



# โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสง  
จากแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น

โดย

นางสาวบงกช ฌ พัทลุง

เลขประจำตัวนิต 6032717323

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2563

การหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสง จากแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น

นางสาวบงกช ณ พัทลุง

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

LUMINESCENCE DATING OF BRICKS FROM MUANGPHEA

ARCHAEOLOGICAL SITE, KHON KAEN PROVINCE

MISS BONGKOD NABHADALUNG

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Academic Year 2020

หัวข้อโครงการ

การหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสง จากแหล่งโบราณคดี

เมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น

โดย

นางสาวบงกช ฦ พัทลุง

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

ศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้

วันที่ส่ง..... 14 / 05 / 2564 .....

วันที่อนุมัติ..... 7 / 05 / 2564 .....

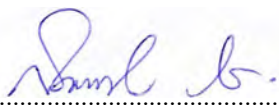
.....  


อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้)

Project Title LUMINESCENCE DATING OF BRICKS FROM MUANGPHEA  
ARCHAEOLOGICAL SITE, KHON KAEN PROVINCE  
By Miss Bongkod NaBhadalung  
Field of Study Geology  
Project Advisor Professor Santi Pailoplee, Ph.D.

Submitted date.....14 / 05 / 2021.....

Approval date.....7 / 05 / 2021.....



.....

Project Advisor  
(Professor Santi Pailoplee, Ph.D.)

บงกช ฌ พัทลุง : การหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสง จากแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น. (LUMINESCENCE DATING OF BRICKS FROM MUANGPHEA ARCHAEOLOGICAL SITE, KHON KAEN PROVINCE) อ.ที่ปรึกษาโครงการหลัก : ศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้, 53 หน้า.

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอายุแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น จากก้อนอิฐด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสง โดยทำการเก็บตัวอย่างอิฐที่ถูกขุดขึ้นมาจากการสำรวจของกรมศิลปากรและการดำเนินงานวางท่อขนส่งน้ำมัน ซึ่งทั้งสองบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างอิฐมาศึกษาตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของเมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพภายในของก้อนอิฐพบว่าอิฐจากทั้งสองบริเวณมีลักษณะทางกายภาพภายในก้อนอิฐที่แตกต่างกัน โดยก้อนอิฐจากบริเวณที่ 1 มีลักษณะเป็นสีดำบริเวณตรงกลางและมีสีส้มบริเวณผิวด้านนอก ส่วนบริเวณที่ 2 มีลักษณะเป็นสีส้มเนื้อเดียวกันทั่วทั้งก้อน ผู้จัดทำโครงการจึงวางแผนการทดลองโดยใช้ตัวอย่างอิฐทั้งหมด 4 ก้อน แต่ทำการแยกตัวอย่างระหว่างเนื้อด้านนอกและด้านในก้อนอิฐ โดยแบ่งตัวอย่างเป็น 5 ตัวอย่าง ได้แก่ PH01-out PH01-in PH02-out PHG01-all และ PHG02-out จากนั้นหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader และค่า AD ด้วยเครื่อง gamma-ray spectrometer แล้วคำนวณหาค่าอายุ จากการศึกษาค้นคว้าอิฐที่เก็บมาทำการศึกษามีช่วงอายุ 2 ช่วง ช่วงอายุที่ 1 คืออิฐจากที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว ซึ่งจากค่าอายุที่ได้ทำให้สันนิษฐานได้ว่ามีการสร้างโบราณสถานก่ออิฐและการอยู่อาศัยในเมืองเพ็ญในช่วงเวลาประมาณ 1,400-1,500 ปีมาแล้ว ซึ่งตรงกับช่วงสมัยทวารวดี ส่วนช่วงอายุที่ 2 คืออิฐจากที่ดินนายชุตติเดช สูงเพ็ญ จากค่าอายุที่ได้แสดงให้เห็นว่าคนในอดีตในพื้นที่เมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ มีการอยู่อาศัยและสร้างศาสนสถานขึ้น ในช่วงเวลาประมาณ 625-955 ปีมาแล้ว ซึ่งตรงกับสมัยลพบุรีและช่วงรอยต่อระหว่างสมัยลพบุรีและล้านช้าง นอกจากนี้ยังพบว่าหากตัวอย่างอิฐที่นำมาศึกษาเป็นอิฐที่เผาไม่สุกทั่วทั้งก้อน เนื้ออิฐบริเวณขอบนอกที่มีสีส้มจะเหมาะกับการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงมากกว่าเนื้ออิฐด้านในที่มีสีดำ เนื่องจากอิฐด้านในอาจมีการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ในระหว่างกระบวนการผลิต

ภาควิชา	ธรณีวิทยา	ลายมือชื่อนิสิต.....	บงกช ฌ พัทลุง
สาขาวิชา	ธรณีวิทยา	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....	Santi B.
ปีการศึกษา	2563		

# # 6032717323 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : DATING / LUMINESCENCE / BRICK / MUANGPHEA ARCHAEOLOGICAL SITE


BONGKOD NABHADALUNG : LUMINESCENCE DATING OF BRICKS FROM MUANGPHEA ARCHAEOLOGICAL SITE, KHON KAEN PROVINCE. ADVISOR : PROFESSOR SANTI PAILOPLEE, Ph.D., 53 pp.

The objective of this project is to determine the age of the Muangphea Archaeological Site, Ban Phai District, Khon Kaen Province using optically stimulated luminescence dating. Brick samples were excavated from the Fine Arts Department's survey and oil transportation pipeline operations. Collected bricks are located on the east and west side of the ancient city of Ban Muangphea. The inside of brick samples from both areas show different characteristics. The bricks from the first area showed black in the middle and orange in the outer portion of bricks while the bricks from the second area showed homogeneous orange color throughout the cube. The four brick samples were prepared into five samples: PH01-out, PH01-in, PH02-out, PHG01-all, and PHG02-out. The ED was determined with a TL/OSL reader and AD was determined with a gamma-ray spectrometer. According to the result, it was found that the bricks collected in the study can be classified into two age ranges. The first one from the west of Ban Muangphea concludes that the bricks of archaeological site and residents of the people in the city of Muangphea was constructed about 1,400-1,500 years ago, which corresponds to the Dvaravati period. The second one from the eastern part of Ban Muangphea, the age has shown that people in the past in the Muangphea lived and built religious places around 625-955 years ago, which corresponds to the Lopburi period and the boundary between the Lopburi and Lan Xang period. In addition, it is found that the outside portion of the brick is more suitable for luminescence dating than the inside portion since the inside might be incompletely fired during the production process.

Department : Geology

Student's Signature..... 

Field of Study : Geology

Advisor's Signature..... 

Academic Year : 2020

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์เรื่องการหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสง จากแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น สามารถสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจากผู้มีพระคุณทุกท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้มอบโอกาส ในการทำโครงการฉบับนี้ อีกทั้งได้สละเวลาเป็นที่ปรึกษางานโครงการพร้อมทั้งให้คำปรึกษาทางด้าน วิชาการ การวางแผนและคำแนะนำแนวทางที่ถูกต้องในการทำงาน รวมไปถึงประสบการณ์ในการทำ โครงการ ตลอดจนคอยแก้ไขข้อบกพร่อง ด้วยความละเอียดถี่ถ้วน และการเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ นางสาวทิพย์วรรณ วงศ์อัสน์ไพบุลย์ นักโบราณคดีชำนาญการ สำนักศิลปากร ที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร ที่ได้อำนวยความสะดวกทั้งในส่วนของสถานที่เก็บตัวอย่าง การเก็บ ตัวอย่าง รวมไปถึงในส่วนของข้อมูลทางด้านประวัติศาสตร์ของเมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น สำหรับใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดลองของโครงการในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุมัติให้มีการ จัดทำโครงการวิทยาศาสตร์และอนุมัติงบประมาณสำหรับการจัดทำโครงการในครั้งนี้ อีกทั้งยังได้ให้ ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง TL/OSL reader นอกจากนั้นยังขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรม นิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง gamma-ray spectrometer ทดลองหาค่า AD เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับโครงการ

ขอขอบพระคุณบุคลากรและอาจารย์ในภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยทุกท่านที่คอยให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือ และคอยประสานงานด้านต่าง ๆ ตลอด ระยะเวลาในการทำโครงการครั้งนี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องธรณีวิทยาทุกคน ที่คอยให้ คำแนะนำ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีมาเสมอ

ขอขอบพระคุณนายศุภณัฐ สมใส เพื่อนจากมหาวิทยาลัยศิลปากร ที่คอยให้คำแนะนำและ ความช่วยเหลือในส่วนของข้อมูลทางด้านโบราณคดีต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้จัดทำโครงการที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลัง และ ขอบคุณเพื่อน ๆ ธรณีวิทยา รุ่น 61 ทุกคน ที่คอยรับฟังปัญหา ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ รวมถึงให้กำลังใจที่สำคัญเสมอมาตลอดการทำโครงการ ทำให้โครงการฉบับนี้สำเร็จและบรรลุ วัตถุประสงค์ตามที่วางไว้ไปได้ด้วยดี

นางสาวบงกช ฦ พัทลุง

ผู้จัดทำ



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	จ
สารบัญตาราง	ช
นิยามศัพท์เฉพาะ	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 พื้นที่ศึกษา	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและวิธีดำเนินงานวิจัย</b>	<b>9</b>
2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
2.2 วิธีการดำเนินงาน	23
<b>บทที่ 3 ผลการทดลอง</b>	<b>32</b>
3.1 ผลการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water Content)	32
3.2 ผลการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่าง (Equivalent Dose)	32
3.3 ผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual Dose)	43
<b>บทที่ 4 วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>44</b>
4.1 การคำนวณอายุจากผลการทดลอง	44
4.2 การอภิปรายผลการทดลอง	46
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>	<b>49</b>
5.1 สรุปผลอายุที่ได้จากการทดลอง	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>51</b>

## สารบัญญรูปภาพ

		หน้า
รูป 1.1.	ภาพถ่ายทางอากาศของเมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ	3
รูป 2.1.	รูปจำลองแสดงระดับพลังงานในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ ของการเปล่งแสง	10
รูป 2.2.	การประยุกต์หลักการเปล่งแสงกับการหาอายุวัสดุที่เคยผ่านความร้อน	11
รูป 2.3.	สัมประสิทธิ์การลดทอนแสง (ก) ความสามารถในการทะลุทะลวงของเบตา (พจน์ B) (ข) ความสามารถในการทะลุทะลวงของแอลฟา (พจน์ K) ที่สัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม	13
รูป 2.4.	(ซ้าย) OSL decay curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กตรอนในตัวอย่างในแกนตั้ง (หน่วย count/sec) ในแต่ละเวลาการอบแสงกระตุ้นซึ่งอยู่ในแกนนอน และ (ขวา) growth curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ตรวจวัดได้จากการเปล่งแสงด้วยวิธี OSL (หน่วย count/sec) ที่มีในตัวอย่างและปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ทราบค่า (หน่วย Gy)	16
รูป 2.5.	ปรากฏการณ์ทางพลังงานของการเปล่งแสงของผลึกแร่ที่อธิบายในเชิงการกระตุ้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ (ก) TL และ (ข) OSL	17
รูป 2.6.	(ก) แสดงกราฟสัญญาณ TL จากตัวอย่างตะกอนแร่เฟลด์สปาร์ก่อนและหลังถูกตรวจวัดด้วยวิธี OSL พบว่าสัญญาณ TL หลังการตรวจวัด OSL ลดลงบ้างบางส่วน (ข) แสดงกราฟสัญญาณ OSL ที่ได้จากการวัดกับตัวอย่างเดียวกัน	18
รูป 2.7.	ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการกระจายตัวของบริเวณที่พบหลักฐานทางโบราณคดีภายในเมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ	24
รูป 2.8.	โบราณสถานในที่ดินนายชูติเดช สูงเพ็ญ	24
รูป 2.9.	โบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว	25
รูป 2.10.	ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง	28
รูป 2.11.	ตัวอย่างที่จะนำไปหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose)	29
รูป 2.12.	แผนภาพการทดลองการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปี	29
รูป 2.13.	ภาพตัวอย่างของห้องมืดที่ใช้ในการทำการทดลอง	30
รูป 2.14.	แผนภาพการทดลองการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่าง	31
รูป 3.1.	แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH01-out ในการทดลองครั้งที่ 1 (PH01-out _01)	33
รูป 3.2.	แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out	34

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูป 3.3. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH01-in ในการทดลองครั้งที่ 5 (PH01-in _05)	35
รูป 3.4. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in	36
รูป 3.5. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH02-out ในการทดลองครั้งที่ 3 (PH02-out _03)	37
รูป 3.6. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PH02-out	38
รูป 3.7. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PHG01-all ในการทดลองครั้งที่ 1 (PHG01-all _01)	39
รูป 3.8. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all	40
รูป 3.9. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PHG02-out ในการทดลองครั้งที่ 1 (PHG02-out _01)	41
รูป 3.10. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out	42
รูป 4.1. แผนภาพแสดงการกระจายตัวของอายุจากตัวอย่างอิฐที่นำมาศึกษาเทียบกับค่าอายุที่ทางสำนักศิลปากรที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร ได้กำหนดไว้ตามหลักฐานทางโบราณคดีที่พบ	47
รูป 4.2. ตัวอย่างอิฐ PH01 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อด้านในและเนื้อขอบนอก	47
รูป 4.3. ตัวอย่างอิฐ PH02 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อขอบนอกที่ค่อนข้างแปรปรวน	48
รูป 4.4. ตัวอย่างอิฐ PHG01 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณทั่วทั้งก้อน	48
รูป 4.5. ตัวอย่างอิฐ PHG02 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อขอบนอก	48
รูป 5.1. ผังเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย บริเวณหมายเลข 1 ที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว และ บริเวณหมายเลข 2 ที่ดินนายชุตติเดช สูงเพี้ย	50

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1. ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแต่ละธาตุกัมมันตรังสีและปริมาณการแผ่รังสีต่อปี	12
ตาราง 2.2. ตารางแสดงประสิทธิภาพในการประยุกต์วิธีการหาอายุของตัวอย่างทางธรณีวิทยาและโบราณคดีชนิดต่าง ๆ โดยปริมาณของสัญลักษณ์จะแปรผันตามประสิทธิภาพ	20
ตาราง 2.3. แสดงข้อมูลและภาพตัวอย่างของตัวอย่างอิฐในโบราณสถานในที่ดินนายชุตติเดช สูงเพี้ย	25
ตาราง 2.4. แสดงข้อมูลและภาพตัวอย่างของตัวอย่างอิฐในโบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว	26
ตาราง 2.5. แสดงลักษณะกายภาพภายใน (สี) ของตัวอย่างที่จะนำไปทำการศึกษา	27
ตาราง 3.1. แสดงผลการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำหรือ water content (W) ในตัวอย่าง	32
ตาราง 3.2. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out	34
ตาราง 3.3. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in	36
ตาราง 3.4. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH02-out	38
ตาราง 3.5. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all	40
ตาราง 3.6. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out	42
ตาราง 3.7. แสดงค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติในตัวอย่างที่นำมาศึกษา	43
ตาราง 3.8. แสดงผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีหรือค่า AD	43
ตาราง 4.1. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH01-out	44
ตาราง 4.2. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH01-in	44
ตาราง 4.3. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH02-out	45
ตาราง 4.4. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PHG01-all	45
ตาราง 4.5. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PHG02-out	46

## นิยามศัพท์เฉพาะ

### การเปล่งแสงด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (optically stimulated luminescence)

การเปล่งแสงด้วยการกระตุ้นด้วยแสง เป็นการใช้แสงในการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนไปตกที่ศูนย์กลางการเปล่งแสง เกิดเป็นการรวมตัวใหม่อีกครั้งและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยเป็นการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบโฟตอน

### Equivalent dose (ED)

Equivalent dose (ED) คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งในธรรมชาติโครงสร้างผลึกจะมีความไม่สมบูรณ์อยู่ เมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยการอาบรังสี จะสามารถตรวจวัดพลังงานที่ได้รับด้วยเครื่อง TL/OSL reader โดยมีหน่วยเป็น เกรย์ (Gy)

### Annual dose (AD)

Annual dose (AD) หรืออัตราการแผ่รังสีต่อปี เป็นการประเมินหาค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) จากนั้นธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจะให้พลังงาน 3 ชนิด และเปลี่ยนสภาพเป็นธาตุใหม่ในรูปของอนุภาค ได้แก่ 1) อนุภาคแอลฟา 2) อนุภาคเบตา และ 3) อนุภาคแกมมา ซึ่งทั้ง 3 อนุภาคนี้ เป็นสิ่งที่ไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถทำการตรวจวัดได้โดยใช้เครื่อง gamma-ray spectrometry

### อายุสัมพัทธ์ (relative-age dating)

การหาอายุสัมพัทธ์ เป็นการบอกถึงการเกิดขึ้นของเหตุการณ์ต่าง ๆ ก่อนหรือหลัง โดยใช้หลักฐานและข้อมูลที่มีอยู่มาหาความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน และสามารถอธิบายถึงลำดับของเหตุการณ์ รวมถึงวิวัฒนาการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นได้ ในทางธรณีวิทยา มีการใช้อายุสัมพัทธ์ในการอธิบายถึงลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีต โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการสังเกต เช่น ความสัมพันธ์ของการลำดับชั้นหิน ธรณีวิทยาโครงสร้าง รวมถึงซากดึกดำบรรพ์ที่พบในชั้นหิน และในทางโบราณคดีมีการอธิบายเหตุการณ์และเรื่องราวที่เกิดขึ้นในประวัติศาสตร์ โดยใช้ข้อมูลจากหลักฐานที่พบ ทั้งโบราณวัตถุต่าง ๆ เช่น เครื่องปั้นดินเผา สิ่งของเครื่องใช้ รวมไปถึงโบราณสถาน ซึ่งเป็นหลักฐานที่ไม่เป็นลายลักษณ์อักษร โดยสามารถนำไปอธิบายได้ว่าเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นก่อน หรือเหตุการณ์ใดเกิดขึ้นในภายหลัง

### อายุสัมบูรณ์ (absolute-age dating)

การหาอายุสัมบูรณ์ เป็นการหาค่าอายุของสิ่งต่าง ๆ จากการคำนวณและวิเคราะห์ โดยใช้เครื่องมือและกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นตัวเลขที่แน่นอน ทำให้มีความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากยิ่งขึ้น การหาอายุสัมบูรณ์มีวิธีการหาที่หลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับสิ่งที่ต้องการทราบค่าอายุ โดยต้องมีการเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสม เพราะการหาอายุบางวิธีเหมาะกับตัวอย่างที่มีอายุอ่อนกว่าหลักหมื่นปี บางวิธีเหมาะกับตัวอย่างที่มีอายุหลักแสนปี ไปจนถึงหลักล้านปี การหาอายุสัมบูรณ์สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นทางธรณีวิทยา ที่นิยมนำธาตุกัมมันตรังสี เช่น ธาตุยูเรเนียม-238 ธาตุคาร์บอน-14 เป็นต้น มาคำนวณค่าครึ่งชีวิตที่อยู่ในซากดึกดำบรรพ์หรือหิน ส่วนทางโบราณคดีนิยมหาอายุด้วยวิธีคาร์บอน-14 ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมกับตัวอย่างอายุต่ำกว่า 50,000 ปี และต้องเป็นตัวอย่างของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ถ่าน หรือโครงกระดูกมนุษย์ เป็นต้น

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1. ที่มาและความสำคัญ

บ้านเมืองเพี้ยตั้งอยู่ที่จังหวัดขอนแก่น ซึ่งเป็นจังหวัดที่มีประวัติศาสตร์อันยาวนาน ก่อนที่จะมีการตั้งถิ่นฐานของชุมชนบริเวณเมืองเพี้ยในปัจจุบัน คาดว่าในบริเวณนี้เคยเป็นเมืองโบราณมาก่อน โดยการที่พบเนินดินที่อัดแน่นด้วยภาชนะดินเผาหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าโพน เป็นหลักฐานสำคัญที่บ่งบอกว่าเมืองแห่งนี้มีการทำอุตสาหกรรมต้มเกลือ ทำให้สันนิษฐานได้ว่าเมืองเพี้ยเคยเป็นแหล่งผลิตเกลือสินเธาว์ขนาดใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยในสมัยโบราณ และจากการที่พบร่องรอยคูน้ำคันดินชัดเจน โบราณวัตถุและมีแหล่งโบราณคดีอื่น ๆ อยู่บริเวณใกล้เคียง จึงสามารถกำหนดได้ว่าเมืองโบราณแห่งนี้เป็นแหล่งโบราณคดีที่สำคัญ ทำให้นักวิชาการให้ความสนใจกับเมืองโบราณนี้เป็นอย่างมาก (ปริวรรต เจียมจิตต์, 2561) ในปัจจุบันมีข้อมูลทางประวัติศาสตร์จากกรมศิลปากรเกี่ยวกับช่วงอายุของแหล่งโบราณคดีเมืองเพี้ยว่ามีพัฒนาการทางโบราณคดีที่สามารถแบ่งออกเป็น 5 สมัย ได้แก่ สมัยก่อนประวัติศาสตร์ตอนปลาย สมัยทวารวดี สมัยลพบุรี สมัยล้านช้าง และสมัยรัตนโกสินทร์ ซึ่งการกำหนดอายุดังกล่าวเป็นการกำหนดอายุจากหลักฐานทางโบราณคดีที่พบ แต่ยังไม่มีการกำหนดอายุที่แน่ชัดโดยวิธีการวิทยาศาสตร์ และแม้ว่าจังหวัดขอนแก่นจะมีแหล่งโบราณคดีมากมายที่พบหลักฐานทางประวัติศาสตร์และถูกกำหนดอายุให้อยู่ในสมัยทวารวดี แต่ที่เมืองเพี้ยมีหลักฐานโบราณสถานก่ออิฐของทวารวดีที่ชัดเจนที่สุดในจังหวัดขอนแก่น เท่าที่มีการสำรวจพบในขณะนี้ ทำให้นักโบราณคดีต้องการทราบอายุที่แน่ชัดของเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ยจากวิธีการทางวิทยาศาสตร์

