



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง จังหวัดบุรีรัมย์

โดย

นางสาวสิริกฐา บรรณรณ

เลขประจำตัวนิต 5932738023

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

การหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง จังหวัดบุรีรัมย์

นางสาวศิริกัญญา บรรณารณ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

LUMINESCENCE DATING OF ANCIENT KILNS IN BURIRAM PROVINCE

Ms. Sirittha Banron

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Bachelor of Science

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Academic Year 2019

หัวข้อโครงการ

การหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง จังหวัดบุรีรัมย์

โดย

นางสาวสิริภุชญา บรรณารณ

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

รศ.ดร.สันติ ภัยหลบลี้

วันที่ส่ง _____

วันที่อนุมัติ _____

(รศ.ดร.สันติ ภัยหลบลี้)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

สิริภุชญา บรรณารณ : การหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง จังหวัดบุรีรัมย์

(LUMINESCENCE DATING OF ANCIENT KILNS IN BURIRAM PROVINCE)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้, 44 หน้า

จากการพบหลักฐานโบราณวัตถุแหล่งโลหะกรรมสมัยโบราณ ซึ่งแสดงถึงร่องรอยการผลิตเหล็กของแหล่งโบราณคดีบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่แหล่งเตาถลุงเหล็กบ้านสายโท 7 และบ้านเขาดินใต้ ซึ่งถูกสันนิษฐานว่ามีอายุร่วมสมัยกับแหล่งผลิตเครื่องถ้วยวัฒนธรรมขอมในช่วงพุทธศตวรรษที่ 15-18 โดยโครงการนี้เป็นการศึกษาหาอายุของเตาถลุงเหล็กและตะกรันเหล็กบ้านสายโท 7 ด้วยวิธีเรืองแสง หลักการในการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงนั้น ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนของโครงสร้างผลึกของแร่ หรือ Equivalence dose (ED) กับอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ หรือ Annual dose (AD) ซึ่งการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงมีประสิทธิภาพสามารถประยุกต์ใช้กับการหาอายุจำพวกวัสดุทางโบราณคดี วัสดุทางธรณีวิทยา และตะกรันของโลหะได้ จากการทดลองวัดค่าสัญญาณ OSL ของตัวอย่างตะกรันเหล็ก พบว่ามีสัญญาณเพียงเล็กน้อยและในบางตัวอย่างไม่แสดงผลสัญญาณ ทั้งนี้อาจเกิดจากความซับซ้อนของแร่องค์ประกอบและสัดส่วนของแร่ควอตซ์ที่มีปริมาณน้อยในตัวอย่างตะกรันเหล็กเมื่อเทียบกับแร่องค์ประกอบชนิดอื่น ทำให้ค่า ED ที่ได้จากตัวอย่างของตะกรันเหล็กมีการกระจายตัวค่อนข้างมาก จึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาอายุได้ ส่วนผลวิเคราะห์อายุที่ได้จากตัวอย่างเตาเผา พบว่ามีอายุที่แก่กว่าข้อมูลอายุที่ใช้ในการอ้างอิงและข้อมูลในเชิงประวัติศาสตร์ของแหล่งเตาเผาดังกล่าว ซึ่งคาดว่าข้อผิดพลาดนี้เกิดจากการรีเซ็ตสัญญาณหลังได้รับพลังงานครั้งสุดท้ายของแร่ควอตซ์ซึ่งการรีเซ็ตสัญญาณที่ไม่สมบูรณ์นั้นจะส่งผลให้อายุที่ได้แก่กว่าอายุที่แท้จริง

คำสำคัญ : การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง เตาถลุงเหล็ก ตะกรันเหล็ก

5932738023: MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS: DATING / LUMINESCENCE / IRON SMELTING / BAN KRUAD ARCHAEOLOGICAL SITE / BURIRAM PROVINCE

SIRITTHA BANRON: LUMINESCENCE DATING OF ANCIENT KILNS IN BURIRAM PROVINCE

ADVISOR: ASSOC. PROFESSOR SANTI PAILOPLEE, Ph.D., 44 pp.

From findings the archaeometallurgical evidence which represent iron smelting activities at archeological site, Ban Kruad district, Buriram province. Especially at Ban Sai Tho 7 and Ban khao Din Tai iron smelting site where was assumed to be in the same period as the source of Khmer cultural wares during the Buddhist century 15-18. In this study, using luminescence techniques which has potential for dating archaeological material, geological material and metallurgical slag to proof age of iron smelting furnace and iron slags at Ban Sai Toh 7 site. Principle of luminescence dating is using the relationship between Equivalent dose and Annual dose. The OSL measurements, sample of iron slags showed only small and in some cases not display signals maybe because the complex compositions of slags have unpleasant consequences for the OSL measurements and small amount of quartz in slags, so the ED distribution of iron slags not able to be calculated for age. The aging result of the iron smelting furnace is older than the reference dates and historical data. This error might be due to the resetting of the luminescence signal prior to deposition which incomplete resetting will result in an overestimation of the burial age.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยาศาสตร์ เรื่องการหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง จังหวัดบุรีรัมย์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาชี้แนะและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากรองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ภัยหลบลี้ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องมาโดยตลอด ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุมัติการจัดทำโครงการและอนุมัติงบประมาณที่ใช้ในการจัดทำโครงการในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บุคลากรทุกท่านในภาควิชาธรณีวิทยา ที่คอยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ คอยเป็นที่ปรึกษาและคอยดูแลเป็นอย่างดีตลอดระยะเวลาในการทำการทดลอง

ขอขอบพระคุณ พี่สุทธิกานต์ คำศิริ และพี่ธนสรณ์ พุทธกาล รวมถึงรุ่นพี่ภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ ธรณีวิทยา รุ่นที่ 60 ทุกคน ที่ช่วยให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ คอยช่วยเหลือและช่วยเป็นกำลังใจที่ดีซึ่งกันและกันเสมอมา ขอขอบใจ รุ่นน้องภาควิชาธรณีวิทยาทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการจัดทำโครงการจนสำเร็จ ประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาโครงการฉบับนี้ ผู้จัดทำขอน้อมบูชาพระคุณบิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ และให้ความเมตตาแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด และเป็นกำลังใจสำคัญที่ทำให้การศึกษาโครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
นิยามศัพท์เฉพาะ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 พื้นที่ศึกษา	2
1.5 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
บทที่ 2 วิธีการทดลอง	16
2.1 การเก็บตัวอย่าง	16
2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการทดลอง	24
3.1 ผลการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water content (W))	24
3.2 ผลการหาอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual dose (AD))	25
3.3 ผลการหาปริมาณของอิเล็คตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่าง (Equivalence dose (ED))	25
3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD เพื่อหาแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง	35
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	39
4.1 การวิเคราะห์แร่องค์ประกอบของตัวอย่าง	39
4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า Equivalent dose (ED)	39
4.3 ผลการคำนวณอายุที่ได้จากการวิเคราะห์ค่า ED	42
4.4 การวิเคราะห์สรุปอายุที่ได้จากการทดลอง	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	44
5.1 สรุปผลอายุที่ได้จากการทดลอง	44
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	ญ

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1 รูปแสดงพื้นที่ศึกษา อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ (ที่มา https://th.wikipedia.org (รูปซ้าย) และ http://stat.dopa.go.th (รูปขวา))	3
2 รูปแสดงที่ตั้งของพื้นที่ศึกษาบนแผนที่จาก Google Earth Pro	3
3 รูปแสดงลักษณะความผิดปกติแบบต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในโครงสร้างของแร่	8
4 รูปแสดงลักษณะการสะสมตัวและการถูกปลดปล่อยของอิเล็กตรอนในเหตุการณ์ต่าง ๆ (ปรับปรุงจาก Feathers, 2003)	9
5 รูปแสดงพื้นที่ศึกษา บริเวณถนนสายโท 7 ใต้ ตำบลจันทบเพชร อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์	16
6 รูปแสดงการกระจายตัวของชั้นส่วนเตาเผาและตะกรันเหล็กบริเวณพื้นที่ศึกษา บริเวณถนนสายโท 7 ใต้	17
7 รูปแสดงตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา	17
8 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างสำหรับการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (W)	21
9 รูปแสดงการบรรจุตัวอย่างเพื่อทำการทดลองวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่าง	22
10 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างในห้องมืดเพื่อใช้ในการทดลองหาค่า Equivalence dose (ED)	23
11 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK1-1_06	26
12 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK1-2_08	29
13 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK4-1_02	32
14 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK4-2_12	33
15 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK1-2	35
16 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK2-1	36
17 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK3-1	37
18 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK4-1	38
19 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED ของตัวอย่าง BK1-1 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ	39

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
20 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED error (%) ของตัวอย่าง BK1-1 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ	40
21 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED ของตัวอย่าง BK1-2 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ	40
22 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED error (%) ของตัวอย่าง BK1-2 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ตารางแสดงประสิทธิภาพในการประยุกต์วิธีการหาอายุของตัวอย่างทางธรณีวิทยาและโบราณคดีชนิดต่าง ๆ โดยปริมาณของสัญลักษณ์ * จะแปรผันตามประสิทธิภาพ (Aitken, 1990)	10
2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีกับปริมาณรังสีชนิดต่าง ๆ ที่ธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิดปลดปล่อยออกมา (Bell, 1979)	11
3 ตารางแสดงภาพของตัวอย่างเตาเผา	18
4 ตารางแสดงข้อมูลและภาพของตัวอย่างตะกรันเหล็ก	19
5 ตารางแสดงผลการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (water content (W))	24
6 ตารางแสดงผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual Dose (AD))	25
7 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-1	26
8 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-2	29
9 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-1	32
10 แสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-2	34
11 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ผลอายุของตัวอย่างเตาเผา	42
12 ตารางแสดงสรุปผลอายุของตัวอย่าง BK1-1 และ BK1-2 เทียบกับข้อมูลการหาอายุจากแหล่งเตาเผาเดียวกันและแหล่งเตาเผาโบราณต่าง ๆ ในอำเภอบ้านกรวด	43

นิยามศัพท์เฉพาะ

Equivalence dose (ED)

Equivalence dose (ED) คือ ค่าปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่าง เนื่องจากกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) เป็นคุณสมบัติของธาตุบางชนิด ที่สามารถเปลี่ยนแปลงตัวเองเป็นธาตุชนิดอื่นที่มีความเสถียรมากกว่า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะมีการปลดปล่อยรังสีออกมาด้วย โดยที่ปริมาณรังสีที่ปลดปล่อยมาจากธาตุกัมมันตรังสีซึ่งเป็นต้นกำเนิดของรังสีจะวัดออกมาในหน่วยเบคเคอเรล (Becquerel (Bq)) เมื่อรังสีที่ปลดปล่อยออกมามีค่าสูง เช่น การอาบรังสีให้กับตัวอย่าง พลังงานที่ตัวอย่างได้รับจากการอาบรังสี เรียกว่า ปริมาณรังสีที่ได้รับ (radiation dose) มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gray (Gy)) ซึ่งสำหรับการทดลองการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงนั้นจะนำปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนมาใช้ในการคำนวณหาอายุ ซึ่งหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนดังกล่าวเกิดจากการจัดเรียงของโครงสร้างผลึกที่ไม่สมบูรณ์ของแร่ในธรรมชาติ โดยการสะสมตัวของอิเล็กตรอนดังกล่าวเกิดขึ้นจากการผลักอิเล็กตรอนลงไปหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นพลังงานจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ได้แก่ ยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K)

Annual dose (AD)

Annual dose (AD) คือ ค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ เนื่องจากกัมมันตภาพรังสี (Radioactivity) เป็นปฏิกิริยาที่มีอัตราในการสลายตัวคงที่ ในการทดลองการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงนั้นจะใช้อัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของปริมาณกัมมันตรังสีที่ถูกปลดปล่อย ได้แก่ รังสีแอลฟา รังสีเบตาและรังสีแกมมาที่ระยะเวลาในการปลดปล่อย 1 ปี ซึ่งเรียกว่า Annual dose มีหน่วยเป็น เกรย์ต่อปี (Gray/Year (Gy/Yr))

ตะกรันเหล็ก (Slag)

ตะกรันเหล็ก คือ ส่วนของเหลือหรือของเสียที่ได้จากกระบวนการถลุงเหล็ก ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่หลอมละลายพร้อมกับเหล็กในเตาถลุงเหล็ก

อายุ (Age)

อายุที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ในโครงการฉบับนี้มีหน่วยเป็นปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งเป็นอายุที่เทียบกับปีพุทธศักราช 2563

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แหล่งโบราณคดีนับเป็นหนึ่งในมรดกทางประวัติศาสตร์และวัฒนธรรมที่สำคัญ เนื่องจากการศึกษาแหล่งโบราณคดี เป็นเครื่องสะท้อนเรื่องราวในอดีต ทั้งยังมีคุณค่าทางด้านประวัติศาสตร์ สถาปัตยกรรม และศิลปกรรม เช่น โบราณสถาน สามารถบอกเรื่องราวทางประวัติศาสตร์จากรูปแบบของสถาปัตยกรรมที่มีลักษณะเฉพาะแต่ละยุคสมัยได้ ซึ่งในประเทศไทยนั้นได้มีการค้นพบแหล่งโบราณคดีที่มีความสำคัญมากมาย หนึ่งในแหล่งโบราณคดีนั้นก็คือ แหล่งเตาเผาโบราณ จังหวัดบุรีรัมย์ นักโบราณคดีและนักประวัติศาสตร์ให้ข้อสันนิษฐานโดยสรุปว่า จังหวัดบุรีรัมย์เคยเป็นที่ตั้งอาณาจักรอันยิ่งใหญ่รุ่งเรืองมาตั้งแต่สมัยทวารวดี (พุทธศตวรรษที่ 12-16) ต่อเนื่องจนถึงสมัยลพบุรี (พุทธศตวรรษที่ 16-18) จากนั้นก็เริ่มเสื่อมอำนาจลงและแตกแยกอาจจะด้วยเหตุภัยธรรมชาติหรือสงคราม ประชาชนกระจ่ายออกไปตั้งชุมชนเล็ก ๆ ตามป่าหรือชายแดนเรียกว่า “เขมรป่าดง” จากการสำรวจของกรมศิลปากรได้พบเตาเผาเครื่องเคลือบดินเผามากกว่า 300 เตาในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งเตาเผาโบราณอำเภอบ้านกรวด มีจำนวนเตาที่พบมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นแหล่งอุตสาหกรรมผลิตเครื่องเคลือบดินเผาที่มีขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง ซึ่งแสดงถึงเครื่องถ้วยวัฒนธรรมขอม มีอายุอยู่ในช่วงพุทธศตวรรษที่ 15-18 นอกจากนั้นแหล่งเตาเผาโบราณอำเภอบ้านกรวด ยังพบเป็นแหล่งโลหะกรรมที่มีความสำคัญ ได้แก่ แหล่งโลหะกรรมบ้านสายโท 7 และแหล่งโลหะกรรมบ้านเขาดินใต้ ซึ่งเป็นแหล่งที่พบร่องรอยกิจกรรมการถลุงเหล็กสมัยโบราณ พบโบราณวัตถุเป็นชิ้นส่วนของเตาถลุงเหล็ก และตะกรันเหล็กที่เกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กกระจ่ายอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งมีหลายงานวิจัยศึกษากระบวนการถลุงเหล็กและหาอายุเตาถลุงเหล็กของแหล่งเตาเผาโบราณบ้านกรวด อาทิเช่น อิศราวรรณ อยู่ป้อม (2553) และจิตรประสงค์ ลาภจิตร (2553) ซึ่งได้ข้อสรุปอายุอยู่ในช่วง 1100-1200 ปีก่อนปัจจุบัน ซึ่งสอดคล้องกับอายุของเตาเผาเครื่องเคลือบบ้านกรวด ที่มีการกำหนดอายุที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น ผู้จัดทำจึงมีความสนใจในการนำเตาถลุงเหล็กและตะกรันเหล็กที่ได้จากกระบวนการถลุงเหล็กของแหล่งโลหะกรรมบ้านสายโท 7 มาศึกษาหาอายุเพิ่มเติม

โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงของ ปาณิสรา นวสมัศกาล (2554) กล่าวว่า การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสง (Luminescence Dating) เป็นเทคนิคที่กลุ่มนักวิจัยทางวิทยาศาสตร์ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดอายุวัสดุทางธรณีวิทยา และโบราณคดีอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นตะกอนหรือเครื่องปั้นดินเผา โดยผลการศึกษาที่ผ่านมาบ่งชี้ว่าการกำหนดอายุด้วยวิธีการเรืองแสงนั้นมีความแม่นยำและถูกต้องแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตัวอย่างที่เหมาะสมในการนำมากำหนดอายุ จากการพิจารณาวิธีการหาอายุทาง

