

การกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิด
โดยวิธีอิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์



นายศุภกิจ อรรถบุตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

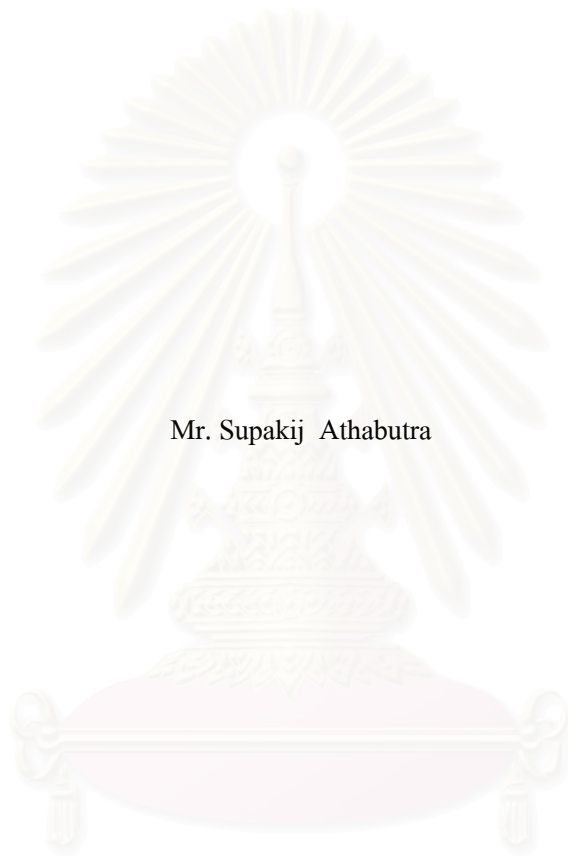
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ELECTRON SPIN RESONANCE DATING OF SOME ANIMAL TEETH ENAMEL
AND SHELL FOSSILS



Mr. Supakij Athabutra

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ
บางชนิดโดยวิธีอิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์

โดย

นายศุภกิจ อรรถนุตร

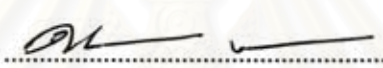
สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

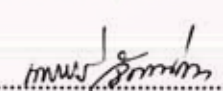
อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์

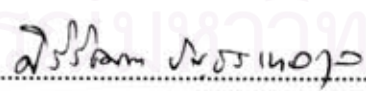
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ชิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ศุภกิจ อรรถบุตร : การกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิดโดยวิธี
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์. (ELECTRON SPIN RESONANCE DATING OF SOME
ANIMAL TEETH ENAMEL AND SHELL FOSSILS) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ชยากริต
ศิริอุปถัมภ์ 155 หน้า.

ได้ทำการกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิดโดยวิธี
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (อีเอสอาร์) ซึ่งจุดค้นพบ ณ ตำแหน่งจุดค้นที่ 1 (S23W10) บริเวณเพิงผา
ถ้ำลอด แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด เขตรักษาพันธุ์สัตว์
ป่าคุ้มครองแม่ข่ายป่าคอนเหนือ ในท้องที่ตำบลถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน กำหนดค่าอายุ
ได้ 33,200 - 18,700 ปี ของตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์ และ 32,300 ปี ของตัวอย่างเปลือกหอยน้ำจืด
โบราณ สายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) ผลการวิเคราะห์อีเอสอาร์สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า
g-factor g_1 (g_R) = 2.0040 - 2.0041, g_2 (g_{center}) = 2.0030 - 2.0036 และ g_3 (g_L) = 1.997 - 1.9988 ซึ่งเกิด
จาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic สำหรับเคลือบฟันของสัตว์ และได้ค่า
g-factor g (g_{center}) = 2.0042 \pm 0.0003 ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $SO_3^{\cdot -}$ จากตัวอย่างเปลือกหอย
น้ำจืดโบราณ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิเวศวิทยาเทคโนโลยี
สาขาวิชา นิเวศวิทยาเทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิติกร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

467 05276 21 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: ESR DATING / THE THAMLOD ROCKSHELTER / ANIMAL TEETH ENAMEL SHELL FOSSILS

SUPAKIJ ATHABUTRA : ELECTRON SPIN RESONANCE DATING OF SOME ANIMAL TEETH ENAMEL AND SHELL FOSSILS. : THESIS ADVISOR ASSOC.PROF.CHYAGRIT SIRI-UPATHUM, 155 pp.

Electron spin resonance (ESR) dating was conducted for some ungulate tooth enamel samples and shell fossils of the the Tham Lod rockshelter Area I (S23W10) located in Highland Archaeology Project in Pang Mapha District, Mae Hong Son Province, North Thailand. Age estimation for wave-induced breaching of the cavity and initial sand deposition (Level 19-29) was 33,200 - 18,700 years for teeth enamel. The estimate age of the shell fossils was found to be 32,300 years for *Nodularia scobinata* sp. (*Carditidae*). Result of ESR Spectrum was g-factor $g_1 (g_{\parallel}) = 2.0040 - 2.0041$, $g_2 (g_{\text{center}}) = 2.0030 - 2.0036$ and $g_3 (g_{\perp}) = 1.997 - 1.9988$ formed by CO_2^- Orthorhombic free radical for teeth enamel and g-factor $g (g_{\text{center}}) = 2.0042 \pm 0.0003$ formed by SO_3^- free radical for fresh shell fossils.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology
Field of Study Nuclear Technology
Academic 2006

Student's signature Supakij A.

Advisor's signature Chyagrit Siri-upathum

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ และประสานงานในการขอความอนุเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบ และให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ และคณาจารย์ประจำภาควิชาชีวเคมีและเทคโนโลยีทุกท่าน ขอกราบขอบพระคุณ ดร.กฤษณ์ วันอินทร์ ที่กรุณาอบรมแนะนำวิธีการกำหนดอายุและเทคนิควิธีการเตรียมตัวอย่าง และบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนทุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณข้าราชการและเจ้าหน้าที่จากสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้ให้คำแนะนำเอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัยและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ได้แก่ คุณมานิตย์ ช้อนสุข คุณพิศาล ทั้งพิทยคุณ คุณอารักษ์ วิทิตธีรานนท์ ดร.ปรารธนา กิ่งสุวรรณ คุณหริเนตร มุ่งพยาบาล คุณนงกัญช แจ็งสว่าง คุณบุญเลิศ สวนมะม่วง และคุณขวัญจิรา กาบดี

ขอขอบพระคุณข้าราชการและเจ้าหน้าที่จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้แก่ ดร. สาทร สุวรรณ และคุณมานพ ติระรัตนสมโภช ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำการหาเงื่อนไขและการใช้งานในการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเครื่อง Electron Spin Resonance Spectrometer

ขอขอบคุณโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างทางโบราณคดี เพื่อกำหนดอายุในงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. รัศมี ชูทรงเดช หัวหน้าโครงการฯ และอาจารย์ชวลิต ขาวเขียว อาจารย์ประจำภาควิชาโบราณคดี คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ท่านกรุณาเอื้อเฟื้อตัวอย่างในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณพิพัฒน์ กระจ่างจันทร์ คุณอนุสรณ์ อำพันธ์ศรี และคณะผู้ช่วยนักวิจัยทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและคัดเลือกตัวอย่างและให้ความอนุเคราะห์ที่พักในการเก็บตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณน้องๆ ผู้ช่วยเหลือและร่วมเดินทางในการเก็บตัวอย่าง ได้แก่ คุณพงษ์ยุทธ ศรีพลอย คุณจตุรพร ทองวิจิตร และคุณอนุพงษ์ ประพันธ์ และเพื่อนๆ ที่ภาควิชาชีวเคมีและเทคโนโลยีทุกท่านที่เป็นเพื่อนและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่เป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา คุณค่าอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้ศึกษาวิจัยด้านวิทยาศาสตร์โบราณคดีในรุ่นต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	4
1.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่	
2. ทฤษฎี.....	9
2.1 หลักการของการกำหนดอายุโดยวิธีอิลีCtrอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR Dating).....	9
2.2 หลักการของอิลีCtrอนสปินเรโซแนนซ์.....	13
2.2.1 อิลีCtrอนสปินเรโซแนนซ์.....	13
2.2.2 ลักษณะของ ESR สเปกตรัม.....	16
2.2.3 อุปกรณ์ (Instrumentation).....	17

บทที่	หน้า
2.3 การกำหนดอายุโบราณวัตถุประเภทวัสดุเคลือบฟันและกระดูก.....	20
2.3.1 ประเภทวัสดุเคลือบฟันและกระดูก (teeth and bones enamel materials).....	20
2.3.2 สเปกตรัมของ ESR และการแตกออกของส่วนประกอบ โครงสร้างผลึก apatite.....	22
2.3.3 ประเภทวัสดุเคลือบเปลือกหอย (Biocarbonate Shell fossil materials).....	26
2.3.4 สเปกตรัมของ ESR และการแตกออกของส่วนประกอบ โครงสร้างผลึก CaCO ₃	28
2.4 พื้นที่ในการศึกษา.....	30
2.5 สภาพของแหล่งโบราณคดี.....	30
2.6 การเตรียมตัวอย่าง (SAMPLE PREPARATION).....	35
2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค XRD และ FT-IR.....	36
2.8 การคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose).....	40
2.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง.....	58
บทที่	
3. วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.1 การเก็บตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose และการคัดเลือกตัวอย่าง.....	53
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	54
3.1.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	54
3.2 การเตรียมตัวอย่างฟันและเปลือกหอยสำหรับวัดสัญญาณ ESR.....	57
3.2.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์.....	57
3.2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับฟันสัตว์).....	58
3.2.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับเปลือกหอยโบราณ).....	62

บทที่	หน้า
3.3 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสี เพื่อคำนวณ Annual dose.....	64
3.3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์.....	64
3.3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	64
3.4 การนำตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อฉายรังสีแกมมา สำหรับการหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose.....	65
3.4.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์.....	65
3.4.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	66
3.5 การวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึกของ เคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	67
3.5.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์.....	67
3.5.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	68
3.6 วิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite ,Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	69
3.6.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์.....	69
3.6.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับการวิเคราะห์ค่า g-factor ในสารมาตรฐาน).....	70
 บทที่	
4. ผลการทดลอง.....	72
4.1 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose ในตัวอย่างดิน.....	72
4.2 ผลการหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content, %W).....	73

บทที่	หน้า
4.3 ผลการคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดิน.....	74
4.4 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ.....	75
4.4.1 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟัน.....	75
4.4.2 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเปลือกหอยโบราณ.....	75
4.5 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ.....	77
4.6 ผลการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ เพื่อสำหรับการหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose.....	79
4.7 ผลการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึก ของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	80
4.7.1 ผลการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึก ของเคลือบฟันสัตว์.....	80
4.7.1.1 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	80
4.7.1.2 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 3.....	81
4.7.1.3 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	82
4.7.1.4 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151 /A4234 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3.....	83

บทที่	หน้า
4.7.1.5	
เกลือบพื้นสัตว์รหัส # 1151 /A4233 Level 20	
MHS'45 A. I S23W10 NWQ 1.....	84
4.7.1.6	
เกลือบพื้นสัตว์รหัส # 981-1 Level 20	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 1.....	85
4.7.1.7	
เกลือบพื้นสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20	
MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3.....	86
4.7.1.8	
เกลือบพื้นสัตว์รหัส # 1453 Level 26	
MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4.....	87
4.7.2	
ผลการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึก	
ของเปลือกหอยโบราณ.....	88
4.7.2.1	
เปลือกหอยรหัส # 1583-1 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	88
4.7.2.2	
เปลือกหอยรหัส # 1583-2 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	89
4.7.2.3	
เปลือกหอยรหัส # 1583-3 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	90
4.7.2.4	
เปลือกหอยรหัส # 1583-4 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	91
4.7.2.5	
เปลือกหอยรหัส # 1583-5 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	92
4.7.2.6	
เปลือกหอยรหัส # 1583-6 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	93
4.7.2.7	
เปลือกหอยรหัส # 1583-7 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	94
4.7.2.8	
เปลือกหอยรหัส # 1583-8 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10.....	95

บทที่	หน้า
4.8 ผลการหาปริมาณ Total dose of natural radiation (<i>TD</i>) โดยวิธี Additive dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	96
4.8.1 ผลการหาปริมาณ (<i>TD</i>) โดยวิธี Additive dose โครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์.....	96
4.8.1.1 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	97
4.8.1.2 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 3.....	99
4.8.1.3 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	100
4.8.1.4 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3.....	101
4.8.1.5 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151 /A4234 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 1.....	102
4.8.1.6 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151/A4233 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 1.....	103
4.8.1.7 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3.....	104
4.8.1.8 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4.....	105
4.8.2 ผลการหาปริมาณ (<i>TD</i>)โดยวิธี Additive dose โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยโบราณ.....	106
4.8.2.1 เปลือกหอยรหัส # 1583-1 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	106
4.8.2.2 เปลือกหอยรหัส # 1583-2 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	107

บทที่	หน้า
4.8.2.3 เปลือกหอยรหัส # 1583-3 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	109
4.8.2.4 เปลือกหอยรหัส # 1583-4 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	110
4.8.2.5 เปลือกหอยรหัส # 1583-5 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	111
4.8.2.6 เปลือกหอยรหัส # 1583-6 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	112
4.8.2.7 เปลือกหอยรหัส # 1583-7 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	113
4.8.2.8 เปลือกหอยรหัส # 1583-8 Level 29	
MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4.....	114
4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	115
4.9.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม ESR ของสารประกอบ Hydroxylapatite มาตรฐานกับสารประกอบ Hydroxylapatite ที่มีอยู่ในเคลือบฟัน ธรรมชาติ.....	115
4.9.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ โดยวิธี XRD.....	116
4.9.3 ผลการวิเคราะห์ถ่ายภาพพื้นผิวเคลือบฟันของสัตว์และ เปลือกหอยโบราณด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope.....	117
4.9.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลในเคลือบฟันสัตว์ด้วย เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR).....	120
บทที่	
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	121

บทที่	หน้า
5.1 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose ในตัวอย่างดิน.....	121
5.2 การหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content, %W).....	121
5.3 การคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดิน.....	122
5.4 การวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ.....	122
5.5 การคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่าง เคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ.....	123
5.6 การฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อ สำหรับการหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose.....	123
5.7 การวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึกของ เคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	123
5.8 การหาปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) โดยวิธี Additive dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	124
5.9 การวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	125
5.10 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกตัวอย่างมาใช้ในการศึกษา.....	126
5.11 ข้อเสนอแนะ.....	127
รายการอ้างอิง.....	128
ภาคผนวก.....	132

ภาคผนวก ก	การใช้สารละลาย Fricke เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสี มาตรฐานอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสีระดับสูง สำหรับตัวอย่าง.....	133
ภาคผนวก ข	รูปภาพตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ ที่ได้จากหลุมขุดค้นที่ 1 S23W10 ภายในแหล่งโบราณคดี เพิงผาถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน.....	140
ภาคผนวก ค	รูปภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	149
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		155

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากสเปกตรัมของ ESR ที่เกิดจากการแตกออกของ ส่วนประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึก apatite เนื่องมาจากรังสีใน สิ่งแวดล้อม.....	24
2.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากสเปกตรัมของ ESR ที่เกิดจากการแตกออกของ ส่วนประกอบทางเคมีของ CaCO_3 ของ Aragonite Shell และพีคหินปะการัง เนื่องมาจากรังสีใน สิ่งแวดล้อม.....	29
2.3 ตารางแสดงตำแหน่งเลขคลื่นของ IR absorption bands ของเคลือบฟันสัตว์ โดยทั่วไป.....	39
2.4 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี (หน่วย ppm หรือ %) และอัตราการแผ่รังสีต่อปี (หน่วย μGy).....	42
3.1 รายละเอียดของตัวอย่างฟันที่นำมากำหนดอายุโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์..	56
3.2 ตารางแสดง Condition ต่างๆ ของการวัดสัญญาณ Electron Trapped ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	68
4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer.....	72
4.2 ผลการหา % Water content ในตัวอย่างดิน.....	74
4.3 ผลการคำนวณค่า Annual dose ในตัวอย่างดิน.....	75
4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเคลือบฟันโดยวิธี ICP-AES.....	76
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเปลือกหอย ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer.....	76
4.6 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose) ในตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์.....	77
4.7 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose) ในตัวอย่างเปลือกหอย.....	78
4.8 ผลการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ.....	79
5.1 สรุปผลการกำหนดค่าอายุโดยวิธี Electron Spin Resonance ของ เคลือบฟันสัตว์ (330 -410 cm) และเปลือกหอยโบราณ (430 – 440 cm).....	125

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาของ radioactive กับตัวอย่าง ทางโบราณวัตถุหรือตัวอย่างทางธรณีวิทยา..... 9
2.2	แผนภาพอธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมหรือโครงสร้างผลึก ของวัสดุในตัวอย่างที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุหรือสารประกอบ ทางอนินทรีย์หรืออินทรีย์ภายใน ตัวอย่าง โบราณวัตถุหรือตัวอย่าง ทางธรณีวิทยา..... 10
2.3	ขอบเขต และวัสดุตัวอย่างที่สามารถนำมากำหนดอายุโดยวิธี ESR dating..... 11
2.4	สัญญาณของอิเล็กตรอนที่หมุนกำทอน (ESR signal) ของสารเคลือบฟัน (enamel) ที่เป็นตัวอย่างจาก <i>Le Moustier</i> 12
2.5	การหาปริมาณ total dose ของตัวอย่างที่เริ่มสะสมตั้งแต่แรกจนกระทั่ง ถึงเวลาปัจจุบัน ซึ่งหาได้จากวิธี additive dose..... 13
2.6	การเกิดสปินในอิเล็กตรอน เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน..... 14
2.7	กราฟแสดง Splitting ของระดับพลังงานจากอิเล็กตรอนอิสระภายใต้ อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก..... 15
2.8	เปรียบเทียบลักษณะของ absorption Spectrum (a) และ derivative (b)..... 16
2.9	แผนภาพการทำงานของ ESR Spectrometer..... 17
2.10	เครื่อง ESR Spectrometer และระบบควบคุม..... 18
2.11	หลอดบรรจุตัวอย่างที่ใส่ลงในส่วนของ cavity resonator..... 18
2.12	Resonant cavities (ซ้าย), magic -T Bridge (ขวาบน), wave guide (ขวาล่าง) และ electric and magnetic ของ standing waves..... 19
2.13	รูปแบบพื้นผิวด้านบนของโครงสร้างฟันจาก fossil ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ที่มีกิบเท้า..... 21
2.14	แสดงโครงสร้างผลึก apatite $[Ca_{10}(PO_4)_6X_2]$ 22
2.15	สเปกตรัมของ ESR หลังจากการอบรังสีด้วยรังสีแกมมาแล้ว..... 23
2.16	แสดงแกนหลักของ orthorhombic CO_2^- และการหมุนรอบแกนสมมติ..... 25
2.17	สเปกตรัม ESR ของ powdered tooth enamel..... 26
2.18	แสดงภาคตัดขวางภายในของเปลือกหอยประเภท aragonitic mollusc shell... 27

รูปที่	หน้า
2.19 แสดงโครงสร้างผลึกของ Aragonite.....	27
2.20 แสดงโครงสร้างผลึกของ Calcite.....	28
2.21 สเปกตรัมของ ESR ของตัวอย่าง aragonitic shell.....	29
2.22 สเปกตรัมของ ESR ของตัวอย่าง Calcite shell.....	30
2.23 แสดงตำแหน่งของพื้นที่จุดคั่นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด.....	31
2.24 รูปแสดงการทำงานของพื้นที่จุดคั่นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด.....	32
2.25 แสดงตำแหน่ง profile excavation ของจุดคั่นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด.....	33
2.26 รูปภาพแสดงตัวอย่างฟันกวาง (family Cervidae) สัตว์ในวงศ์วัวป่า (family Bovidae) หอยน้ำจืดสายพันธุ์ <i>Nodularia scobinata (Carditidae)</i>	34
2.27 ภาพแสดงส่วนของฟันที่ติดกับกระดูกเชิงอก.....	35
2.28 ภาพตัวอย่างเปลือกหอยที่ยังไม่ได้ลอกเอาส่วนหน้าออก และภาพตัวอย่างเปลือกหอยที่ลอกเอาส่วนหน้าออกแล้ว.....	36
2.29 แสดงเส้นสเปกตรัมของ IR ของแถบหมู่ H ₂ O และ OH เปรียบเทียบ ระหว่างกวางยุคใหม่กับซากฟอสซิลของกวางโบราณ (A) และแสดง แถบของสารประกอบคาร์บอนเนต (B).....	37
2.30 แสดงเส้นสเปกตรัมของ XRD ระหว่างกวางยุคใหม่ (Modern) (A) กับซากฟอสซิลของกวางโบราณ (B).....	38
2.31 แผนภาพขั้นตอนการ Treatment ตัวอย่าง.....	40
2.32 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม.....	41
2.33 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีโพแทสเซียม-40.....	41
2.34 ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงที่แตกต่างกันของอนุภาคแอลฟา เบตาและแกมมา.....	43
2.35 อัตราการลดทอนความสามารถในการทะลุทะลวง ของอนุภาคแอลฟา (α) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอน.....	43
2.36 อัตราการลดทอนความสามารถในการทะลุทะลวงของอนุภาคเบตา (β) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอน.....	44

รูปที่	หน้า
2.37 ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของอนุภาคเมื่อไม่ผ่านตัวกลาง ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ.....	45
2.38 ลักษณะทาง Geometry ของตัวอย่างฟันจาก ปรากฎการณ์ Radiation Damage.....	46
2.39 ลักษณะทาง Geometry ของตัวอย่างฟันจาก ปรากฎการณ์ Radiation Damage เปรียบเทียบกับตัวอย่างตะกอนดิน.....	47
2.40 การเปรียบเทียบสัญญาณปกติ และพีคที่มีสัญญาณรบกวน (Noise).....	50
2.41 แผนภาพขั้นตอนการเลือกตัวอย่าง.....	52
2.42 แผนภาพขั้นตอนการวัดปริมาณสัญญาณ ESR.....	52
3.1 แสดงภาพหลุมขุดค้นที่ 1 (S23W10) ภายในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด...	53
3.2 กรอบสำหรับเก็บตัวอย่างดิน.....	54
3.3 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อวัด Annual dose.....	55
3.4 ตัวอย่างที่ทำการเก็บในถุงพลาสติกและลงรายละเอียดไว้แล้ว.....	56
3.5 แสดงส่วนประกอบของตัวอย่างฟัน.....	58
3.6 แสดงการแยกส่วนของ Enamel ออกจาก เนื้อฟัน (Dentine).....	59
3.7 แสดงการขูดหินปูนและเนื้อฟันออกจาก Enamel ของตัวอย่าง.....	60
3.8 การกรองสารละลายที่ละลายหินปูนและเนื้อฟัน.....	61
3.9 Enamel ที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็น powder.....	62
3.10 การ treatment ในส่วนของเปลือกหอยให้สะอาด.....	63
3.11 เปลือกหอยในส่วนที่เป็นโครงสร้างของ Aragonite ที่ผ่านการ treatment แล้วพร้อมที่จะบดเป็น powder.....	64
3.12 ตัวอย่างดินที่ผ่านการร่อนแล้ว.....	65
3.13 แสดงการบรรจุตัวอย่างที่ฉายรังสีใน Chamber.....	67
4.1 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกัมมันตรังสี และตำแหน่งสมมติของระดับชั้นความลึกของหลุมขุดค้นที่ 1 (S23W10).....	73

รูปที่	หน้า
4.2 แผนภูมิแห่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกัมมันตรังสี และตำแหน่งสมมติบอกรหัสตัวอย่างและระดับชั้นความลึกของ ตัวอย่างเคลือบพื้น.....	78
4.3 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19.....	81
4.4 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19.....	82
4.5 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19.....	83
4.6 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1151 /A4234 Level 20.....	84
4.7 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1151 /A4233 Level 20.....	85
4.8 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 981-1 Level 20.....	86
4.9 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20.....	87
4.10 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของ สัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบพื้นสัตว์รหัส # 1453 Level 26.....	88

รูปที่	หน้า
4.11 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-1 Level 29.....	89
4.12 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-2 Level 29.....	90
4.13 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-3 Level 29.....	91
4.14 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-4 Level 29.....	92
4.15 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-5 Level 29.....	93
4.16 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-6 Level 29.....	94
4.17 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-7 Level 29.....	95
4.18 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ <i>Nodularia scobinata</i> (Carditidae) รหัส # 1583-8 Level 29.....	96
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19.....	97

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1125 /A3120 Level 19.....	99
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1695 /A3110 Level 19.....	100
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1163 /A3671 Level 20.....	101
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1151 /A4234 Level 20.....	102
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1151 /A4233 Level 20.....	103
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 981-1 Level 20.....	104
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัสน # 1453 Level 26.....	105
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัสน # 1583-1 Level 29.....	106
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัสน # 1583-2 Level 29.....	108

รูปที่	หน้า
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-3 Level 29.....	109
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-4 Level 29.....	110
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-5 Level 29.....	111
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-6 Level 29.....	112
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-7 Level 29.....	113
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-8 Level 29.....	114
4.35 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของสารมาตรฐาน Hydroxylapatite อบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง.....	115
4.36 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึก Aragonite ในเปลือกหอยโบราณรหัส # 1583.....	116
4.37 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึก Hydroxylapatite ในเคลือบฟันสัตว์โบราณรหัส #1163.....	117
4.38 ภาพถ่ายพื้นผิวของเคลือบฟันสัตว์ที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 500X.....	118
4.39 ภาพถ่ายพื้นผิวของเคลือบฟันสัตว์ที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 2000X.....	118
4.40 ภาพถ่ายพื้นผิวของเปลือกหอยโบราณที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 500X....	119

รูปที่	หน้า
4.41 ภาพถ่ายพื้นผิวของเปลือกหอยโบราณที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 2000X.....	119
4.42 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันนัลในเคลือบฟันสัตว์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR).....	120
ข1 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1163 -A3671 (#1163 -A3671 MHS'45 THAMLOD AREA I S23W10 NWQ 3 Level 20. 340-350 cm.dt.) ที่ผ่านการเอาส่วนที่ ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา.....	140
ข2 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1453 (#1453 MHS'45 THAMLOD AREA I S23W10 NEQ 4 Level 26. 400-410 cm.dt.) เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาด พร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	141
ข3 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 919 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	142
ข4 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1125 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	143
ข5 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1695 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	144
ข6 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 981-1 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	145
ข7 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1151/A4233 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	146

รูปที่	หน้า
ข8 ตัวอย่างพินสัต์ว์ รหัส # 1151/A4234 เป็นพินขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบพินที่สะอาดพร้อม ทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	147
ข9 ตัวอย่างเปลือกหอยหอยน้ำจืดโบราณสายพันธุ์ <i>Nodularia scobinata (Carditidae)</i> รหัส # 1583-1 ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อผิวชั้นในของกาบ ที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR.....	148
ค1 เครื่อง Eletron Spin Resonance Spectrometer รุ่น JEOL ES-IPRITS/RE-2X ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron) cavity resonator เป็นแบบ cylindrical TE ₀₁₁ ใช้ Microwave Bridge ในช่วง X – band ของ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	149
ค2 เครื่องควบคุมป้อนสนามแม่เหล็ก.....	150
ค3 Microwave Bridge ช่วง X – band.....	150
ค4 cavity resonator แบบ cylindrical TE ₀₁₁	151
ค5 หลอดแก้วควอตซ์สำหรับบรรจุตัวอย่างที่บดเป็น powder แล้ว.....	151
ค6 ดันกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel.....	152
ค7 อุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว) (Shielding attenuation = 90 %) ที่ทำหน้าที่กำบัง รังสีแกมมาเพื่อเพิ่มเวลาในการฉาย ใน Chamber ของดันกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel.....	152
ค8 หัววัดรังสีแบบ HPGe ขนาด 76×76 mm.....	153
ค9 Amplifier และ maltichannel analyzer	153
ค10 Profile-Areal ของหลุมชุดคันที่ 1 S23W10.....	154
ค11 Profile-Areal ด้านทิศตะวันตกของหลุมชุดคันที่ 1 S23W10 ผนังด้านที่เก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิจัย.....	154