การกำหนดอายุแหล่งโบราณคดีหรือการทราบระยะเวลาของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในอดีต จะสามารถวิเคราะห์หาอายุได้จากข้อมูลที่ถูกบันทึกอยู่ในตัวอย่างที่เรานำมาศึกษา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ 1) อายุสัมพัทธ์ (relative age) ซึ่งเป็นช่วงระยะเวลาที่บอกเป็นลำดับของเหตุการณ์ก่อนหลัง โดยหาได้จากการนำเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นมาเรียงลำดับกันจนได้เป็นปฏิทินของเหตุการณ์ลำดับต่าง ๆ ตามความเป็นจริง และ 2) อายุสัมบูรณ์ (absolute age) เป็นระยะเวลาที่สามารถบ่งบอกอายุที่แน่นอนลงไป ซึ่งหาได้จากการกำหนดหาอายุโดยวิเคราะห์และคำนวณจากไอโซโทปของธาตุกัมมันตรังสีที่ปะปนประกอบอยู่ในตัวอย่างโบราณวัตถุหรือก้อนอิฐที่เรานำมาศึกษา เดิมการกำหนดหาอายุในทางโบราณคดีจะกำหนดจากอายุสัมพัทธ์โดยการกำหนดอายุจากรูปแบบศิลปะ หรือการเทียบลำดับเหตุการณ์ต่าง ๆ จากโบราณสถานและโบราณวัตถุที่พบข้างเคียง และไม่ได้มีการกำหนดอายุสัมบูรณ์ทำให้ไม่สามารถทราบอายุของโบราณวัตถุ โบราณสถาน หรือระยะเวลาของเหตุการณ์ในอดีตได้อย่างชัดเจน (มานิตย์ ช้อนสุข และ เนาวรัตน์ วรรณนะพันธุ์, 2535)

จากงานวิจัยของ ดาวิยะห์ อาแด (2560) กล่าวว่า ในปี ค.ศ. 1905 เออร์เนท รัทเทอร์ฟอร์ด (Ernest Rutherford) ซึ่งให้เห็นว่ารังสีสามารถนำมาใช้ในการกำหนดหาอายุตัวอย่างทางโบราณคดี (archaeology) และทางธรณีวิทยา (geological) ได้ ภายหลังจากจึงมีการพัฒนาวิธีการหาอายุของ นักวิทยาศาสตร์และเทคนิคที่สามารถประมาณค่าอายุหินและซากสิ่งมีชีวิตโบราณได้ การกำหนดหา อายุวัตถุโบราณได้รับความสนใจมากขึ้น จึงมีกระบวนการพัฒนากันมากขึ้น กระบวนการตรวจหาอายุ วัตถุโบราณมีหลายวิธีการ เช่น เทคนิคคาร์บอน-14 (radiocarbon) เทคนิควัดการเปล่งแสง (luminescence) เทคนิคภาวะแม่เหล็กบรรพกาล (archaeomagnetic or palaeomagnetism) เทคนิคการนับวงปีต้นไม้ (tree ring or dendro – chronology) การกำหนดอายุโดยใช้แร่อบโซ เดียน (obsidian dating) เทคนิคการตรวจสอบอายุที่จมอยู่ในดิน (varve dating) การวัดสปินของ อิเล็กตรอน (electron spin resonance dating) การกำหนดอายุโดยใช้โพแทสเซียม-อาร์กอน (potassium – argon dating) เทคนิคการนับรอยฟิชชัน (fission track technique) โดยวิธีการ ตรวจหาอายุในแต่ละวิธีการนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการเลือกใช้วิธีการตรวจหาอายุ จึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของตัวอย่างที่ศึกษา

ซึ่งจากการศึกษาหลากหลายงานวิจัยมีการนำเทคนิควัดการเปล่งแสง (luminescence) มาใช้ ในการหาอายุก้อนอิฐโบราณเพื่อให้ได้อายุที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น (ยกตัวอย่างเช่น Abby Antrobus, 2004; Thomas Gurling, 2009 และ Pailoplee et al., 2016) ดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงมีความสนใจ ที่จะกำหนดอายุของก้อนอิฐโบราณด้วยเทคนิคการหาอายุจากวิธีกระตุ้นด้วยแสงควบคู่ไปกับข้อมูลการ กำหนดอายุจากรูปแบบศิลปะ หลังจากนั้นนำข้อมูลมาสรุปและอภิปรายผล เพื่อให้ได้ข้อมูลช่วงอายุของ แหล่งโบราณคดีเมืองเพี้ยที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น และหากการกำหนดอายุแหล่งโบราณคดีเมืองเพี้ยโดย เทคนิคการหาอายุจากวิธีกระตุ้นด้วยแสงมีความสอดคล้องกับข้อมูลทางประวัติศาสตร์เป็นอย่างดี ก็จะมี นำองค์ความรู้ไปใช้ศึกษากับก้อนอิฐโบราณในโบราณสถานข้างเคียงต่อไปในอนาคต

## 1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาอายุบริเวณแหล่งโบราณคดีเมืองเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น จากก้อนอิฐด้วย วิธีกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งเทียบเคียงได้กับอายุของแหล่งโบราณคดีหรืออายุของกิจกรรมมนุษย์ในสมัยนั้น

## 1.3. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวเป็นข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้ยืนยัน และ ประกอบกับข้อมูลทางประวัติศาสตร์ เพื่ออธิบายถึงอายุที่แน่ชัดของอิฐโบราณ ซึ่งมีข้อมูลทาง ประวัติศาสตร์ว่าอยู่ในสมัยก่อนประวัติศาสตร์ตอนปลาย สมัยทวารวดี สมัยลพบุรี สมัยล้านช้าง และ สมัยรัตนโกสินทร์ ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับชุมชนบ้านเมืองเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น



## 1.4. พื้นที่ศึกษา

### 1.4.1. ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาโครงการคือบริเวณเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ยซึ่งตั้งอยู่ที่บ้านเมืองเพี้ย หมู่ที่ 1, 2 และ 8 ตำบลเมืองเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ตำแหน่งละติจูดที่ 16 องศา 04 ลิปดา 43.2 ฟลิปดา เหนือ ลองจิจูดที่ 102 องศา 39 ลิปดา 31.6 ฟลิปดา ตะวันออก พิกัด UTM ที่ 48Q 0249549 ตะวันออก 1779055 เหนือ ความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 172 เมตร (ในระบบ WGS 1984 แผนที่มาตราส่วน 1: 50,000 พิมพ์ครั้งที่ 1 – RTSD ลำดับชุด L7018 ระวัง 5541 III อำเภอบ้านไผ่) เมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย มีลักษณะเป็นเมืองโบราณที่มีคูน้ำและคันดินล้อมรอบ 1 ชั้น (รูป 1.1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมืองตามแนวแกนทิศตะวันออก – ตะวันตก ยาวประมาณ 1,150 เมตร และตามแนวแกนทิศเหนือ – ใต้ กว้างประมาณ 1,100 เมตร จุดศูนย์กลางของเมืองโบราณซึ่งมีลักษณะเป็นเนินมีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 171 เมตร และสูงกว่าบริเวณโดยรอบซึ่งมีลักษณะเป็นทุ่งนาอยู่ประมาณ 12-15 เมตร ด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือของเมืองเป็นอ่างเก็บน้ำแก่งละว้า จากภาพถ่ายทางอากาศ พ.ศ. 2496 จะเห็นว่าในอดีตเคยมีลำห้วยเชื่อมระหว่างอ่างเก็บน้ำแก่งละว้ากับคูเมืองโบราณ แต่ปัจจุบันลำห้วยนี้ได้แห้งไปและกลายสภาพเป็นทุ่งนาแล้ว



รูป 1.1. ภาพถ่ายทางอากาศของเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ยจาก Google Earth Pro

สภาพปัจจุบันพื้นที่บริเวณเนินเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย เป็นที่ตั้งของโรงเรียนบ้านเมืองเพี้ย สถานีนามัยบ้านเมืองเพี้ย วัดมงคลหลวง และบ้านเรือนของประชาชนที่ปลูกอยู่อย่างหนาแน่น โดยบ้านเมืองเพี้ยแบ่งออกเป็น 3 หมู่บ้าน คือ หมู่ที่ 1 หมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 8 มีอาณาเขต ดังนี้

ทิศเหนือ	จรดพื้นที่บ้านหนองนางขวัญและบ้านละว้า
ทิศใต้	จรดพื้นที่บ้านขามเรียน
ทิศตะวันออก	จรดพื้นที่บ้านโนนข่าและบ้านหนองร้านหญ้า
ทิศตะวันตก	จรดพื้นที่อำเภอชนบท

#### 1.4.2. ข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ของจังหวัดขอนแก่น

จังหวัดขอนแก่นตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 165 เมตร มีเนื้อที่ทั้งสิ้นประมาณ 10,885.99 ตารางกิโลเมตร หรือ 6.8 ล้านไร่ และอยู่ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 449 กิโลเมตร ซึ่งมีอาณาเขตติดต่อดังนี้

ทิศเหนือ	ติดต่อกับ จังหวัดเลย จังหวัดหนองบัวลำภู และจังหวัดอุดรธานี
ทิศตะวันออก	ติดต่อกับ จังหวัดกาฬสินธุ์และจังหวัดมหาสารคาม
ทิศใต้	ติดต่อกับ จังหวัดนครราชสีมาและจังหวัดบุรีรัมย์
ทิศตะวันตก	ติดต่อกับ จังหวัดชัยภูมิและจังหวัดเพชรบูรณ์

จังหวัดขอนแก่นมีสภาพพื้นที่ลาดเอียงจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออกและทิศใต้ บริเวณที่สูงทางด้านตะวันตกมีสภาพพื้นที่เป็นเขาหินปูนตะปุ่มตะป่ำสลับกับพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย มีระดับความสูงประมาณ 200-250 เมตรจากระดับน้ำทะเล บริเวณที่สูงตอนกลางและด้านเหนือมีสภาพพื้นที่เป็นเทือกเขา สูงประมาณ 300-660 เมตร นอกจากนั้นทางตอนเหนือของจังหวัดยังเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำชีและแม่น้ำพอง ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นที่ตั้งของ เขื่อนอุบลรัตน์และเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญที่ใช้หล่อเลี้ยงพื้นที่การเกษตรในหลายอำเภอ เช่น อำเภอ น้ำพอง อำเภอหนองเรือ อำเภออุบลรัตน์ และอำเภอภูเวียง บริเวณแอ่งโคราชจะครอบคลุมพื้นที่ทางด้านใต้ของจังหวัด สภาพพื้นที่เป็นลูกคลื่นลอนลาดเล็กน้อย มีความสูงประมาณ 150-200 เมตร มีบางส่วนเป็นเนิน สูงประมาณ 170-250 เมตร และลาดต่ำไปทางที่ราบลุ่มที่ขนานกับลำน้ำชี มีความสูงประมาณ 130-150 เมตร จากนั้นพื้นที่จะลาดเอียงไปทางตะวันออก มีลักษณะเป็นลูกคลื่นลอนลาดมีความสูงประมาณ 200-250 เมตร และค่อนข้างราบ มีความสูงประมาณ 170 -180 เมตร

#### 1.4.3. ข้อมูลทางประวัติศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลจากนางสาวทิพย์วรรณ วงศ์อัสสไพบูลย์ (2564) ได้ระบุว่าจากหลักฐานที่ค้นพบบริเวณบ้านเมืองเพี้ย เมื่อ พ.ศ. 2516 พบภาชนะดินเผาเนื้อหยาบและผิวเรียบ ลายเชือกทาบ ลายขูดขีด ลายเขียนสีแดง และเคลือบสีแดง ใบเสมาหิน แม่พิมพ์ดินเผา ลูกกระสุนดินเผา กำไลสำริด เครื่องมือเหล็ก กระดุกมนุษย์ กระดุกสัตว์ ฯลฯ พอสันนิษฐานได้ว่าชุมชนนี้น่าจะเริ่มตั้งถิ่นฐานมาตั้งแต่ช่วงก่อนประวัติศาสตร์เรื่อยมาถึงช่วงสมัยประวัติศาสตร์

1) **ระยะแรกของสมัยประวัติศาสตร์ในยุควัฒนธรรมของสมัยทวารวดี** วัฒนธรรมที่ปรากฏร่องรอยหลักฐานของความเจริญรุ่งเรือง ในบริเวณดินแดนถิ่นบ้านเมืองเพ็ญ เป็นวัฒนธรรมทวารวดี ราวศตวรรษที่ 12 – 16 มีหลักฐานบ่งชี้กล่าว คือ

- บริเวณรอบ ๆ บ้านเมืองเพ็ญ มีลักษณะเป็นเนินดินรูปรี เป็นชุมชนที่มีการตั้งถิ่นฐานของผู้คนค่อนข้างใหญ่ มีคูน้ำคันดินล้อมรอบ โดยมีคูน้ำ 1 ชั้น และคันดิน 2 ชั้น รอบทุกทิศกว้างจากทิศตะวันออกถึง 790 เมตร จากทิศเหนือจรดทิศใต้ 860 เมตร
- งานศิลปกรรมทวารวดี มีงานศิลปกรรมที่พบในหมู่บ้านอีกแบบคือเสมาหิน ขนาดใหญ่พบที่บริเวณศาลากลางบ้านเมืองเพ็ญ (ป้อบ้าน) และมีวัดเก่าอยู่ทางทิศตะวันออกของหมู่บ้าน (ปัจจุบันเป็นกุ่เก่าที่ปรักหักพังอยู่ด้านหลังโรงเรียนบ้านเมืองเพ็ญ) สันนิษฐานว่าเป็นเสมาหินแบบเดียวกับที่พบที่เมืองโบราณเมืองชัยวาน (บ้านโพธิ์ไชย กิ่งอำเภอกอโพธิ์ไชย) ซึ่งพบเสมาหินปักอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าล้อมรอบพระเจ้าใหญ่ทั้ง 8 ทิศ
- การสร้างพระพุทธรูป เพื่อสักการบูชาและประกอบพิธีกรรมทางศาสนา ซึ่งเป็นพระพุทธรูปหินฝีมือช่างพื้นเมือง เป็นสมัยศิลปะทวารวดี ได้แก่ พระเจ้าใหญ่มงคลหลวง บ้านเมืองเพ็ญ สันนิษฐานว่าคงจะสร้างยุคเดียวกันกับพระเจ้าใหญ่เมืองโพธิ์ไชย (เมืองชัยวาน) ตำบลโคกโพธิ์ไชย กิ่งอำเภอกอโพธิ์ไชย จังหวัดขอนแก่น พระเจ้าใหญ่เมืองคอนสวรรค์ (เมืองหมากกุด) หรือนครกาหลง จังหวัดชัยภูมิ จากคำสัมภาษณ์สอบถามคุณอนันต์ ต.สุวรรณ กรรมการเหรียญกมุคินิสังเคราะห์สงฆ์อีสาน ซึ่งมีอายุ 77 ปี เกิดที่บ้านโนนเพ็ก อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น เจ้าของสำนักพิมพ์ศรีอนันต์ กรุงเทพฯ กล่าวไว้ว่า ผู้เฒ่าผู้แก่เล่าต่อกันมาว่า หลวงพ่อใหญ่เมืองเพ็ญ หลวงพ่อใหญ่เมืองโพธิ์ไชย (เมืองชัยวาน) หลวงพ่อใหญ่เมืองคอนสวรรค์ (เมืองหมากกุด หรือ นครกาหลง) เป็นพระพุทธรูปศักดิ์สิทธิ์คู่บ้านคู่เมืองสามพี่น้องนี้มาแต่โบราณกาล ความเดิมชาวบ้านเรียกขานว่าหลวงพ่พระเจ้าใหญ่ ต่อมาเมื่อประมาณ พ.ศ.2495 จึงตั้งขนานนามท่านว่าพระเจ้ามงคลหลวง ความเป็นมาไม่ทราบแน่ชัดว่าสร้างตั้งแต่สมัยใด เพราะไม่มีการบันทึกจากคนรุ่นก่อนไว้จึงเป็นเพียงการสันนิษฐานเอาว่าสร้างในสมัยทวารวดี เพราะเมื่อปี พ.ศ. 2516 ได้มีการขุดค้นพบพระพุทธรูปหินแกะสลัก และวัตถุโบราณหลายอย่าง เช่น เศียรพระพุทธรูป เสมาหิน กระเบื้องดินเผา ถ้วยชามภาชนะใส่อาหาร และกระดูกมนุษย์โบราณ ซึ่งชาวบ้านเรียกว่ากระดูกคนแปดศอก สำหรับพระพุทธรูปที่ขุดได้นั้นเป็นยุคทวารวดี ปัจจุบันนำไปประดิษฐานไว้ที่วิหารในวัดมงคลหลวง ชาวบ้านขนานนามท่านว่าหลวงพ่่อถันหรือพระพุทธรูปทวารวดีศรีสุทธิพิตร ซึ่งถือว่าเป็นสมัยเดียวกันกับหลวงพ่พระเจ้าใหญ่

- เนินดินขนาดใหญ่ ตั้งเรียงรายตามทุ่งนา ซึ่งมีถนนออกจากหมู่บ้านหลายแห่งที่คาดว่า จะเชื่อมไปยังเนินดินขนาดใหญ่ ดูเหมือนว่าจะตั้งเป็นแนวเส้นทางเดินทัพโบราณ จาก นครราชสีมา ชัยภูมิ มัญจาคีรี ชนบท เมืองเพี้ย บ้านลาน หินตั้ง บรมมือ มหาสารคาม ตลอดแนวทุ่งกุลาร้องไห้ ของจังหวัดร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี (บางตำราบอกว่าเนิน ดินขนาดใหญ่อาจเป็นเนินดินที่ต้มเกลือสินเธาว์เพื่อส่งสาย)

2) **ความเป็นมาช่วงเริ่มบ้านเมืองเพี้ยขึ้นมาใหม่ในยุคกรุงรัตนโกสินทร์** จากคำบอกเล่า ตำนาน และเอกสารทางประวัติศาสตร์ พออนุมานได้ว่า ประมาณปี พ.ศ. 2332 คือ รัชสมัยพระบาท สมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกมหาราช เพี้ยเมืองแพน เดิมชื่อ พัน เป็นเชื้อสายกษัตริย์ลาว เป็นหลาน เจ้าแก้วมงคล หรือเจ้าแก้วบุญสม ซึ่งเป็นคนเดียวกันกับจรรย์แก้ว ได้พาผู้คนอพยพข้ามโขงมาอาศัยอยู่กับ เจ้าแก้วมงคล เจ้าเมืองสุวรรณภูมิ (พระขัติยะวงษา) โดยตั้งบ้านเรือนอยู่ที่บ้านชีโหล่น (ปัจจุบันคือ อำเภอสุวรรณภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด) ต่อมาเจ้าคุณแฉ่วน หรือ เจ้าจอมคำแฉ่วน พระสนมเอกใน พระบาทสมเด็จพระพุทธยอดฟ้าจุฬาโลกมหาราช ซึ่งเป็นธิดาองค์โต ของท้าวเพี้ยเมืองแพนทราบข่าวว่า เพี้ยเมืองแพนผู้เป็นบิดา อพยพผู้คนข้ามโขงมาพักอาศัย พระขัติยะวงษา เจ้าเมืองสุวรรณภูมิ ตั้ง บ้านเมืองอยู่ที่เขตชีโหล่น จึงได้กราบบังคมทูลพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ประกอบกับพราณจันทร์ และพราณไฮ้ได้ออกตามล่าสัตว์ เพื่อหาช้างและนอแรด เมื่อถึงโนนบ้านร้างดอนกระยอม พบทำเลเมือง โบราณเหมาะสมกับการสร้างบ้านแปงเมือง จึงนำความมาบอกคนบ้านใกล้เรือนเคียง ทราบถึงเพี้ยเมือง แพน จึงอพยพผู้คนจำนวน 330 คน จากบ้านชีโหล่นมาตั้งนานบ้านเรือนที่ดอนกระยอม หรือดอน พยอม แขวงเมืองชลบท (ปัจจุบันคือบริเวณบ้านเมืองเพี้ย ตำบลเมืองเพี้ย อำเภอบ้านไผ่ จังหวัด ขอนแก่น) พร้อมทั้งแจ้งความประสงค์ไปยังพระยานครราชสีมา ขอเป็นเจ้าเมืองแยกจากสุวรรณภูมิ ขึ้น ตรงต่อนครราชสีมา และรับอาสาส่งสายตามประเพณี พระยานครราชสีมาได้เดินทางไปยังกรุงเทพฯ เข้ากราบบังคมทูลพระเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 1) ให้ทรงทราบ แล้วทรงพระกรุณาโปรดเกล้าแต่งตั้งเพี้ย เมืองแพนเป็น “พระนครศรีบริรักษ์” เป็นเจ้าเมืองขอนแก่นในขณะที่อยู่บ้านดอนกระยอมเมืองเพี้ย ประมาณปี พ.ศ. 2332 เหตุที่ชื่อเมืองขอนแก่นนั้นเล่ากันว่าที่บ้านขามซึ่งเป็นเขตแขวงขึ้นแก่บ้านชี โหล่น มีต้นมะขามใหญ่ตายยืนต้นอยู่ กลับมีใบงอกงามขึ้นอีก ต่อมาได้มีผู้ก่อเจดีย์ครอบต้นมะขามไว้ และถือเป็นปูชนียสถานอันสำคัญ จึงถือเอานิมิตอันนั้นมาตั้งเป็นชื่อเมืองว่า “เมืองขามแก่น” ต่อมา เรียกเพี้ยนไปเป็น “ขอนแก่น” ต่อมาพระนครศรีบริรักษ์ได้อพยพผู้คนจากดอนกระยอม หรือดอน พยอม (บ้านเมืองเพี้ย) ไปสร้างเมืองใหม่ที่บ้านบึงบอน (บ้านบึงบอน คือ บ้านเมืองเก่าซึ่งตั้งแต่อยู่ที่ศ ตะวันตกของบึงบอน บึงบอนปัจจุบัน คือ บึงแก่นนคร) ซึ่งเป็นเมืองขอนแก่นและเป็นเจ้าเมืองขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2340

#### 1.4.4. ข้อสันนิษฐานและการกำหนดอายุเบื้องต้น

ข้อมูลจากนางสาวทิพย์วรรณ วงศ์สสไพบูลย์ (2564) ได้ระบุว่าจากหลักฐานทางโบราณคดีที่มีการสำรวจพบในพื้นที่เมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ และแหล่งโบราณคดีในพื้นที่ใกล้เคียงในรัศมี 5 กิโลเมตร สามารถสรุปพัฒนาการทางโบราณคดีออกได้เป็น 5 สมัย คือ

1) **สมัยก่อนประวัติศาสตร์ตอนปลาย** กำหนดอายุประมาณ 2,500 – 1,500 ปีมาแล้ว โดยหลักฐานในสมัยนี้ ได้แก่ ภาชนะดินเผาเนื้อดิน หลักฐานการถลุงเหล็ก เครื่องประดับสำริด และหลักฐานการฝังกระดูกมนุษย์