วิทยาศาสตร์ ความเหมาะสมของวัสดุที่นำมาใช้ในการหาอายุ ผู้จัดทำจึงนำเตาถลุงเหล็กและตะกรันเหล็กมาหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง (Luminescence Dating) ซึ่งเป็นวิธีการหาอายุที่มีประสิทธิภาพในการหาอายุของทั้งเตาเผาโบราณและตะกรันของโลหะ (Gautier, A. 2001) เพื่อความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูลทางด้านอายุ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการใช้อธิบายเรื่องราวทางประวัติศาสตร์ได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อหาอายุของเตาเผาโบราณด้วยวิธีเรืองแสง อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์

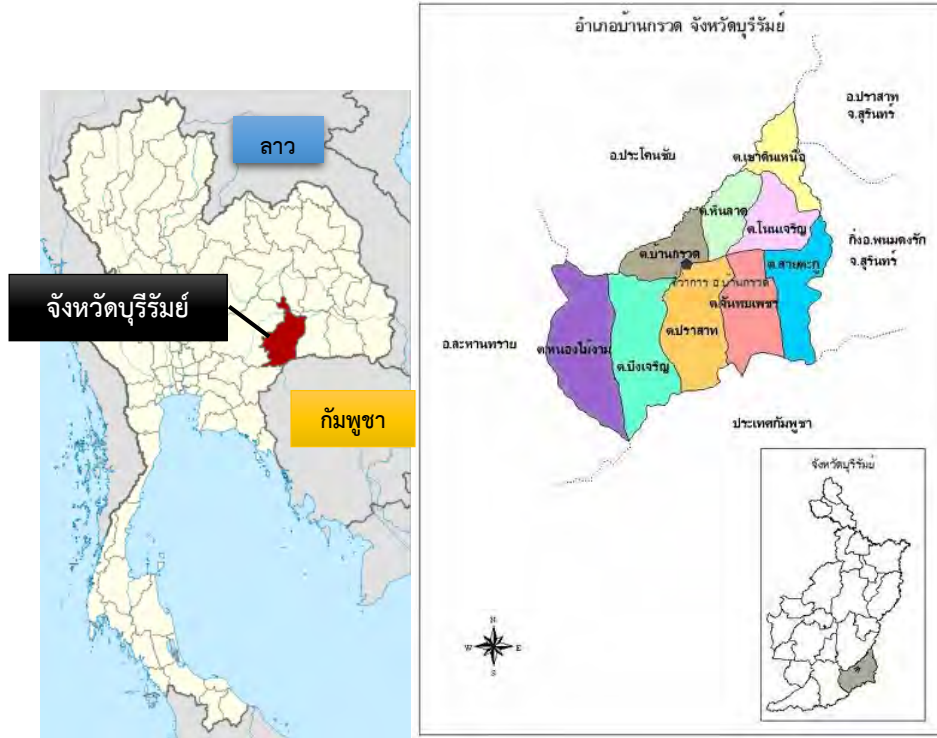
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองการหาอายุโดยวิธีเรืองแสง เพื่อนำไปใช้อธิบายข้อมูลในเชิงประวัติศาสตร์ได้

1.4 พื้นที่ศึกษา

1.4.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ตั้งอยู่บริเวณถนนสายโท 7 ใต้ ตำบลจันทบเพชร อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ บนพิกัดทางภูมิศาสตร์ ละติจูดที่ $14^{\circ} 23' 02''$ N และลองจิจูดที่ $103^{\circ} 10' 28''$ E ซึ่งเป็นแหล่งโลหะกรรมบ้านสายโท 7 มีลักษณะของพื้นที่เป็นแบบลอนลูกคลื่น ตัวแหล่งโบราณคดีเป็นเนินดินซึ่งพบเป็นชั้นส่วนของเศษเตาเผาโบราณ ตะกรันที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็ก มีการกระจายตัวอยู่บนเนินดินไม่น้อยกว่า 10 เนิน ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นร่องรอยของแหล่งถลุงเหล็กสมัยโบราณ แต่ปัจจุบันพื้นที่ดังกล่าวถูกใช้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม ประกอบด้วยไร่มันสำปะหลัง และสวนยางพารา และบางส่วนก็ถูกไถปรับเป็นพื้นที่ราบ



รูปที่ 1 รูปแสดงพื้นที่ศึกษา อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ (ที่มา <https://th.wikipedia.org> (รูปซ้าย) และ <http://stat.dopa.go.th> (รูปขวา))



รูปที่ 2 รูปแสดงที่ตั้งของพื้นที่ศึกษาบนแผนที่จาก Google Earth Pro

1.4.2 ข้อมูลทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

สภาพพื้นที่โดยทั่วไปของจังหวัดบุรีรัมย์ ทางตอนใต้ของจังหวัดเป็นภูเขาและพื้นที่สูง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขาพนมดงรัก ระดับความสูงตั้งแต่ 200 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลางขึ้นไป ครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 25 ของพื้นที่จังหวัด ได้แก่ พื้นที่ด้านทิศตะวันตกของอำเภอหนองหงส์ และหนองกี่ ตอนใต้ของอำเภอนางรอง ปะคำ ละหานทราย และบ้านกรวด ตอนกลางของจังหวัดเป็นพื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้น ความสูงระหว่าง 150-200 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง ครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 60 ของพื้นที่จังหวัดอยู่ในเขตอำเภอบัรบรัมย์ พลับพลาชัย เมืองบุรีรัมย์ กระสัง ลำปลายมาศ และคูเมือง และบางส่วนของอำเภอนางรอง หนองกี่ หนองหงส์ สตึก และพุทไธสง บริเวณอำเภอบ้านกรวด นางรอง ลำปลายมาศ เป็นที่ราบลุ่มริมฝั่งของลำปลายมาศ ลำนางรอง ลำปะเทียบ ลำทะเมนชัย ห้วยราช และห้วยตาตุ่ง ส่วนพื้นที่ตอนใต้ของอำเภอพุทไธสง คูเมือง และเมืองบุรีรัมย์ เป็นพื้นที่ภูเขาสูงและพื้นที่ป่าไม้ ส่วนที่เหลือเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำมูล ความสูงเฉลี่ยต่ำกว่า 150 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง อยู่ทางตอนบนของอำเภอพุทไธสง คูเมือง สตึก และนาโพธิ์

แหล่งน้ำธรรมชาติสำคัญ ได้แก่ แม่น้ำมูล แม่น้ำลำปลายมาศ ลำนางรอง ลำปะเทีย ลำพังชู ลำจักราช ลำห้วยแอก ลำสะเทต ลำตะโคง เป็นต้น เทือกเขาและภูเขาสำคัญประกอบด้วย เทือกเขาสันกำแพง ซึ่งต่อจากเทือกเขาตงพญาเย็น ตั้งแต่เขาเขียวในเขตอำเภอมืองนครนายกมาสิ้นสุดที่ช่องตะโก อำเภอโนนดินแดง จังหวัดบุรีรัมย์ รวมความยาวประมาณ 137 กิโลเมตร และเทือกเขาพนมดงรัก ซึ่งเริ่มจากช่องเขาตะโกทอดยาวไปทางตะวันออกเฉียงเหนือผ่านแดนไทย - กัมพูชา ผ่านจังหวัดสุรินทร์ ศรีสะเกษ ไปสิ้นสุดที่อำเภอน้ำยืน จังหวัดอุบลราชธานี รวมความยาวประมาณ 335 กิโลเมตร นอกจากนี้จังหวัดบุรีรัมย์ยังพบภูเขาไฟที่เกิดขึ้นเนื่องจากการประทุของลาวาขึ้นมา บนแผ่นทวีปเมื่อ 9 แสนปีล่วงมา ได้แก่ ภูเขาไฟพนมรุ้ง ภูเขาไฟอังคาร และภูเขาไฟหลุบ อำเภอลำทะเมนชัย ภูเขาไฟไทรบุรี และภูเขาไฟเขาดอก อำเภอบัรบรัมย์ และภูเขาไฟกระโดง อำเภอมืองบุรีรัมย์

ทรัพยากรแร่ของจังหวัดบุรีรัมย์ ยุทธศาสตร์การบริหารจัดการทรัพยากรแร่ พ.ศ. 2550-2554 ของกรมทรัพยากรธรณี จัดกลุ่มทรัพยากรแร่ของประเทศไทยตามการใช้ประโยชน์ออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มแร่เพื่อการพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐานและโครงการขนาดใหญ่ของรัฐ ซึ่งแบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ
 - 1.1 กลุ่มแร่เพื่ออุตสาหกรรมซีเมนต์ เช่น หินปูน หินดินดาน เหล็ก ยิปซัม
 - 1.2 กลุ่มแร่เพื่อการก่อสร้าง เช่น หินชนิดต่างๆ ที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างและใช้เป็นหินประดับ เช่น หินปูน หินแกรนิต หินอ่อน หินทราย หินแอนดีไซต์ และทรายก่อสร้าง
2. กลุ่มแร่พลังงาน เช่น ถ่านหิน พีโตรเลียม หินน้ำมัน และแร่กัมมันตรังสี

3. กลุ่มแร่เพื่อสนับสนุนเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม มี 4 กลุ่มย่อย คือ
 - 3.1 กลุ่มแร่โลหะมีค่า เช่น ทองคำ เงิน
 - 3.2 กลุ่มแร่โลหะ เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี พลวง ดีบุก ทังสแตน เหล็ก และแมงกานีส
 - 3.3 กลุ่มแร่อุตสาหกรรม เช่น ดิน (ดินขาวและบอลล์เคลย์) เฟลด์สปาร์ แปะไรต์ ฟลูออไรต์ แกลีโธหิน ทราายแก้ว หินปูน ยิปซัม
 - 3.4 กลุ่มแร่รัตนชาติ เช่น พลอย (ทับทิมและแซฟไฟร์)
4. กลุ่มแร่เพื่ออุตสาหกรรมเทคโนโลยีขั้นสูง เช่น แร่โคลัมไบต์ - แทนทาไลต์ และแร่หายาก
5. กลุ่มแร่เพื่อการเกษตร เช่น โพแทช โดโลไมต์ ฟอสเฟต

แหล่งดินเหนียวอำเภอบ้านกรวด แบ่งเป็น 3 แหล่ง ประกอบด้วย

- (1) แหล่งเตานายเจียน บ้านถนน ตำบลหินลาด ครอบคลุมพื้นที่ 1.1 ตารางกิโลเมตร ห่างจากแหล่งดินประมาณ 500 เมตร มีเตาเผาโบราณชื่อเตานายเจียน เป็นเตาเผาเครื่องถ้วยวัฒนธรรมขอมในพุทธศตวรรษที่ 15-17 ผลการศึกษาตัวอย่างดินจากการเจาะสำรวจ 6 ตัวอย่าง พบว่าชั้นดินมี 3 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นบนสุดเป็นชั้นดินปนทรายร้อยละ 50 สีเทาขาว มีจุดประสีแดงอมม่วง ร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 1.5 เมตร ชั้นที่สองเป็นชั้นดินเหนียวสีเทาขาว มีจุดประสีเหลืองอมส้ม ร้อยละ 10 ความหนาเฉลี่ย 2 เมตร และชั้นที่สามเป็นชั้นดินปนทรายร้อยละ 30 สีเทาขาว มีจุดประสีชมพูร้อยละ 10 ชั้นดินที่นำมาใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาได้ คือ ชั้นที่สอง
- (2) แหล่งเตาสวาย บ้านโคกใหญ่ ตำบลโนนเจริญ ครอบคลุมพื้นที่ 0.42 ตารางกิโลเมตร ห่างจากแหล่งดินประมาณ 50 เมตร มีเตาเผาโบราณยุคเดียวกับเตานายเจียนชื่อเตาสวาย ผลการศึกษาตัวอย่างดินจากการเจาะสำรวจ 6 ตัวอย่าง พบว่าแหล่งชั้นดินมีทั้งหมด 5 ชั้น คือ ชั้นบนสุดเป็นดินปนทรายร้อยละ 10 สีน้ำตาลอมดำ มีจุดประสีส้มอมเหลืองร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 0.4 เมตร ชั้นที่สองเป็นชั้นดินเหนียว สีน้ำตาลอมเหลือง มีทรายปนร้อยละ 1-2 มีจุดประสีส้มอมเหลือง ร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 0.5 เมตร ชั้นที่สามเป็นชั้นดินเหนียวปนลูกรัง สีเทาขาวอมส้ม มีลูกรังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1-0.3 เซนติเมตรปนร้อยละ 5 มีจุดประสีแดงอมส้มร้อยละ 15 ความหนาเฉลี่ย 0.6 เมตร ชั้นที่สี่เป็นชั้นดินเหนียวปนทรายร้อยละ 1-2 สีเทาขาว มีจุดประสีแดงร้อยละ 20 ความหนาเฉลี่ย 1.2 เมตร ชั้นที่ห้าเป็นชั้นดินปนทรายร้อยละ 10-15 สีเทาขาว มีจุดประสีเหลืองร้อยละ 15 ชั้นดินที่นำมาใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาได้ คือ ชั้นที่สองและชั้นที่สี่ ความหนาเฉลี่ยรวมกัน 1.7 เมตร

- (3) แหล่งบ้านโคกยาง บ้านโคกยาง ตำบลบ้านกรวด ครอบคลุมพื้นที่ 0.38 ตารางกิโลเมตร ผลการศึกษา ตัวอย่างดินจากการเจาะสำรวจ 4 ตัวอย่าง พบว่าแหล่งดินนี้ประกอบด้วยชั้นดิน 5 ชั้น คือ ชั้นบนสุดเป็นชั้นดินเหนียวสีน้ำตาล มีจุดประสีเหลืองร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 0.4 เมตร ชั้นที่สองเป็นชั้นดินเหนียวสีเทา มีจุดประสีแดงอมน้ำตาลร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 1.1 เมตร ชั้นที่สามเป็นชั้นดินเหนียว สีเทาอมเหลือง มีจุดประสีแดงร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 0.9 เมตร ชั้นที่สี่เป็นชั้นดินเหนียวสีเทาขาว มีจุดประสีแดงอ่อนอมเหลืองร้อยละ 5 ความหนาเฉลี่ย 1.3 เมตร ชั้นที่ห้าเป็นชั้นดินเหนียวปนทรายสีเทาขาว มีทรายปนร้อยละ 60-70 ชั้นดินที่นำมาใช้ทำเครื่องปั้นดินเผาได้ คือ ชั้นที่สอง ชั้นที่สาม และชั้นที่สี่ความหนาเฉลี่ยรวมกัน 3.3 เมตร

1.4.3 ข้อมูลทางประวัติศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา

ประวัติศาสตร์ตามข้อมูลในศูนย์วัฒนธรรมอำเภอบ้านกรวดนั้น ได้ระบุว่า ในอดีตอำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ เคยเป็นแหล่งผลิตเครื่องเคลือบที่ใหญ่ที่สุดของอาณาจักรขอมโบราณ โดยพบกระจายตัวทั่วท้องที่อำเภอบ้านกรวด อำเภอละหานทราย อำเภอบางขัน และบางส่วนของอำเภอกาบเชิง พบเตาเผาเครื่องเคลือบประมาณ 300 กว่าเตา โดยอำเภอบ้านกรวดเป็นพื้นที่ที่พบมากที่สุดคือมากกว่า 100 เตา แต่ในกัมพูชาเองกลับไม่พบร่องรอยของการเผาหรือเตาเผา ซึ่งนักโบราณคดีสันนิษฐานว่ามีอายุประมาณพุทธศตวรรษที่ 14-19 โดยเตาเผาเหล่านี้ผลิตเครื่องถ้วยเขมร เพื่อเป็นสินค้าป้อนให้กับเมืองต่างๆ ในกัมพูชา และในภูมิภาคต่างๆ โดยมีการทำอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และขยายขอบเขตการผลิตไปยังพื้นที่ใกล้เคียงอีกด้วย โดยเมื่อปี พ.ศ. 2519 กรมศิลปากรได้ดำเนินการขุดค้นแหล่งเตาเผาในอำเภอบ้านกรวดเป็นครั้งแรก พบว่า มีเครื่องเคลือบดินเผาหลากหลายรูปแบบ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวที่โดดเด่น ต่อมาในปี พ.ศ. 2530 มีการศึกษาทางโบราณคดีในพื้นที่อำเภอบ้านกรวด โดยโครงการโบราณคดีประเทศไทย (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ) ของกองโบราณคดี กรมศิลปากร พบเนินดินที่มีโบราณวัตถุที่เกี่ยวข้องกับการถลุงเหล็กบ้านเขาดินใต้ ทำให้ทราบว่าบริเวณดังกล่าวเป็นแหล่งโบราณคดีประเภทถลุงเหล็กสมัยโบราณแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ต่อมาในปี พ.ศ. 2548 มีการดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง การค้นหาและพัฒนาสารสนเทศภูมิศาสตร์ของถนนโบราณสมัยพระเจ้าชัยวรมันที่ 7 ผลการดำเนินการในระยะแรก พบว่า มีแหล่งเตาถลุงเหล็กสมัยโบราณและแหล่งเตาเผาภาชนะดินเผาสมัยโบราณจำนวนมากตั้งอยู่ในเส้นแนวสัญจรโบราณ ทั้งสามารถระบุตำแหน่งแหล่งโลหะกรรมได้ 67 แหล่ง (Hendrickson,2010 และ Sokrithy et al.,2015) โดยแหล่งโลหะกรรมที่มีความสำคัญของอำเภอบ้านกรวด ได้แก่ แหล่งโลหะกรรมบ้านสายโท 7 และแหล่งโลหะกรรมบ้านเขาดินใต้ ซึ่งเป็นพื้นที่ใกล้เคียงกัน มีหลักฐานทางโบราณคดีที่ขุดพบได้ ดังนี้