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีการนำเอาความรู้เกี่ยวกับนิวเคลียร์เทคโนโลยีนั้น นำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านศิลปวัฒนธรรม และ โบราณคดีเป็นอันมาก โดยเฉพาะการนำเอาเทคนิคด้านวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์มาประยุกต์ใช้ในงานด้าน โบราณคดีที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดอายุของโบราณวัตถุ หรือที่เรียกว่าเป็นการกำหนดอายุแบบสัมบูรณ์ การตรวจสอบและทำการพิสูจน์ ซึ่งเป็นวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งในสาขา Archaeological Science เพื่อใช้ประกอบการศึกษาวิจัยด้านศิลปวัฒนธรรมของชาติไทยและความเป็นมาของผืนแผ่นดินไทยในอดีต อันเป็นประโยชน์ในการอนุรักษ์วัฒนธรรมของชาติ แต่เดิมในการกำหนดอายุโบราณวัตถุด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์เช่นแบบวิธีเรดิโอคาร์บอน (radiocarbon หรือ ^{14}C dating) ที่ใช้เทคนิคการวัดรังสีเบตา ซึ่งมักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนในการกำหนดอายุที่มีมากเกินไป ความยุ่งยากของขั้นตอนในการทดลองและประมวลผล ข้อจำกัดอันเนื่องมาจากคุณสมบัติเฉพาะของตัวอย่างที่ไม่สามารถกำหนดอายุโบราณวัตถุโดยวิธีเรดิโอคาร์บอนได้ เช่น ตัวอย่างอนินทรีย์ที่อยู่ในหินและกระดูก ครึ่งชีวิตของคาร์บอน-14 ที่สั้นจนไม่อาจกำหนดอายุในช่วงเวลาที่ยาวนานได้ การทดลองที่ทำให้เกิดสูญเสียตัวอย่างโดยวิธีทำลายที่มากเกินไป รวมไปถึงความไม่แน่นอนในการวัดกัมมันตภาพรังสีที่เหลืออยู่ในตัวอย่าง ส่วนวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์หรือวิธีการเรืองรังสีความร้อน (Thermoluminescence dating) ก็มักเกิดปัญหาอันเนื่องมาจากการสั่นดาปสารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่าง ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์เรืองแสงอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี (Chemical luminescence ; CL) ร่วมอาจทำให้การกำหนดอายุโบราณวัตถุด้วยวิธีนี้เกิดข้อผิดพลาดขึ้น ส่งผลให้การศึกษาวิจัยด้านโบราณคดีที่เกี่ยวข้องผิดไปจากความเป็นจริง

วิจัยนี้คือวิธีการกำหนดอายุโบราณวัตถุอีกรูปแบบหนึ่ง ที่อาศัยหลักการดูดกลืนความถี่ช่วงไมโครเวฟ ของอิเล็กตรอนที่ไม่ครบคู่ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง โดยใช้ตัวอย่างเป็นวัสดุประเภท enamel บางประเภท ซึ่ง enamel นั้นเป็นสารเคลือบธรรมชาติที่มีอยู่ในตัวอย่างโบราณวัตถุ อันได้แก่ในกลุ่มแร่ apatite ที่มีอยู่ในตัวอย่างฟอสซิลของฟันและกระดูก และในกลุ่มแร่ Calcite ที่มีอยู่ในฟอสซิลของเปลือกหอยโบราณที่ในอดีตได้รับ External dose rate จากรังสีแอลฟา เบตา แกมมา จากธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม และจากสารกัมมันตรังสี U, Th และ K ที่มีอยู่ในตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนของกลุ่มแร่ดังกล่าวได้รับพลังงานเพิ่มขึ้น และจะทำให้อิเล็กตรอน

ตัวหนึ่งซึ่งมีสปินตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งจะขึ้นจาก valance band ไปอยู่ใน conduction band และทำให้เกิด “หลุม” ขึ้นใน valance band ในบางโอกาสอิเล็กตรอนและหลุมนี้จะกลับรวมตัวกันใหม่โดยทันที แต่ส่วนใหญ่อิเล็กตรอนมักถูกตรึงหรือถูก trap อยู่ใน conduction band เป็นเวลานาน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณรังสีที่ได้รับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดสปีชีส์ที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่เหล่านั้นสะสมอยู่ตลอดเวลาเป็นเวลายาวนาน เมื่อทำการตรวจจับสัญญาณของอิเล็กตรอนที่หมุนกำทอน (resonance) เนื่องจากการดูดกลืนความถี่ช่วงไมโครเวฟของอิเล็กตรอนที่ไม่ครบคู่เหล่านั้น สัญญาณของอิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (lone pair electron) ที่วัดได้สัดส่วนจะแปรตามค่า equivalent dose ซึ่งสามารถหาได้โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโคปี จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาคำนวณค่า dose rate และทำการประมวลผลเพื่อหาอายุของตัวอย่างได้ เรียกการกำหนดอายุชนิดนี้ว่า “วิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์” ซึ่งการกำหนดอายุโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์นี้สามารถให้ผลในการวิเคราะห์และความแม่นยำสูงและใช้ปริมาณตัวอย่างเพียงเล็กน้อยกว่าวิธีอื่นๆ ที่กล่าวมา นอกจากนี้ยังเป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างประเภททำลายในเกณฑ์ที่ต่ำ หรือในตัวอย่างบางประเภทก็สามารถกำหนดอายุโดยไม่ทำลายได้ (Nondestructive) และในบางกรณียังสามารถที่จะใช้กำหนดอายุโบราณวัตถุที่มีอายุยาวนานได้มากกว่าวิธีเรดิโอคาร์บอน การวิเคราะห์รวดเร็วและลดความคลาดเคลื่อนได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ อีกทั้งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งตัวอย่างที่มาจากสิ่งมีชีวิตหรืออินทรีย์สาร ชั้นตะกอนดิน และตัวอย่างที่เป็นอนินทรีย์สารได้มากกว่าวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์หรือวิธีอื่น ซึ่งตามแหล่งโบราณคดีต่างๆ ในประเทศไทยของเรานั้นในปัจจุบันยังไม่มีหน่วยปฏิบัติการด้านการกำหนดอายุโบราณวัตถุโดยวิธี ESR Dating และการศึกษาฟิสิกของ ESR ที่ได้จากสารประกอบในกลุ่มแร่ apatite และ calcite จากตัวอย่างโบราณวัตถุภายในประเทศนั้นยังไม่มีการศึกษาวิจัยกันอย่างละเอียด จึงเห็นสมควรที่จะทำการศึกษาวิธีการดังกล่าวให้เกิดการพัฒนาด้าน Archaeological Science โดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ในประเทศให้มากขึ้น ซึ่งจะมีประโยชน์ทั้งด้านโบราณคดีและธรณีวิทยาในอนาคต

การรายงานผลการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิดที่ขุดค้นพบ ณ แหล่งโบราณคดีเพิงผาลอด ซึ่งตั้งอยู่ในศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าลุ่มแม่น้ำปายตอนเหนือ ในท้องที่ตำบลถ้ำลวด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งแหล่งโบราณคดีเพิงผาลอด เป็นเพิงผาขนาดเล็ก สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 640 เมตร ตัวอย่างฟันที่ใช้เป็นตัวอย่างฟันสัตว์ประเภทวางและกระปือโบราณ และเปลือกหอยโบราณที่มีอายุในช่วงสมัยพลสโตซีนตอนปลายประมาณ 22,190-12,100 ปีมาแล้ว ตัวอย่างเหล่านี้พบในหลุมขุดค้นพื้นที่ที่ 1 ขนาด 4 เมตร×4 เมตร ซึ่งอยู่ใน

ความรับผิดชอบของโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน
คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร [1]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิดโดยวิธีอิเล็กตรอนสปิน
เรโซแนนซ์ และเงื่อนไขในการกำหนดอายุตัวอย่าง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 วิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟัน
ของสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกตัวอย่างมาใช้ในการ
การศึกษา

1.3.2 วัดสัญญาณอิเล็กตรอนรั่ว (ESR Signal) จากอิเล็กตรอนรั่วที่อยู่ในโครงสร้างผลึก
ในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ
เพื่อกำหนดอายุ

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี ข้อมูล เครื่องมือวิเคราะห์ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 วิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ Apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จาก
เคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

1.4.3 วัดสัญญาณอิเล็กตรอนรั่ว (ESR Signal) จากอิเล็กตรอนรั่วที่อยู่ในโครงสร้างผลึก
ในกลุ่มแร่ Apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ
เพื่อกำหนดอายุ

1.4.4 วิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม (U), ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม-40
(⁴⁰K) จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อกำหนดหา internal dose rate

1.4.5 วิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม (U), ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม-40
(⁴⁰K) จากตัวอย่างดินที่อยู่รอบๆตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อกำหนดหา
external dose rate

1.4.6 คำนวณอายุและทำการสรุปผลความคลาดเคลื่อนในการกำหนดอายุตัวอย่างด้านต่างๆ

1.4.7 หาเงื่อนไขในการกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

1.4.8 ทำการสรุปผลการวิจัย และเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

เป็นกรณีตัวอย่างและแนวทางในการปฏิบัติ เพื่อให้การกำหนดอายุตัวอย่างทางธรณีวิทยา และโบราณวัตถุโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance Dating) ในประเทศไทยได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

1.6 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 สติพันธุ์ ณ สงขลา และคณะ [2] ทำการวิจัยเรื่อง การแสดงลักษณะกายภาพของ ฟันและกระดูกจากสัตว์และมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์โดยวิธีนิวเคลียร์ งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างฟอสซิล ที่สืบเนื่องมาจากการศึกษาเรื่องวิวัฒนาการของมนุษย์ในประเทศไทย ซึ่งได้มีการสำรวจพื้นที่บริเวณอำเภอเกาะคา จังหวัดลำปางที่มีความสูงในช่วง 220-300 เมตรจากระดับน้ำทะเล และได้มีการค้นพบฟอสซิลของฟันและกะโหลกของ *Dryopithecus sp.* และ *Homo erectus* กระดูกและฟันของหมีแพนด้ายักษ์ เสือเขี้ยวดาบ ไฮยีนา และสัตว์โบราณอื่นๆ รวมทั้งดินและหินที่อยู่โดยรอบสารตัวอย่างด้วยวิธีการอบรังสีนิวตรอน และวิธีการวางรังสีเอกซ์ สำหรับใช้เป็นแนวทางในการบ่งบอกและแบ่งแยกประเภท ตลอดจนการอนุมานอายุคสมัยของ สิ่งมีชีวิตเหล่านี้เพื่อการยืนยันถึงการค้นพบมนุษย์โบราณสายพันธุ์ *Homo erectus* เป็นครั้งแรกในประเทศไทย

1.6.2 สมหมาย ช่างเขียน และพวงทิพย์ แก้วทับทิม [3] ทำการวิจัยเรื่อง การตอบสนองต่อรังสีของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างสัตว์ทะเลชนิดมีเปลือกและกระดูก งานวิจัยนี้ เกี่ยวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างและผลการตอบสนองต่อการรับรังสีของ โครงสร้างสัตว์ทะเลประเภทมีเปลือกและกระดูกด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราดพร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ และเครื่องอ่านแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ทำให้ทราบปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต โครงสร้างผลึก และทราบความสัมพันธ์ระหว่างแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์กับปริมาณรังสีที่ได้รับในตัวอย่างแต่ละ ชนิด ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองคือลักษณะ โครงสร้างของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตเอง และผลของการเลื่อนกลางจากสัญญาณที่อ่านได้ เมื่อทำการวัดแสงเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ของตัวอย่างอบรังสีที่ผ่านการเก็บไว้เป็นเวลานาน

1.6.3 Blackwell B. A และคณะ [4] ทำการวิจัยเรื่อง ESR Dating Tooth Enamel from the Paleolithic Site at Longola, Zambia งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการค้นพบวัสดุสิ่งของ เครื่องใช้และกระดูกที่มีอายุในช่วงยุคหินกลางที่บริเวณกองหิน Longola ประเทศ Zambia ทำการ

กำหนดอายุวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของฟันสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมโบราณประเภทมีกีบเท้า 4 ซีน ซึ่งจากการทดลองมีช่วงอายุโดยเฉลี่ยประมาณ $220,000 \pm 62,000$ ปี

1.6.4 TIE-MEI CHEN และคณะ [5] ทำการวิจัยเรื่อง **ESR Dating of Tooth Enamel from YUNXIAN *Homo Erectus* Site, China.** งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการกำหนดอายุโบราณวัตถุ เศษชิ้นส่วนหัวกะโหลกของมนุษย์วานรที่ค่อนข้างสมบูรณ์ 2 ชิ้นส่วนที่ถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1989 และ 1990 ในสมัยกลางยุค Pleistocene ซึ่งถือว่าเป็นยุคแรกในสมัย Quaternary ค้นพบในบริเวณที่ราบตะกอนน้ำล้นฝั่งของแม่น้ำฮาน ในเขตปกครองยูนเสวี่ยน มณฑลหูเป่ย์ สาธารณรัฐประชาชนจีน ที่จัดจำแนกอยู่ในสายพันธุ์ *Homo erectus* จากฟอสซิลของฟันจำนวน 9 ซีนที่มีความสัมพันธ์กับอายุในทางธรณีวิทยากับเศษชิ้นส่วนหัวกะโหลกโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance (ESR) Dating) จากค่า accumulated dose (D_e) ที่คำนวณได้จากเส้นกราฟสมการเชิงถดถอยแบบ exponential function ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการปฏิบัติการทดลองในการวิเคราะห์ผล โดยผลการวิจัยพบว่าค่าอายุที่ได้อยู่ในราว $581,000 \pm 93,000$ ปี ซึ่งแตกต่างจากวิธี palaeomagnetic dating ที่หาค่าอายุได้ประมาณ 830,000 - 870,000 ปี โดยสรุปสามารถอนุมานได้ว่าอายุของฟอสซิลหัวกะโหลกที่ฐานขุดค้นในเขตปกครองยูนเสวี่ยนนั้นมีอายุอยู่ระหว่าง อายุของฟอสซิลของ *Homo erectus* ที่แหล่งโบราณคดีหลานเทียน ที่ตั้งอยู่ในมณฑลส่านซี และอายุของฟอสซิลของ *Homo erectus* ที่แหล่งโบราณคดีโจวโจวเตี้ยน ซึ่งการหาอายุของหัวกะโหลกที่ค้นพบในเขตปกครองยูนเสวี่ยนจะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่มีความสัมพันธ์กับวิวัฒนาการของสายพันธุ์มนุษย์ของจีนได้เป็นอย่างดี

1.6.5 Molodkov, A. และคณะ [6] ทำการวิจัยเรื่อง **The ESR Age of *Protlandia Arctica* Shells from Glacial Deposits of Central Latvia: an Answer to a Controversy on the Age and Genesis of their Enclosing Sediments** งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการค้นพบหอยโบราณสายพันธุ์ *Protlandia Arctica* ที่ถูกค้นพบในชั้นตะกอนสะสมที่พัฒนามากับธารน้ำแข็งบริเวณศูนย์กลางของสาธารณรัฐลัตเวีย ซึ่งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศรัสเซีย โดยเกิดการโต้เถียงขัดแย้งจากสื่อตีพิมพ์เผยแพร่ที่เกี่ยวกับค่าอายุของหอยโบราณ ที่ถูกค้นพบโดยทั่วไปตามเขตเพาะปลูกแถบตำบล Holsteinian ทางตอนเหนือของประเทศเยอรมันจนถึงเขตเพาะปลูกแถบ Weichselian และพบอยู่ทั่วไปในสภาพที่ล้อมรอบด้วยชั้นของตะกอน ในชั้นน้ำแข็ง ทะเลธารน้ำแข็ง หรือในทะเล โดยทำการขุดค้นที่ฐานขุดค้น Licupe Site ซึ่งตัวอย่างจะอยู่ในชั้นของตะกอนที่ปนไปด้วยดินและทราย ค่าอายุที่กำหนดได้จากวิธีอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างของหอยโบราณสายพันธุ์ *Protlandia Arctica* จากฐานขุดค้น Licupe และ Daugmales Tomeni อยู่ในช่วง $86,000 \pm 6,800$ ถึง $105,000 \pm 9,200$ ปี ก่อนคริสตศักราช

1.6.6 Kinoshita A. และคณะ [7] ทำการวิจัยเรื่อง **ESR dating of a subfossil shell from Couve Island, Ubatuba, Brazil** งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการค้นพบเศษส่วนของฟอสซิลบริเวณเกาะ Couve เขตการปกครอง Ubatuba เมืองซานเปาโล ทำการวิเคราะห์เศษส่วนองค์ประกอบของหอยโบราณที่มีเปลือกแบบ 2 ฝา โดยการกำหนดอายุวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ทำการหาปริมาณ archaeological absorbed dose โดยวิธี additive irradiation ในช่วง 25 ± 5 Gy ได้อายุอยู่ในช่วง $2,500 \pm 500$ ปี โดยสรุปสามารถอนุมานสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงในแถบชายฝั่งทะเลของประเทศบราซิลในระหว่างยุค Holocene และทำการอนุมานการกระจายอยู่ทั่วไปของกลุ่มสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยาของหอยเปลือก 2 ฝาได้

1.6.7 Chen S.M. และคณะ [8] ทำการวิจัยเรื่อง **A Study on ESR Dating Character of Tooth Enamel** งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการศึกษาและตรวจสอบลักษณะของ paramagnetic centers ระหว่างตัวอย่างฟอสซิลของฟัน ที่ค้นพบที่ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยใช้วิธีการกำหนดอายุแบบอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ได้แก่ฟันของช้าง, ฟันของควาง และฟันของวัว) ซึ่งเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐานบริสุทธิ์ (ได้แก่ CaF_2 , CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ และ $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$) ซึ่งจากตัวอย่างได้ทำการวิเคราะห์สเปกตรัมของ ESR และคำนวณค่า Total dose ที่เกิดจากการแผ่รังสีโดยธรรมชาตินั้นได้ช่วงอายุโดยเฉลี่ยประมาณ 1,000,000 – 10,000,000 ปี และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างสารเคลือบฟันโดยวิธี X-rays diffraction Analysis (XRD) นั้นพบว่าโครงสร้างผลึกที่เป็นองค์ประกอบหลักสำคัญคือ $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ โดยสัญญาณที่ใช้ในการวิเคราะห์หลักด้วยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์คือ PO_3^{4-} ไอออนที่เกิดการ defects ขึ้นในผลึก ซึ่งได้รับอิทธิพลจากกระบวนการการแผ่รังสีโดยธรรมชาติมากที่สุด และเรียกการอ่านค่า g-value จากสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ณ จุดที่เกิด defects ของ PO_3^{4-} ไอออนนั้นว่าบริเวณ F-centers

1.6.8 Skinner A.R. และคณะ [9] ทำการวิจัยเรื่อง **ESR dating at Mezmaiskaya Cave, Russia** งานวิจัยนี้เกี่ยวกับแหล่งโบราณคดีถ้ำแมสไมสกาย่าซึ่งได้ค้นพบสิ่งของเครื่องใช้โบราณที่ทำจากมนุษย์มากกว่า 10,000 ชิ้น ซึ่งมีสิ่งของนับพันชิ้นยังมีสภาพที่ดีและสมบูรณ์อยู่อันบ่งบอกร่องรอยของกลุ่มชนที่เคยอาศัยอยู่ในภูมิภาคแถบนี้และกลุ่มมนุษย์โบราณในสายมริชโฮมินิดส์ที่ยังหลงเหลือหลักฐานให้ศึกษา ซึ่งพบโครงกระดูกมนุษย์ในสมัยกลางยุคหินเก่า (คนภูเขาโบราณ) 7 แหล่ง และในสมัยที่มากกว่ายุคหินเก่า 3 แหล่ง เป็นซากโครงกระดูกที่สมบูรณ์ของทารกมนุษย์นีแอนเดอร์ทัลซึ่งมีลักษณะทางกายวิภาคนอนเรียงชิดติดกันบนก้อนหินปูนขนาดใหญ่ ซึ่งนอนทับด้วยมนุษย์นีแอนเดอร์ทัลที่มีอายุมากกว่าในอีกชั้นหนึ่ง โดยในชั้นระดับที่ 3 ได้ค้นพบชิ้นส่วนกะโหลกศีรษะจำนวน 24 ชิ้นอันเป็นของทารกมนุษย์นีแอนเดอร์ทัลที่มีอายุในช่วงนั้น 1-2

ปี จากการชันสูตรพบว่าทารกมีโครงร่างที่ต่างไปจากมนุษย์ธรรมดาทั่วไป จากการค้นพบจุดต่างๆในโครงกระดูกพบว่าอาจถือกำเนิดจากคนภูเขาโบราณที่นอนทับอยู่ซึ่งค้นพบในชั้นระดับที่ 2 และเมื่อทำการขุดเจาะลงไปชั้น 2A และ 2B(1) นั้นได้นำกระดูกในชั้น 2A มาทำการกำหนดอายุโดยวิธี AMS ^{14}C พบว่ามีอายุประมาณ $35,800-36,300 \pm 500$ ปี ซึ่งแตกต่างจากการกำหนดอายุโดยตรงจากกระดูกมนุษย์อินเดอร์ทัลในชั้นระดับที่ 3 ที่ได้ค่าอายุประมาณ 29,000 ปี แต่จากการพิจารณาชั้นใหม่พบว่าอาจมีการปนเปื้อนจาก modern carbon ได้ ซึ่งจากการนำตัวอย่างฟันที่พบในชั้นระดับที่ 2 ตลอดจนถึงในชั้นที่ 3 ได้ทำการกำหนดอายุจากวิธีมาตรฐานอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (ESR) ที่มีปริมาณยูเรเนียมความเข้มข้นต่ำในชั้นเคลือบฟันและหินปูนที่อยู่ภายในผิวฟันพบว่าอายุที่ได้จากวิธี ESR สามารถประมาณช่วงอายุของคนภูเขาได้อยู่ในช่วง $36,200-73,000 \pm 5,000$ ปี

1.6.9 ชวลิต ขาวเขียว [10] ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง **ธรณีโบราณคดีของพื้นที่เพิงผาถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน ภาคเหนือของประเทศไทย** ซึ่งได้ทำการศึกษาวิจัยลำดับชั้นทับถมของตะกอนจากหลุมขุดค้นสามารถแบ่งได้เป็น 4 หน่วยจาก 3 ช่วงเวลา โดยอาศัยลักษณะเนื้อตะกอน โครงสร้างตะกอน องค์ประกอบทางเคมี การเทียบเคียงระดับชั้นทับถมของแต่ละหลุมขุดค้น ค่าอายุทางวิทยาศาสตร์ ได้แก่ 1. หน่วย A ช่วงสมัยไพลสโตซีนตอนปลายก่อนที่มนุษย์จะเข้ามาใช้พื้นที่ (ก่อน 32,000 ปีมาแล้ว) 2. หน่วย B ช่วงสมัยไพลสโตซีนตอนปลายที่มนุษย์ได้เข้ามาใช้พื้นที่ดังกล่าวแล้ว (32,000 – 10,000 ปีมาแล้ว) 3. หน่วย C ช่วงสมัยไพลสโตซีนตอนต้นถึงตอนกลาง (10,000 – 2,900 ปีมาแล้ว) 4. หน่วย D ช่วงสมัยโฮโลซีนตอนปลาย (2,900 ปีมาแล้วถึงปัจจุบัน) จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถแบ่งชั้นทับถมทางวัฒนธรรมและการใช้พื้นที่นี้ในอดีตได้เป็น 4 ระยะคือ ระยะที่ 1 ช่วงแรกในสมัยไพลสโตซีนตอนปลาย (ประมาณ 32,000 – 14,000 ปีมาแล้ว) พบหลักฐานทางโบราณคดีประเภทเครื่องมือหินและเศษกระดูกเป็นจำนวนมาก มนุษย์มีการตั้งถิ่นฐานแบบสังคมเก็บของป่าล่าสัตว์ ใช้พื้นที่เพิงผาเป็นที่อยู่อาศัย ประกอบอาหารและทิ้งขยะ ระยะที่ 2 ช่วงที่ 2 ในสมัยไพลสโตซีนตอนปลาย (ประมาณ 13,000 – 10,000 ปีมาแล้ว) การดำรงชีพของมนุษย์คล้ายคลึงกับช่วงไพลสโตซีนตอนปลายช่วงที่ 1 คือเป็นสังคมที่ยังคงเก็บของป่าล่าสัตว์ แต่ในระยะนี้พบหลักฐานเกี่ยวกับการฝังศพ ระยะที่ 3 สมัยโฮโลซีนตอนต้นถึงโฮโลซีนตอนกลาง (ประมาณ 9,800 – 2,900 ปีมาแล้ว) หลักฐานทางโบราณคดีที่พบในระยะนี้ได้แก่ เศษภาชนะดินเผาขนาดเล็ก รูปร่างกลมมน เศษลูกปัด เศษกระดูกสัตว์ชิ้นเล็กๆ ก่อนข้างผุ สันนิษฐานว่าหลักฐานทางโบราณคดีที่พบในระยะที่ 3 นี้ อาจถูกพัดพามาโดยการกระทำของน้ำหรือเป็นทับถมที่เกิดจากน้ำท่วม ทำให้ยากแก่การแยกชั้นทับถมที่แน่นอนได้ ระยะที่ 4 สมัยโฮโลซีนตอนปลาย (ประมาณ

2,900 ปีมาแล้วถึงปัจจุบัน) พบโบราณวัตถุ เช่นเศษภาชนะดินเผา ลูกปัดแก้ว ลูกปัดดินเผาปะปนกับสิ่งของต่างๆที่พบในปัจจุบัน ซึ่งเป็นชั้นทับถมที่อยู่บนสุด

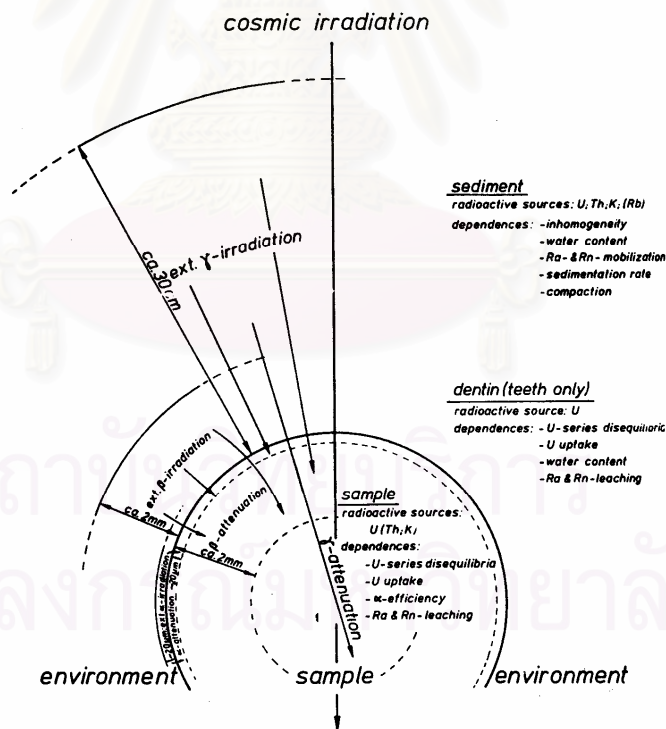
1.6.10 สว่างพงษ์ วัฒนะพิทักษ์สกุล [11] ศึกษาวิจัยเรื่อง มุมมองจากการศึกษาฟันสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในสมัยไพลสโตซีนตอนปลาย โดยผู้วิจัยได้ทำการวัดความยาวและความกว้างของฟันกรามน้อยและฟันกราม ในกวางผา เลียงผา และหมูป่า เพื่อเปรียบเทียบขนาดกับสัตว์ในปัจจุบัน และเปรียบเทียบขนาดในแต่ละชั้น และนำมาคำนวณหาค่าสถิติเบื้องต้น ผลการวิจัยพบว่า ฟันแต่ละตำแหน่งของ กวางผา เลียงผา และหมูป่าในสมัยไพลสโตซีนตอนปลายจากพื้นที่จุดค้นที่ 1 (S23W10) แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอนนั้น มีความหลากหลายมากและส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยของขนาดมากกว่าสัตว์ปัจจุบัน และเมื่อเปรียบเทียบข้อมูลฟันในแต่ละชั้นพบว่า ค่าความยาวและความกว้างของฟันกวางผา เลียงผา และหมูป่าในแต่ละชั้น ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดนั้นพบในชั้นดินที่ 5 มีอายุประมาณ 16,000 ปีมาแล้ว และพบฟันขนาดเล็กที่สุดในชั้นดินที่ 3 ซึ่งมีอายุอยู่ในช่วง 13,000 – 12,000 ปีมาแล้ว และมีแนวโน้มลดลงจนถึงสมัยโฮโลซีน ขนาดของฟันที่ลดลง อาจเกิดจากหลายปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ อาหาร และการแก่งแย่งแข่งขันระหว่างชนิด ความสัมพันธ์ระหว่างผู้ล่าและผู้ถูกล่า แต่ปัจจัยที่มีผลต่อขนาดฟันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ชัดเจนที่สุดในการศึกษาเบื้องต้นนี้คือ ปัจจัยอันเนื่องมาจากอุณหภูมิ ซึ่งมีการเปลี่ยนจากอุณหภูมิต่ำมาเป็นอุณหภูมิสูง เมื่อเข้าใกล้ช่วงรอยต่อระหว่างไพลสโตซีนตอนปลายและโฮโลซีน หรือระหว่าง 10,000 – 9,000 ปี

