{Annual dose}} \quad (2.1)$$



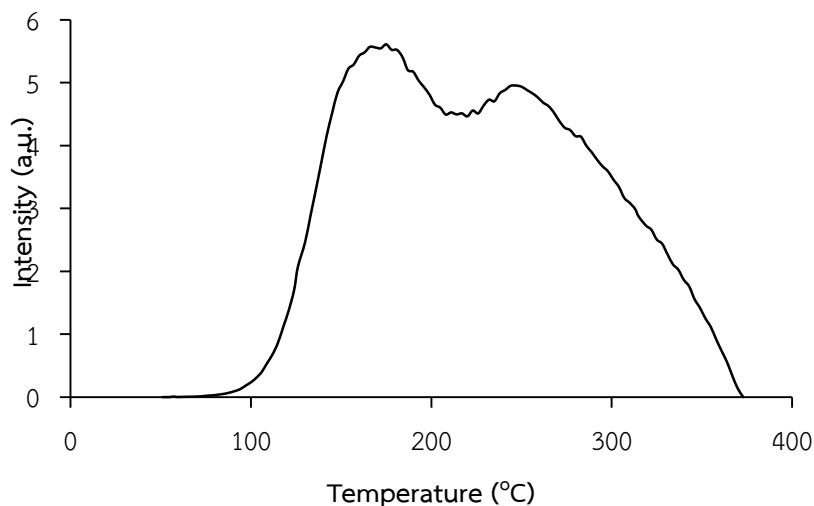
ภาพที่ 2.1 กระบวนการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Aitken, 1985)

ซึ่งปริมาณรังสีต่อปีคำนวณจากค่าความเข้มข้นรังสี (Bq/kg) ที่ได้จาก ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K นำมาวิเคราะห์หาปริมาณรังสีที่ตัวอย่างได้รับจากรังสีในสิ่งแวดล้อมตามสมการ (2.1) (Unsear, 2000); (Hutt and Goksu, 2000)

ส่วนปริมาณรังสีสะสมคำนวณได้จากการความเข้มข้นของการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL ที่สัมพันธ์กับระดับรังสีในปริมาณต่าง ๆ ที่ได้รับ

2.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

การวิเคราะห์สัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ Glow Curve คือกราฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิหรือเวลาโดยมีพื้นที่ใต้กราฟเป็นปริมาณการตอบสนองสัญญาณของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ทั้งหมดในช่วงเวลาที่สนใจ Glow Curve ที่ได้จากการอ่านค่าเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของผลึกตัวอย่างแต่ละชนิด (ดังรูป 2.2) จะมีตำแหน่งสูงสุดที่เรียกว่า Peak ได้ต่างกันและมีมากกว่าหนึ่งค่าก็ได้ ซึ่ง Peak ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงอุณหภูมินั้นมีผลต่อการวัดการสะสมรังสี ถ้า Peak ที่เราสนใจอยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำก็จะมี การเสี้ยวเล็กน้อยในกับดักได้ง่ายแสดงว่าค่าที่ได้อาจจะไม่ใช่ปริมาณรังสีที่สะสมอยู่จริงเนื่องจากผลึกมีการถูกกระตุ้นจากอุณหภูมิภายนอกอยู่ตลอดเวลา แต่ถ้าเลือก Peak ที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะมี การรบกวนจากรังสีอินฟราเรดซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ในการวัดมีอุณหภูมิสูงซึ่งจะยุ่งยากในการออกแบบเครื่องวัด ดังนั้น Glow Curve ที่ดีจะต้องมี Peak ที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สูงเพียงพอที่จะไม่ถูกรบกวนจากอุณหภูมิห้องและไม่สูงเกินไปจน อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 200 °C ตัวแปรที่มีผลต่อ Glow Curve ได้แก่ อัตราการเพิ่มความร้อน ความเป็นเนื้อเดียวกันของสารตัวอย่าง การวัดแต่ละครั้งจึงต้องควบคุมตัวแปรเหล่านี้ให้คงเดิมเสมอ (Hutt and Goksu, 2000)



ภาพที่ 2.2 การตอบสนองของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างผลึกในแต่ละอุณหภูมิ

2.3 การฉายรังสีแบบวิธีย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Additive dose method)

วิธี Additive dose เป็นการฉายรังสีเพิ่มเข้าไปในผลึกตัวอย่าง ทำโดยการฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60 ในระดับโดสต่ำๆ แล้วเพิ่มระดับโดสขึ้นไปเรื่อย ๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL intensity) ต่อหนึ่งหน่วยโดสรังสีหรือเรียกว่า “ผลการตอบสนองของผลึกตัวอย่างต่อรังสี”

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

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

$$I = I_0 \left(1 + \frac{Q}{AD} \right) \quad (2.2)$$

เมื่อ I_0 และ I คือ ความเข้มสัญญาณก่อน และหลังการอาบรังสี

Q คือ ปริมาณโดสรังสีที่ได้รับจากวิธี Additive dose ที่เวลา (t')

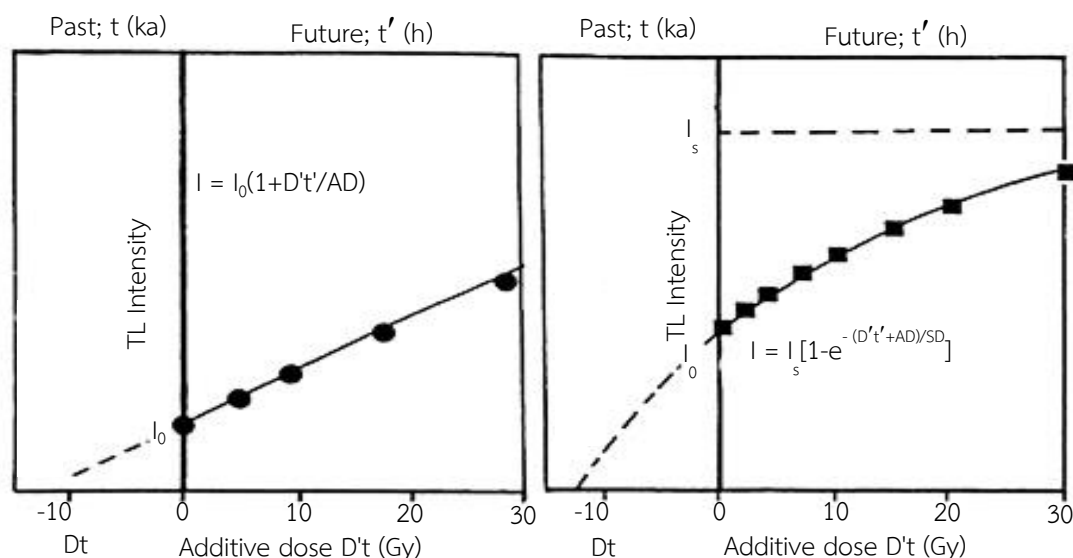
AD คือ ปริมาณโดสรังสีสะสม (Accumulated dose)

กรณีความเข้มกับอุณหภูมิมีแนวโน้มเป็นแบบอ้อมตัว (รูปที่ 2.7 (b))

$$I = I_s (1 - e^{-(D' t' + AD) / SD}) \quad (2.3)$$

เมื่อ I_s คือ ความเข้มที่อ้อมตัว

SD คือ ปริมาณการอาบโดสรังสีที่อ้อมตัว มีค่าเท่ากับการอาบรังสี D' และชั่วชีวิต (life time) ที่เกิดการอ้อมตัว τ'_s



ภาพที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับโดสรังสีแกมมาแบบวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (a) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น (b) เมื่อแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นแบบอิมิตัว (Ikeya, 1993)

ภาพที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสีที่ได้จากวิธี Additive Dose จะมีแนวโน้มความสัมพันธ์ 2 แบบ คือ แบบเชิงเส้น และแบบอิมิตัว กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสี มีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น (ภาพที่ 2.3 (a)) ในกรณีที่หลุมกับดักอิเล็กตรอนสามารถบรรจุอิเล็กตรอนในหลุมได้อีกหรือสามารถบรรจุอิเล็กตรอนเพิ่มอีกได้เป็นระยะเวลาอันยาวนาน กรณีที่เขียนความสัมพันธ์ TL Intensity กับระดับโดสรังสี แล้วมีแนวโน้มเป็นแบบอิมิตัว (ภาพที่ 2.3 (b)) ก็ต่อเมื่อหลุมกับดักอิเล็กตรอนเต็ม เนื่องจากหลุมกับดักอิเล็กตรอนมีขีดจำกัดในการรับอิเล็กตรอน พอถึงจุด ๆ หนึ่งกับดักอิเล็กตรอนเต็มแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับระดับโดสรังสีจะเกิดการอิมิตัว

2.4 กราฟปรับเทียบ (Calibration Curve)

การปรับเทียบของปริมาณรังสีเนื่องจากการวัดปริมาณรังสีโดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นระบบการวัดที่พัฒนาเพื่อการใช้งานทางฟิสิกส์สุขภาพและเมื่อมีการนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาอื่นๆ วิธีการพื้นฐานในการตรวจวัดปริมาณโดสรังสีก็ยังคงเดิม นั่นคือ ระบบการวัดปริมาณโดสรังสีโดยวิธีนี้จะไม่สามารถทราบปริมาณโดสรังสีโดยตรงแต่จะทราบเพียงปริมาณแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมา ดังนั้นระบบการวัดนี้จึงต้องทำการสอบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่สร้างขึ้นจากผลึกของสารชนิดเดียวกัน โดยทราบปริมาณการรับรังสีในลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง TL Output กับปริมาณรังสีที่

ได้รับซึ่งเมื่อนำค่า TL Output ของตัวไม่ทราบค่ามาเทียบกับกราฟนี้ก็สามารถทราบปริมาณการรับโดสรังสีของตัวอย่างนั้นได้

2.5 ส่วนประกอบของตะกอน (Composition of Sediment) มีดังนี้

2.5.1 กลุ่มแร่ควอทซ์ (Quartz) แร่กลุ่มนี้เป็นกลุ่มซิลิเกตที่ประกอบด้วยซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) เพียงอย่างเดียว ซึ่งได้แก่ แร่ตระกูลควอทซ์ ซึ่งเป็นตัวอย่างแร่ที่มีการจัดตัวอย่างของโครงสร้างผลึกที่ประจุมดุลโดยการจับตัวของพีรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron, $(\text{SiO}_4)^{4-}$) ด้วยกันเอง ซึ่งในที่นี้คือออกซิเจนทุกพีรามิดใช้ร่วมกับพีรามิดตัวอื่น แร่ควอทซ์มักเกิดเป็นผลึกหกเหลี่ยมโดยทั่วไปมักมีสีขาวใส แต่อาจแสดงความหลากหลายสีได้และบ้างก็เป็นแร่รัตนชาติที่สำคัญ เพราะมีความคงทนและสีสวยงาม ถ้าสีขาวใสเรียกผลึกหินแก้ว (Rock Crystal) สีเหลืองใสเรียก ซิตรีน (Citrine) หรือสีม่วงเรียกว่าอะมีทิส (Amethyst) แร่ควอทซ์จัดเป็นแร่ที่พบมากที่สุดของเปลือกทวีป ด้วยเหตุนี้หินตะกอนบางชนิดจึงประกอบด้วยแร่ควอทซ์เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์

2.5.2 กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar) คำว่า เฟลด์สปาร์ (Feldspar) มาจากภาษาสวีเดน คือ Feld (Field) แปลว่าทุ่งหรือสนาม และ Spar (Mineral) หมายถึง แร่นั้นเอง คนเหมืองชาวสวีเดนในยุคโบราณพบเห็นแร่เฟลด์สปาร์นี้บ่อยครั้งมากในเหมืองแร่ และเป็นแร่ที่พบเห็นมากที่สุดในเปลือกโลก ในเปลือกสมุทรมียูประมาณร้อยละ 60 ในเปลือกทวีป เมื่อรวมกับแร่ควอทซ์มีมากถึงร้อยละ 75 ผิดกับแร่ควอทซ์ที่มักไม่ค่อยพบเห็นในเปลือกสมุทร แร่เฟลด์สปาร์ที่พบบนเปลือกโลกจะมีอยู่ 2 กลุ่มใหญ่คือ กลุ่มใหญ่คือ กลุ่ม Alkali Feldspar และกลุ่ม Plagioclase

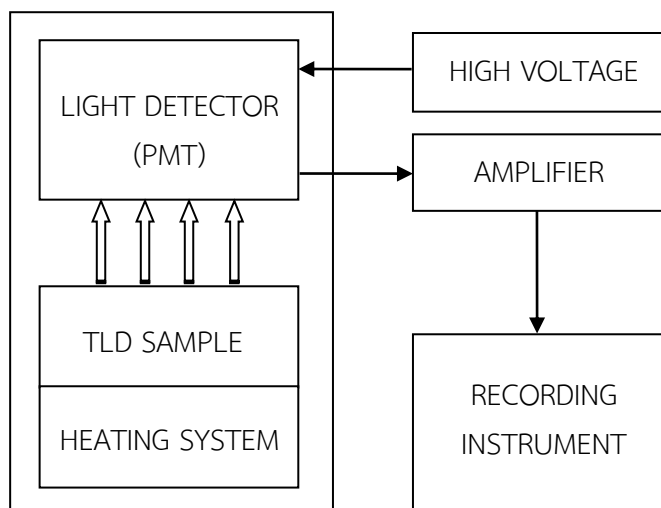
2.6 เครื่องมือวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

2.6.1 หัววัดชนิดหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier Tube) ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงที่เกิดจากกระบวนการเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า

2.6.2 ถาดความร้อนชนิดใช้ไฟฟ้า (Planchet) เป็นภาชนะใส่ตัวอย่าง ซึ่งมีระบบให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าและระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยลวดเทอร์โมคอปเปิล ถาดที่ใช้จะมีผลต่อการวัด กรณีแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีการสะท้อนกลับจากผิวถาดในตัวอย่างชนิดฟิล์มบาง นอกจากนี้ในขณะให้ความร้อนสารตัวอย่างบางชนิดจำเป็นต้องใช้แก๊สที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างแทนการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศปกติที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบซึ่งทำให้ผลการวัดผิดพลาดและเกิดการลุกไหม้ได้ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่เป็นผงขนาดเล็ก

ระบบแสดงผลจะแสดงผลหน้าจอของเครื่องวัดโดยตรงหรือส่งผ่านข้อมูลไปเก็บด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (ดังรูปภาพที่ 2.4) (สมหมาย และพวงทิพย์, 2547) (Ankjargaard, et al, 2005)

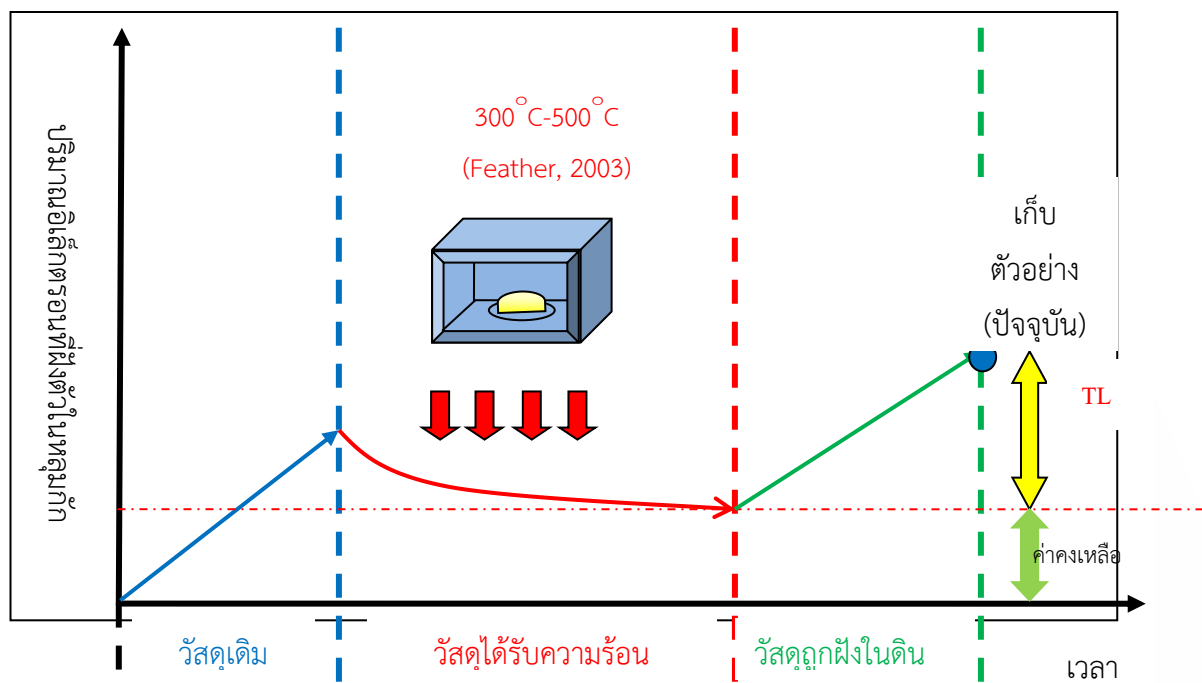


ภาพที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

2.7 การประยุกต์หลักการเรืองแสงความร้อนกับการกำหนดอายุวัสดุ

2.7.1 การกำหนดอายุวัสดุที่ได้รับความร้อน

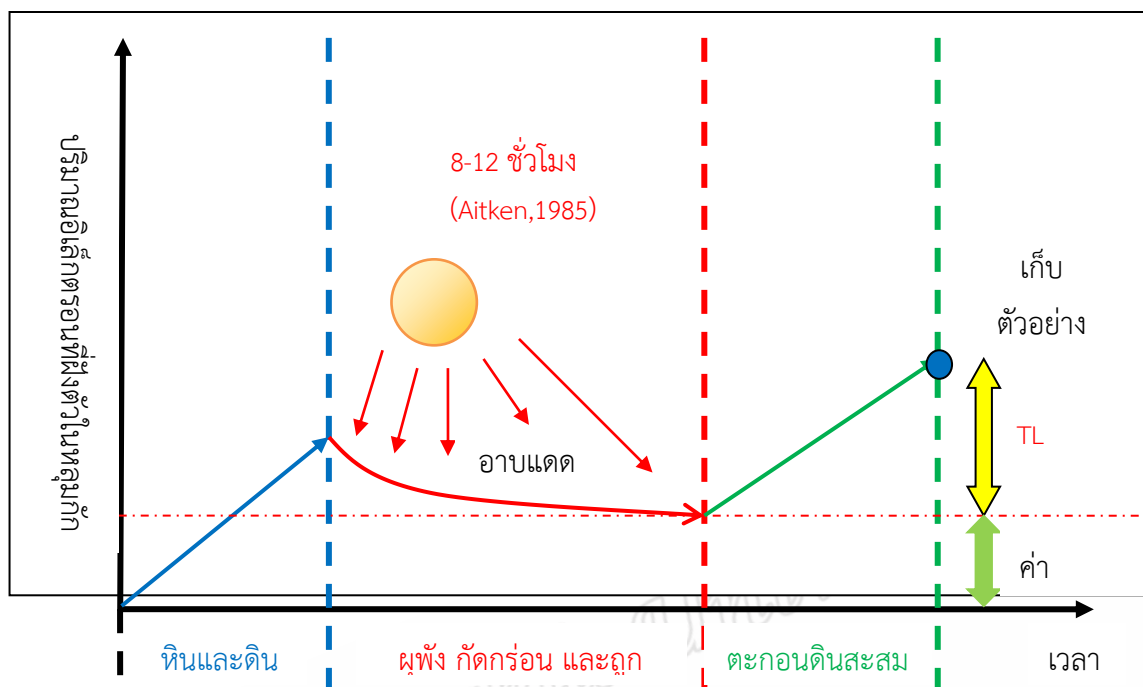
วัสดุที่ได้รับความร้อน เช่น หินอัคนี หินแปร อิฐ ถ้วยชามสังคโลกทางโบราณคดี เป็นต้น กระบวนการตั้งแต่เริ่มต้นจากวัสดุเดิมที่เกิดการสะสมอิเล็กตรอนอยู่ตลอดเวลาตามปัจจัยของเวลาและอัตราการแผ่กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติ จนถึง ณ เวลาหนึ่งซึ่งวัสดุนั้นได้รับความร้อน ด้วยอุณหภูมิ $300^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$ (Feathers, 2003) ขึ้นไป เช่น ตัวอย่างในธรรมชาติ ลาวาที่กลายหินอัคนี หินดั้งเดิมที่ถูกแปรสภาพด้วยความดันและอุณหภูมิสูง อิฐ ถ้วยชามสังคโลกที่ถูกเผาในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งสาเหตุต่างๆเหล่านี้ ทำให้วัสดุซึ่งมีอิเล็กตรอนสะสมตัวอยู่ถูกขับออกจนหมดเหมือนกับการหมนเข้มนาฬิกาที่ตำแหน่งศูนย์ จากนั้นนำวัสดุดังกล่าวจึงเริ่มต้นสะสมอิเล็กตรอนใหม่อีกครั้ง จนถึงวันที่นำตัวอย่างมาตรวจวัดปริมาณอิเล็กตรอนหรือปริมาณสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL เพื่อทำการกำหนดอายุวัสดุ ปริมาณอิเล็กตรอนที่ได้ จึงมีค่าเทียบเคียงได้กับปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่าง นับตั้งแต่วัสดุนั้นได้รับความร้อนครั้งสุดท้ายจนถึงปัจจุบัน (ดังภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุวัสดุที่ได้รับความร้อน (Featers, 2003)

2.7.2 การกำหนดอายุของตะกอนดิน

ในการกำหนดอายุของตะกอนดินนั้น จะมีข้อแตกต่างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการกำหนดอายุวัสดุที่ได้รับความร้อน โดยกระบวนการเริ่มต้นจากหินหรือตะกอนดั้งเดิมมีการสะสมตัวของอิเล็กตรอนจนกระทั่งหินหรือตะกอนเหล่านี้ถูกปัจจัยทางธรณีวิทยาต่าง เช่น น้ำ ลม ฯลฯ กัดกร่อนและเกิดการผุพังเป็นเม็ดตะกอน จากนั้นตะกอนเกิดการพัดพาจากแหล่งกำเนิดตะกอนลงสู่แหล่งสะสมตะกอน ซึ่งในระหว่างช่วงเวลาของการพัดพา เม็ดตะกอนจะค่อยๆ สูญเสียปริมาณอิเล็กตรอนหรือสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL) เนื่องจากสัมผัสกับแสงอาทิตย์ ซึ่งเรียกว่า การอาบแดด (Bleaching) จนกระทั่งสัญญาณที่มีอยู่เดิมถูกลบล้างออกไป และเริ่มต้นสะสมปริมาณอิเล็กตรอนใหม่อีกครั้ง โดยมีเม็ดตะกอนชั้นบนที่ปิดทับเป็นตัวป้องกันแสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อมาถึงปัจจุบันปริมาณอิเล็กตรอน ที่มีอยู่ในดินจะสะท้อนถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัว นับตั้งแต่ตะกอนนั้นสะสมตัวครั้งสุดท้ายจนถึงปัจจุบัน การอาบแดดในทางทฤษฎีคาดว่าสามารถลบล้างปริมาณอิเล็กตรอนที่มีอยู่เดิมหมดจนหมด แต่ในทางปฏิบัติไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากยังคงมีสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ TL หรือปริมาณอิเล็กตรอนหลงเหลืออยู่ทุกครั้งถึงแม้ว่าจะอาบแดดเท่าใดก็ตาม สัญญาณที่เหลืออยู่ เรียกว่า ค่าคงเหลือ (Residual) ซึ่งจะแตกต่างกับการได้รับความร้อนดังที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ดังนั้นในการกำหนดตะกอน เราจึงต้องนำค่าคงเหลือนี้มาพิจารณาเพื่อหักลบออกจากค่าที่เราวัดได้ เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด (ดังภาพ 2.6)



ภาพที่ 2.6 การประยุกต์หลักการเรื่องแสงความร้อนกับการกำหนดอายุของตะกอนดิน โดยแสดงอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนที่ฝังตัวในหลุมกักเก็บและเวลา (Won-in, 2003)

ดังนั้น หากเราสามารถวัดปริมาณอิเล็กตรอนที่ฝังตัวอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนได้ และสามารถหาอัตราการแผ่รังสีต่อปีของสิ่งแวดล้อมรอบข้างที่เป็นตัวกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเข้าไปเติมเต็มในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนได้ เราก็สามารถหาอายุของวัสดุนั้นได้ จากสมการความสัมพันธ์ของการกำหนดอายุด้วยเรื่องแสงความร้อน คือ อายุวัสดุ = Equivalent Dose (ED) / Annual Dose (AD)

Equivalent Dose (ED) หรือ ค่า **Paleodose** (หน่วย เกรย์ (Grey)) คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในระดับ Meta State เนื่องจากการกระตุ้นจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีในบริเวณรอบสิ่งแวดล้อม

Annual Dose (AD) (หน่วย เกรย์ต่อปี: Grey/year) คือ อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้าง ซึ่งธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญ ได้แก่ ยูเรเนียม (U), ทอเรียม (Th), โพแทสเซียม (K) และรังสีคอสมิก จากชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของตัววัดรังสี

การตอบสนองของตัววัดรังสี (Dose Response) ในงานด้านการวัดปริมาณรังสีความเหมาะสมในการเลือกใช้ตัววัดรังสีต่อช่วงปริมาณรังสีที่จะวัดอาจพิจารณาจาก ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมา กับช่วงปริมาณรังสีที่ได้รับ จะต้องมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น หรืออีกนัยหนึ่งพยายามหลีกเลี่ยงช่วงสูงกว่าการตอบสนองเชิงเส้น (Super linearity) และช่วงก่อนการตอบสนองเชิงเส้นซึ่งจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการสอบเทียบ (Calibration) ปริมาณรังสีการถูกแผ่รังสีและการผ่านกระบวนการทางความร้อน (Thermal Treatments) ของสารเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อลักษณะของช่วงสูงกว่าการตอบสนองเชิงเส้น ดังนั้นสารเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนไป (ศิริพงษ์, 2547)

2.9 การคัดเลือกสัญญาณที่มีความเสถียรตลอดช่วงอายุแร่

เนื่องจากในการวัดค่าปริมาณสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดนั้น ค่าที่ได้เป็นกราฟ Glow Curve ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการเรืองแสงในแต่ละระดับอุณหภูมิ ปัญหาคือเราจะใช้ค่าใดในการเป็นตัวแทนของกราฟ เพื่อนำมาสร้างกราฟ Glow Curve สืบเนื่องจากในแต่ละอุณหภูมินั้นมีปริมาณการเรืองแสงไม่เท่ากัน ดังนั้นเราจึงต้องมีการทดสอบว่าสัญญาณในช่วงอุณหภูมิใดที่เหมาะสมเป็นตัวแทนของกราฟ Glow Curve เพื่อนำไปใช้ในการสร้างกราฟ Glow Curve ซึ่งเราสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีที่เรียกว่า “Plateau Test”