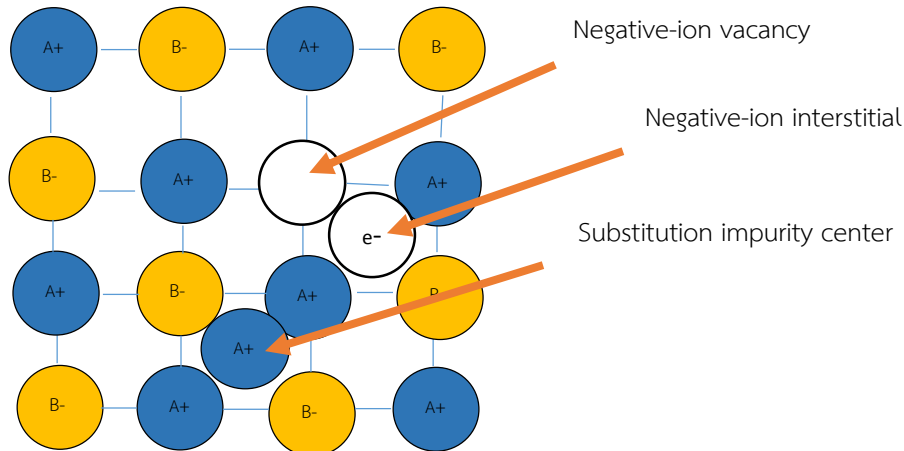
จากการขุดค้นแหล่งโลกรกรรมบ้านสายโท 7 พบว่าภายในหลุมขุดค้นพบตะกั่วที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กเป็นจำนวนมากกระจายอยู่ทั่วพื้นที่การขุดค้น และโบราณวัตถุอื่น ๆ ที่พบ ได้แก่ เศษภาชนะดินเผา ก้อนดินเผา ก้อนดินเผาไฟ เศษเครื่องมือเหล็ก ชิ้นส่วนกำไลสำริด ชิ้นส่วนกำไลข้อมือที่ทำจากกระดูกสัตว์ เศษกระดูกสัตว์ทั้งวัวควายและหมู เปลือกหอย โครงกระดูกคน ลูกปัดอะเกต กระสุนดินเผา ลูกปัดหินอะเกต ซากเตาถลุงประมาณ 10 เตา ส่วนประกอบของเตาถลุง ได้แก่ ชิ้นส่วนผนังเตา ชิ้นส่วนดินเผาไฟ ก้อนดินเผาสำหรับอุดช่องดักตะกั่วที่ผนังเตาถลุงแร่ ชิ้นส่วนท่อดินเผาสำหรับหุ้มปลายท่อที่สุบลม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงร่องรอยกิจกรรมการถลุงเหล็กในพื้นที่แหล่งโบราณคดีดังกล่าว ซึ่งมีอายุราวพุทธศตวรรษที่ 15-18 ด้วยการตรวจสอบอายุจากตัวอย่างถ่านในชั้นทับถมของซากเตาถลุงเหล็ก และจากการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน (Thermoluminescence (TL))

1.5 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.1 ทฤษฎีการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง

หลักการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง Aitken (1985) ได้เสนอขึ้นโดยอาศัยหลักการของผลึกแร่ที่เกิดจากการทำพันธะไอออนิกของธาตุองค์ประกอบซึ่งเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างธาตุที่มีประจุบวก และธาตุที่มีประจุลบ โดยในเชิงทฤษฎีการเกิดพันธะไอออนิกจะต้องประกอบด้วยธาตุที่มีประจุบวกและธาตุที่มีประจุลบในปริมาณที่เท่ากันเพื่อความสมดุลและความมีเสถียรภาพ แต่การจัดเรียงของอะตอมของธาตุในธรรมชาติสามารถเกิดข้อบกพร่องขึ้นได้ เนื่องจากการจัดเรียงอะตอมของธาตุในธรรมชาติอาจเกิดความไม่เท่ากันของปริมาณธาตุที่มีประจุบวกและธาตุที่มีประจุลบ ซึ่งข้อบกพร่องของผลึกของแร่ในธรรมชาตินี้มีสาเหตุมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ การแทนที่ของไอออนของธาตุมลทินในโครงสร้างผลึกแร่ และการได้รับอิทธิพลจากธาตุกัมมันตรังสีซึ่งส่งผลให้ธาตุที่เป็นประจุบวกและธาตุที่เป็นประจุลบในผลึกแร่ไม่สามารถที่จะจัดเรียงได้อย่างปกติ หรือสามารถหลุดออกไปได้จากผลึกแร่ จากปัจจัยเหล่านี้ ทำให้โครงร่างผลึก (Lattice) ของแร่ในธรรมชาติเกิดความบกพร่องเกิดเป็นความผิดปกติ 3 รูปแบบ ที่กลายเป็นหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (Electron traps) ภายในโครงสร้างแร่ ได้แก่

- 1) ความผิดปกติเนื่องจากประจุลบหายไปจากตำแหน่งที่ควรอยู่ (Negative-ion vacancy)
- 2) ความผิดปกติเนื่องจากประจุลบแทรกอยู่ระหว่างกลาง (Negative-ion interstitial)
- 3) ความผิดปกติเนื่องจากการแทนที่ของศูนย์กลางความไม่บริสุทธิ์หรือมีธาตุอื่นเข้ามาแทนที่ในช่องว่าง (Substitution impurity center)

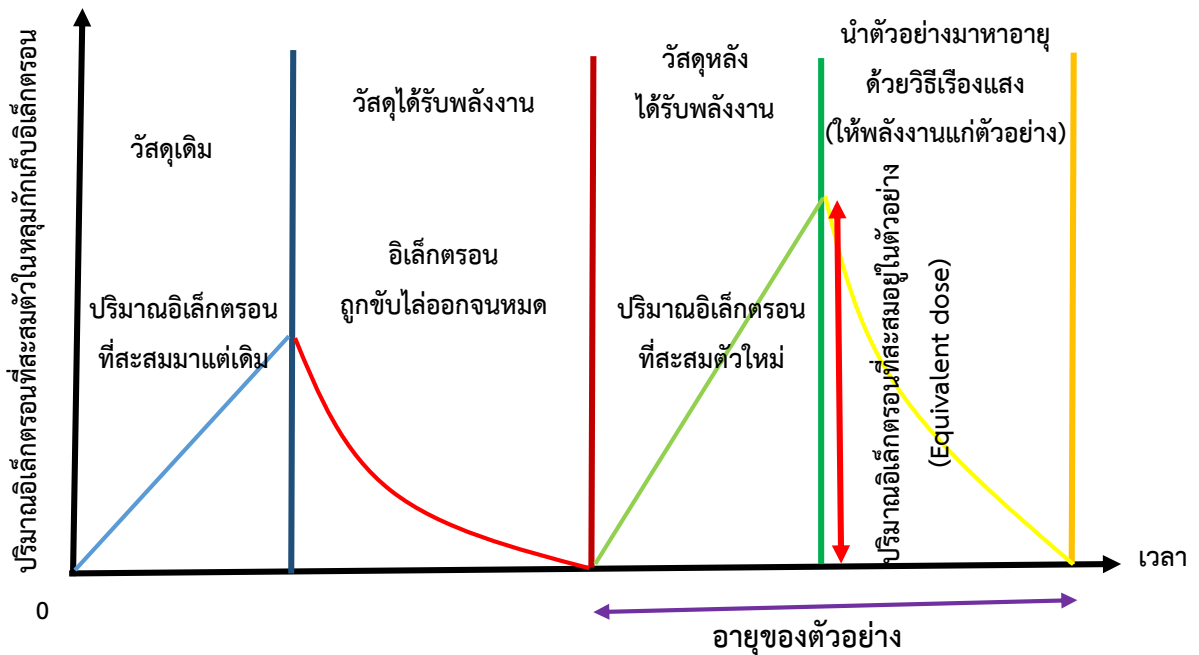


รูปที่ 3 รูปแสดงลักษณะความผิดปกติแบบต่าง ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในโครงผลึกของแร่

การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงได้นำหลักการปลดปล่อยพลังงานจากการสลายตัวของธาตุยูเรเนียม ทอเรียมและโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ เป็นตัวกระตุ้นการผลึกให้อิเล็กตรอนในวัสดุเข้าไปสะสมตัวอยู่ในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนดังกล่าว ในอัตราการสะสมตัวที่คงที่ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีที่มีค่าคงที่ตามแต่ชนิดของธาตุกัมมันตรังสีนั้น ๆ จึงทำให้เกิดการสะสมตัวของอิเล็กตรอนในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนเรื่อยมาจนกระทั่งเมื่อให้พลังงานแก่วัสดุ เช่น การโดนแสงของตะกอน ก่อนการทับถมและการเผาวัสดุจำพวกอิฐหรือเซรามิค เป็นต้น ซึ่งเป็นการให้พลังงานค่าหนึ่งที่ทำให้ให้อิเล็กตรอนในหลุมกักเก็บขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) และในทางทฤษฎีได้ตั้งสมมติฐานว่า พลังงานดังกล่าวมากพอจะทำให้ให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กตรอนจนหมด โดยภายหลังการให้พลังงานหรือสิ้นสุดการเผา อิเล็กตรอนจะกลับมาสะสมตัวใหม่อีกครั้งในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การรวมกันอีกครั้ง (recombination) พร้อมทั้งอิเล็กตรอนดังกล่าวก็จะกลับมาอยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาจนกว่าจะมีการให้พลังงานเพื่อการขับไล่อิเล็กตรอนให้ออกจากหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน (Preusser et al, 2008)

จากหลักการนี้นักวิทยาศาสตร์จึงนำมาประยุกต์ใช้ในการหาอายุ โดยทำการทดลองให้พลังงานแก่อิเล็กตรอน ซึ่งการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนนั้นมี 2 รูปแบบ คือกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งเรียกว่า วิธีเรืองแสงความร้อน (Thermoluminescence (TL)) ซึ่งคิดค้นครั้งแรกโดย Aitken (1985) และกระตุ้นด้วยแสง ซึ่งเรียกว่า วิธีเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง (Optically stimulated luminescence (OSL)) ซึ่งคิดค้นครั้ง

แรกโดย Huntley et al. (1985) ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบใช้หลักการเดียวกันคือการให้พลังงานดังกล่าวทำให้ อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) หรืออิเล็กตรอนไปอยู่ในระดับชั้นพลังงานอื่นที่สูงกว่า และเมื่อกลับมาอยู่ในสภาวะเสถียร (Ground State) อิเล็กตรอนที่หลุดออกดังกล่าวจึงต้องคายพลังงาน ออกมา จึงเกิดปรากฏการณ์เรืองแสง (Luminescence) ขึ้น โดยจะเรียกค่าที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 รูปแบบนี้ ว่า Equivalence dose (ED) และการทำการทดลองหาพลังงานที่ปลดปล่อยโดยธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ ของ Aitken (1985) ซึ่งสามารถผลักให้อิเล็กตรอนเข้าไปสะสมตัวในหลุมกักเก็บอิเล็กตรอน โดยวัดค่าความ เข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีเป็นเวลา 1 ปี ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาค่า Annual dose (AD) จากนั้นจึงใช้ ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้ทั้ง ED และ AD มาหาความสัมพันธ์ระหว่างกันเพื่อคำนวณหาอายุ โดยอายุที่ได้จาก การทดลองโดยวิธีนี้จะเป็นอายุที่นับตั้งแต่วัตถุนั้นได้รับพลังงานเป็นครั้งสุดท้าย ซึ่งเป็นเวลาเดียวกันกับที่ ตะกอนได้รับแสงเป็นครั้งสุดท้ายก่อนที่จะสะสมตัวโดยมีตะกอนอื่นมาปิดทับ และเป็นเวลาเดียวกันกับที่ เครื่องปั้นดินเผาผ่านกระบวนการเผาขณะผลิต (Martini and Sibilia, 2001)



รูปที่ 4 รูปแสดงลักษณะการสะสมตัวและการถูกปลดปล่อยของอิเล็กตรอนในเหตุการณ์ต่าง ๆ (ปรับปรุงจาก Feathers, 2003)

สำหรับโครงการฉบับนี้จะใช้แร่ควอตซ์ (quartz) ในการทำการทดลอง เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้ในการหาอายุนั้นมีแร่องค์ประกอบหลักเป็นแร่ควอตซ์ (quartz) อีกทั้งแร่ควอตซ์ (quartz) ยังมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการใช้หาอายุด้วยวิธีเรืองแสงเป็นอย่างดี ประกอบกับวิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อสกัดแร่ควอตซ์ (quartz) ออกมานั้นสามารถทำได้ง่าย มีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนอีกด้วย

1.5.3 การคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual dose (AD))

การทดลองวัดค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่าง ได้แก่ โพแทสเซียม (K) ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ซึ่งค่าที่ได้จากเครื่องมือนี้จะอยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่นับได้กับพลังงานของรังสีแกมมา จึงต้องทำการแปลผลข้อมูลจากกราฟให้เป็นปริมาณของธาตุยูเรเนียมและทอเรียม ในหน่วย ppm และปริมาณของโพแทสเซียมออกไซด์ในหน่วยร้อยละ (%) จากนั้นทำการแปลงค่าปริมาณความเข้มข้นที่วัดได้ให้เป็นหน่วยเกรย์ (Gy) โดยใช้ตารางความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกัมมันตรังสี (หน่วย ppm หรือ %) และอัตราการแผ่รังสีในหน่วยเกรย์ต่อปี (Gy/Yr) ของ Bell (1979)

ตารางที่ 2 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีกับปริมาณรังสีชนิดต่าง ๆ ที่ธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิดปลดปล่อยออกมา (Bell, 1979)

อนุภาค	ความเข้มข้น	ปริมาณ radionuclide ($\mu\text{Gy}/\text{Yr}$)		
		แอลฟา	เบตา	แกมมา
Thorium				
- No thoron loss	1 ppm	738	28.6	51.4
- 100 % thoron loss		309	10.3	20.8
Uranium				
- No radon loss	1 ppm	2783	146.2	114.8
- 100 % radon loss		1262	60.9	5.6
Natural potassium	1% K ₂ O	-	689.3	206.9
	1% K	-	830.3	249.2
Natural rubidium	100 ppm Rb	-	46.4	-

การคำนวณหาค่า AD นั้นจะต้องใช้ค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (W) มาประกอบด้วย เนื่องจากปริมาณน้ำในตัวอย่างนั้นจะลดทอนประสิทธิภาพในการทะลุทะลวงของรังสีชนิดต่าง ๆ ลง โดยจะลดทอนประสิทธิภาพของรังสีแอลฟา 50% ประสิทธิภาพของรังสีเบตา 25% และประสิทธิภาพของรังสีแกมมา 14% (Aitken, 1990) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยของขนาดตะกอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล ซึ่งส่งผลต่อการคำนวณค่า AD เพราะคุณสมบัติในการทะลุทะลวงเข้าไปในขนาดเม็ดตะกอนที่ต่างกันของรังสีแต่ละชนิดย่อมมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน

จากปัจจัยทั้งหมดข้างต้นจึงใช้สูตรในการคำนวณหาค่า AD ของ Aitken (1985) ที่ว่า

$$AD = D\alpha + D\beta + D\gamma + DC \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดยที่ AD คือ ค่า Annual Dose ทั้งหมด มีหน่วยเป็นเกรย์ต่อปี (Gy/Yr)

$D\alpha$ คือ ค่า Annual Dose จากรังสีแอลฟา มีค่าเท่ากับ $\frac{a(2783U+783Th)}{1+1.50W}$

$D\beta$ คือ ค่า Annual Dose จากรังสีเบตา มีค่าเท่ากับ $\frac{b(146.2U+28.6Th+689.3K)}{1+1.25W}$

$D\gamma$ คือ ค่า Annual Dose จากรังสีแกมมา มีค่าเท่ากับ $\frac{114.18U+51.4Th+206.9K}{1+1.14W}$