บทที่ 2

ทฤษฎี

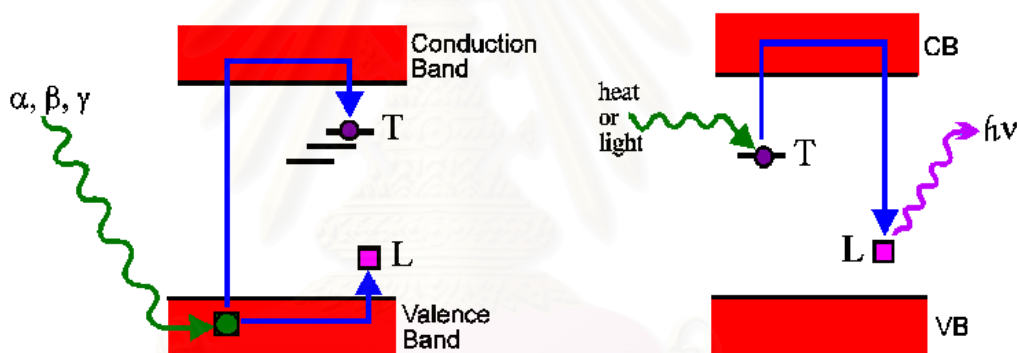
2.1 หลักการของการกำหนดอายุโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR Dating)

การแผ่รังสีธรรมชาติ อาทิ รังสีแอลฟา, เบตา และแกมมา ที่ปลดปล่อยธาตุกัมมันตรังสีเช่น ยูเรเนียม (^{238}U และ ^{235}U), ทอเรียม (^{232}Th) และจากธาตุกัมมันตรังสีลูกต่างๆ และจากธาตุ โพแทสเซียม (^{40}K) ในสิ่งแวดล้อมรวมทั้งจากรังสีคอสมิก ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเหล่านี้กับวัสดุหรือสารประกอบทางอนินทรีย์หรืออินทรีย์ภายในตัวอย่างโบราณวัตถุซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่อง (defect) ขึ้นในตัวอย่างที่เรียกว่า Radiation damage หรือ Radiation exposure ดังรูปที่ 2.1 [12]



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงการเกิดอันตรกิริยาของ radioactive กับตัวอย่างทางโบราณวัตถุหรือตัวอย่างทางธรณีวิทยา [12]

ทั้งนี้รวมถึงการแผ่รังสีธรรมชาติดังกล่าวจากตัวอย่างเองด้วย ทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่า Radiation exposure หรือ Radiation Damage ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนของวัสดุภายในตัวอย่างดังกล่าวได้รับพลังงาน ซึ่งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมหรือโครงสร้างผลึกของวัสดุในตัวอย่างขึ้นไปเป็นอนุมูลอิสระทำให้เกิดสภาพที่มีอิเล็กตรอนตัวหนึ่งซึ่งมีสปินตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่คู่กันนั้นถูกจับ (trapped) โดยอนุมูลอิสระนั้นและจะขึ้นจาก valance band ไปอยู่ใน conduction band และทำให้เกิด “หลุม” ขึ้นใน valance band ในบางโอกาสอิเล็กตรอนและหลุมนี้จะกลับรวมตัวกันใหม่โดยทันที [13] แต่ส่วนใหญ่อิเล็กตรอนมักถูกตรึงหรือถูก trapped โดยอนุมูลอิสระหรือ impurity ที่อยู่ใน conduction band เป็นเวลานาน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณรังสีที่ได้รับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดอิเล็กตรอนไม่ครบคู่เหล่านั้นสะสมอยู่ตลอดเวลาอันยาวนาน ดังรูปที่ 2.2 [14]

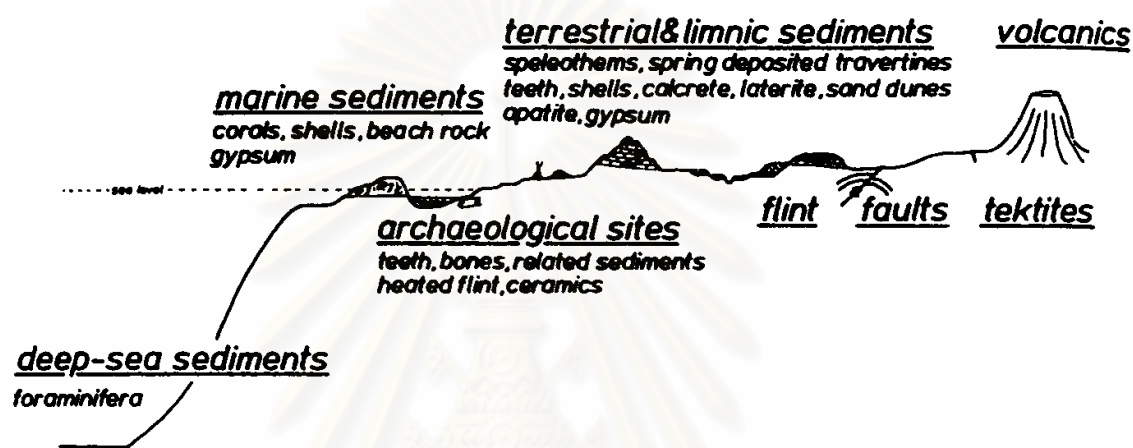


รูปที่ 2.2 แผนภาพอธิบายการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมหรือโครงสร้างผลึกของวัสดุในตัวอย่างที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุหรือสารประกอบทางอนินทรีย์หรืออินทรีย์ภายใน ตัวอย่างโบราณวัตถุหรือตัวอย่างทางธรณีวิทยา [14]

เมื่อทำการตรวจจับสัญญาณของอิเล็กตรอนที่หมუნก่าทอน เนื่องจากการดูดกลืนความถี่ช่วงไมโครเวฟของอิเล็กตรอนที่ไม่ครบคู่เหล่านั้น สัญญาณหรือความเข้มของอิเล็กตรอนโดดเดี่ยวที่วัดได้สัดส่วนจะแปรตามค่า “total dose of natural radiation (TD)” ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรมิเตอร์

การประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์แบบ ESR spectroscopy เริ่มนำมาประยุกต์ใช้เมื่อมีการกำหนดอายุตัวอย่างโบราณวัตถุและธรณีวิทยาครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1975 เมื่อ Motoji Ikeya ได้ทำการวิเคราะห์และหาอายุตัวอย่างโบราณวัตถุที่เกี่ยวกับมนุษย์ถ้ำ จากถ้ำ Akiyoshi ในประเทศญี่ปุ่น

[18] ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาการกำหนดอายุโดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR dating) จึงได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและเป็นทางเลือกวิธีหนึ่งในการกำหนดอายุในด้านธรณีวิทยา การศึกษาต้นกำเนิดลักษณะและการพัฒนาของรูปร่างผิวดิน (Geomorphology) และงานด้านโบราณคดี ดังได้สรุปการจำแนกประเภทตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อทำการกำหนดอายุดังรูปที่ 2.3 [12]



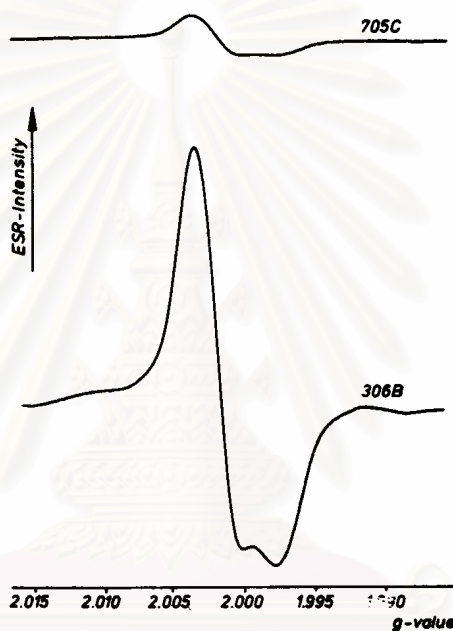
รูปที่ 2.3 ขอบเขต และวัสดุตัวอย่างที่สามารถนำมากำหนดอายุโดยวิธี ESR dating [12]

ในการตรวจวัดโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปคโทรสโคปี จะทำการตรวจวัด ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor อันเนื่องมาจากการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเดี่ยว (paramagnetic center) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสัญญาณของเครื่อง ESR ปริมาณของการดูดกลืนพลังงานที่วัด ณ จุดศูนย์กลางของ derivative curve ขึ้นอยู่กับ dose rate และระยะเวลาที่ตัวอย่างได้รับรังสีเป็นเวลาอันยาวนาน ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งอายุที่ได้ของการวิเคราะห์โดยวิธี ESR คำนวณได้จากสมการ (2.1) [12]

$$AD = \int_0^T D(t) dt \quad (2.1)$$

โดยที่ค่า AD (Archaeological dose) มีความหมายเดียวกันกับค่า total dose of natural radiation (TD) ของตัวอย่างที่เริ่มสะสมตั้งแต่วินาทีแรกจนกระทั่งถึง ณ เวลาปัจจุบันหรือในทางธรณีวิทยาเรียกว่า “geological dose (GD)” และมีความหมายเดียวกับ “equivalent dose (ED)” ซึ่ง

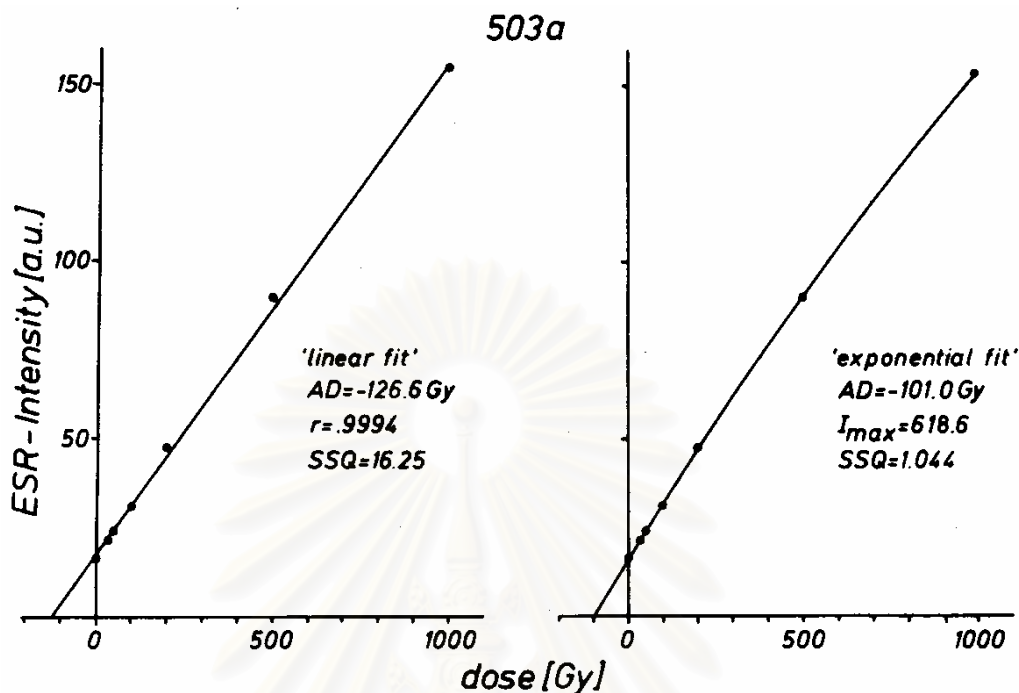
AD หาได้จากวิธี additive dose โดยการนำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแยกทางเคมีแล้วมาอบรังสีแกมมาเป็นปริมาณ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 เท่าของปริมาณรังสีที่สารประกอบได้รับจากธรรมชาติตามลำดับ [13] แล้วนำสารประกอบเหล่านั้นไปวัดค่าสัญญาณของอิเล็กตรอนที่หมุนกำหนด จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟด้วยวิธี linear extrapolation หรือ exponential extrapolation โดยแกน x คือ ค่า additive dose ที่เติมและแกน y คือค่า ESR signal จากนั้นต่อเส้นกราฟตัดแกน x จะได้ค่า AD ดังรูปที่ 2.4 [15]



รูปที่ 2.4 (รูปบน) สัญญาณของอิเล็กตรอนที่กำทอน (ESR signal) ของสารเคลือบฟัน (enamel) ที่เป็นตัวอย่างจาก *Le Moustier* (รูปล่าง) ของสารเคลือบฟันที่เป็นตัวอย่างจาก *Sterkfontein* [15]

ค่า AD หรือ TD ที่ได้ เมื่อทราบค่าของ “annual dose rate of nature radiation (D)” หรืออัตราการได้รับรังสีของวัสดุในตัวอย่างต่อเดือนหรือปี จะสามารถหาอายุของตัวอย่างโดยวิธี ESR หรือ T_{ESR} ได้จากสมการ (2.2) คือ

$$T_{ESR} = \frac{TD}{D} \quad \text{หรือ} \quad T_{ESR} = \frac{ED}{D} \quad (2.2)$$



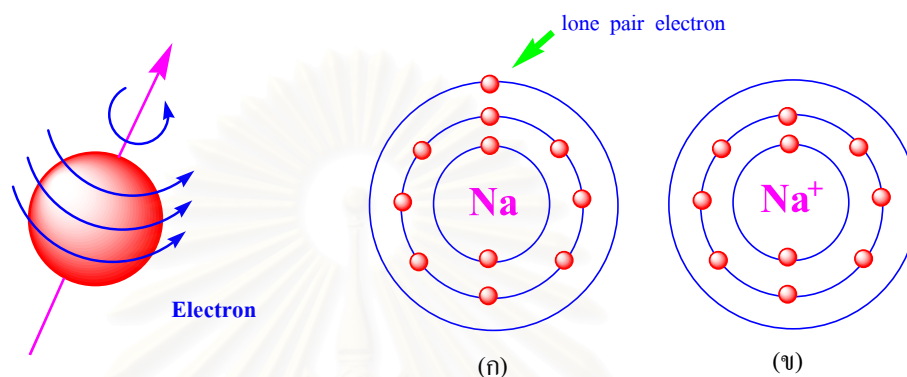
รูปที่ 2.5 การหาปริมาณ total dose ของตัวอย่างที่เริ่มสะสมตั้งแต่แรกจนกระทั่งถึงเวลาปัจจุบัน ซึ่งหาได้จากวิธี additive dose โดยการเขียนกราฟระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation หรือ exponential extrapolation (รูปซ้าย) แสดงการพลอตจุดข้อมูลที่วัดได้จากตัวอย่างหมายเลข 503a ด้วยวิธี linear fitting (รูปขวา) แสดงการพลอตจุดข้อมูลที่วัดได้ด้วยวิธี exponential fitting โดยแสดงค่า SSQ (sum of the vertical distances) ของข้อมูล และค่า I_{max} คือค่าความเข้มของสัญญาณสูงสุดที่วัดได้ [15]

2.2 หลักการของอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

2.2.1 อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ จัดเป็นสเปกโทรสโคปีแขนงหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงในช่วงไมโครเวฟ (microwave) ของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว ซึ่งในปี ค.ศ. 1925 Goudsmit ค้นพบว่าอิเล็กตรอนมีการหมุนรอบตัวเอง เรียกว่าอิเล็กตรอนสปิน (Electron spin) ดังรูปที่ 2.6 (ซ้าย) [16] ซึ่งการหมุนของอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กขึ้นมา อาจแทนขนาดและทิศทางด้วยสัญลักษณ์เป็นลูกศรชี้ขึ้น ถ้าในวงโคจรหนึ่งมีอิเล็กตรอน 2 ตัว และมีสปินตรงกันข้ามกัน โดยอิเล็กตรอนปกติที่มีสปินเท่ากับ $1/2$ จะมีสปินควอนตัม $m_s = \pm 1/2$ ซึ่งหากไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ก็จัดได้ว่าอิเล็กตรอนอยู่ใน doubly degenerate spin

state คือ state ที่มี $m_s = +1/2$ และ $m_s = -1/2$ จะมีพลังงานเท่ากัน เพราะโมเมนต์แม่เหล็กจะหักล้างกันกลายเป็นศูนย์ และถ้าวงโคจรมีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียว ที่เรียกว่า อิเล็กตรอนไร้คู่ (lone pair electron) ดังรูป 2.6 (ขวา) [16]



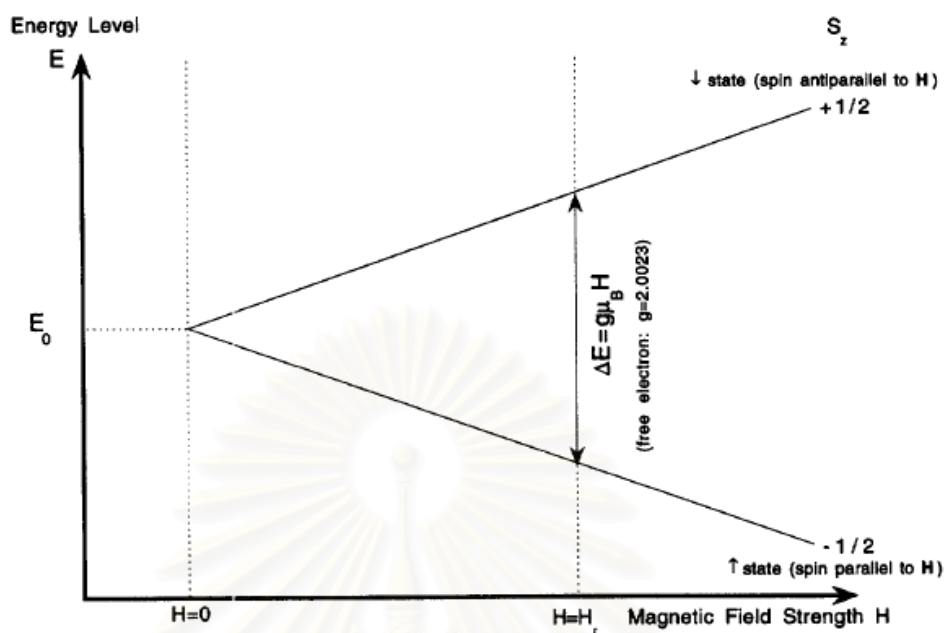
รูปที่ 2.6 (ซ้าย) การเกิดสปินในอิเล็กตรอน เกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน (ขวา) ตัวอย่างไอออนที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ก) และที่ไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ข) [16]

อะตอมที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่เรียกว่า free radical หรือ radical หากเราป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่วัสดุที่เกิด radical เหล่านั้น จะทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนไร้คู่ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ระดับ (เรียกว่า ปรากฏการณ์ Zeeman) ดังรูปที่ 2.7 [17] ในขณะที่เดียวกัน ถ้าเรายิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงาน (eV) เท่ากับความแตกต่างของพลังงานดังกล่าว จะทำให้อิเล็กตรอนไร้คู่เหล่านั้นสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี และเกิดการกำทอน (resonance) ของอิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งเรียกการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนไร้คู่ว่า อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance) ซึ่งพบว่าความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่าง state ที่มี $m_s = -1/2$ และ $m_s = +1/2$ จะเท่ากับ $g\mu_B H$ โดยที่

g คือ gyromagnetic ratio หรือเรียกว่า Spectroscopic splitting factor

μ_B คือ Bohr magneton มีค่าเท่ากับ 9.27×10^{-24} J/T

และค่า H คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) ฉะนั้นหากมีความเข้มของแสงที่เหมาะสม อิเล็กตรอนก็อาจจะเกิดการเปลี่ยนจาก state ที่มี $m_s = -1/2$ ไปยัง $m_s = +1/2$ โดยการดูดกลืนแสงในช่วงไมโครเวฟ ดังสภาวะต่อไปนี่ ดังสมการ (2.3) [16]



รูปที่ 2.7 กราฟแสดง Splitting ของระดับพลังงานจากอิเล็กตรอนอิสระ ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก [17]

$$E = h\nu = g\mu_B H \quad (2.3)$$

โดยที่ E คือ พลังงานที่ใช้ในการทรานสิชัน หรือพลังงานของไมโครเวฟที่ถูกดูดกลืน

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.62×10^{-34} J·S

v คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ

ค่า g จัดได้ว่าเป็นปริมาณเทนเซอร์ (คือปริมาณที่แสดงการขึ้นกับทิศทางของสมบัติของโมเลกุลหรือของแข็ง) ในกรณีของอิเล็กตรอนอิสระ พบว่ามีค่า $g = 2.0023$ ในสารพวกอนุมูลอิสระ (free radicals) ซึ่งมีอิเล็กตรอนเดี่ยว พบว่าค่า g จะใกล้เคียงกับค่าของอิเล็กตรอนอิสระ แต่ในพวกโลหะไอออนพบค่า g มักจะต่างไปจากค่าของอิเล็กตรอนอิสระ [16]

โดยทั่วไปแล้วค่าของ g จะขึ้นกับการจัดเรียงตัว (orientation) ของโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่หรืออิเล็กตรอนเดี่ยว [16] ว่าจะจัดอย่างไรเมื่อเทียบกับสนามแม่เหล็ก ในสภาพที่เป็นสารละลายหรือเป็นก๊าซ เนื่องจากโมเลกุลเคลื่อนที่ได้อิสระ ดังนั้นค่า g จึงเป็นค่าเฉลี่ยของการจัดเรียงตัวในแบบต่างๆ แต่ในผลึกการเคลื่อนที่ของโมเลกุลถูกจำกัด พบว่าหากพาราแมก-

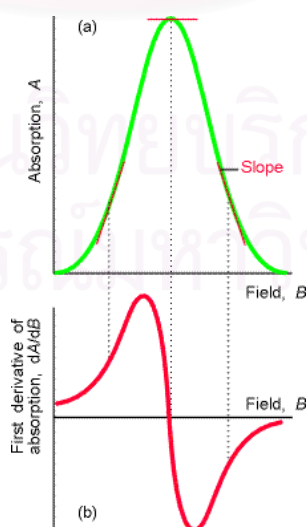
เนติก ไอออนหรืออนุมูล จัดตัวอยู่ใน crystal site ที่มีสมมาตรลูกบาศก์ (cubic) ที่สมบูรณ์ (เช่นออกตาฮีดรอน หรือเตตระฮีดรอน ไซท์) แล้วค่า g ของมันจะไม่ขึ้นกับการจัดเรียงตัวของผลึกหรือกล่าวได้ว่าค่า g เป็น isotropic แต่ถ้าหาก crystal site มีสมมาตรต่ำกว่าลูกบาศก์แล้ว ค่า g ก็จะขึ้นกับการจัดเรียงตัวของผลึก และถือว่าเป็น anisotropic ถ้าหากสมมติให้ z เป็นแกนของโมเลกุลและถือเป็นแกนหมุนที่มีจำนวนโพล (fold) สูงสุด (highest rotational axis) แล้ว g_z ก็จะมีค่าเท่ากับ g_{11} หรือค่า g ที่ได้เมื่อแกน z ขนานกับทิศทางสนามแม่เหล็ก ส่วนค่า g ในแนว x และ y ซึ่งได้แก่ g_x, g_y นั้นมักเขียนเป็น g_{\perp} หรือค่า g ที่ได้เมื่อทิศทางของสนามแม่เหล็กตั้งฉากกับแกน z ซึ่งสำหรับระบบที่มีสมมาตรกับแกน (axial symmetry) ค่า g จากการทดลองอาจเขียนได้เป็นสมการ (2.4) [16] ดังนี้

$$g^2 = g_{11}^2 \cos^2 \theta + g_{\perp}^2 \sin^2 \theta \quad (2.4)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างสนามแม่เหล็ก และแกน z

2.2.2 ลักษณะของ ESR สเปกตรัม

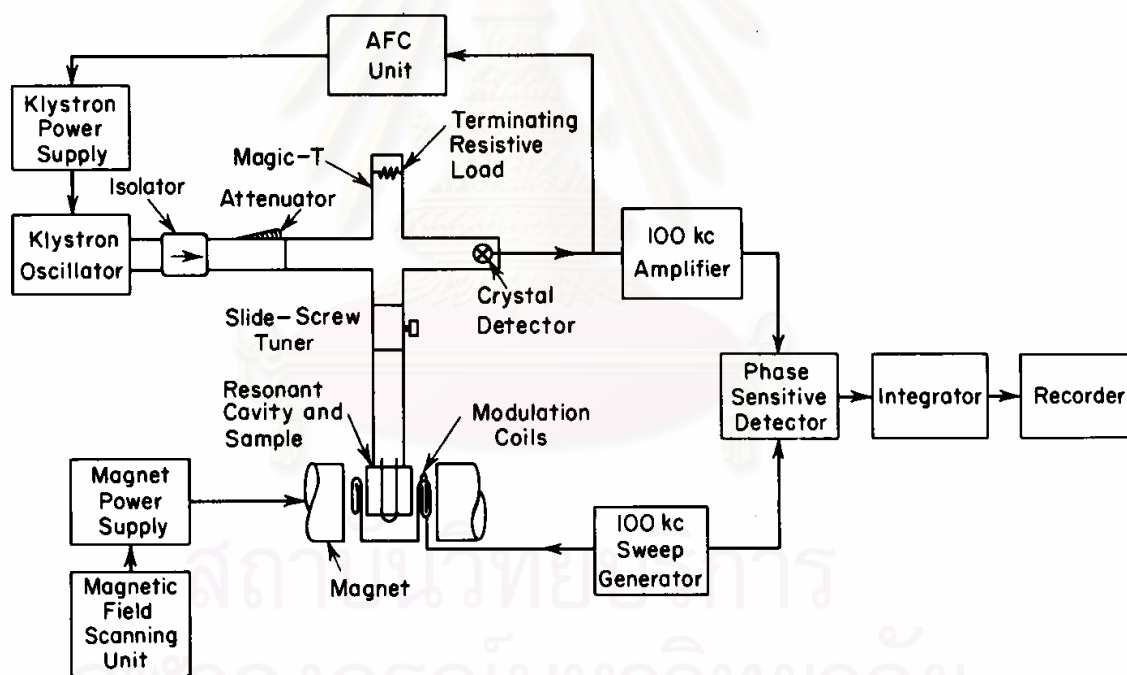
ลักษณะของ ESR สเปกตรัมมีลักษณะเป็น derivative curve คือเป็นแบบ first derivative (slope) ของ absorption curve ที่พลอตกับความเข้มสนามแม่เหล็ก (tesla, T, H หรือ B) [7] ซึ่งประโยชน์ของ derivative curve คือ ในกรณีที่แบนด์กว้าง จะมีความไว (sensitivity) มากกว่า absorption curve โดยสเปกตรัมทั้งในแบบ derivative และ absorption จะมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังรูปที่ 2.8 [18]



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบลักษณะของ absorption Spectrum (a) และ derivative (b) [18]

2.2.3 อุปกรณ์

ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron) โดยหลอดคลิสตรอนให้รังสีไมโครเวฟที่มีความยาวคลื่นเดียวแก่สารตัวอย่างและมีความถี่ 9,500 เมกะเฮิร์ตซ์ ภายในหลอดนี้มีการวัดแคว้งทางอิเล็กทรอนิกส์ ให้ลำอิเล็กตรอนที่เกิดจากการพัลส์ระหว่างแคโทด และตัวสะท้อน (reflector) ส่วนสารตัวอย่างจะบรรจุอยู่ในหลอดแก้วทำด้วยควอตซ์ขนาดเล็ก ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร [19] และวางอยู่ระหว่างขั้วแม่เหล็กถาวร แผนภาพการทำงานในรูปที่ 2.9 และ 2.10 [20] ซึ่งคลื่นไมโครเวฟนั้นจะประกอบด้วย L-band (1-2 GHz), S-band (2-4 GHz), X-band (8-10 GHz), K-band (27-35 GHz) และ W-band (95 GHz) [21]

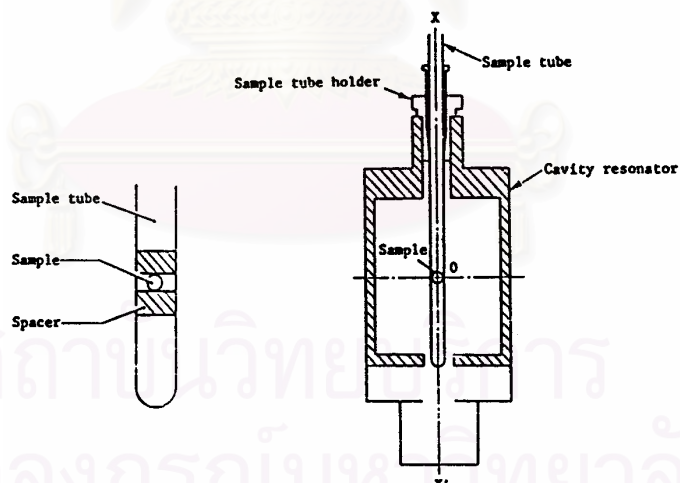


รูปที่ 2.9 แผนภาพการทำงานของ ESR Spectrometer [20]