2) **สมัยทวารวดี** กำหนดอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 12 – 16 หรือประมาณ 1,400 – 1,000 ปีมาแล้ว หลักฐานในสมัยนี้ ได้แก่ ใบเสมาหินทราย ร่องรอยโบราณสถานก่ออิฐ ชิ้นส่วนปูนปั้น ประดับศาสนสถาน พระพุทธรูปศิลปะทวารวดี และรอยพระพุทธรูปบนแผ่นหินทราย

3) **สมัยลพบุรี** กำหนดอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 16 – 18 หรือประมาณ 1,000 – 800 ปีมาแล้ว อย่างไรก็ตามก็ตีหลักฐานในสมัยนี้พบในปริมาณน้อยและยังไม่ชัดเจนเท่าใดนัก กล่าวคือพบเพียงภาชนะดินเผาเนื้อแกร่ง (stoneware) ประเภทไหเคลือบสีน้ำตาลดำ และแท่นหินบดแบบเขมรเท่านั้น

4) **สมัยล้านช้าง** กำหนดอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 22 – 24 หรือประมาณ 400 – 200 ปีมาแล้ว พบหลักฐานที่สำคัญคือ หลวงพ่อพระเจ้าใหญ่ (พระพุทธรูปปางมารวิชัย) ภายในอุโบสถวัดมงคลหลวง ซึ่งเป็นศิลปะล้านช้าง ฝีมือช่างพื้นถิ่น และภาชนะดินเผาเนื้อแกร่งประเภทไห จากกลุ่มเตาลุ่มน้ำสงคราม

5) **สมัยรัตนโกสินทร์** โดยหลักฐานในสมัยนี้อ้างอิงจากประวัติการเข้ามาตั้งบ้านเรือนของราษฎรในสมัยหลังจนถึงปัจจุบัน และสอดคล้องกับหลักฐานการผลิตเกลือสินเธาว์ตามพื้นที่โนนโดยรอบแหล่งที่มีประวัติการต้มเกลือมาจนถึงเมื่อประมาณ 20 ปีก่อนที่ชาวบ้านจะเลิกผลิตไปในที่สุด

อย่างไรก็ดีแม้ว่าการผลิตเกลือสินเธาว์ในพื้นที่โดยรอบเมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญจะมีหลักฐานการผลิตมาจนถึงเมื่อประมาณ 20 ปีก่อน แต่จากลักษณะของเศษภาชนะดินเผาจำนวนมากที่พบทับถมอยู่ตามโนนดินต่าง ๆ ก็แสดงให้เห็นว่าการต้มเกลือในพื้นที่ตำบลเมืองเพ็ญ อาจเริ่มมีการผลิตมาตั้งแต่สมัยทวารวดี (หรืออาจเก่าไปถึงสมัยก่อนประวัติศาสตร์ตอนปลาย แต่เนื่องจากยังไม่เคยมีการขุดค้นทางโบราณคดีในพื้นที่โนนต่าง ๆ เหล่านี้ ปัจจุบันจึงยังไม่สามารถระบุพัฒนาการการผลิตเกลือได้อย่างชัดเจนนัก) เรื่อยมาจนถึงสมัยรัตนโกสินทร์ เนื่องจากสภาพภูมิศาสตร์และธรณีวิทยาในพื้นที่บริเวณนี้มีชั้นดินเกลืออยู่ตื้น สามารถนำคราบเกลือ (ดินซึกะทา) มาต้มได้ง่ายในช่วงฤดูแล้ง ทั้งนี้เกลือถือเป็นธาตุอาหารที่สำคัญมากต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ รวมไปถึงกิจกรรมการถนอมอาหาร ฟอกหนังสัตว์ ทำเครื่องนุ่งห่ม หรืองานโลหกรรม ที่ต้องใช้เกลือเป็นจำนวนมาก ประกอบกับปัจจัยด้านภูมิศาสตร์อื่น ๆ เช่น มีแหล่งน้ำตามธรรมชาติ มีพื้นที่เนินเหมาะแก่ตั้งชุมชน และมีพื้นที่ราบเหมาะแก่การทำเกษตร

ด้วยปัจจัยทางภูมิศาสตร์เหล่านี้ จึงส่งผลให้เมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญมีพัฒนาการทางวัฒนธรรมมาอย่างต่อเนื่องและยาวนาน

#### 1.4.5. ข้อมูลลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลทางธรณีวิทยาจากกรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ปี พุทธศักราช 2557 ได้ระบุว่า ลำดับชั้นหินของจังหวัดขอนแก่นพบทั้งหินตะกอนและหินอัคนี ส่วนตะกอนร่วนที่ยังไม่แข็งตัวจะพบอยู่บริเวณตะพักและที่ราบลุ่มแม่น้ำ และในบริเวณพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในบริเวณที่เป็นตะกอนยุคควอเทอร์นารี ที่เป็นตะกอนธารน้ำพา กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสะสมตัวตามร่องน้ำ คันดินแม่น้ำ และแอ่งน้ำท่วมถึง ซึ่งเป็นตะกอนร่วนขนาดละเอียดพวกทรายและดินสะสมตัวตามแนวลุ่มน้ำ เช่น แม่น้ำชี ลำน้ำพอง เป็นต้น ตะกอนน้ำพาอาจมีคราบเกลือสีขาวบนผิวดินซึ่งมีชาวบ้านนำมาต้มทำเกลือสินเธาว์ ในส่วนของสภาพภูมิประเทศของจังหวัดขอนแก่นโดยทั่วไปจะเป็นพื้นที่ราบสูง มีพื้นที่สูงต่ำสลับ เป็นลูกคลื่น อยู่สูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลางโดยเฉลี่ย 100-200 เมตร ลักษณะแผ่นดินแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

1) **ลักษณะแผ่นดินที่เป็นภูเขา** แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ภูเขายอดราบ พบบริเวณทิศเหนือถึงทิศตะวันตก มีจุดสูงสุดอยู่ที่ภูเวียงที่มีความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง 844 เมตร เป็นแนวเทือกเขาที่มีความสูงกว่าที่ลุ่มมากกว่า 300 เมตร ประกอบด้วยหินตะกอนของกลุ่มหินโคราช ชนิดหินทราย หินทรายแป้ง หินดินดาน และหินกรวดมน ที่สะสมตัวจากตะกอนทางน้ำบนบก และภูเขายอดตะปุ่มตะป่ำแบบคาสต์ที่ ส่วนใหญ่เป็นภูเขาหินปูน

2) **ลักษณะแผ่นดินที่เป็นเนินเขาและตะพัก (hill and high terrace landform)** เนินเขาและตะพักหรือที่ลาดลอนคลื่น เป็นบริเวณที่อยู่ถัดจากที่ราบลุ่มแม่น้ำออกไปทั้งสองด้านของแม่น้ำ หรือบริเวณที่อยู่ห่างจากแม่น้ำที่ไม่ได้เป็นภูเขา หรือเป็นพื้นที่ลอนลาดอยู่ระหว่างเทือกเขา ที่วางตัวในทิศทางเดียวกับแม่น้ำชีและแม่น้ำพอง มีความสูงกว่าที่ลุ่มมากกว่า 30 เมตร เป็นส่วนหนึ่งของเนินเขาดินเชิงเขา ตะกอนตะพัก ตะกอนกึ่งลมหอบ เห็นเป็นพื้นผิวสูง ๆ ต่ำ ๆ เช่น ตะพักสีแดงเข้มที่มหาวิทยาลัยขอนแก่น มักใช้เป็นที่ทำไร่ ปลูกอ้อย มันสำปะหลัง และยางพาราหรือเป็นป่าละเมาะหรือเป็นบ่อดินและลูกวัง

3) **ลักษณะแผ่นดินที่เป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ (alluvial plain landform)** เป็นที่ราบลุ่มริมแม่น้ำ และที่ลุ่มที่อยู่ห่างออกมาจากเนินเขา เป็นบริเวณปลูกข้าว สวนผัก เนื่องจากความลาดเอียงของพื้นที่ค่อนข้างน้อย และน้ำในแม่น้ำมีน้อยหรือไหลเอื่อย ๆ ในหน้าแล้ง ทำให้เห็นร่องรอยการเคลื่อนที่ของทางน้ำ มีการกัดแกว่ง เกิดเป็นรอยทางน้ำโค้งตัว (meander scar) ทะเลสาบรูปแอก (oxbow lake) แต่ช่วงฤดูฝนจะมีน้ำไหลท่วมหรือล้นฝั่งแม่น้ำ เกิดเป็นที่ลุ่มชื้นแฉะ (marsh) ที่ลุ่มน้ำขัง (swamp) บึงหรือหนองน้ำ และสันดอนทราย (sand bar หรือ point bar)

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวิธีดำเนินงานวิจัย

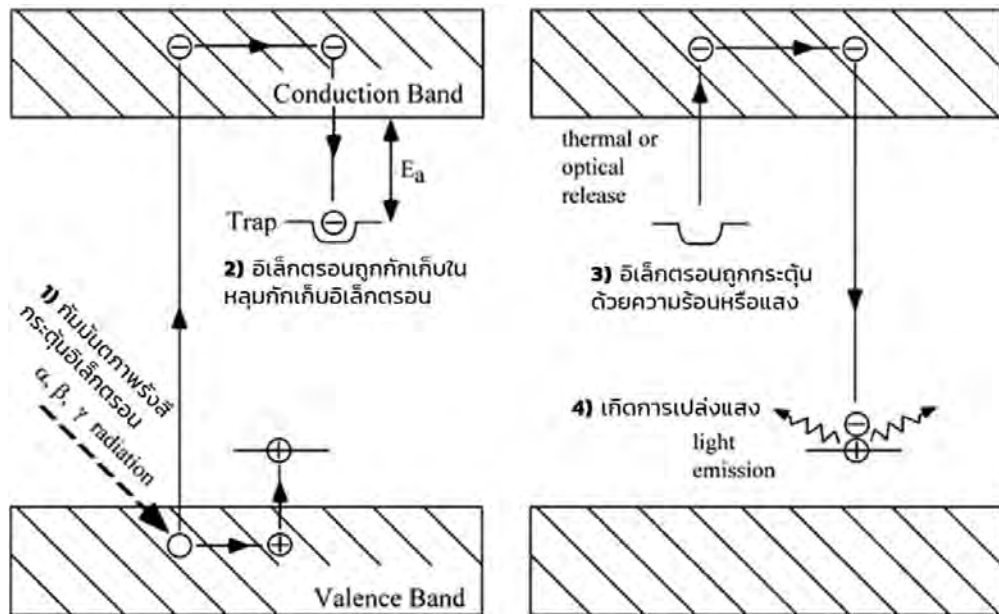
#### 2.1. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1. หลักการเปล่งแสงของแร่

แร่มีสถานะเป็นของแข็งซึ่งมีสมบัติการเปล่งแสงเป็นแบบโฟโตเรสเซนซ์ (phosphorescence) อธิบายได้ในรูปของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและการกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งในทางทฤษฎีผลึกของแร่ที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยโครงข่ายของประจุลบและประจุบวกที่ยึดเหนี่ยวอยู่ด้วยกันอย่างสมดุล แต่โดยส่วนใหญ่แล้วผลึกแร่ในธรรมชาติมักจะไม่สมบูรณ์ของผลึก ซึ่งเกิดจากความบกพร่องเนื่องจากหลายกรณี การมีประจุของธาตุมลทินมาแทนที่หรือการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของลาวา กลายเป็นหิน ซึ่งสาเหตุดังกล่าวจะทำให้ประจุลบหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีหรือประจุลบแทรกอยู่ระหว่างกลางโครงข่ายผลึก เป็นต้น ทำให้ไม่พบประจุลบบางตำแหน่งในโครงข่ายผลึกของแร่ ซึ่งในตำแหน่งดังกล่าวจะประพติดัวเป็นหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (electron trap) ซึ่งอยู่ในระดับพลังงานกระตุ้นกึ่งเสถียร (meta state) และเป็นจุดดึงดูดอิเล็กตรอนอื่น ๆ ที่กระจายตัวอยู่บริเวณรอบข้างให้เข้ามาฝังตัว หลังจากนั้นหากแร่ได้รับการกระตุ้นจากบริเวณรอบข้างหรือสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น พลังงานจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น ธาตุยูเรเนียม ทอเรียม และธาตุโปแตสเซียม อิเล็กตรอนก็จะถูกกระตุ้นและเข้าไปฝังอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน และเมื่อแร่ได้รับการกระตุ้นอีกครั้งไม่ว่าจะเป็นในรูปแบบของความร้อนหรือแสง อิเล็กตรอนที่อยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนจะสามารถหลุดออกมาจากหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนและเปล่งแสง

นอกจากการอธิบายหลักการการเปล่งแสงดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การเปล่งแสงของแร่ยังสามารถอธิบายด้วยทฤษฎีระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (รูป 2.1) ในผลึกแร่ที่มีโครงข่ายผลึกไม่สมบูรณ์ จะประกอบไปด้วยหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (electron trap) และศูนย์กลางการเปล่งแสง (luminescence centers) ซึ่งหลุมกักเก็บนี้จะมีระดับพลังงานอยู่ในระดับพลังงานพื้นฐาน (ground state หรือ valence band) เป็นชั้นที่มีความเสถียรสูง และระดับพลังงานกระตุ้น (excited state หรือ conduction band) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร จากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากตัวแปรต่าง ๆ เช่น การแผ่กัมมันตภาพรังสีจากธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นขึ้นไปในสถานะกระตุ้นและเกิดการกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ในหลุมกักเก็บ โดยที่ระดับความลึกของหลุมกักเก็บนั้นต้องมีพลังงานมากกว่าหรือลึกเพียงพอสำหรับการกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งจำนวนของอิเล็กตรอนในหลุมกักเก็บมีความสัมพันธ์กับอายุของตัวอย่าง ส่วนการเล็ดลอดของอิเล็กตรอนออกจากหลุมกักเก็บในช่วงเวลาการกักเก็บนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก จึงไม่นำมาพิจารณา และถ้าหากมีการการกระตุ้นด้วยพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นและหลุดออกจากหลุมกักเก็บ ซึ่งหลังจากอิเล็กตรอนถูกขับไล่

ออกมา จะเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่ (recombination) ที่บริเวณศูนย์กลางการเปล่งแสง (luminescence center) และมีการเปล่งแสงเกิดขึ้น



รูป 2.1. รูปจำลองแสดงระดับพลังงานในระหว่างกระบวนการต่าง ๆ ของการเปล่งแสง (Aitken, 1985)

ดังนั้นหากสามารถวัดจำนวนอิเล็กตรอนที่ฝังตัวอยู่ในหลุมกักเก็บและประเมินอัตราการแผ่รังสีต่อปีของสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บอยู่ในหลุมกักเก็บได้ ก็จะสามารถหาอายุของตัวอย่างหรือวัตถุชิ้น ๆ ได้ จากสมการความสัมพันธ์ของการหาอายุ (สมการ 2.1)

$$\text{อายุวัตถุ} = \text{Equivalent Dose/Annual Dose หรือ ED/AD}$$

สมการ (2.1)

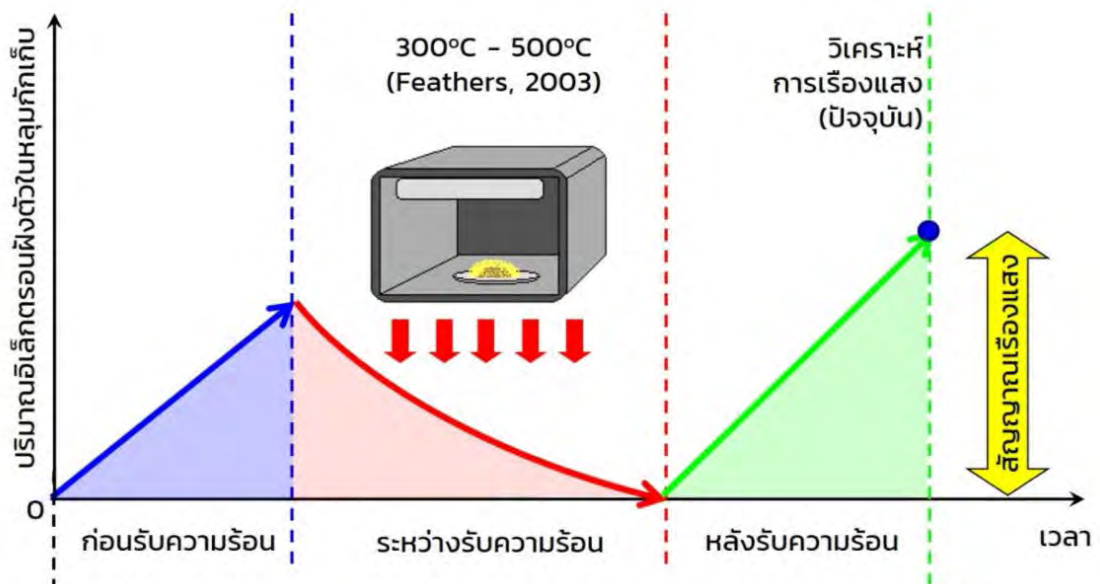
กำหนดให้

- Paleodose หรือ Equivalent Dose (PE หรือ ED) คือ ค่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน อันเนื่องมาจากการกระตุ้นจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีในบริเวณรอบข้าง มีหน่วยเป็น เกรย์ (Gy)
- Annual dose (AD) คือ อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้าง ซึ่งธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญ ได้แก่ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และ โพแทสเซียม (K) รวมทั้งรังสีคอสมิก (cosmic ray) จากชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีผลแค่เล็กน้อยเท่านั้น โดย AD มีหน่วยเป็น เกรย์ต่อปี (Gy/year)



ในตอนต้นแร้เดิมนั้นมีการสะสมอิเล็กตรอนอยู่ตลอดเวลาด้วยอัตราที่คงที่ ตามอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ซึ่งหากแร้ได้รับความร้อนประมาณ 300-500 องศาเซลเซียส เช่น หินที่ถูกแปรสภาพด้วยความร้อนและความดัน การที่ลาวากลายเป็นหินอัคนี ก้อนอิฐที่ถูกเผา หรือ ตะกอนที่ผ่านกระบวนการพัดพาและถูกอาบแดด แร้เดิมที่เคยมีอิเล็กตรอนสะสมตัวอยู่จะถูกขับออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนจนหมด หลังจากนั้นแร้จะมีการเริ่มสะสมตัวของอิเล็กตรอนใหม่อีกครั้ง จนถึงวันที่นำตัวอย่างมาตรวจวัดจำนวนอิเล็กตรอนด้วยการตรวจวัดการเปล่งแสง จำนวนอิเล็กตรอนที่ได้จึงเทียบเคียงได้กับจำนวนอิเล็กตรอนที่สะสมตัว ตั้งแต่แร้เดิมนั้นได้รับความร้อนครั้งสุดท้ายจนถึงวันที่นำตัวอย่างแร้หรือหินนั้นมาตรวจวัดการเปล่งแสง ดังแสดงในรูป 2.2

ดังนั้นเมื่อได้ค่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนและอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้างจากผลการทดลองแล้ว และนำไปใส่ตามสมการ จะทำให้ได้ผลลัพธ์ของค่าอายุในหน่วยปี ซึ่งเป็นอายุนับตั้งแต่แร้เดิมนั้นได้รับความร้อนครั้งสุดท้าย ในปัจจุบันวิธีที่นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นมาเพื่อตรวจวัดการเปล่งแสงและหาอายุของแร้หรือหินที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ 1) การกระตุ้นตัวอย่างแร้ด้วยความร้อนและตรวจวัดการเปล่งแสง เรียกว่า การหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermoluminescence, TL dating) และ 2) การกระตุ้นการเปล่งแสงด้วยแสงช่วงความถี่เฉพาะ เรียกว่า การหาอายุด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสง (Optically Stimulated Luminescence, OSL dating)



รูป 2.2. หลักการเปล่งแสงกับการหาอายุวัสดุที่เคยผ่านความร้อน (สันติ ภัยหลบลี้, 2563)

### 2.1.2. อัตราการแผ่รังสีจากสิ่งแวดล้อม

การกำหนดอายุทางธรณีวิทยาหรือโบราณคดีด้วยวิธีการเปล่งแสง ค่าตัวแปรที่เราจำเป็นต้องใช้ในการหาอายุประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ 1) ค่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนหรือค่า ED ในหน่วยเกรย์ (Gy) และ 2) อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้างหรือค่า AD ในหน่วยเกรย์ต่อปี (Gy/year) ในกรณีของการหาค่า AD ซึ่งเป็นอัตราการแผ่รังสีต่อปีนั้น เริ่มแรกจะต้องประเมินหาค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี (radioactive element) ที่ปะปนอยู่ในดินทั้งภายในและโดยรอบตัวอย่าง โดยธาตุกัมมันตรังสีที่มีนัยสำคัญต่อการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เข้าไปอยู่ในหลุมกักเก็บมีอยู่ 3 ธาตุหลัก ๆ คือ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และ โพแทสเซียม (K) ซึ่งธาตุทั้ง 3 ธาตุจะสลายตัวตามค่าครึ่งชีวิต (half life) ของแต่ละตัว จากนั้นธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจะกลายเป็นธาตุใหม่ พร้อมกับให้อนุภาคที่มีพลังงาน 3 ชนิด ได้แก่ 1) อนุภาคแอลฟา 2) อนุภาคเบตา และ 3) รังสีแกมมา ซึ่งทั้ง 3 อนุภาคนี้อาจจะเป็นตัวการสำคัญที่ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ดังนั้นอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในบริเวณรอบข้างจะมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับอนุภาคทั้ง 3 อนุภาค และความรุนแรงของอนุภาคทั้ง 3 ตัว จะมีความรุนแรงมากเท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี U Th และ K

โดยการจะตรวจวัดค่า AD นั้น หลังจากที่เก็บตัวอย่างและเตรียมตัวอย่างเสร็จสิ้นแล้วจะต้องทำการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ ที่มีอยู่ในดินรอบ ๆ วัตถุหรือตัวอย่างที่ต้องการหาอายุ ซึ่งสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น 1) วิธี Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (ICP-MS) 2) วิธี Neutron Activation Analysis (NAA) และ 3) วิธี Gamma Spectrometry (GS)