โดยทั่วไปแล้วอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละระดับพลังงานต้องการพลังงานกระตุ้นที่แตกต่างกัน ในการทำให้หลุดออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ในพลังงานระดับลึกอาจต้องใช้อุณหภูมิถึง 400-500 °C โดยทั่วไปในธรรมชาติรับการกระตุ้นจากกัมมันตรังสีภายนอก อิเล็กตรอนในแต่ละระดับพลังงานจะถูกกระตุ้นและเข้าไปกักเก็บในหลุมอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสัดส่วนกัน แต่จะมีบางระดับพลังงานที่อิเล็กทรอนิกส์สามารถหลุดออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ได้เช่นเดียวกัน ถึงแม้จะอยู่ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ แต่ในกรณีของที่ระดับพลังงานสูงๆ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นและถูกกักเก็บเพียงอย่างเดียวโดยจะไม่สลายตัวในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ นั่นหมายความว่าในการกระตุ้นแต่ละครั้งจะได้รับพลังงานเป็นสัดส่วนเท่ากันเสมอ แต่ในกรณีของพลังงานต่ำจะมีทั้งการรับเข้าและการคายออก ในขณะที่ในระดับพลังงานสูงจะรับเพียงอย่างเดียวในสภาวะธรรมชาติ ซึ่งช่วงของอุณหภูมิที่ไม่มีการคายพลังงานออกในระหว่างที่ฝังอยู่ในดินนั้นสามารถใช้เป็นตัวแทนปริมาณกัมมันตรังสีที่แร่ได้รับนับตั้งแต่ได้รับความร้อนครั้งสุดท้าย หรือได้รับการอบแดดมาจนถึงปัจจุบันได้ วิธีการคัดเลือกช่วงอุณหภูมิที่อิเล็กทรอนิกส์นั้นมีความเสถียรนั้น ทำได้โดยการนำตัวอย่างธรรมชาติไปวัดค่าปริมาณรังสีในแต่ละอุณหภูมิ และอีกส่วนคือ นำตัวอย่างธรรมชาติไปอบรังสีและนำมาวัดในทันที ซึ่งส่วนหลังนั้นจะแสดงถึงการอบรังสีและวัดทันที นั่นแสดงว่าในส่วนที่สามารถสลายได้ในเวลานานนั้นยังอยู่เช่นเดิม ดังนั้นเมื่อนำมาหารกัน จะได้ผลลัพธ์เป็นอัตราส่วนที่แน่นอนหลังจากได้ช่วงอุณหภูมิที่เราได้ทดสอบแล้วว่าเป็นช่วงที่เสถียรที่สุด จึงเลือกช่วงอุณหภูมินั้นมาใช้

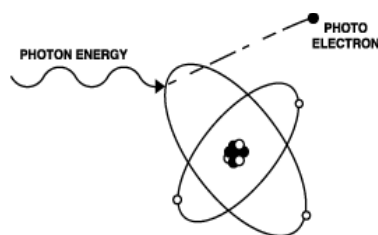
เป็นเสมือนตัวแทนของค่าปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด และนำไปสร้างกราฟ Glowth Curve ต่อไป (ปัญญา, 2550)

2.10 ปฏิกริยาของรังสีแกมมากับหัววัดรังสี

สเปกตรัมรังสีแกมมาเป็นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์พลังงานของรังสีและกัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี จากส่วนที่เป็นโฟโตพีค (Photopeak) องค์ประกอบของสเปกตรัม เกิดจากปฏิกริยาระหว่างรังสีแกมมากับผลึกของสารกึ่งตัวนำภายในหัววัด ปฏิกริยาหลักๆที่เกิดขึ้นได้แก่

2.10.1 ปฏิกริยาโฟโตอิเล็กตริก (Photoelectric Effect)

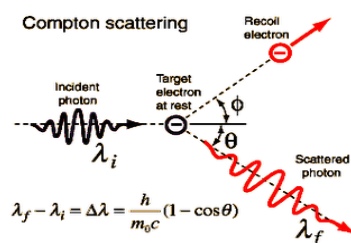
เป็นปฏิกริยาที่รังสีแกมมาถ่ายพลังงานทั้งหมดให้แก่อะตอมของหัววัดทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานเท่ากับผลต่างของพลังงานรังสีแกมมากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดโฟโตพีคบนสเปกตรัมรังสีแกมมา



ภาพที่ 2.7 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน

2.10.2 ปฏิกริยาคอมพ์ตัน (Compton Effect)

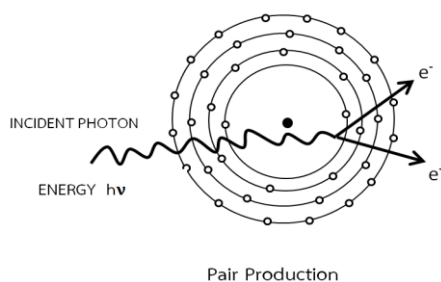
เป็นปฏิกริยาที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้แก่อะตอมของหัววัด ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานต่อเนื่องโดยมีค่าขึ้นกับมุมตกกระทบของรังสีแกมมาทำให้เกิดแถบพลังงานต่อเนื่องของคอมพ์ตัน (Compton Continuum)



ภาพที่ 2.8 การเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตัน (Phil, 2010)

2.10.3 ปฏิกริยาการผลิตคู่ (Pair production)

เป็นกระบวนการที่รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1022 keV ทำปฏิกริยากับสนามของนิวเคลียส ทำให้พลังงานเปลี่ยนเป็นมวลของอนุภาคและปฏิอนุภาค ได้แก่ อิเล็กตรอน (e^-) และโพสิตรอน (e^+) ซึ่งโพสิตรอนที่หมดพลังงานจะรวมกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกริยาการทำลาย (Annihilation) กลายเป็นรังสีแกมมา 2 หน่วย มีพลังงาน 511 keV เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม



ภาพที่ 2.9 การเกิดปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (ปรับปรุงจากพงศกร, 2548)

2.11 หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี

หน่วย คือชื่อเฉพาะที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้บอก ขนาดและปริมาณของสิ่งต่างๆ หน่วยของรังสีและกัมมันตภาพรังสี มีดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงหน่วยของปริมาตรต่างๆทางรังสี

ปริมาณ	หน่วยเดิม	หน่วยใหม่ (SI unit)
กัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)	คูรี (Ci)	เบคเคอเรล (Bq)
รังสีที่ดูดกลืน (Absorbed Dose)	แรด (Rad)	เกรย์ (Gy)
รังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)	เรินท์เกน (R)	คูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg)
รังสีสมมูล (Dose Equivalent)	เรม (Rem)	ซีเวิร์ต (Sv)

จากการกำหนดหน่วยของปริมาณต่างๆดังกล่าวมาในข้างต้น การวัดรังสีเพื่อกำหนดปริมาณซึ่งเป็นที่ยอมรับ และเปรียบเทียบผลกันได้ โดยอาศัยการวัดค่าพื้นฐานตามคำจำกัดความของแต่ละหน่วย เช่น

2.11.1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity)

การเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ส่งผลให้เกิดการแผ่รังสี หรือมีอนุภาคที่มีพลังงานเกิดขึ้น ไอโซโทป รังสีหรือนิวไคลด์รังสี (Radionuclide) จึงเป็นแหล่งกำเนิดรังสีชนิดหนึ่งในหลายชนิด การวัดจำนวน ไอโซโทปรังสี หรือนิวไคลด์รังสี ไม่อาจทำได้โดยการชั่งน้ำหนัก หรือ ตวง วัดได้ เพราะไอโซโทปรังสีจะปน อยู่กับไอโซโทปอื่นๆเสมอ แม้แต่เมื่อทำการแยกให้บริสุทธิ์แล้ว เมื่อเวลาผ่านไปการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ก็จะทำให้เกิด ธาตุใหม่ขึ้นปะปน ดังนั้นปริมาณกัมมันตภาพรังสีในขณะใดขณะหนึ่งจึงวัดได้โดยวัดรังสีที่ เกิดขึ้น ในขณะนั้น ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงทาง นิวเคลียร์ที่เกิดขึ้น หน่วยของปริมาณ กัมมันตภาพรังสี เดิมอาศัยการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์ ของธาตุเรเดียมหนัก 1 g ซึ่งเท่ากับ 3.7×10^{10} disintegration per second และเรียกว่า 1 คูรี (Ci) $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ ครั้งต่อ วินาที (s^{-1}) ต่อมาใช้ SI unit หน่วยของกัมมันตรังสี ควรจะเป็น s^{-1} แต่ให้ใช้ชื่อเฉพาะว่า เบคเคอเรล (Bq) ดังนั้น

$$1 \text{ คูรี (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

ปริมาณกัมมันตภาพรังสีจะมีผลเมื่อเข้าสู่ร่างกาย เพราะรังสีที่เกิดขึ้นจะถูกดูดกลืนในอวัยวะและ เนื้อเยื่อของร่างกายมากที่สุด โดยเฉพาะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์นั้นให้อนุภาคแอลฟา หรือ เบตา เพราะอนุภาคทั้งสองเป็นอนุภาคที่มีพิสัยต่ำ แน่นนอนว่าจะต้องถ่ายทอดพลังงานทั้งหมด ให้อวัยวะ และเนื้อเยื่อในร่างกาย ทำให้เกิดอันตรายมากที่สุด

2.11.2 ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (Absorbed Dose)

ผลของรังสีต่อวัตถุต่างๆ บางอย่างที่สามารถสังเกตเห็นได้ เช่น การที่แก้วหรือพลาสติกเปลี่ยนสี เมื่อนำไปฉายรังสี เป็นเพราะเนื้อแก้ว ดูดกลืน พลังงานของรังสีเข้าไป เนื่องจากรังสีแต่ละชนิดมี ความสามารถทะลุผ่านวัตถุได้ไม่เท่ากัน และถ่ายเทพลังงานให้กับวัตถุแต่ละชนิดได้ไม่เท่ากันดังนั้น ผล ของรังสีต่อวัตถุ จึงแปรผันตามปริมาณพลังงานรังสีที่วัตถุนั้นดูดกลืนไว้ ตัวอย่าง เช่นรังสีแอลฟาและ รังสีเบตา จะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับ วัตถุ ในระยะทางจากผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โฟตอนพลังงาน ต่ำๆ ก็เช่นกัน ผลก็คือจะทำให้เกิดรอยไหม้ที่ผิวหนัง ถ้าเป็นโฟตอนพลังงานสูงหรือนิวตรอน พลังงาน บางส่วนอาจจะหลุดออกไปจากวัตถุ บางส่วนของพลังงานถูกดูดกลืนไว้ หน่วยของ Absorbed Dose เดิม ใช้ rad (Radiation Absorbed Dose) ซึ่งเท่ากับพลังงานรังสีที่ถูกดูดกลืน 100 ergs ในวัตถุมวล 1 gm

$$1 \text{ rad} = 1000 \text{ ergs/gm}$$

ในปัจจุบันหน่วย SI unit ซึ่งใช้หน่วยใหญ่ คือ MKS เป็นมาตรฐาน ให้หน่วยของ Absorbed Dose จาก หน่วยของพลังงานเป็นจูล (Joule) และหน่วยของมวลเป็นกิโลกรัม (kg) โดยใช้ชื่อเฉพาะว่าเกรย์ (Gy)

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Jkg}^{-1} = 100 \text{ rads}$$

2.11.3 ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัว (Exposure)

เป็นปริมาณรังสีที่ไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับผลของรังสีเพราะเพียงแต่วัดว่า มีการแตกตัวของอากาศมากน้อยเพียงใด การวัด Exposure เป็นที่นิยมเพราะเป็นวิธีที่มีความไวสูง และสามารถวัดค่าได้ถูกต้องมากด้วยเทคนิคในปัจจุบัน หน่วยเดิมของ Exposure คือ เรินเกนท์ (R) ซึ่งเท่ากับปริมาณรังสี ที่ทำให้อากาศแตกตัวให้ประจุ 1 e.s.u. ในอากาศแห้ง 1 ลูกบาศก์ เซนติเมตร ที่ NTP หรืออากาศมวล 1.293×10^{-3} g ปัจจุบันหน่วย SI ใช้เป็นคูลอมบ์ต่อกิโลกรัม (C/kg) โดยที่

$$1 \text{ R} = 2.54 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$\text{ประจุ 1 e.s.u. มีค่าเท่ากับ } 3.335 \times 10^{-10} \text{ C}$$

2.11.4 ปริมาณรังสีสมมูล (Dose Equivalent)

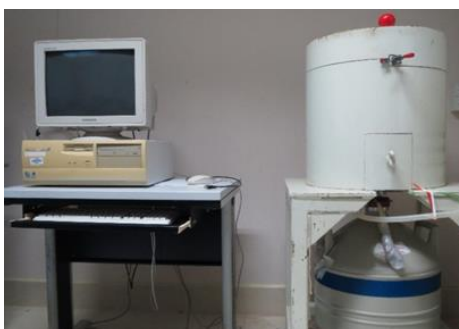
เป็นหน่วยที่นำเอาผลทางชีววิทยาของรังสีเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยโดยอาศัยค่า Absorbed Dose เฉลี่ยทั่วกลุ่มของเนื้อเยื่อ หรืออวัยวะร่วมกับ Radiation Weighting Factor (W_R) ตามชนิดและพลังงานของรังสี ในการหาค่า Dose Equivalent (H_T) ของกลุ่ม เนื้อเยื่อ และอวัยวะต่างๆ ดังสูตรต่อไปนี้

$$H_T = S_R W_R \times D_{T \times R} \quad (2.4)$$

เมื่อ $D_{T \times R}$ เท่ากับ Absorbed Dose เฉลี่ยทั่วกลุ่มเนื้อเยื่อ หรืออวัยวะ (T) เนื่องจากรังสี (R) ค่า W_R นี้มีความสัมพันธ์กับค่า Relative Biological effectiveness (RBE) ซึ่งอาศัยการเปรียบเทียบความเสียหายของเนื้อเยื่อ เมื่อได้รับ Absorbed Dose จากรังสีต่างชนิด และ ต่างพลังงาน

2.12 หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detector)

ในงานวิจัยนี้ใช้หัววัดสารกึ่งตัวนำชนิดหัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium Detector: HPGe) หัววัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ HPGe ทำขึ้นจากผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอกที่มีผิวด้านนอกแพร่ (diffusion) ด้วยลิเทียมส่วนด้านในปลูกไอออน (Ion Implantation) ของโบรอน เรียกว่าหัววัดชนิดพี (P-type) หรือเป็นผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอก ซึ่งแพร่ด้วยลิเทียมไว้ที่ผิวด้านใน ส่วนด้านนอกปลูกไอออน (Ion Implantation) ของโบรอน ดังภาพ



ภาพที่ 2.10 หัววัดรังสีแบบเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

2.13 ระบบหัววัดรังสี

ระบบหัววัดรังสีโดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

2.13.1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูง (High Voltage Supply: HV)

ทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถปรับค่าได้และจะต้องมีเสถียรภาพในการรักษาศักย์ไฟฟ้าทางเข้าที่พุดให้คงที่ ณ จุดที่ตั้งไว้โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อม

2.13.2 ภาคขยายส่วนหน้า (Preamplifier)

แบบที่นิยมใช้กันมากเป็นแบบที่เรียกว่า Charge Sensitive Preamplifier ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากหัววัดรังสี แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่มีขนาดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนประจุ

2.13.3 ภาคขยายหลัก (Amplifier)

เป็นส่วนที่รับสัญญาณพัลส์ (Pulse) มาจากภาคขยายส่วนหน้าแล้วนำมาปรับแต่งรูปสัญญาณ พร้อมทั้งขยายขนาดของสัญญาณให้เหมาะสมกับการนำไปวิเคราะห์ความสูง ขนาดของการขยายสัญญาณ (Voltage Gain) สามารถปรับค่าได้ในช่วงกว้างด้วยการปรับละเอียดเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความสูงของสัญญาณให้เป็น Unipolar และ Bipolar รูปร่างของสัญญาณทั้งสองนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับค่า Shaping Time Constant

2.13.4 วงจรวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer: MCA)

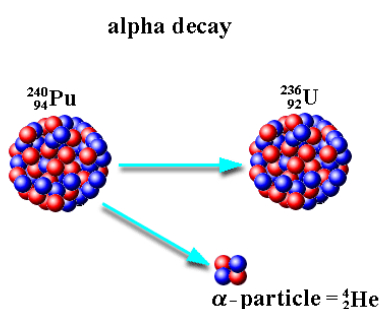
เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเก็บข้อมูลจำนวนนับของรังสีที่ระดับพลังงานต่างๆ ซึ่งตกกระทบหัววัดได้อย่างอัตโนมัติเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่อินพุตของ Analog to Digital Converter หรือ ADC ความสูงของสัญญาณจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจะเป็นตัวระบุตำแหน่ง (Address) การเก็บข้อมูลในหน่วยความจำ สัญญาณจะถูกส่งต่อไปยัง Channel Address Register ซึ่งจะทำหน้าที่เลือกแอดเดรสหรือตำแหน่งในหน่วยความจำที่ได้รับมาเพื่อให้ภาคบันทึกข้อมูล (Data Register) ทำการบันทึกจำนวนครั้งของสัญญาณที่เกิดขึ้นครั้งละ 1 หน่วยนับโดยบวก (Add) เข้ากับข้อมูลที่มีอยู่ในหน่วยความจำและจะถูกส่งออกไปแสดงผลบนจอภาพ

2.14 คุณสมบัติของรังสีแต่ละชนิด

ซึ่งรังสีดังกล่าวประกอบด้วย 4 ชนิดด้วยกัน คือ รังสีแอลฟา รังสีบีตา รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ และรังสีนิวตรอนหรืออนุภาคนิวตรอน ซึ่งแต่ละรังสีมีผลกระทบดังนี้

2.14.1 รังสีแอลฟาหรืออนุภาคแอลฟา

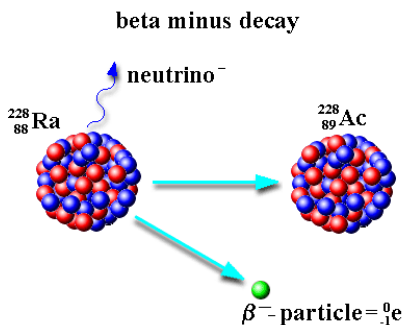
เป็นอนุภาคที่มีประจุและมีมวลมาก มีการสูญเสียพลังงานโดยการถ่ายเทพลังงานเชิงเส้นสูงทำให้รังสีแอลฟาเคลื่อนที่ในอากาศได้ในระยะทางที่น้อยมากและมีอำนาจทะลุทะลวงวัสดุตัวกลางได้น้อยมาก เช่นไม่สามารถผ่านผิวหนังชั้นนอกเข้าไปได้ ซึ่งถือว่าไม่เป็นอันตรายมากนัก



ภาพที่ 2.11 การสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา (Czarnecki, 2009)

2.14.2 รังสีบีตาที่มีประจุบวกและมีมวลน้อย

สามารถเคลื่อนที่ในอากาศได้ไกลกว่าอนุภาคแอลฟาโดยทั่วไปสามารถทะลุผ่านเข้าสู่ผิวหนังชั้นนอกเข้าไปทำอันตรายเซลล์ที่อยู่ลึกลงไปในระดับ 2-3 มิลลิเมตร จึงถือได้ว่าเป็นอันตรายต่อผิวหนังและนัยน์ตา

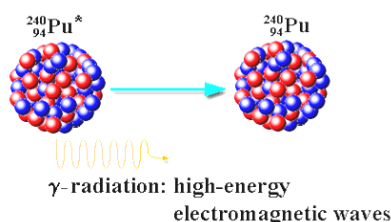


ภาพที่ 2.12 การสลายตัวให้รังสีเบตา (Czarnecki, 2009)

2.14.3 รังสีแกมมาและรังสีเอกซเรย์

เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถเคลื่อนที่ในอากาศได้ไกลและมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมาก จึงสามารถทะลุผ่านผิวหนังเข้าไปทำอันตรายอวัยวะต่างๆภายในร่างกายได้ จึงถือได้ว่าเป็นรังสีที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายโดยรวมอย่างมาก

gamma decay



ภาพที่ 2.13 การสลายตัวให้รังสีแกมมา (Czarnecki, 2009)

2.14.4 รังสีนิวตรอนหรืออนุภาคนิวตรอน

เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ แต่มีมวล มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงมากและสามารถถ่ายเทพลังงานให้แก่เนื้อเยื่อต่างๆ จึงถือได้ว่าเป็นรังสีชนิดหนึ่งที่เกิดอันตรายต่อร่างกายได้

2.15 กัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ

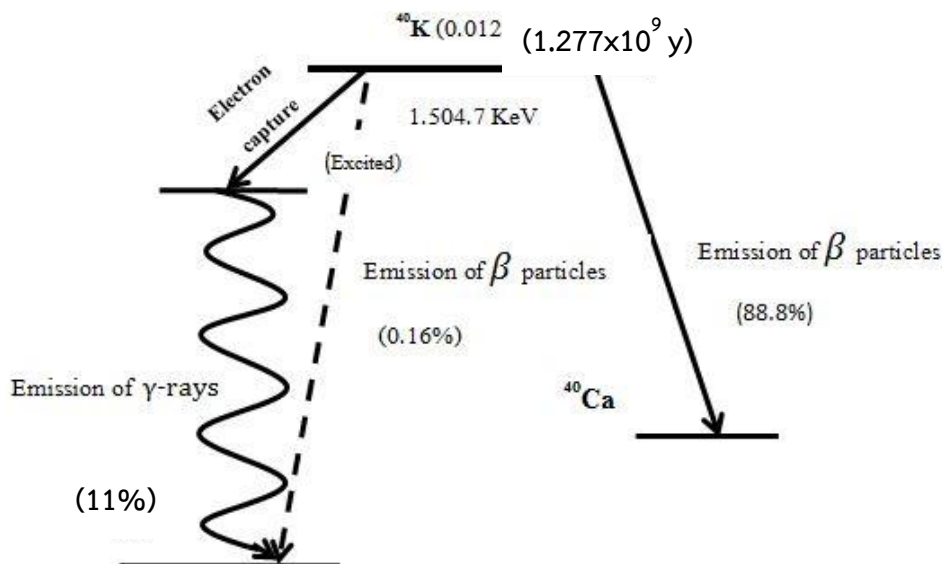
รังสีต่าง ๆ จะถูกปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดหลายแหล่งด้วยกัน เช่น รังสีจากนอกโลกซึ่งเรียก รังสีคอสมิก โดยแหล่งกำเนิดที่ใหญ่ที่สุดของรังสีนี้ คือ ดวงอาทิตย์ ส่วนรังสีจากโลก ได้แก่ การแผ่รังสีตามธรรมชาติจากไอโซโทปของธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ ซึ่งมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นส่วนประกอบของโลก ได้แก่ ดิน น้ำ หิน และแก๊ส เช่น ทอเรียม (^{232}Th) ยูเรเนียม (^{238}U) และโพแทสเซียม (^{40}K) ไอโซโทปกัมมันตรังสีเหล่านี้จะมีปริมาณแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิศาสตร์ธาตุดังกล่าวจะสลายตัวตามหลักครึ่งชีวิต (Half life) และในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่าง ๆ กันในรูปของรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ยูเรเนียม และทอเรียมเป็นไอโซโทปที่เสถียรตั้งตารางที่ 2.2 – 2.3 สำหรับ ^{40}K มีอยู่ในธรรมชาติ 0.012 % มีค่าครึ่งชีวิต 1.277×10^9 y สลายให้อนุภาคเบตาที่มีค่าครึ่งชีวิต 1.4×10^9 y กลายเป็น ^{40}Ca ให้พลังงาน 1.311 MeV และเกิดปฏิกิริยาการจับอิเล็กตรอน (Electron capture) กลายเป็น ^{40}Ar ที่ครึ่งชีวิต 1.19×10^{10} y และปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 1.460 MeV นอกจากนี้ ยังมีรังสีบางส่วนที่มาจากนอกโลกที่เรียกว่ารังสีคอสมิก โดยแหล่งกำเนิดใหญ่ที่สุดของรังสีนี้คือดวงอาทิตย์แต่เป็นส่วนที่น้อยรังสีมีการสัมผัสกับผลึกตัวอย่างนี้สามารถแปลงเป็นปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose) ได้โดยวิเคราะห์จากทอเรียม (^{232}Th) ยูเรเนียม (^{238}U) และโพแทสเซียม (^{40}K) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่จะนำไปใช้ประโยชน์กับการกำหนดอายุวัตถุทางด้านโบราณคดี และธรณีวิทยาด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ตารางที่ 2.2 อนุกรมการสลายตัว พลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของ
ธาตุกัมมันตรังสีในอนุกรมยูเรเนียม

เลขอะตอม (Z)	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		0.506 0.0249	0.0935
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	0.0127	0.00154
				4.621		
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	0.705	
82	^{214}Pb	β	26.8		0.2072	0.2486
					0.2274	
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 2.3 อนุกรมการสลายตัวพลังงานเฉลี่ยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา และครึ่งชีวิตของธาตุ
กัมมันตรังสีในอนุกรมทอเรียม (Ikeya, 1993)

เลขอะตอม (Z)	นิวไคลด์	การสลายตัว	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 m		0.2147	1.20589
82	^{208}Pb	stable				
$E_{\text{total}, \alpha, \beta, \gamma}$				35.932	1.3462	2.4860



ภาพที่ 2.14 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีโพแทสเซียม (Goffer, 2007)

2.16 พิสัย และสมบัติของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา

เมื่อเกิดการสลายตัวของกัมมันตรังสีตามธรรมชาติส่งผลให้ปลดปล่อยรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในผลึกตัวอย่าง จะเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในผลึกตัวอย่าง ก่อเกิดจุดบกพร่องที่ทำให้อิเล็กตรอนสะสมตัวในกับดักอิเล็กตรอน การวัดพลังงานของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาที่วิ่งผ่านผลึกตัวอย่างนี้ มักจะวัด พิสัยที่รังสีสามารถวิ่งเข้าไปในผลึกตัวอย่าง สำหรับพิสัยของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาในตัวอย่าง ที่มีความหนาแน่น (ρ) เท่ากับ 2.6 kg/m^3

2.16.1 รังสีแอลฟา

อัตราปริมาณรังสีแอลฟาภายใน (Internal α -Dose Rate, $D_{in,\alpha}$) รังสีแอลฟามีอำนาจทะลุทะลวงต่ำมาก สามารถวิ่งผ่านแค่ผิววัสดุตัวอย่างได้ไม่กี่ไมโครเมตร สำหรับปริมาณแอลฟาภายนอก (External α -Dose Rate, $D_{ex,\alpha}$) ก็ทำให้เกิดความเสียหายแก่ผิววัสดุตัวอย่างไม่กี่ ซึ่งถือว่าน้อยมาก ๆ และสามารถลบผลกระทบที่ก่อให้เกิดความเสียหายเนื่องจากรังสีแอลฟานี้ได้ด้วยกรด

2.16.2 รังสีเบต้า

อัตราปริมาณรังสีเบต้าภายใน (Internal β -Dose Rate, $D_{in,\beta}$) จะมีผลต่อตัวอย่าง และ สิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ไปอีกในระยะ 1 mm ในขณะที่โดสรังสีเบต้าภายนอก (External β -Dose) จะส่งผลให้เกิดความเสียหายเฉพาะพื้นผิวตัวอย่างประมาณ 1 mm ดังนั้น ผลกระทบที่เกิดจากรังสีเบต้าต้องพิจารณาทั้งภายใน และภายนอกพื้นดินตัวอย่างประมาณ 0.5 – 1 mm