หลอดแก้วที่บรรจุตัวอย่างแล้วเมื่อจะทำการวัดจะถูกนำไปใส่ในเครื่องในส่วนที่เรียกว่า cavity resonator ดังรูปที่ 2.11 [23]



รูปที่ 2.10 เครื่อง ESR Spectrometer และระบบควบคุม [22]



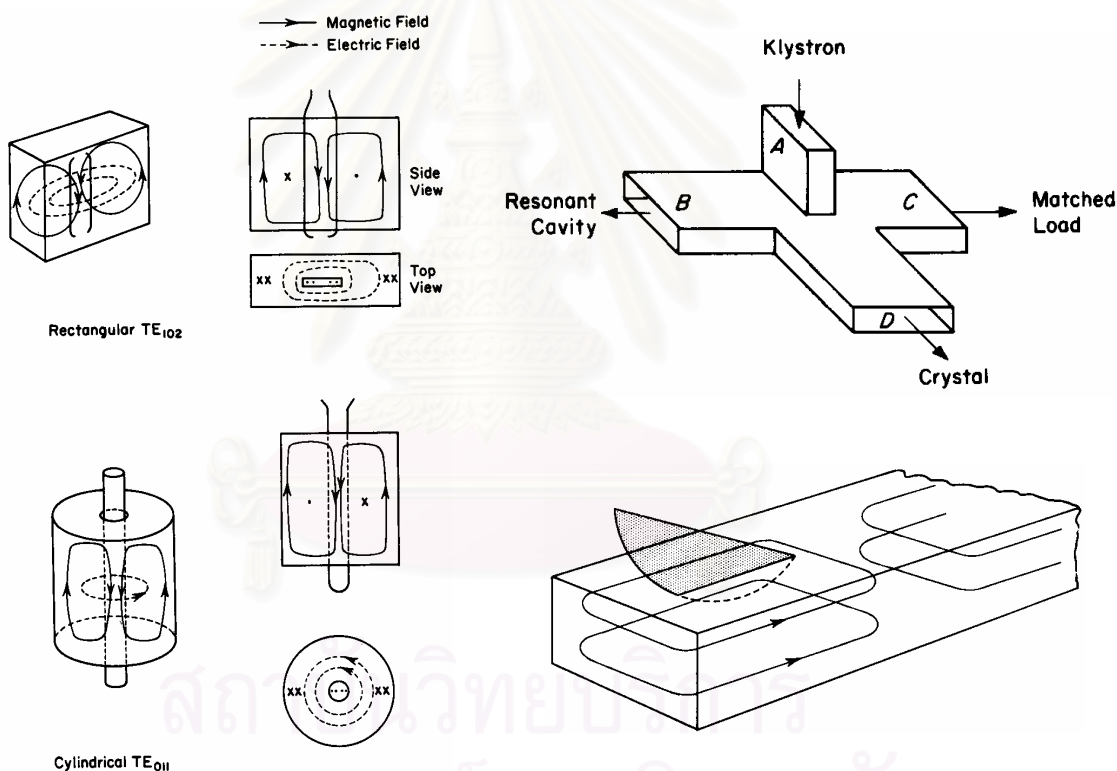
รูปที่ 2.11 หลอดบรรจุตัวอย่างที่ใส่ลงในส่วนของ cavity resonator [23]

ส่วนของ cavity resonator จะวางอยู่ระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.12 โดยมีท่อนำคลื่นไมโครเวฟ (wave guide) ต่ออยู่เพื่อนำคลื่นไมโครเวฟผ่านไปสูตัวอย่าง ลักษณะ cavity นี้จะมีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แบบ rectangular TE_{102} และแบบ cylindrical TE_{011} ดังรูปที่ 2.12 โดยคุณภาพของ cavity resonator จะมีผลโดยตรงต่อความไว

(sensitivity) ของเครื่อง spectrometer ค่าคุณภาพของ cavity นี้ จะเรียกว่า Q value หรือ Q factor ซึ่งกำหนดโดยสมการ (2.5) [16]

$$Q = \frac{2 \pi (\text{พลังงานของคลื่นซึ่งยังคงอยู่ใน cavity})}{\text{พลังงานที่สูญเสียไปต่อรอบ}} \quad (2.5)$$

โดยทั่วไปแล้ว Q ของ cavity ชนิด rectangular จะมีค่าประมาณ 4,000 ส่วนของ cylindrical จะมีค่าประมาณ 12,000 [16]



รูปที่ 2.12 Resonant cavities (ซ้าย), magic-T Bridge (ขวาบน), wave guide (ขวาล่าง) และ electric and magnetic ของ standing waves [20]

โดยสรุปข้อมูลที่ได้จาก ESR นั้นโดยทั่วไปจะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ส่วนมากคือ ไมโครเวฟ: ความถี่ระดับ GHz กำลังประมาณ mW) ที่มีความถี่ที่ค่าหนึ่งเข้าสู่วัสดุ และ scan หรือ เปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วจึงวัดปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ ดังนั้นในสเปกตรัมของ ESR แกนในแนวนอนคือความเข้มสนามแม่เหล็ก (เช่น scan จาก 3,000-3,500

Gauss) และแกนในแนวตั้งคือปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัตินิยมรายงานในรูปของ differential curve

จากสเปกตรัมของ ESR เราได้ข้อมูลที่สำคัญ [16] อาทิเช่น

1. จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนรั่วในวัสดุ
2. จากตำแหน่งของยอด curve จะได้ค่า g ของวัสดุ ซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอนรั่วคู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอมหรือ radical
3. จากค่า line width จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับ interaction ของสปินข้างเคียงตลอดจนระยะห่างของสปินแต่ละตัว
4. จากโครงสร้างไฮเปอร์ไฟน์ (สเปกตรัมที่มีพีคจำนวนมากๆ) จะได้ข้อมูลที่เกี่ยวกับชนิดของธาตุหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าเป็นธาตุใด

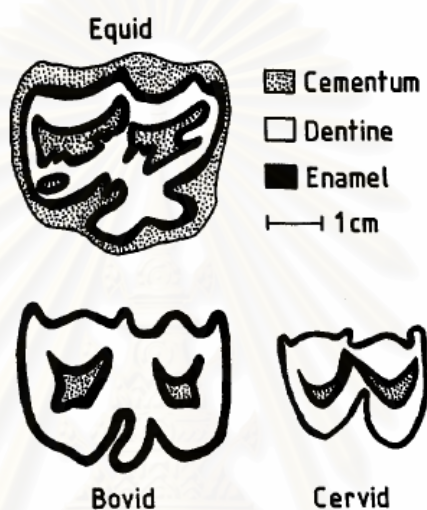
2.3 การกำหนดอายุโบราณวัตถุประเภทวัสดุเคลือบฟันและกระดูก

การกำหนดอายุโบราณวัตถุประเภทวัสดุเคลือบโดยวิธี ESR ในตัวอย่างฟันและกระดูก จะอาศัยหลักการของการเกิดกระบวนการที่เรียกว่า Radiation exposure หรือ Radiation Damage ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนของสารประกอบในวัสดุเคลือบภายในตัวอย่างดังกล่าวนั้นได้รับพลังงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมหรือโครงสร้างผลึกของวัสดุในตัวอย่างจนทำให้เกิด radical อิสระซึ่งเปรียบเสมือนกับเป็นจุดบกพร่อง (defect) หรือเป็น impurity โดย radical อิสระดังกล่าวก็จะหน้าที่เป็นตัว trapped อิเล็กตรอนตัวหนึ่งในโครงสร้างผลึกซึ่งมีสปินตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่คู่กันในโครงร่างผลึกนั้นด้วยโดยขึ้นจาก valance band ไปอยู่ใน conduction band เป็นเวลานาน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณรังสีที่ได้รับเพิ่มขึ้นในสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดอิเล็กตรอนไม่ครบคู่เหล่านั้นสะสมอยู่ตลอดเวลาอันยาวนาน ซึ่งอธิบายโดยละเอียดได้ดังนี้

2.3.1 ประเภทวัสดุเคลือบฟันและกระดูก (teeth and bones enamel materials)

ในตัวอย่างโบราณวัตถุประเภทฟันและกระดูก (teeth and bones enamel materials) นั้น จะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือส่วนที่เป็นเคลือบฟัน (enamel), เนื้อฟัน (dentine) และหินปูนหรือเคลือบรากฟัน (cementum) ซึ่งเคลือบฟัน (enamel) หมายถึง สารประกอบโปร่งแสงที่มีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นแคลเซียม หุ้มอยู่ด้านนอกของตัวฟัน เป็นส่วนที่แข็งที่สุดของร่างกาย เมื่อมีการสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วจะไม่สามารถสร้างเพิ่มใหม่ได้ หลังจากที่มีการสึกไปจากการบดเคี้ยว หรือการใช้งานอื่นๆ ส่วนเนื้อฟัน (dentine) หมายถึง ส่วนประกอบที่เป็นโครงสร้างของตัว

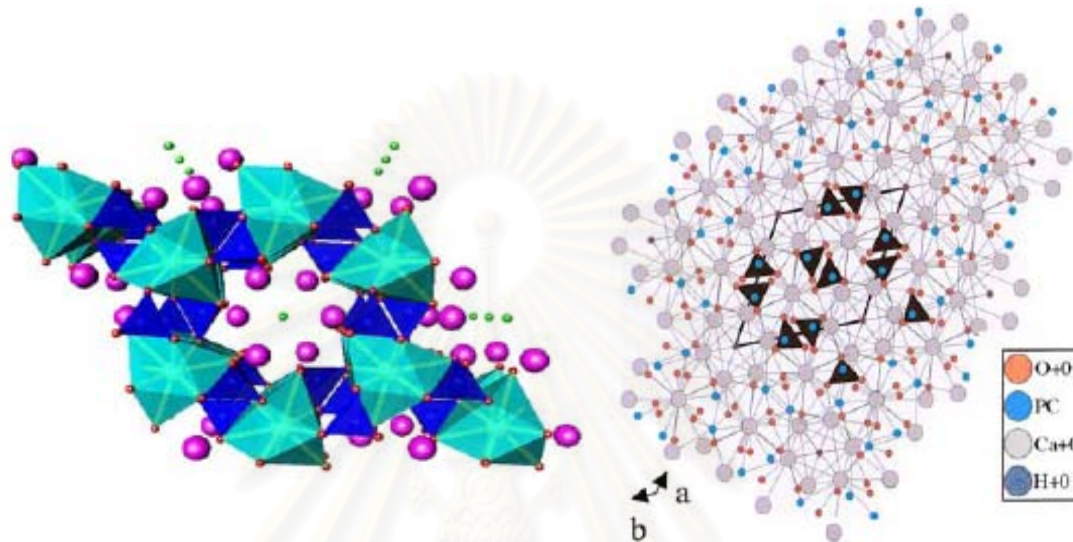
ฟันและรากฟันที่อยู่ภายใต้เคลือบฟัน และเคลือบรากฟัน มีความแข็งแรงน้อยกว่าเคลือบฟัน แต่มีความแข็งแรงมากกว่ากระดูก มีส่วนติดต่อกับเนื้อเยื่อโพรงประสาทฟันที่มีชีวิต สามารถสร้างเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการกระตุ้นกับสิ่งแวดล้อมทั้งภายในและภายนอก และหินปูนหรือเคลือบรากฟัน (cementum) หมายถึง สารประกอบที่เป็นของแข็งหุ้มอยู่บนเนื้อฟันในส่วนที่เป็นรากฟัน เป็นที่ยึดเกาะของเนื้อเยื่อปริทันต์ [24] ดังรูปที่ 2.13 [25]



รูปที่ 2.13 รูปแบบฟันคิ้วด้านบนของโครงสร้างฟันจาก fossil ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีกีบเท้าประกอบด้วยหินปูน (cementum) , เนื้อฟัน (dentine) และสารเคลือบฟัน (enamel) ที่ใช้ในการกำหนดอายุโดยวิธี ESR ซึ่ง Equid (ม้าและลา) จะมีส่วนของหินปูนหุ้มอยู่นานกว่า Bovid (วัวและควาย) และ Cervid (กวาง) [25]

โดยเฉพาะสารเคลือบฟันจะมีส่วนประกอบของ PO_4^{3-} ไอออนเป็นประกอบที่สำคัญของแร่ธาตุในกลุ่มฟอสเฟต [35] ซึ่งจะมีทั้งในส่วนของอินทรีย์สาร ได้แก่ collagen และในส่วนของอนินทรีย์สาร ได้แก่ apatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2]$ ($\text{X} = \text{OH}, \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) [26] ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งมีรูปผลึกระบบสามแกนราบ (hexagonal system) [27] โดยแร่ธาตุดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของแร่ธาตุในกลุ่มฟอสเฟต ซึ่งในตัวอย่างโบราณวัตถุฟันและกระดูกนั้นจะมีแร่ธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบในปริมาณที่เพียงพอ โดยเฉพาะรูปผลึกของ hydroxyapatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2]$ เมื่อเกิดกระบวนการทาง Radiation Damage ทำให้โครงสร้างของ hydroxyapatite เปลี่ยนไปหรือแตกออกไปบางส่วน จนเกิด impurity ions หรือเกิด defect ในโครงสร้างผลึกและในขณะเดียวกันจะทำหน้าที่ trapped อิเล็กตรอนตัวหนึ่งในโครงสร้างผลึกที่หลุดออกมาจากกระบวนการข้างต้น โดย

impurity ions ดังกล่าวก็คือ radical ชนิดต่างๆ เช่น CO_2^- ที่มีโครงสร้างแบบ orthorhombic, axial และ isotropic CO_3^- ที่มีโครงสร้างแบบ axial, O^- , O_2^- และ SO_2^- เป็นต้น [26] ซึ่งโครงสร้างของ hydroxyapatite ที่เปลี่ยนไปหลังจากกระบวนการ Radiation Damage มีดังนี้ [26]



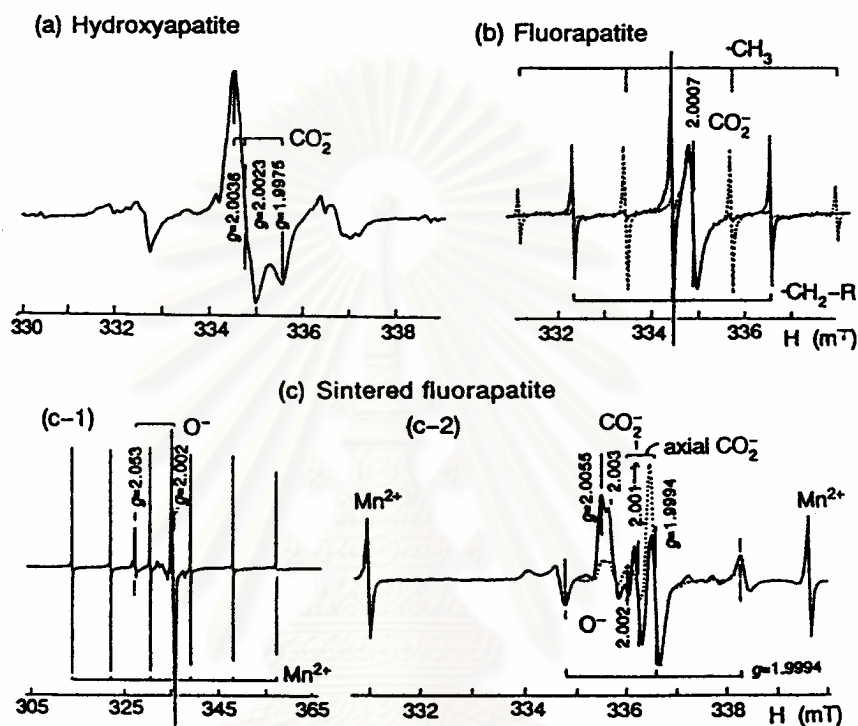
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างผลึก apatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2]$ ($\text{X} = \text{OH}, \text{F}, \text{Cl}$) [28]

1. Ca^{2+} เปลี่ยนไปโดย cation แบบ monovalent (Na^+ , K^+ และ H^+) , โดย cation แบบ divalent (Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} , Fe^{2+} , ฯลฯ) และโดย cation แบบ trivalent (Al^{3+} , Y^{3+} , Ce^{3+} , ฯลฯ) [26]
2. OH^- เปลี่ยนไปโดย anion แบบ monovalent (F^- และ Cl^-) และโดย anion แบบ divalent (CO_3^{2-}) และ H_2O [26]
3. PO_4^{3-} และ radical ที่มีรูปร่างแบบ tetrahedral phosphate เปลี่ยนไปโดย anion แบบ divalent (SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , ฯลฯ) และแบบ trivalent (BO_3^{3-} , As_4O^{3-} , ฯลฯ) [26]

2.3.2 สเปกตรัมของ ESR และการแตกออกของส่วนประกอบโครงสร้างผลึก apatite

กระบวนการทางรังสีในสิ่งแวดล้อมทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึก apatite ได้รับความเสียหายหรือแตกออกไปซึ่งแล้วแต่กรณี ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.1 [26] ในการศึกษาแบบที่เปลี่ยนไปของส่วนประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึก apatite นั้นส่วนใหญ่จะศึกษาโครงสร้างผลึกของ hydroxyapatite และ fluorapatite ซึ่งสเปกตรัมของ ESR

หลังจากการอบรังสีด้วยรังสีแกมมาแล้วจะแสดงดังรูปที่ 2.15 [26] เมื่อพิจารณาจากพิคส่วนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite นั้นพบว่าส่วนใหญ่มาจาก radical อิสระของ CO_2^- ที่มีรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกันออกไป [26]



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมของ ESR หลังจากการอบรังสีด้วยรังสีแกมมาแล้ว (a) แสดงพิคของ hydroxyapatite (b) fluorapatite และ (c),(c-1) และ (c-2) fluorapatite ที่เป็นสตุ [26]

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากสเปกตรัมของ ESR ที่เกิดจากการแตกออกของ ส่วนประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึก apatite เนื่องมาจากรังสีในสิ่งแวดล้อม[26]

Model	g factor			A-tensor in mT			Material	Ref.
	$g_1 (g_{ })$	g_2	$g_3 (g_{\perp})$	A_1	A_2	A_3		
CO ₂ ⁻ orthorhombic	2.0023	2.0036	1.9975				OH-apatite	1
	2.0015	2.0030	1.9970	15.9	16.4	19.9 (¹³ C)	C-apatite (B) ^{a)}	2
	2.0017	2.0031	1.9972				C-apatite (B) ^{a)}	3
	2.0018	2.0034	1.9971				C-apatite (A) ^{a)}	4
	2.0024	2.0035	1.998	20.5	17.5	16.4 (¹³ C)	C-apatite (A) ^{a)}	5
CO ₂ ⁻ axial	2.003		1.999				sin-F-apatite ^{b)}	1
CO ₂ ⁻ isotropic	2.0007			$A_{iso}=14.8$ (¹³ C)			F-apatite	1
	2.0007			$A_{iso}=14.7$ (¹³ C)			C-apatite	2,3
CO ₃ ⁻ axial	2.0060	2.0170	2.0084	$A_{iso}=1.3$ (¹³ C)			C-apatite (B) ^{a)}	2
	2.0066	2.0178	2.0087				C-apatite (B) ^{a)}	3
CO ₃ ⁻ rotating	2.0115			$A_{iso}=1.12$ (¹³ C)			C-apatite (B) ^{a)}	2,3
O ⁻	2.0276	2.0406	2.0330				C-apatite (B) ^{a)}	2
	2.0018		2.0683	0.56	0.59	(¹ H)	OH-apatite	6
O ⁻ at an F ⁻ site	2.002		2.053				sin-F-apatite	1
	2.0018		2.0522	0.70	0.03	(¹⁹ F)	F-apatite	7
O ₂ ⁻	2.06	2.001	2.001				OH-apatite	8
O ³⁻ at three F ⁻ vacancies	1.9983		1.9994	3.2	2.1	(¹⁹ F)	F-apatite	7
	1.9995		2.0000	0.41	0.27	(¹⁹ F)	F-apatite	7
Hole center ^{c)}	2.0068	2.0032	2.0148				OH-apatite	9
SO ₂ ⁻	2.0055						sin-F-apatite	1
•CH ₃	2.0026	quartet		2.3 (¹³ C)			F-apatite	1
•CH ₂ -R	2.0033	triplet		2.1 (¹³ C)			F-apatite	1

a) Carbonated apatite (A-type is CO₃²⁻ substitution at OH⁻ and B-type at PO₄³⁻ sites).

b) Sintered fluorapatite

c) Hole center trapped at both OH⁻ and neighboring PO₄³⁻.

Reference: 1) Ishii and Ikaya 1993; 2) Callens *et al.* 1989; 3) Meons *et al.* 1993; 4) Bacquet *et al.* 1981; 5) Geoffroy and Tochon-Danguy 1982; 6) Mengeot *et al.* 1975; 7) Piper *et al.* 1965; 8) Dugas and Rey 1976; 9) Close *et al.* 1981.

Nuclear spin and abundance: ¹H ($I = 1/2$, 99.99%); ¹³C ($I = 1/2$, 1.10%);
¹⁹F ($I = 1/2$, 100%).

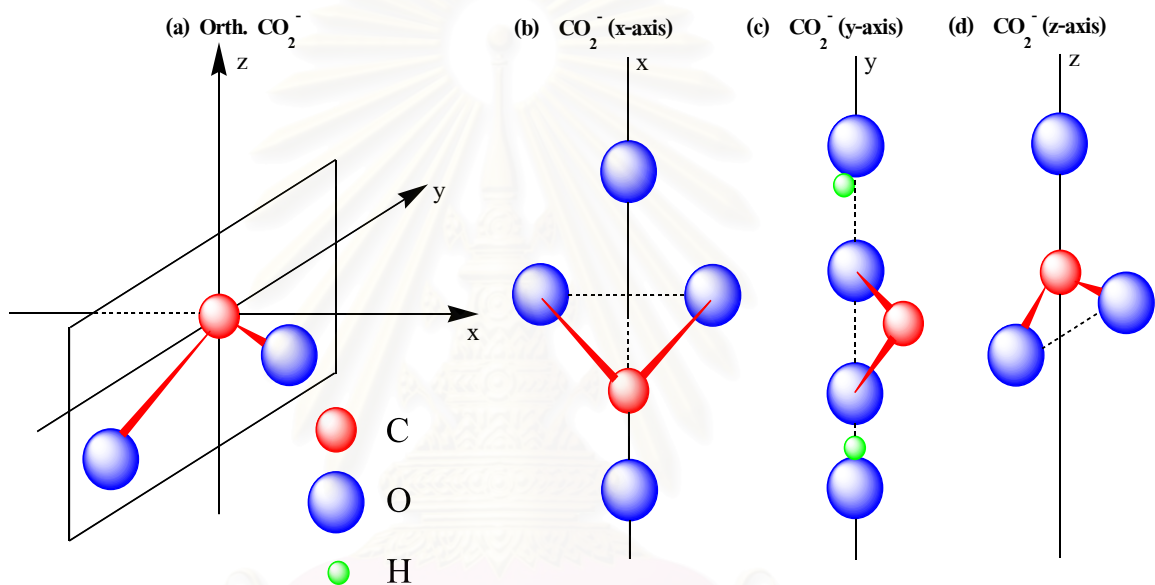
ซึ่งโดยสรุปแล้ว ค่า g ที่ได้จากสเปกตรัม ESR คือ

Hydroxyapatite : orthorhombic CO_2^- ที่ $g = 2.0023, 2.0036, 1.9975$

Fluorapatite : freely rotating CO_2^- ที่ $g = 2.0007$

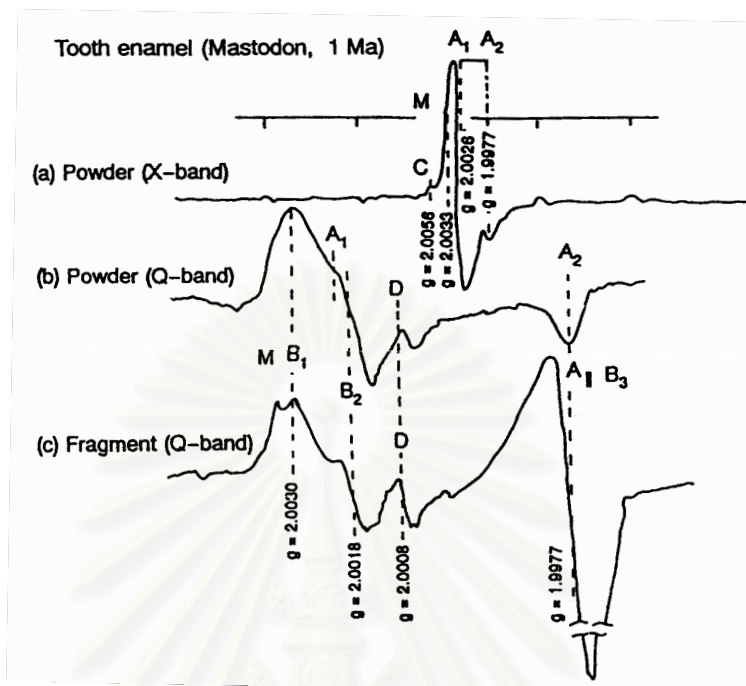
Sintered fluorapatite : axial CO_2^- ที่ $g_{11} = 2.003, g_{\perp} = 1.999$ [26]

โดยแสดงรูปแบบการจัดเรียงตัวและการหมุนรอบแกนสมมติของ radical CO_2^- ที่แตกต่างกันหลังจากเกิดกระบวนการ Radiation damage ดังรูปที่ 2.16 [26]



รูปที่ 2.16 (a) แสดงแกนหลักของ orthorhombic CO_2^- และการหมุนรอบแกนสมมติ
 (b) การหมุนรอบแกน x ของ Fluorapatite
 (c) การหมุนรอบแกน y ของ Hydroxyapatite ตรงพันธะไฮโดรเจน
 (d) การหมุนรอบแกน z เมื่อเกิดการดูดกลืนแสงของ CO_2^- radical [26]

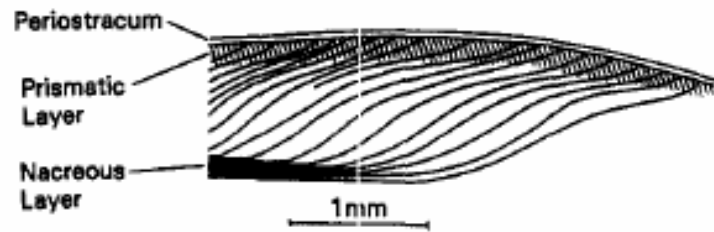
โดยสรุปส่วนใหญ่แล้วสเปกตรัมของ ESR มักจะวัดค่าการดูดกลืนไมโครเวฟที่เกิดจากการ defect ของ hydroxyapatite จาก CO_2^- radical เป็นสำคัญ โดยวัดค่าการดูดกลืนไมโครเวฟที่ 2 ค่าความถี่ คือที่ X-band (9.5 GHz) และที่ Q-band (35 GHz) ดังรูปที่ 2.17 [26]



รูปที่ 2.17 สเปกตรัม ESR ของ powdered tooth enamel ที่
 (a) X-band (9.5 GHz) และ (b) Q-band (35 GHz) และ (c) ชิ้นส่วนของ
 enamel ที่ Q-band (35 GHz) [26]

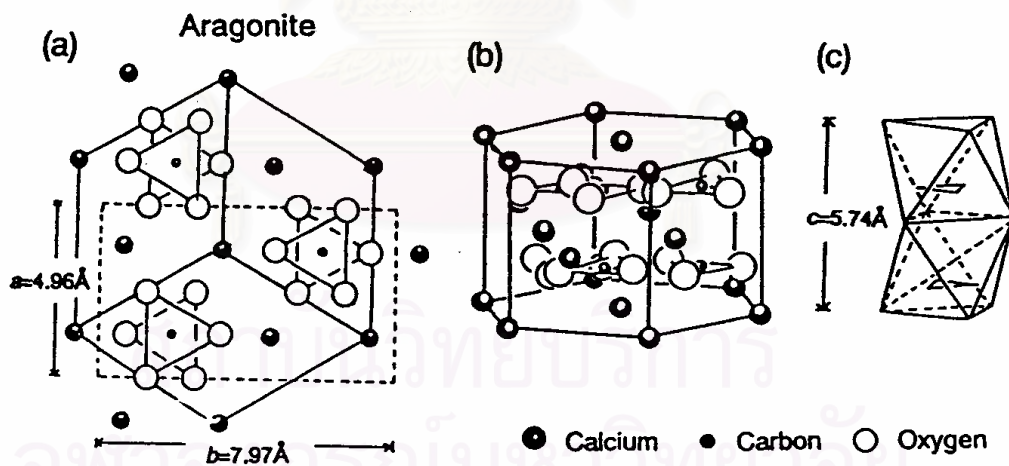
2.3.3 ประเภทวัสดุเคลือบเปลือกหอย (Biocarbonate Shell fossil materials)