จากการตรวจวัดด้วยวิธีต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น จะทำให้ได้ค่าความเข้มข้นของธาตุ U และ Th ในหน่วย 1:1,000,000 หรือ part per million (ppm) ในกรณีของธาตุ K จะได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โพแทสเซียม (%K) ซึ่งจากค่าต่าง ๆ ที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีในหน่วยเกรย์ต่อปี (Gy/year) ซึ่งนิยมใช้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแต่ละธาตุกัมมันตรังสีและปริมาณการแผ่รังสีต่อปี นำเสนอโดย Bell (1979) ดังแสดงในตาราง 2.1

**ตาราง 2.1.** ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของแต่ละธาตุกัมมันตรังสีและปริมาณการแผ่รังสีต่อปี (Bell, 1979)

อนุภาค	ความเข้มข้น	แอลฟา	เบตา	แกมมา
Th	1 ppm <sup>232</sup> Th	0.738	0.0286	0.0514
U	1 ppm <sup>238</sup> U	2.783	0.1462	0.1148
K	1% K	-	0.8303	0.2492

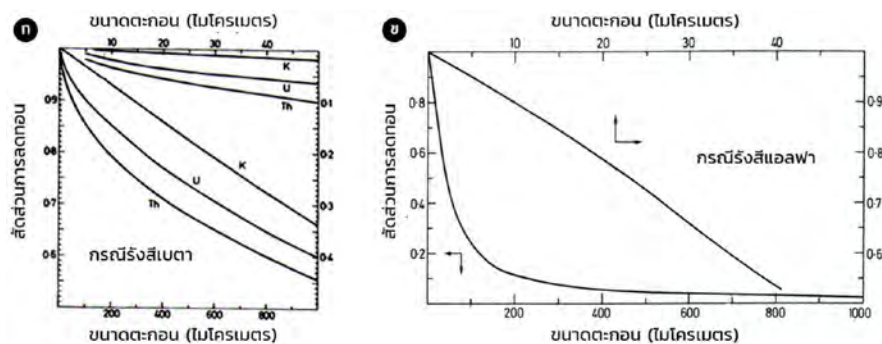
ซึ่งเมื่อนำผลความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในแต่ละธาตุ ไปคูณกับสัดส่วนอัตราการแผ่รังสีของแต่ละอนุภาค ผลที่ได้ของอัตราการแผ่รังสีหรือ AD ในหน่วย มิลลิเกรย์ต่อปี (mGy/year) แสดงดังต่อไปนี้

- Dแอลฟา =  $2.783U+0.783Th$
- Dเบตา =  $0.1462U+0.0286Th+0.8303K$
- Dแกมมา =  $0.1148U+0.0514Th+0.2492K$

### 2.1.3. ปัจจัยในการลดทอนของสัญญาณ

อย่างไรก็ตามค่า AD ที่ได้มาจากการคำนวณข้างต้นเป็นเพียงค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีในทางอุดมคติ หรือเป็นค่าที่ไม่ได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมที่ทำให้เกิดการลดทอนของอัตราการแผ่รังสี ยังมีสาเหตุที่ทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณ ซึ่งเราจะต้องนำมาพิจารณาในการประเมินค่า AD ได้แก่

1) การลดทอนสัญญาณเพราะขนาดตะกอนหรือผลึก อนุภาคต่าง ๆ ทั้งอนุภาคแอลฟา เบตาและแกมมา ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในการกระตุ้นอิเล็กตรอนนั้น โดยปกติแล้วจะมีคุณสมบัติการทะลุทะลวงและลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน ในกรณีดินที่อยู่ตามธรรมชาติ อนุภาคแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ถึง 30 เซนติเมตร อนุภาคเบตามีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ในระยะ 3 เซนติเมตร ในขณะที่อนุภาคแอลฟามีความสามารถในการทะลุทะลวงแค่ 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้นในการจะพิจารณาการลดทอนของสัญญาณจะมีการตั้งให้วัตถุหรือตัวอย่างที่ต้องการหาอายุเป็นจุดศูนย์กลาง และพิจารณาเฉพาะดินหรือสิ่งแวดล้อมที่ห่างจากตัวอย่างในรัศมี 30 เซนติเมตร ดังนั้นอนุภาคแกมมาจะมีประสิทธิภาพการทะลุทะลวงได้ 100% ในขณะที่อนุภาคเบตาและแอลฟาจะถูกลดทอนประสิทธิภาพในการเป็นตัวกระตุ้นอิเล็กตรอน ไปตามขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น ซึ่งสัมพันธ์กับการลดทอนของอนุภาคเบตา (พจน์ B) และแอลฟา (พจน์ K) ที่สัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอนแสดงไว้ดังรูป 2.3



รูป 2.3. สัมประสิทธิ์การลดทอนแสดง (ก) ความสามารถในการทะลุทะลวงของเบตา (พจน์ B) (ข) ความสามารถในการทะลุทะลวงของแอลฟา (พจน์ K) ที่สัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อม (Aitken, 1985)

ดังนั้นหากนำปัจจัยของการลดทอนอันเนื่องมาจากขนาดตะกอนหรือผลึกมาคำนวณร่วมด้วย ค่า AD จะแสดงได้ดังสมการ

- Dแอลฟา =  $K(2.783U+0.783 \text{ Th})$
- Dเบตา =  $B(0.1462U+0.0286\text{Th}+0.8303K)$
- Dแกมมา =  $(0.1148U+0.0514\text{Th}+0.2492K)$

**2) การลดทอนสัญญาณเพราะความชื้นที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อม** ปัจจัยการลดทอนประสิทธิภาพของอนุภาคต่าง ๆ ที่สำคัญอีกอย่างคือความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ ซึ่งในแต่ละอนุภาคก็มีประสิทธิภาพการลดทอนที่แตกต่างกัน ได้แก่ แอลฟา 50% เบตา 25% และแกมมา 14% นอกจากนี้ยังมีรังสีบางส่วนที่มาจากนอกโลกหรืออวกาศที่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเข้าไปฝังอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนได้เช่นกัน คือ รังสีคอสมิก (cosmic ray) โดยนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่ารังสีดังกล่าวสามารถทะลุลงชั้นดินลงไปได้ลึกประมาณ 15 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับผลกระทบจากธาตุกัมมันตรังสีต่าง ๆ ที่กล่าวมาในข้างต้น ผลกระทบจากรังสีคอสมิกถือว่าส่งผลน้อยมาก อย่างไรก็ตามหากต้องการให้การหาอายุด้วยวิธีเปล่งแสงแม่นยำมากขึ้น ในการคำนวณค่า AD ก็จะนำปัจจัยของรังสีคอสมิกมาพิจารณาด้วยเช่นกัน ดังนั้นโดยสรุปหากพิจารณา 1) อัตราการแผ่รังสีต่อปีของแต่ละธาตุกัมมันตรังสี 2) ปัจจัยการลดทอนจากขนาดตะกอนและผลึก 3) ความชื้นที่มีอยู่ในตัวอย่างและสิ่งแวดล้อม และ 4) ผลกระทบจากรังสีคอสมิกที่แผ่มาจากอวกาศ สมการอย่างง่ายของการคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปี หรือค่า AD ในหน่วย มิลลิเกรย์ต่อปี (mGy/year) แสดงดังนี้

- Dแอลฟา =  $K(2.783U+0.783 \text{ Th}) / (1+1.50W)$
- Dเบตา =  $B(0.1462U+0.0286\text{Th}+0.8303K) / (1+1.25W)$
- Dแกมมา =  $(0.1148U+0.0514\text{Th}+0.2492K) / (1+1.14W)$
- Dคอสมิก = อนุমানให้เป็นค่าประมาณคงที่เท่ากับ 0.15

กำหนดให้

- K และ B ขึ้นอยู่กับขนาดของเม็ดตะกอนหรือผลึกแร่ของตัวอย่างในส่วนที่จะนำมาพิจารณาค่า AD
- W คือ ปริมาณน้ำหรือความชื้นคิดเป็นร้อยละที่อยู่ในช่องว่างของตะกอน (น้ำหนักเปียก - น้ำหนักแห้ง / น้ำหนักแห้ง × 100)

จากปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้น ที่ทำให้อัตราการแผ่รังสีเกิดการลดทอน สามารถนำมาใช้กับสมการอย่างง่ายของ Aitken (1985) ในการคำนวณค่า AD หรืออัตราการแผ่รังสีต่อปี มีหน่วยเป็น มิลลิเกรย์ต่อปี (mGy/year) (สมการ 2.2)

$$AD = D\alpha + D\beta + DY + DC \quad \text{สมการ (2.2)}$$

โดย

AD คือ ค่า Annual Dose ทั้งหมด มีหน่วยเป็นมิลลิเกรย์ต่อปี (mGy/y)

$D\alpha$  คือ ค่า Annual Dose จากอนุภาคแอลฟา  
มีค่าเท่ากับ  $a(2.783U+0.738Th) / (1+1.50W)$

$D\beta$  คือ ค่า Annual Dose จากอนุภาคเบตา  
มีค่าเท่ากับ  $b(0.1462U+0.0286Th+0.8303K) / (1+1.25W)$

$DY$  คือ ค่า Annual Dose จากรังสีแกมมา  
มีค่าเท่ากับ  $(0.1148U+0.0514Th+0.2492K) / (1+1.14W)$

$DC$  คือ ค่า Annual Dose จากรังสีคอสมิก กำหนดให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 0.15

เมื่อ

K คือ ปริมาณ Radionuclide ชนิดต่าง ๆ ที่โพแทสเซียม (K) ปลดปล่อยออกมา

U คือ ปริมาณ Radionuclide ชนิดต่าง ๆ ที่ยูเรเนียม (U) ปลดปล่อยออกมา

Th คือ ปริมาณ Radionuclide ชนิดต่าง ๆ ที่ทอเรียม (Th) ปลดปล่อยออกมา

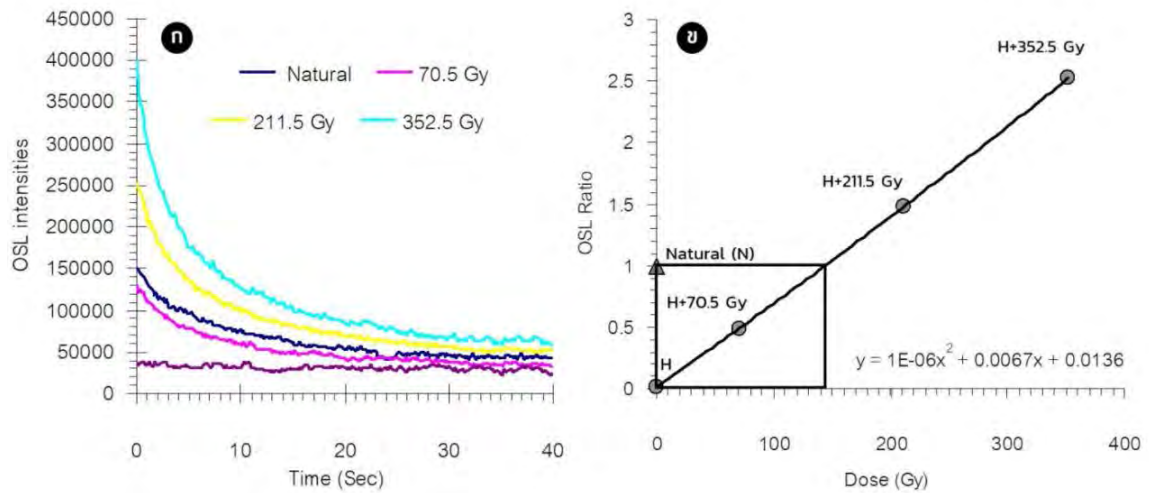
W คือ ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง

a และ b ขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดตะกอน

#### 2.1.4. หลักการเปล่งแสงจากวิธีการกระตุ้นด้วยแสง

OSL เป็นหนึ่งในวิธีการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้หาอายุทางธรณีวิทยาของตัวอย่างต่าง ๆ ซึ่งวิธีการจะคล้ายกับการหาอายุด้วยวิธี TL แต่เปลี่ยนจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเป็นการกระตุ้นตัวอย่างด้วยแสง โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (electron trap) ถูกกระตุ้นด้วยแสงและตกไปที่ศูนย์กลางการเปล่งแสง (luminescence center) ทำให้เกิดปรากฏการณ์การรวมตัวใหม่ (recombination) และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือการเปล่งแสง

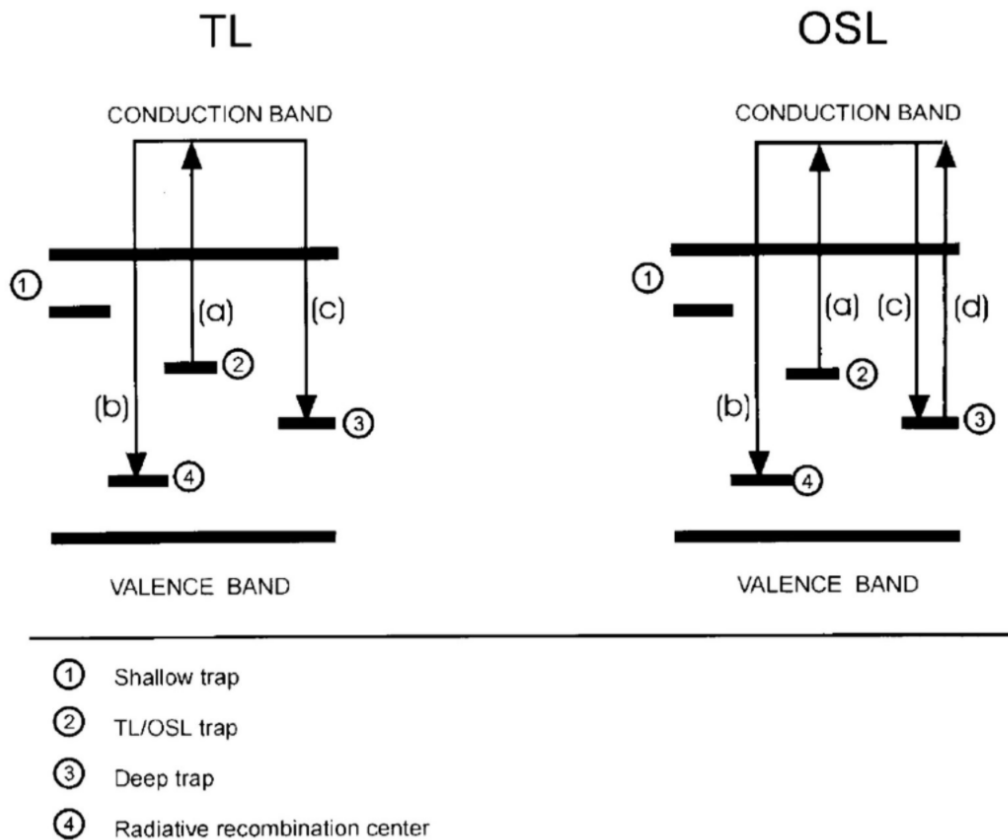
ซึ่งความเข้มข้นของการเปล่งแสงจะสัมพันธ์กับจำนวนอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในตัวอย่าง และสัญญาณการเปล่งแสงที่ตรวจวัดได้จะแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของปริมาณการเปล่งแสงหรือปริมาณโฟตอน (แกนตั้ง) ที่ลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาของการถูกแสงกระตุ้น (แกนนอน) จนถึงระดับที่สัญญาณการเปล่งแสงนั้นมีค่าต่ำสุด (ค่าภูมิหลัง) เรียกกราฟความสัมพันธ์นี้ว่า กราฟ OSL decay curve (รูป 2.4) ซึ่งแตกต่างจากกราฟ TL glow curve ที่เกิดจากการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างในแต่ละระดับอุณหภูมิ



รูป 2.4. (ซ้าย) OSL decay curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กตรอนในตัวอย่างในแกนตั้ง (หน่วย count/sec) ในแต่ละเวลาการอบแสงกระตุ้นซึ่งอยู่ในแกนนอน และ (ขวา) growth curve แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนอิเล็กตรอนที่ตรวจวัดได้จากการเปล่งแสงด้วยวิธี OSL (หน่วย count/sec) ที่มีในตัวอย่างและปริมาณกัมมันตภาพรังสีที่ทราบค่า (หน่วย Gy) (สันติ ภัยหลบลี้, 2563)

แม้ว่ากระบวนการการเปล่งแสงจากวิธีการกระตุ้นด้วยแสงและการเปล่งแสงจากวิธีการกระตุ้นด้วยความร้อนจะสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการเปล่งแสงของแรโดยทั่วไป แต่ที่มาของอิเล็กตรอนจากทั้งสองกระบวนการนั้นมีความแตกต่างกัน จึงส่งผลให้ในรายละเอียดของการตรวจวัดสัญญาณการเปล่งแสงและการหาอายุด้วยวิธีกระตุ้นด้วยแสงนั้นดีกว่าการหาอายุด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยความร้อน โดยมีรายละเอียดของความแตกต่างและข้อดีข้อด้อย ดังนี้

1) **ระดับพลังงานในการตรวจวัด OSL ครบถ้วนกว่า TL** จากรูปแสดงแบบจำลองการเปล่งแสง (รูป 2.5) ซึ่งประกอบด้วยหลุมกักเก็บ 3 ระดับพลังงาน คือ หลุมกักเก็บอิเล็กตรอนระดับ 1 ระดับ 2 และระดับ 3 และศูนย์กลางการเปล่งแสง (ระดับ 4) ระดับพลังงานที่ตื่นและไม่เสถียรคือระดับพลังงานที่ 1 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถเข้า-ออกได้ตลอดเวลา แม้ในสถานะอุณหภูมิหรือความดันในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติปกติ หรืออีกนัยหนึ่ง ระดับนี้คือ ระดับสัญญาณที่ 110 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจวัดด้วยวิธี TL ส่วนระดับพลังงานที่เสถียรหรือระดับพลังงานที่รับอิเล็กตรอนรับเข้าหลุมกักเก็บอย่างเดียวยตลอดเวลาในสภาวะปกติ คือระดับพลังงานที่ 2 และ 3 ซึ่งเหมาะสมกับการตรวจวัดสัญญาณทั้ง TL และ OSL



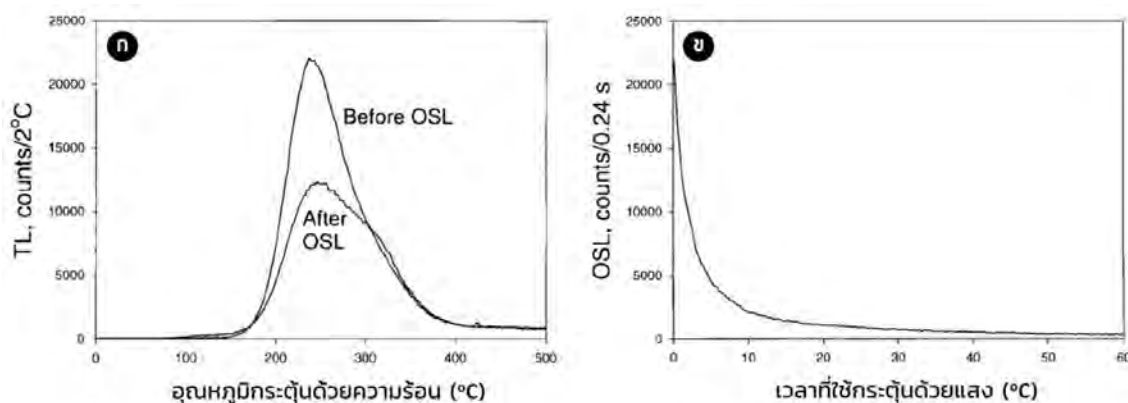
รูป 2.5. ปรากฏการณ์ทางพลังงานของการเปล่งแสงของผลึกแร่ที่อธิบายในเชิงการกระตุ้นด้วยเทคนิคต่าง ๆ (ก) TL และ (ข) OSL (สันติ ภัยหลบลี้, 2563)

ในการที่จะตรวจวัดสัญญาณการเปล่งแสงทั้งวิธี TL และ OSL นั้น ต้องการสัญญาณเฉพาะระดับพลังงานที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นสัญญาณที่เสถียรเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องให้ความร้อนเบื้องต้น (pre-heating) ที่เหมาะสมก่อนการตรวจวัดการเปล่งแสงเพื่อกำจัดสัญญาณที่ไม่เสถียรออกไป ในการกระตุ้นด้วยวิธี TL (ความร้อน) สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนได้เพียงในระดับ 1 และ 2 เท่านั้น ในขณะที่วิธี OSL (แสง) สามารถกระตุ้นได้ทั้ง 3 ระดับ จากการใช้แสงที่มีพลังงานสูงและความยาวคลื่นสั้นมากระตุ้น และในการกระตุ้นระหว่างการตรวจวัด อิเล็กตรอนต้องตกมาที่ศูนย์กลางการเปล่งแสง (ระดับ 4) หรือก็ต้องผ่านกระบวนการ b เท่านั้นถึงจะเกิดการเปล่งแสงขึ้น ซึ่งการกระตุ้นด้วยความร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับที่ 2 สามารถหลุดออกมา (กระบวนการ a) และไปตกที่ระดับ 4 หรือไปกักเก็บอยู่ในระดับที่ 3 ก็ได้ หากว่าอิเล็กตรอนไปตกอยู่ที่ระดับ 4 จะเกิดการเปล่งแสงขึ้น (กระบวนการ b) แต่ถ้าอิเล็กตรอนผ่านกระบวนการ c เพื่อไปกักเก็บในระดับ 3 ที่ลึกขึ้นได้ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ re-trapping จะไม่มีการให้สัญญาณการเปล่งแสง ดังนั้นในการกระตุ้นด้วยวิธี TL ปริมาณการเปล่งแสงอาจต่ำกว่าความเป็นจริงได้ เพราะมีการ re-trapping ของอิเล็กตรอนไปบางส่วน ในกรณีของวิธี OSL

(รูป 2.5 (ข)) ซึ่งสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนได้ที่ระดับ 2 และ 3 ทำให้ช่วยลดการเกิด re-trapping ของอิเล็กตรอนได้ ดังนั้นสัญญาณการเปล่งแสงจึงแปรผันโดยตรงกับปริมาณของอิเล็กตรอนในตัวอย่างนั้น ๆ ซึ่งเป็นข้อดีของวิธี OSL ที่ดีกว่าวิธี TL