2.16.3 รังสีแกมมา

ตามที่กล่าวไปแล้วพิสัยของรังสีแกมมาในธรรมชาติประมาณ 10 cm หากพิจารณาใน สภาพแวดล้อมภายนอกเป็นกลุ่ม และไม่จำกัด พิจารณามากกว่า 30 cm จากตำแหน่งตัวอย่าง โดย กำหนดให้กัมมันตรังสีอยู่ในสถานะสมดุลพบว่า ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแกมมา (D_γ) สามารถคำนวณได้ จากการสลายตัวตามธรรมชาติของ ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ของผิวนอกของดินและต้องคิดผลกระทบที่เกิดจากรังสีคอสมิก (D_{cos}) เช่นเดียวกับการคำนวณอัตราปริมาณรังสีภายนอก (External Dose Rate, D_{ex})

2.17 ปริมาณรังสีภายใน (Internal dose) และปริมาณรังสีภายนอก (External dose)

ตัวอย่างจะเป็นดินที่อยู่โดยรอบบริเวณกำแพงเมือง ดินบริเวณนั้นเป็นดินตามธรรมชาติที่ได้รับ ปริมาณรังสีจากธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุดิน ซึ่งเราถือว่าปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุดิน บริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลาจะพิจารณาจาก

2.17.1 ปริมาณรังสีภายนอก (External dose, D_{ex})

ปริมาณรังสีภายนอกได้จากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินใน รัศมี 30 cm ของอนุภาคแกมมา และในรัศมี 3 cm ของอนุภาคเบต้า

$$D_{ex} = D'_{ex,\gamma} + D'_{ex,\beta} \quad (2.5)$$

2.17.2 ปริมาณรังสีภายใน (Internal dose, D_{in})

ปริมาณรังสีภายในนั้นได้จากปรากฏการณ์การแผ่รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในผลึกของ ตัวอย่างในรัศมี 3 cm ของอนุภาคเบต้า และในรัศมี 0.3 mm ของอนุภาคแอลฟา

$$D_{in} = kD'_{in,\alpha} + D'_{in,\beta} \quad (2.6)$$

ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีนอกจากปริมาณรังสีภายนอกและปริมาณรังสีภายในจะต้องพิจารณา วิเคราะห์รังสีคอสมิกซึ่งได้จากโปรแกรมคำนวณ โดยรังสีคอสมิกจะถูกควบคุมด้วยเส้นละติจูด ลองติจูด ระดับความสูงและความลึกของผลึกตัวอย่าง ปริมาณรังสีต่อปีจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวอย่างตาม ธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุดิน ดังนั้น ปริมาณรังสีต่อปีของดินคำนวณได้จากปริมาณรังสีต่อปีภายใน และภายนอกเช่นกัน แต่ดินเราจะถือว่า ธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่สม่ำเสมอในทุก ๆ ตัวอย่าง พลังงานที่รังสี

ปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับปริมาณที่ดูดกลืนโดยตัวอย่าง ดังนั้น เราอาจจะพิจารณาว่าขนาดของตัวอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เราสามารถมองข้ามไม่นำปริมาณภายนอก (D_{ex}) มาพิจารณาเพื่อคำนวณค่าปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดิน ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) พิจารณาได้จากปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีจากการสลายตัวของอนุกรม ^{238}U และ ^{238}Th ได้แก่วัสดุแอลฟาและเบต้า รังสีแกมมาจากการแผ่รังสีตามธรรมชาติของธาตุ ^{40}K และรังสีคอสมิก ซึ่งมาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์และกาแล็กซีซึ่งได้จากโปรแกรมคำนวณ ปริมาณรังสีต่อปีสำหรับการกำหนดอายุของดินได้ตามสมการนี้

$$D = D_{in} + D_{cos} \quad (2.7)$$

$$D = kD'_{\alpha} + D'_{\beta} + D'_{\gamma} + D_{cos} \quad (2.8)$$

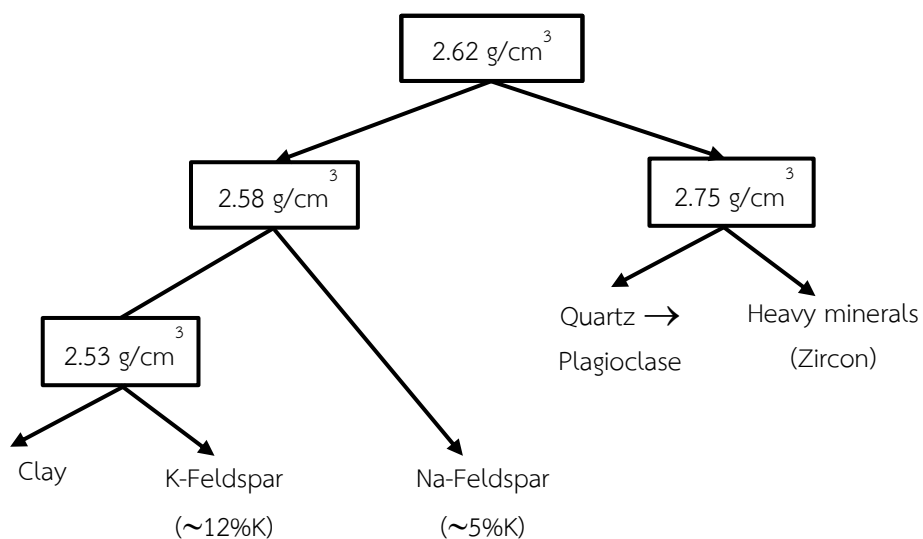
2.18 การประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์อาศัยหลักการการสะสมปริมาณรังสีจากสิ่งแวดล้อมของผลึกตัวอย่าง แล้วเปลี่ยนปริมาณรังสีดังกล่าวออกมาในรูปของแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความร้อน เรียกแสงที่ปลดปล่อยนี้ว่าปริมาณความเข้มแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (TL Intensity) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose) ที่ผลึกตัวอย่างได้รับตลอดเวลา นับตั้งแต่ผลึกตัวอย่างอยู่ในธรรมชาติหรือครั้งสุดท้ายที่ผลึกตัวอย่างถูกกระตุ้น (การที่ตัวอย่างอยู่ในธรรมชาติเมื่อถูกกระตุ้นหรือถูกเผาเปรียบเสมือนลบปริมาณรังสีที่สะสมเดิมทิ้งแล้วตั้งต้นสะสมใหม่อีกครั้ง)

ดังนั้น การกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose, AD) ซึ่งได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL Intensity กับโดสรังสีแบบ Additive dose และปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose) ของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้าง วิเคราะห์ได้จากการรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งนอกจากรังสีคอสมิกในชั้นบรรยากาศที่มาจากนอกโลกมีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์ และกาแล็กซีแล้ว ยังมีรังสีจากไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมกับโลก ได้แก่ ยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม โดยที่ไอโซโทปรังสีเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาว จึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบัน เราก็สามารถคำนวณอายุของตัวอย่างได้ดังสมการต่อไปนี้ (2.1)

จากสมการ (2.1) ค่าปริมาณรังสีสะสมคือปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัวอย่างในกับดักอิเล็กตรอนที่เกิดจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีในบริเวณรอบสิ่งแวดล้อม และปริมาณรังสีต่อปี คือ อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบตัวอย่าง จากธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม โพแทสเซียม และรังสีคอสมิกจากชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในการกำหนดอายุตัวอย่าง

งานวิจัยนี้ทำการกำหนดอายุตัวอย่างดิน เริ่มจากการสกัดผิวด้านนอกของตัวอย่างออก โดยการกัดกรด และคัดเลือกขนาดตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างทำโดยการสกัดผลึกควอตซ์จากตัวอย่างดิน โดยใช้ของเหลวความถ่วงจำเพาะสูง โดยอาศัยความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างของสารเพื่อแยกสารออกจากกัน ดังรูปที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, g/cm^3) ของควอตซ์ (Aitken, 1985)

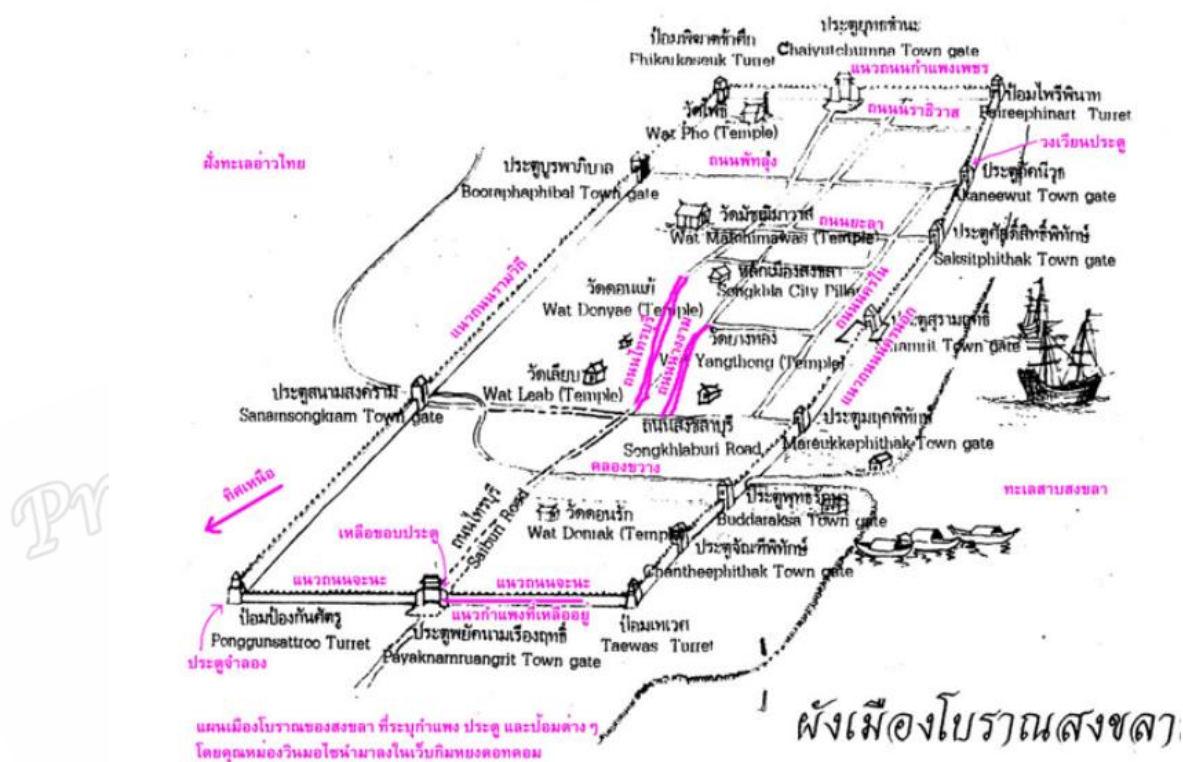
2.19 สถานที่ตั้งที่เก็บตัวอย่างวิจัย

สถานที่ตั้ง : กำแพงเมืองประวัติศาสตร์ จังหวัดสงขลา

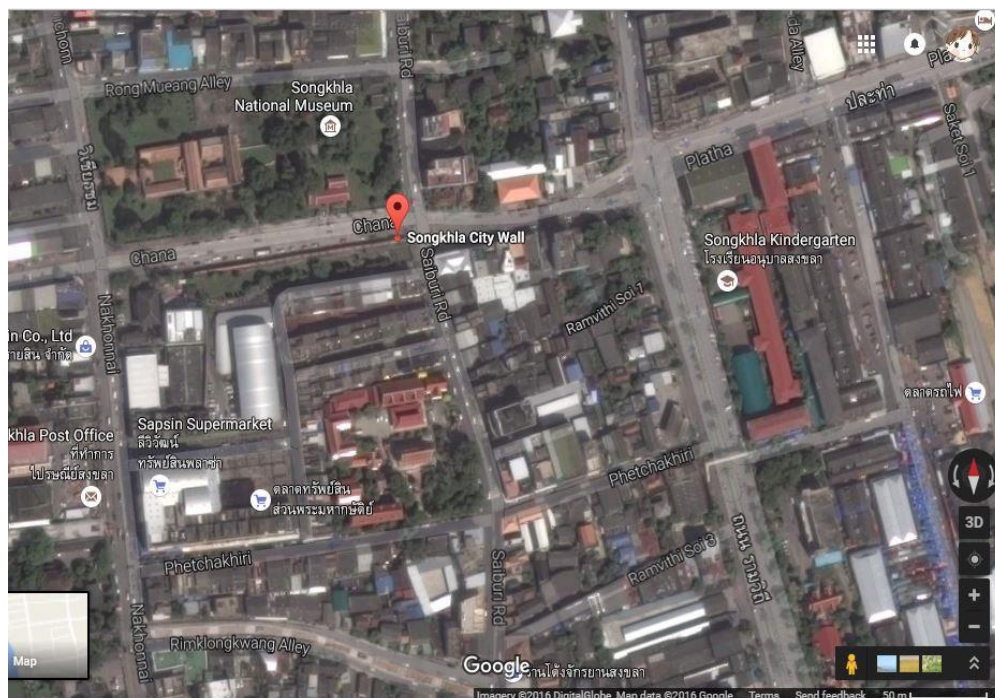
ที่ตั้ง : อยู่ในเขตเทศบาลนครสงขลา ตำบลบ่อยาง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา ตั้งอยู่

บริเวณ UTM 47-675842E 0796211N

อาณาเขตติดต่อ : ทิศเหนือติดกับถนนจะนะ ทิศใต้ติดกับถนนซอยทรัพย์สินส่วนพระมหากษัตริย์ 1 ทิศตะวันออกติดกับถนนไทรบุรี ทิศตะวันตกติดกับองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จังหวัดสงขลา ปรากฏตำแหน่งที่ตั้งอยู่ในแผนที่ทหารลำดับชุด L 7017 ระหว่าง 5022 IV



ภาพที่ 2.16 ผังเมืองโบราณสงขลาที่มีกำแพงโดยรอบ (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา, 2554)



ภาพที่ 2.17 ตำแหน่งที่ตั้งของกำแพงเมืองสงขลา (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา, 2554)

เมืองสงขลาเป็นเมืองท่าที่มีความสำคัญเมื่อหนึ่งในภาคใต้ หลักฐานทางโบราณคดีบ่งชี้ว่าสงขลา ในระยะเวลาแรกตั้งศูนย์กลางเมืองอยู่บริเวณคาบสมุทรสทิงพระ โดยก่อนหน้าพุทธศตวรรษที่ 22 ศูนย์กลางอยู่บริเวณตอนกลางของคาบสมุทรสทิงพระ ต่อมาในราวกลางพุทธศตวรรษที่ 22 จึงได้ย้าย กลางเมืองสงขลามายู่ปลายคาบสมุทรสทิงพระ และเป็นเมืองท่าที่สำคัญแห่งหนึ่งในสมัยกรุงศรีอยุธยา และรัตนโกสินทร์ตอนต้น และเมื่อศูนย์กลางเมืองสงขลาได้ย้ายอยู่บริเวณพื้นที่ฝั่งแหลมสน ตำบลหัวเขา อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา เมืองสงขลาจึงมีสภาพคับแคบ ต่อมาในปี พ.ศ. 2379 พระบาทสมเด็จพระนั่งเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 3 จึงโปรดเกล้าฯ ให้พระยาวิเชียรคีรี (เถี้ยนเส้ง) เจ้าเมืองสงขลาย้ายที่ตั้งเมือง จากบริเวณบ้านแหลมสน ตำบลหัวเขา อำเภอสิงหนคร ปัจจุบันมาสร้างเมืองใหม่ ทางฝั่งตะวันออกของ ทะเลสาบสงขลา ซึ่งเป็นที่ตั้งของตำบลบ่อยางในปัจจุบัน

กระนั้นก็ตาม ศูนย์กลางเมืองสงขลาในระยะแรกตามหลักฐานทางโบราณคดีบ่งชี้ว่า ก่อนหน้า พุทธศตวรรษที่ 22 ศูนย์กลางเมืองสงขลาตั้งอยู่บริเวณสทิงพระ เป็นเมืองท่าสำคัญในสมัยกรุงศรีอยุธยา (ชื่อเมืองสงขลาปรากฏในพงศาวดารกรุงศรีอยุธยาในสมัยสมเด็จพระรามาธิบดีที่ 1 แห่งกรุงศรีอยุธยาเมื่อ ปี พ.ศ. 1893 ว่าเป็นเมืองประเทศราชในจำนวน 16 หัวเมือง นอกจากนี้ บันทึกของพ่อค้าและนักเดินเรือ ชาวอาหรับเปอร์เซีย ระหว่างปี พ.ศ. 1993 – 2093 ได้เอ่ยชื่อเมืองสงขลาในนามของเมือง "ซิงกูร์" หรือ "ซิงกอร่า" ในหนังสือประวัติศาสตร์และการเมืองแห่งราชอาณาจักรสยามของนายนิโกลาส แซร์แวส เรียกชื่อเมืองสงขลาว่า "เมืองสิงขร" โดยได้สันนิษฐานคำว่า "สงขลา" น่าจะเพี้ยนมาจากคำว่า "สิงหลา"

หรือ "สิงขร") และเมืองทำยงต่อเนื่องสมัยรัตนโกสินทร์ตอนต้น ต่อมาได้ย้ายศูนย์กลางเมืองมาตั้งอยู่บริเวณพื้นที่ฝั่งแหลมสน (หัวเขาแดงยังคงปรากฏป้อมกำแพงให้เห็นอยู่) กระทั่งย้ายมาสร้างเมืองใหม่ฝั่งตะวันออกทะเลสาบสงขลาในสมัยรัชกาลที่ 3

กำแพงเมืองสงขลาสร้างแล้วเสร็จปี พ.ศ. 2385 (ระหว่าง พ.ศ. 2381 หัวเมืองมลายูกบฏ ยกทัพมาเผาเมืองจะนะ แล้วเลยเข้าตีเมืองสงขลา ทำให้ก่อสร้างกำแพงเมืองล่าช้า) โดยกำแพงเมืองเวลานั้นอยู่ห่างจากน้ำประมาณ 40 m กำแพงจากด้านทิศตะวันออกถึงทิศตะวันตกยาวประมาณ 1200 m ด้านทิศเหนือถึงทิศใต้ยาว 1000 m มีป้อม 8 ป้อม อยู่มุมเมือง 4 ป้อม ด้านตะวันออกและตะวันตกอีกด้านละ 2 ป้อม ตัวป้อมกว้างและยาว 10 m มีประตูเมืองเป็นซุ้มใหญ่โดยรอบ 10 ประตู แต่ละประตูกว้าง 3 m สูง 6 m ซุ้มเป็นหลังคาจีน บนกำแพงประกอบด้วยโอบเสมาสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 1.9 m และมีประตูช่องกุศอีก 10 ประตู แต่ละประตูกว้าง 2 m สูง 2.50 m

ชื่อประตูเมืองสงขลาที่ปรากฏหลักฐานในเอกสารโบราณ ได้แก่ 1. ประตูพุทธรักษา 2. ประตูสุรามฤทธิ์ 3. ประตูศักดิ์สิทธิ์พิทักษ์ 4. ประตูอัคนิวรุ 5. ประตูชัยยุทธชำนาญ 6. ประตูบูรพาภิบาล 7. ประตูสนามสงคราม 8. ประตูพยัคฆนามเรืองฤทธิ์ 9. ประตูจันทิพิทักษ์ 10. ประตูมรคาพิทักษ์

กำแพงเมืองสงขลามีการซ่อมแซมมาโดยตลอด เมื่อครั้งพระยายมราช (ปั้น สุขุม) เป็นพระวิจิตรวรสาสน์ ข้าหลวงพิเศษตรวจราชการเมืองสงขลา และเป็นพระยาสุขุมนัยวินิต สมุหเทศาภิบาลมณฑลนครศรีธรรมราช (พ.ศ. 2437 – 2448) ได้รื้อกำแพงเมืองสงขลาส่วนใหญ่เพื่อขยายถนนและปรับปรุงตัวเมืองให้กว้างขึ้น โดยใช้อิฐจากการรื้อกำแพงส่วนใหญ่มาถมถนน

ต่อมา มีการก่อสร้างอาคาร (หลังพ.ศ. 2478) ได้ปรากฏร่องรอยหลักฐานการรื้อกำแพงเมืองด้านทิศเหนือและบริเวณมุมด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือ พบหลักฐานแผ่นศิลาจารึกเป็นตารางหรือลายเส้นเป็นตัวเลขและอักขระอยู่ใต้ป้อม สันนิษฐานว่า น่าจะเป็นยันต์ที่เรียกว่า "ยันต์สี่" มีตัวเลขอยู่ในช่องตารางทั้ง 37 ช่อง อาจหมายถึงโพธิปักขิยกรรม 37 ประการ อย่างไรก็ตาม ยันต์ดังกล่าวอาจสัมพันธ์กับยันต์ที่เรียกว่า "ยันต์โสฬสมหามงคล" ใช้สำหรับขับไล่ภูตผีปีศาจ ทำลายไสยเวทย์อาคม วัตถุอาถรรพ์ทุกชนิด ในด้านโบราณคดี มีการขุดค้นรากฐานอาคารกำแพงเมืองซึ่งจมลึกไปในชั้นดินธรรมชาติ พบท่อนไม้ขนาดเล็กปักอยู่ชิดกับฐานรากของกำแพงและก้อนหินปะปน สันนิษฐานเพื่อป้องกันการพังทลายของดินในขณะที่ขุดหลุมเพื่อทำฐานรากของกำแพงเมือง ในปี พ.ศ. 2554 กำแพงเมืองสงขลาบางส่วนพังทลายจากพายุฝนตกหนักดังภาพที่ 2.18 สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา ได้ขุดค้นเพื่อตรวจสอบทางโบราณคดีจากตำแหน่งดังภาพที่ 2.19 เพื่อระบุตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง แล้วหลังจากนั้นจึงได้ดำเนินการบูรณะให้กลับมาอยู่สภาพดั้งเดิม

กำแพงเมืองสงขลาปัจจุบันเหลืออยู่บริเวณกำแพงเมืองด้านทิศเหนือซึ่งกรมศิลปากร ได้ประกาศขึ้นทะเบียนเป็นโบราณสถานชาติในหนังสือราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 52 ตอนที่ 75 หน้า 3713 ลงวันที่ 8 มีนาคม 2478 และประกาศขอเขตพื้นที่โบราณสถานในหนังสือราชกิจจานุเบกษาเล่มที่ 93 ตอนที่ 112 หน้า 2567 ลงวันที่ 21 กันยายน 1519 พื้นที่โบราณประมาณ 2 ไร่ 17 ตารางวา และแนวกำแพงเมืองด้านทิศตะวันตกซึ่งอยู่ในพื้นที่หน่วยบริการประชาชนร่วมข่าวของสถานีตำรวจภูธรเมืองสงขลา



ภาพที่ 2.18 กำแพงเมืองสงขลาพังทลายบางส่วน (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา, 2554)



ภาพที่ 2.19 ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่าง (สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา, 2554)

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งใช้ในการเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์การทดลอง วิธีดำเนินการทดลอง ขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง ขั้นตอนการอบรังสี ขั้นตอนการวัดปริมาณรังสีสะสม ซึ่งแสดงรายละเอียดต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 วัสดุและสารเคมี

3.1.1 วัสดุกรองแสง

3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)

3.1.2.2 กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF)

3.1.2.3 กรดแอสिटิก (Acetic acid)

3.1.2.4 ของเหลวความถ่วงจำเพาะสูง

(Tetrabromoethane: TBE, Dipropylene glycol)

3.1.2.5 น้ำกลั่น (Distilled water)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ รุ่น Harshow-3500

3.2.2 ระบบฉายรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60

3.3.3 สารรังสีมาตรฐาน (Standard Radiactive source)

3.3.4 เครื่องชั่งอย่างละเอียด 0.0001 g

3.3.5 เครื่องปั่นแยกเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge)

3.3.6 เครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic Cleaner)

3.3.7 ครกบดสาร (Mortar)

3.3.8 หลอดหยด (Dropper)

3.3.9 ปีกเกอร์ (Beaker)

3.3.10 ตะแกรงร่อนตัวอย่างขนาด 150 μ

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา

การวางผังจุดคั้น เป็นการวางผังในระบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตามแนวแกนทิศเหนือ-ใต้ และเรียกพื้นที่ของหลุมขุดคั้นตามลำดับทิศ

พื้นที่ขุดคั้นอยู่บริเวณตอนกลางของกำแพงจำนวน 3 หลุม ได้แก่

หลุมขุดที่ 1 มีขนาด 3×6 m อยู่บริเวณตอนกลางของกำแพง

หลุมขุดที่ 2 มีขนาด 2×4 m อยู่บริเวณประตูช่องกุดของกำแพง

หลุมขุดที่ 3 มีขนาด 3×3 m อยู่ด้านทิศตะวันตกของหลุมขุดคั้นที่ 2

การกำหนดจุดตายตัว (Fix Point) ได้กำหนดบนผนังกำแพงเมืองในระดับความสูงจากผิวดิน 30 cm อยู่บริเวณหลุมขุดคั้นที่แล้วถ่ายระดับ Datum มายังหลุมขุดคั้นทั้ง 3 หลุม เพื่อใช้ในการบันทึกระดับความลึกของโบราณวัตถุที่พบในแต่ละชั้นดินของการขุดคั้น