DC คือ ค่า Annual Dose จากรังสีคอสมิก กำหนดให้มีค่าคงที่ เท่ากับ 0.1

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

a และ b ขึ้นอยู่กับขนาดเม็ดตะกอน และ W คือ ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง

1.5.4 การคำนวณค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สะสมตัวในตัวอย่าง Equivalence dose (ED)

การทดลองหาค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ที่สะสมตัวในตัวอย่างด้วยเครื่อง TL/OSL Reader ค่าที่ได้จากเครื่องมือจะแสดงอยู่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจวัดได้จากตัวอย่างในหน่วย count/sec กับเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นตัวอย่าง (exposure time) ในหน่วยวินาที ซึ่งเรียกกราฟนี้ว่า Glow curve โดยจะต้องนำกราฟดังกล่าวไปทำการแปลผลการทดลองให้อยู่ในรูป Growth curve เพื่อแปลผลปริมาณของอิเล็กทรอนิกส์ที่ตรวจวัดได้ให้มีหน่วยเป็นเกรย์ (Gy) ด้วยการใช้วิธี additive (Aitken, 1985) โดยการนำแร่ควอตซ์หลังการตรวจวัดปริมาณ

อิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่างตามธรรมชาติไปทำการอาบรังสีที่ทราบค่าในช่วงค่าต่าง ๆ ในหน่วยเกรย์ (Gy) แล้วทำการวัดปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่างหลังการอาบรังสีที่ทราบค่าต่าง ๆ ในหน่วยเกรย์ (Gy) ซึ่งจะต้องทำอย่างน้อย 3 ค่า เพื่อสร้างกราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนที่วัดได้จากตัวอย่างหลังอาบรังสีแต่ละค่าในหน่วย count/sec กับปริมาณอิเล็กตรอนที่ใช้ในการอาบรังสีแต่ละครั้งในหน่วยเกรย์ (Gy) และนำกราฟเส้นตรงนี้ไปเทียบกับปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมในตัวอย่างตามธรรมชาติที่วัดได้เพื่อวิเคราะห์ค่า ED ในหน่วยเกรย์ (Gy)

1.5.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.5.5.1 การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง

Hazenfratz et al. (2013) ได้ทำการศึกษาหาอายุของเครื่องปั้นดินเผาจากแหล่งโบราณคดี Osvaldo และ Lago Grande บริเวณตอนกลางของป่าแอมะซอน (Central Amazon) ด้วยวิธีเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง (Optically stimulated luminescence (OSL)) ซึ่งทำการทดลองแบบ single-aliquot regenerative-dose (SAR) ผลการคำนวณการหาอายุแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในตัวอย่างเป็นตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องคำนึงถึง ไม่สามารถละทิ้งได้ เนื่องจากบริเวณตอนกลางของป่าแอมะซอนมีความชื้นในดินสูง ส่งผลต่อปริมาณน้ำในตัวอย่างเครื่องปั้นดินเผา ผลของอายุที่ได้อยู่ระหว่าง 867 ± 101 ปี และ 1154 ± 62 ปี ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลระยะเวลาที่มีการครอบครองอยู่ของแหล่งโบราณคดีดังกล่าว

Pailoplee et al. (2016) ได้ทำการศึกษาหาอายุจากตัวอย่างอิฐ บริเวณแหล่งโบราณคดีทุ่งตึก อำเภอตะกั่วป่า จังหวัดพังงา ผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าต่ำสุดของค่า ED ที่วัดด้วยวิธีเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยแสง (Optically stimulated luminescence (OSL)) มีค่าใกล้เคียงกันกับค่า ED ที่วัดด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน (Thermoluminescence (TL)) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในการหาอายุของอิฐ โดยมีการคำนวณหาอายุแบบ Central Age Model (CAM) และ Minimum Age Model (MAM) โดยพิจารณาจากการกระจายตัวของค่า ED ตามหลักของ Dulle et al. (2008)

1.5.5.2 การหาอายุตะกรันเหล็กด้วยวิธีเรืองแสง

G. Rower et al. (1983) ทำการหาอายุตะกรันเหล็กด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน (Thermoluminescence (TL)) โดยได้มีการแบ่งประเภทของตะกรันในเบื้องต้นออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ glassy slags, aphanitic slags และ porous slags โดยพบว่าตะกรันเหล็กประเภท porous slags มีค่าสัญญาณ TL ที่มีประสิทธิภาพในการนำไปใช้ในการคำนวณอายุได้ดีที่สุดในขณะที่อีก 2 ประเภทแทบจะไม่เกิดสัญญาณ TL

M. Haustein et al. (2003) ได้ทำการหาอายุตะกรันเหล็กด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน (Thermo luminescence (TL)) โดยนำตะกรันเหล็กจากบริเวณต่าง ๆ ในทวีปยุโรป ซึ่งมีอายุที่แตกต่างกัน เทียบเคียงกับการหาอายุจากคาร์บอน-14 และอายุทางประวัติศาสตร์ งานวิจัยดังกล่าวมีการศึกษาแร่องค์ประกอบของตะกรันเหล็ก และพิจารณาเลือกใช้การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงซึ่งเป็นวิธีที่มีศักยภาพและเหมาะสมกับกลุ่มของแร่ตัวอย่าง โดยได้มีการพัฒนาวิธีการทดลองแยกแร่ควอตซ์ออกจากตะกรันเหล็กซึ่งเป็นวิธีการที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากแร่องค์ประกอบในตะกรันเหล็กที่มีความเสถียรภาพทางเคมีต่ำและมีความซับซ้อนอย่างมาก ทำให้เป็นข้อจำกัดในการหาอายุของตะกรันเหล็ก ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวสามารถแยกแร่ควอตซ์ออกมาได้ ทำให้ผลอายุของตะกรันเหล็กที่ได้สอดคล้องกับอายุที่ใช้ในการอ้างอิง (อายุจากการใช้วิธีคาร์บอน-14 และอายุทางประวัติศาสตร์) แสดงให้เห็นว่าผลอายุที่ได้นั้นมีประสิทธิภาพ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แต่บางตัวอย่างพบว่าผลอายุที่ได้ค่อนข้างแตกต่างกับอายุที่ใช้ในการอ้างอิงเนื่องจากแร่ควอตซ์ที่สกัดออกมาได้มีปริมาณน้อยมาก อีกทั้งธาตุกัมมันตรังสีในตะกรันเหล็กยังเป็นปัญหาหลักที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการหาอายุอีกด้วย

1.5.5.3 แร่องค์ประกอบในตะกรันเหล็ก

Chuenpee et al. (2014) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กด้วยวิธี XRF และแร่องค์ประกอบของตะกรันเหล็กด้วย SEM และ XRD ของแหล่งโบราณคดีบ้านเขาดินใต้ อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ จำนวน 5 ตัวอย่าง เพื่อทำการจำแนกประเภทของตะกรันเหล็ก ซึ่งจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ platy slags และ lumpy slags ซึ่งแร่องค์ประกอบหลักของตะกรันเหล็กที่พบคือ Fayalite, Hercynite และ Quartz โดยมี Fayalite เป็นแร่องค์ประกอบโดยส่วนใหญ่ โดยสามารถสรุปได้ว่าเกิดจากกระบวนการถลุงเหล็กแบบวิธีเดียวกัน (การถลุงแบบทางตรง) และแร่เหล็กที่นำมาใช้ในการถลุงมาจากแหล่งแร่เดียวกัน

1.5.5.4 ข้อจำกัดของการหาอายุด้วยวิธีเรืองแสง

J. Wallinga (2015) การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงมีความคลาดเคลื่อนอย่างน้อย 4-5% ซึ่งเกิดจากการวิเคราะห์ผลจากการหาค่า ED และค่า AD ซึ่งทั้งสององค์ประกอบมีความเป็นไปได้เท่า ๆ กัน จึงควรถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากความคลาดเคลื่อนการประมาณอายุ นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณอีกด้วย

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก Equivalent Dose ได้แก่ individual aliquots, sample, calibration และ total equivalent dose uncertainty

ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก Annual Dose ได้แก่ concentration measurements, conversion factors, attenuation factors, cosmic rays และ alpha particles

1.5.5.5 หลักการทำงานของเครื่อง Lexsysmart-Automated TL/OSL Reader

ข้อมูลจากคู่มือการใช้เครื่อง Lexsysmart-Automated TL/OSL Reader ระบุว่า การทำงานของเครื่องดังกล่าวประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนควบคุมความร้อน ส่วนกระตุ้นด้วยแสง ส่วนวัดปริมาณแสง ส่วนกรองแสงและส่วนอาบรังสีเบตา

- 1) ส่วนควบคุมความร้อน (Heating unit) ใช้หลักการของการให้พลังงานกระแสไฟฟ้าไปยังตัวทำความร้อน (heater) เพื่อให้ความร้อนแก่แผ่นโลหะที่ใส่ตัวอย่าง (sample holder) ซึ่งแผ่นโลหะที่ใส่ตัวอย่างนั้นส่วนใหญ่จะใช้เป็นโลหะจำพวกแผ่นโมลิบดีนัม (molybdenum) หรือแผ่นนิกเกิลโครเมียม (Ni-chrome) ความร้อนของแผ่นโลหะที่ใส่ตัวอย่างมีอัตราความร้อน 200 องศาเซลเซียสต่อนาที และสามารถทำความร้อนได้สูงสุด 500 องศาเซลเซียส
- 2) ส่วนกระตุ้นด้วยแสง (Light stimulation) เป็นการสร้างแสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ในช่วง Infrared Visible light และ Ultraviolet จากพลังงานไฟฟ้าด้วย Laser diode หรือหลอด LED และฉายไปยังตัวอย่างเพื่อทำการกระตุ้น โดยมีส่วนขยายความเข้มของแสงที่วัดได้ เรียกว่า Photomultiplier
- 3) ส่วนวัดปริมาณแสง (Detection unit) เป็นส่วนที่ใช้วัดปริมาณของแสงที่ออกมาจากตัวอย่างหลังได้รับการกระตุ้น โดยสามารถวัดแสงในช่วงความยาวคลื่น 280-650 นาโนเมตร และสามารถบันทึกข้อมูล แสดงผลข้อมูลที่วัดได้ในแนวแกน Y ส่วนแกน X แสดงค่าเวลาที่ใช้ในการกระตุ้นตัวอย่าง ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และผลที่ได้คือกราฟเส้นที่เรียกว่า Glow curve
- 4) ส่วนกรองแสง (Filter wheel) โดยชุดเครื่องมือสามารถรวบรวมค่าแสงทั้งหมดที่ออกมาจากตัวอย่างได้ดี สามารถปรับให้มีการกรองแสงให้มีค่าความยาวคลื่นที่สนใจได้โดยอัตโนมัติ และสามารถตรวจจับการแทรกของแสงแปลกปลอมภายนอกที่เข้ามาปะปนในการทดลอง
- 5) ส่วนอาบรังสีเบตา (Beta Irradiation unit) เป็นส่วนที่ใช้ในการอาบรังสีที่ทราบค่าให้กับตัวอย่างเพื่อสร้างกราฟมาตรฐานสำหรับการเทียบปริมาณย้อนกลับไปยังค่าที่วัดได้เริ่มต้น

บทที่ 2

วิธีการทดลอง

2.1 การเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างสำหรับนำมาหาค่าอายุด้วยวิธีเรืองแสง (Luminescence dating) มีวิธีการและข้อควรระวัง โดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ในการหาอายุ แต่หลักทั่วไปแล้วจำเป็นจะต้องหลีกเลี่ยงจากแสงแดด ความร้อนและความชื้น ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนของการหาอายุได้ ในกรณีของเศษภาชนะดินเผา อิฐหรือชิ้นส่วนของเตาเผา จะมีการขุดเอาผิวด้านนอกออกก่อนนำไปทำการทดลอง



รูปที่ 5 รูปแสดงพื้นที่ศึกษา บริเวณถนนสายโท 7 ได้ ตำบลจันทบเพชร อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์



รูปที่ 6 รูปแสดงการกระจายตัวของชิ้นส่วนเตาเผาและตะกรันเหล็กบริเวณพื้นที่ศึกษา บริเวณถนนสายโท 7 ได้





รูปที่ 7 รูปแสดงตัวอย่างที่เก็บจากพื้นที่ศึกษา




จากการเก็บตัวอย่างจากพื้นที่ศึกษา สามารถแบ่งตัวอย่างได้เป็น 2 ส่วน




1. ตัวอย่างเตาเผา
2. ตัวอย่างตะกรันเหล็ก โดยสามารถแบ่งตามลักษณะในเบื้องต้นออกได้เป็น 3 ประเภท
 - 1) ตะกรันเหล็กที่มีลักษณะเป็นมันวาว น้ำหนักเบา
 - 2) ตะกรันเหล็กที่มีสีแดง มีรูพรุน น้ำหนักเบา
 - 3) ตะกรันเหล็กเนื้อแน่น มีสีดำเทา

ตารางที่ 3 ตารางแสดงภาพของตัวอย่างเตาเผา

ชื่อตัวอย่าง	ภาพตัวอย่าง
BK1-1	
BK1-2	

ตารางที่ 4 ตารางแสดงข้อมูลและภาพของตัวอย่างตะกอนหลัก

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น	ภาพตัวอย่าง
BK2-1	ลักษณะเป็นมันวาว มีรูพรุน น้ำหนักเบา มีสีดำ	
BK2-2	ลักษณะเป็นมันวาว มีรูพรุน น้ำหนักเบา มีสีดำ	
BK3-1	ลักษณะเป็นรูพรุน น้ำหนักเบา มีสีแดง	

ชื่อตัวอย่าง	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตเห็น	ภาพถ่ายอย่าง
BK3-2	ลักษณะเป็นรูพรุน น้ำหนักเบา มีสีแดง	
BK4-1	ลักษณะเนื้อแน่น มีสีดำเทา	
BK4-2	ลักษณะเนื้อแน่น มีสีดำเทา	

2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลอง

ในการทำการทดลองจะแบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วน

2.2.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสำหรับการหาอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual Dose (AD))

2.2.1.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสำหรับการหารอยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water content (W))

ในส่วนของการหาค่า AD นั้น จะต้องนำตัวอย่างมาคำนวณหาค่า water content โดยนำตัวอย่างมาชั่งเอาผิวด้านนอกออก นำมาทุบด้วยคอนและลิ่มเพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดที่เล็กลง ทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างเปียกโดยใช้ตัวอย่างประมาณ 20-50 กรัม นำตัวอย่างไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้น้ำในตัวอย่างระเหยไปจนหมด ทำการชั่งน้ำหนักหลังการอบแห้ง เพื่อทราบค่าน้ำหนักตัวอย่างแห้ง นำค่าน้ำหนักตัวอย่างเปียกและค่าน้ำหนักตัวอย่างแห้งมาแทนสูตรคำนวณ

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

ซึ่งค่า W นี้จะประกอบในการคำนวณหาอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose, AD) กับขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 8 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างสำหรับการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (W)

2.2.1.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองเพื่อวัดค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่าง

นำตัวอย่างสวนที่เหลือมาบดในเครื่อง Disc Mill แลวนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำมาบรรจุในกระปุกพลาสติกให้มีขนาดพอดีกับตัวอย่าง หลังจากนั้นทิ้งไว้ประมาณ 1 เดือน แลวนำกระปุกตัวอย่างไปทำการทดลองเพื่อวัดค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่าง ไคแก โพแทสเซียม (K) ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) โดยใช้เครื่อง Gamma-ray Spectrometer ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมนิวเคลียร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นวิเคราะห์หาความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวจากกราฟที่ได้จากการทดลอง และนำค่าความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์มาประกอบกับคาร์บอนของปริมาณน้ำในตัวอย่างจากการทดลองในขั้นตอนที่ (2.2.1.1) เพื่อทำการคำนวณค่า AD (ตามสมการที่ 1)



รูปที่ 9 รูปแสดงการบรรจุตัวอย่างเพื่อทำการทดลองวัดค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่าง

2.2.2 การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสำหรับการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่าง (Equivalence dose (ED))

การเตรียมตัวอย่างและการทดลองสำหรับการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่าง (Equivalence dose (ED)) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัวอยู่ในตัวอย่างโดยใช้การวิเคราะห์ผลจากเม็ดแร่ควอตซ์ (Quartz grains) ซึ่งทำการทดลองในห้องมืด (Red Subdue Room) โดยใช้แสงสีแดงซึ่งเป็นแสงที่มีพลังงานต่ำ โดยนำตัวอย่างมาทำการขัดผิวออกประมาณ 1-2 มิลลิเมตร (Feathers, 2003) โดยสกัดด้วยลิ้มและค้อนใหม่มีขนาดเล็กลง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงให้ไดขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 60-200 (ผ่านตะแกรงเบอร์ 60 และคางอยู่บนตะแกรง