2) สัญญาณ OSL ไม่ค่อยเพี้ยน ถ้าต้องวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง กับตัวอย่างเดิม การตรวจวัดด้วยวิธี OSL จะเป็นการตรวจวัดที่อุณหภูมิปกติ โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างหรือคุณสมบัติการเปล่งแสง ทำให้ความไวต่อสัญญาณการเปล่งแสง (luminescence sensitivity) ที่ตอบสนองต่อปริมาณรังสีที่อาบให้ตัวอย่างนั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นจึงสามารถนำกลับมาอาบรังสีและตรวจวัดซ้ำใหม่ได้หลายครั้ง แต่ในกรณีของการตรวจวัดด้วยวิธี TL ซึ่งให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสูงเพื่อตรวจวัดการเปล่งแสง ทำให้โครงสร้างผลึกของตัวอย่างมีโอกาสเปลี่ยนไปและส่งผลให้การตอบสนองของสัญญาณการเปล่งแสงต่อการอาบรังสีมีสัดส่วนไม่คงที่ตลอดการตรวจวัดซ้ำกับตัวอย่างเดิม

3) ด้วยตัวอย่างเดิม หาอายุ OSL เสร็จแล้ว ยังหาอายุ TL ซ้ำได้ คุณสมบัติที่น่าสนใจอีกข้อหนึ่งของความสัมพันธ์กันระหว่างสัญญาณ TL และสัญญาณ OSL คือการเปล่งแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนซึ่งหลุดออกมาจากหลุมกักเก็บโดยวิธี TL และ OSL นั้น ไม่ได้มีแหล่งกำเนิดมาจากหลุมกักเก็บเดียวกัน เพราะในบางกรณีของการตรวจวัดสัญญาณการเปล่งแสงด้วยวิธี OSL และลบสัญญาณ OSL ออกจนหมดแล้ว แต่กลับพบว่ามีผลกระทบในการลดสัญญาณ TL แค่มิเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงทำให้สามารถตรวจวัดสัญญาณด้วยวิธี TL หลังจากมีการตรวจวัดสัญญาณ OSL ในตัวอย่างตัวเดียวกันได้ โดยไม่เกิดผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ TL มากนัก (รูป 2.6) แต่จะไม่สามารถหาอายุด้วยวิธี OSL หลังจากทำการตรวจวัดโดยใช้วิธี TL ได้



รูป 2.6. (ก) แสดงกราฟสัญญาณ TL จากตัวอย่างตะกอนแร่เฟลด์สปาร์ก่อนและหลังถูกตรวจวัดด้วยวิธี OSL พบว่าสัญญาณ TL หลังการตรวจวัด OSL ลดลงบ้างบางส่วน (ข) แสดงกราฟสัญญาณ OSL ที่ได้จากการวัดกับตัวอย่างเดียวกัน (สันติ ภัยหลบลี, 2563)



**4) ไม่ยุ่งยากเรื่องการประเมินค่าคงเหลือ (Io)** ก่อนที่ตะกอนลมหอบหรือตะกอนที่ถูกพัดพามาตามน้ำจะมีการสะสมตัว เม็ดตะกอนจะได้รับแสงแดดเพียงพอที่จะลบล้างสัญญาณที่มีความว่องไวต่อแสง จนถึงระดับหนึ่งที่แสงไม่สามารถลบสัญญาณออกได้ ซึ่งในการหาอายุด้วยวิธี TL จะเรียกระดับอิเล็กตรอนที่หลงเหลือนี้ว่า ระดับคงเหลือ (residual, Io) ส่วนวิธี OSL จะวัดเฉพาะจำนวนอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในหลุมกักเก็บ นับตั้งแต่การสะสมตัวของตะกอนครั้งสุดท้ายจนถึงปัจจุบัน ซึ่งจะมีความแตกต่างจากวิธี TL ที่จะวัดอิเล็กตรอนที่หลงเหลืออยู่ก่อนที่จะมีการสะสมตัวครั้งสุดท้ายรวมกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในหลุมกักเก็บหลังจากการสะสมตัวครั้งสุดท้ายจนถึงปัจจุบัน ดังนั้นการหาอายุตะกอนด้วยวิธี OSL จึงมีความสะดวกมากกว่าวิธี TL เพราะไม่ต้องยุ่งยากนำตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งไปจำลองการหลงเหลือสัญญาณก่อนการสะสมตัวของตะกอน

**5) มีตัวอย่างน้อยก็หาอายุได้** จากการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง ทำให้ในปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตแหล่งกำเนิดแสงกระตุ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นักวิทยาศาสตร์จึงสามารถผลิตลำแสงที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกระตุ้น (แสงเลเซอร์) และสามารถกำหนดขอบเขตของการกระตุ้นในพื้นที่เล็ก ๆ ได้ (เส้นผ่านศูนย์กลาง < 100 ไมครอน) ดังนั้นในการวัดปริมาณรังสีด้วยวิธี OSL จึงสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกับการวัดตัวอย่างที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อย โดยใช้ลำแสงเล็ก ๆ กระตุ้นไปบนตำแหน่งที่ต้องการบนพื้นผิวของเม็ดตัวอย่างที่ต้องการวัด ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของลำแสงได้ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งปัจจุบันเทคนิคนี้นิยมใช้ในการกระตุ้นตะกอนขนาดทรายแค่เม็ดเดียวเท่านั้นเพื่อตรวจวัดสัญญาณ OSL ทำให้การหาอายุด้วยวิธี OSL สามารถทำได้ดีกว่าวิธี TL แม้ในกรณีที่มีตัวอย่างจำกัด

#### 2.1.5. ตัวอย่างที่เหมาะสมในการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสง

ในการที่จะคัดเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อนำไปหาอายุด้วยวิธีเปล่งแสง (ทั้ง TL และ OSL) อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องมีหลักฐานหรือข้อสมมุติฐานที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่เราจะนำมาหาอายุนั้น ได้รับความร้อนเพียงพอ (300-500 °C; Feathers, 2003) หรือตัวอย่างตะกอนดินที่ต้องการหาอายุการสะสมตัวครั้งล่าสุดนั้นจะต้องมีสภาพแวดล้อมการสะสมตัวของตะกอนที่บ่งบอกได้ว่ามีโอกาสได้รับแสงอาทิตย์ 6-8 ชั่วโมง (Aitken, 1985) ซึ่งเพียงพอที่จะลบล้างอิเล็กตรอนที่เคยอยู่ในหลุมกักเก็บหรือสัญญาณการเปล่งแสงออกไปจนหมด หรือออกไปจนมีระดับเท่ากับค่าคงเหลือ หรือค่า Io และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือตัวอย่างนั้นจะต้องมีองค์ประกอบของแร่ที่มีคุณสมบัติในการเปล่งแสง (Aitken, 1985) ซึ่งแร่ที่มีความเหมาะสมและนิยมใช้ในการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสง ได้แก่ แร่ควอตซ์ (quartz) และแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) (Feathers, 2003) จากคุณสมบัติของตัวอย่างที่เหมาะสมในการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสง ทำให้ Aitken (1990) ได้เสนอตารางแสดงประสิทธิภาพของวิธีการหาอายุในหลากหลายวิธีกับตัวอย่างชนิดต่าง ๆ (ตาราง 2.2) ดังนั้นแล้วการหาอายุด้วยวิธีเปล่งแสงจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการทดลองเพื่อการหาอายุอิฐได้ (ยกตัวอย่างเช่น Bailiff



### 2.1.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายงานของ Pailoplee et al. (2016) เรื่องการหาอายุอัฐด้วยวิธีเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อนและการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงจากโบราณสถานทุ่งตึก อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ได้ทำการศึกษาอัฐทั้งหมด 6 ก้อน โดยแบ่งการศึกษาเป็น 2 ส่วน คือ แยกระหว่างเนื้ออัฐส่วนนอกและเนื้ออัฐส่วนใน ซึ่งการหาอายุทั้งจากวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อนและการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงให้ค่าอายุที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 840-1,500 ปี โดยมีอัตราส่วนระหว่าง ED(OSL)/ED(TL) อยู่ในช่วง 0.8 ถึง 1.5 ซึ่งถือว่ามีความน่าเชื่อถือและยอมรับได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Gredmaier et al. (2011) กล่าวว่า สีที่แตกต่างกันของอัฐส่วนนอกและอัฐส่วนในเป็นผลมาจากความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของแร่ที่มีสูตรเคมีเหมือนกัน นอกจากนี้สีที่แตกต่างกันระหว่างอัฐส่วนนอกและอัฐส่วนในเป็นผลมาจากการได้รับความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ทั้งก่อนในขั้นตอนของกระบวนการเผาอัฐ และพบว่าเนื้ออัฐส่วนนอกให้ค่าอายุที่แม่นยำกว่า เนื่องจากได้รับความร้อนที่เพียงพอในขั้นตอนการเผา ส่วนเนื้ออัฐส่วนในให้ค่าอายุที่สูงกว่าปกติ และมีค่า ED ที่แปรปรวนกว่าเนื้ออัฐส่วนนอก และถ้าอัฐมีอายุน้อยเกินไปก็อาจจะบอกได้ว่าเป็นอัฐสมัยใหม่ที่ถูกนำมาบูรณะโบราณสถาน การหาอายุอัฐมีความสำคัญเนื่องจากสามารถบอกถึงอายุที่อัฐนั้นถูกสร้างขึ้นมา ซึ่งจะเป็นอายุเดียวกับอายุของโบราณสถานอีกด้วย

รายงานของธนีสรณ์ พุทธกาล (2560) เรื่องการหาอายุอัฐจากกำแพงเมืองสงขลา ด้วยวิธีเปล่งแสง โดยนำตัวอย่างอัฐจากกำแพงอัฐที่วางตัวอยู่บนกำแพงหิน และวางตัวแนบอยู่กับด้านบนของตัวเมือง ซึ่งจุดค้นพบที่บริเวณแนวกำแพงเมืองสงขลาทางด้านทิศตะวันตกของเมืองมาทำการศึกษา โดยผู้จัดทำโครงการได้ทำการเก็บตัวอย่างอัฐจากกำแพงเมืองสงขลาทั้งสิ้น 13 ตัวอย่าง โดยแบ่งตัวอย่างอัฐออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุด SK1 เป็นตัวอย่างอัฐที่วางตัวอยู่บนกำแพงหิน โดยอัฐมีลักษณะทางกายภาพภายนอกเป็นสีส้ม ผิวขรุขระ มีการเจาะรูเข้าไปในเนื้ออัฐ ส่วนตัวอย่างอัฐชุดที่ 2 คือ ชุด SK2 เป็นตัวอย่างอัฐที่วางตัวแนบผนังด้านในของกำแพงหิน โดยมีลักษณะทางกายภาพภายนอกเป็นสีน้ำตาลเหลือง ผิวเรียบ ไม่มีการเจาะรูเข้าไปในเนื้ออัฐ แต่จากตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่าง ผู้จัดทำโครงการได้ทำการเลือกเฉพาะตัวอย่าง SK1-1 และ SK2-1 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพภายในของเนื้ออัฐทั้ง 2 ตัวอย่างมีสีและเป็นเนื้อเดียวกันทั่วทั้งก้อน ซึ่งทำการเตรียมตัวอย่างโดยสกัดสกัดควอตซ์ให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปทดลองหาค่า ED และ AD ด้วยเครื่อง TL / OSL reader และ gamma-ray spectrometer ตามลำดับ ทั้งนี้ผู้จัดทำโครงการ ได้ทำการทดลองหาค่า ED จาก 2 แหล่ง ได้แก่ ห้องปฏิบัติการของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และห้องปฏิบัติการของภาควิชาธรณีศาสตร์มหาวิทยาลัยไฟร์บวร์กสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีแล้วนำผลการทดลองทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % พบว่าตัวอย่างอัฐ SK1-1 มีอายุ 120-141 ปี ก่อนปัจจุบันและตัวอย่างอัฐ SK2-1 มีอายุ 151-173 ปี ก่อนปัจจุบัน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าหลังจาก

การก่อสร้างกำแพงหินเพื่อวางรากฐานกำแพงเมืองสงขลาในปี พ.ศ. 2379 ถึงปี พ.ศ. 2385 เสร็จสิ้นได้มีการก่อสร้างกำแพงอิฐแนบกับแนวกำแพงหินทางด้านในของตัวเมืองเพิ่มเติมในช่วงประมาณปี พ.ศ. 2387 ถึงปี พ.ศ. 2409 และต่อมาได้มีการก่อสร้างกำแพงอิฐซึ่งวางทับอยู่บนกำแพงเมืองที่เป็นกำแพงหินเพิ่มเติมในช่วงประมาณปี พ.ศ. 2419 ถึงปี พ.ศ. 2440

รายงานของ Tudela et al. (2011) เรื่องการหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อน วิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง และวิธีคาร์บอน-14 ของตะกอนและอิฐ จากสุสานมัมมีแม่ซีในประเทศบราซิล โดยทำการศึกษาทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง ประกอบด้วยดินโคลนจากผนัง Taipa (MTR6) ตะกอนที่อยู่ใกล้กับมัมมีด้านหน้า (MTR8) ตะกอนที่อยู่ระหว่างมัมมีด้านหน้าและด้านใน (MTR9) ตะกอนที่อยู่ใกล้กับมัมมีด้านใน (MTR10) อิฐจากผนัง (MTR11) และดินโคลนจากผนังสุสาน (MTR12)

ทำการทดลองโดยสกัดควอตซ์ให้บริสุทธิ์ จากนั้นนำไปหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อน (TL) โดยให้ความร้อนในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อวินาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน และการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง (OSL) ดำเนินการกระตุ้นด้วยแสงสีน้ำเงิน ผลจากการหาอายุคือ ตัวอย่างจากดินโคลนจากผนัง Taipa มีอายุที่ได้จากวิธีการทำ OSL คือ 163 ปี และวิธีการทำ TL คือ 168 ปี และมีความสัมพันธ์กับการหาอายุจากคาร์บอน 14 ที่ได้ 131 ปี ค่าอายุจากตัวอย่างตะกอนที่อยู่ใกล้กับมัมมีด้านหน้า ตะกอนที่อยู่ใกล้กับมัมมีด้านใน และอิฐจากผนัง มีค่าอายุที่ได้จากวิธีการทำ TL คือ 233 ปี, 236 ปี และ 224 ปี ตามลำดับ ส่วนจากวิธีการทำ OSL คือ 210 ปี, 224 ปี และ 204 ปี ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าอายุที่ได้จากการหาด้วยวิธีคาร์บอน 14 คือ 231 ปี ซึ่งตรงกับช่วงศตวรรษที่ 18 ส่วนตัวอย่างจากตะกอนที่อยู่ระหว่างมัมมีด้านหน้าและด้านใน และตัวอย่างดินโคลนจากผนังสุสาน ได้ค่าอายุที่เกินเกินไป คาดว่าเกิดจากการที่สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ถูกลบล้างออกไปไม่หมด

ผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่ามัมมีทั้งสองถูกฝังในเวลาที่แตกต่างกัน โดยตะกอนจากมัมมีที่อยู่ด้านในมีอายุมากกว่าตะกอนจากมัมมีที่อยู่หน้า นอกจากนี้ค่าอายุที่ได้จากวิธีการทำ TL และ OSL มีค่าไม่แตกต่างกัน และมีค่าใกล้เคียงกับวิธีคาร์บอน 14

รายงานของ Panzeri et al. (2018) ได้ทำการหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงทั้ง 2 วิธี คือวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อนและวิธีเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง โดยทำการศึกษาดูตัวอย่างชิ้นส่วนอิฐและปูนบางส่วน จากมหาวิหารและหอคอย Ghirlandina ที่เมืองโมเดนาอยู่ทางตอนเหนือของประเทศอิตาลี ซึ่งเป็นแหล่งมรดกโลก จากการศึกษาพบว่า การหาอายุด้วยวิธีการเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยความร้อน อิฐส่วนใหญ่มีอายุเก่าแก่กว่าการสร้างมหาวิหารมากซึ่งอยู่ในยุคโรมัน ข้อมูลเหล่านี้สอดคล้องกับการศึกษาขนาดของอิฐและแผ่นหินประดับซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยแผ่นหินที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Lugli et al., 2009) มีเพียง 2 ตัวอย่างเท่านั้นที่มีอายุอยู่ในช่วงหลังยุคโรมัน ซึ่ง

เกิดจากการมีการผลิตอิฐใหม่เพื่อสร้างหอคอยให้เสร็จสมบูรณ์ และพื้นที่ได้รับการปรับเปลี่ยนเพื่อให้เข้ากับบริบททางศิลปะใหม่ ๆ ในขณะนั้น ในขณะที่การหาอายุด้วยวิธีเปล่งแสงจากการกระตุ้นด้วยแสงให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับช่วงของการก่อสร้างมหาวิหาร แต่ตัวอย่างที่มีอายุสอดคล้องมีเพียง 3 ตัวอย่างจากหอคอย Ghirlandina และ 1 ตัวอย่างจากมหาวิหาร ส่วนตัวอย่างอื่น ๆ ให้ผลอายุที่มากกว่าที่คาดการณ์ไว้เป็นผลเนื่องมาจากการฟอกสีควอตซ์ที่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์

## 2.2. วิธีการดำเนินงาน

### 2.2.1. การเก็บตัวอย่างอิฐ

เมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญเป็นเมืองที่พบหลักฐานทางโบราณคดีมากมาย (รูป 2.7) และยังเป็นแหล่งโบราณคดีที่สำคัญ เนื่องจากพบหลักฐานที่บ่งบอกว่าเมืองแห่งนี้เคยเป็นแหล่งผลิตเกลือสินเธาว์ขนาดใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยในสมัยโบราณ นอกจากนี้ยังพบร่องรอยคูน้ำคันดินชัดเจน โบราณวัตถุและมีแหล่งโบราณคดีอื่น ๆ อยู่บริเวณใกล้เคียง ทำให้ผู้จัดทำมีความสนใจที่จะศึกษาพื้นที่บริเวณนี้ ดังนั้นผู้ทำโครงการจึงได้ทำการติดต่อประสานงานและส่งเอกสารราชการไปยังนางสาวทิพย์วรรณ วงศ์อัสสไพบุลย์ นักโบราณคดีชำนาญการ สำนักศิลปากรที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร เพื่อขออนุญาตเข้าถึงพื้นที่ศึกษาและทำการเก็บตัวอย่างอิฐทั้งสิ้นจาก 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณโบราณสถานในที่ดินนายชุตติเดช สูงเพ็ญ และบริเวณโบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว

ซึ่งจากบริเวณโบราณสถานในที่ดินนายชุตติเดช สูงเพ็ญ (รูป 2.8) ผู้จัดทำโครงการได้ทำการเลือกก้อนอิฐมา 2 ก้อน เพื่อทำการศึกษาและพบว่ามีลักษณะทางกายภาพภายนอกสีส้ม ผิวค่อนข้างขรุขระ (ตาราง 2.3) และเนื้อของอิฐบริเวณนี้จะมีความแข็งแรงกว่าอิฐจากบริเวณโบราณสถานในอีกพื้นที่ศึกษา และในอีกบริเวณที่ผู้จัดทำโครงการได้เก็บตัวอย่างอิฐมาศึกษาคือบริเวณโบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว (รูป 2.9) ซึ่งแนวอิฐของโบราณสถานถูกขุดค้นพบจากการดำเนินงานวางท่อขนส่งน้ำมัน ปัจจุบันเจ้าของที่ดินได้เก็บรักษาชิ้นส่วนของอิฐเอาไว้บางส่วนดังนั้นผู้จัดทำโครงการจึงดำเนินการติดต่อกับเจ้าของที่ดินเพื่อนำตัวอย่างอิฐ 2 ก้อนจากบริเวณนี้กลับมาทำการศึกษา โดยตัวอย่างอิฐถูกขุดนำขึ้นมาวางไว้ในที่ดินแห่งนี้มาเป็นเวลานาน ทำให้ก้อนอิฐมีลักษณะที่ผุพังบ้าง และก้อนอิฐในบริเวณนี้มีลักษณะทางกายภาพภายนอกสีส้มปนดำ ผิวค่อนข้างขรุขระ (ตาราง 2.4)



รูป 2.7. ภาพถ่ายทางอากาศแสดงการกระจายตัวของบริเวณที่พบหลักฐานทางโบราณคดีภายในเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย (ทิพย์วรรณ วงศ์อัสสไพบูลย์, 2564)





รูป 2.8. โบราณสถานในที่ดินนายชติเดช สูงเพี้ย







รูป 2.9. โบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว

ตาราง 2.3. แสดงข้อมูลและภาพตัวอย่างของตัวอย่างอิฐในโบราณสถานในที่ดินนายชุตีเดช สูงเพี้ย

ตัวอย่าง	ตำแหน่งที่เก็บ ตัวอย่าง	ขนาด (เซนติเมตร)			ภาพตัวอย่าง
		กว้าง	ยาว	หนา	
PH01	โบราณสถานในที่ดิน นายชุตีเดช สูงเพี้ย	15	34	8.5	
PH02	โบราณสถานในที่ดิน นายชุตีเดช สูงเพี้ย	17	24	7	

ตาราง 2.4. แสดงข้อมูลและภาพตัวอย่างของตัวอย่างอิฐในโบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว

ตัวอย่าง	ตำแหน่งที่เก็บ ตัวอย่าง	ขนาด (เซนติเมตร)			ภาพตัวอย่าง
		กว้าง	ยาว	หนา	
PHG01	โบราณสถานในที่ดิน นายธรรมะ เทศแก้ว	17	16	7.5	
PHG02	โบราณสถานในที่ดิน นายธรรมะ เทศแก้ว	17	17	7.5	

### 2.2.2. การเตรียมตัวอย่างการทดลอง









จากการเก็บตัวอย่างอิฐมาทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง ผู้จัดทำโครงการได้ทำนำอิฐทั้งหมดมาทำการตัดทดสอบด้วยเครื่องตัดหินเจียร์ โดยตัดให้ตัวอย่างที่ถูกตัดออกมีความหนาประมาณ 5 เซนติเมตร เพื่อสังเกตลักษณะทางกายภาพภายใน (สี) ที่แตกต่างกันของอิฐแต่ละก้อน