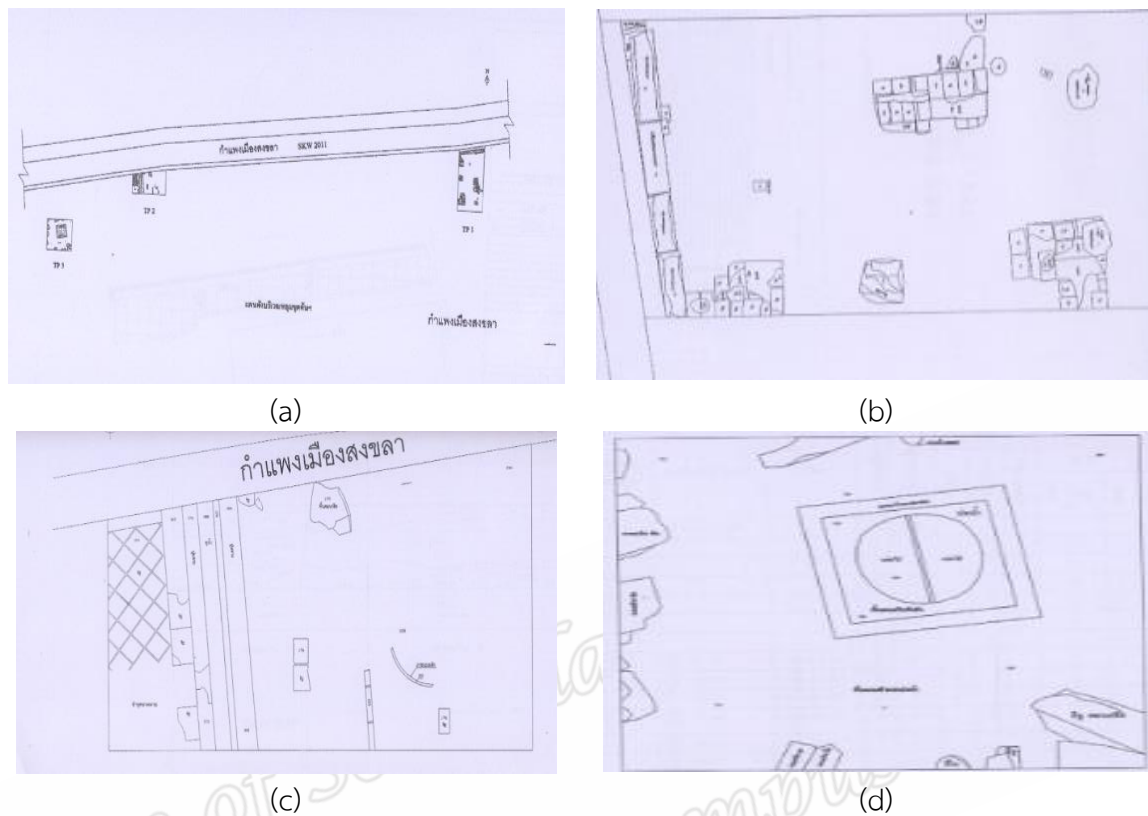
เทคนิคการขุดคั้น เป็นการขุดคั้นโดยใช้ระดับสมมติ ระดับละ 10 cm โดยการใช้การขุดคั้นด้วยเครื่องมือขนาดเล็กและขนาดใหญ่ตามสภาพของชั้นดินโบราณคดีดังภาพที่ 3.1 - 3.3 และแสดงถึงตำแหน่งตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่างในแต่ละหลุมตามตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ตัวอย่างการเก็บตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา



ภาพที่ 3.2 รายละเอียดการทำการขุดค้นแหล่งโบราณคดี (a) กำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา (b) กำแพงเมืองก่อนทำการขุดค้นทางโบราณคดี (c) การตีเส้นกำหนดการขุดค้น (d) การจดบันทึกในแต่ละหลุม



ภาพที่ 3.3 แผนผังหลุมชุดคัน (a) แผนผังหลุมชุดคันทั้ง3หลุม (b) แผนผังหลุมชุดคันที่1 (c) แผนผังหลุมชุดคันที่2 (d) แผนผังหลุมชุดคันที่3

ตารางที่ 3.1 แสดงถึงตำแหน่งตัวอย่างทั้ง5ตัวอย่างในแต่ละหลุม

หลุมชุดคัน	รหัสตัวอย่าง
หลุมชุดคันที่1	SKTP1
หลุมชุดคันที่2	SKTP2
หลุมชุดคันที่3	SK012 , SK013, SK016



ภาพที่ 3.4 ลักษณะผนังชั้นดินของหลุมขุดค้น (a) หลุมขุดค้นที่ 1 ด้านทิศใต้ (b) หลุมขุดค้นที่ 2 ด้านตะวันตก (c) หลุมขุดค้นที่ 2 ด้านทิศใต้ (d) หลุมขุดค้นที่ 3 ด้านทิศใต้

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง

3.3.2.1 นำตัวอย่างไปผ่านตะแกรงร่อนเพื่อให้ได้ขนาดตัวอย่าง 90-150 μm

3.3.2.2 นำตัวอย่างที่คัดขนาดแล้วไปกักกรดไฮโดรฟลูออริก 48 % ในปีกเกอร์ชนิดเทพลอนภายใต้ชุดดูดอากาศ (Exhaust Hood) เป็นเวลานาน 1 คืน เพื่อลดผลการรบกวนรังสีแอลฟาจากธรรมชาติ นำไปล้างทำความสะอาด แล้วแช่ในกรดไฮโดรคลอริก 10 % เพื่อกำจัดฟลูออไรด์ที่เกิดจากกระบวนการธรรมชาติ แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตนตามลำดับต่อนั้นทั้งตัวอย่างให้แห้ง

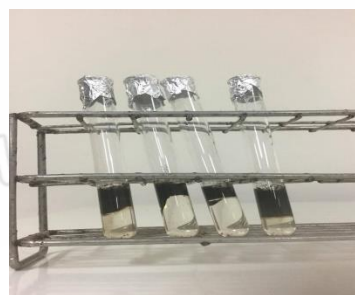
3.3.2.3 นำตัวอย่างที่แห้งสนิทแล้วไปแยกผลึกที่ไม่ต้องการ ด้วยของเหลวความถ่วงจำเพาะสูง (Tetrabromoethane: TBE, Dipropylene glycol) แล้วนำไปเซนต์พิวส์ที่ 2,000 รอบต่อนาที หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 คืน

3.3.2.4 แยกผลึกควอทซ์ตามค่าความถ่วงจำเพาะของสารตัวอย่าง ซึ่งผลึกที่ได้จะแยกชั้นในของเหลวความถ่วงจำเพาะสูง หลังจากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน ตามลำดับ

3.3.2.5 นำตัวอย่างเก็บไว้ให้แห้งจนได้ผลึกที่พร้อมจะใช้งานเช่นเดียวกันกับการเตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้



(a)



(b)

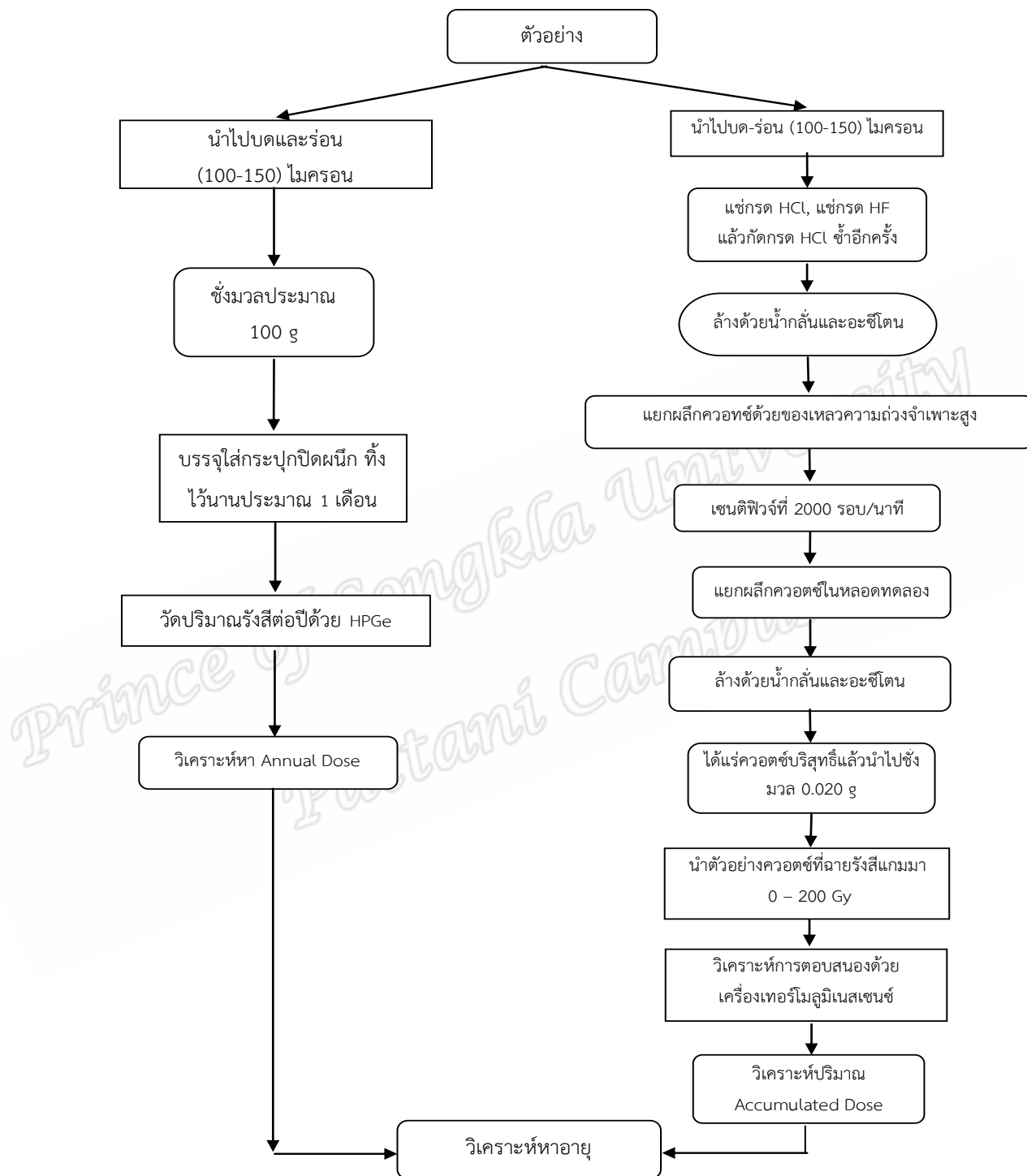


(c)



(d)

ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (a) ลักษณะของตัวอย่างดินรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา (b) การเซนต์พิวส์เพื่อแยกชั้นผลึก (c) ตัวอย่างที่เก็บไว้ให้แห้ง (d) ตัวอย่างที่พร้อมจะใช้งานทั้ง 2 ส่วน คือ TL และ HPGe



ภาพที่ 3.6 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.3 การวัดปริมาณรังสีสะสมต่อปี

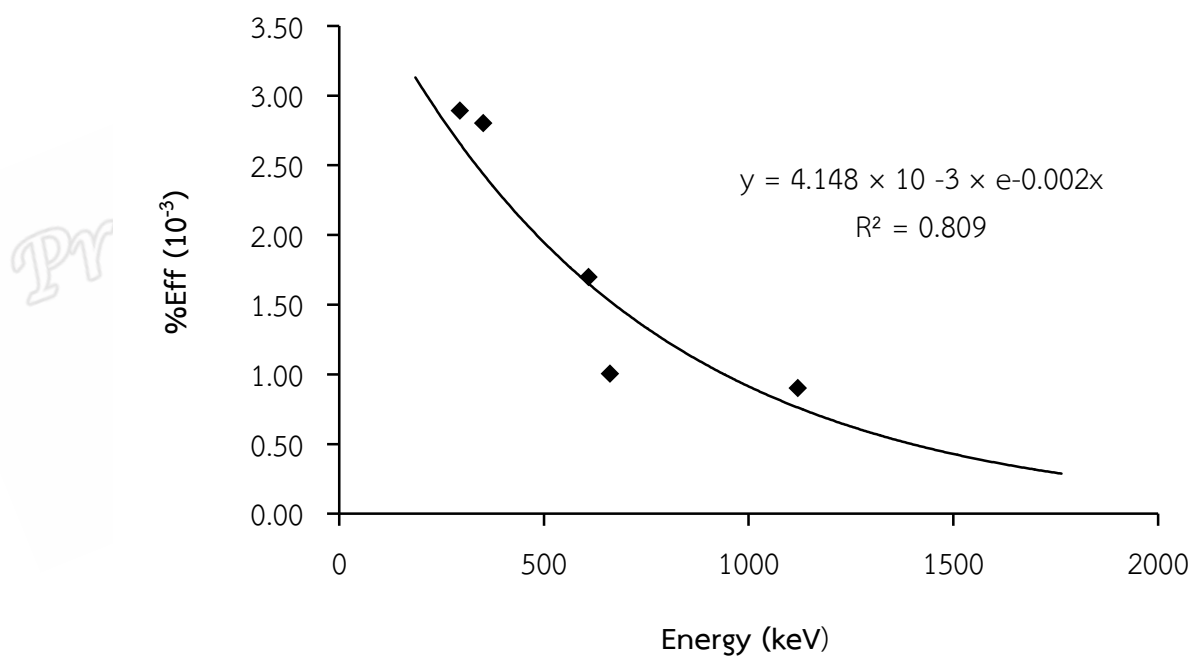
3.3.3.1 นำตัวอย่างดินที่ผ่านการบดและชั่งบรรจุในกระปุกพลาสติก วางทิ้งไว้ 1 เดือน หรือมากกว่า เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลรังสีแบบถาวรของการสลายตัว

3.3.3.2 ตรวจวัดสารกัมมันตรังสีด้วยหัววัดชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) ใช้เวลาในการวัด 5 hr/sample แล้วบันทึกข้อมูล

3.3.3.3 วัดรังสีภูมิหลัง (Background Radiation) ใช้เวลาในการวัด 5 hr/time แล้วบันทึกข้อมูล

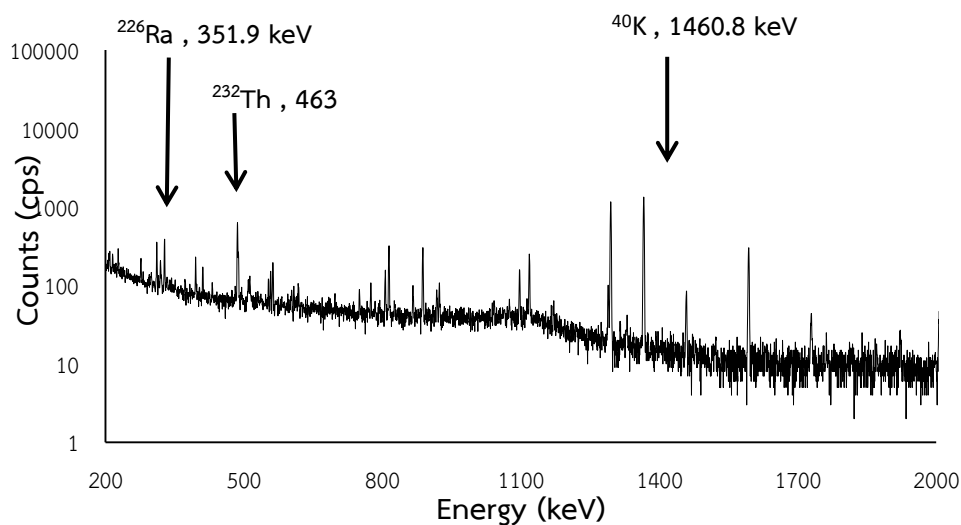
3.3.3.4 วิเคราะห์พื้นที่ใต้พีคในช่วงพลังงานโฟโตพีคของ ^{40}K , ^{238}U และ ^{232}Th ตัวอย่าง แล้วลบออกด้วยค่ารังสีภูมิหลัง

3.3.3.5 วัดสารรังสีมาตรฐานใช้เวลา 5 hr โดยวิเคราะห์พื้นที่ คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการนับวัด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกับพลังงานต่างๆ ของสารรังสีมาตรฐานเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับวัดของนิวไคลด์ ^{40}K , ^{238}U และ ^{232}Th



ภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกับพลังงานต่างๆ

3.3.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของ ^{40}K , ^{238}U และ ^{232}Th จากกราฟประสิทธิภาพของสารรังสีมาตรฐาน



ภาพที่ 3.8 สเปกตรัมของสารรังสีมาตรฐาน ^{40}K , ^{238}U และ ^{232}Th

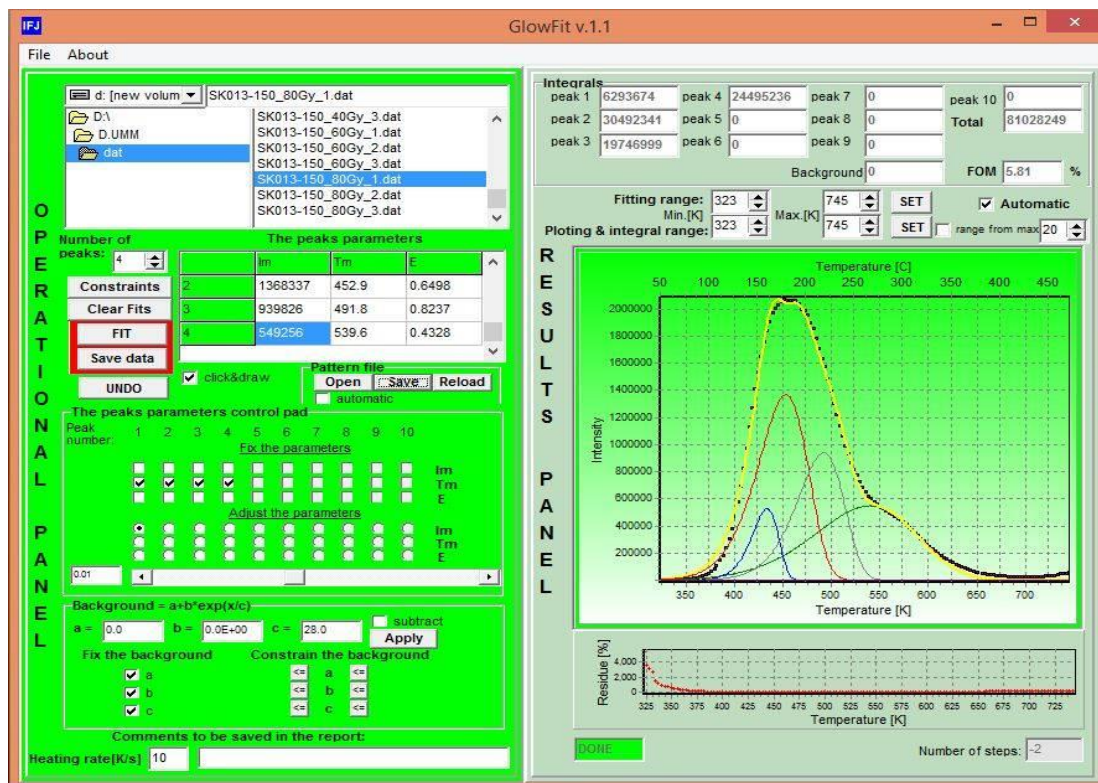
3.3.5 ขั้นตอนการวัดปริมาณรังสีสะสม

อ่านสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างธรรมชาติ ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่าน ขั้นตอนการฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 Excel

อ่านสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ของทุกๆ ตัวอย่าง ภายใต้แก๊สไนโตรเจนที่ระดับอุณหภูมิสูงสุด $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิสูงสุด $10\text{ }^{\circ}\text{C/S}$ ศักย์ไฟฟ้า 850 V ซึ่งตัวอย่างที่ได้จะต้องป้องกันการรับแสงและความร้อนจากภายนอก โดยทำการวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในห้องมืด แล้วบันทึกผลวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GlowFit

โกลว์เคิร์ฟที่ได้จากผลึกตัวอย่างตะกอนดินที่ผ่านการฉายรังสีแบบ Additive dose ที่ระดับโดสรังสีต่าง ๆ จะแสดงผลออกมาเป็นสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบภาพที่ 3.5 ซึ่งพื้นที่ใต้พีคหาได้โดยใช้โปรแกรมโกลว์ฟิต ซึ่งเป็นโปรแกรมดาวนโหลด (Puchalska and Bilski, 2006) เพื่อวิเคราะห์ผลให้มีความถูกต้องมากขึ้น

นำโกลว์เคิร์ฟที่ได้จากเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เข้าโปรแกรมโกลว์ฟิตมาอ่านค่า TL Intensity ของแต่ละอุณหภูมิ เพื่อเลือก TL Intensity ที่อุณหภูมิของพีคในการคำนวณปริมาณรังสีสะสม งานวิจัยนี้เลือกพีคที่อุณหภูมิ $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ เพื่อใช้ในการกำหนดอายุ เนื่องจากพีคที่อุณหภูมิสูงนี้มีความเสถียรภาพที่สุด



ภาพที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Glow Fit

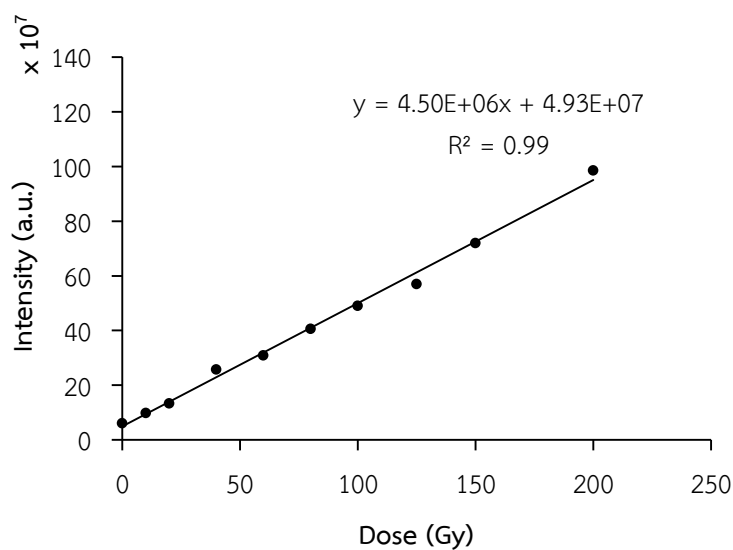
นำค่าที่ TL Intensity ของแต่ละอุณหภูมิที่ได้รับ เขียนกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานด้วย linear Extrapolation โดยแกน x คือ ค่า TL Intensity (a.u.) และแกน y คือ ค่าโดสรังสีแกมมาแบบแบ่งย่อย ตัวอย่างหลาย ๆ ชุด (Gy)

จากสมการพิตกราฟที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง TL intensity (a.u.) และอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) จะอยู่ในรูปสมการ (3.1)

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

เมื่อต่อเส้นกราฟตัดแกน x จะได้ค่า y คือ TL Intensity Residual และ x คือปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่าง

3.3.6 ผลจากการวิเคราะห์หาค่าอายุ



ภาพที่ 3.10 ปรับเทียบ (Calibration Curve) ที่รังสีระดับต่าง ๆ ของตัวอย่าง

3.3.7 การคำนวณหาค่าอายุ

จากการทดลองการหาอายุด้วยวิธีเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งได้มาจากค่าอัตราส่วนของปริมาณรังสีที่สะสม (AD) และปริมาณรังสีเฉลี่ยต่อปี (D) ของตัวอย่าง สามารถคำนวณหาอายุได้จากสมการ (2.1)

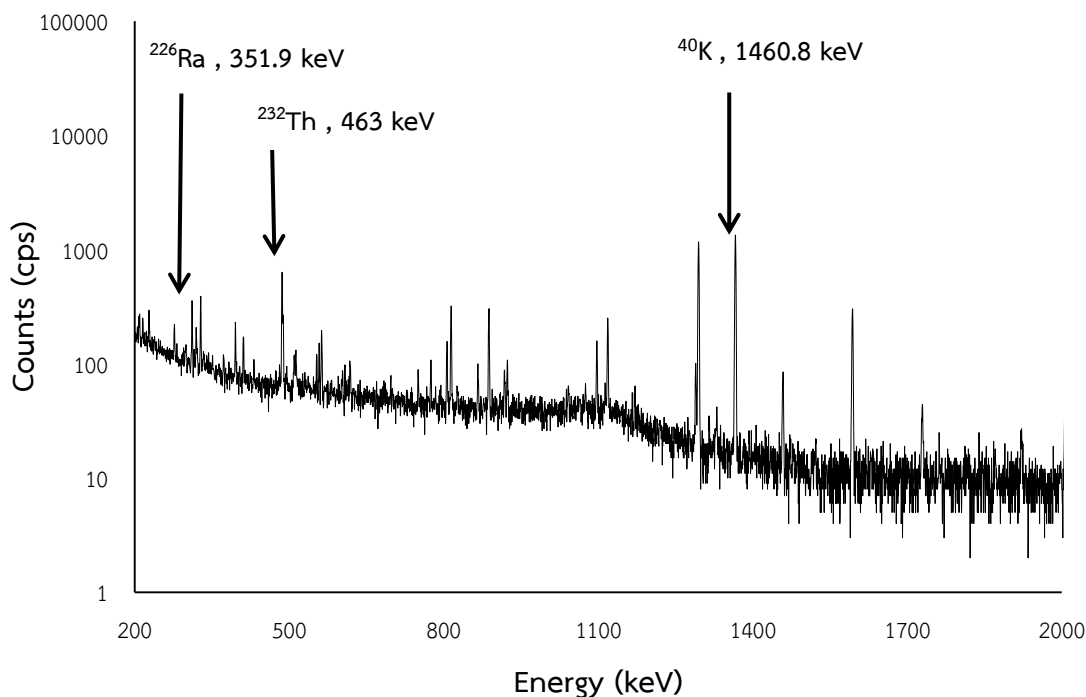
บทที่ 4

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการตอบสนองต่อรังสีของผลึกตัวอย่างจากแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา นำไปสู่การกำหนดอายุแบบสัมบูรณ์ด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นการวัดแสงที่ปลดปล่อยออกมาเมื่อผลึกถูกเผาจนร้อนด้วยอุณหภูมิ 600 °c ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวัดปริมาณกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในตัวอย่าง

จากการนำตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลา บดจนละเอียดสม่ำเสมอขนาดน้อยกว่า 150 μm ทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) โดยการวัดรังสีแกมมาของตัวอย่าง (ภาพที่ 4.1) เป็นเวลา 11 ชั่วโมง ด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง ได้ผลการทดลองดังนี้



ภาพที่ 4.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน ยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม

4.2 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีจากการวิเคราะห์โดยใช้หัววัดชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe)

จากการนำสเปกตรัมของตัวอย่างตะกอนดินมาวิเคราะห์ความแรงของรังสีแกมมาที่สลายตัวของไอโซโทปกัมมันตรังสี ^{226}Ra , ^{232}Th และ ^{40}K ที่พลังงาน 351.9, 463 และ 1460.8 keV ตามลำดับ เพื่อคำนวณหาปริมาณธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) แลโพแทสเซียม (^{40}K) โดยใช้หลักการเปรียบเทียบจำนวนนับรังสีแกมมาของตัวอย่างกับสารอ้างอิงมาตรฐาน ซึ่งทราบปริมาณความเข้มข้นของธาตุที่สนใจแน่นอน ได้ผลการวิจัยตามตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมในตะกอนดิน

ตัวอย่าง	^{238}U (ppm)	^{232}Th (ppm)	^{40}K (%)
SK012	8.20 ± 1.00	3.99 ± 0.70	2.28 ± 0.03
SK013	10.38 ± 0.33	2.32 ± 0.05	4.36 ± 0.09
SK016	19.24 ± 9.84	2.07 ± 0.28	4.46 ± 0.33
SKTP1	24.74 ± 2.06	3.48 ± 0.50	3.91 ± 0.10
SKTP2	19.89 ± 1.47	2.14 ± 0.88	3.75 ± 0.04

3.76

4.3 ผลการคำนวณปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose หรือ Dose rate, D)

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมจากการวัดรังสีแกมมาโดยใช้หัววัดชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (HPGe) นำไปสู่การคำนวณหาปริมาณรังสีต่อปี (Annual dose, D) ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