เบอร์ 200) นำตัวอย่างไปใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 10% ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้ง จากนั้นใส่สารละลายไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ความเข้มข้น 30% ทิ้งไว้จนกระทั่งไม่เกิดปฏิกิริยา เพื่อกำจัดอินทรีย์วัตถุ จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้ง แล้วนำไปใส่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 37% เป็นเวลา 40 นาที เพื่อกำจัดเฟลด์สปาร์ (feldspar) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้ง และใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) อีกครั้งที่มีความเข้มข้น 37% เป็นเวลา 40 นาที เพื่อกำจัดฟลูออไรต์ (fluorite) จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยน้ำกลั่น 3-5 ครั้ง และนำตัวอย่างไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างที่แห้งแล้วไปผานเครื่อง Magnetic Separator โดยตั้งค่าไทม์คา vibrator สูงสุด และใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกแร่โลหะ 1.8 A เพื่อทำการแยกโลหะหนักออกมา จนได้แร่ควอตซ์บริสุทธิ์ จากนั้นนำแร่ควอตซ์ที่ได้ไปทำการทดลองเพื่อหาปริมาณ Equivalent dose และสัญญาณเปรียบเทียบจากการอาบรังสีที่ทราบค่าด้วยเครื่อง TL/OSL Reader เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์หาปริมาณอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่างในหน่วยเกรย์ (Gy) โดยทำการทดลองที่ห้อง TL/OSL ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยวิเคราะห์ตัวอย่างละ 60 ซ้ำ บันทึกผลการทดลองทั้งในรูปแบบ Glow curve และ Growth curve และนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า ED ต่อไป (วิธีการทดลองดัดแปลงจาก Pailoplee, (2016) และ Puttagan, (2019))

หมายเหตุ ขั้นตอนในการสกัดแร่ควอตซ์ ได้ทำการทดลองกับเฉพาะตัวอย่างเตาเผาเท่านั้น เนื่องจากในการเตรียมการทดลองเพื่อสกัดแร่ควอตซ์ออกจากตัวอย่างตะกรันเหล็กนั้นมีขั้นตอนที่ค่อนข้างซับซ้อน และแตกต่างจากการสกัดแร่ควอตซ์ออกจากวัสดุจำพวกอิฐ เครื่องปั้นดินเผา และเตาเผา



รูปที่ 10 รูปแสดงการเตรียมตัวอย่างในห้องมืดเพื่อใช้ในการทดลองหาค่า Equivalence dose (ED)

บทที่ 3

ผลการทดลอง

3.1 ผลการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water content (W))

ตารางที่ 5 ตารางแสดงผลการหาค่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (water content (W))

ชื่อตัวอย่าง	BK1-1	BK1-2	BK4-1	BK4-2
น้ำหนักภาชนะ (กรัม)	31.115	31.460	28.502	27.790
น้ำหนักภาชนะ + น้ำหนักตัวอย่าง เปียก (กรัม)	59.608	62.058	41.093	44.624
น้ำหนักภาชนะ + น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)	58.830	61.135	40.975	44.415
น้ำหนักตัวอย่าง เปียก (กรัม)	28.493	30.598	12.591	16.834
น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)	27.715	29.675	12.473	16.625
ร้อยละของปริมาณ น้ำในตัวอย่าง (%)	2.730	3.017	0.937	1.242

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่าร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง (Water content (W)) ของตัวอย่างเตาเผาทั้ง 2 ตัวอย่างคือ BK1-1 และ BK1-2 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากบริเวณที่ตั้งของตัวอย่างนั้นอยู่บนผิวดินในระดับเดียวกัน พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับย่อมมีปริมาณเท่า ๆ กัน ส่วนตัวอย่างตะกรันเหล็กอีก 2 ตัวอย่างคือ BK4-1 และ BK4-2 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันเช่นกัน แต่มีค่าน้อยกว่าของตัวอย่างเตาเผาทั้ง 2 ตัวอย่าง ถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมเดียวกันและอยู่ห่างจากผิวดินในระดับเดียวกันกับตัวอย่างเตาเผา แต่ด้วยคุณลักษณะของตะกรันเหล็ก เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ น้ำในตัวอย่างจะ

ระเหยออกไปได้มากกว่า ประกอบกับคุณลักษณะของเตาเผามีการดูดซึมน้ำ ทำให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้ดีกว่า ทำให้มีปริมาณน้ำในตัวอย่างที่มากกว่า ฉะนั้นด้วยคุณลักษณะเฉพาะตัวของตัวอย่างแต่ละประเภททำให้ได้ผลสอดคล้องกับผลการทดลองการหาร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่างดังแสดงในตารางข้างต้น

3.2 ผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual Dose (AD))

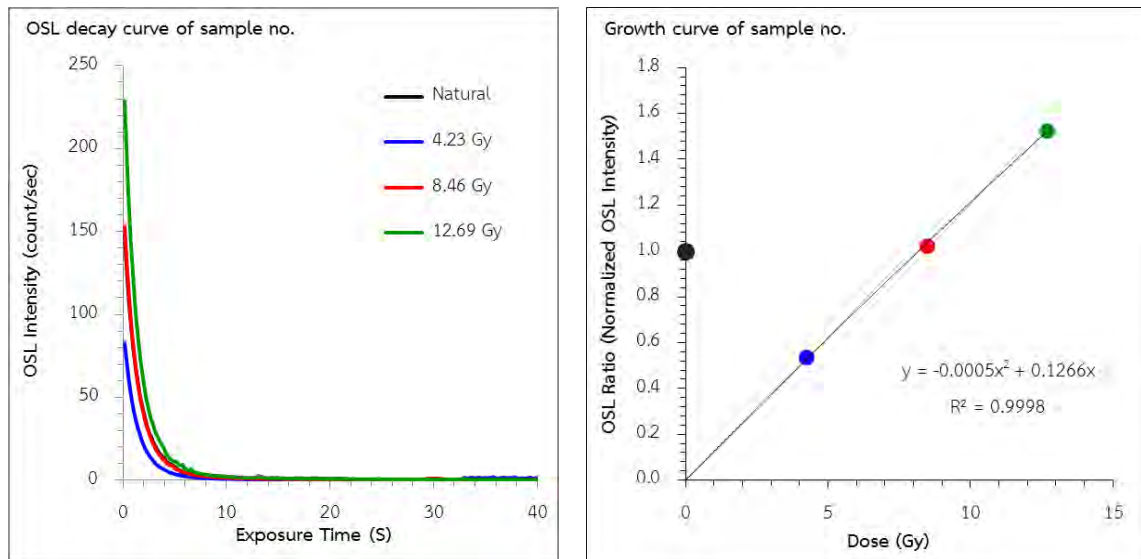
ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลการหาค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีของธาตุกัมมันตรังสีในธรรมชาติ (Annual Dose (AD))

ชื่อตัวอย่าง	ค่าความเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี						ร้อยละของปริมาณน้ำในตัวอย่าง	Annual Dose (Gy/ka)	AD Error (%)
	U (ppm)	Error (ppm)	Th (ppm)	Error (ppm)	K ₂ O (%)	Error (%)			
BK1-1	2.28	±0.00	13.01	±0.01	0.47	±0.47	2.730	3.68±0.03	0.82
BK1-2	1.82	±0.00	11.91	±0.01	0.33	±0.33	3.017	3.14±0.03	0.96
BK4-1	14.19	±0.00	20.23	±0.02	0.93	±0.93	0.937	11.46±4.96	4.96
BK4-2	19.08	±0.00	23.94	±0.04	1.09	±1.09	1.242	14.65± 4.54	4.54

3.3 ผลการทดลองสำหรับการหาปริมาณของอิเล็กตรอนที่สะสมตัวในตัวอย่าง (Equivalence dose (ED))

จากการนำตัวอย่างเตาเผา 2 ตัวอย่าง คือ BK1-1 และ BK1-2 ไปทำการสกัดแร่ควอตซ์บริสุทธิ์ออกมา เพื่อนำมาทำการทดลองหาค่า Equivalence dose (ED) ส่วนตัวอย่างของตะกั่วเหล็กทั้ง 6 ตัวอย่าง นำมาทำการทดลองหาค่า Equivalence dose (ED) โดยไม่ผ่านการสกัดแร่ควอตซ์ ซึ่งเมื่อนำมาทำการทดลองหาค่า ED มีตัวอย่างที่มีค่าสัญญาณ OSL ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่า ED ได้ทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างของเตาเผา BK1-1 และ BK1-2 ตัวอย่างของตะกั่วเหล็ก BK4-1 และ BK4-2 ทำให้ได้ผลของค่า Equivalent dose (ED) ทั้งหมด 4 ชุด ดังนี้

1) ผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-1



รูปที่ 11 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK1-1_06

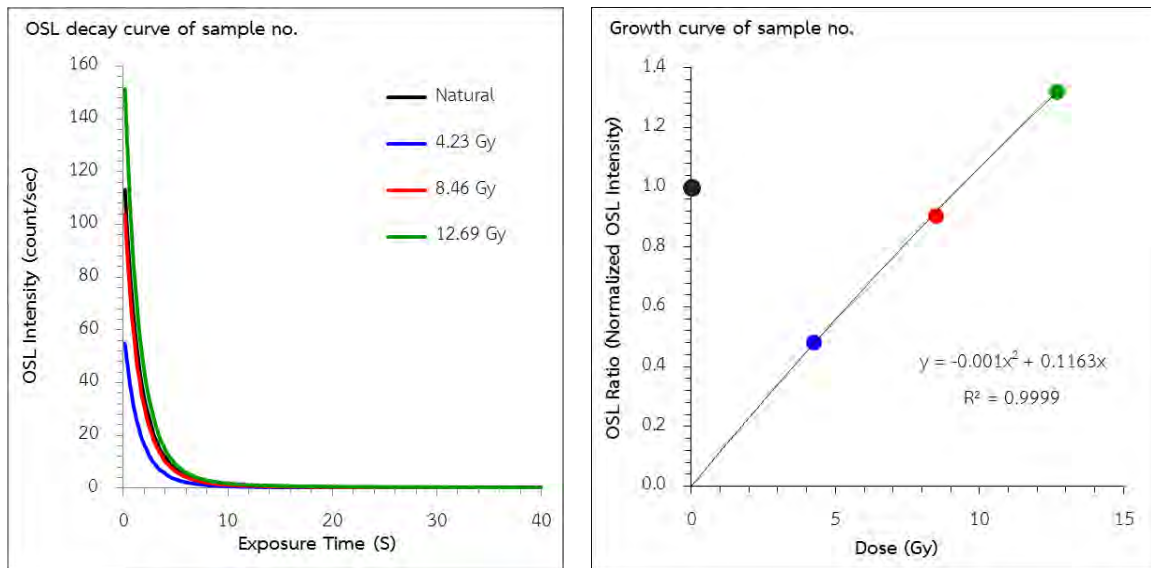
ตารางที่ 7 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-1

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-1_01	1	0	0.020925647	-0.002	0.1633	0	6.67	2.09
BK1-1_02	1	0	0.014590607	-0.0012	0.1537	0	6.88	1.46
BK1-1_03	1	0	0.010426485	-0.0015	0.1379	0	7.94	1.04
BK1-1_04	1	0	0.009177927	-0.0011	0.138	0	7.72	0.92
BK1-1_05	1	0	0.019149051	-0.0011	0.1395	0	7.63	1.91
BK1-1_06	1	0	0.013843115	-0.0005	0.1266	0	8.16	1.38
BK1-1_07	1	0	0.025607775	-0.0008	0.1353	0	7.75	2.56
BK1-1_08	1	0	0.017643757	-0.0015	0.1335	0	8.26	1.76
BK1-1_09	1	0	0.01952948	-0.0012	0.1292	0	8.39	1.95
BK1-1_10	1	0	0.008619986	-0.001	0.1388	0	7.62	0.86
BK1-1_11	1	0	0.026938267	-0.0015	0.1398	0	7.81	2.69
BK1-1_12	1	0	0.027732709	-0.0006	0.122	0	8.56	2.77

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-1_13	1	0	0.029189677	-0.0011	0.1422	0	7.46	2.92
BK1-1_14	1	0	0.019534237	-0.0009	0.138	0	7.63	1.95
BK1-1_15	1	0	0.01926439	-0.001	0.134	0	7.93	1.93
BK1-1_16	1	0	0.054555973	0.0004	0.1318	0	7.42	5.46
BK1-1_17	1	0	0.014453104	-0.001	0.1209	0	8.93	1.45
BK1-1_18	1	0	0.003325958	-0.0016	0.154	0	7.00	0.33
BK1-1_19	1	0	0.018832483	-0.0015	0.1483	0	7.28	1.88
BK1-1_20	1	0	0.014908352	-0.001	0.1312	0	8.13	1.49
BK1-1_21	1	0	0.035463	-0.001	0.1515	0	6.92	3.55
BK1-1_22	1	0	0.054553	-0.0013	0.1339	0	8.11	5.46
BK1-1_23	1	0	0.01419	-0.001	0.1373	0	7.72	1.42
BK1-1_24	1	0	0.008706	-0.0028	0.1696	0	6.62	0.87
BK1-1_25	1	0	0.039375	-0.0008	0.1326	0	7.92	3.94
BK1-1_26	1	0	0.043266	-0.0014	0.1311	0	8.38	4.33
BK1-1_27	1	0	0.024058	-0.0011	0.1466	0	7.21	2.41
BK1-1_28	1	0	0.019268	-0.0013	0.1485	0	7.19	1.93
BK1-1_29	1	0	0.021047	-0.0003	0.1408	0	7.21	2.10
BK1-1_30	1	0	0.024629	-0.0008	0.1303	0	8.07	2.46
BK1-1_31	1	0	0.012387	-0.0013	0.1484	0	7.19	1.24
BK1-1_32	1	0	0.027399	-0.0007	0.131	0	7.97	2.74
BK1-1_33	1	0	0.017792	-0.0009	0.1375	0	7.66	1.78
BK1-1_34	1	0	0.017224	-0.0008	0.1342	0	7.82	1.72
BK1-1_35	1	0	0.015001	-0.0012	0.1427	0	7.48	1.50
BK1-1_36	1	0	0.015319	-0.001	0.1274	0	8.40	1.53
BK1-1_37	1	0	0.03637	-0.0017	0.1497	0	7.28	3.64
BK1-1_38	1	0	0.044307	-0.0024	0.1619	0	6.88	4.43
BK1-1_39	1	0	0.010521	-0.0012	0.1329	0	8.12	1.05

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-1_40	1	0	0.018153	-0.0011	0.1307	0	8.22	1.82
BK1-1_41	1	0	0.018621	-0.0007	0.1176	0	8.98	1.86
BK1-1_42	1	0	0.051757	-0.0012	0.1289	0	8.42	5.18
BK1-1_43	1	0	0.013414	-0.0016	0.1216	0	9.38	1.34
BK1-1_44	1	0	0.016966	-0.0015	0.1253	0	8.94	1.70
BK1-1_45	1	0	0.017031	-0.0013	0.1394	0	7.73	1.70
BK1-1_46	1	0	0.015346	-0.0011	0.1218	0	8.93	1.53
BK1-1_47	1	0	0.022761	-0.001	0.1371	0	7.73	2.28
BK1-1_48	1	0	0.005055	-0.0005	0.1283	0	8.05	0.51
BK1-1_49	1	0	0.014181	-0.0021	0.1405	0	8.10	1.42
BK1-1_50	1	0	0.020697	-0.0008	0.1257	0	8.41	2.07
BK1-1_51	1	0	0.024646207	-0.0009	0.1294	0	8.20	2.46
BK1-1_52	1	0	0.019389928	-0.0013	0.1368	0	7.90	1.94
BK1-1_53	1	0	0.028674503	-0.0012	0.1266	0	8.60	2.87
BK1-1_54	1	0	0.017984164	-0.0016	0.1507	0	7.18	1.80
BK1-1_55	1	0	0.034309883	-0.0013	0.1355	0	7.99	3.43
BK1-1_56	1	0	0.018703404	-0.0012	0.1414	0	7.56	1.87
BK1-1_57	1	0	0.031734471	-0.0008	0.138	0	7.58	3.17
BK1-1_58	1	0	0.016771857	-0.0015	0.1551	0	6.91	1.68
BK1-1_59	1	0	0.032344036	-0.0009	0.1395	0	7.53	3.23
BK1-1_60	1	0	0.019277489	-0.0013	0.1423	0	7.55	1.93

2) ผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-2



รูปที่ 12 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK1-2_08

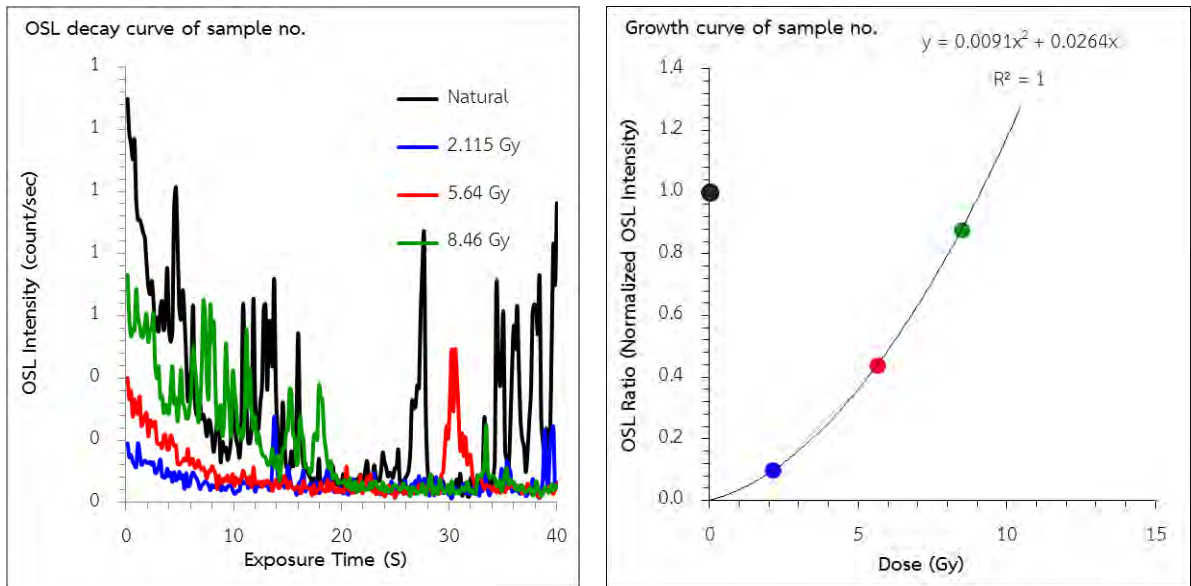
ตารางที่ 8 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK1-2

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-2_01	1	0	0.020319	-0.0011	0.1168	0	9.39	2.03
BK1-2_02	1	0	0.021775	-0.0015	0.1285	0	8.66	2.18
BK1-2_03	1	0	0.024674	-0.0008	0.1166	0	9.15	2.47
BK1-2_04	1	0	0.031881	-0.0003	0.1272	0	8.01	3.19
BK1-2_05	1	0	0.017026	-0.0012	0.1126	0	9.93	1.70
BK1-2_06	1	0	0.032128	-0.0014	0.1185	0	9.51	3.21
BK1-2_07	1	0	0.00452	-0.0018	0.1296	0	8.79	0.45
BK1-2_08	1	0	0.010484	-0.001	0.1163	0	9.35	1.05
BK1-2_09	1	0	0.024175	-0.001	0.126	0	8.51	2.42
BK1-2_10	1	0	0.017082	-0.0011	0.1304	0	8.24	1.71
BK1-2_11	1	0	0.024386	-0.0008	0.0976	0	11.29	2.44

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-2_12	1	0	0.015326	-0.0008	0.0993	0	11.06	1.53
BK1-2_13	1	0	0.022116	-0.0011	0.1189	0	9.19	2.21
BK1-2_14	1	0	0.022611	-0.0006	0.1017	0	10.48	2.26
BK1-2_15	1	0	0.007018	-0.001	0.1191	0	9.09	0.70
BK1-2_16	1	0	0.002112	-0.001	0.1179	0	9.20	0.21
BK1-2_17	1	0	0.025749	-0.0003	0.1053	0	9.77	2.57
BK1-2_18	1	0	0.020079	-0.0006	0.097	0	11.07	2.01
BK1-2_19	1	0	0.12478	0.0008	0.1083	0	8.68	12.48
BK1-2_20	1	0	0.026963	-0.0009	0.1039	0	10.60	2.70
BK1-2_21	1	0	0.01667031	-0.0003	0.1109	0	9.25	1.67
BK1-2_22	1	0	0.017467672	-0.0013	0.1134	0	9.95	1.75
BK1-2_23	1	0	0.028946555	0.0004	0.1068	0	9.06	2.89
BK1-2_24	1	0	0.011153307	-0.0019	0.1368	0	8.26	1.12
BK1-2_25	1	0	0.029611213	-0.0003	0.0979	0	10.56	2.96
BK1-2_26	1	0	0.013610084	-0.0006	0.103	0	10.33	1.36
BK1-2_27	1	0	0.03218042	-0.0007	0.113	0	9.40	3.22
BK1-2_28	1	0	0.014050861	-0.0008	0.1071	0	10.10	1.41
BK1-2_29	1	0	0.025503068	-0.001	0.1337	0	7.95	2.55
BK1-2_30	1	0	0.016503969	-0.0008	0.121	0	8.77	1.65
BK1-2_31	1	0	0.019295318	-0.0009	0.1182	0	9.09	1.93
BK1-2_32	1	0	0.024762577	-0.0007	0.1121	0	9.48	2.48
BK1-2_33	1	0	0.007851673	-0.0006	0.119	0	8.79	0.79
BK1-2_34	1	0	0.012709944	-0.0006	0.1136	0	9.26	1.27
BK1-2_35	1	0	0.025592575	-0.0007	0.12	0	8.78	2.56
BK1-2_36	1	0	0.019963267	-0.0008	0.1114	0	9.64	2.00
BK1-2_37	1	0	0.019615768	-0.0006	0.111	0	9.50	1.96

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK1-2_38	1	0	0.024152945	-0.0007	0.116	0	9.12	2.42
BK1-2_39	1	0	0.035440736	-0.0004	0.1081	0	9.59	3.54
BK1-2_40	1	0	0.025191738	-0.0001	0.1135	0	8.88	2.52
BK1-2_41	1	0	0.03631044	-0.0012	0.117	0	9.47	3.63
BK1-2_42	1	0	0.020831441	-0.0007	0.101	0	10.69	2.08
BK1-2_43	1	0	0.004730691	-0.0004	0.1129	0	9.15	0.47
BK1-2_44	1	0	0.01947759	-0.002	0.1267	0	9.24	1.95
BK1-2_45	1	0	0.002487976	-0.0016	0.1305	0	8.56	0.25
BK1-2_46	1	0	0.006885709	-0.0006	0.1136	0	9.26	0.69
BK1-2_47	1	0	0.020193632	-0.0009	0.1368	0	7.70	2.02
BK1-2_48	1	0	0.00506946	-0.0023	0.1306	0	9.12	0.51
BK1-2_49	1	0	0.023565618	-0.0002	0.085	0	12.11	2.36
BK1-2_50	1	0	0.016077635	-0.0011	0.1205	0	9.05	1.61
BK1-2_51	1	0	0.025470466	-0.0006	0.0946	0	11.39	2.55
BK1-2_52	1	0	0.036265083	-0.0009	0.1058	0	10.37	3.63
BK1-2_53	1	0	0.023388173	-0.0006	0.117	0	8.96	2.34
BK1-2_54	1	0	0.015399255	-0.0008	0.0948	0	11.70	1.54
BK1-2_55	1	0	0.040491362	0.0005	0.1018	0	9.39	4.05
BK1-2_56	1	0	0.020660872	-0.001	0.1351	0	7.86	2.07
BK1-2_57	1	0	0.030715091	-0.0008	0.1149	0	9.31	3.07
BK1-2_58	1	0	0.037912925	-0.0008	0.1266	0	8.34	3.79
BK1-2_59	1	0	0.030894438	-0.0009	0.1424	0	7.37	3.09
BK1-2_60	1	0	0.004385329	-0.0015	0.1149	0	10.01	0.44

3) ผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-1



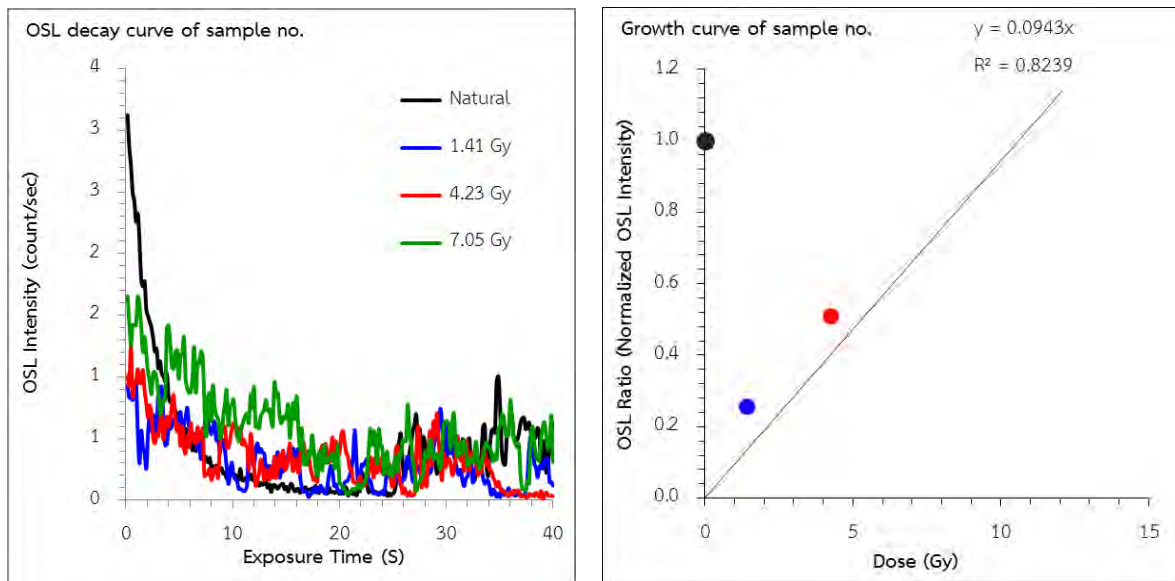
รูปที่ 13 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK4-1_02

ตารางที่ 9 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-1

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK4-1_01	1	0	4.314902553	0	0.0522	0	19.16	431.49
BK4-1_02	1	0	0.006961691	0.0091	0.0264	0	9.13	0.70
BK4-1_03	1	0	8.721669801	0	0.0713	0	14.03	872.17
BK4-1_04	1	0	85.12621311	0	0.0044	0	227.27	8512.62
BK4-1_05	1	0	0.927879243	0	0.0777	0	12.87	92.79
BK4-1_06	1	0	0.8711545	0	0.0988	0	10.12	87.12
BK4-1_07	1	0	0.387812498	0	0.0439	0	22.78	38.78
BK4-1_08	1	0	7.560534033	0	-0.0073	0	N/A	N/A
BK4-1_09	1	0	1.37520393	0	-1.4811	0	N/A	N/A
BK4-1_10	1	0	4.767717775	0	0.6929	0	1.44	476.77
BK4-1_11	1	0	0.909979539	0	-0.0792	0	N/A	N/A
BK4-1_12	1	0	0.669194585	0	-0.3864	0	N/A	N/A

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK4-1_13	1	0	1.732062554	0	-0.1814	0	N/A	N/A
BK4-1_14	1	0	4.687205651	0	0.0284	0	35.21	468.72
BK4-1_15	1	0	6.302570678	0.0078	0.0088	0	10.77	630.26
BK4-1_16	1	0	2.245311702	0	0.0818	0	12.22	224.53
BK4-1_17	1	0	4.485342292	0	0.4387	0	2.28	448.53
BK4-1_18	1	0	0.955588086	0	1.1262	0	0.89	95.56
BK4-1_19	1	0	8.336031025	-0.0029	0.0261	0	4.50	833.60
BK4-1_20	1	0	182.6988873	0.0106	-0.057	0	12.77	18269.89

4) ผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-2



รูปที่ 14 รูปแสดงตัวอย่างของผลที่ได้จากการทดลองหาค่า ED ของตัวอย่าง BK4-2_12

ตารางที่ 10 ตารางแสดงผลการหาค่า Equivalent dose (ED) ของตัวอย่าง BK4-2

Simple no.	N	lo	Error	a	b	c	ED (Gy)	ED Error (%)
BK4-2_01	1	0	1.876105297	0	0.1009	0	9.91	187.61
BK4-2_02	1	0	0.559397104	0	0.1955	0	5.12	55.94
BK4-2_03	1	0	4.455511477	0	0.1022	0	9.78	445.55
BK4-2_04	1	0	2.615190083	0	0.2651	0	3.77	261.52
BK4-2_05	1	0	35.07942591	0	0.0338	0	29.59	3507.94
BK4-2_06	1	0	2.566253199	0	0.0734	0	13.62	256.63
BK4-2_07	1	0	1.075259765	0	0.1063	0	9.41	107.53
BK4-2_08	1	0	13.68800756	0	-0.0695	0	N/A	N/A
BK4-2_09	1	0	3.033704226	0	0.2245	0	4.45	303.37
BK4-2_10	1	0	0.321385732	0	0.0938	0	10.66	32.14
BK4-2_11	1	0	0.742477739	0.0026	0.2659	0	3.63	74.25
BK4-2_12	1	0	0.565076454	0	0.0943	0	10.60	56.51
BK4-2_13	1	0	11.37178377	0	-0.7826	0	N/A	N/A
BK4-2_14	1	0	14.80811218	0	0.0384	0	26.04	1480.81
BK4-2_15	1	0	4.383424334	0	-0.0241	0	N/A	N/A
BK4-2_16	1	0	5.460238918	0	0.0333	0	30.03	546.02
BK4-2_17	1	0	0.354771422	0	0.0757	0	13.21	35.48
BK4-2_18	1	0	4.055512405	0	0.0996	0	10.04	405.55
BK4-2_19	1	0	15.43847031	0.0018	0.0449	0	14.19	1543.85
BK4-2_20	1	0	0.521507597	0	0.2742	0	3.65	52.15

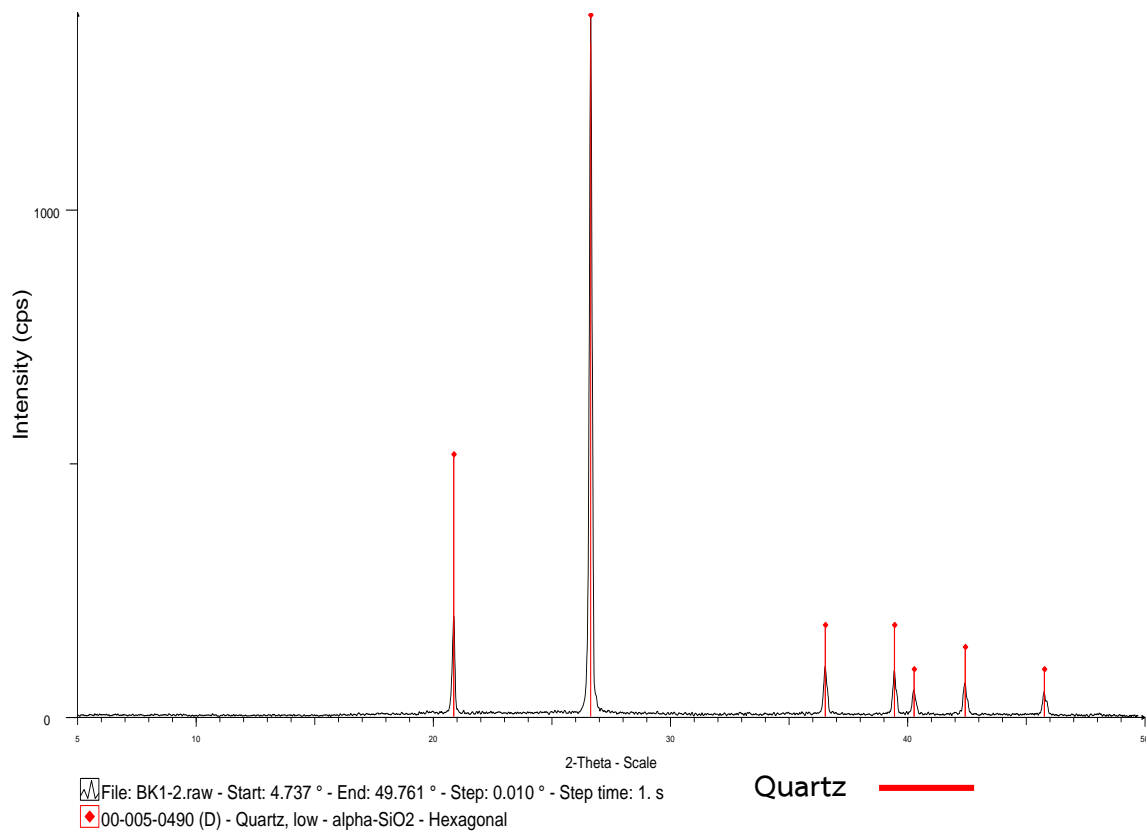
3.4 ผลการวิเคราะห์ XRD เพื่อหาแร่ประกอบของตัวอย่าง