ในตัวอย่างฟอสซิลประเภทเปลือกหอย (Shell fossil) จะมีส่วนประกอบของส่วนที่เป็นแร่ธาตุ, CaCO_3 คือส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกของ Aragonite และ Calcite และส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุของโปรตีนที่เรียกว่า Conchiolin จัดเป็นฟอสซิลประเภท Biological carbonate สำหรับส่วนที่เป็น โครงสร้างผลึกของ Aragonite มีรูปผลึกระบบสามแกนต่าง เป็นแร่ไตรสัณฐานกับแคลไซต์กับวาทไรต์ พบเกิดในอัมซิมและชั้นแร่เหล็ก แหล่งแร่ น้ำพุร้อน เนินได้ทะเลตื้นและพืดหินปะการัง ในไข่มุก [27] โดยเฉพาะในส่วนของส่วนชั้นที่เป็นแถบคล้ายสีรุ้งใส (Prismatic Layer) [25] จะประกอบด้วยโครงสร้างผลึก aragonite ที่เป็นเส้นยาวเรียวยาวนาน ได้เยื่อหุ้มเปลือกชั้นบนในขณะที่ส่วนของชั้นที่เป็นแถบแวววาวของเปลือกหอย (Nacreous Layer) ของโครงสร้างผลึก aragonite อีกแห่งหนึ่งจะเรียงตามแนวขนานได้เปลือกกลมมาอีกชั้นหนึ่งดังรูปที่ 2.18 [25]

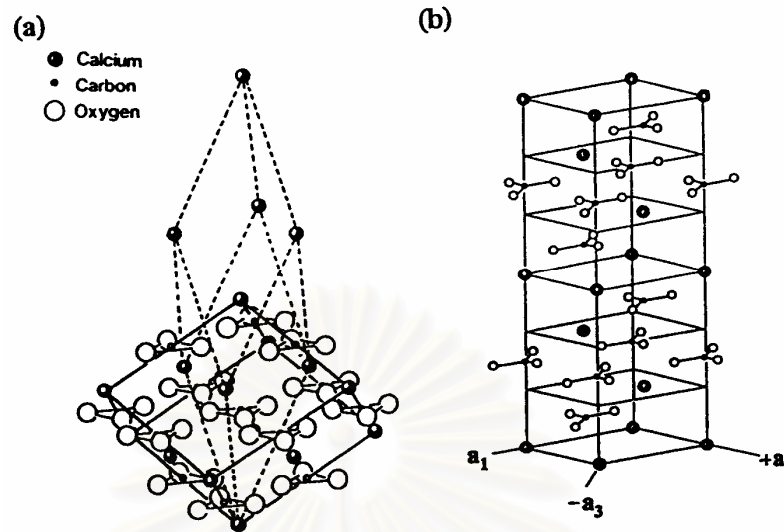


รูปที่ 2.18 แสดงภาคตัดขวางภายในของเปลือกหอยประเภท aragonitic mollusc shell ซึ่งแสดงส่วนที่เป็นแถบคล้ายสีรุ้งในสไลประกอบด้วยโครงสร้างผลึก aragonite ที่เป็นเส้นยาวเรียงขนานได้ เชื่อมหุ้มเปลือกชั้นบนในขณะที่ส่วนของชั้นที่เป็นแถบแนวขาวของเปลือกหอยของโครงสร้างผลึก aragonite อีกแห่งหนึ่งจะเรียงตามแนวขนานได้เปลือกลงมาอีกชั้นหนึ่ง [25]

ส่วนแร่ Calcite มีรูปผลึกอยู่ในระบบสามแกนราบ มักเป็นรูปหกเหลี่ยมยาวยอดแหลมหรือมีรูปขนมเปียกปูนอาจมีสีหรือไม่มีสีก็ได้ ละลายได้ในกรดและมีพรายแก๊ส CO_2 ผุดขึ้นด้วย เป็นแร่ประกอบหินสำคัญในหินปูน บางทีเรียกว่า แร่ฟันหมา (dogtooth spar) [27] สำหรับรูปผลึกของ aragonite และ Calcite แสดงดังรูปที่ 2.19 และ 2.20 [27]



รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างผลึกของ Aragonite [26]



รูปที่ 2.20 แสดงโครงสร้างผลึกของ Calcite [26]

2.3.4 สเปกตรัมของ ESR และการแตกออกของส่วนประกอบโครงสร้างผลึก CaCO_3

กระบวนการทางรังสีในสิ่งแวดล้อมทำให้ส่วนประกอบทางเคมีของโครงสร้างผลึก CaCO_3 ได้รับความเสียหายหรือแตกออกไปซึ่งแล้วแต่กรณี ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.2 โดยสรุปคือจะเกิด defect ของ free rotating SO_2^- , free rotating ของ CO_2^- , orthorhombic SO_3^- และ orthorhombic CO_2^- ค่า g ของ Aragonite โดยเฉลี่ยเท่ากับ 2.0031 ซึ่งจะแตกต่างจากค่า g ของ Calcite เพียงเล็กน้อย คือเท่ากับ 2.0036 และ 2.0024 ของ radical SO_3^- ในรูปแบบของ isotropic SO_3^- และ axial SO_3^- [26] ซึ่งโดยสรุปส่วนใหญ่แล้วสเปกตรัมของ ESR มักจะวัดค่าการดูดกลืนไมโครเวฟที่เกิดจากการ defect ของ Aragonite และ Calcite จาก CO_2^- radical เป็นสำคัญ ดังสเปกตรัมของ ESR ของ aragonitic shell ดังรูปที่ 2.21 [26] และสเปกตรัมของ ESR ของ Calcite shell ดังรูปที่ 2.22 [26]

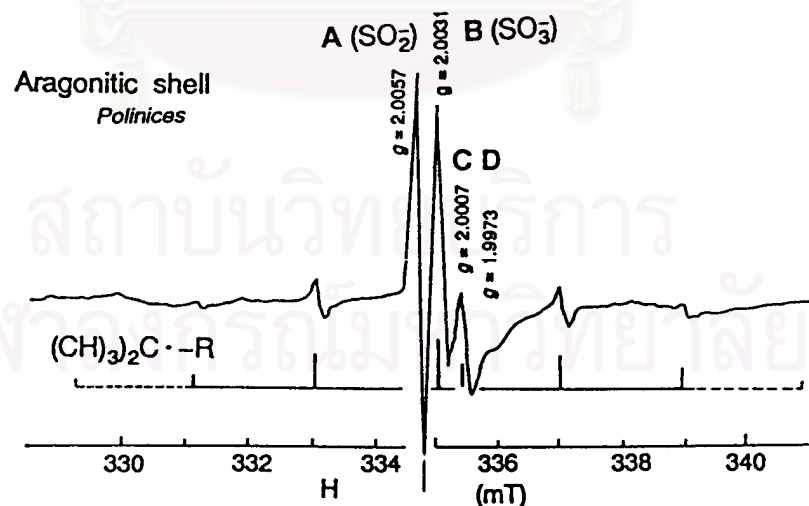
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากสเปกตรัมของ ESR ที่เกิดจากการแตกออกของ ส่วนประกอบทางเคมีของ CaCO_3 ของ Aragonite Shell และพีคหินปะการัง เนื่องมาจากรังสีใน สิ่งแวดล้อม [26]

Models	Notation	g factor (A tensor)	Comment	Ref.
SO_2^- (free rotation)	A	$g_A=2.0057$	thermally formed	1,2,3,4
SO_3^- (isotropic)	B	$g_B=g_{av}=2.0031^a)$	$\tau \approx 3 \text{ Ma}$ (15°C)	1,2,3
SO_3^- (orthorhombic)		$g_x=2.0038$ $g_y=2.0021$ $g_z=2.0034$		1
CO_2^- (free rotation)	C	$g_C=2.0007$	$\tau \approx 1 \text{ Ma}$ (15°C)	2,5,6
CO_2^- (orthorhombic)	D	$g_D=g_{yy}=1.9973$	$\tau \approx 1 \text{ Ma}$ (15°C)	2
$(\text{CH}_3)_2\text{C}\cdot\text{-R}^b)$	septet	$g=2.0039$ ($A=2.17 \text{ mT}$: ^1H)	thermally formed	7,8
?		$g=2.0018 - 2.0020$	observed in shells	2,9,10

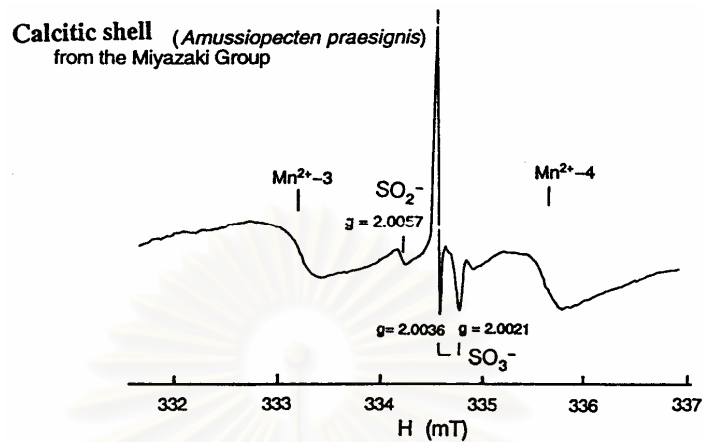
a: Signal B due to axial SO_3^- in calcite is at $g_{\parallel}=2.0021$ and $g_{\perp}=2.0036$.

b: The septet signal due to proton hf splittings is ascribed to isopropyl radicals in valine-doped aragonitic CaCO_3 thermally annealed following γ -irradiation.

Reference: (1) Kai and Miki 1992; (2) Katzenberger *et al.* 1989; (3) Barabas 1992; (4) Walther *et al.* 1992; (5) Miki and Kai 1990, 1991; (6) Barabas *et al.* 1992a, b; (7) Kai and Miki 1989; (8) Murata *et al.* 1993; (9) Skinner and Weicker 1992; (10) Molodkov 1988a.



รูปที่ 2.21 สเปกตรัมของ ESR ของตัวอย่าง aragonitic shell [26]



รูปที่ 2.22 สเปกตรัมของ ESR ของตัวอย่าง Calcite shell [26]

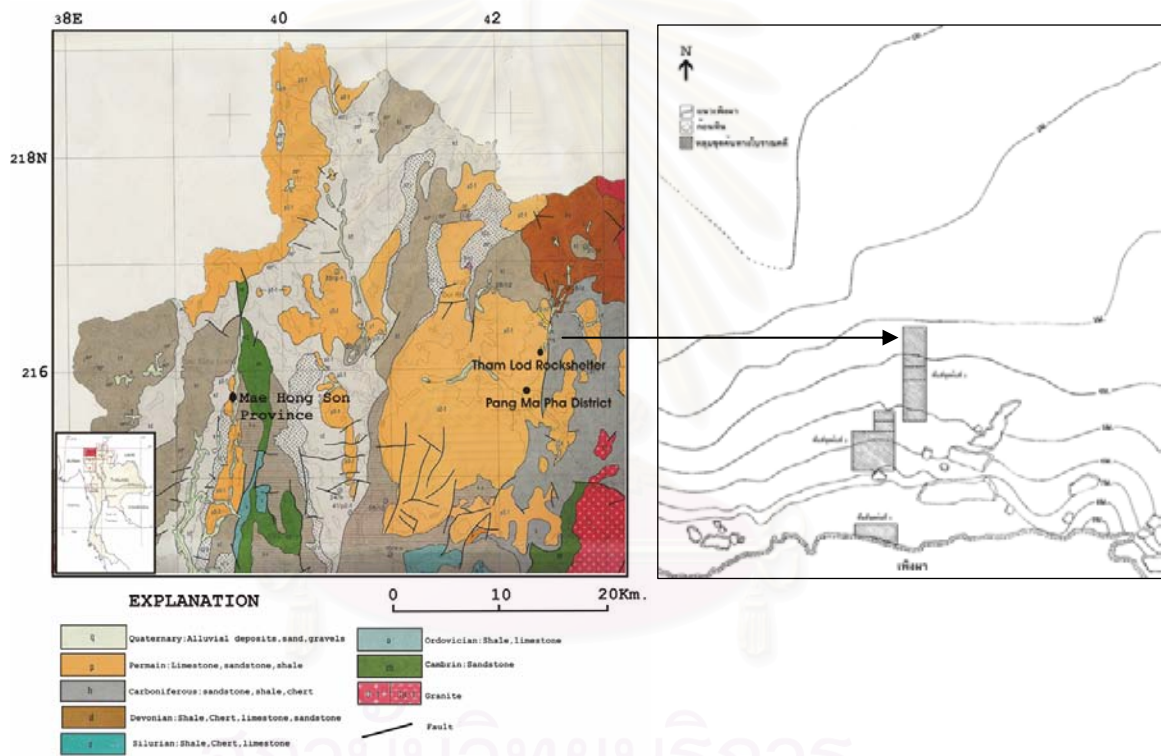
2.4 พื้นที่ในการศึกษา

พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาได้เลือกตัวอย่างหินและเปลือกหอยโบราณที่ได้จากหลุมขุดค้นที่ 1 ภายในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่ากลุ่มแม่น้ำปายตอนเหนือ ในท้องที่ตำบลถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ซึ่งถ้ำลอดเป็นถ้ำขนาดใหญ่ที่มีลำน้ำลอดไหลผ่าน มีหลักฐานทางโบราณคดีประเภทโลงไม้และเป็นสถานที่ท่องเที่ยวที่สำคัญของจังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังรูปที่ 2.23 และ 2.24 [10] แหล่งโบราณคดีอยู่ในความรับผิดชอบของโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน มหาวิทยาลัยศิลปากร อันเป็นโครงการวิจัยที่ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) [1] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5 สภาพของแหล่งโบราณคดี

แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอดมีลักษณะเป็นชะงอกผาสูง เป็นเพิงผาขนาดเล็ก บริเวณใต้เพิงผามีพื้นที่ราบแคบๆ มีความกว้างประมาณ 4-5 เมตร ยาวประมาณ 30 เมตร สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 640 เมตร ตั้งอยู่ในตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ที่ 47 QMB247636 (แผนที่ทางทหารระวาง 4648II ลำดับชุด L7017 พิมพ์ครั้งที่ 2 RTSD มาตรฐาน 1: 50,000) [29] สภาพของแหล่งมีก้อนหินขนาดใหญ่ตกกระจายอยู่ทั่วไปไม่หนาแน่นนัก ถัดจากพื้นที่ราบใต้เพิงผามีลักษณะลาดเอียงลงไปยังพื้นที่ราบด้านล่าง ทำให้สภาพพื้นที่ใต้เพิงผาเป็นเนินดินสูงประมาณ 3 เมตร ที่ตั้งของแหล่งอยู่ห่างจากลำน้ำกลางทางด้านทิศตะวันออกของแหล่งประมาณ 250

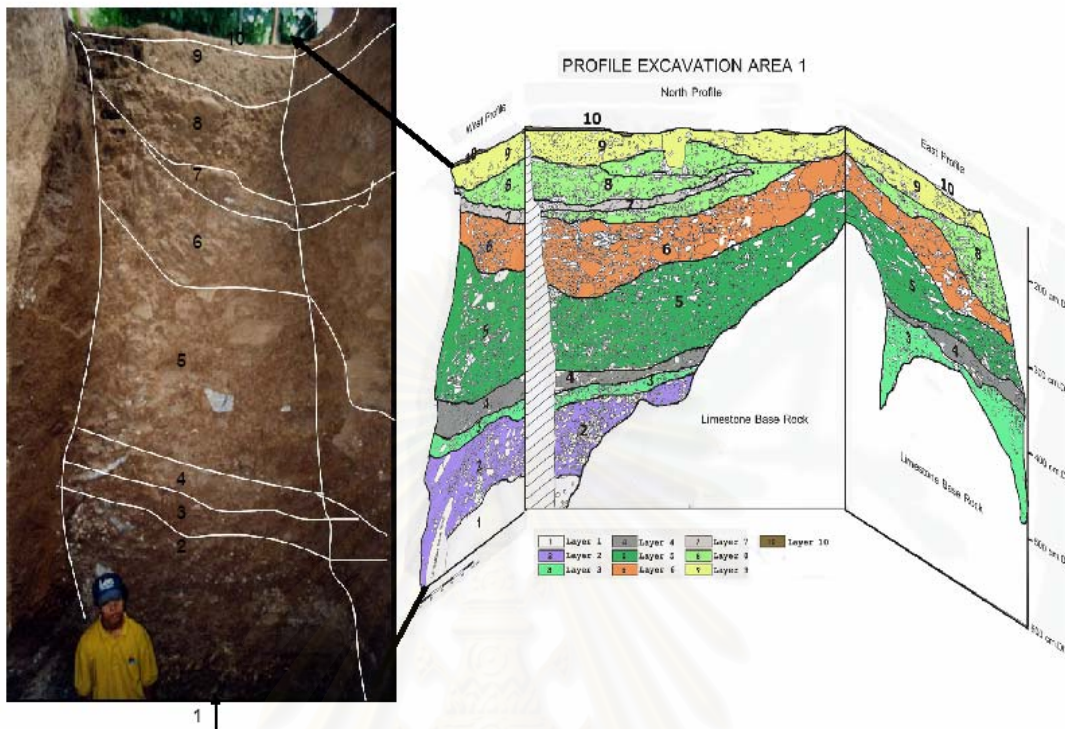
เมตร บริเวณใต้เพิงผาพบโบราณวัตถุที่เป็นเครื่องมือหินและเศษภาชนะดินเผากระจายอยู่ทั่วไปบนผิวดินซึ่งอาจเกิดจากการรบกวนโดยสัตว์ดั้งที่พบร่องรอยตามซอกเชิงหน้าผา ถัดจากบริเวณเพิงผาเป็นพื้นที่ลาดเอียงลงทางด้านทิศเหนือสู่ที่ราบบริเวณสนามหญ้า ซึ่งมีลักษณะเป็นแอ่งยุบที่อยู่ในศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด ตำบลถ้ำน้ำลอด จัดว่ามีลักษณะธรณีวิทยาพื้นฐานเป็นแอ่งยุบขนาดเล็กแบบเปิด (doline) [10] ทำให้พื้นที่บริเวณรอบๆแหล่งโบราณคดีมีลักษณะลาดเอียงจากเชิงเขาลงไปยังบริเวณกลางแอ่งยุบ สำหรับลักษณะสภาพแวดล้อมบริเวณรอบๆแหล่งโบราณคดีพบว่ามีป่าเบญจพรรณ ป่าดิบแล้ง ป่าเต็งรังกระจายอยู่



รูปที่ 2.23 แสดงตำแหน่งของพื้นที่ขุดค้นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด [10]



รูปที่ 2.24 รูปแสดงการทำงานของพื้นที่ขุดค้นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเฟิงผาถ้ำลอด [10]
 ภาพ ก. เฟิงผาถ้ำลอดที่ทำการขุดค้น
 ภาพข. การตีเส้นกำหนดขอบเขตของตำแหน่งที่ทำการขุดค้น
 ภาพ ค. ผู้ช่วยนักวิจัยด้านโบราณคดีของโครงการฯ กำลังเริ่มทำการขุดค้น
 และทำการเก็บตัวอย่าง
 ภาพ ง. การเก็บตัวอย่างดินในแต่ละระดับเพื่อนำไปวัดปริมาณธาตุ
 กัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ dose rate เพิ่มเติมเมื่อวันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2549



รูปที่ 2.25 แสดงตำแหน่ง profile excavation ของจุดค้นที่ 1 ในแหล่งโบราณคดีเฟิงผาถ้ำลอด[10]

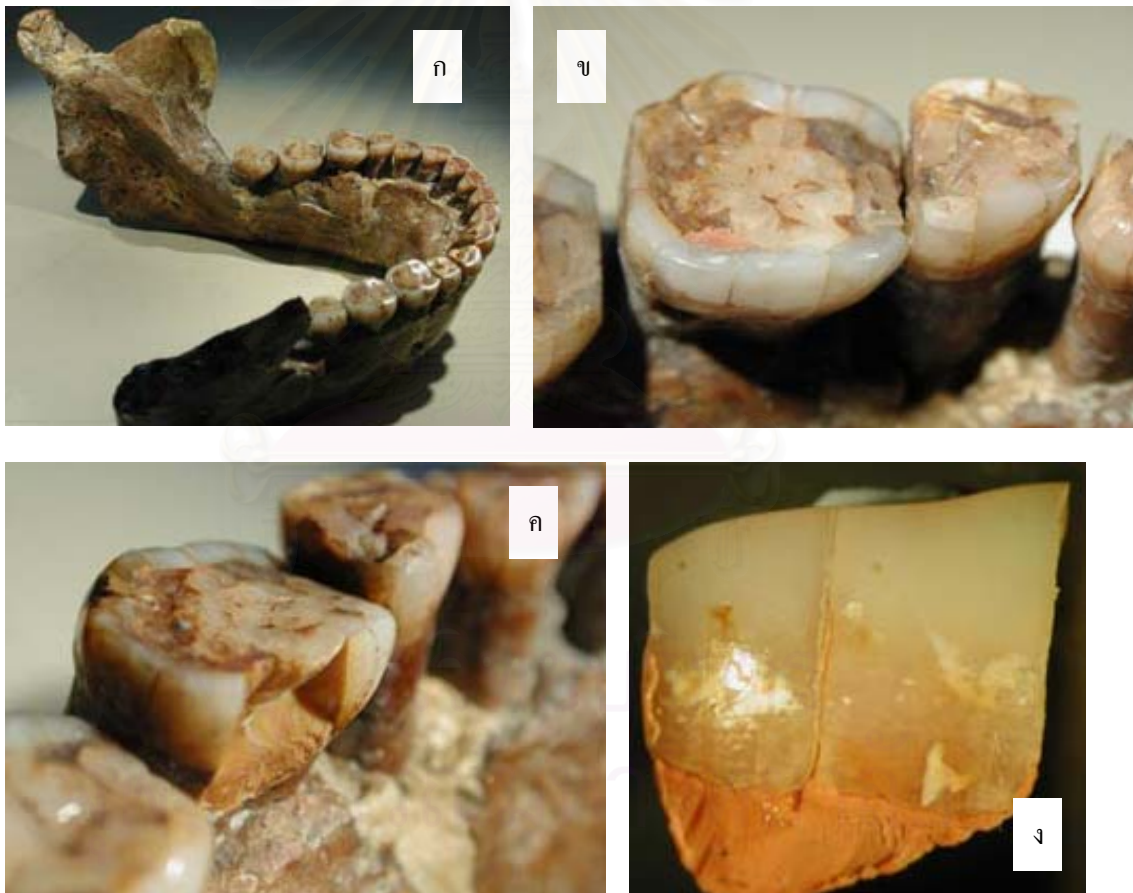
สำหรับตัวอย่างฟันและเปลือกหอยโบราณที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้นำมาจากพื้นที่จุดค้นที่ 1 (S23W10) แหล่งโบราณคดีเฟิงผาถ้ำลอดนี้ในช่วงความลึกที่ระดับสมมติ 1 – 29 (Level 1 – 29) ที่มีอายุในสมัยทางธรณีวิทยาไพลสโตซีนตอนปลาย [29] ตัวอย่างฟันสัตว์ที่ใช้ในการหาอายุในงานวิจัยอยู่ในช่วงความลึกจุดค้นที่ระดับสมมติ 19 – 29 (Level 19 – 29) ส่วนตัวอย่างเปลือกหอยที่ใช้ในการหาอายุในงานวิจัยอยู่ในช่วงความลึกจุดค้นที่ระดับสมมติ 29 (Level 29) เพียงระดับเดียวสำหรับฟันของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่จากการรายงานการศึกษาชนิดสัตว์ในบริเวณเฟิงผาถ้ำลอด พบกระดูกและฟันในวงศ์กวาง (family Cervidae) สัตว์ในวงศ์วัวป่า (family Bovidae) หมูป่า (*Sus scrofa*) เป็นต้น [11] ที่มีสภาพอากาศที่หนาวเย็นและแห้งแล้ง และมีพืชพรรณทั่วไปหรือชนิดป่าเหมือนกับปัจจุบัน ส่วนตัวอย่างเปลือกหอยที่จุดค้นพบรวมในหลุมเดียวกันนั้นเป็นตัวอย่างเปลือกหอยชนิดสองฝาของหอยน้ำจืดที่พิสูจน์ว่าเป็นหอยในสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (*Carditidae*) ซึ่งหอยน้ำจืดชนิดนี้ในปัจจุบันได้สูญพันธุ์ไปแล้ว [10]



รูปที่ 2.26 รูปภาพแสดงตัวอย่างฟันกวาง (family Cervidae) สัตว์ในวงศ์วัวป่า (family Bovidae) และหอยน้ำจืดสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) ได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

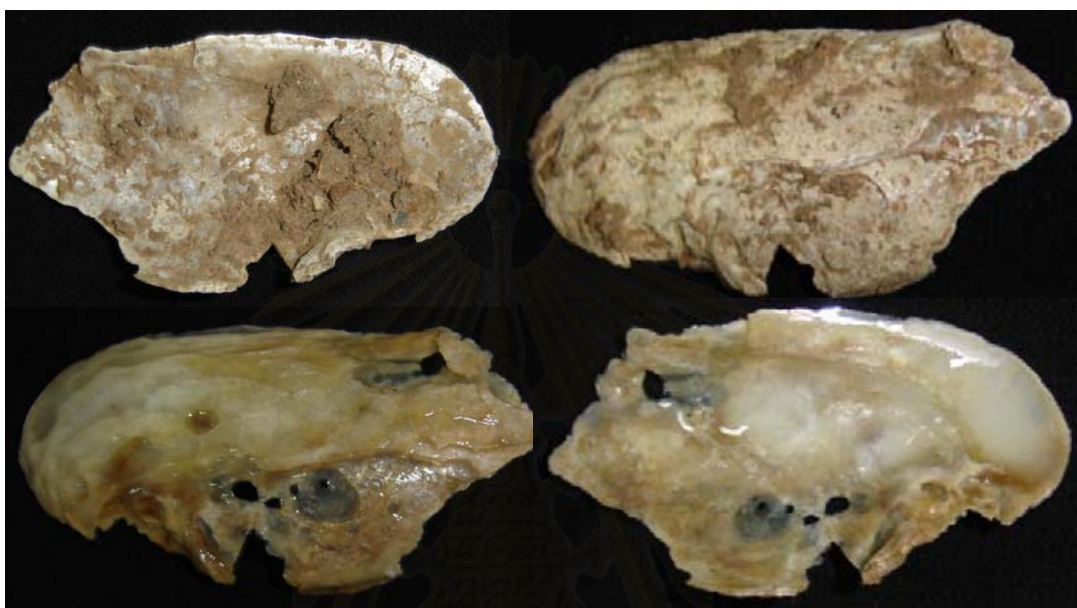
2.6 การเตรียมตัวอย่าง (SAMPLE PREPARATION)

ในการเตรียมตัวอย่างสำหรับฟันและเปลือกหอยนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความสะอาดผิวหน้าของตัวอย่างให้สะอาดในเบื้องต้น ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละชนิดของตัวอย่างนั้นๆ ในกรณีฟันสัตว์นั้น จำเป็นที่จะต้องตัดเอาส่วนของ เคลือบฟัน (Enamel) ออกจากเนื้อฟัน (Dentine) เพื่อความสะดวกในการอ่านสัญญาณจากเครื่อง ESR Spectrometer ถ้าเป็นฟันซี่เดี่ยวๆ สามารถดำเนินการแยกได้เลย แต่ในกรณีที่ฟันนั้นติดกับกระดูกเหงือก หรือ กะโหลกที่ไม่สามารถที่จะถอนตัวอย่างฟันมาใช้ได้เนื่องจากเหตุผลจำเป็นในการอนุรักษ์โบราณวัตถุอาจเลาะเอาเฉพาะเคลือบฟันออกมาได้ โดยใช้เครื่องกรอฟันแบบทันตแพทย์ ดังรูป 2.27