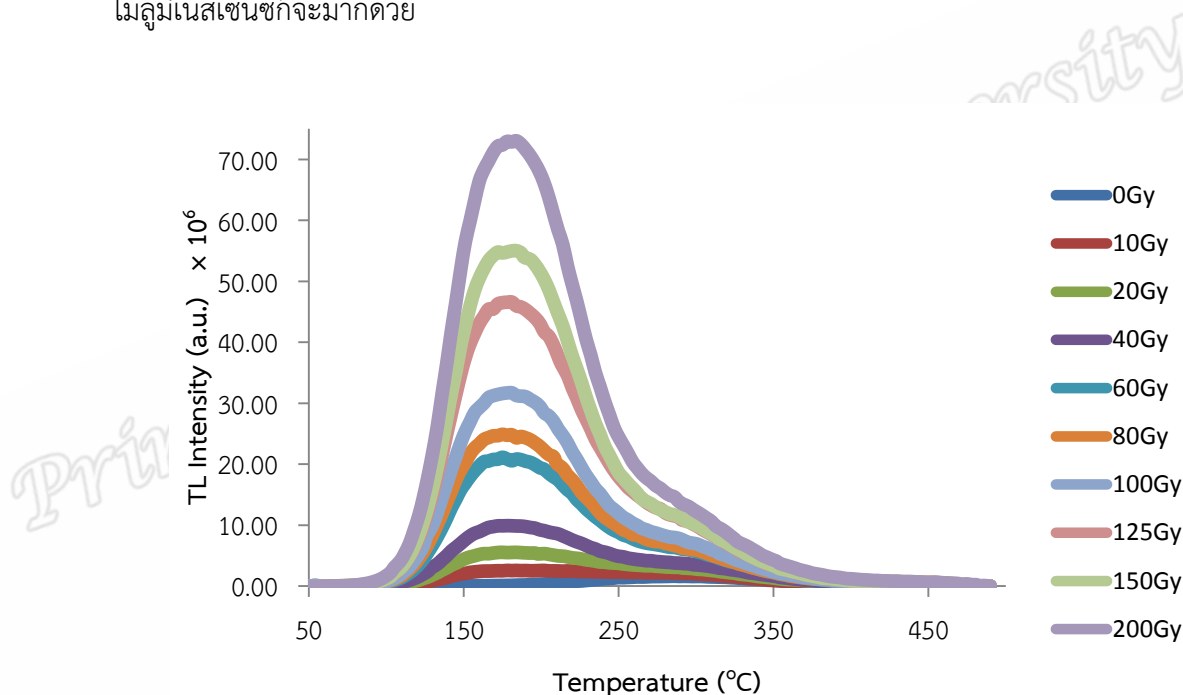
ตารางที่ 4.2 ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างตะกอนดิน

ตัวอย่าง	D_{α} (mGy/a)	D_{β} (mGy/a)	D_{γ} (mGy/a)	D_{cos} (mGy/a)	D (mGy/a)
SK012	25.02	2.83	1.57	0.162 ± 0.08	64.595 ± 3.06
SK013	29.65	1.55	2.15	0.162 ± 0.08	55.892 ± 1.00
SK016	53.32	2.80	3.13	0.162 ± 0.08	68.251 ± 0.33
SKTP1	69.16	3.63	3.70	0.162 ± 0.08	77.085 ± 2.06
SKTP2	55.12	2.90	3.06	0.162 ± 0.08	62.898 ± 1.47

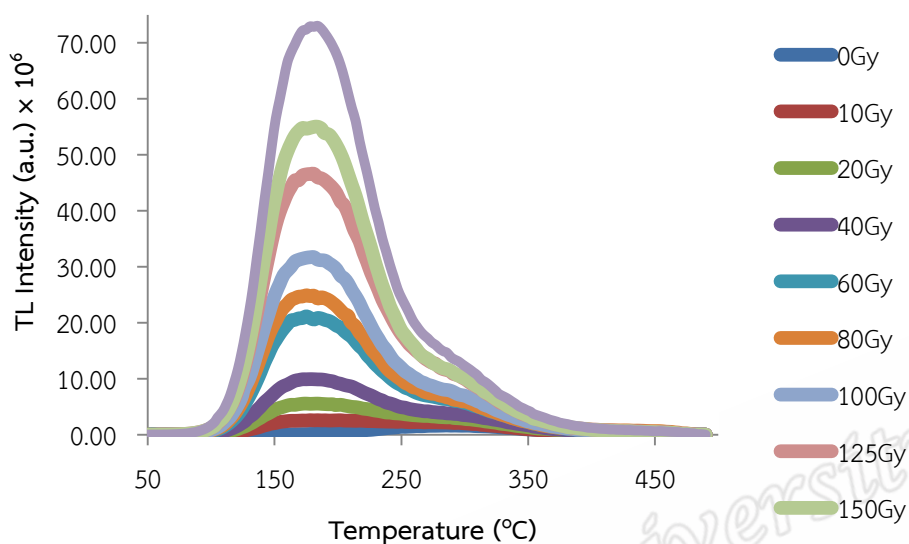
4.4 ผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของแต่ละตัวอย่าง

4.4.1 กราฟ Glow Curve

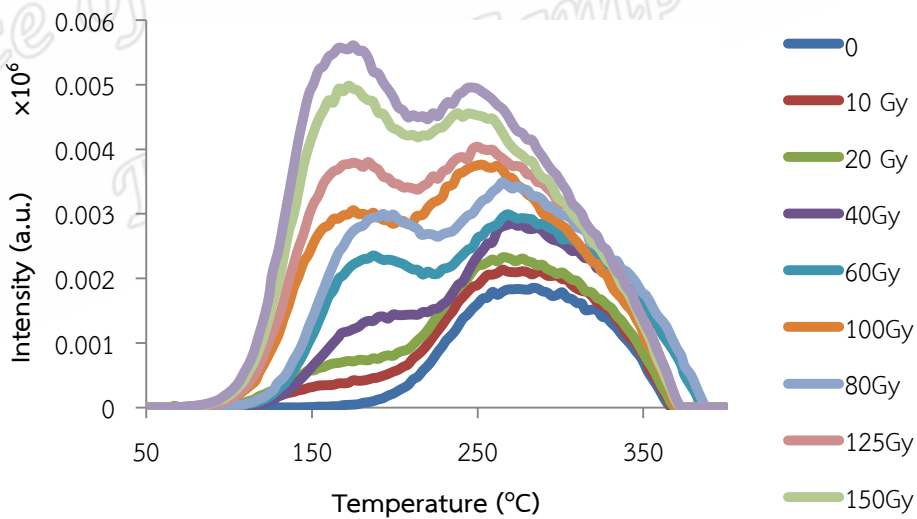
จากการศึกษาการวิเคราะห์การตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในผลึกควอตซ์ที่รับรังสีของตัวอย่างด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์แสดง ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับปริมาณของอุณหภูมิเป็นกราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “Glow-Curve” โดยจะพบว่าความเข้มแสงของการตอบสนองที่วัดได้ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างจะแปรผันตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการรับรังสีมาเป็นเวลานานในสิ่งแวดล้อม ก็จะส่งผลให้มีปริมาณอิเล็กตรอนมากขึ้นตามระยะเวลาที่สะสม ความเข้มของการตอบสนองที่วัดได้ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ก็จะมากด้วย



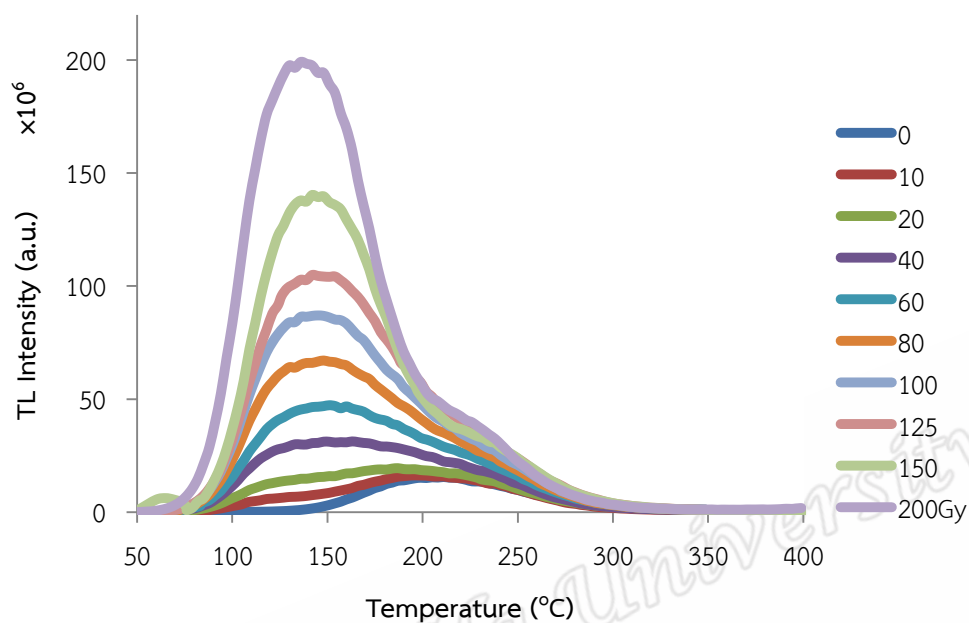
ภาพที่ 4.2 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอาบรังสีของตัวอย่างตะกอนดิน (SK012) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา



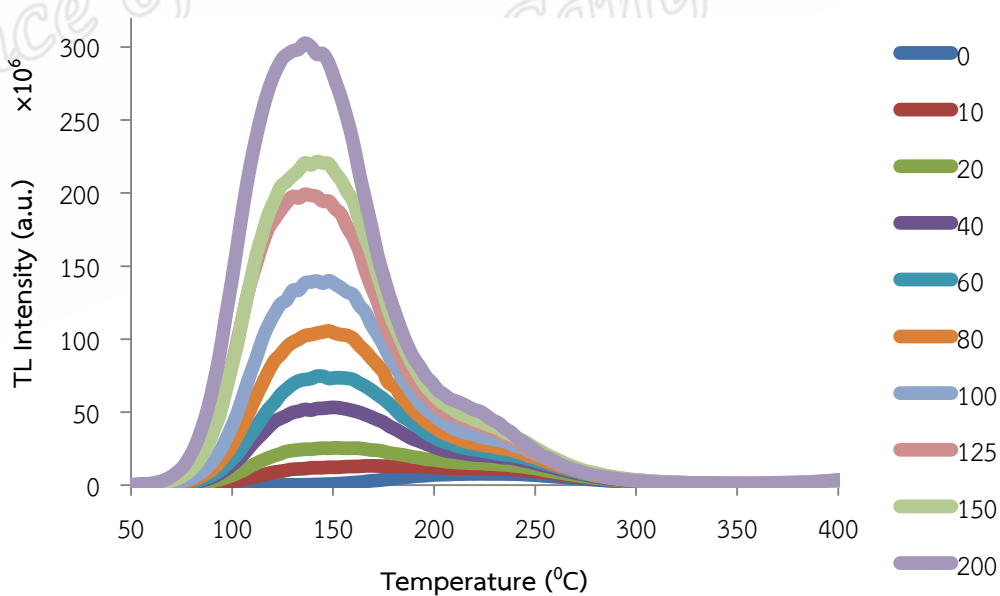
ภาพที่ 4.3 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอาบรังสีของตัวอย่างตะกอนดิน (SK013) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา



ภาพที่ 4.4 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอาบรังสีของตัวอย่างตะกอนดิน (SK016) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา



ภาพที่ 4.5 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอาบรังสีของตัวอย่างตะกอนดิน (SKTP1) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา

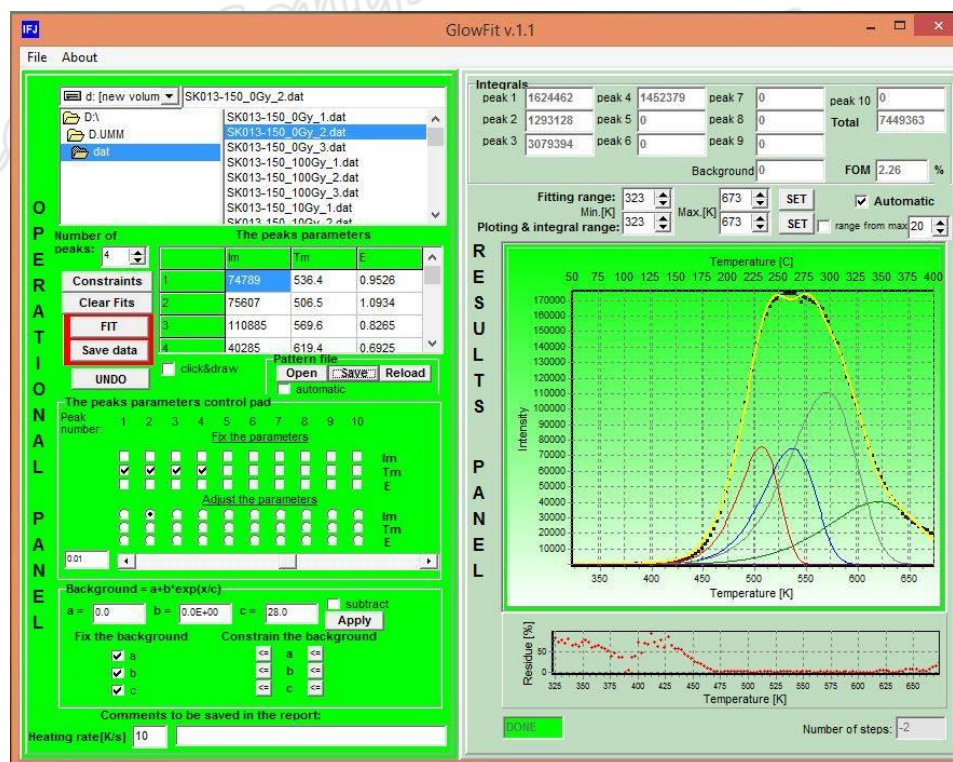


ภาพที่ 4.6 ผลการวัดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในธรรมชาติและผ่านการอาบรังสีของตัวอย่างตะกอนดิน (SKTP2) รอบบริเวณกำแพงเมืองสงขลา

จากการศึกษาผลการตอบสนองต่อรังสีเพื่อวัด TL Intensity ของตัวอย่างที่รับรังสีจากธรรมชาติ และตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแบบ Additive Dose ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะได้กราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอุณหภูมิการตอบสนอง ซึ่งเป็นการพความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Glow Curve ดังรูปที่ 4.2 - 4.6 พบว่า ความเข้มแสงของการตอบสนองที่วัดได้จะแปรผันตรงกับปริมาณ อิเล็กตรอนอิสระ ตัวอย่างที่ผ่านการรับโดสรังสีที่ระดับมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณอิเล็กตรอนเยอะมากขึ้น ตามไปด้วย

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมโกลว์ฟิต

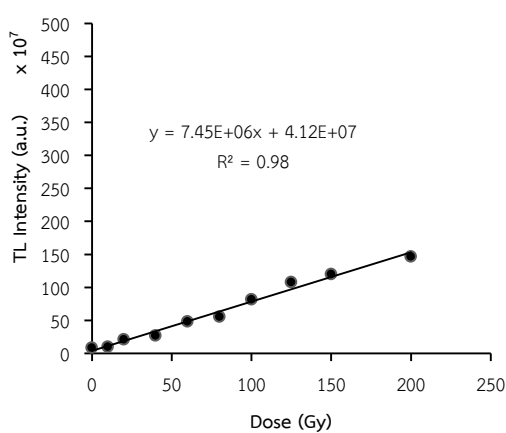
เมื่อนำค่า TL Intensity หารด้วยน้ำหนักตัวอย่างจะได้ค่า TL Intensity ในหน่วย arbitrary unit (a.u.) เข้าโปรแกรม Glow Curve พบว่า สเปกตรัมที่ปรากฏประกอบไปด้วยสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็น องค์ประกอบ ซึ่งสัญญาณการตอบสนองของตัวอย่างตะกอนดินสอดคลองไปด้วย 5 อุณหภูมิ คือ 153 °C, 175 °C, 210 °C, 250 °C ดังภาพที่ 4.7 ในงานวิจัยนี้เลือก TL Intensity ที่อุณหภูมิการตอบสนอง 250 °C เนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวมีความเสถียรมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างกล่าว เพื่อใช้ วิเคราะห์ปริมาณ Accumulated Dose ในแต่ละตัวอย่าง



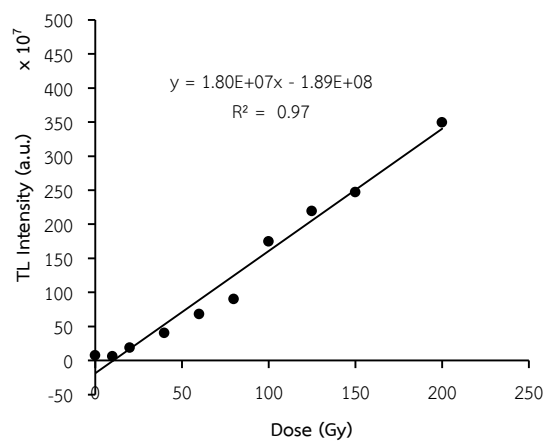
ภาพที่ 4.7 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ Glow Curve ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละ อุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง

4.4.3 กราฟเปรียบเทียบ (Calibration Curve)

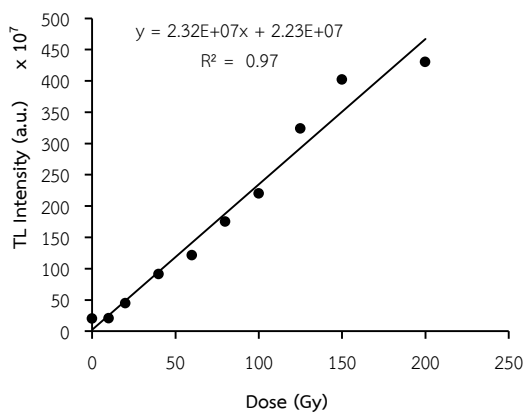
เมื่อนำค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิ ซึ่งอ่านได้จากโปรแกรมโกลว์ฟิต เพื่อสร้างกราฟเปรียบเทียบมาตรฐานได้ผลดังนี้



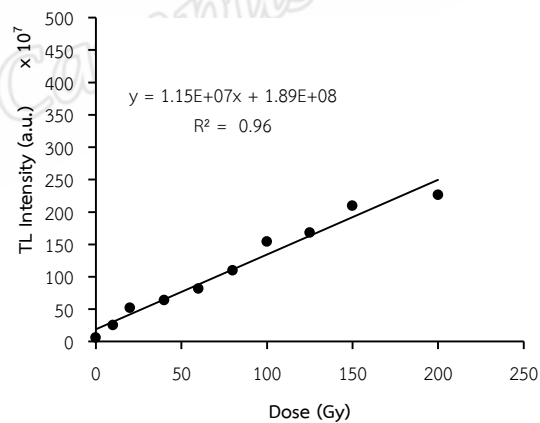
(a)



(b)

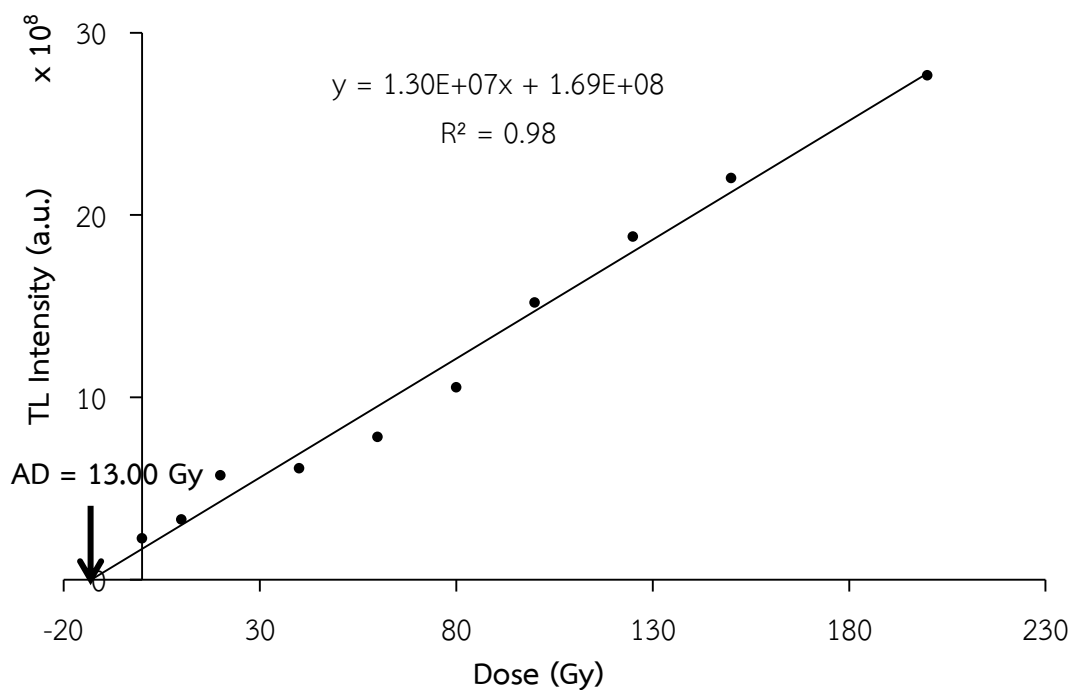


(c)



(d)

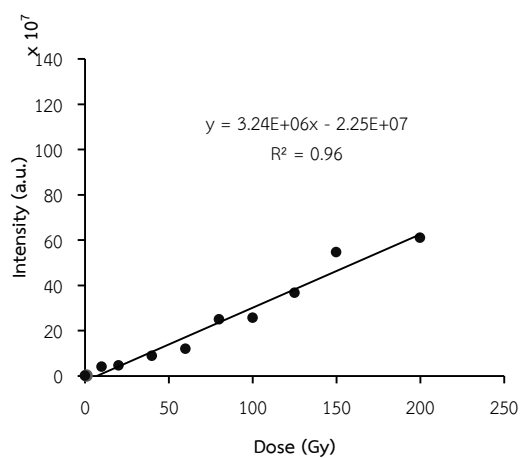
ภาพที่ 4.8 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK012 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C



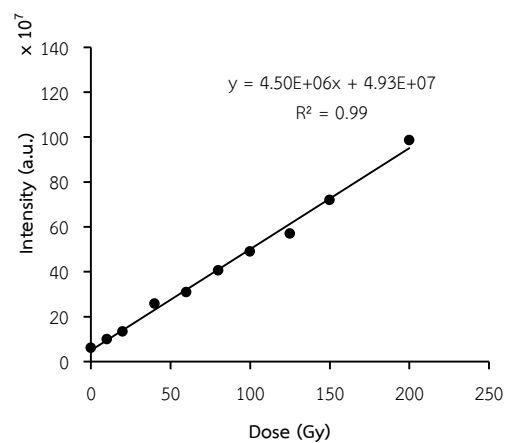
ภาพที่ 4.9 ค่า AD ของตัวอย่าง SK012 ที่อุณหภูมิ 175 °C

ตารางที่ 4.3 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK012 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

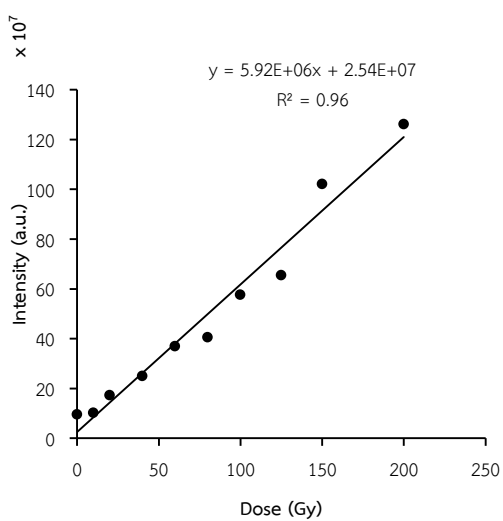
Dose(Gy)	TL (a.u.)			
	153 °C	175 °C	210 °C	250 °C
0	85078160	72522218	199437510	58223369
10	97208002	61637867	206072780	252520190
20	209876190	186279180	442833800	517657630
40	269451080	402795300	907603450	638179740
60	480875200	678667600	1212306200	815675780
80	553639670	902176780	1749068700	1094407100
100	818209200	1745062660	2196781100	1542333700
125	1079933900	2194004770	3235237800	1679974400
150	1201563500	2472014000	4019288400	2093870600
200	1464345900	3495054820	5502143300	2260540800



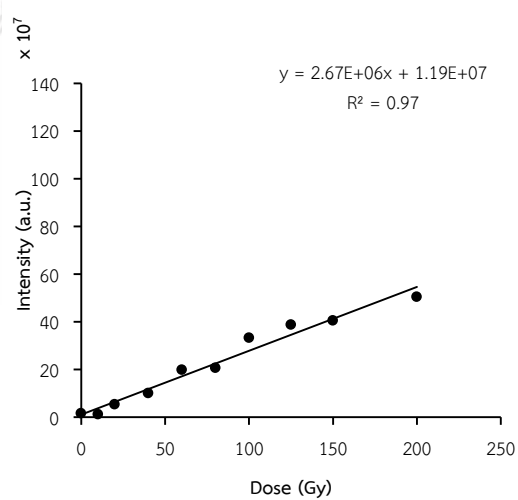
(a)



(b)

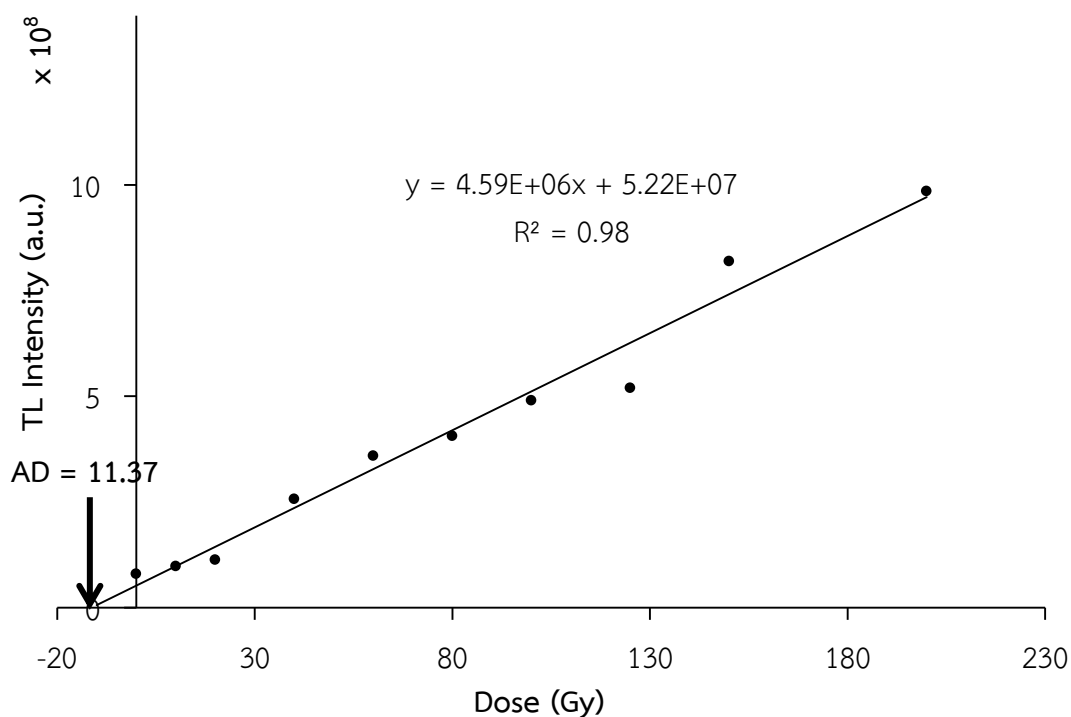


(c)