พบว่าตัวอย่างอิฐ PH01 และ PH02 มีลักษณะทางกายภาพ (สี) ของภายในและภายนอกก้อนอิฐแตกต่างกัน โดยก้อนอิฐเป็นสีดำบริเวณตรงกลางและมีสีส้มในบริเวณผิวด้านนอกของอิฐ ส่วนตัวอย่างอิฐ PHG01 และ PHG02 มีลักษณะทางกายภาพภายใน (สี) เป็นสีส้มเนื้อเดียวกันทั่วทั้งก้อน (ตาราง 2.5) จากงานวิจัยของ Pailoplee et al. (2016) ได้ระบุว่าความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพภายใน (สี) ของอิฐนั้นเป็นผลมาจากสภาวะแวดล้อมของการเผาอิฐที่ต่างกันอันส่งผลให้อิฐแต่ละก้อนได้รับความร้อนและสุกถึงเนื้ออิฐด้านในแตกต่างกันซึ่งลักษณะทางกายภาพ (สี) ของเนื้ออิฐด้านในและเนื้ออิฐด้านนอกที่ต่างกันนี้จะส่งผลต่อการทดลองหาค่า ED โดยที่ค่าอายุที่ได้จากเนื้ออิฐด้านในซึ่งมีสีดำมีค่าความแปรปรวนที่มากกว่าและค่าอายุที่ได้มีค่าสูงผิดปกติ ดังนั้นผู้ทำโครงการจึงวางแผนการทดลองเพื่อให้สามารถประเมินค่าอายุจากก้อนอิฐได้ครอบคลุมที่สุด โดยใช้ตัวอย่างทั้ง 4 ก้อนแต่ทำการแยกตัวอย่างระหว่างเนื้อด้านนอกและด้านในก้อนอิฐในการศึกษา โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 5 ตัวอย่าง ได้แก่ บริเวณขอบนอกของก้อนอิฐก้อนที่ 1 จากพื้นที่ศึกษาที่ 1 (PH01-out) บริเวณเนื้อด้านในของก้อนอิฐก้อนที่ 1 จากพื้นที่ศึกษาที่ 1 (PH01-in) บริเวณขอบนอกของก้อนอิฐก้อนที่ 2 จากพื้นที่ศึกษาที่ 1 (PH02-out) บริเวณทั่วทั้งก้อนอิฐของก้อนที่ 1 จากพื้นที่ศึกษาที่ 2 (PHG01-all) บริเวณขอบนอกของก้อนอิฐก้อนที่ 2 จากพื้นที่ศึกษาที่ 2 (PHG02-out)



หลังจากทำการแยกเนื้อด้านในและด้านนอกของก้อนอิฐแล้ว ก็นำตัวอย่างอิฐมาขัดทำความสะอาดผิวและกำจัดตัวเชื่อมประสานจากการก่อกำแพงออก แล้วนำไปทำการทดลองต่อไป

ตาราง 2.5. แสดงลักษณะกายภาพภายใน (สี) ของตัวอย่างที่จะนำไปทำการศึกษา

ตัวอย่าง	ภาพตัวอย่าง	
	ตัวอย่างก่อนการตัดทดสอบ	ตัวอย่างหลังการตัดทดสอบ
PH01		
PH02		
PHG01		
PHG02		

### 2.2.3. การหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water content)

ทำการตัดแบ่งตัวอย่างอิฐทั้ง 4 ตัวอย่างประมาณตัวอย่างละ 400 กรัม นำมาทุบด้วยค้อนและลิ้มเพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างเปียกโดยใช้ตัวอย่างอิฐประมาณ 20-50 กรัม ก่อนที่จะนำตัวอย่างไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้น้ำในตัวอย่างระเหยไปจนหมด (รูป 2.10) และทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้งเพื่อทราบค่าน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำค่าน้ำหนักตัวอย่างเปียกและค่าน้ำหนักตัวอย่างแห้งมาแทนสูตรคำนวณตามสมการ 2.3 เพื่อหาปริมาณร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (W) ซึ่งจะใช้ประกอบในการหาค่า AD ในขั้นตอนต่อไป

$$\text{ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างเปียก} - \text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}) \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

สมการ 2.3



รูป 2.10. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง

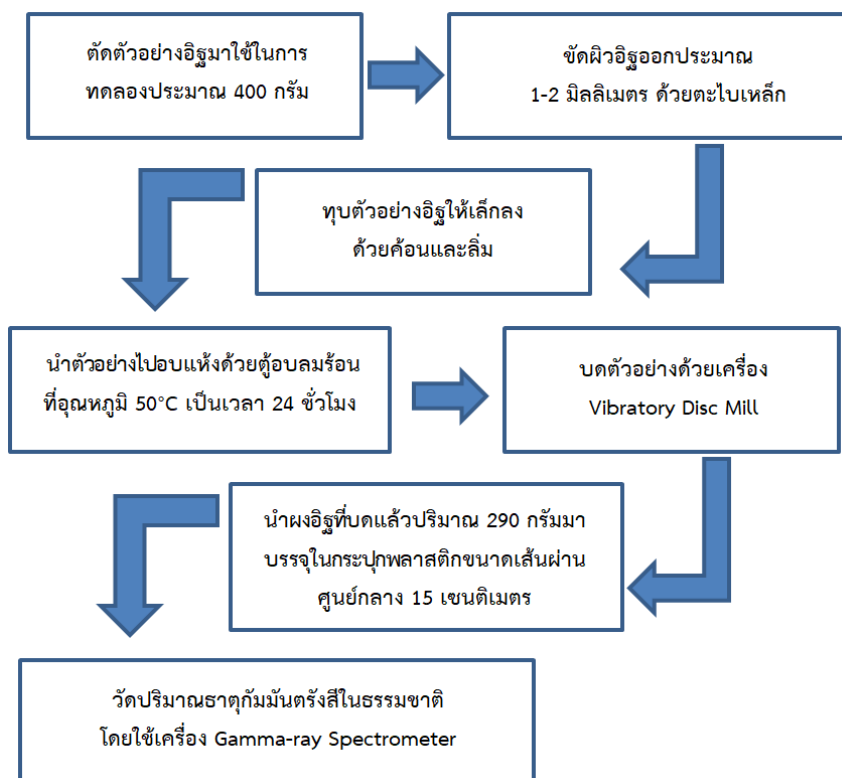
### 2.2.4. การหาอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose)

การหาอัตราการแผ่รังสีต่อปีหรือค่า AD (รูป 2.12) จะเริ่มจากการนำตัวอย่างที่เหลือจากการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (การทดลองที่ 2.2.3) มาบดด้วยเครื่อง vibratory disc mill ให้ละเอียด ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 290 กรัมและนำมาบรรจุในกระปุกพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร (รูป 2.11) นำกระปุกตัวอย่างไปทำการทดลองเพื่อวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่

มีอยู่ในตัวอย่าง ได้แก่ Th U และ K โดยใช้เครื่อง gamma-ray spectrometer ที่คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี  
ดังกล่าวจากกราฟที่ได้จากการทดลอง และนำค่าความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์มาประกอบกับค่า  
ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่างจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เพื่อทำการคำนวณค่า AD



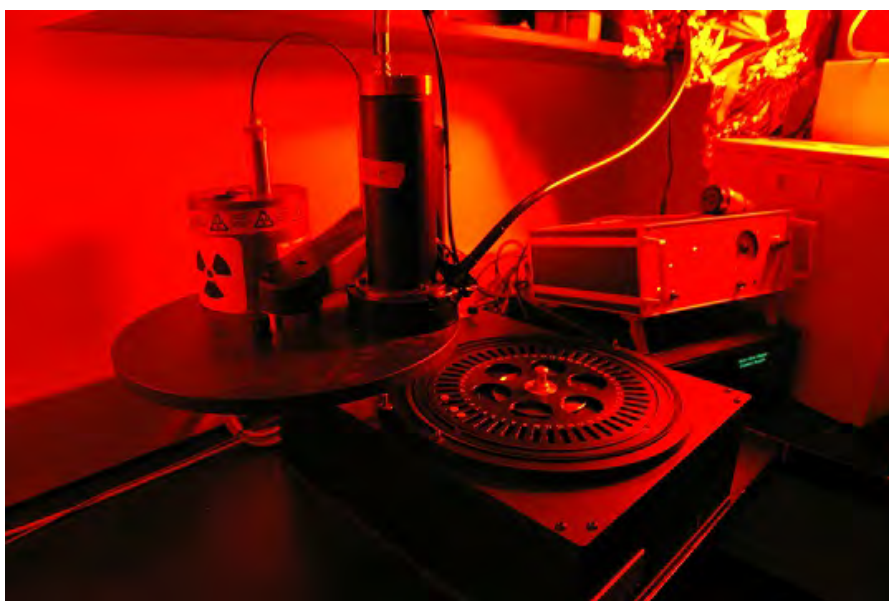
รูป 2.11. ตัวอย่างที่จะนำไปหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose)



รูป 2.12. แผนภาพการทดลองการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปี

### 2.2.5. การหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่าง (Equivalence dose)

Equivalence dose (ED) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวอยู่ในตัวอย่าง (รูป 2.14) โดยวิเคราะห์ผลจากเม็ดแร่ควอตซ์ (quartz grains) ซึ่งทำการทดลองทุกขั้นตอนในห้องมืด (red subdue room) (รูป 2.13) ซึ่งใช้แสงสีแดงซึ่งเป็นแสงที่มีพลังงานต่ำ โดยนำชิ้นส่วนอิฐมาทำการขัดผิวอิฐออกประมาณ 1-2 มิลลิเมตร (Feathers, 2003) และทพด้วยลิมและค้อนให้มีขนาดเล็กลงแล้วนำไปบดมือด้วยครกเหล็กให้ละเอียด จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดระหว่าง 74-250 ไมโครเมตร (ตัวอย่างที่ใช้จะร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 60 และค้ำอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200) นำตัวอย่างไปใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 10% และสารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ความเข้มข้น 10% ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างตัวอย่าง 3-5 ครั้งด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปใส่ด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่ความเข้มข้น 37% เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นล้างตัวอย่าง 3-5 ครั้งด้วยน้ำกลั่นและใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) อีกครั้งที่ความเข้มข้น 37% เป็นเวลา 40 นาที ทำการล้างกรดออกจากตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้งและนำตัวอย่างไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างแห้งที่ได้ไปผ่านเครื่อง magnetic separator โดยตั้งให้มีค่าการสั่นสูงสุดและใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกแร่โลหะ 1.8 A จนได้แร่ควอตซ์บริสุทธิ์ จากนั้นนำแร่ควอตซ์ที่ได้ไปทำการทดลองหาปริมาณ ED และหาสัญญาณเปรียบเทียบกับผลการอาบรังสีที่ทราบค่าด้วยเครื่อง TL/OSL reader เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่างในหน่วย เกรย์ (Gy)



รูป 2.13. ภาพตัวอย่างของห้องมืดที่ใช้ในการทำการทดลอง (ที่มา : <https://www.wgtn.ac.nz>)





### บทที่ 3

#### ผลการทดลอง

#### 3.1. ผลการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water Content)

ผลการทดลองจากตาราง 3.1 พบว่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่างของตัวอย่างอิฐ PHG01 และ PHG02 ซึ่งเป็นบริเวณโบราณสถานในที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว มีค่ามากกว่าตัวอย่างอิฐ PH01 และ PH02 ซึ่งเป็นบริเวณโบราณสถานในที่ดินนายชุตติเดช สูงเพียง เนื่องจากบริเวณที่ตั้งของตัวอย่างอิฐ PHG01 และ PHG02 อยู่ใกล้บริเวณสระบัวใหญ่ซึ่งเป็นสระขนาดใหญ่ และตัวอย่างอิฐได้ถูกขุดขึ้นมาจากบริเวณที่อยู่ลึกจากผิวดินประมาณ 1-2 เมตร ดังนั้นในตอนที่ยังไม่ถูกขุดขึ้นมาตัวอย่างอิฐนี้อาจจะถูกล้อมรอบไปด้วยตะกอนที่สามารถกักเก็บน้ำได้ดี ส่วนตัวอย่างอิฐ PH01 และ PH02 นั้นถูกขุดขึ้นมาวางไว้บนผิวดินเป็นเวลานานกว่า และยังอยู่ใกล้แหล่งน้ำที่เป็นเพียงบึง จึงทำให้ได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์และน้ำมีการระเหยออกไปมากกว่า ดังนั้นร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่างจึงมีปริมาณน้อยกว่า

ตาราง 3.1. แสดงผลการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำหรือ water content (W) ในตัวอย่าง

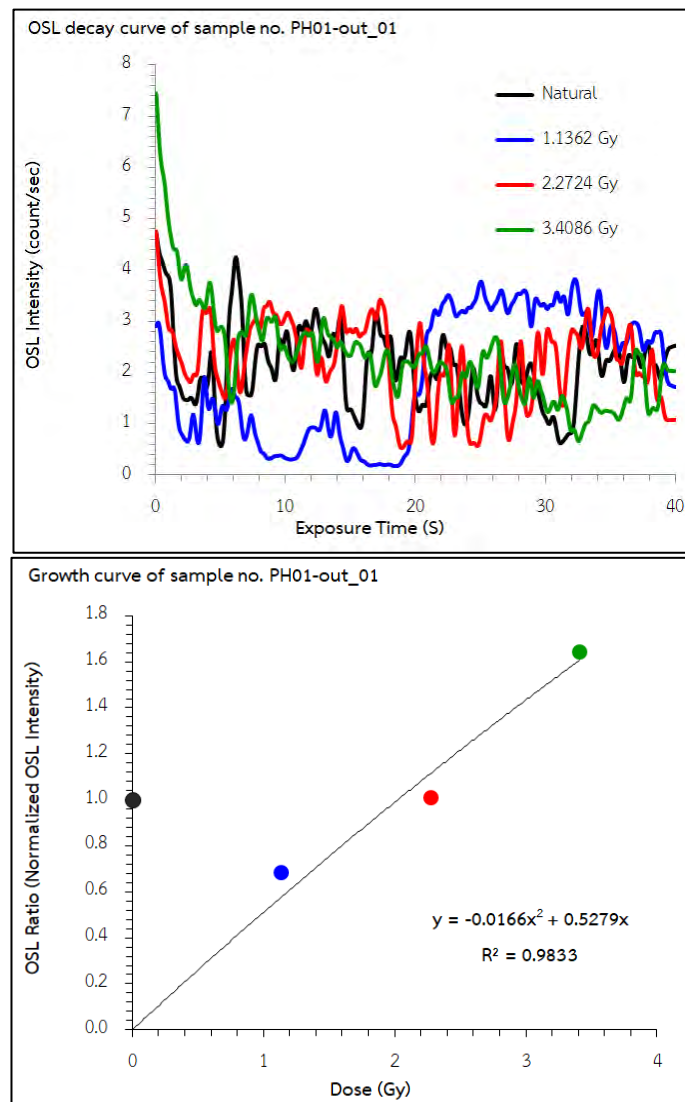
	ตัวอย่าง			
	PH01	PH02	PHG01	PHG02
น้ำหนักภาชนะ (กรัม)	50.01	47.73	47.90	45.16
น้ำหนักภาชนะ + น้ำหนักตัวอย่างเปียก (กรัม)	74.04	80.06	80.75	75.78
น้ำหนักภาชนะ + น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)	72.23	79.44	79.84	72.84
น้ำหนักตัวอย่างเปียก (กรัม)	24.03	32.33	32.85	30.62
น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)	22.22	31.71	31.94	27.68
ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง	8.14	1.96	2.85	10.62

#### 3.2. ผลการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่าง (Equivalent Dose)

จากการที่มีการแยกตัวอย่างระหว่างเนื้อด้านนอกและด้านในก้อนอิฐในการศึกษา ดังนั้นในการทดลองนำตัวอย่างแร่ควอตซ์มาหาค่า ED จะมีตัวอย่างในการทดลองทั้งสิ้น 5 ตัวอย่างจากก้อนอิฐที่ทำการคัดเลือกมา 4 ก้อน ได้แก่ PH01-out PH01-in PH02-out PHG01-all และ PHG02-out โดยนำตัวอย่างเข้าเครื่อง TL/OSL reader ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

### 3.2.1. ผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out (บริเวณเหนือขอบนอกสี่ลัม)

จากการนำตัวอย่างอิฐ PH01-out ไปหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟ OSL decay curve (รูป 3.1 บน) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้แสง (แกนนอน) ในหน่วย sec และปริมาณการเรืองแสง (แกนตั้ง) ในหน่วย count/sec พบว่ากราฟมีความผันผวนอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามยังเห็นแนวโน้มของความเป็น OSL decay curve ดังนั้นจึงนำสัญญาณการเปล่งแสงในเวลา 0-16 วินาทีของตัวอย่าง natural และตัวอย่างที่อาบรังสีที่ทราบค่า มาสร้างกราฟ growth curve (รูป 3.1 ล่าง) โดยกราฟแสดงแนวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟ growth curve ไปคำนวณหาค่า ED ซึ่งได้ค่า ED ดังตาราง 3.2

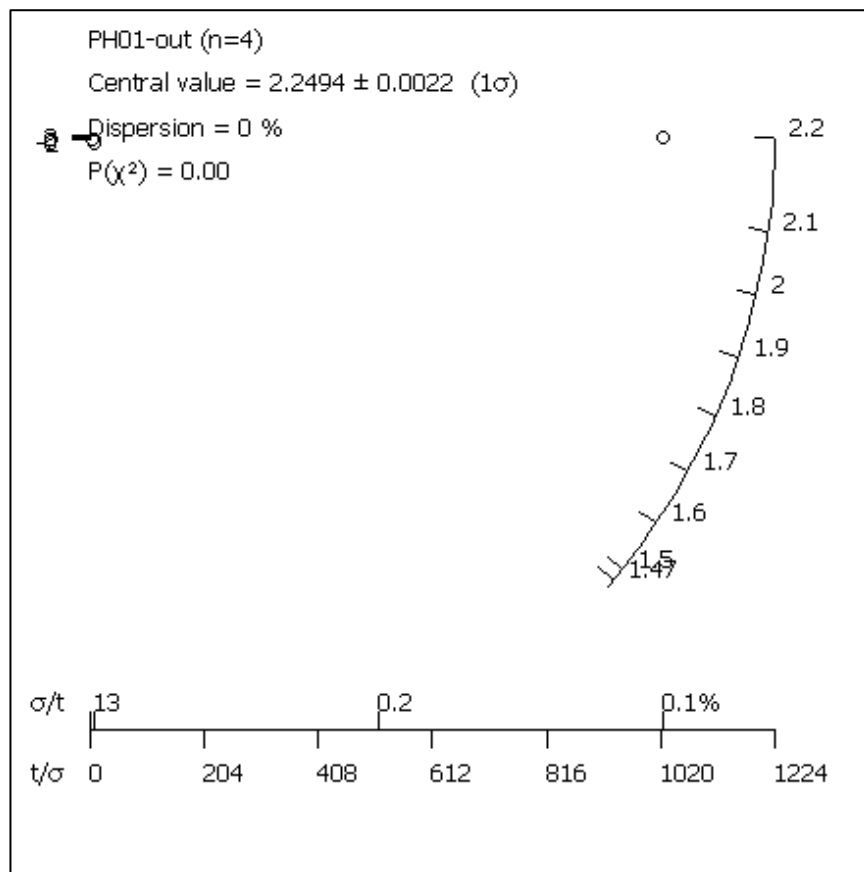


รูป 3.1. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH01-out ในการทดลองครั้งที่ 1 (PH01-out\_01)

ตาราง 3.2. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)
PH01-out_01	2.02	0.24	11.88
PH01-out_02	1.47	0.13	8.56
PH01-out_03	1.99	0.26	13.17
PH01-out_04	2.25	0.00	0.10

จากผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out ทั้งหมด สามารถใช้โปรแกรม RadialPlotter ในการคำนวณหาค่า ED ตัวแทน สรุปได้ว่า ค่า ED ในหน่วย เกรย์ (Gy) ที่เป็นค่าตัวแทนของตัวอย่าง PH01-out มีค่าเท่ากับ 2.25 และค่า ED Error ในหน่วย เกรย์ (Gy) มีค่าตัวแทนเท่ากับ 0.00 (รูป 3.2)

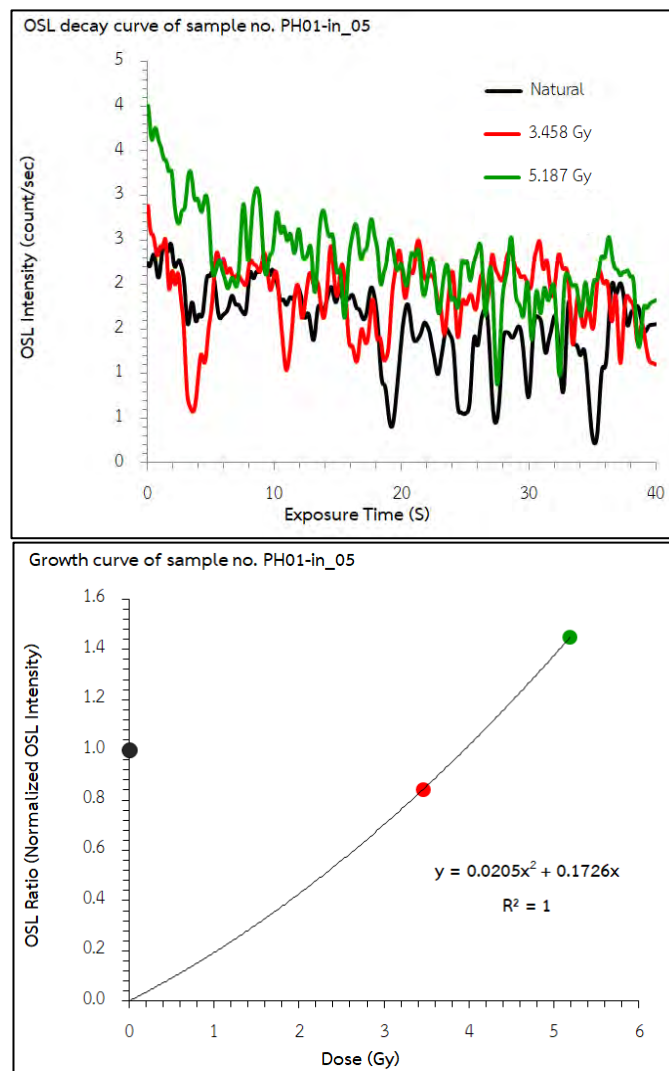


รูป 3.2. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-out



### 3.2.2. ผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in (บริเวณเนื้อด้านในสีดำ)

จากการนำตัวอย่างอิฐ PH01-in ไปหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟ OSL decay curve (รูป 3.3 บน) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้แสง (แกนนอน) ในหน่วย sec และปริมาณการเรืองแสง (แกนตั้ง) ในหน่วย count/sec พบว่ากราฟมีความผันผวนอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามยังเห็นแนวโน้มของความเป็น OSL decay curve ดังนั้นจึงนำสัญญาณการเปล่งแสงในเวลา 0-16 วินาทีของตัวอย่าง natural และตัวอย่างที่อาบรังสีที่ทราบค่าบางค่า มาสร้างกราฟ growth curve (รูป 3.3 ล่าง) เนื่องจากการตัดค่าการเปล่งแสงจากการอาบรังสีที่ทราบค่าบางตัวออกไปจะทำให้สามารถสร้างกราฟ growth curve ที่แสดงแนวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันได้ จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่า ED ซึ่งได้ค่า ED ดังตาราง 3.3