รูปที่ 2.27 ภาพแสดงส่วนของฟันที่ติดกับกระดูกเหงือก (รูป ก.) ส่วนสีขาวด้านนอกของซี่ฟันคือเคลือบฟัน (Enamel) ส่วนเนื้อในคือเนื้อฟัน (Dentine) จากนั้นเลาะเอาส่วนของเคลือบฟันด้านหน้าออก (รูป ค.) เหลือแต่ของเคลือบฟันที่พร้อมบด (รูป ง.) [30]

ในส่วนของเปลือกหอยนั้น เมื่อล้างทำความสะอาดแล้วให้ลอกส่วนหน้านี้อาจมีการแลกเปลี่ยนสารประกอบจำพวกคาร์บอเนตในน้ำออกก่อน ให้เหลือแต่เนื้อในใสๆ จึงสามารถนำมาบดวิเคราะห์สัญญาณได้ โดยนำไปแช่ในกรดอะซิติก 0.1 M [31]

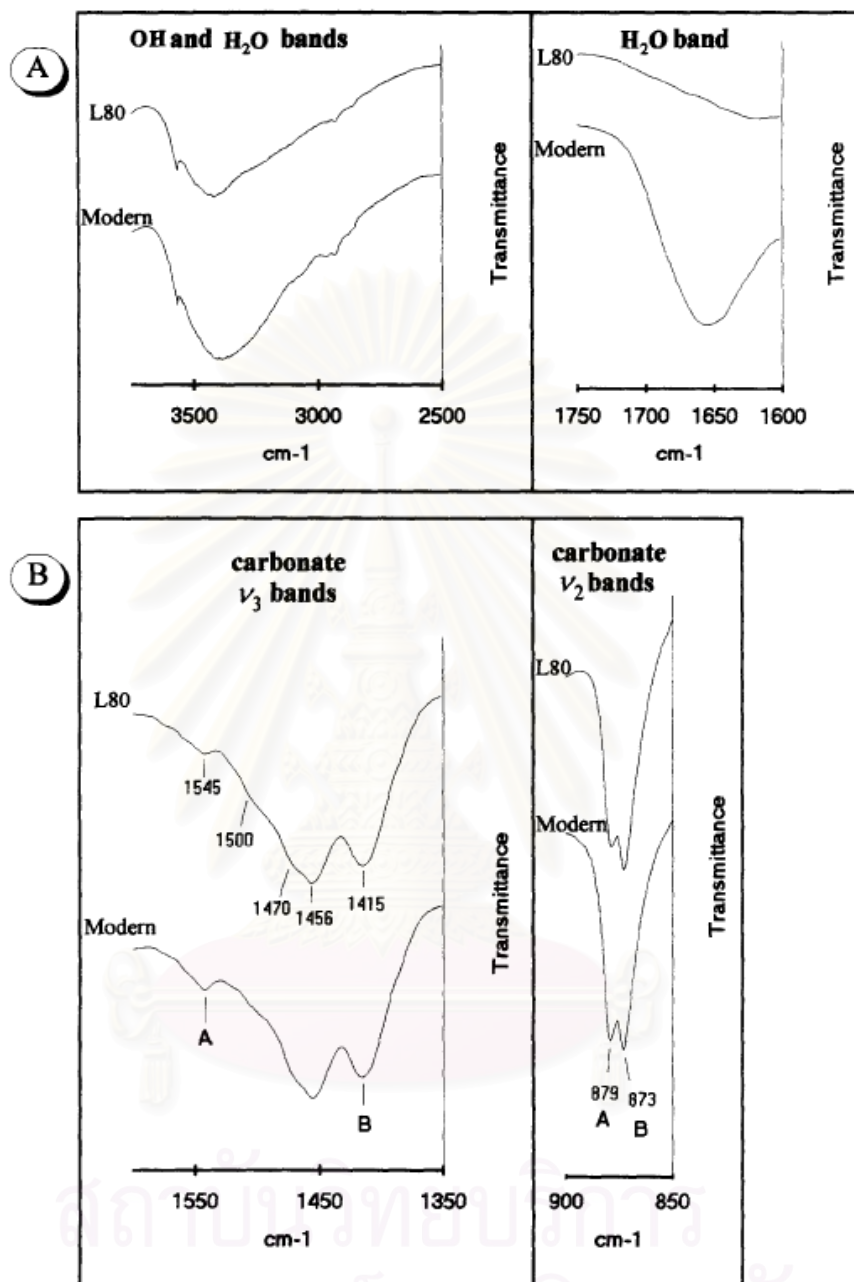


รูปที่ 2.28 ภาพตัวอย่างเปลือกหอยที่ยังไม่ได้ลอกเอาส่วนหน้าออก (ภาพบน) และภาพตัวอย่างเปลือกหอยที่ลอกเอาส่วนหน้าออกแล้ว (ภาพล่าง)

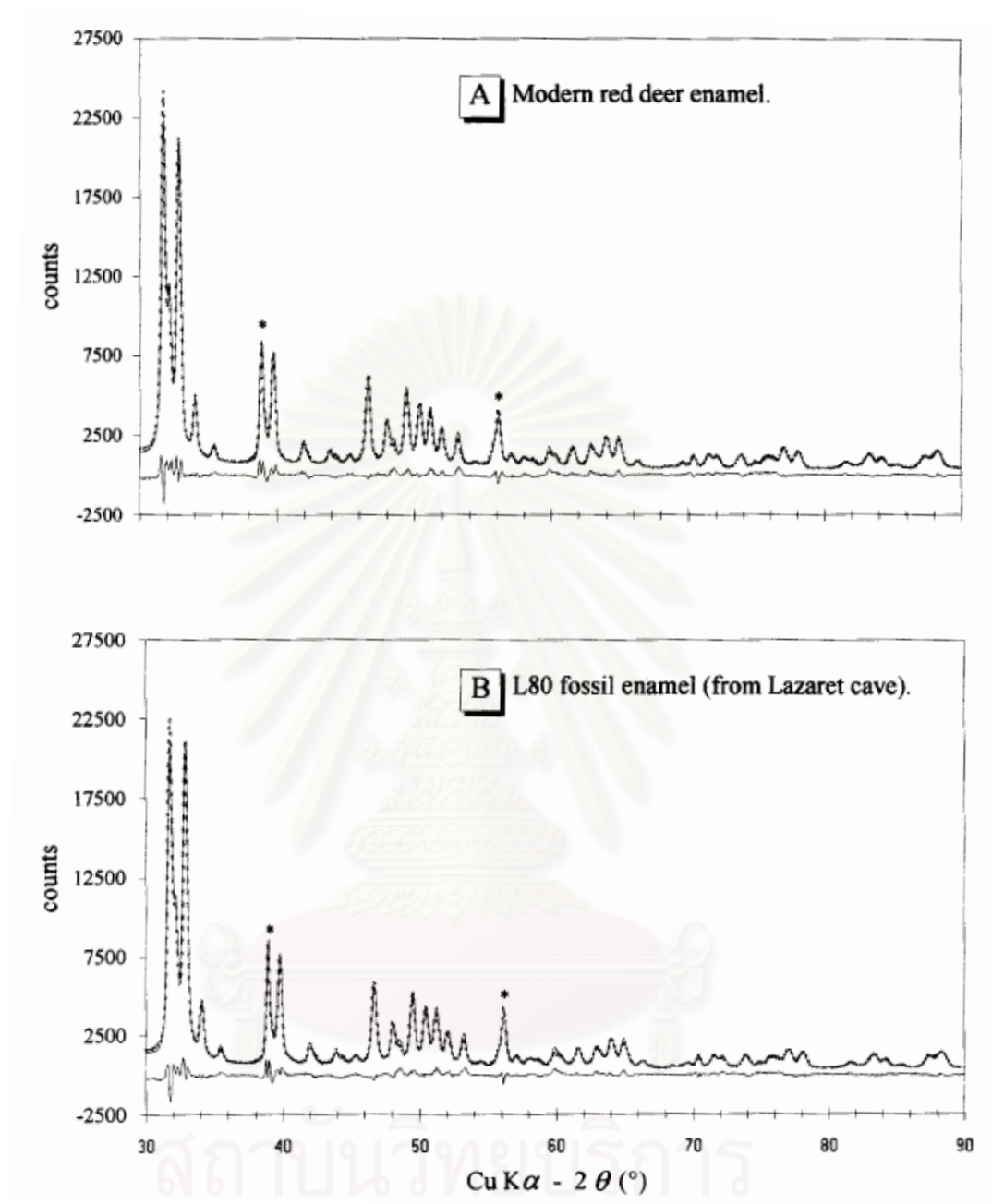
เมื่อทำการแยกส่วนที่ไม่ต้องการวิเคราะห์ออกไปแล้ว จากนั้นจะนำไปบดให้เป็น powder และนำไปวิเคราะห์สัญญาณ XRD และ FT-IR ก่อนเพื่อพิสูจน์ให้เด่นชัดว่าเป็นผลึกเป้าหมายที่จะนำไปวัดสัญญาณได้ ซึ่งในส่วนของเคลือบฟันจะทำการวัดสัญญาณ Electron trapped จากโครงสร้างผลึก Hydroxyapatite ส่วนของเปลือกหอยจะทำการวัดสัญญาณ Electron trapped จากโครงสร้างผลึกคาร์บอเนตของ Aragonite หรือ Calcite

2.7 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค XRD และ FT-IR

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยเทคนิค XRD และ FT-IR มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพิสูจน์โครงสร้างผลึกที่เราแยกออกมาได้ว่าเป็นโครงสร้างผลึกที่เราต้องการนำไปวัดสัญญาณ Electron trapped เพื่อทำการกำหนดอายุต่อไป ดังรูป 2.29 และ 2.30 และตารางที่ 2.3 [32]



รูปที่ 2.29 แสดงเส้นสเปกตรัมของ IR ของแถบหมู่ H₂O และ OH เปรียบเทียบระหว่างกวางยุคใหม่กับซากฟอสซิลของกวางโบราณ (A) และแสดงแถบของสารประกอบคาร์บอเนต (B) [32]

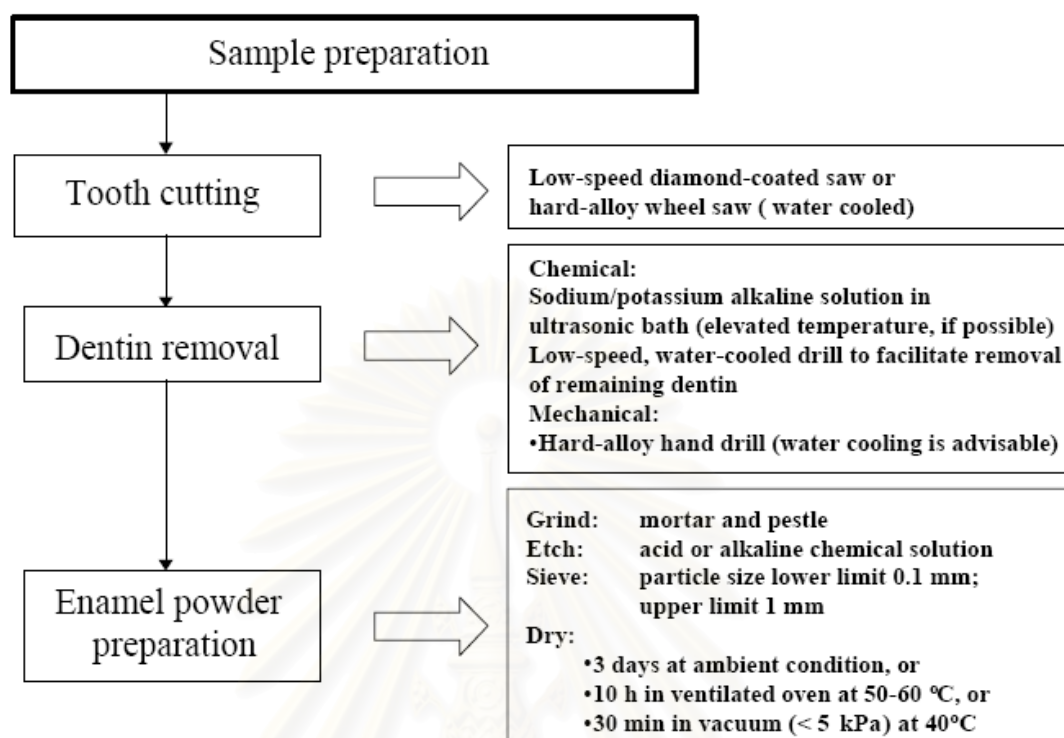


รูปที่ 2.30 แสดงเส้นสเปกตรัมของ XRD ระหว่างกวางยุคใหม่ (Modern) (A) กับซากฟอสซิลของกวางโบราณ (B) [32]

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงตำแหน่งเลขคลื่นของ IR absorption bands ของเคลือบฟัน
สัตว์โดยทั่วไป [32]

IR absorption bands	positions
OH	3567 (w)
H ₂ O	3300–3430
H ₂ O—organic carbonate ν_3	(s) ~1650 (*) 1545 (w) 1500 (w) 1470 (w) 1456 (s) 1415 (s)
Phosphate ν_3	1090 (vs) 1040 (vs)
Phosphate ν_1	961 (m)
Carbonate ν_2	879 (m) 873 (m)
OH	630 (w)
Phosphate ν_4	604 (vs) 575 (s) 565 (vs)
Phosphate ν_2	472 (w)

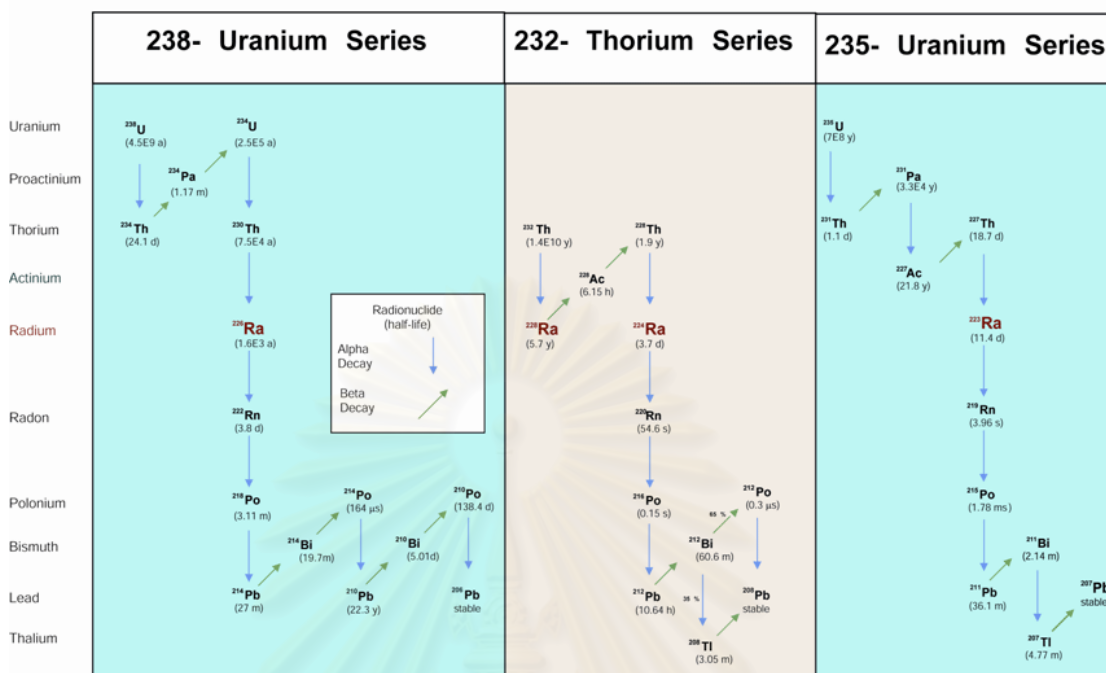
เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะเข้าสู่วิธีการ Treatment ตัวอย่าง ซึ่งในกระบวนการเตรียมตัวอย่างจะต้องกระทำในห้องมืดที่ไม่มีรังสีอื่นรบกวนต่อตัวอย่าง ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการล้างด้วย 40% กรดไฮโดรคลอริก และล้างด้วยเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นอาจใช้ลิวหรือเครื่องกรอฟันตัดส่วนที่เป็น Enamel แยกเป็นส่วนๆ และชุบเอาหินปูนที่ยังติดอยู่กับ Enamel ออกไปให้สะอาด จากนั้นทำการล้างด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อขจัดผิวหนังที่อาจจะเกิดการ Damage ประเภทอื่นที่ไม่ใช่กระบวนการ Radiation Damage และที่เกิดจากการ Damage ของรังสีแอลฟาออกไป จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงเมื่อครบกำหนดเวลาจึงการบดให้เป็น Powder ซึ่งพร้อมที่จะทำการฉายรังสี เพื่อทำการ Additive dose เพิ่มเข้าไปตามเกณฑ์ที่กำหนด ด้วยเครื่องฉายรังสี ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs หรือเครื่องฉายรังสีเบตา เพื่อทำการวัดสัญญาณ Electron trapped ด้วยเครื่อง ESR Spectrometer ในขั้นตอนต่อไป ดังแผนภาพการเตรียมตัวอย่างในรูปที่ 2.31



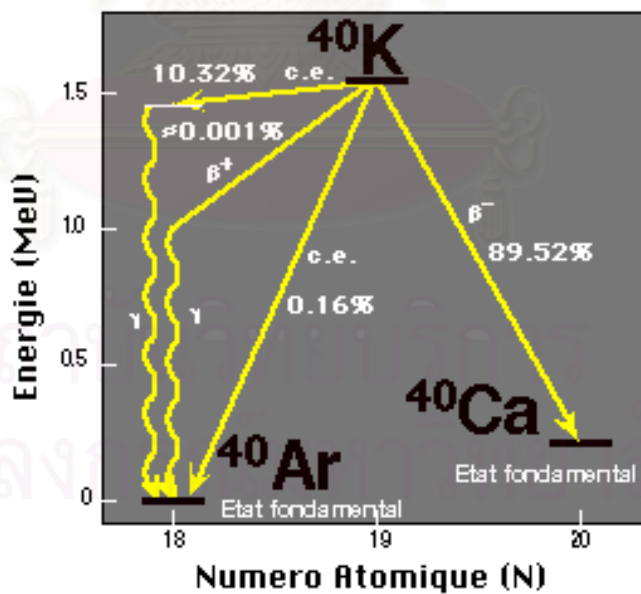
รูปที่ 2.31 แผนภาพขั้นตอนการ Treatment ตัวอย่าง [33]

2.8 การคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose) [34]

ในการคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปี (Annual dose) ในธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นดิน ธาตุกัมมันตรังสีที่สำคัญ ได้แก่ ธาตุยูเรเนียม (U), ทอเรียม (Th) และโพแทสเซียม (K) ซึ่งทั้ง 3 ธาตุนี้จะสลายตัวตามหลักการของครึ่งชีวิต (Half-Life) ของธาตุแต่ละตัว และในระหว่างการสลายตัวจะแผ่รังสีออกมาในปริมาณต่างๆกัน ในรูปของรังสีแอลฟา, เบตา และแกมมา ตามแผนภาพการสลายตัวดังรูปที่ 2.32 และ 2.33 นอกจากนี้ยังมีรังสีบางส่วนที่ได้รับจากนอกโลกหรืออวกาศ เช่น รังสีคอสมิก (Cosmic ray) แต่เป็นส่วนน้อย หลังจากเตรียมตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นของธาตุต่างๆที่มีอยู่ในดิน ด้วยวิธีทางเทคนิคต่างๆ เช่น วิธี Neutron Activation Analysis (NAA), โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ในการอ่านสัญญาณ หรือ วิธี Inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS)



รูปที่ 2.32 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม [35]



รูปที่ 2.33 แผนภาพอนุกรมการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีโพแทสเซียม-40 [36]

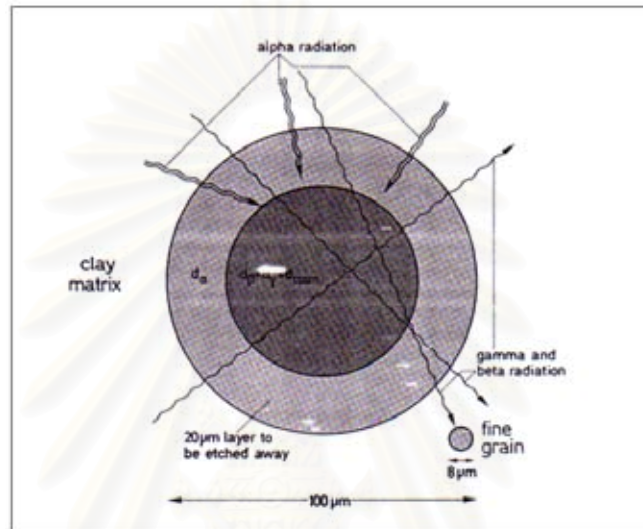
ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมมีหน่วยความเข้มข้นเป็น ppm ส่วนธาตุโพแทสเซียมมีหน่วยความเข้มข้นเป็น % จากนั้น จึงทำการแปลงค่าที่ได้จากการวัดเป็นหน่วยที่เราต้องการ คือ Gy โดยใช้ตารางมาตรฐานของ Bell (1979) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างเข้มข้นของธาตุกัมมันตรังสี (หน่วย ppm หรือ %) และอัตราการแผ่รังสีต่อปี (หน่วย μGy) [34]

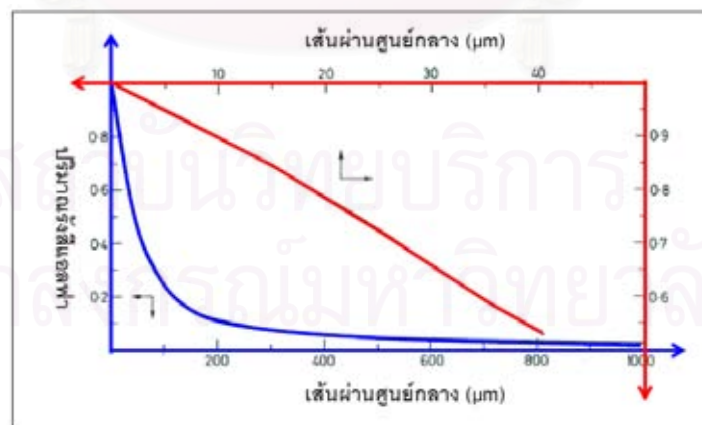
อนุภาค	ความเข้มข้น	ชนิดของ Radionuclide		
		แอลฟา	เบตา	แกมมา
Thorium series	1 ppm ^{232}Th			
- no thoron loss		738	28.6	51.4
- 100% thoron loss		309	10.3	20.8
Uranium series	1 ppm ^{238}U			
- no radon loss		2783	146.2	114.8
- 100% radon loss		1262	60.9	5.6
Natural potassium	1% K_2O	-	689.3	206.9
	1% K	-	830.3	249.2

จากค่า AD ที่ได้ถึงขั้นตอนนี้ เป็นค่าอัตราการแผ่รังสีต่อปีในทางอุดมคติ หรือเป็นค่าที่ได้ 100% โดยที่ไม่ได้รับผลกระทบซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการลดทอนของสัญญาณแต่อย่างใด แต่ในทางปฏิบัติสาเหตุของการลดทอนของอัตราการแผ่รังสีนั้นมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกัน เช่น การลดทอนของสัญญาณอันเนื่องมาจากขนาดของผงตะกอน และการลดทอนอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในดินในธรรมชาติ เป็นต้น เนื่องจากอนุภาคต่างๆ ที่เป็นตัวกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ อนุภาค แอลฟา เบตา แกมมา ซึ่งในแต่ละอนุภาคนั้นมีลักษณะและคุณสมบัติการทะลุทะลวงไม่เท่ากัน ดังรูป 2.34 ในกรณีของดิน อนุภาคแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ถึง 30 เซนติเมตร ส่วนอนุภาคเบตามีความสามารถในการทะลุทะลวงได้ในระยะ 3 เซนติเมตร ในขณะที่อนุภาคแอลฟามีความสามารถในการทะลุทะลวงเพียง 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้นหากพิจารณาเฉพาะสิ่งแวดล้อมในรัศมี 30 เซนติเมตร โดยมีตัวอย่างเป็นจุดศูนย์กลาง อนุภาค

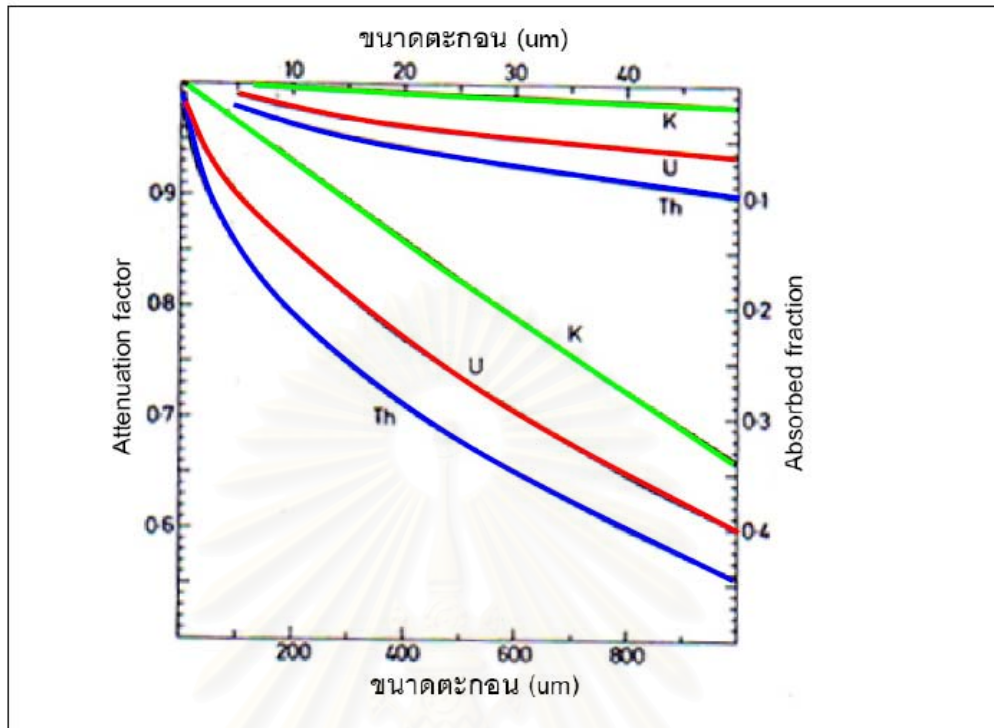
แกมมาจะมีประสิทธิภาพการทะลุทะลวงได้ 100% จากที่คำนวณได้ในตอนต้น ในขณะที่อนุภาคเบตาและแอลฟาถูกกีดทอนไปตามขนาดของเม็ดตะกอนที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมนั้น ซึ่ง Aitken (1985) ได้นำเสนออัตราการกีดทอนของอนุภาคเบตาและแอลฟาที่สัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอน ดังรูป 2.35 และ 2.36



รูปที่ 2.34 ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงที่แตกต่างกันของอนุภาคแอลฟา เบตาและแกมมา [34]

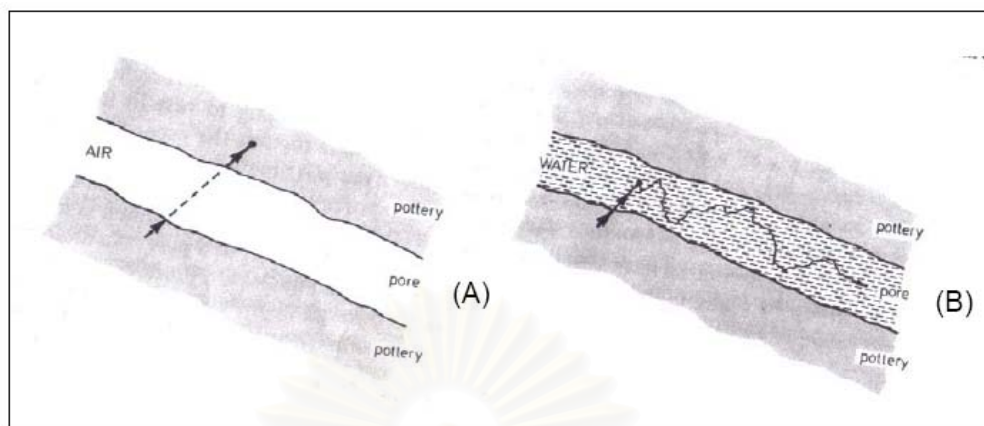


รูปที่ 2.35 อัตราการกีดทอนความสามารถในการทะลุทะลวง ของอนุภาคแอลฟา (α) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอน [34]



รูปที่ 2.36 อัตราการลดทอนความสามารถในการทะลวงของอนุภาคเบตา (β) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของเม็ดตะกอน[34]