การวิเคราะห์ XRD เพื่อหาแร่ประกอบ ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

ตัวอย่างจากเตาเผาจำนวน 1 ตัวอย่าง และตัวอย่างจากตะกอนเหล็กประเภทละ 1 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 4 ตัวอย่าง ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่าง BK1-2

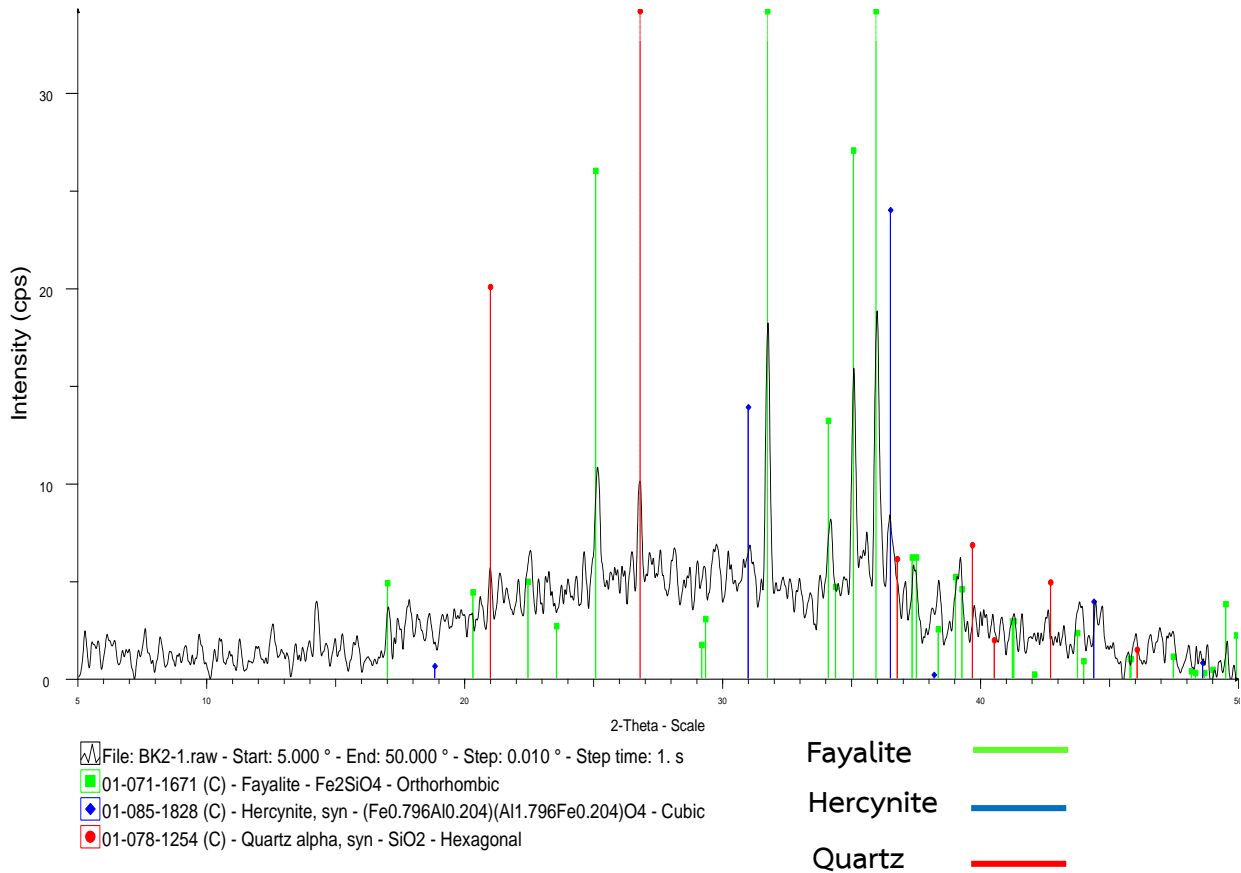
พบว่าแร่ประกอบของตัวอย่างจากเตาเผา มีเพียงแร่ควอตซ์ (quartz) เท่านั้น (ควอตซ์บริสุทธิ์)



รูปที่ 15 รูปแสดงแร่ประกอบของตัวอย่าง BK1-2

2) ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างตะกอนเหล็กประเภทที่ 1 (มีลักษณะเป็นมันวาว น้ำหนักเบา) ของตัวอย่าง BK2-1

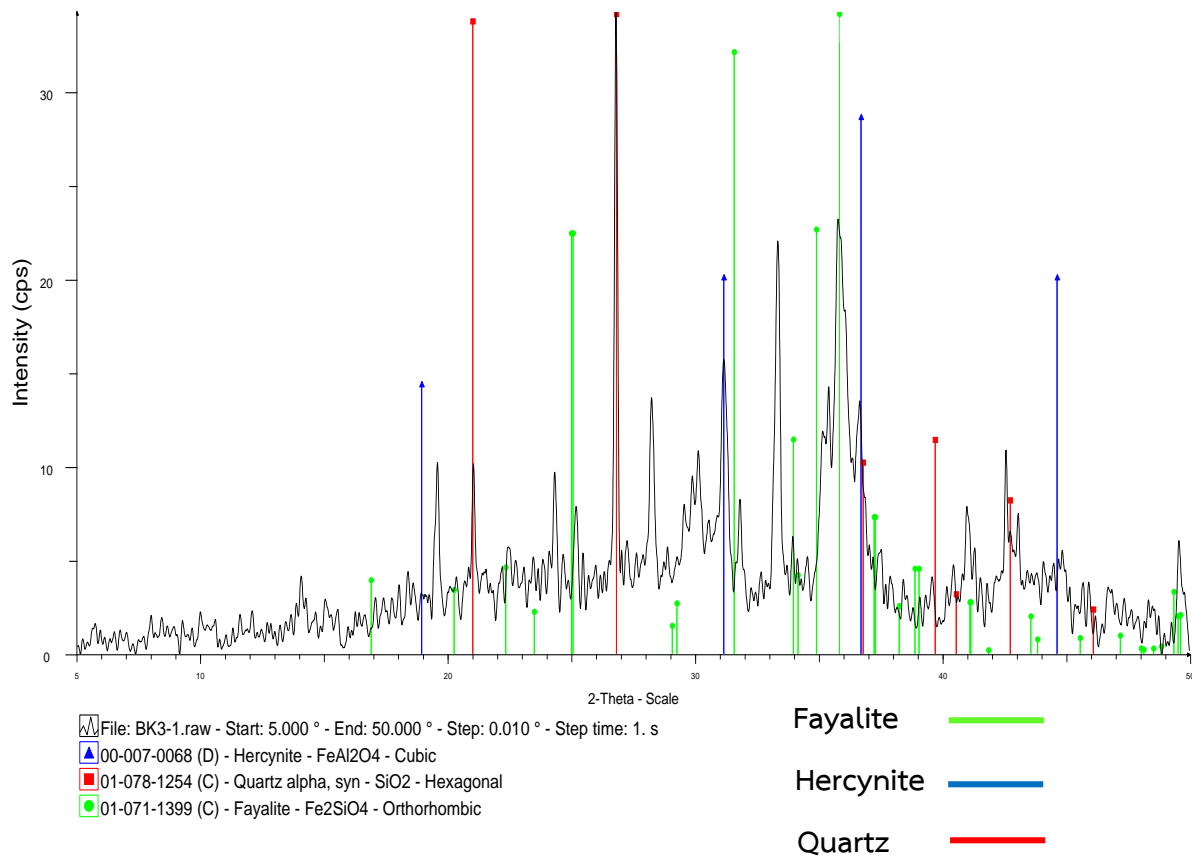
พบว่าแร่องค์ประกอบหลักของตัวอย่างตะกอนเหล็กประเภทที่ 1 ประกอบด้วยแร่ Fayalite, Hercynite และ Quartz



รูปที่ 16 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK2-1

3) ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างตะกรันเหล็กประเภทที่ 2 (มีสีแดง มีรูพรุน น้ำหนักเบา) ของตัวอย่าง BK3-1

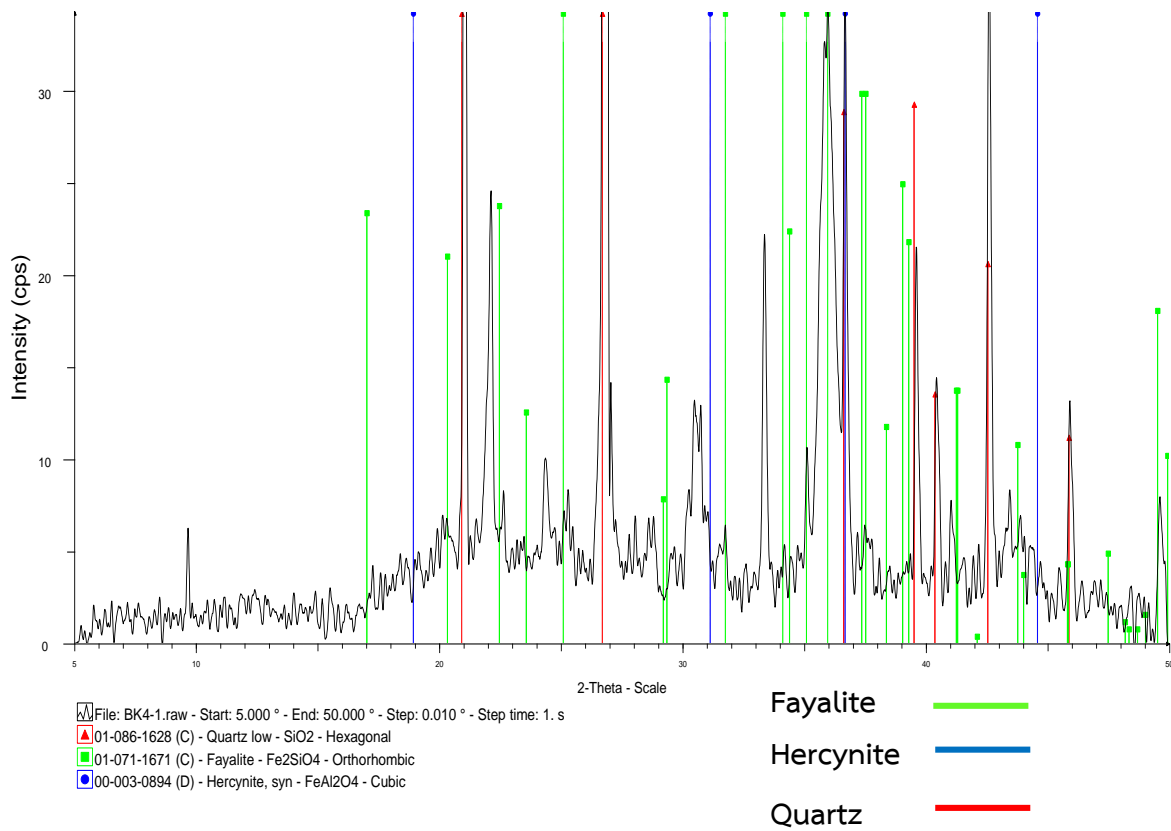
พบว่าแร่องค์ประกอบหลักของตัวอย่างตะกรันเหล็กประเภทที่ 2 ประกอบด้วยแร่ Fayalite, Hercynite และ Quartz



รูปที่ 17 รูปแสดงแร่องค์ประกอบของตัวอย่าง BK3-1

4) ผลการวิเคราะห์ XRD ของตัวอย่างตะกรันเหล็กประเภทที่ 3 (เนื้อแน่น มีสีดำเทา) ของตัวอย่าง BK4-1

พบว่าแร่หลักประกอบหลักของตัวอย่างตะกรันเหล็กประเภทที่ 3 ประกอบด้วยแร่ Fayalite, Hercynite และ Quartz



รูปที่ 18 รูปแสดงแร่ประกอบของตัวอย่าง BK4-1

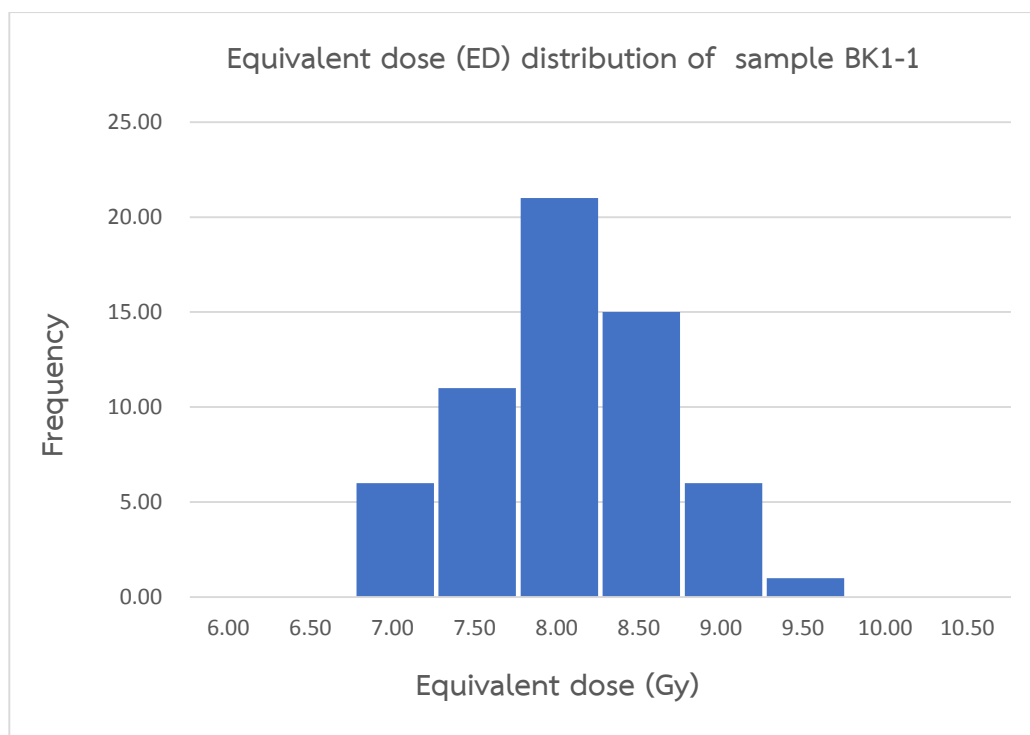
บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์แร่องค์ประกอบของตัวอย่าง

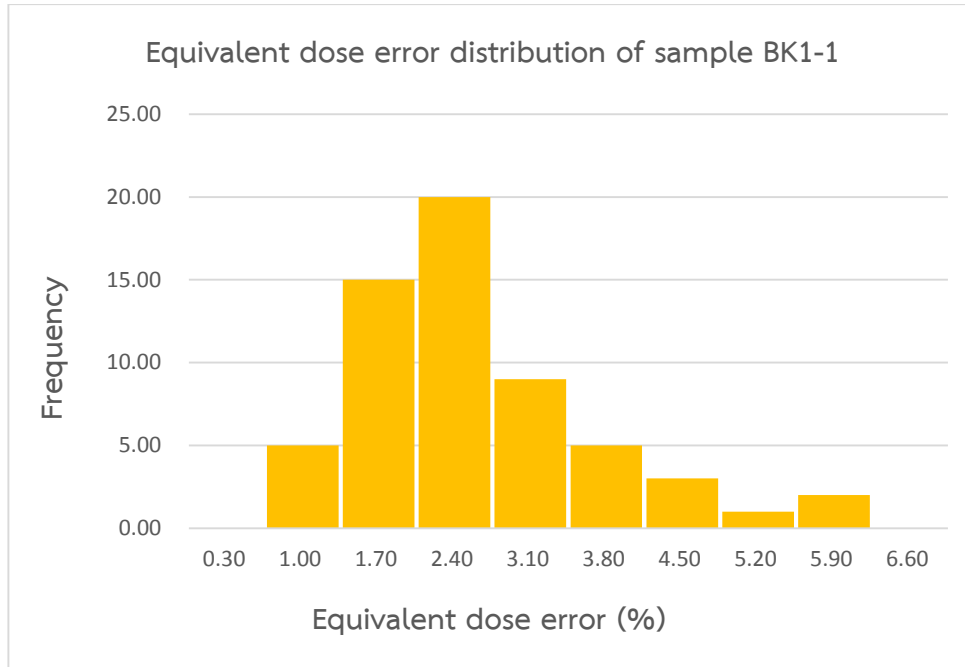
จากผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบของเตาเผาจากตัวอย่าง BK1-2 (ตามรูปที่ 15) พบว่ามีแร่องค์ประกอบเพียงชนิดเดียวคือ แร่ควอตซ์ (quartz) และผลการวิเคราะห์แร่องค์ประกอบหลักของตัวอย่างตะกอนเหล็กทั้ง 3 ประเภท ประกอบด้วย Fayalite, Hercynite และ Quartz ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแร่องค์ประกอบภายในตะกอนเหล็กมีความหลากหลาย และความซับซ้อนของแร่องค์ประกอบดังกล่าว รวมไปถึงสัดส่วนของแร่ควอตซ์ในตัวอย่างของตะกอนเหล็กมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับแร่องค์ประกอบชนิดอื่นซึ่งส่งผลต่อการวัดค่าสัญญาณ OSL