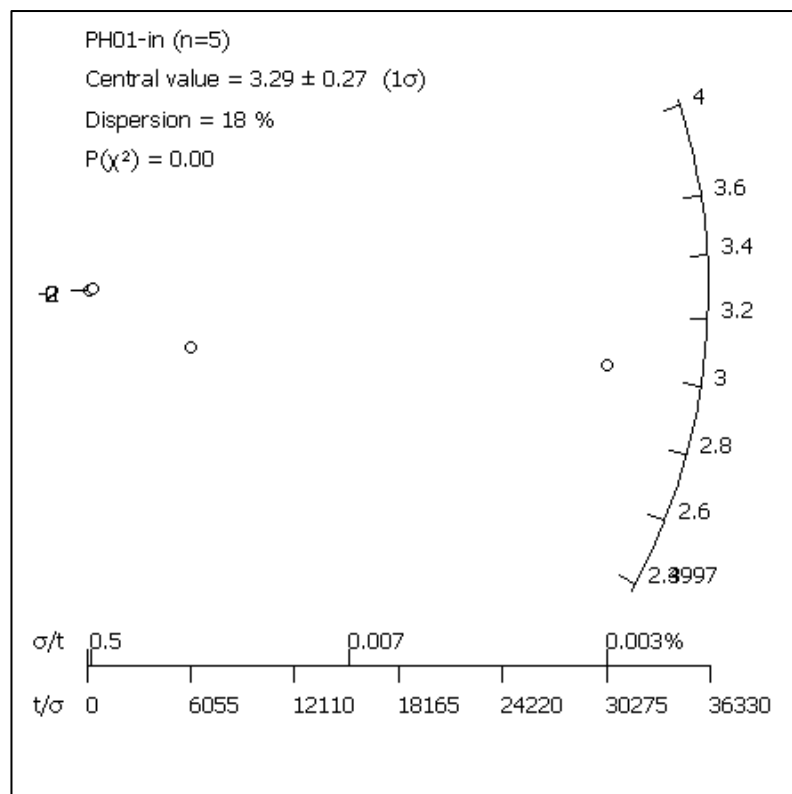


รูป 3.3. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH01-in ในการทดลองครั้งที่ 5 (PH01-in\_05)

ตาราง 3.3. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)
PH01-in_01	3.55	0.02	0.46
PH01-in_02	3.78	0.02	0.46
PH01-in_03	3.02	0.00	0.00
PH01-in_04	3.95	0.01	0.25
PH01-in_05	2.40	0.00	0.02

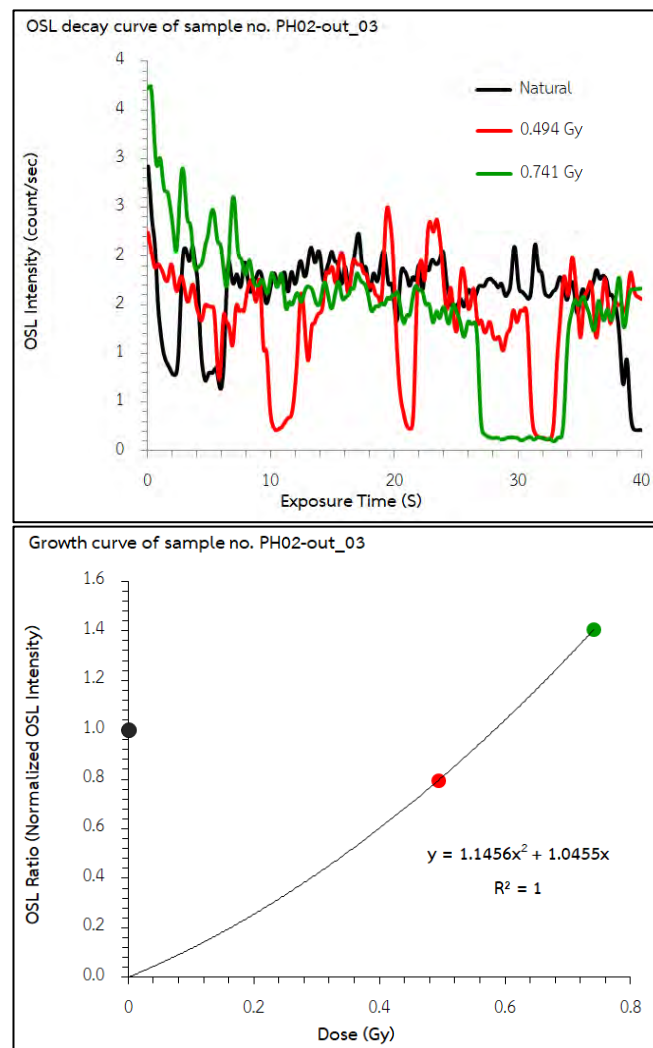
จากผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in ทั้งหมด สามารถใช้โปรแกรม RadialPlotter ในการคำนวณหาค่า ED ตัวแทน สรุปได้ว่า ค่า ED ในหน่วย เกรย์ (Gy) ที่เป็นค่าตัวแทนของตัวอย่าง PH01-in มีค่าเท่ากับ 3.29 และค่า ED Error ในหน่วย เกรย์ (Gy) มีค่าตัวแทนเท่ากับ 0.27 (รูป 3.4)



รูป 3.4. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PH01-in

### 3.2.3. ผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PH02-out (บริเวณเหนือขอบนอกสี่ลัม)

จากการนำตัวอย่างอิฐ PH01-in ไปหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟ OSL decay curve (รูป 3.5 บน) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้แสง (แกนนอน) ในหน่วย sec และปริมาณการเรืองแสง (แกนตั้ง) ในหน่วย count/sec พบว่ากราฟมีความผันผวนอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามยังเห็นแนวโน้มของความเป็น OSL decay curve ดังนั้นจึงนำสัญญาณการเปล่งแสงในเวลา 0-16 วินาทีของตัวอย่าง natural และตัวอย่างที่อาบรังสีที่ทราบค่าบางค่า มาสร้างกราฟ growth curve (รูป 3.5 ล่าง) เนื่องจากการตัดค่าการเปล่งแสงจากการอาบรังสีที่ทราบค่าบางตัวออกไปจะทำให้สามารถสร้างกราฟ growth curve ที่แสดงแนวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันได้ จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่า ED ซึ่งได้ค่า ED ดังตาราง 3.4

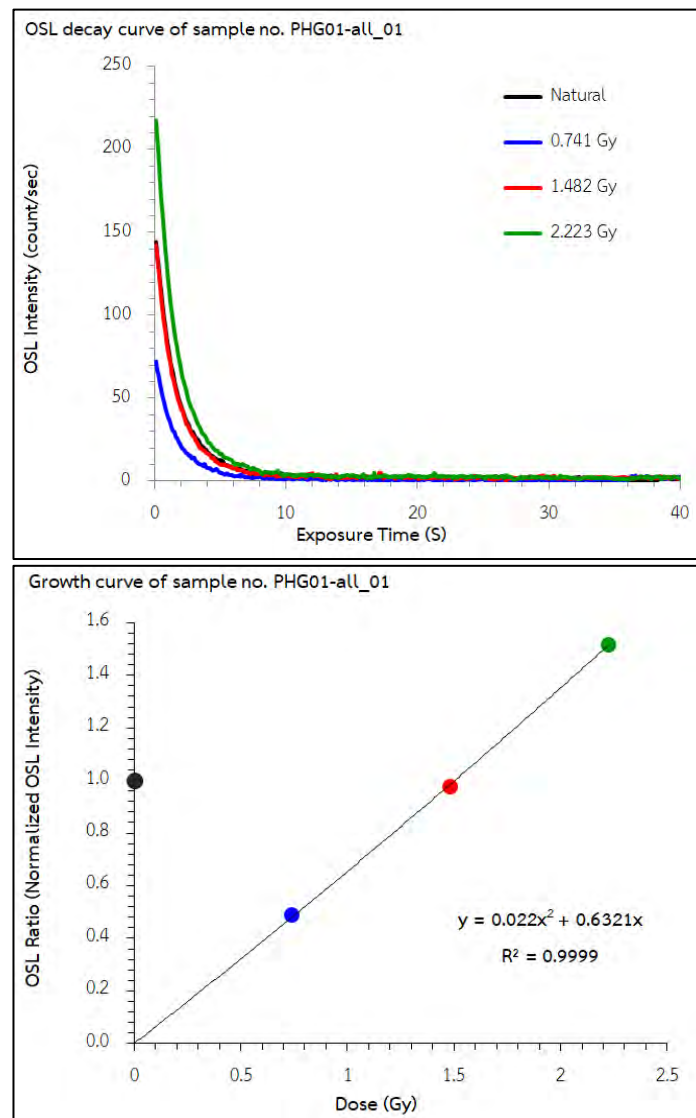


รูป 3.5. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PH02-out ในการทดลองครั้งที่ 3 (PH02-out\_03)



### 3.2.4. ผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all (บริเวณทั่วทั้งก้อนอิฐ)

จากการนำตัวอย่างอิฐ PHG01-all ไปหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟ OSL decay curve (รูป 3.7 บน) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้แสง (แกนนอน) ในหน่วย sec และปริมาณการเรืองแสง (แกนตั้ง) ในหน่วย count/sec พบว่ากราฟไม่มีความผันผวน ซึ่งกราฟที่ได้นั้นตรงกับทฤษฎี OSL โดยมีแนวโน้มของความเป็น OSL decay curve ดังนั้นจึงนำสัญญาณการเปล่งแสงในเวลา 0-16 วินาทีของตัวอย่าง natural และตัวอย่างที่อบรังสีที่ทราบค่า มาสร้างกราฟ growth curve (รูป 3.7 ล่าง) โดยกราฟแสดงแนวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่า ED ซึ่งได้ค่า ED ดังตาราง 3.5

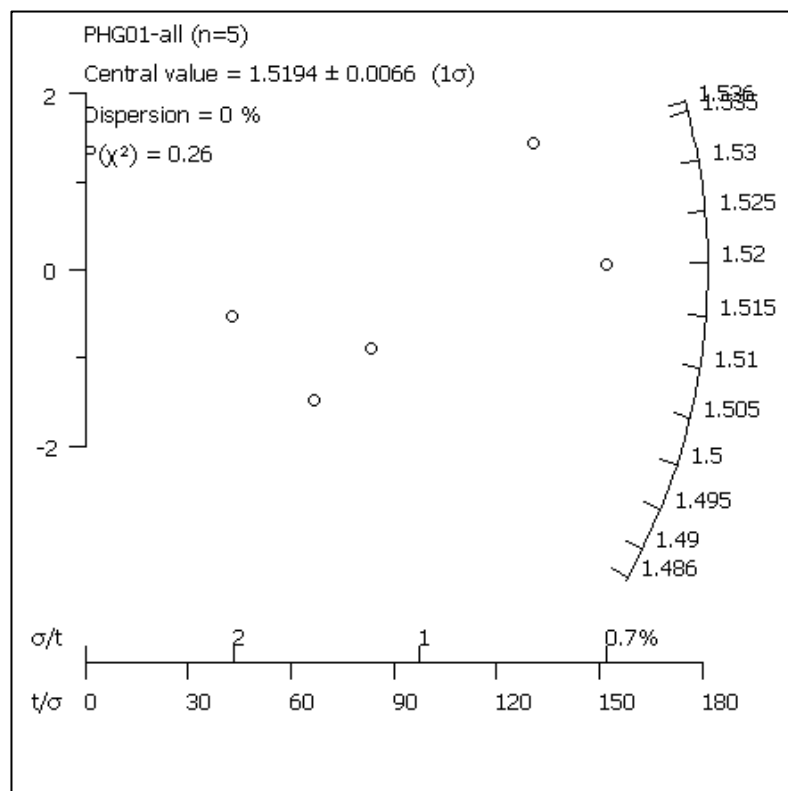


รูป 3.7. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PHG01-all ในการทดลองครั้งที่ 1 (PHG01-all \_01)

ตาราง 3.5. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)
PHG01-all_01	1.50	0.02	1.20
PHG01-all_02	1.49	0.02	1.49
PHG01-all_03	1.50	0.03	2.31
PHG01-all_04	1.54	0.01	0.76
PHG01-all_05	1.52	0.01	0.38

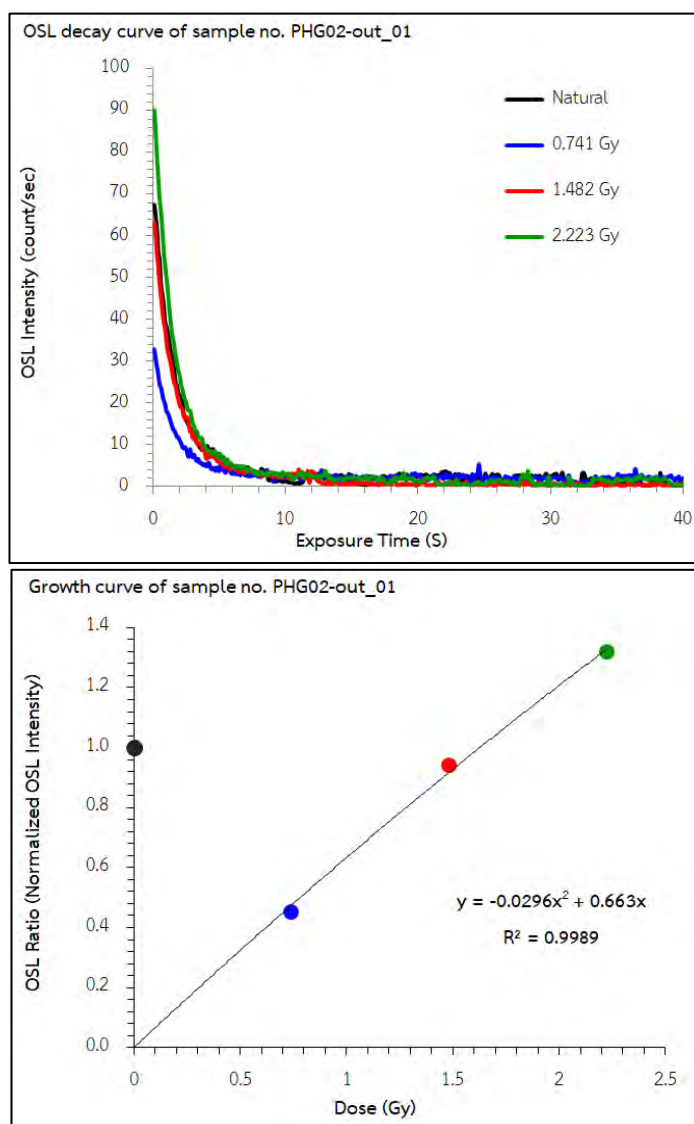
จากผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all ทั้งหมด สามารถใช้โปรแกรม RadialPlotter ในการคำนวณหาค่า ED ตัวแทน สรุปได้ว่า ค่า ED ในหน่วย เกรย์ (Gy) ที่เป็นค่าตัวแทนของตัวอย่าง PHG01-all มีค่าเท่ากับ 1.52 และค่า ED Error ในหน่วย เกรย์ (Gy) มีค่าตัวแทนเท่ากับ 0.01 (รูป 3.8)



รูป 3.8. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PHG01-all

### 3.2.5. ผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out (บริเวณเหนือขอบนอก)

จากการนำตัวอย่างอิฐ PHG02-out ไปหาค่า ED ด้วยเครื่อง TL/OSL reader จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟ OSL decay curve (รูป 3.9 บน) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการให้แสง (แกนนอน) ในหน่วย sec และปริมาณการเรืองแสง (แกนตั้ง) ในหน่วย count/sec พบว่ากราฟไม่มีความผันผวน ซึ่งกราฟที่ได้นั้นตรงกับทฤษฎี OSL โดยมีแนวโน้มของความเป็น OSL decay curve ดังนั้นจึงนำสัญญาณการเปล่งแสงในเวลา 0-16 วินาทีของตัวอย่าง natural และตัวอย่างที่อบรังสีที่ทราบค่า มาสร้างกราฟ growth curve (รูป 3.9 ล่าง) โดยกราฟแสดงแนวเป็นเส้นตรงและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกัน จากนั้นนำสมการที่ได้จากกราฟไปคำนวณหาค่า ED ซึ่งได้ค่า ED ดังตาราง 3.6

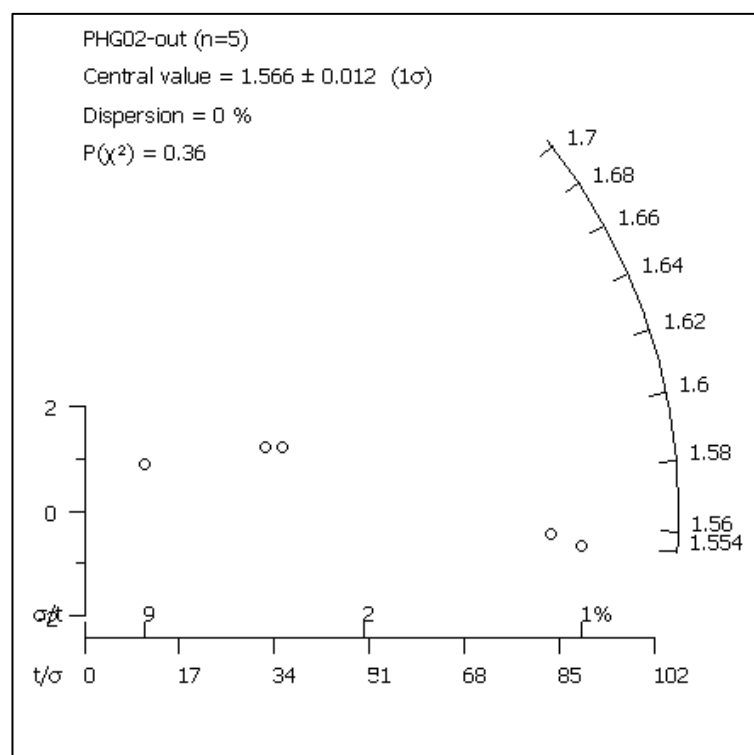


รูป 3.9. แสดงผลการหาค่า ED ในรูปแบบ OSL decay curve (บน) และ growth curve (ล่าง) ของตัวอย่าง PHG02-out ในการทดลองครั้งที่ 1 (PHG02-out\_01)

ตาราง 3.6. แสดงผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)
PHG02-out_01	1.62	0.05	3.06
PHG02-out_02	1.62	0.04	2.81
PHG02-out_03	1.55	0.02	1.12
PHG02-out_04	1.56	0.02	1.20
PHG02-out_05	1.70	0.16	9.17

จากผลการหาค่า ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out ทั้งหมด สามารถใช้โปรแกรม RadialPlotter ในการคำนวณหาค่า ED ตัวแทน สรุปได้ว่า ค่า ED ในหน่วย เกรย์ (Gy) ที่เป็นค่าตัวแทนของตัวอย่าง PHG02-out มีค่าเท่ากับ 1.57 และค่า ED Error ในหน่วย เกรย์ (Gy) มีค่าตัวแทนเท่ากับ 0.01 (รูป 3.10)



รูป 3.10. แสดงการหาค่าตัวแทน ED ของตัวอย่างอิฐ PHG02-out



### 3.3. ผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual Dose)

จากการที่ได้ส่งตัวอย่างอิฐ PH01 PH02 PHG01 และ PHG02 ไปทำการทดลองโดยเครื่อง gamma-ray spectrometer ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ดังตาราง 3.7 จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปคำนวณร่วมกับผลการทดลองร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง เพื่อคำนวณหาค่า AD โดยใช้สูตรการคำนวณของ Aitken (1985) ซึ่งแสดงผลดังตาราง 3.8

ตาราง 3.7. แสดงค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติในตัวอย่างที่นำมาศึกษา

ตัวอย่าง	U-238		Th-232		K-40	
	ppm	error	ppm	error	%	error
PH01	2.82	0.01	11.52	0.07	0.96	0
PH02	2.01	0.01	7.42	0.07	0.62	0
PHG01	1.84	0.01	4.86	0.05	0.14	0
PHG02	2.23	0.01	5.59	0.06	0.17	0

ตาราง 3.8. แสดงผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีหรือค่า AD

ตัวอย่าง	ค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี			ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง	Annual Dose (Gy/Ka)	Annual Dose Error (Gy/Ka)
	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)			
PH01	2.82	11.52	0.96	8.14	2.36	0.02
PH02	2.01	7.42	0.62	1.96	1.72	0.02
PHG01	1.84	4.86	0.14	2.85	1.03	0.02
PHG02	2.23	5.59	0.17	10.62	1.11	0.02

## บทที่ 4

### วิเคราะห์และอภิปรายผลการทดลอง

#### 4.1. การคำนวณอายุจากผลการทดลอง

จากการนำค่า ED และ AD ที่ได้จากการทดลองมาคำนวณหาอายุของอิฐตามสมการ 2.1 จากตัวอย่างอิฐ 4 ก้อน ทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง ได้แก่ PH01-out PH01-in PH02-out PHG01-all และ PHG02-out ซึ่งค่า AD ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gamma spectrometer ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ส่วนค่า ED ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TL/OSL reader ในห้องปฏิบัติการของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ค่าอายุดังต่อไปนี้

ตาราง 4.1. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH01-out

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)	AD (Gy/ka)	AD Error (Gy/ka)	Age (y)	Age Error (y)
PH01-out_01	2.02	0.24	11.88	2.36	0.02	857	±102
PH01-out_02	1.47	0.13	8.56	2.36	0.02	625	±54
PH01-out_03	1.99	0.26	13.17	2.36	0.02	847	±112
PH01-out_04	2.25	0.00	0.10	2.36	0.02	955	±9

ตาราง 4.2. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH01-in

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)	AD (Gy/ka)	AD Error (Gy/ka)	Age (y)	Age Error (y)
PH01-in_01	3.55	0.02	0.46	2.36	0.02	1505	±16
PH01-in_02	3.78	0.02	0.46	2.36	0.02	1603	±17
PH01-in_03	3.02	0.00	0.00	2.36	0.02	1286	±13
PH01-in_04	3.95	0.01	0.25	2.36	0.02	1677	±17
PH01-in_05	2.40	0.00	0.02	2.36	0.02	1019	±10