นอกจากการลดทอนความสามารถในการกระตุ้นอันเนื่องมาจากสาเหตุของขนาดตะกอนแล้ว ยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกอย่าง คือ ความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content, %W ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำหรือความชื้นคิดเป็นร้อยละที่อยู่ในช่องว่างของตะกอนดิน)ซึ่งมีประสิทธิผลการลดทอนที่แตกต่างกันในแต่ละอนุภาค (แอลฟา 50 % , เบตา 25% และ แกมมา 14 %) เช่นเดียวกัน ดังรูป 2.37



รูปที่ 2.37 (ก) ประสิทธิภาพการทะลุทะลวงของอนุภาคเมื่อไม่ผ่านตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ
(ข) การลดทอนความสามารถในการทะลุทะลวงของอนุภาคกัมมันตภาพรังสีจากเนื่องมาจากความชื้นในตัวอย่าง[34]

และการหา %W ในตัวอย่างดินที่หา Annual dose นั้น สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$\%W = \frac{(\text{weight of wet sample} - \text{weight of dried sample})}{\text{weight of dried sample}} \times 100 \quad (2.6)$$

ดังนั้น สมการอย่างง่ายของการคำนวณอัตราการแผ่รังสีต่อปี (หน่วย mGy) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\text{Annual dose} = D_{\alpha} + D_{\beta} + D_{\gamma} + D_c \quad (2.7)$$

เมื่อ

D_{α} = ค่า Adsorb dose ของ รังสีแอลฟา

D_{β} = ค่า Adsorb dose ของ รังสีเบตา

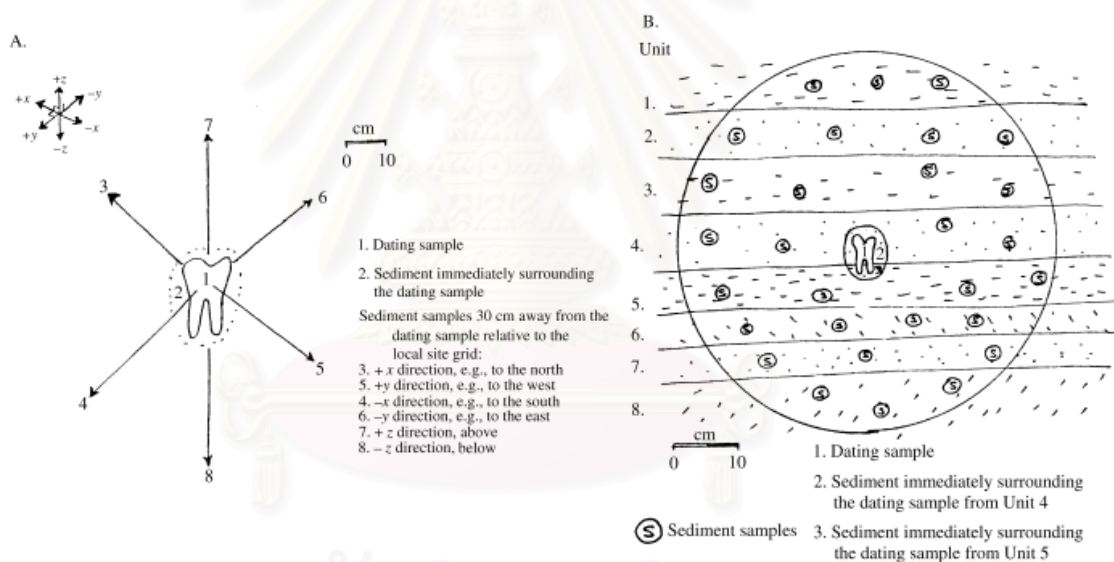
D_{γ} = ค่า Adsorb dose ของ รังสีแกมมา

D_c = ค่า Adsorb dose ของ รังสีคอสมิก

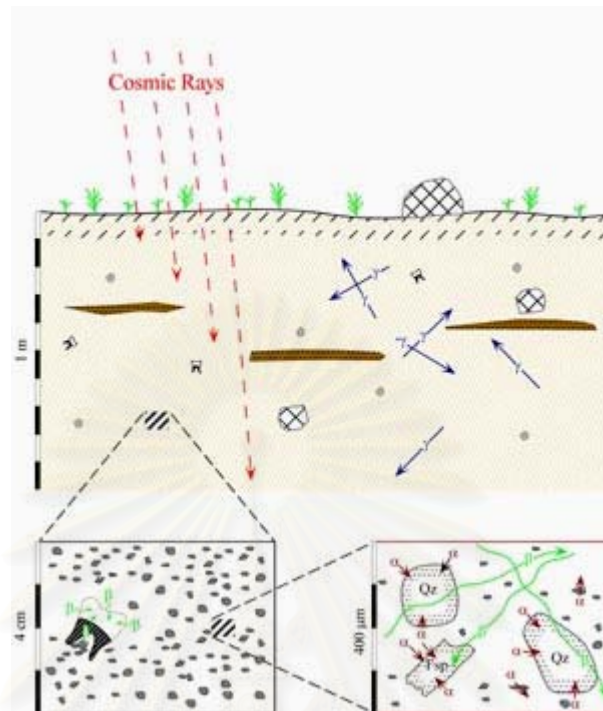
เมื่อทำการหาค่า %W และปริมาณความเข้มข้นของธาตุต่างๆที่มีอยู่ในดินแล้ว จึงทำการคำนวณค่า Annual dose (AD) ต่อไป ซึ่งค่า Annual dose (AD) ที่ใช้ในการคำนวณหาอายุนั้น จะประกอบด้วยค่า AD 2 ค่า ได้แก่ External dose หรือ AD_{Ex} และ Internal dose หรือ AD_{In} ดังสมการ (2.8)

$$\text{Annual dose} = AD_{Ex} + AD_{In} \tag{2.8}$$

เหตุผลเนื่องจากว่าตัวอย่างอาทิเช่นตัวอย่างฟันนั้นเมื่อฝังตัวอยู่ใต้ดินก็จะได้รับ dose ได้จาก 1. รังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดิน 2. รังสีธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในฟัน ซึ่งเราถือว่าค่า External dose นั้นได้มาจากปรากฏการณ์ Radiation Damage ของรังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินในรัศมี 30 เซนติเมตร ของอนุภาคแกมมา และในรัศมี 3 เซนติเมตร ของอนุภาคเบตา ส่วนค่า Internal dose นั้นได้มาจากปรากฏการณ์ Radiation Damage ของรังสีในธรรมชาติที่แผ่ออกมาจากธาตุในดินในรัศมี 3 เซนติเมตร ของอนุภาคเบตา และในรัศมี 0.3 มิลลิเมตร ของอนุภาคแอลฟา ซึ่งแล้วแต่ชนิดของแต่ละตัวอย่าง ถ้าเป็นตัวอย่างในกรณีอื่นเช่น ตะกอนดิน ประเภทแร่ธาตุควอตซ์ก็จะมีลักษณะทาง Geometry ที่แตกต่างกันดังรูป 2.38 และ 2.39



รูปที่ 2.38 ลักษณะทาง Geometry ของตัวอย่างฟันจาก ปรากฏการณ์ Radiation Damage [37]



รูปที่ 2.39 ลักษณะทาง Geometry ของตัวอย่างดินจาก ปฏิกิริยา Radiation Damage
เปรียบเทียบกับตัวอย่างตะกอนดิน [38]

สำหรับการหาค่า External dose หรือ AD_{Ex} จะใช้ dose rate อันเนื่องมาจากรังสีเบตา และแกมมา ตามเหตุผลในหัวข้อ 2.8 สมการที่ใช้หามานั้นมีอยู่ 3 สมการให้เลือกใช้คำนวณขึ้นอยู่กับขนาดของตะกอนหรือตัวอย่างที่บดแล้ว [39] ดังนี้

1. ขนาด Grain size 74 - 149 μm

$$AD = \left[\frac{((0.91 \times 0.1462 \times C_V) + (0.86 \times 0.0286 \times C_{Th}) + (0.97 \times 0.8303 C_K))}{(1 + 1.25 \times \%W)} \right] + \left[\frac{(0.1148 \times C_V + 0.0514 \times C_{Th} + 0.2492 C_K)}{(1 + 1.14 \times \%W)} \right] + D_C \quad (2.9)$$

2. ขนาด Grain size 149 - 250 μm

$$AD = \left[\frac{((0.87 \times 0.1462 \times C_V) + (0.79 \times 0.0286 \times C_{Th}) + (0.93 \times 0.8303 C_K))}{(1 + 1.25 \times \%W)} \right] + \left[\frac{(0.1148 \times C_V + 0.0514 \times C_{Th} + 0.2492 C_K)}{(1 + 1.14 \times \%W)} \right] + D_C \quad (2.10)$$

3. ขนาด Grain size 74 - 250 μm

$$AD = \left[\frac{((0.88 \times 0.1462 \times C_V) + (0.83 \times 0.0286 \times C_{Th}) + (0.95 \times 0.8303 C_K))}{(1 + 1.25 \times \%W)} \right] + \left[\frac{(0.1148 \times C_V + 0.0514 \times C_{Th} + 0.2492 C_K)}{(1 + 1.14 \times \%W)} \right] + D_C \quad (2.11)$$

เมื่อ

- AD = Annual dose (mGy/year)
 C_U = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) (ppm)
 C_{Th} = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (Th) (ppm)
 C_K = ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียม (K) (%)
 %W = Water content (%) ของตัวอย่างดิน
 D_C = ค่า Adsorb dose ของ ริงส์คอสมิค (มีค่าเท่ากับ 0.15 mGy/year)

สำหรับการหาค่า Internal dose [36] หรือ AD_{in} จะใช้ dose rate อันเนื่องมาจากรังสีแอลฟา และเบตา ตามเหตุผลเดียวกันกับหัวข้อ 2.8 สมการที่ใช้คำนวณนั้น คือ

$$AD_{in} = \frac{[(0.1 \times 2.783 \times C_U) + (0.1 \times 0.738 \times C_{Th})] / (1 + (1.50 \times \%W)) + [(0.1462 \times C_U) + (0.0286 \times C_{Th}) + (0.8303 \times C_K)] / (1 + (1.25 \times \%W))}{1}$$
 (2.12)

เมื่อ

- AD_{in} = Internal annual dose (mGy/year)
 C_U = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) ในเนื้อฟัน (Dentine) และเคลือบฟัน (Enamel) หรือเปลือกหอย (ppm)
 C_{Th} = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (Th) ในเนื้อฟัน (Dentine) และเคลือบฟัน (Enamel) หรือเปลือกหอย (ppm)
 C_K = ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียม (K) (%)
 %W = Water content (%) ของตัวอย่างฟันทั้งซี่หรือเปลือกหอยทั้งเปลือก

ซึ่งสามารถประเมินค่า standard error ได้ โดยของธาตุยูเรเนียมและทอเรียมนั้นประมาณไม่น้อยกว่า 10 % ส่วนของธาตุโพแทสเซียม ไม่น้อยกว่า 3% เมื่อใช้เทคนิคทางวิธี Neutron Activation Analysis (NAA), โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometry ในการอ่านสัญญาณ [39]

2.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง [33]

ความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง หรือค่า Uncertainties (σ) ของตัวอย่างขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทดลองหลายปัจจัย โดยกำหนดมาตรฐานตามแบบของ ASTM Standard และ ISO [33] สามารถกำหนดขอบเขตของค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังต่อไปนี้

2.9.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการเปลี่ยนไปของสัญญาณ (σ_{FADING})

จากกำหนดอายุโบราณวัตถุประเภทหิน โดยวิธี ESR Dating ตัวอย่างมักจะเกิดอนุมูลอิสระประเภท CO_2^- ที่เกิดเป็นจุดบกพร่องในโครงสร้างผลึกได้นานถึง 10 ล้านปี เมื่อเปรียบเทียบกับหินของมนุษย์ในปัจจุบันพบว่ามีลักษณะที่เหมือนกัน คือเมื่อเกิดการ Radiation Damage ในโครงสร้างผลึกแล้วจะคงอยู่ในโครงสร้างผลึกตลอดไป จึงไม่มีปัญหาในการเปลี่ยนไปของสัญญาณ จึงให้มีค่า $\sigma_{\text{FADING}} = 0\%$ เพราะเกิดการ Fading น้อยมาก [33]

2.9.2 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่าง (σ_{SAMPLE})

ในการเตรียมตัวอย่างพบว่าในบางกรณีอาจเกิดความสูญเสียเนื้อผิวหน้าของตัวอย่างที่ต้องการวัดสัญญาณไปเนื่องจากการเตรียมตัวอย่างในระหว่างการทดลอง และเหตุเนื่องมาจากการชุกค้นพบตัวอย่าง ให้มีค่า $\sigma_{\text{SAMPLE}} = 10\%$ [33]

2.9.3 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการวัดสัญญาณ ESR (σ_{ESR})

เมื่อทำการวัดสัญญาณในตัวอย่าง ในการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการวัดสัญญาณ ESR มีปัจจัยย่อยในการพิจารณา ได้แก่

2.9.3.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน (Noise) (σ_{noise})

เนื่องจากการนำตัวอย่างเข้าไปวัดสัญญาณนั้น ในการเตรียมตัวอย่างในบางครั้งอาจมีสิ่งแปลกปลอมหรือมลทินที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวอย่างปนในสัญญาณด้วย เช่น เนื้อฟัน (Dentine) หรือหินปูน (Cement) ให้มีค่า $\sigma_{\text{noise}} = 30 \times (I_{\text{NOISE}}/I_{\text{ESR}})$ หรือประมาณค่าโดยทั่วไปเท่ากับ 10% [33] ดังรูปที่ 2.40

2.9.3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการจัดวางตำแหน่งใน cavity ของเครื่อง ESR (σ_{POSIT})

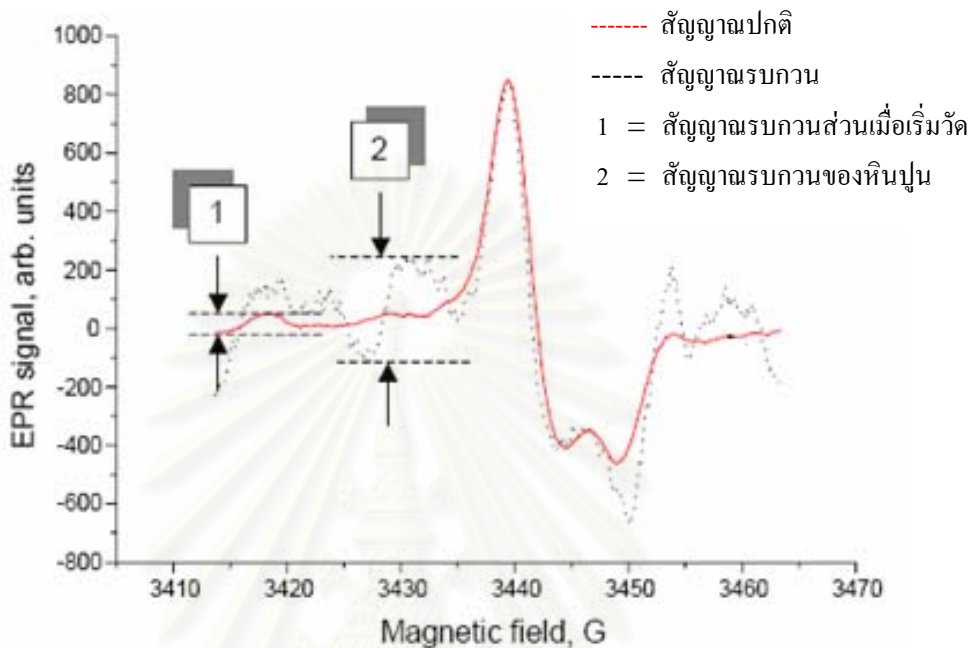
ในการวางหลอดแก้วควอตซ์สำหรับเข้าวัดลงใน cavity ในเครื่อง ESR Spectrometer อาจมีเนื้อมวลสารของตัวอย่างในบางกรณีเป็นสารเนื้อผสม เมื่อทำการเขย่าหรือหมุนหลอดและนำไปวัดสัญญาณแต่ละครั้งอาจมีสเปกตรัมและปริมาณสัญญาณที่เปลี่ยนไปจึงให้มีค่า $\sigma_{\text{POSIT}} = 1\%$ [33]

2.9.3.3 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากเสถียรภาพของเครื่อง ESR Spectrometer (σ_{STAB})

สำหรับเครื่อง ESR Spectrometer นั้นส่วนประกอบหลักที่สำคัญได้แก่ ส่วนของ microwave power และ magnetic fields ซึ่งผลของอุณหภูมิขณะทำการวัดอาจเกิดความคลาดเคลื่อนได้ ให้มีค่า $\sigma_{\text{STAB}} = 1\%$ [33]

ดังนั้นจึงให้มีค่า

$$(\sigma_{ESR}) = [(\sigma_{NOISE})^2 + (\sigma_{POSIT})^2 + (\sigma_{STAB})^2]^{1/2} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.40 การเปรียบเทียบสัญญาณปกติ และพิกที่มีสัญญาณรบกวน (Noise) [33]

2.9.4 ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการคำนวณความสูงของพีคหรือปริมาณสัญญาณ

(Numerical treatment of spectra) (σ_{TREAT}) [33]

ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการคำนวณความสูงของพีค ซึ่งคำนวณได้จากผลการวัดปริมาณสัญญาณ ซึ่งการวัดปริมาณสัญญาณ (I_{ESR-i}) ได้ n ครั้ง และนำมาหาค่า Experimental Standard Deviation (s) และนำผลที่ได้มาคำนวณค่า σ_{TREAT} ต่อ ดังนี้ [40]

$$s_{ESR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{ESR-i} - \overline{I_{ESR}})^2}{n-1}} \quad (2.13)$$

และ

$$\sigma_{TREAT} = \frac{s_{ESR}}{\sqrt{n}} \quad (2.14)$$

2.9.5 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการทำ Calibration curve ของสัญญาณ ESR ($\sigma_{\text{TOTAL - CALIB}}$) [33]

ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการทำ Calibration curve ของสัญญาณ ESR เกิดขึ้นเนื่องจาก 2 สาเหตุได้แก่

2.9.5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา (σ_{source})

เนื่องมาจากการอาบรังสีแกมมาในตัวอย่างเพิ่ม หรือการทำ Addition curve นั้นเนื่องจากในบางกรณีการฉายอาจมีการคลาดเคลื่อนของการคำนวณเวลาที่ใช้ในการฉาย และลักษณะที่ตำแหน่งในการฉายไม่ตรงตามลักษณะของ Geometry ในการฉาย จึงให้หาค่า $\sigma_{\text{source}} = 3\%$ [33]

2.9.5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจาก Addition curve หรือ Calibration curve (σ_{CALIB}) [33]

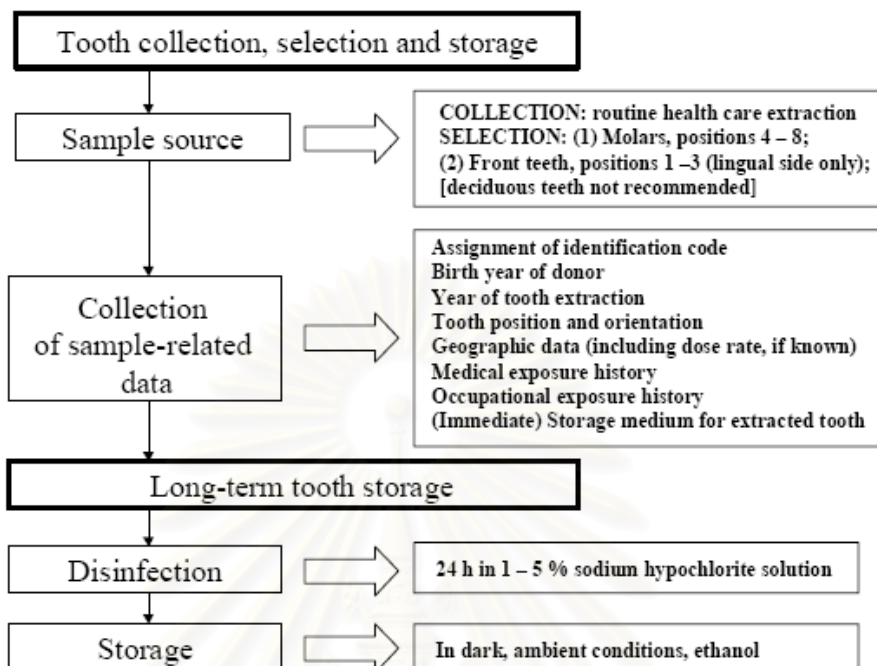
เนื่องจากการทำ Addition curve หรือ Calibration curve นั้น การทำ least-square เกิดขึ้นจากปริมาณการอาบรังสีเพิ่ม ซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อนของตัวเลขของปริมาณรังสีที่อาบ ไม่สัมพันธ์กับปริมาณสัญญาณ จึงให้หาค่า $\sigma_{\text{CALIB}} = 10\%$ [33]

ดังนั้นจึงให้หาค่า
$$(\sigma_{\text{TOTAL - CALIB}}) = [(\sigma_{\text{SOURCE}})^2 + (\sigma_{\text{CALIB}})^2]^{1/2} \quad (2.15)$$

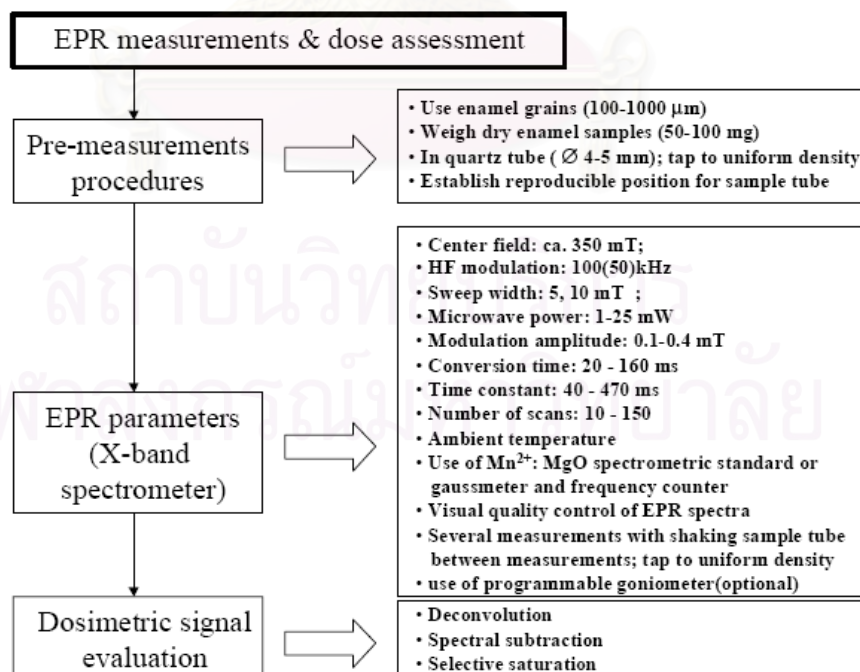
สรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่างได้จาก [33]

$$\sigma_{\text{ESRDOSE}} = (\sigma_{\text{FADING}}^2 + \sigma_{\text{SAMPLE}}^2 + \sigma_{\text{ESR}}^2 + \sigma_{\text{TREAT}}^2 + \sigma_{\text{TOTAL - CALIB}}^2)^{1/2} \quad (2.16)$$

และขั้นตอนการกำหนดอายุตั้งแต่การเตรียมตัวอย่าง จนถึงการนำตัวอย่างเข้าไปวัดสัญญาณ ได้สรุปลักษณะและรูปแบบขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 2.41 และ 2.42



รูปที่ 2.41 แผนภาพขั้นตอนการเลือกตัวอย่าง [33]



รูปที่ 2.42 แผนภาพขั้นตอนการวัดปริมาณสัญญาณ ESR [33]

บทที่ 3

วัตถุประสงค์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเก็บตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose และการคัดเลือกตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose และการคัดเลือกตัวอย่างในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้คัดเลือกจากตัวอย่างพื้นสัตว์และเปลือกหอยโบราณจากหลุมขุดค้นที่ 1 (S23W10) ภายในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด ศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าลุ่มแม่น้ำปายตอนเหนือ ในท้องที่ตำบลถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ในช่วงความลึกที่ระดับสมมติ 1 – 29 (Level 1 – 29) ที่มีอายุในสมัยทางธรณีวิทยาไพลสโตซีนตอนปลาย ตัวอย่างพื้นสัตว์ที่ใช้ในการหาอายุในงานวิจัยอยู่ในช่วงความลึกขุดค้นที่ระดับสมมติ 19 – 29 (Level 19 – 29) ส่วนตัวอย่างเปลือกหอยที่ใช้ในการหาอายุในงานวิจัยอยู่ในช่วงความลึกขุดค้นที่ระดับสมมติ 29 (Level 29) เพียงระดับเดียว ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาพหลุมขุดค้นที่ 1 (S23W10) ภายในแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด (ก) กรอบสีดำแสดงขอบเขตวิจัย (ข), (ค) 1 ตารางเส้นขาวเท่ากับ 2 Level

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

- 3.1.1.1 ชะแสงสำหรับขุดดิน
- 3.1.1.2 กระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างดิน
- 3.1.1.3 parafilm สำหรับ seal กระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างดิน
- 3.1.1.4 ถังเก็บตัวอย่างดิน
- 3.1.1.5 ถุงพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างดิน

3.1.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1.2.1 ทำการเก็บตัวอย่างดินในช่วงความลึกที่ระดับสมมติ 19 – 29 (Level 19 – 29) โดยใช้ชะแสงสำหรับขุดดินสั้งดินให้ลึกที่สุดและเก็บใส่ถัง โดยการสั้งเอาส่วนหน้าออกไปก่อน ดังรูปที่ 3.3

3.1.2.2 แยกส่วนที่ไม่ใช่ดินออกและเก็บไว้ในกระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างดิน ปิดฝากระบอกลำหรับแน่น

3.1.2.3 ทำการ seal กระบอกลำหรับเก็บตัวอย่างดิน ด้วย parafilm เขียนกำกับตำแหน่ง Level ให้ถูกต้อง

3.1.2.4 ทำการคัดเลือกตัวอย่างฟันสัตว์และเปลือกหอย ซึ่งตัวอย่างได้ทำการเก็บรักษาไว้ในสำนกังานฯ ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกฟันสัตว์และเปลือกหอยที่มีความสมบูรณ์ สำหรับฟัน คัดเฉพาะฟันที่มี Enamel ที่สมบูรณ์ ไม่ผุกร่อน สามารถนำมาเตรียมตัวอย่างได้ ดัง

รายละเอียดที่บอกตำแหน่งที่พบตัวอย่างจำนวน 23 ตัวอย่าง ตามข้อมูลในตารางที่ 3.1 และได้เก็บตัวอย่างไว้ในถุงพลาสติกและลงรายละเอียดกำกับไว้ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การเก็บตัวอย่างดินเพื่อวัด Annual dose

- ก. การดูตำแหน่ง Profile เพื่อทำการเก็บตัวอย่างดินตาม Level ที่ต้องการ
ข. และ ค. การเก็บตัวอย่างดินโดยการเก็บส่วนดินเนื้อในที่ลึก

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของตัวอย่างพื้นที่นำมากำหนดอายุโดยวิธีอเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์

ระดับสมมติ (Level)	ช่วงความลึกจากปากหลุม	รหัสตัวอย่าง
19	330 – 340 cm.	# 919 /A3096 MHS'45 A I S23W10 NEQ 4 #1695 /A3110 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 3 # 1125 /A3120 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4
20	340 – 350 cm	#1163 /A3671 MHS'45 A.I S23W10 NWQ 3 # 1151-2 /A4233 MHS'45 A.I S23W10 NWQ 1 # 1151-1 /A4234 MHS'45 A.I S23W10 NWQ 3 # 981-1 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 1
26	400 – 410 cm	# 1453 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4
29	430-440 cm.	# 1583 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างที่ทำการเก็บในถุงพลาสติกและลงรายละเอียดไว้แล้ว

3.2 การเตรียมตัวอย่างพื้นและเปลือกหอยสำหรับวัดสัญญาณ ESR

3.2.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

- 3.2.1.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR- Grade
- 3.2.1.2 สารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) AR- Grade
- 3.2.1.3 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) AR- Grade 35% (v/v)
- 3.2.1.4 น้ำกลั่น
- 3.2.1.5 เครื่องกรอฟัน, มีดผ่าตัด, สิว
- 3.2.1.6 ครุชีเบิล
- 3.2.1.7 ครก Agate motar
- 3.2.1.8 แท่งแก้วคนสาร
- 3.2.1.9 บีเปต ขนาด 10,25 ml
- 3.2.1.10 จุกยางสำหรับดูดสาร
- 3.2.1.11 กระจกตวงขนาด 100 ml
- 3.2.1.12 กระจกนาฬิกา
- 3.2.1.13 จานเพาะเชื้อ
- 3.2.1.14 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ 4 ตำแหน่ง
- 3.2.1.15 กระจกโพลีเอธิลีนขนาดเล็ก
- 3.2.1.16 ขวดวัดปริมาตรขนาด 100, 250 และ 500 ml
- 3.2.1.17 ตู้อบแบบควบคุมอุณหภูมิ
- 3.2.1.18 ตู้ดูดควัน
- 3.2.1.19 ขวดรูปหมพู่
- 3.2.1.20 กรวยบุษเนอร์
- 3.2.1.21 กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41
- 3.2.1.22 กระจกสำหรับเก็บสารละลาย Waste
- 3.2.1.23 เดซิเกตเตอร์ (บรรจุด้วยซิลิกาเจล)
- 3.2.1.24 บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250 และ 500 ml

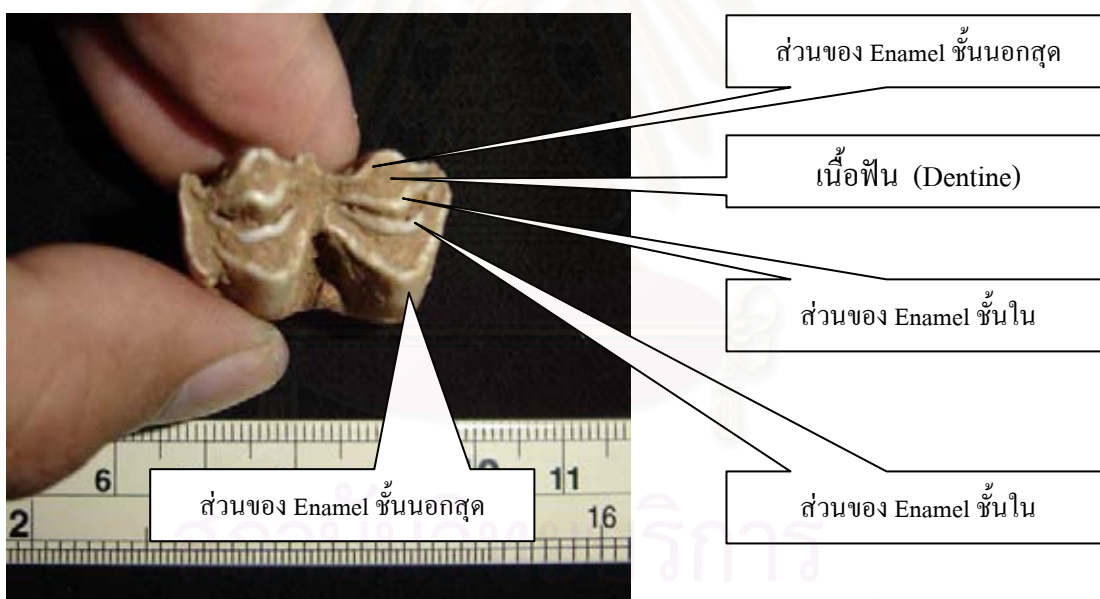
3.2.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับฟันสัตว์)

3.2.2.1 เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR- Grade ความเข้มข้น 40 % โดยปริมาตร ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 ml.