4.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของค่า Equivalent dose (ED)



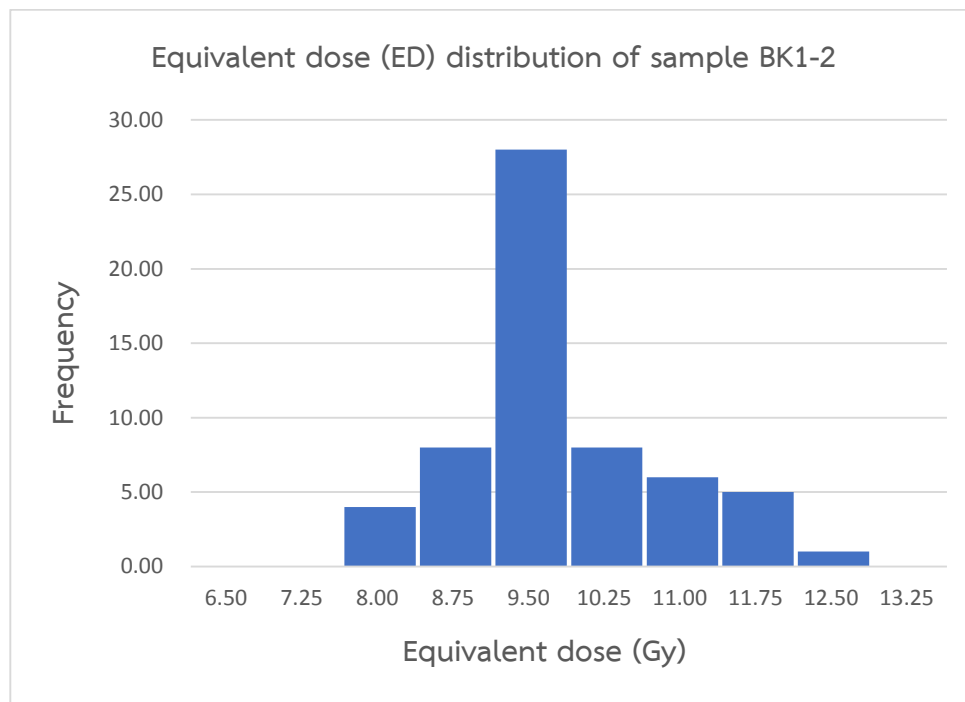
Number = 60, Min = 6.62, Mean = 7.82

รูปที่ 19 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED ของตัวอย่าง BK1-1 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ



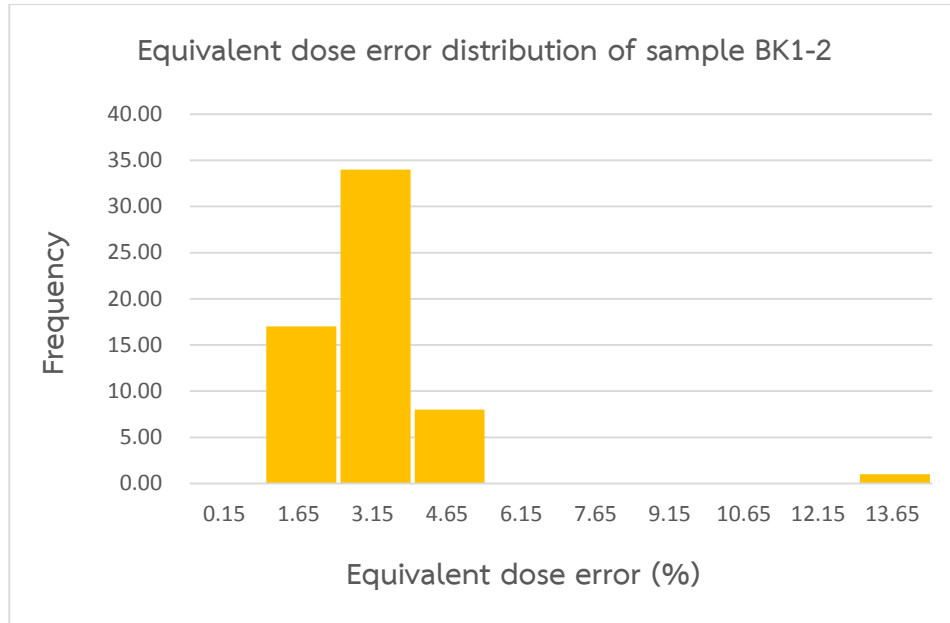
Number = 60, Min = 0.33, Mean = 2.21

รูปที่ 20 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED error (%) ของตัวอย่าง BK1-1 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ



Number = 60, Min = 7.37, Mean = 9.41

รูปที่ 21 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED ของตัวอย่าง BK1-2 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ



Number = 60, Min = 0.21, Mean = 2.23

รูปที่ 22 รูปแสดง Histogram การกระจายตัวของค่า ED error (%) ของตัวอย่าง BK1-2 ซึ่งนำมาใช้พิจารณาในการคำนวณหาอายุ

จากผลการคำนวณการหาค่า ED ของตัวอย่างเตาเผาคือ BK1-1 และ BK1-2 พบว่า ค่าที่ได้มีการกระจายตัวที่เกาะกลุ่มกัน โดยส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของข้อมูล (ตามรูปที่ 19 และรูปที่ 21) โดยค่าความผิดพลาด (ED error) ที่ได้อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ (ตามรูปที่ 20 และรูปที่ 22) ซึ่งจากงานวิจัยของ Takashima (1989) ได้ประเมินค่าความผิดพลาดของการหาค่า ED ที่สามารถยอมรับได้ในการหาอายุด้วยวิธีนี้ต้องไม่เกิน 15 %

ผลการคำนวณการหาค่า ED ของตัวอย่างตะกรันเหล็กคือ BK4-1 และ BK4-2 ค่าที่ได้ค่อนข้างมีการกระจายตัวกันอย่างกระจุกกระจาย มีทั้งค่าที่สูงมากผิดปกติ และบางกรณีหาค่าไม่ได้ นอกจากนี้ค่าความผิดพลาด (ED error) ที่ได้มีค่าสูงมาก ซึ่งอยู่ในช่วงที่ไม่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำมาคำนวณหาอายุได้ ทั้งนี้เนื่องจากในตัวอย่างตะกรันเหล็ก มีสัดส่วนของแร่ควอตซ์และแร่องค์ประกอบอื่น (Fayalite และ Hercynite) รวมอยู่ด้วย ทำให้องค์ประกอบทางเคมีในตะกรันเหล็กมีความซับซ้อน และการทำการทดลองสกัดแร่ควอตซ์ออกจากตะกรันเหล็กนั้น มีขั้นตอนที่ซับซ้อน (M. Haustein et al. (2003)) ซึ่งแตกต่างจากขั้นตอนที่ทำการทดลองมาข้างต้น (ในหัวข้อ 2.2.2) ทำให้ไม่สามารถทำการสกัดแร่ควอตซ์ออกจากตะกรันเหล็กได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดในขั้นตอนการเตรียมการทดลอง

4.3 ผลการคำนวณอายุที่ได้จากการวิเคราะห์ค่า ED

การคำนวณอายุจากผลการทดลอง

นำข้อมูลของผลการคำนวณค่า AD และ ED ข้างต้นมาคำนวณอายุของตัวอย่าง โดยใช้สูตร

$$\text{Luminescence date} = \frac{\text{Equivalent dose (ED)}}{\text{Annual dose (AD)}}$$

จากตัวอย่างเตาเผาทั้ง 2 ตัวอย่าง คือ BK1-1 และ BK1-2 โดยแต่ละตัวอย่างมีค่า Annual Dose (AD) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gamma Spectrometer และค่า Equivalence Dose (ED) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TL/OSL Reader จึงทำให้ได้ผลการคำนวณอายุ 2 ชุด ดังนี้

ตารางที่ 11 ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ผลอายุของตัวอย่างเตาเผา

Sample No.	AD (Gy/ka)	Mean ED (Gy)	Central Age Model (Yr) (Duller et al., 2008)	Min ED (Gy)	Minimum Age Model (Yr) (Duller et al., 2008)
BK1-1	3.68 ± 0.03	7.82 ± 0.13	2120 ± 30	6.62 ± 0.06	1790 ± 20
BK1-2	3.14 ± 0.03	9.40 ± 0.30	2990 ± 90	7.37 ± 0.23	2340 ± 70






เนื่องจากข้อมูลของค่า ED ที่ได้มีการกระจายตัวอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของข้อมูลอย่างเห็นได้ชัดของตัวอย่างเตาเผาทั้ง 2 ตัวอย่าง จึงได้ข้อสรุปในการเลือกใช้การคำนวณอายุแบบ Central Age Model (CAM) โดยพิจารณาตามการกระจายตัวของค่า ED (Duller et al., 2008)

จะได้ว่าตัวอย่าง BK1-1 มีอายุอยู่ในช่วง 2090 – 2150 ปีก่อนปัจจุบัน

และตัวอย่าง BK1-2 มีอายุอยู่ในช่วง 2920 – 3060 ปีก่อนปัจจุบัน

4.4 การวิเคราะห์สรุปอายุที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 12 ตารางแสดงสรุปผลอายุของตัวอย่าง BK1-1 และ BK1-2 เทียบกับข้อมูลการหาอายุจากแหล่งเตาเผาเดียวกันและแหล่งเตาเผาโบราณต่าง ๆ ในอำเภอบ้านกรวด

แหล่งเตาเผาโบราณ	อายุ (ปีก่อนปัจจุบัน)		
	3000	2000	1000
BK1-1			
BK1-2			
แหล่งเตากลุงเหล็กบ้านสายโท 7 (จิตประสงค์ ลากจิตร, 2553) กำหนดอายุอยู่ในช่วง 1100 -1200 ปีก่อนปัจจุบัน			
แหล่งเตากลุงเหล็กบ้านเขาดินใต้ (อิสราวรรณ อยู่ป้อม, 2553) กำหนดอายุอยู่ในช่วง 1100 ปีก่อนปัจจุบัน			
แหล่งเตาเผาโบราณบ้านกรวด (เตาเผาผลิตเครื่องปั้นดินเผา) ช่วงพุทธศตวรรษที่ 15-18			

Central Age Model 

Minimum Age Model 

Reference dates 

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลอายุที่ได้จากการทดลอง

ผลของการคำนวณอายุที่ได้จากตัวอย่างเตาเผา คือ ตัวอย่าง BK1-1 มีอายุอยู่ในช่วง 2090 – 2150 ปีก่อนปัจจุบัน และตัวอย่าง BK1-2 มีอายุอยู่ในช่วง 2920 – 3060 ปีก่อนปัจจุบัน

จากการศึกษางานวิจัยเก่าและข้อมูลการกำหนดอายุของแหล่งเตาเผาต่าง ๆ ในอำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ ประกอบกับข้อมูลทางประวัติศาสตร์ของพื้นที่ แล้วนำมาวิเคราะห์เทียบเคียงกับข้อมูลอายุที่ได้จากการทดลอง พบว่า ผลอายุที่ได้จากการทดลองมีอายุแก่กว่าแหล่งเตาเผาจากทุก ๆ แหล่ง ทำให้สรุปได้ว่าอาจเกิดข้อผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนจากการหาอายุ โดยข้อผิดพลาดดังกล่าวอาจเกิดจากรังคอวตซ์ไม่เกิดการรีเซ็ตสัญญาณหลังได้รับพลังงานครั้งสุดท้าย ซึ่งการรีเซ็ตที่ไม่สมบูรณ์จะส่งผลให้อายุที่ได้แก่กว่าอายุที่แท้จริง ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าตัวอย่างจากเตาเผาที่เก็บมาไม่ได้ผ่านความร้อนมากพอที่ทำให้เกิดการรีเซ็ตค่าสัญญาณออกจนหมด ทำให้ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการคำนวณหาอายุดังกล่าว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดลองหาค่า Equivalent dose (ED) จากห้องปฏิบัติการอื่น ๆ ประกอบด้วย เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองจากหลาย ๆ แหล่งข้อมูล ซึ่งจะช่วยสรุปผลช่วงอายุของตัวอย่างที่มีความถูกต้อง แม่นยำและเพื่อช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของอายุที่ได้มากขึ้น
2. การหาอายุด้วยวิธีเรืองแสงนั้นเหมาะสมกับตัวอย่างที่เคยได้รับแสง หรือเคยได้รับความร้อนมาก่อน การเก็บตัวอย่างของวัสดุจำพวกอิฐ เซรามิก เครื่องปั้นดินเผา และเตาเผาโบราณจึงต้องผ่านการได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 300 - 500 องศาเซลเซียสขึ้นไป ซึ่งหากวัสดุดังกล่าวไม่ได้รับความร้อนที่มากพอ จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของการคำนวณหาอายุ
3. ควรมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลมากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- จิตประสงค์ ลากิจิตร, 2553. การกำหนดอายุแหล่งเตาถลุงเหล็กด้วยวิธีเรืองแสง (Thermoluminescence Dating): กรณีศึกษาแหล่งเตาถลุงเหล็กบ้านเขาดินใต้และแหล่งเตาถลุงเหล็กบ้านสายโท 7 อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์, ภาควิชาโบราณคดี คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ธนีสรณ พุทธกาล, 2560. การหาอายุอิฐจากกำแพงเมืองสงขลาด้วยวิธีเปล่งแสง, โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปณิสรา นวลสมัคร, 2554. การกำหนดอายุเตาเผาโบราณด้วยวิธีการเรืองแสง, โครงการเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันติ ภัยหลบลี้, 2552. การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความรอน บทที่1 และบทที่2, ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อิสราวรรณ อยู่ป้อม, 2553. การศึกษาเตาถลุงเหล็กสมัยโบราณที่บ้านเขาดินใต้ อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์, สาขาวิชาโบราณคดีสมัยก่อนประวัติศาสตร์ ภาควิชาโบราณคดี บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศิลปากร.
- Aitken, M. J. 1985. Thermoluminescence dating. Academic press, London, U.K.
- Bell, W. T. 1979. Attenuation factors for the absorbed radiation dose in quartz inclusions for thermoluminescence dating. Ancient TL, 8(2), 12.
- Chuenpee, T., Won-In, K., Natapintu, S., and Takashima, I. 2014. Archaeometallurgical Studies of Ancient Iron Smelting Slag from Ban Khao Din Tai Archaeological Site, Northeastern Thailand. Journal of Applied Sciences, 14(9).

- Duller, G.A.T. 2008. Single-grain optical dating of Quaternary sediments: why aliquot size matters in luminescence dating. *Boreas*, 37, 589-612.
- Feathers, J. K. 2003. Use of luminescence dating in archaeology. *Measurement Science and Technology*, 14(9), 1493.
- Gautier, A. 2001. Luminescence dating of archaeometallurgical slag: use of the SAR technique for determination of the burial dose. *Quaternary Science Reviews*, 20(2001), 973-980.
- Haustein, M., et al. 2003. Dating archaeometallurgical slags using thermoluminescence *Archaeometry*. *Archaeometry*, 45(3), 519-530.
- Hazenfratz, R., Tudela, D. R. G., Mittani, J. C. R., Tatumi, S. H., Munita, S. H. 2013. Optically stimulated luminescence dating of archaeological ceramics from Osvaldo and Lago Grande sites in central Amazon. *ResearchGate*.
- Hendrickson, M. 2010. Historic routes to Angkor: development of the Khmer road system (ninth to thirteenth centuries AD) in mainland Southeast Asia. *ResearchGate*.
- Huntley, D. J., Godfrey-Smith, D. I., and Thewalt, M. L. W. 1985. Optical dating of sediments. *Nature*, 313(5998), 105-107.
- 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).

Preusser, F., Degering, D., Fuchs, M., Hilgers, A., Kadereit, A., Klasen, N., Spencer, J. Q. 2008.

Luminescence dating: basics, methods and applications. *Eiszeitalter & Gegenwart Quaternary Science Journal*, 57(1/2), 95–149.

Rower, G., and Pernicka, E. 1983. Thermoluminescence dating of archaeometallurgical slags.

Sokrithy, I. 2015. The Living Angkor Road Project: Connectivity within Ancient Mainland Southeast Asia. ResearchGate.

Takashima, I., and Honda, S. 1989. Comparison between K-Ar and TL dating results of pyroclastic flow deposits in the Aizutajima area, Northeast Japan. *Chishitsugaku Zasshi*, 95(11), 807–816.

Wallinga, J. and Cunningham, A. 2015. Luminescence Dating, Uncertainties, and Age Range. ResearchGate.