(d)

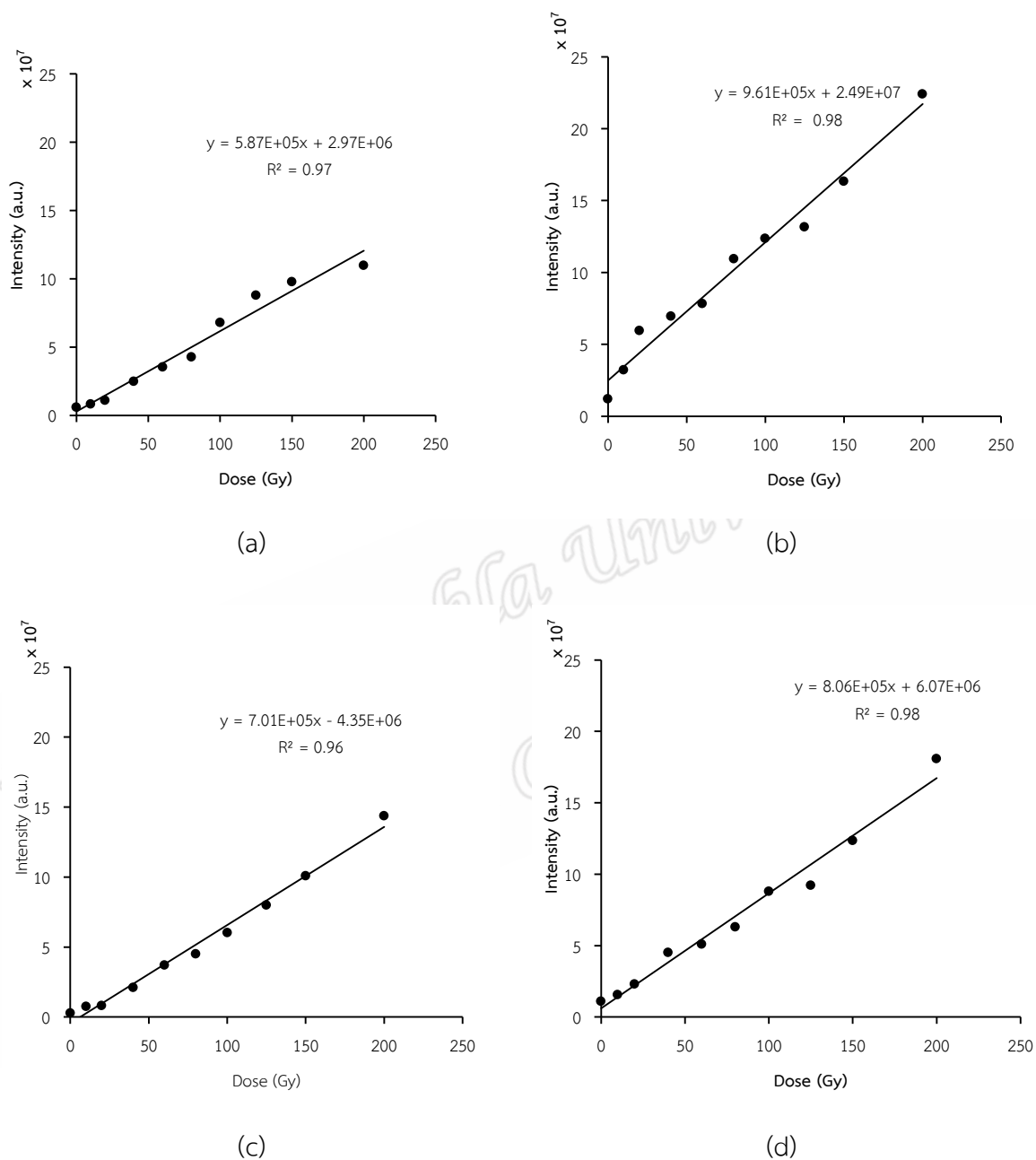
ภาพที่ 4.10 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK013 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C



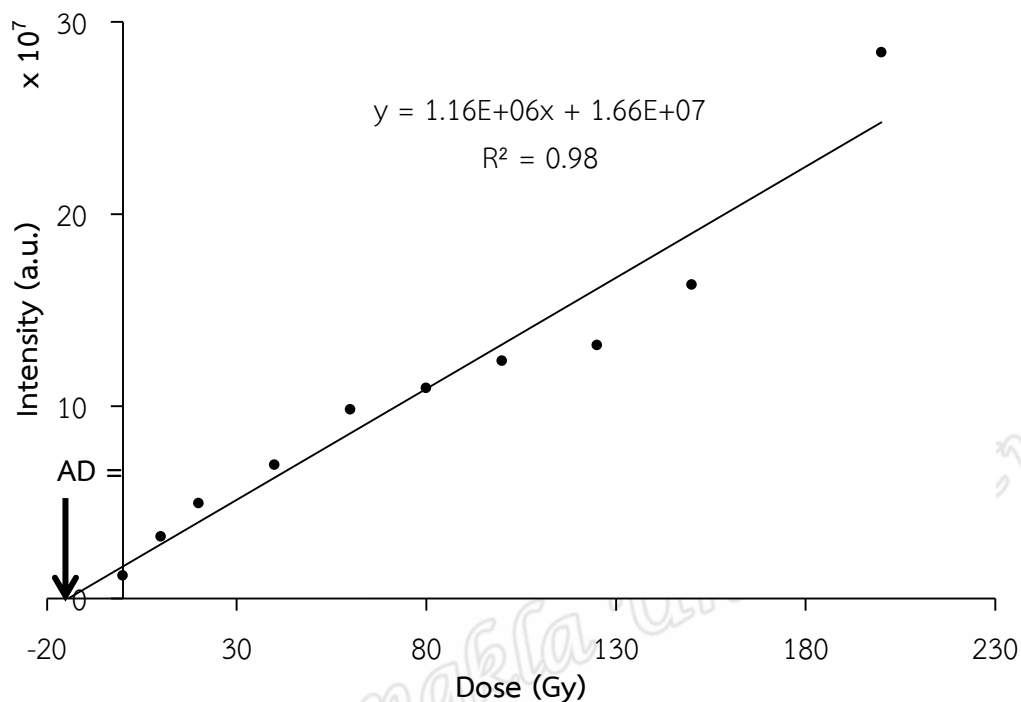
ภาพที่ 4.11 ค่า AD ของตัวอย่าง SK013 ที่อุณหภูมิ 175 °C

ตารางที่ 4.4 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK013 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

Dose	TL (a.u.)			
	153 °C	175 °C	210 °C	250 °C
0	50	94549342	60163482	15415411
10	39600322	101592763	98542167	11572340
20	45175928	172000000	133438806	53208783
40	88212617	249000000	257000000	100000000
60	119000000	369361540	309000000	199000000
80	249000000	405000000	406000000	206000000
100	256000000	576000000	490000000	333000000
125	366000000	653700000	570000000	388000000
150	546000000	1020000000	719000000	405000000
200	609900000	1260000000	984960000	504000000



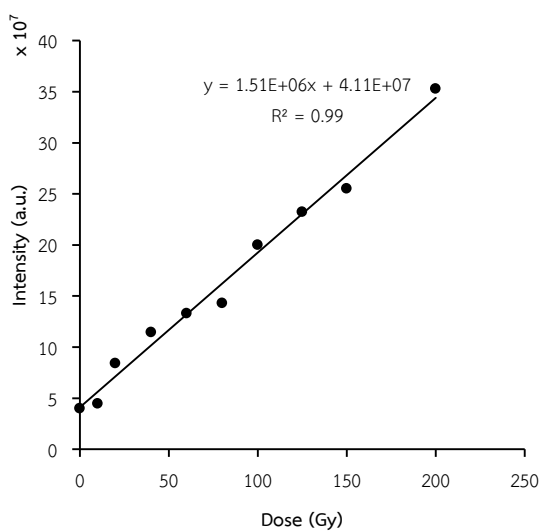
ภาพที่ 4.12 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SK16 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C



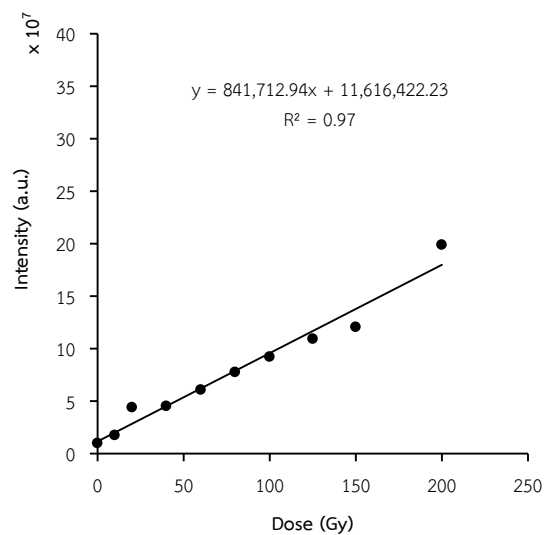
ภาพที่ 4.13 ค่า AD ของตัวอย่าง SK016 ที่อุณหภูมิ 175 °C

ตารางที่ 4.5 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SK016 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

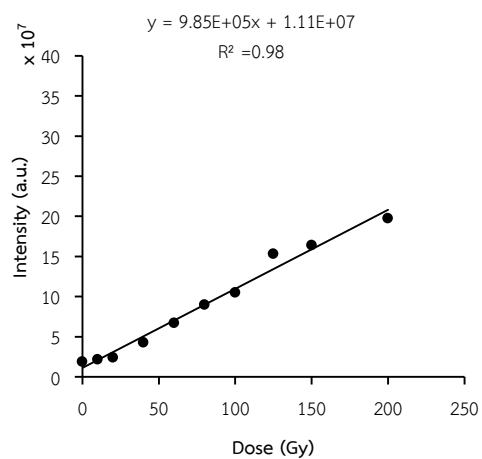
Dose	TL (a.u.)			
	153 °C	175 °C	210 °C	250 °C
0	11916842	5836973	2808999	11039621
10	32198059	8134627	7620919	15544797
20	59502276	10865676	8071363	23067239
40	69490070	24755335	21031553	45125453
60	78349942	35225501	37049036	50970643
80	109459788	42704615	45030709	63145160
100	123559263	67810595	60280811	88014466
125	131707807	87838927	80064267	92236618
150	163276107	97796237	100836207	123518876
200	224156336	109668960	163724770	130829926



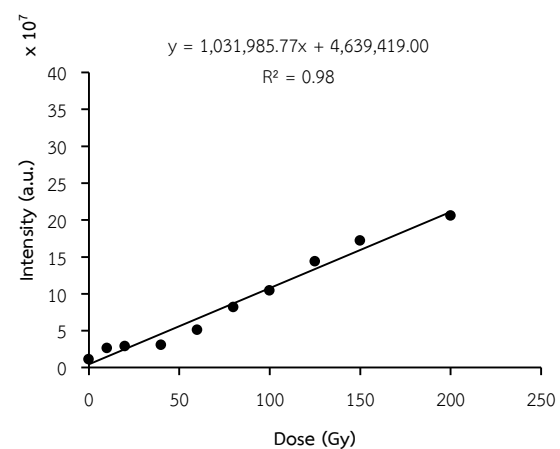
(a)



(b)

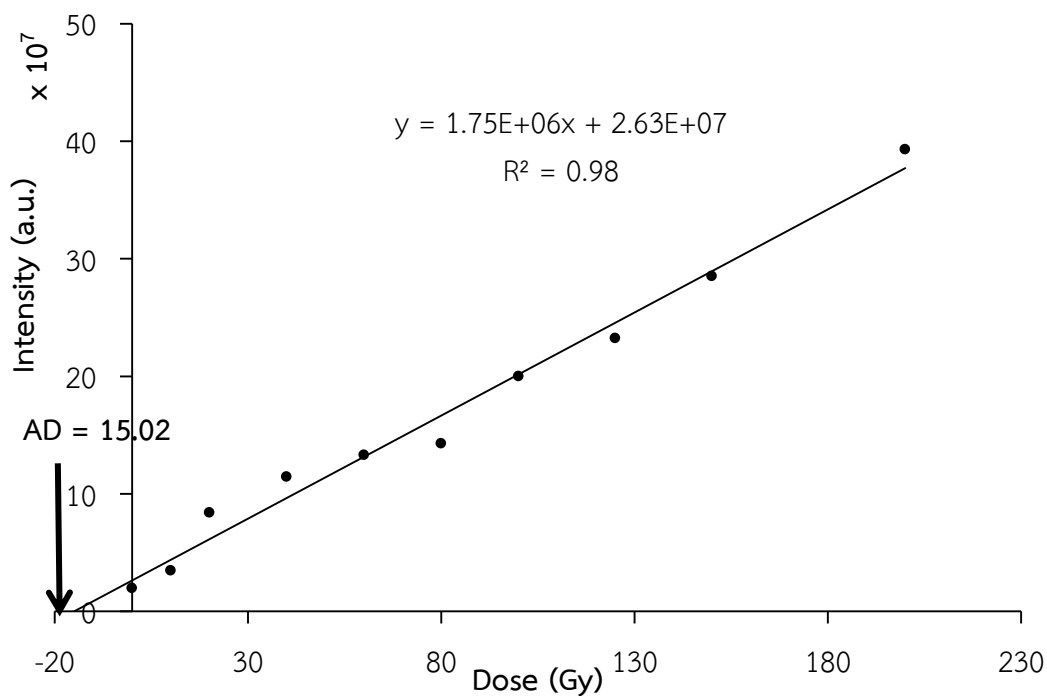


(c)



(d)

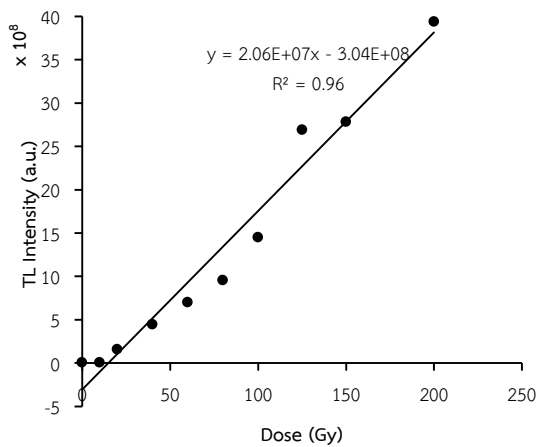
ภาพที่ 4.14 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SKTP1 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C



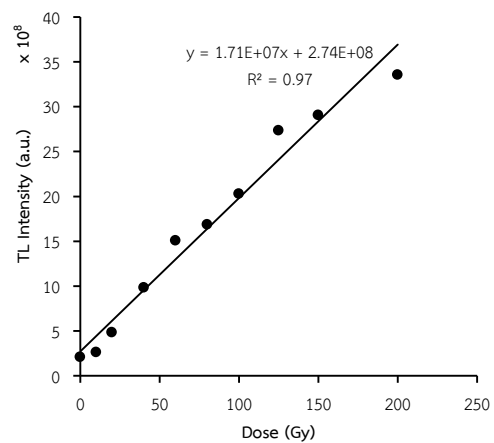
ภาพที่ 4.15 ค่า AD ของตัวอย่าง SKTP1 ที่อุณหภูมิ 175 °C

ตารางที่ 4.6 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SKTP1 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

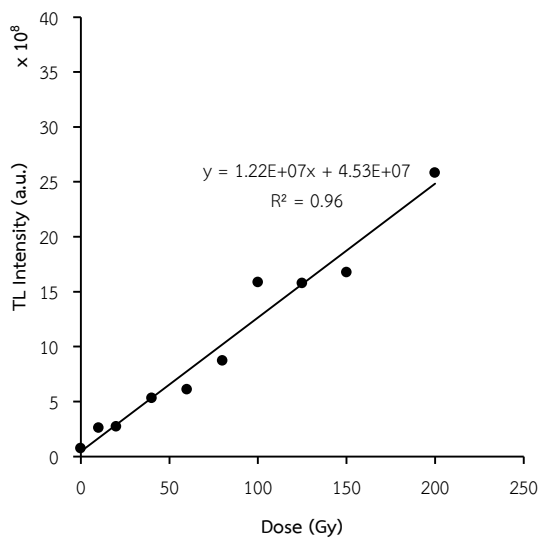
Dose	TL (a.u.)			
	153 °C	175 °C	210 °C	250 °C
0	21159321	10111092	18824001	39896457
10	58223025	17685779	21638413	44836291
20	111904180	44139884	24150964	84169500
40	308378000	45345063	42750967	104601726
60	509646200	61038129	66990947	133006523
80	820631730	77715866	89722921	203006520
100	2046642100	92257982	105226490	219953710
125	2437368900	109213125	153413240	302492969
150	3719201700	120625500	164087032	315170472
200	4057433900	198776460	197556930	443041530



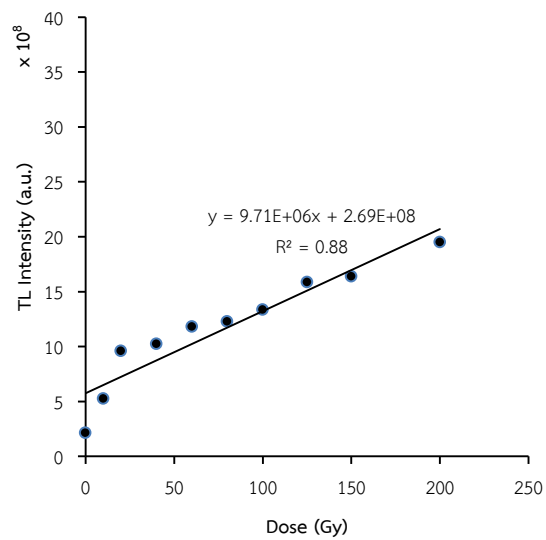
(a)



(b)

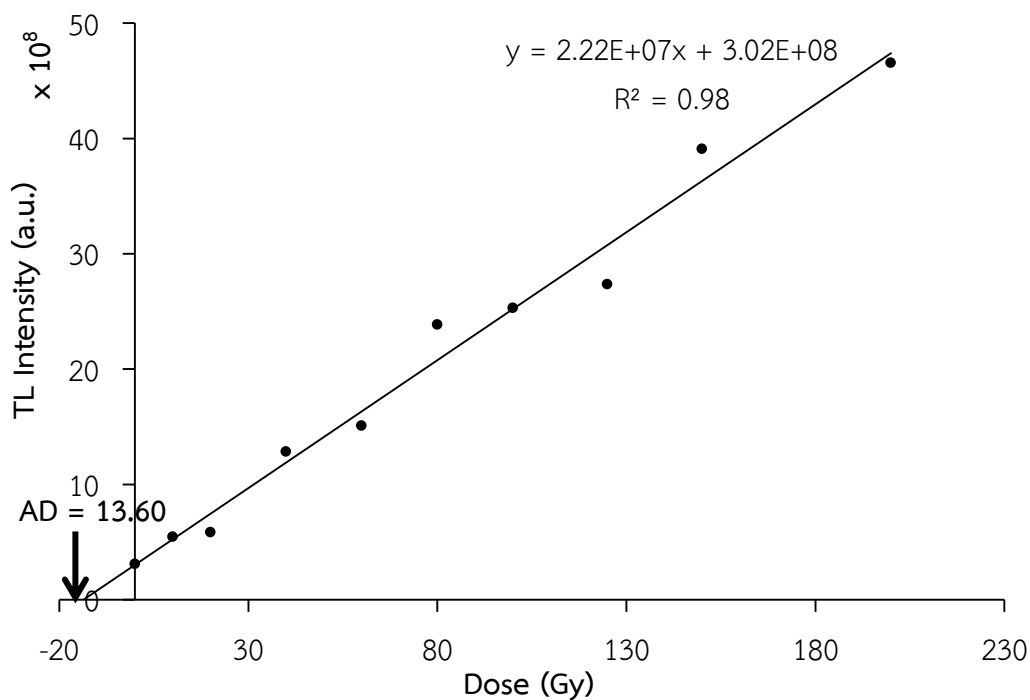


(c)



(d)

ภาพที่ 4.16 ค่า TL Intensity (a.u.) ที่แต่ละอุณหภูมิการตอบสนองของตัวอย่าง SKTP2 เมื่อ (a) 153 °C (b) 175 °C (c) 210 °C (d) 250 °C



ภาพที่ 4.17 ค่า AD ของตัวอย่าง SKTP2 ที่อุณหภูมิ 175 °C

ตารางที่ 4.7 ค่า TL Intensity ในตัวอย่าง SKTP2 ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ระดับโดสต่าง ๆ

Dose	TL (a.u.)			
	153 °C	175 °C	210 °C	250 °C
0	210051	5289368	209267640	73446432
10	2375928	5417187	264481700	89987472
20	5910639	157010136	484419280	271836898
40	12106475	447838920	983340358	528895669
60	17941893	700613650	1509309822	608147085
80	22752821	955706760	1684870230	870126451
100	33403464	1448617600	2028074330	984658493
125	58356329	2688734800	2734661189	1576050210
150	63638417	2784285400	2907392554	1674707531
200	94856074	3939015600	3354346458	2080715753

4.5 ผลการกำหนดอายุตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์

จังหวัดสงขลาด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสะสมด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และปริมาณรังสีสะสมต่อปีจากปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ของตัวอย่างตะกอนดินโดยวิธี HPGe เมื่อนำไปคำนวณหาอายุตามตารางสมการที่ (2.1) ได้ผลตามตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 อายุของตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา

ตัวอย่าง	TL Intensity Residual (a.u.)	D (mGy/a)	AD (Gy)	อายุ (year)
SK012	1.69E+08	64.595 ± 3.06	13.00 ± 0.88	201 ± 25
SK013	5.22E+07	55.892 ± 1.00	11.37 ± 1.54	203 ± 42
SK016	1.66E+07	68.251 ± 0.33	14.31 ± 0.35	210 ± 67
SKTP1	2.63E+07	77.085 ± 2.06	15.02 ± 0.28	195 ± 84
SKTP2	3.02E+08	62.898 ± 1.47	13.60 ± 1.46	216 ± 23

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการหาอายุของตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา ทางภาคใต้ของประเทศไทย ด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ บริเวณแหล่งโบราณคดีดังกล่าวเป็นพื้นที่ซึ่งพบหลักฐานทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก จากรายงานของกรมศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม พบว่าเมืองสงขลาเป็นเมืองท่าที่สำคัญแห่งหนึ่งในสมัยกรุงศรีอยุธยาและรัตนโกสินทร์ตอนต้น และได้ทำการหาอายุของกำแพงเมืองสงขลาด้วยเทคนิคการใช้คาร์บอน-14 โดยมีอายุอยู่ในช่วงพุทธศตวรรษที่ 22 การหาอายุด้วยเทคนิคนี้มีองค์ประกอบ 2 ส่วน ซึ่งส่วนแรกศึกษา ลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ของควอทซ์ ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาแบบ วิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลาย ๆ ชุด ด้วยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ปริมาณรังสีสะสมและส่วนที่สองวิเคราะห์ปริมาณรังสีต่อปีของตะกอนดินจากการรับรังสีในธรรมชาติ ซึ่งนอกจากรังสีคอสมิกยังมีธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ผลของการวิเคราะห์ปริมาณทั้งสองส่วนจะนำไปหาค่าอายุจากตะกอนดินทั้ง 5 ตัวอย่าง

5.1 ลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนส์

จากการนำผลึกควอทซ์ในตัวอย่าง ฉายรังสีแกมมาและอ่านค่าการตอบสนองของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนส์หรือ TL intensity ด้วย เครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนส์พบว่า เมื่อผลึกตัวอย่างค่อย ๆ ถูกเผาจนถึงอุณหภูมิสูงสุด พบว่า TL Intensity จะแปรผันตรงกับปริมาณอิเล็กตรอนอิสระ และพบตำแหน่งอุณหภูมิ การตอบสนองของควอทซ์ในตัวอย่างตะกอนดินพบอุณหภูมิการตอบสนองที่ $175\text{ }^{\circ}\text{C}$, $210\text{ }^{\circ}\text{C}$, $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ สอดคล้องกับอุณหภูมิการตอบสนองของตะกอนดินในงานวิจัยของ Anna Galliet al. (2006) การตอบสนองของ TL intensity ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาดังกล่าวมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น

5.2 ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated dose)

จากความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของ TL intensity ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา สามารถนำไปวิเคราะห์หาปริมาณรังสีสะสมของตัวอย่างที่สอดคล้องกับอุณหภูมิ $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ตะกอนดินประกอบด้วยตัวอย่าง SK012 SK013 SK016 SKTP1 SKTP2 ได้ค่าปริมาณรังสีสะสมเท่ากับ $13.00 \pm 0.88\text{ Gy}$, $11.37 \pm 1.54\text{ Gy}$, $14.31 \pm 0.35\text{ Gy}$, $15.02 \pm 0.28\text{ Gy}$ และ $13.60 \pm 1.46\text{ Gy}$ ตามลำดับ

5.3 ปริมาณโดสรังสีต่อปี (Annual dose)

ปริมาณรังสีสะสมต่อปี ซึ่งวิเคราะห์ด้วยหัววัดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูงและระบบวิเคราะห์แบบแกมมาสเปกโตรเมตรี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวัดกับสารรังสีมาตรฐานตะกอนดินประกอบด้วยตัวอย่าง SK012, SK013, SK016, SKTP1 และ SKTP2 ค่าปริมาณโดสรังสีต่อปีมีค่าเท่ากับ 64.595 ± 3.06 mGy/y, 55.892 ± 1.00 mGy/y, 68.251 ± 0.33 mGy/y, 77.085 ± 2.06 และ 62.898 ± 1.47 mGy/y ตามลำดับ

5.4 อายุของตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลา

อายุของตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลาคำนวณได้จากการนำปริมาณรังสีสะสมของแต่ละตัวอย่างมาหารด้วยปริมาณรังสีต่อปีที่ตัวอย่างได้รับ ซึ่งอายุของตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลาประกอบด้วยตัวอย่าง SK012, SK013, SK016, SKTP1 และ SKTP2 คำนวณอายุได้เท่ากับ 201 ± 25 year, 203 ± 42 year, 210 ± 67 year, 195 ± 84 year และ 216 ± 23 year ตามลำดับ

จากผลดังกล่าวพบว่าอายุของตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา มีค่าอยู่ที่ 205 ± 36 year ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลทางโบราณคดีรายงานอยู่ที่ 180 ± 22 year นั้นแสดงให้เห็นว่าค่าอายุที่ได้จากการกำหนดอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสำหรับการหาอายุทางด้านโบราณคดีดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบของการหาอายุด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับวิธีทางโบราณคดีโดยเฉลี่ย

วิธีการกำหนดอายุ	อายุ (year)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
เทคนิคการใช้คาร์บอน-14	180 ± 22	12 %
เทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์	205 ± 36	

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.1.1 ในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ควรอบตัวอย่างก่อนนำไปวัดโดสรังสีแกมมาที่ระดับต่าง ๆ เพื่อความเสถียรของข้อมูล