ตาราง 4.3. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PH02-out

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)	AD (Gy/ka)	AD Error (Gy/ka)	Age (y)	Age Error (y)
PH02-out_01	0.53	0.000017	0.00	1.72	0.02	307	±4
PH02-out_02	1.00	0.000144	0.01	1.72	0.02	582	±7
PH02-out_03	0.58	0.000023	0.00	1.72	0.02	339	±4
PH02-out_04(R3)	1.11	0.000090	0.01	1.72	0.02	647	±7
PH02-out_04(R2)	0.87	0.000097	0.01	1.72	0.02	504	±6
PH02-out_04(R1)	0.39	0.000013	0.00	1.72	0.02	226	±3
PH02-out_05(R3)	0.90	0.000047	0.01	1.72	0.02	523	±6
PH02-out_05(R2)	0.47	0.000015	0.00	1.72	0.02	276	±3
PH02-out_05(R1)	0.31	0.000000	0.00	1.72	0.02	181	±2
PH02-out_06	0.85	0.000363	0.04	1.72	0.02	495	±6

ตาราง 4.4. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PHG01-all

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)	AD (Gy/ka)	AD Error (Gy/ka)	Age (y)	Age Error (y)
PHG01-all_01	1.50	0.02	1.20	1.03	0.02	1463	±30
PHG01-all_02	1.49	0.02	1.49	1.03	0.02	1447	±32
PHG01-all_03	1.50	0.03	2.31	1.03	0.02	1461	±41
PHG01-all_04	1.54	0.01	0.76	1.03	0.02	1495	±27
PHG01-all_05	1.52	0.01	0.38	1.03	0.02	1483	±25

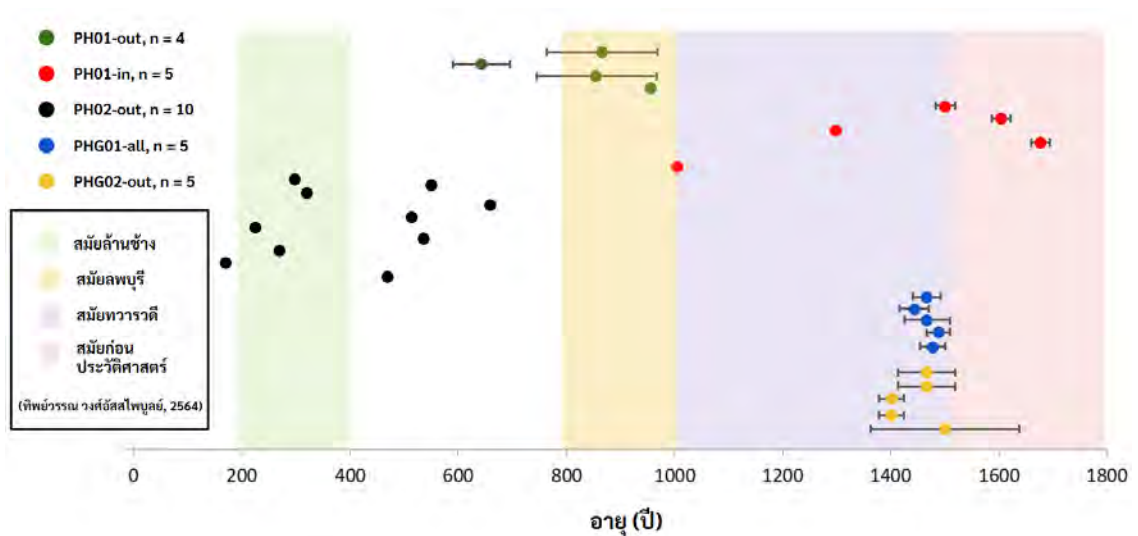
ตาราง 4.5. แสดงผลการคำนวณอายุของตัวอย่างอิฐ PHG02-out

ตัวอย่าง	ED (Gy)	ED Error (Gy)	ED Error (%)	AD (Gy/ka)	AD Error (Gy/ka)	Age (y)	Age Error (y)
PHG02-out_01	1.62	0.05	3.06	1.11	0.02	1467	±50
PHG02-out_02	1.62	0.04	2.81	1.11	0.02	1462	±47
PHG02-out_03	1.55	0.02	1.12	1.11	0.02	1403	±27
PHG02-out_04	1.56	0.02	1.20	1.11	0.02	1407	±27
PHG02-out_05	1.70	0.16	9.17	1.11	0.02	1536	±143

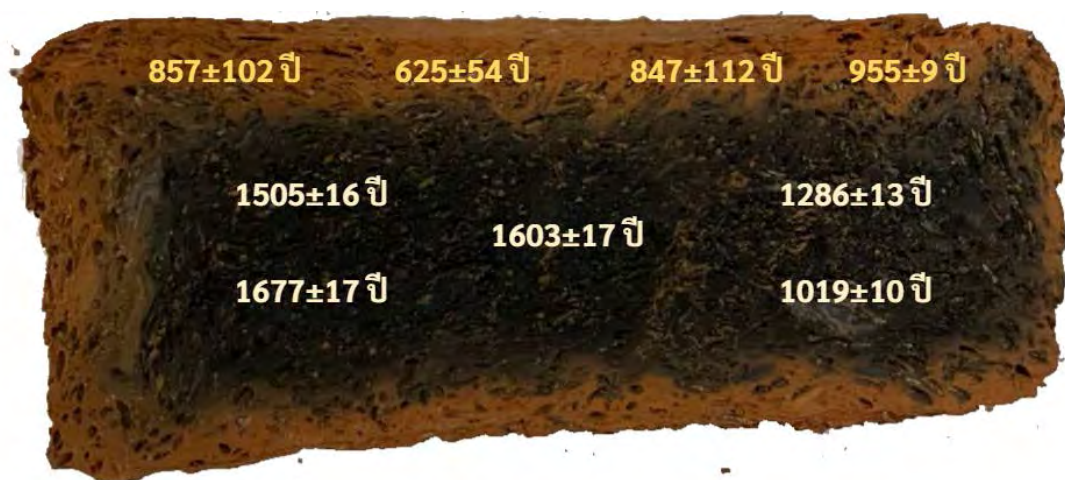
#### 4.2. การอภิปรายผลการทดลอง

จากตารางแสดงการคำนวณอายุของก้อนอิฐข้างต้น (ตาราง 4.1-4.5) จะเห็นว่าจากก้อนอิฐทั้ง 4 ก้อน เราได้ค่าอายุมา 5 กลุ่ม (รูป 4.1) กลุ่มที่ 1 คือค่าอายุของตัวอย่างอิฐ PH01-out (เนื้ออิฐด้านนอก) มีอายุอยู่ระหว่าง 625-955 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐานที่ว่าค่าอายุของก้อนอิฐบริเวณเนื้อด้านนอกที่มีสีส้มจะมีค่าอายุที่เกาะกลุ่มและใกล้เคียงกับค่าอายุที่เทียบเคียงทางประวัติศาสตร์ ในขณะที่อิฐก้อนเดียวกันแต่หาค่าอายุที่เนื้อด้านในอิฐที่มีสีดำ หรือจากตัวอย่างอิฐ PH01-in จะมีค่าอายุที่แปรปรวนและสูงผิดปกติ (รูป 4.2) เป็นเพราะว่าอิฐด้านในได้รับความร้อนจากการเผาในขั้นตอนการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยของ Pailoplee et al. (2016) และจากงานวิจัย Gredmaier et al. (2011) ซึ่งได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของอิฐที่เผาไม่สุกทั่วทั้งก้อนโดยศึกษาถึงชนิดของแร่ประกอบภายในก้อนอิฐซึ่งตรวจพบแร่ควอตซ์ในเนื้ออิฐสีส้มและแร่คริสโตแบไลต์ในเนื้ออิฐสีดำ ซึ่งแร่ทั้ง 2 ชนิดนี้มีสูตรทางเคมีเหมือนกัน แต่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันอันเกิดจากการปรับเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของแร่ในระหว่างการเผา ซึ่งมีผลต่อปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ฉะนั้นการหาอายุโดยใช้ตัวอย่างอิฐด้านในและขอบนอกของก้อนอิฐจึงให้ค่าอายุที่ต่างกัน ดังนั้นค่าอายุของอิฐก้อนนี้จะเป็นไปตามค่าอายุของขอบอิฐด้านนอกที่ได้รับความร้อนที่ทั่วถึงและเป็นค่าอายุของก้อนอิฐ ณ วันที่ถูกเผา ซึ่งตรงกับข้อมูลค่าอายุที่ทางสำนักศิลปากรที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร ได้กำหนดไว้จากหลักฐานทางโบราณคดีที่ค้นพบ ส่วนเนื้ออิฐด้านในจะเป็นอายุของดินเดิมก่อนที่จะถูกนำมาเผาเป็นก้อนอิฐ ทำให้มีอายุมากกว่าเนื้ออิฐบริเวณขอบนอก ตัวอย่างถัดมาคือตัวอย่างบริเวณขอบนอกของอิฐก้อนที่ 2 จากบริเวณพื้นที่ศึกษาเดิม หรือตัวอย่างอิฐ PH02-out ค่าอายุมีความแปรปรวน (รูป 4.3) อาจเนื่องมาจากมีปริมาณควอตซ์ในตัวอย่างน้อยทำให้สัญญาณในกราฟ OSL decay curve ต่ำ ดังนั้นตัวอย่างนี้ไม่มีนัยยะในเชิงอายุ ส่วนตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาที่ 2 ได้แก่ตัวอย่างอิฐ PHG01-all และ PHG02-out ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพภายใน (สี) เหมือนกันทั่วทั้ง

ก่อน จะพบว่ามีค่าอายุที่เกาะกลุ่ม (รูป 4.4 และ รูป 4.5) แม้ว่าการศึกษาตัวอย่างอิฐ PHG01-all จะเป็นการศึกษาอิฐจากทั่วทั้งก้อน และการศึกษาตัวอย่างอิฐ PHG02-out จะเป็นการศึกษาเพียงเนื้อขอบนอก แต่ทั้งสองก็ยังมีอายุที่ใกล้เคียงกันเป็นเพราะก้อนอิฐได้รับความร้อนจากการเผาในขั้นตอนการผลิตที่สมบูรณ์ (เผาสุกทั่วทั้งก้อน) และนอกจากนั้นค่าอายุที่ได้ยังตรงกับค่าอายุที่ทางสำนักศิลปากรที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร ได้กำหนดไว้จากหลักฐานทางโบราณคดีที่พบ ซึ่งมีอายุอยู่ระหว่าง 1,400-1,500 ปีก่อนปัจจุบัน



รูป 4.1. แผนภาพแสดงการกระจายตัวของอายุจากตัวอย่างอิฐที่นำมาศึกษาเทียบกับค่าอายุที่ทางสำนักศิลปากรที่ 8 ขอนแก่น กรมศิลปากร ได้กำหนดไว้ตามหลักฐานทางโบราณคดีที่พบ



รูป 4.2. ตัวอย่างอิฐ PH01 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อด้านในและเนื้อขอบนอก



รูป 4.3. ตัวอย่างอิฐ PH02 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อขอบนอกที่ค่อนข้างแปรปรวน



รูป 4.4. ตัวอย่างอิฐ PHG01 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณทั่วทั้งก้อน



รูป 4.5. ตัวอย่างอิฐ PHG02 พร้อมกับแสดงค่าอายุในบริเวณเนื้อขอบนอก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1. สรุปผลอายุที่ได้จากการทดลอง

จากการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองการหาอายุอิฐด้วยวิธีการเปล่งแสงจากแหล่งโบราณคดีเมืองเพ็ญ จังหวัดขอนแก่น จากตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ตัวอย่างพบว่า ตัวอย่างที่ 1 PH01 บริเวณขอบนอกค่าอายุจะอยู่ระหว่าง 625-955 ปีก่อนปัจจุบัน ส่วนตัวอย่างที่ 2 PH01 บริเวณเนื้อด้านในสีค่าอายุของอิฐจะอยู่ระหว่าง 1,019-1,677 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งมีความแปรปรวนและมีค่าสูงผิดปกติ ส่วนตัวอย่างที่ 3 PH02 บริเวณขอบนอก พบว่ากราฟ OSL decay curve ของตัวอย่างนี้มีสัญญาณที่ต่ำ จึงส่งผลให้ค่า ED มีค่าระหว่าง 0.31-1.11 ทำให้ค่าอายุของอิฐมีความแปรปรวนสูง โดยอายุอยู่ระหว่าง 181-674 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งไม่สอดคล้องกับค่าอายุของตัวอย่าง PH01 บริเวณขอบด้านนอก ตัวอย่างที่ 4 PHG01 ที่มีสีเหมือนกันทั่วทั้งก้อน โดยทำการศึกษาอิฐจากทั่วทั้งก้อน ค่าอายุที่ได้อยู่ระหว่าง 1,463-1,495 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งเป็นค่าอายุที่เกาะกลุ่ม ส่วนตัวอย่างสุดท้าย PHG02 บริเวณขอบด้านนอก ค่าอายุที่ได้อยู่ระหว่าง 1,403-1,536 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งเป็นค่าอายุที่เกาะกลุ่มเช่นกัน

ดังนั้นจากการศึกษาครั้งนี้สรุปผลได้ว่าอิฐที่เก็บมาทำการศึกษามีช่วงอายุ 2 ช่วง ช่วงอายุที่ 1 คืออิฐจากที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว (รูป 5.1) ซึ่งจากค่าอายุที่ได้ทำให้สันนิษฐานได้ว่า มีการสร้างโบราณสถานก่ออิฐและการอยู่อาศัยในเมืองเพ็ญในช่วงเวลาประมาณ 1,400-1,500 ปีมาแล้ว ซึ่งตรงกับช่วงสมัยทวารวดี ส่วนช่วงอายุที่ 2 คืออิฐจากที่ดินนายชุตติเดช สูงเพ็ญ (รูป 5.1) จากค่าอายุที่ได้แสดงให้เห็นว่าคนในอดีตในพื้นที่เมืองโบราณบ้านเมืองเพ็ญ มีการอยู่อาศัยและสร้างศาสนสถานขึ้น ในช่วงเวลาประมาณ 625-955 ปีมาแล้ว ซึ่งตรงกับสมัยลพบุรีและช่วงรอยต่อระหว่างสมัยลพบุรีและล้านช้าง ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว มีอาณาจักรหรือรัฐที่สำคัญในภูมิภาคนี้ 2 อาณาจักร ได้แก่ ทางตะวันตกเป็นอาณาจักรอยุธยา ส่วนทางตอนเหนือของเมืองเพ็ญคืออาณาจักรล้านช้าง โดยทั้ง 2 รัฐก็มีศูนย์กลางที่ไกลจากเมืองเพ็ญมากพอสมควร ฉะนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าบริเวณเมืองเพ็ญ อาจมีการอยู่อาศัยต่อเนื่องมาจากสมัยทวารวดีและลพบุรี แต่ในช่วงเวลาดังกล่าวอาจไม่ได้ตกอยู่ภายใต้อิทธิพลรัฐใดอย่างชัดเจน และจากข้อมูลช่วงอายุทั้งสองช่วงก็ยังสามารถนำไปยืนยันข้อมูลที่ได้จากหลักฐานทางโบราณคดีที่พบในพื้นที่ศึกษาได้อีกด้วย





รูป 5.1. ผังเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย บริเวณหมายเลข 1 ที่ดินนายธรรมะ เทศแก้ว และบริเวณหมายเลข 2 ที่ดินนายชุตีเดช สูงเพี้ย (ทิพย์วรรณ วงศ์อัสสไพบูลย์, 2564)

## 5.2. ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาหาอายุเพิ่มเติมในตัวอย่างอิฐก้อนอื่น ๆ ในบริเวณพื้นที่ศึกษาเดียวกัน เนื่องจากหากใช้ก้อนอิฐในพื้นที่ศึกษาเดียวกันมาหาอายุเปรียบเทียบกันเพียงสองก้อน อาจเกิดกรณีมีแร่ควอตซ์ในตัวอย่างก้อนอิฐก้อนใดก้อนหนึ่งน้อยเกินไป ทำให้ก้อนอิฐก้อนนั้นไม่สามารถสรุปอายุได้ ดังนั้นก้อนอิฐทั้งสองจะไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบค่าอายุเพื่อทำการสรุปผลช่วงอายุของตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ศึกษาเดียวกันให้มีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้

2) ควรเพิ่มการทดลองในการหาค่า ED ในแต่ละตัวอย่างให้ได้อย่างน้อย 30 ซ้ำ เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือในทางสถิติให้มากยิ่งขึ้น และทำให้การสรุปผลช่วงอายุของตัวอย่างมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่ในการศึกษาครั้งนี้ที่มีการทดลองเพียงตัวอย่างละ 4-10 ซ้ำ เนื่องจากเกิดเหตุการณ์แพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ทำให้การเข้าไปทำการทดลองที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นั้นไม่สามารถทำได้อย่างเต็มที่

3) อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบางอุปกรณ์ เกิดการชำรุดระหว่างการทดลอง อาจเนื่องมาจากอุปกรณ์มีอายุการใช้งานมาก ซึ่งทำให้การดำเนินการทดลองเกิดความล่าช้า



## บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. (2552). การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี  
จังหวัดขอนแก่น. กรุงเทพฯ: บริษัทจันฉนวนิชย์ ซีเคียวริตี้พรีนซ์ติ้ง จำกัด.
- ดาวิยะห์ อาแด. (2560). การหาอายุด้วยเทคนิคเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของซากหอยน้ำจืดและตะกอน  
ดิน บริเวณแหล่งโบราณคดีถ้ำหวดตาทวดยาย จังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศา  
สตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ทิพย์วรรณ วงศ์อัสสไพบูลย์. (2564). พัฒนาการทางโบราณคดีเมืองโบราณบ้านเมืองเพี้ย. ขอนแก่น:  
สำนักศิลปากรที่ 8 กรมศิลปากร.
- ธนีสรณ์ พุทธกาล. (2560). การหาอายุอิฐจากกำแพงเมืองสงขลาด้วยวิธีเปล่งแสง. โครงการการเรียน  
การสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ปวิรรษ เจียมจิตต์. (2561). การตั้งถิ่นฐานสมัยโบราณในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำชีตอนบน ก่อนพุทธศตวรรษที่  
19. วิทยานิพนธ์ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโบราณคดี ภาควิชาโบราณคดี บัณฑิต  
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- มานิตย์ ช้อนสุข และ เนาวรัตน์ วรรณะพันธ์. (2535). การกำหนดค่าอายุโบราณวัตถุจากเมืองโบราณ  
ฟ้าแดดสงยาง ด้วยวิธีคาร์บอน-14. กรุงเทพฯ: สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ.
- สันติ ภัยหลบลี. (2563). การหาอายุด้วยวิธีเปล่งแสง. สืบค้นเมื่อ 25 ตุลาคม 2563,  
จาก <http://www.mitrearth.org/15-13-4-luminescence-dating>
- Aitken, M.J. (1985). Thermoluminescence dating. Academic Press, London, U.K.
- Aitken, M. J. (1990). Science-based dating in archaeology. Routledge.
- Antrobus, A. (2004). Luminescence Dating of Brick Chimneys. Vernacular Architecture,  
35(1), 21-31.
- Bailiff, I. K. (2007). Methodological Developments in the Luminescence Dating of Brick  
from English Late-Medieval and Post-Medieval Building. Archaeometry, 49(4),  
827– 851.
- Bailiff, I. K., and Holland, N. (2000). Dating bricks of the last two millennia from  
Newcastle upon Tyne: a preliminary study. Radiation Measurements, 32(5),  
615–619.
- Bell, W.T. (1979). Attenuation factors for the absorbed radiation dose in quartz  
inclusions for Thermoluminescence dating. Ancient TL. 8, 2-13.

- Blain, S., Bailiff, I. K., Guibert, P., Bouvier, A., and Baylé, M. (2010). An intercomparison study of luminescence dating protocols and techniques applied to medieval brick samples from Normandy (France). *Quaternary Geochronology*, 5(2), 311–316.
- Chruscinska, A., Cicha, A., Kijek, N., Palczewski, P., Przegietka, K., and Sulkowska Tuszynska, K. (2014). Luminescence dating of bricks from the gothic Saint James Church in Torun. *Geochronometria*, 41(4), 352–360.
- Diego R.G. T., Sonia H. T., Márcio Y., Silvio L.M. B., and José L. M. (2011). TL, OSL and C-14 Dating Results of the Sediments and Bricks from Mummified Nuns' Grave. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 84(2)
- Feathers, J. K. (2003). Use of luminescence dating in archaeology. *Measurement Science and Technology*, 14(9), 1493.
- Fu, X., Zhang, J.-F., Mo, D.-W., Shi, C.-X., Liu, H., Li, Y.-Y., and Zhou, L.-P. (2009). Luminescence dating of baked earth and sediments from the Qujialing archaeological site, China. *Quaternary Geochronology*, 5(2–3), 353–359.
- Gredmaier, L., Banks, C.J., and Pearce, R.B. (2011). Calcium and sulphur distribution in fired clay brick in the presence of a black reduction core using micro X-ray fluorescence mapping. *Construction and Building Materials*. 25, 4477-4486.
- Leung, P. L., Tang, Q., Li, M., and Zhang, C.-X. (2004). The preliminary application of OSL in comparison with TL for authentication of ancient Chinese bricks. *Radiation measurements*, 40(1), 1–4.
- Pailoplee, S., Won-In, K., Chaisuwan, B., and Charusiri, P. (2016). Thermoluminescence and optically stimulated luminescence dating of bricks from the Thung Tuk archaeological site, Southern Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 38(6).
- Panzeri, L., Caroselli, M., Galli, A., Lugli, S., Martini, M., Sibilìa, E. (2019). Mortar OSL and brick TL dating: The case study of the UNESCO world heritage site of Modena. *Quaternary Geochronology*, 49, 236–241.
- Thomas, G. (2009). *Luminescence Dating of Medieval and Early Modern Brickwork*. Durham theses, Durham University.

Victoria University of Wellington. (2020). Luminescence dating facility. Retrieved March 24, 2021, from <https://www.wgtn.ac.nz>

Won-in, K., Wattanakul, P., Dararutana, P., Pongkrapan, S., Takashima, I., Ruangrunsi, N., Singharajwarapan, F.S., Supajanya, T., and Vichapan, K. (2008). Preliminary study of the age of the Lanna period by Thermoluminescence dating: A case study from the Wiang Kaen Ancient Site, Chiang Rai, Northern Thailand. Proceedings of the International Conference, Sofia, Bulgaria, October 29-30, 2008, 130-133.