5.1.2 ควรทำการทดสอบตัวอย่างที่ระดับโดสจากมากไปน้อย โดยทำการทดสอบตัวอย่างเดียวกันต่อเนื่องจนเสร็จสิ้น เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการจางหายของอิเล็กตรอน

5.1.3 ควรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณอายุและค่าคลาดเคลื่อน เพื่อความสะดวกรวดเร็วและความน่าเชื่อถือของการกำหนดอายุ

บรรณานุกรม

- นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. 2553. นิวเคลียร์เทคโนโลยี: พื้นฐานและการประยุกต์ใช้ด้านดินและพืช, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, หน้า 126.
- พวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2545. การศึกษาอัตราการตกตะกอนของอ่าวปัตตานีโดยใช้เทคนิคการวัดซีซีเอ็ม-137. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม. 2554. รายงานเบื้องต้นการขุดค้นทางโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา ตำบลบ่อยาง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา, พิมพ์ครั้งที่ 1, สงขลา: จกท. ตรีโอ ศรีเอช.
- สันติ ภัยหลบลี้. 2547. การหาอายุตะกอนดินยุคควอเทอร์นารีด้วยวิธีแปลงแสงความร้อนชนิดโททัล บลิสและรีเจเนอเรชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลำพูน ออกุ่น. 2551. การผลิตและคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของผลึกเชิงเดี่ยว ลิเธียมฟลูออไรด์: แมกนีเซียม คอปเปอร์ ซิลิกอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สมาน จาตุรงค์วนิชย์. 2532. รายงานเรื่องการวัดอายุของรอยเลื่อนโดยเครื่องอ่านเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์. รายงานการไปศึกษาดูงานและวิจัย ณ ประเทศญี่ปุ่น. ทูกลางของกองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 14.
- สมหมาย ช่างเขียน และพวงทิพย์ แก้วทับทิม. 2540. การหาอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผา โดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์บริเวณเมืองโบราณยะรัง อำเภอยะรัง จังหวัดปัตตานี. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมหมาย ช่างเขียน. 2555. การกำหนดอายุทางโบราณคดีและธรณีวิทยาด้วยเทคนิคลูมิเนสเซนซ์. หน่วยวิจัยฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศิริพงษ์ สมวรรณ. 2547. การหาอายุของอิฐจากกำแพงเมืองเชียงแสนโบราณโดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศตภิชช์ ไกรษี. 2543. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุในดินตัวอย่างจากเหมืองทองคำโดยวิธีวิเคราะห์แบบนิวตรอนแอคติเวชัน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการสอนเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- Abdel-Wahab, M. S., El-Fiki, S., El-Fiki, A., Abdel-Kariem, M.S. and El-Faramawy, N. 1996. Annual dose measurement and TL dating of ancient egyptian pottery. *Journal of radiation physics and chemistry*. 47, 697-700.
- Aitken, M.J. 1985. *Thermoluminescence dating*. Academic press, London, 351.
- Aitken, M.J. 1990. *Science-based dating in archaeology*. Lodon: Longman, 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(11), 6-8.
- Boyle, R. 1664. Observations made this 27th of October, 1663, about Mr. Clayton's Diamond. In: R. Boyle, Editor, *Experiments and considerations touching colours*, Henry Herringman, London, pp 413-423.
- Chen, G. and Li, S.H. 2000. Studies of quartz 110°C thermoluminescence peak sensitivity change and its relevance to optically stimulated luminescence dating. *Journal of physics D: Applied physics*. 33(2), 437-443.
- Colman, S.M. and Pierce, K.L. 2000. Classifications of quaternary geochronologic methods. In J. S. Noller, J. M. Sowers, and W. R. Littis (eds.). *Quaternary Geochronology: methods and application*. Washington D.C. American geophysical union, pp 2-5.
- Colman, S.M., Pierce, K.L. and Birkeland, P.W. 1987. Suggested terminology for quaternary dating methods. *Journal of quaternary research*. 28(2), 314-319.
- Daniel, R. 2007. Advantages and limitations of Thermoluminescence dating of heated flint from Paleolithic sites. *Geoarchaeology: An International Journal*. 22(1), 671-683.
- Ekdal, E., Ege, A., Karali, T. and Derin, Z. 2012. Luminescence dating studies of Yeşilova Hoyuk.. *Journal of geochronometria*. 39(9), 268-275.
- Eskola, K.O., Okkonen, J. and Junger, H. 2001. Luminescence dating of a coastal stone age dwelling place in Northern Finland. *Journal of quaternary Science Reviews*. 22(12), 945-948.
- Fattahi, M. 2009. Dating past earthquakes and related sediments by thermoluminescence methods: a review. *Journal of quaternary International*, 30(2), 104-146.

- Goffer, Z. 2007. Archaeological Chemistry (Second Edition). Wiley-Interscience. New Jersey. 225-231.
- Harvery, E.N. 1957. A History of Luminescence: From the earliest times until 1900. The American Philosophical society, Philadelphia. pp 46-50.
- Helmuth, S. 1998. Introduction to radiation detectors and electronics. physics division Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley. pp 25-31.
- Hon, Z-Y., Li, S-H. and Tso, M-Y.W. 2001. TL dating of granitic quartz using an additive alpha dose method. Journal of Quaternary Science Reviews. 20, 907-911.
- Hubert, L.O. 2001. Calibration standard for use in gamma spectrometry and luminescence dating. Journal of Methods and Applications of Absolute Chronology. 20(8), 31-38.
- Hubert, L.O., Krzysztof, R.P., Krzysatof, R.L. and Jecek, B.S. 2000. Gamma Spectrometry in Thermoluminescence Dating. Journal of Geochronometry. 18(10), 57-62.
- Ikeya, M. 1993. New applications of electron spin resonance dating. Dosimetry and Microscopy. Singapore: World Scientific, Singapore, pp 447.
- Ioannis, L. 2000. Advances in Thermo and Opto-Luminescence Dating of Environmental Materials (Sediment Deposits). Global Nest: the International Journal. 2(2), 3-27.
- Ioannis, K., Leonidas, S., Dora, K. and Spyros, P. 2001. A palaeoseismological and geoarchaeological investigation of the Eliki fault, Gulf of Corinth, Greece. Journal of Structural Geology. 23(3), 531-543.
- Lian, O.B. and Roberts, R.G. 2006. Dating the Quaternary Progress in Luminescence Dating of Sediment. Journal of Quaternary Science Reviews. 25(5), 2449-2468.
- Limsuwan, S., Vichaidid, T. and Limsuwan, P. 2011. ESR dating of laterite from Ban Tha Ta Suea, Kanchanaburi, Thailand. Journal of Applied Radiation and Isotopes. 69(1), 545-549.
- Marco, M., Emanuela, S., Silvia, C. and Mauro, C. 2001. Thermoluminescence (TL) dating of burnt flints: problems, perspectives and some examples of application. Journal of Cultural Heritage. 2(6), 179-190.
- McKeever, S.W.S. 1995. Thermoluminescence of Solids. New York: The Press Syndicate of the University of Cambridge, pp 392.
- Puthusserry, J. 2009. Luminescence dating of beachrock in the Southeast Coast of India - potential for Holocene shoreline reconstruction. Journal of Coastal Research. 25(9), 1-7.

- Puchalska, M. and Bilski, P. 2006. GlowFit - a new tool for thermoluminescence glow curve deconvolution. *Journal of radiation measurements*. 41(8), 659-664.
- Richter, D. and Kropatschek, M. 2006. A new Thermoluminescence Dating technique for Heated Flint. *Journal of Archaeometry*. 48(9), 695-705.
- Richter, D., Mercier, N., Valladas, H., Jaubert, J., Texier, P.J., Brugal, J.P., Kervazo, B., Reys, J.L., Joron, J.L. and Wagner, G.A. 2007. Thermoluminescence dating of heated flint from the Mousterian site of Bérigoule, Murs, Vaucluse, France. *Journal of Archaeological Science*. 34(7), 532-539.
- Vora, K.H., Gaur, A.S., David, P. and Sundaresh, H. 2002. Cultural sequence of Bet Dwarka island based on thermoluminescence dating. *Journal of current science*. 82(2), 1351-1356.
- Won-in, K. 2003. Quaternary geology of the phrae basin, northern Thailand, and application of thermoluminescence technique for quaternary chronology. PhD thesis, research Institute of materials and resources, Faculty of engineering and resource science, Akita university. pp 113-123.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณโดสรังสีต่อปี

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

$$D_U = (0.062879) \sum E_{i(238),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / y}] \quad (\text{ก.1.1.})$$

$$D_{Th} = (0.02514) \sum E_{i(232),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / y}] \quad (\text{ก.1.2})$$

$$D_K = (0.02514) \sum E_{i(40),(\alpha,\beta,\gamma)} \quad [\text{mGy / y}] \quad (\text{ก.1.3})$$

ตารางที่ ก.1 พลังงานรวมของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา ของอนุกรมการสลายตัวของ ยูเรเนียม ทอเรียมและธาตุโพแทสเซียมตามธรรมชาติ

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

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

$$\begin{aligned} D_U &= (0.062879) \sum E_\alpha \\ &= 0.062879 \times 42.806 \\ &= 2.6916 \quad [\text{mGy / y}] \end{aligned}$$

ข้อมูลตามตารางที่ ก.1.1 เป็นพลังงานทั้งหมดของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาของ อนุกรมการ สลายตัว ^{238}U , ^{232}Th และ ^{40}K ตามธรรมชาติ ปริมาณรังสีต่อปีที่ 1 ppm ของธาตุ กัมมันตรังสีจะถูก คำนวณอยู่บนพื้นฐานของพลังงานดังกล่าวได้ค่าตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ ก.2 ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมา ที่คำนวณได้จากสมการ

สมมูลกัมมันตรังสีของอนุกรมการสลายตัวของธาตุยูเรเนียม (^{238}U) ทอเรียม (^{232}Th) และโพแทสเซียม (^{40}K) ตามธรรมชาติ

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

นำข้อมูลตามตารางที่ ก.2 มาคำนวณปริมาณรังสีต่อปีโดยอาศัยปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ ได้ตามสมการ (ก.1.4 - ก.1.6)

$$D_{\alpha} = C_U D_{U-\alpha} + C_{Th} D_{Th-\alpha} \quad (\text{ก.2.4})$$

$$D_{\beta} = C_U D_{U-\beta} + C_{Th} D_{Th-\beta} + C_K D_{K-\beta} \quad (\text{ก.2.5})$$

$$D_{\gamma} = C_U D_{U-\gamma} + C_{Th} D_{Th-\gamma} + C_K D_{K-\gamma} \quad (\text{ก.2.6})$$

เมื่อ C คือ ปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ

D คือ ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีชนิดต่าง ๆ

ค่าตามตารางที่ ก.2 นอกจากจะใช้สมการ (ก.2.4 - ก.2.6) ในการคำนวณค่าดังกล่าวแล้ว สามารถใช้สมการต่อไปนี้ ในการคำนวณ

$$D_{\alpha} = C_U (2.692) + C_{Th} (0.737) \quad (\text{ก.2.7})$$

$$D_{\beta} = C_U (0.143) + C_{Th} (0.028) + C_K (0.678) \quad (\text{ก.2.8})$$

$$D_{\gamma} = C_U (0.110) + C_{Th} (0.051) + C_K (0.203) \quad (\text{ก.2.9})$$

เมื่อ C_U , C_{Th} และ C_K เป็นปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียมและทอเรียม ในหน่วย ppm และโพแทสเซียมในหน่วย % ที่ได้จากเทคนิค HPGe

ตารางที่ ก.3 ปริมาณความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียมในตะกอนดินบริเวณโดยรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา

ตัวอย่าง	^{40}K (%)	^{232}Th (ppm)	^{238}U (ppm)	ปริมาณน้ำ, W
SK012	2.28	3.99	8.2	0.00
SK013	4.36	2.32	10.38	0.00
SK016	4.46	2.07	19.24	0.81
SKTP1	3.91	3.48	24.74	0.00
SKTP2	3.75	2.14	19.89	0.00

ภาคผนวก ข การคำนวณปริมาณโดสรังสีต่อปีของตัวอย่างดิน

ปริมาณโดสรังสีต่อปีของตัวอย่างดิน คำนวณได้จากปริมาณรังสีต่อปีภายในและ ภายนอกสำหรับ ตัวอย่างดินเราจะถือว่า ธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่สม่ำเสมอในทุก ๆ ตัวอย่าง พลังงานที่รังสีปลดปล่อย ออกมาจากตัวอย่างมีค่าเท่ากับปริมาณรังสีดูดกลืนโดยตัวอย่าง ดังนั้น เราอาจจะพิจารณาว่าขนาดของ ตัวอย่างไม่มีที่สิ้นสุด เราสามารถมองข้ามไม่นำปริมาณรังสีต่อปีภายนอก (D_{ex}) มาพิจารณาเพื่อคำนวณค่า ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดิน ปริมาณรังสีต่อปีภายใน (D_{in}) พิจารณาได้จากปริมาณความเข้มข้นของ ธาตุ กัมมันตรังสีจากการสลายตัวของอนุกรม ^{238}U และ ^{238}Th และรังสีแอลฟา เบต้าและแกมมาจากการ แผลรังสีตามธรรมชาติของธาตุ ^{40}K

ความเข้มข้นของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตารางที่ ก.3 นำไป แทนค่าใน สมการ (ก.2.7-ก.2.9) เพื่อหาปริมาณรังสีต่อปีได้ดังนี้

$$D_{\alpha} = (8.20)(2.692) + (3.99)(0.737)$$

$$= 25.02$$

mGy/y

$$D_{\beta} = (8.20)(0.14273) + (3.99)(0.05092) + (2.28)(0.67805)$$

$$= 2.83$$

mGy/y

$$D_{\gamma} = (8.20)(0.1102) + (3.99)(0.05092) + (2.28)(0.20287)$$

$$= 1.57$$

mGy/y

ตารางที่ ข.1 ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมา

ตัวอย่าง	ปริมาณรังสีต่อปี (mGy/a)		
	แอลฟา	เบต้า	แกมมา
SK012	25.02	2.83	1.57
SK013	29.65	1.55	2.15
SK016	53.32	2.80	3.13
SKTP1	69.16	3.63	3.70
SKTP2	55.12	2.90	3.06

ปริมาณรังสีต่อปีของรังสีแอลฟา เบต้า และแกมมาในตารางที่ ก.1.4 เป็นค่าทางอุดมคติหรือเป็นค่าที่ได้ 100 % โดยที่ไม่ได้รับผลกระทบจากความชื้นหรือปริมาณของน้ำในตัวอย่าง แต่ในทางปฏิบัติปริมาณรังสีต่อปีจะถูกการลดทอนด้วยปริมาณน้ำหรือความชื้น ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณรังสีต่อปีที่มีปริมาณน้ำได้จากสมการ ได้ดังนี้

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

$$D'_{\beta} = D_{\beta} / [(1 + 1.49W) / (100 - W)] \quad (\text{ข.2})$$

$$D'_{\gamma} = D_{\gamma} / [(1 + 1.49W) / (100 - W)] \quad (\text{ข.3})$$

ปริมาณรังสีต่อปีของตัวอย่างดินคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$D = D_{in} + D_{cos} \quad (\text{ข.4})$$

$$D = kD'_{\alpha} + D'_{\beta} + D'_{\gamma} + D_{cos} \quad (\text{ข.5})$$

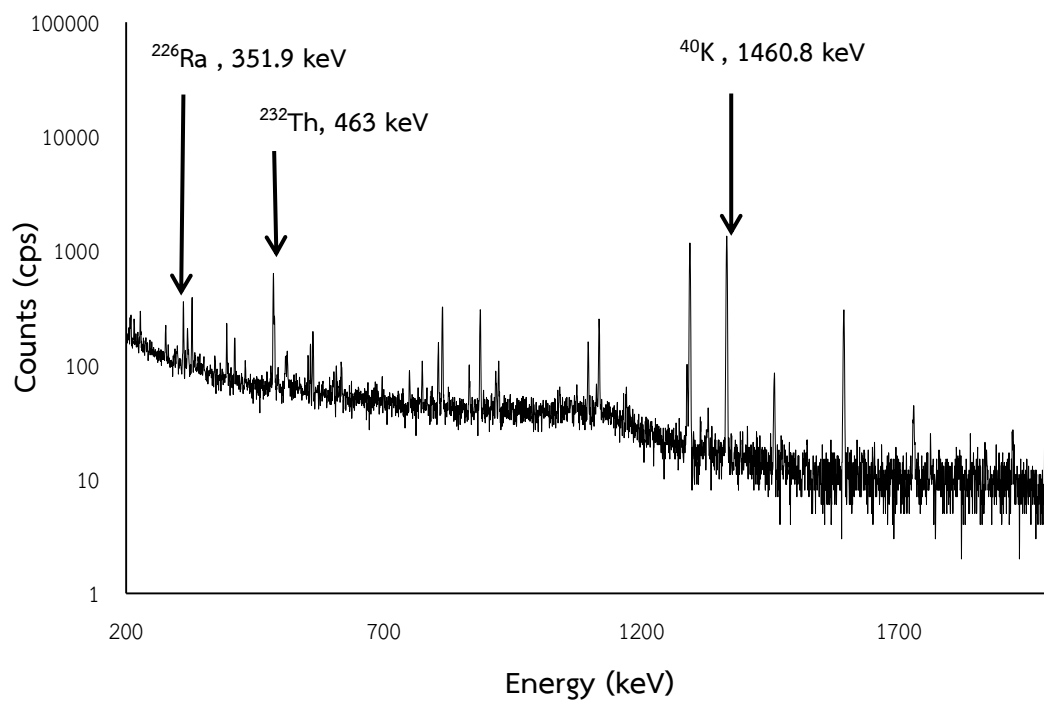
$$\text{เมื่อ } k_{\alpha} = \frac{AD_{\gamma}}{AD_{\alpha}} = 0.15$$

$$k_{\beta} = k_{\gamma} = 1$$

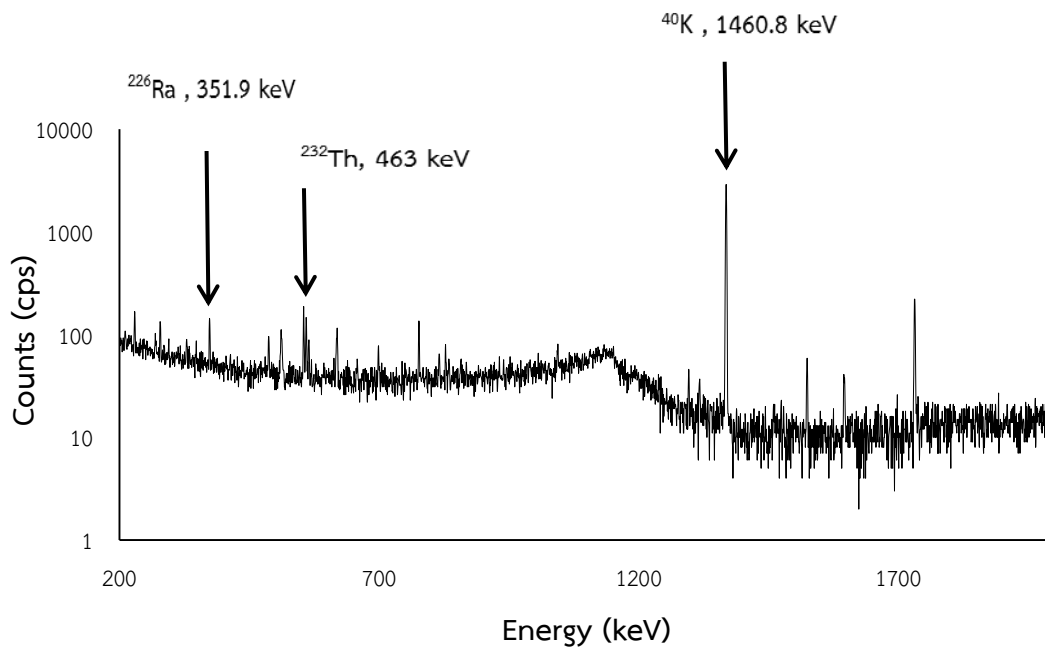
ค่าคงที่ k หาได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณรังสีสะสมจากการฉายรังสีแอลฟา (AD_{α}) และรังสีแกมมา (AD_{γ}) ในงานวิจัยนี้ เหลือ ใช้ค่าคงที่ k เท่ากับ 1 ตามงานวิจัยของ Voinchet et al. (2004) สมการ (ข.5) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} D &= (0.15)(25.02) + 2.83 + 1.57 + 0.162 \\ &= 6.46 \quad \text{mGy/y} \end{aligned}$$

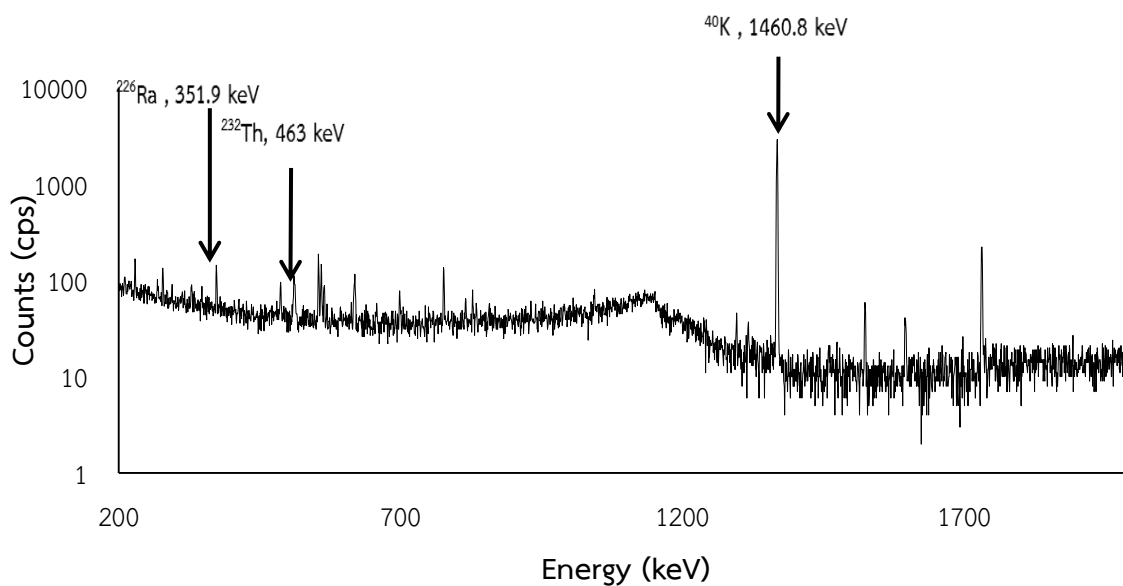
ภาคผนวก ค รายละเอียดสเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างตะกอนดิน



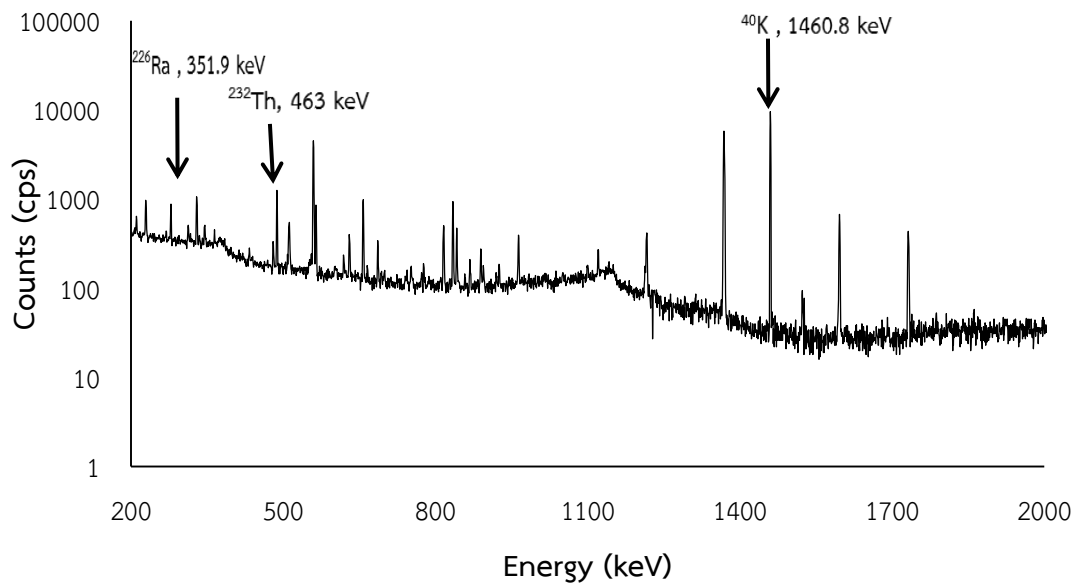
ภาพที่ ค.1 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน SK012 ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม



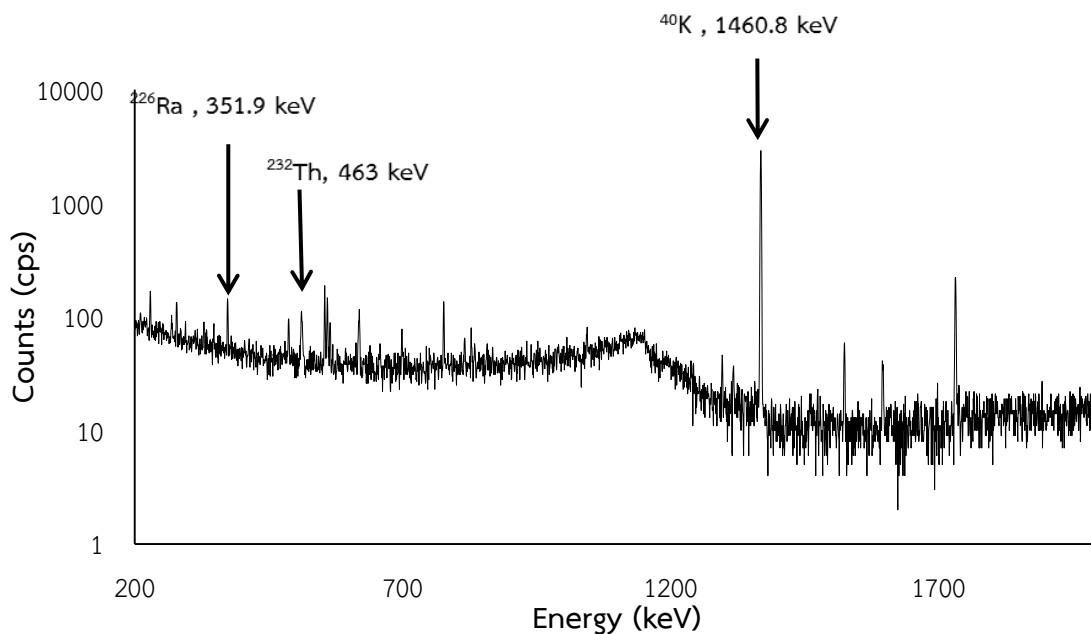
ภาพที่ ค.2 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน SK013 ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม



ภาพที่ ค.3 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน SK016 ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม

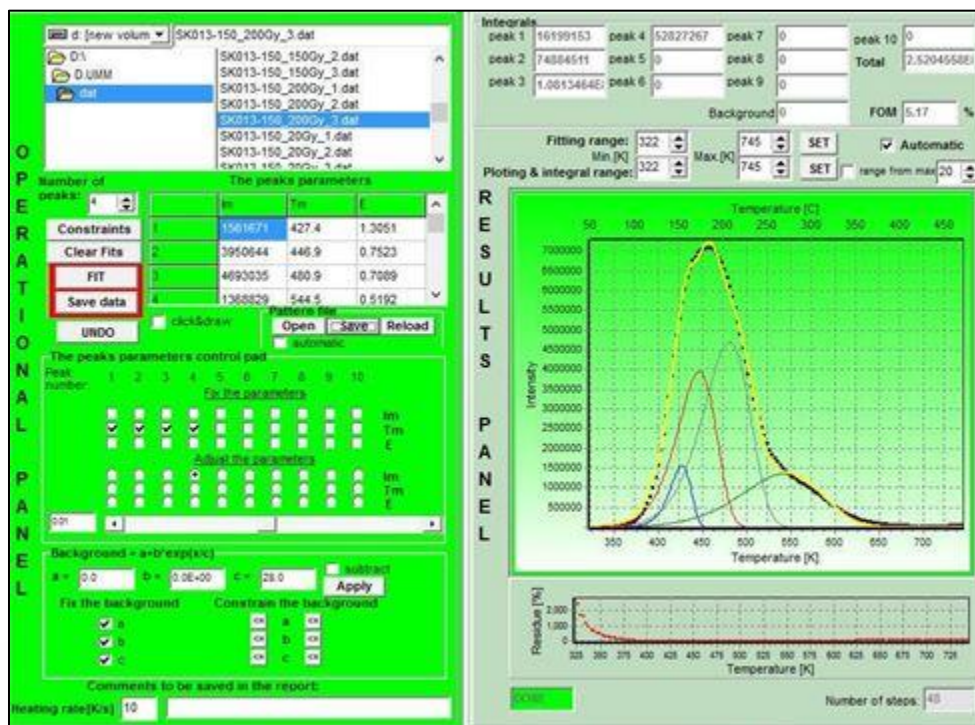


ภาพที่ ค.4 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน SKTP1 ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม

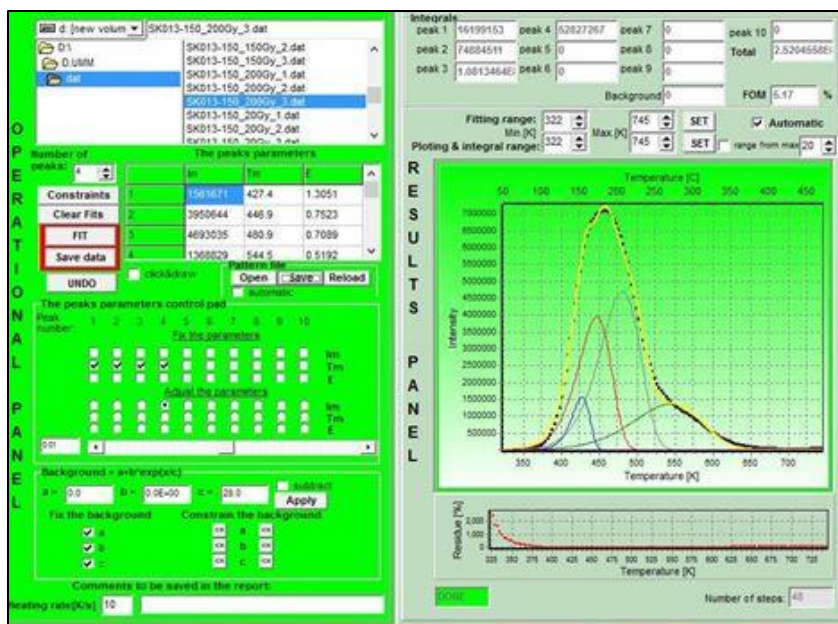


ภาพที่ ค.5 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตะกอนดิน SKTP2 ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม

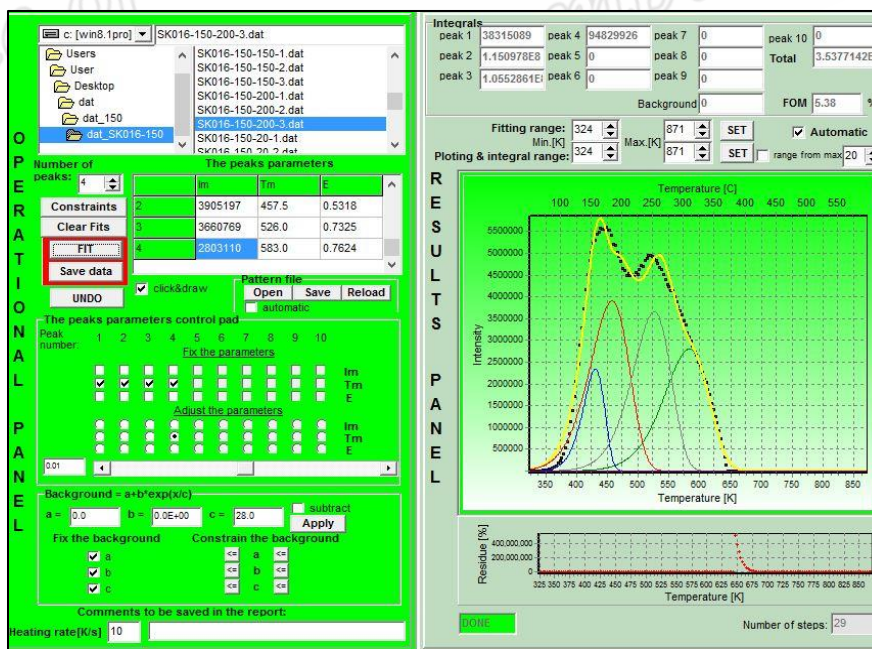
ภาคผนวก ง รายละเอียดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของตัวอย่างตะกอนดิน



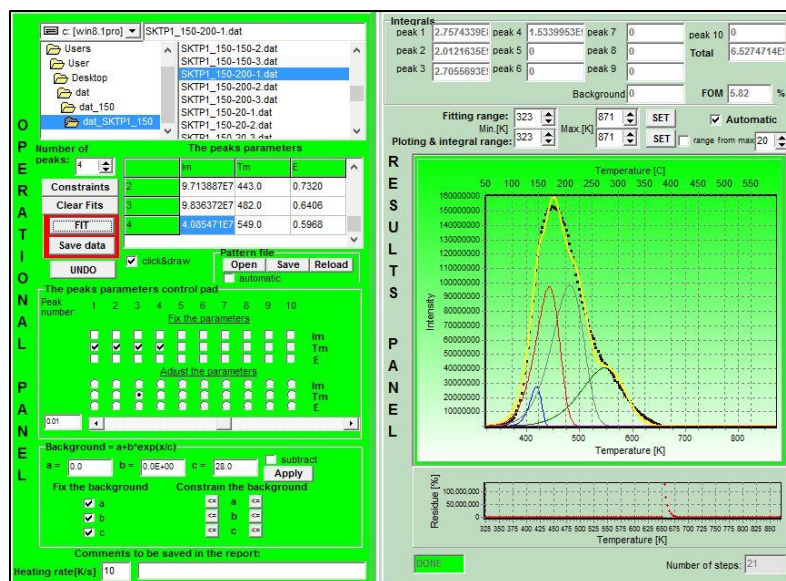
ภาพที่ ง.1 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอนุกรมเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SK012



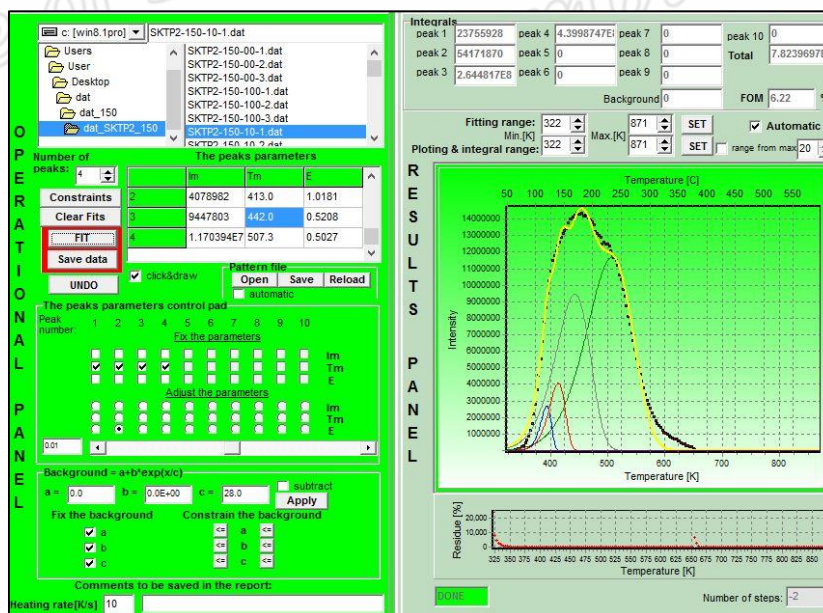
ภาพที่ ง.2 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SK013



ภาพที่ ง.3 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SK016



ภาพที่ ง.4 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SKOTP1



ภาพที่ ง.5 สเปกตรัมที่ปรากฏในส่วนแสดงผลของ GlowFit ซึ่งมีสเปกตรัมที่แต่ละอุณหภูมิเป็นส่วนประกอบของตัวอย่าง SKTP2

ภาคผนวก จ การเผยแพร่ผลงานวิจัย

การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ครั้งที่ 4 วันที่ 10 มีนาคม 2560 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

{ 1002 }

การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตะกอนดินบริเวณรอบ แหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา โดยใช้วิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี Determination of U,Th and K in Sedimental from Historical wall,Songkla Provine Using Gramma-ray Spectrometry methode

อุมมูอัยมาน มะดีเยาะ¹ ธรมณีศ นาวารัตน์² และ อิดารัตน์ วิชัยดิษฐ์³

Ummuaiman Madiyah¹ Thoranit Navarat² And Tidarut Vichaidid³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

²ผ.ศ.ร., สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

³ผ.ศ.ร., สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

*E-mail : um.kansom@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติของตะกอนดินบริเวณแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา เป็นแหล่งประวัติศาสตร์ที่มีการขุดพบตัวอย่างทางโบราณคดีเป็นจำนวนมาก ซึ่งวิเคราะห์หาปริมาณกัมมันตภาพรังสีโดยใช้หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (high-purity germanium, HPGe) โดยวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีหลักในธรรมชาติคือ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) ที่พลังงาน 351.9, 463.0 และ 1460.8 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างตะกอนดินมีค่าปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 95.42-170.42 Bq/kg 8.86-13.25 Bq/kg และ 273.61-595.28 Bq/kg ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์สามารถนำข้อมูลไปใช้ประกอบการหาอายุในตะกอนดินบริเวณรอบแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา ซึ่งจะนำไปสู่ข้อมูลทางประวัติศาสตร์ได้

คำสำคัญ : ตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองสงขลา หัววัดรังสีเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง(HPGe) ระบบวัดรังสีแกมมา

Abstract

Analysis of natural radioactive content from historical walls in Songkhla Province. This historical site has unearthed a lot archaeological samples, the sample used was determined using high-purity germanium (HPGe). Natural radioactive elements are members of uranium, thorium and potassium to energy 351.9, 463.0 and 1460.8 (keV), respectively. The concentrations of uranium, thorium, and potassium in samples can be achieved by this technique and found to be in the range of 95.42 to 170.42, 8.86 to 13.25 and 273.61 to 595.28 (Bq/kg), respectively. This data can be used to determine the age of the sediment.

Keywords : Sediment from Historical Wall, Songkhla Province, High-Purity Germanium (HPGe), Gamma Spectrometry

1. บทนำ

ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศที่มีแหล่งโบราณคดีมากมาย ด้วยเพราะภูมิประเทศที่อุดมสมบูรณ์จึงทำให้ยังหลงเหลือประวัติศาสตร์ให้คนรุ่นหลังได้ศึกษา อีกทั้งมนุษย์และสิ่งแวดลอมทุกชนิดที่อาศัยอยู่บนโลกที่มีกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อมอยู่ทั่วไป โดยส่วนใหญ่ เป็นรังสีที่มีอยู่ตามธรรมชาติ และบางส่วนขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยแหล่งที่ก่อให้เกิดรังสีได้มากที่สุดภายในและภายนอก ดังนั้นการตรวจวัดกัมมันตรังสีในสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์หากมีการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม (U-238) ทอเรียม (Th-232) และโพแทสเซียม (K-40) เพื่อหาปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) (Ikeya, 1993) จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาอายุโดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ค่าอายุที่น่าเชื่อถือเพื่อเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องทางประวัติศาสตร์จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งกับประวัติศาสตร์ของประเทศไทย รวมถึงเป็นการพัฒนาแหล่งท่องเที่ยวของจังหวัดทางภาคใต้อีกด้วย

เนื่องจากว่าตัวอย่างอาทิเช่น ตัวอย่างหอยนั้นเมื่ออยู่ใต้ดินจะได้รับปริมาณรังสี (Dose) จากรังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดิน ที่มาจากอัตราการแผ่กัมมันตภาพรังสีในธรรมชาติและไอโซโทปรังสีที่มีกำเนิดมาพร้อมโลกได้แก่ ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ซึ่งทั้ง 3 ธาตุนี้จะสลายตัวตามหลักครึ่งชีวิต (Half-life) ซึ่งธาตุเหล่านี้มีค่าครึ่งชีวิตยาวจึงยังมีปรากฏอยู่ในโลกจนถึงปัจจุบันและในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่างๆ กันในรูปของรังสีแอลฟา เบตา และแกมมา ยูเรเนียมและทอเรียมเป็นไอโซโทปรังสีที่มีการสลายตัวต่อเนื่องเป็นห่วงโซ่เรียกว่าอนุกรมและจะไปสิ้นสุดที่ไอโซโทปที่เสถียรมีอยู่ 4 อนุกรม สำหรับอนุกรมเนปทูเนียมมีครึ่งชีวิตสั้นมากเมื่อเทียบกับอายุของเอกภพ ซึ่งมีอายุประมาณ 10^{10} ปี ดังนั้นจึงไม่มีโอกาสที่จะพบนิวเคลียสที่เป็นสมาชิกในอนุกรมนี้ในธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีรังสีบางส่วนที่ได้รับจากภายนอกลูกโลกหรืออวกาศ เช่น รังสีคอสมิก (Cosmic ray) แต่เป็นส่วนน้อย รังสีที่มีการสัมผัสกับผลึกตัวอย่างนี้สามารถแปลงเป็นปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) ได้ โดยวิเคราะห์จากปริมาณยูเรเนียม (U-238) ทอเรียม (Th-232) และโพแทสเซียม (K-40) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่นำไปใช้ประโยชน์กับการกำหนดอายุวัตถุทางด้านโบราณคดีและธรณีวิทยาด้วยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Ikeya, 1993)

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม (U-238) ทอเรียม (Th-232) และโพแทสเซียม (K-40) ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์วัดรังสีแกมมา เพื่อนำไปหาค่าปริมาณรังสีสะสมต่อปี (Annual dose) ในการหาอายุต่อไป และยังได้กรรมวิธีในการวิเคราะห์ธาตุยูเรเนียม (U-238) ทอเรียม (Th-232) และโพแทสเซียม (K-40) ในตะกอนดินบริเวณรอบแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา เพื่อเป็นแนวทางให้แก่ผู้ค้นคว้าวิจัยในงานแขนงนี้ได้ทราบถึงเทคนิคการวิเคราะห์อีกหนึ่งวิธีอันอาจนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยได้

1.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปริมาณสารกัมมันตรังสี ในตัวอย่างตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองสงขลา

1.2 ขอบเขตการศึกษา

1. ตัวอย่างตะกอนดิน บริเวณรอบกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา
2. วิเคราะห์หาค่ากัมมันตภาพรังสี ได้แก่ K-40, Th-232 และ U-238 ในตัวอย่างตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองสงขลา

2. วิธีดำเนินการวิจัย

นำตัวอย่างดินที่ผ่านการบดและซั่งบรจุในกระปุกพลาสติก วางทิ้งไว้ 1 เดือนหรือมากกว่า เพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลรังสีแบบถาวรของการสลายตัวตรงวัดสารกัมมันตรังสีด้วยหัววัดชนิดเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium Detector: HPGe) ใช้เวลาในการวัด 5 ชั่วโมงต่อตัวอย่างแล้วบันทึกข้อมูล วัดรังสีภูมิหลัง (Background Radiation) ใช้เวลาในการวัด 5 ชั่วโมงต่อครั้งแล้วบันทึกข้อมูล วิเคราะห์พื้นที่ที่ได้พิคในช่วงพลังงานของ K-40, U-238 และ Th-232 ของตัวอย่างแล้วลบออกด้วยค่ารังสีภูมิหลัง วัดสารรังสีมาตรฐานใช้เวลา 5 ชั่วโมง โดยวิเคราะห์พื้นที่ คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการนับวัด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับวัดกับพลังงานต่างๆ ของสารรังสีมาตรฐาน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับวัดของนิวไคลด์ K-40, U-238 และ Th-232

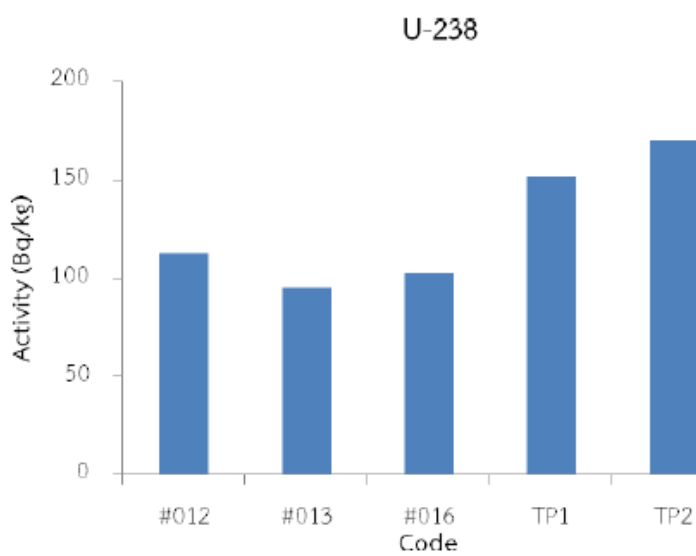
3. ผลการวิจัย

ผลจากการทดลองวัดปริมาณรังสีต่อปีที่พบในธรรมชาติ ซึ่งปริมาณยูเรเนียมและทอเรียมคำนวณด้วยระบบวัดรังสีแกมมา ที่ได้กราฟสเปคตรัมจากโปรแกรม GENIE 2000 ค่าพลังงานของโพแทสเซียม 1460.8 keV ค่าพลังงานของยูเรเนียม 351.9 keV ค่าพลังงานของทอเรียม 463.0 keV แล้วหาประสิทธิภาพของหัววัดรังสีแบบเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์สูง (Efficiency : ๕) หากการตรวจวัดค่ากัมมันตภาพ แล้วนำหาค่าปริมาณ Activity (ดังตารางที่ 1 รูปที่ 1 รูปที่ 2 รูปที่ 3 และรูปที่ 4)

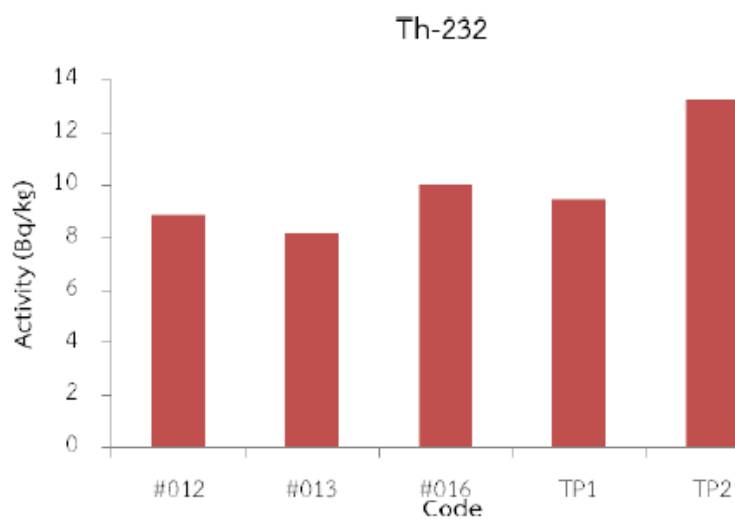
ตารางที่ 1 ปริมาณ Activity ของโพแทสเซียม ยูเรเนียม และทอเรียม

ตัวอย่าง	Activity (Bq/kg)		
	U-238	Th-232	K-40
#012	113.03	8.86	273.61
#013	95.42	8.20	595.28
#016	102.46	10.01	553.84
TP1	151.67	9.48	515.00
TP2	170.42	13.25	485.24

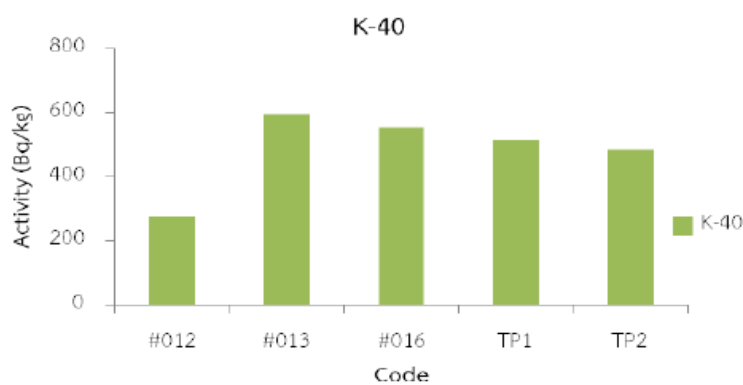
(1005)



รูปที่ 1 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี U-238



รูปที่ 2 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี Th-232



รูปที่ 3 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี K-40



รูปที่ 4 ปริมาณกัมมันตภาพรังสี U-238 Th-232 และ K-40

4. สรุปและเสนอแนะ

จากตัวอย่างตะกอนดินจำนวน 5 ตัวอย่าง ซึ่งเก็บและรวบรวมจากบริเวณรอบกำแพงเมืองประวัติศาสตร์จังหวัดสงขลา เมื่อวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตภาพรังสีของธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมด้วยเทคนิคใช้วิธีแกมมาสเปกโตรเมตรีผลการวิเคราะห์พบว่าในตัวอย่างตะกอนดินมีค่าปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียมอยู่ในช่วง 95.42-170.42 Bq/kg 8.86-13.25 Bq/kg และ 273.61-595.28 Bq/kg ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าธาตุที่มีปริมาณสูงในธรรมชาติของตัวอย่างตะกอนดินบริเวณกำแพงเมืองสงขลามีค่า K-40 สูง ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม ทอเรียม และโพแทสเซียม ยิ่งไปกว่านั้นยังเป็นเทคนิคที่มีความเหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างวิจัยที่มีปริมาณกัมมันตภาพรังสีมาก ถึงแม้ว่าปริมาณกัมมันตรังสีมีโทษต่อมนุษย์และ

สิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามปริมาณกัมมันตรังสีก็ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม ด้านการศึกษาวิจัย ด้านสิ่งแวดล้อม และด้านการหาอายุวัตถุโบราณ

ผู้วิจัยจึงนำเทคนิคดังกล่าวมาใช้เพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณตัวอย่างและให้เกิดประสิทธิภาพได้สูงสุด เพื่อความแม่นยำในการนำไปหาอายุของกำแพงเมืองประวัติศาสตร์ จังหวัดสงขลาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้จาก ผศ.ดร. ธรมิศ นาวารัตน์ และ ผศ.ดร. อิตารัตน์ วิชัยดิษฐ ได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอบคุณนักโบราณคดีชำนาญการและนายช่างสำรวจปฏิบัติงาน สำนักศิลปากรที่ 13 กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรมที่ช่วยกรุณาสำรวจและเก็บตัวอย่างตะกอนดินบริเวณรอบแหล่งโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยรังสีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์วิทยาเขตปัตตานีที่ให้การสนับสนุนเกี่ยวกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมี รวมถึงพี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่ได้ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานตลอดมา ทำน้ขอบคุณทุกท่านที่ได้มีส่วนช่วยเหลือในงานครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศุภกิจ อรรถนบุตร. 2549. การกำหนดอายุเคลือบพื้นของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิดโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 180 น.
- [2] สำนักศิลปากรที่ 13 สงขลา กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม. 2553. รายงานเบื้องต้นการขุดค้นทางโบราณคดีกำแพงเมืองสงขลา. พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา: จกท.ตรีโอ ศรีเอช. 38 น.
- [3] อุษณี เกิดพันธ์. 2553. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ ในดินขุดทางดงและสันทรายโดยเทคนิคนิวตรอนแอคติเวชันและเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 140 น.
- [4] El-Ghawi, U. M., M. M. Bejey, S. M. Al-Fakhri, A. A. Al-Sadeq and K. K. Doubali. 2005. Analysis of libyan arable soils by means of thermal and epithermal NAA. *The Arabian Journal for Science and Engineering*. 30: 147-153.
- [5] Hubert, L. O. 2001. Calibration standard for use in gamma spectrometry and luminescence dating. *Methods and Applications of Absolute Chronology*. 20: 31-38.
- [6] Ikeya, M. 1993. *New Applications of Electron Spin Resonance Dating. Dosimetry and Microscopy*. Singapore: World Scientific. 447 p.
- [7] Soliman, N. F. 2006. Investigation of an Egyptian Alabaster ore by Measuring its Natural Radioactivity and by NAA using K_0 Standardization and comparator Methods. *Nuclear and Radiation Physics*. 1(1): 31-40.
- [8] Tidarut, V., S. Thongchai, S. Natnalin, O. Chutima and L. Pichet. 2008. Determination of U, Th and K in Sediments and Fossil Collected from Mae Moh Mine Using Gamma-Ray

Spectrometry and Neutron Activation Analysis (NAA). *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*. 42: 333-339.

- [9] Limsuwan, S., T. Vichaidid and P. Limsuwan. 2011. ESR dating of laterite from Ban Tha Ta Suea, Kanchanaburi, Thailand. *Applied Radiation and Isotopes*. 69: 545-549.

Prince of Songkla University
Pattani Campus

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวอุมมอัยมาน มะดีเยาะ

รหัสนักศึกษา 5620320803

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จ
วิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ.(ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2555

ทุนการศึกษา

ทุนยกเว้นค่าธรรมเนียมการศึกษา จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อุมมอัยมาน มะดีเยาะ ธรณิศ นาวารัตน์ และจิตารัตน์ วิชัยดิษฐ์. 2560. การวิเคราะห์ปริมาณยูเรเนียม
ทอเรียม และโพแทสเซียม ในตะกอนดินบริเวณรอบแหล่งโบราณคดี กำแพงเมืองสงขลา
จังหวัดสงขลา โดยใช้วิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี. การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ครั้งที่ 4. อาคารเฉลิมพระเกียรติฉลองสิริราชสมบัติครบ
60 ปี (สำนักงานอธิการบดี) มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, เพชรบูรณ์, 10 มีนาคม
2560, 1002-1008.