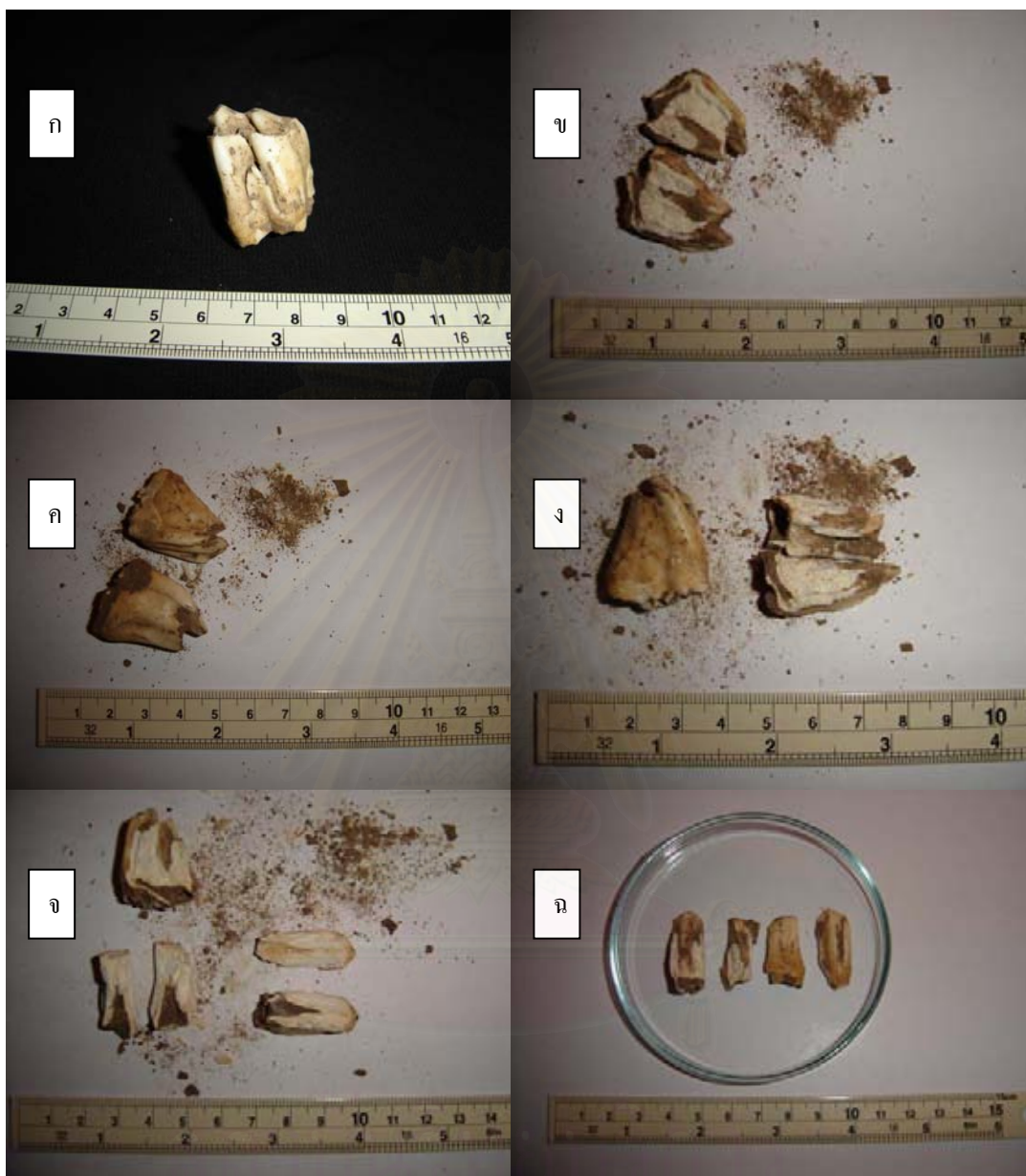
3.2.2.2 ในส่วนของห้องปฏิบัติการ จะต้องกระทำในห้องมืด โดยมีโคมไฟที่กรองแสงด้วยแผ่นกรองแสง ทำความสะอาดฟันให้สะอาดให้ปราศจากเศษดิน ให้แห้ง

3.2.2.3 นำฟันที่ทำความสะอาดแล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จดบันทึกน้ำหนัก และนำไปอบเพื่อในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำ บันทึกน้ำหนักเพื่อคำนวณ %W

3.2.2.4 ล้างฟันให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้เศษดินหมดไป จากนั้นทำการแยก Enamel ให้แยกออกจากเนื้อฟัน โดยการใช้สว่านที่สะอาดและคมแยกออกมา และกรอเอาส่วนของ หินปูนและเนื้อฟัน (Dentine) ออกให้ได้ส่วนของ Enamel อย่างเดียว ดังรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงส่วนประกอบของตัวอย่างฟัน



รูปที่ 3.6 แสดงการแยกส่วนของ Enamel ออกจาก เนื้อฟัน (Dentine)

- ก. ฟันสัตว์ รหัส #1163 Level 20 ที่พร้อมทำการแยก
- ข. ทำการแบ่งฟันสัตว์ออกเป็น 2 ส่วน ด้านหงาย จะเห็นเนื้อฟันด้านใน
- ค. ส่วนของด้านนอกที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนแล้ว
- ง. นำส่วนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนแล้ว แบ่งต่ออีกเป็น 2 ส่วน
- จ. นำส่วนที่เล็กที่สุดที่แยกออกมาชูดหินปูนออกให้มากที่สุด
- ฉ. แสดงภาพ Enamel ที่แยกออกมาแล้วเบื้องต้น รอทำการ Treatment ต่อไป

3.2.2.5 ขูดหินปูนและเนื้อฟันออกจาก Enamel ให้ได้มากที่สุด จากนั้นแยกส่วนที่เป็น Enamel และเนื้อฟันออก รวบรวมออกเป็น 2 ส่วน เพื่อความสะดวกในการวัดสัญญาณ ESR Spectrometer ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการขูดหินปูนและเนื้อฟันออกจาก Enamel ของตัวอย่าง

3.2.2.6 นำเอาส่วนของ Enamel มาขจัดหินปูนให้หมดไปด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) AR- Grade ความเข้มข้น 40 % และจัดการ Damage ที่เกิดจากรังสีแอลฟาออกไป ซึ่งในสารละลายกรดจะละลายแร่ธาตุส่วนหน้าของฟัน และละลายหินปูนกับให้หมด

3.2.2.7 จากนั้นละลายเนื้อฟันลงในสารละลายกรด HCl 50 ml. ในบีกเกอร์ให้หมดและนำสารละลายกรดที่ละลายแร่ธาตุส่วนหน้าของฟัน และละลายหินปูนออกจาก Enamel มาผสมรวมกัน

3.2.2.7 นำมากรองโดยตัดกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 41 โดยใส่บนขวดรูปชมพู่เพื่อทำการกรองสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกรองสารละลายที่ละลายหินปูนและเนื้อฟัน

3.2.2.8 นำสารละลายในหัวข้อ 3.2.2.7 นำไปหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม ในหน่วย ppm ด้วยเครื่อง ICP-AES เพื่อคำนวณค่า Internal annual dose

3.2.2.9 นำ Enamel ที่ผ่านกระบวนการ treatment แล้วนำมาล้างน้ำกลั่นให้สะอาดและแช่ลงในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) AR- Grade 35% (v/v) เป็นเวลา 40 นาที และนำมาล้างในน้ำกลั่นอีกครั้งให้สะอาด

3.2.2.10 นำ Enamel ที่ผ่านกระบวนการในหัวข้อที่ 3.2.2.9 ใส่ลงในครุสิเบ็ดและอบในตู้อบที่ $50^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2.11 นำ Enamel ที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็น powder ด้วยครก Agate ผ่านตะแกรงร่อน $106 \mu m$ ดังรูปที่ 3.9

3.2.2.12 นำ Enamel ที่บดแล้วนำมา ชั่งน้ำหนัก และบรรจุในหลอดเซนต์ปีฟัจขนาดเล็ก และเก็บไว้ในกล่องฟิล์มดำยารูป จากนั้นนำไปเก็บไว้ในเดซิเกตอร์ เพื่อรอการดำเนินวิจัยในขั้นต่อไป



รูปที่ 3.9 Enamel ที่ได้มาบดให้ละเอียดเป็น powder

3.2.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับเปลือกหอยโบราณ)

3.2.3.1 เตรียมสารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) AR- Grade ความเข้มข้น 0.1 M ในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 ml.

3.2.3.2 ในส่วนของห้องปฏิบัติการ จะต้องกระทำในห้องมืด โดยมีคอมไฟที่กรองแสงด้วยแผ่นกรองแสง ทำความสะอาดเปลือกหอยให้สะอาดให้ปราศจากเศษดิน ให้แห้ง

3.2.3.3 นำเปลือกหอยที่ทำความสะอาดแล้วชั่งน้ำหนักตัวอย่าง จดบันทึกน้ำหนัก และนำไปอบเพื่อในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำออกไป บันทึกน้ำหนักเพื่อคำนวณ %W และนำเปลือกหอย 1 เปลือกเป็นตัวแทนบดให้เป็น powder เพื่อทำการวัดปริมาณธาตุปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้วิธี Gamma Spectroscopy ในการวัดปริมาณธาตุเพื่อคำนวณค่า Internal Annual dose

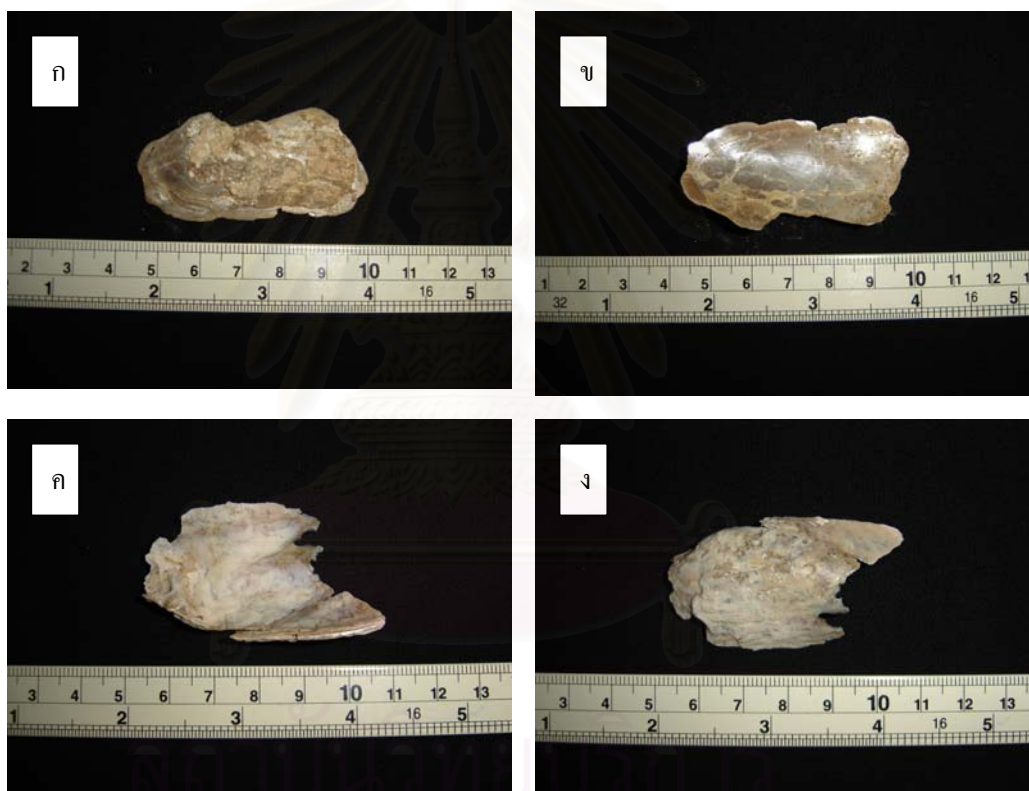
3.2.3.4 ล้างเปลือกหอยให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้เศษดินหมดไป จากนั้นทำการขจัดหินปูนส่วนหน้าออก เพราะหินปูนหรือ CaCO_3 ส่วนด้านนอกมักจะรับเอา CaCO_3 ในแหล่งน้ำที่อาศัยไว้ในอดีต ด้วยการแช่ในกรดอะซิติก และใช้มีดผ่าตัด ขูดผิวออกออกให้บางจนเหลือแต่เนื้อด้านในออกก่อน ดังรูปที่ 3.10

3.2.3.5 นำเปลือกหอยที่ผ่านกระบวนการ treatment แล้วนำมาล้างน้ำกลั่นให้สะอาด และแช่ลงในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) AR- Grade 35% (v/v) เป็นเวลา 40 นาที และนำมาแช่ลงในน้ำกลั่นอีกครั้งให้สะอาด

3.2.3.6 นำเปลือกหอยที่ผ่านกระบวนการในหัวข้อที่ 3.2.2.5 ใส่ลงในครุสปีด และอบในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

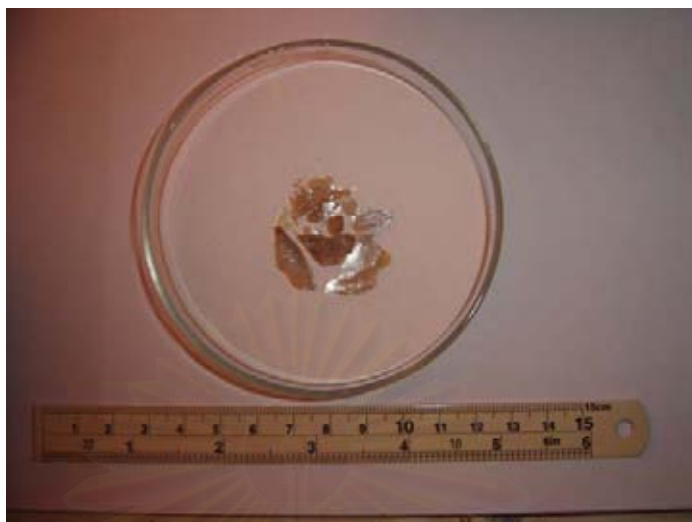
3.2.3.7 นำเปลือกหอยที่ได้ดังรูปที่ 3.11 มาบดให้ละเอียดเป็น powder ด้วยครกบด AR ผ่านตะแกรงร่อน 106 μm

3.2.3.8 นำเปลือกหอยที่บดแล้วนำมา ชั่งน้ำหนัก และบรรจุในหลอด Centrifuge ขนาดเล็ก และเก็บไว้ในกล่องฟิล์มสถ่ายรูป จากนั้นนำไปเก็บไว้ในเคซิเกตอร์ เพื่อรอการดำเนินการวิจัยในขั้นต่อไป



รูปที่ 3.10 การ treatment ในส่วนของเปลือกหอยให้สะอาด

- ก. เปลือกหอยด้านนอก
- ข. เปลือกหอยด้านใน
- ค. เปลือกหอยด้านนอก ที่ทำการ treatment แล้ว
- ง. เปลือกหอยด้านใน ที่ทำการ treatment แล้ว



รูปที่ 3.11 เปลือกหอยในส่วนที่เป็นโครงสร้างของ Aragonite ที่ผ่านการ treatment แล้ว พร้อมที่จะบดเป็น powder

3.3 การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose

3.3.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.3.1.1 เครื่องเขย่าตะแกรงร้อน

3.3.1.2 Sieve ขนาด 106 μm

3.3.1.3 เครื่องซั่งอิเล็กทรอนิกส์ 4 ตำแหน่ง

3.3.1.4 บีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250 และ 500 ml

3.3.1.5 ตู้อบแบบควบคุมอุณหภูมิ

3.3.1.6 ครก porcelain

3.3.1.7 กระบอกลพลาสติก

3.3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.2.1 นำตัวอย่างดินที่เก็บได้แล้วในแต่ละ Level มาแยกเอาเศษชิ้นส่วน กระดูกโบราณและสิ่งที่ไม่ต้องการออก

3.3.2.2 นำดินที่ค่อนข้างแห้งและเนื้อดินนำมาบดในขั้นต้นด้วย ครก porcelain

3.3.2.3 นำดินที่ผ่านการเตรียมในหัวข้อ 3.3.2.2 มาผ่านใน เครื่องเขย่าตะแกรง ร้อน ที่ผ่าน Sieve ขนาด 106 μm เป็นลาดสุดท้าย

3.3.2.4 นำดินที่ได้จากหัวข้อ 3.3.2.3 ใส่ลงในบีกเกอร์ ดังรูปที่ 3.12 ชั่ง น้ำหนัก และจดบันทึกเพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณ %W



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างดินที่ผ่านการร่อนแล้ว

3.3.2.5 ให้นำตัวอย่างดินไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เมื่อครบแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

3.3.2.6 นำตัวอย่างดินที่ได้มาทำการ ชั่งน้ำหนัก และจดบันทึกเพื่อเป็นข้อมูล ในการคำนวณ %W

3.3.2.7 นำตัวอย่างดินบรรจุไว้ในกระบอกพลาสติก และทำการวัดปริมาณธาตุ ปริมาณธาตุกำมะถันตรงสี่ยูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ในการวัดปริมาณธาตุเพื่อคำนวณค่า External annual dose

3.4 การนำตัวอย่างเคลือบพื้นสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อฉายรังสีแกมมา

สำหรับการหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose

ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแยกทางเคมีแล้วในขั้นตอนต่อไปคือการฉายรังสีแกมมา เป็นปริมาณ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 เท่าของปริมาณรังสีที่สารประกอบได้รับจากธรรมชาติ ซึ่งจะใช้ ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel และใช้สารละลาย Fricke เป็นตัวเทียบมาตรฐาน ปริมาณรังสีที่ฉายจริง ในการฉายรังสีเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างผลึกดังมีรายละเอียดดังนี้

3.4.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.4.1.1 สารละลาย Fricke (สารละลาย ferrous sulfate ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตรและ โซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิโมล ในน้ำกลั่นสามครั้ง (triply distilled water)) ใน

หลอด ampule ขนาด 5 มิลลิลิตร สำหรับใช้เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงในการวัดปริมาณรังสี

3.4.1.2 เครื่อง Spectrophotometer (Model UV-3101PC SHIMADZU UV-VIS-NIR SCANNING SPECTROPHOTOMETER) ที่ได้รับการปรับเทียบแล้ว สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ถึง 2 .0000 โดยมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดไม่มากกว่า $\pm 1\%$ ในย่านความยาวคลื่น 300 nm) สำหรับอ่านค่า absorbance ของสารละลาย Fricke

3.4.1.3 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel

3.4.1.4 อุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว) (Shielding attenuation = 90 %)

3.4.1.5 หลอด Centrifuge ขนาดเล็ก

3.4.1.6 ตัวอย่างเคลือบพื้นสัตว์และเปลือกหอยที่บดเป็น powder แล้ว

3.4.1.6 กล้องฟิล์มถ่ายภาพ

3.4.1.7 โฟมสำหรับบรรจุหลอดตัวอย่างและหลอดสารละลาย Fricke ความสูง 5 เซนติเมตร

3.4.1.8 กระจบออะลูมิเนียมหุ้มกระดาษทึบแสงสำหรับบรรจุสารละลาย Fricke

3.4.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.2.1 บรรจุตัวอย่างเคลือบพื้นสัตว์และเปลือกหอยที่บดเป็น powder แล้ว แบ่งออกเป็น 5 ส่วน สำหรับทำ Additive dose Calibration curve โดยการฉายรังสีจะฉายใน 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1 ฉายรังสีที่ 20, 40, 60 และ 80 Gy ของตัวอย่างควบคู่กับสารละลาย Fricke และแบบที่ 2 ฉายรังสีที่ 10, 30, 50 และ 70 Gy ของตัวอย่างควบคู่กับสารละลาย Fricke ซึ่งจะมีส่วนแรกในแต่ละแบบไม่ฉายรังสี

3.4.2.2 นำอุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว)(Shielding attenuation = 90 %) ครั้งหนึ่ง เข้าไปบรรจุใน Chamber ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel เพื่อทำการลดทอนรังสีแกมมา สำหรับเพิ่มเวลาการฉายรังสีให้นานเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ค่า dose ที่แน่นอนกว่า

3.4.2.3 นำตัวอย่างที่บรรจุในหลอด Centrifuge ขนาดเล็ก บรรจุในโฟมที่เจาะรูบรรจุแล้ว เข้าไปใส่ใน Shielding ตะกั่ว และปิดด้วย Shielding ตะกั่วอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.13

3.4.2.4 ปิด Chamber และทำการฉายรังสีตัวอย่างตามรูปแบบในหัวข้อ 3.4.2.1

3.4.2.5 นำหลอดซึ่งบรรจุตัวอย่างออกใส่ในกล่องฟิล์มกล่องละ 1 ตัวอย่าง ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2-3 วัน ก่อนนำไปวัดสัญญาณ Electron trap ด้วยเครื่อง ESR Spectrometer เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.13 การบรรจุตัวอย่างที่จะฉายรังสีใน Chamber ของเครื่องฉายรังสี

3.5 การวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเกลือพินัสต์วและเปลือกหอยโบราณ

3.5.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.5.1.1 ตัวอย่างเกลือพินัสต์วและเปลือกหอยโบราณที่ผ่านกระบวนการในหัวข้อ 3.4 มาแล้ว

3.5.1.2 สารมาตรฐานแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) สำหรับทำการ Calibrate เครื่อง Electron Spin Resonance Spectrometer

3.5.1.3 หลอดแก้วควอตซ์สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อทำการวัด

3.5.1.4 เครื่องซังอิเล็กทรอนิกส์ 4 ตำแหน่ง

3.5.1.5 เครื่อง Electron Spin Resonance Spectrometer รุ่น JEOL ES-IPRITS/RE-2X ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron) cavity

resonator เป็นแบบ cylindrical TE_{011} ใช้ Microwave Bridge ในช่วง X – band ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.5.2.1 ทำการ Calibrate เครื่อง Eletron Spin Resonance Spectrometer โดยการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของ สารมาตรฐานแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) โดยการบรรจุสารมาตรฐานในหลอดแก้วควอตซ์ประมาณ 0.15 กรัมใน cavity resonator เพื่อทำการปรับค่า

3.5.2.2 ทำการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเกลืออนินทรีย์และเปลือกหอยโบราณ โดยบรรจุตัวอย่างที่เป็น powder ในหลอดแก้วควอตซ์ประมาณ 0.15 กรัมใน cavity resonator ปรับค่าเพื่อหา condition ซึ่ง condition ที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดง Condition ต่างๆของการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเกลืออนินทรีย์และเปลือกหอยโบราณ

Condition	เกลืออนินทรีย์	เปลือกหอยโบราณ
Frequency (GHz)	9.44-9.45	9.44-9.45
Power (mW)	1.0	1.0
Field Center (mT)	336.5	336.6
Width (mT)	5.0×1	5.0×1
Sweep Time (min)	1	0.5
Modulation (kHz)	100	100
Width (mT)	0.32×1	0.25×10
Amplitude	4.0×10	3.2×10
Time constant (sec)	0.01	0.03
Phase (deg)	0	0
Temperature (°C)	25	25
g- factor	2.0028-2.0035	2.0078-2.0080

3.5.2.3 ทำการวัดความสูงของพีค (Peck High) ของพีคที่ได้ ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g อันเนื่องมาจากการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเดี่ยว (paramagnetic center) โดยในแต่ละตัวอย่างจะแบ่งตาม Dose ที่ได้รับเพิ่ม 5 ตัวอย่าง ๆ ละ 1 พีค ซึ่งจะได้ความเข้มสัญญาณจากการวัดความสูงของพีค (Peck High) หรือ ESR Signal 5 ค่า ตามค่า additive dose dose ที่ได้รับ

3.5.2.4 นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ ด้วยวิธี linear extrapolation หรือ Polynomial extrapolation Degree 2 โดยแกน x คือ ค่า additive dose ที่เดิมและแกน y คือค่า ESR signal จากนั้นต่อเส้นกราฟตัดแกน x จะได้ค่า AD

3.5.2.5 หาอายุของตัวอย่าง โดยวิธี ESR หรือ T_{ESR} ได้จากสมการ (3.1) ซึ่งค่า AD ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 3.5.2.4 และค่า Annual dose ที่ได้จากผลบวกของค่า External Annual dose ซึ่งได้จากการวัดปริมาณธาตุปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer และค่า Internal Annual dose ซึ่งได้จากการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม หน่วยเป็น ppm ด้วยเครื่อง ICP-AES

$$T_{ESR} = \frac{AD}{External\ dose + Internal\ dose} \quad (3.1)$$

3.5.2.6 ทำการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง หรือค่า Uncertainties (σ) จากสมการในหัวข้อ 2.9

3.6 วิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเกลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

3.6.1 สารเคมีและวัสดุอุปกรณ์

3.6.1.1 สารมาตรฐาน Hydroxylapatite, High Resolution ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1004.6 CAS 1306-065 ของบริษัท Merck Germany บรรจุ 100 กรัม

3.6.1.2 สารมาตรฐาน KBr สำหรับใช้เป็นแบคกราวด์

3.6.1.3 เครื่อง Eletron Spin Resonance Spectrometer รุ่น JEOL ES-IPRITS/RE-2X ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron) cavity

resonator เป็นแบบ cylindrical TE_{011} ใช้ Microwave Bridge ในช่วง X – band ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.1.4 เครื่อง Scanning Electron Microscope SEM model JSM-6400 สำหรับถ่ายภาพพื้นผิวเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.1.5 เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer XRD model JDX-8030 สำหรับวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.1.6 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer FT-IR model 1760x สำหรับวิเคราะห์หมู่ functional group ในเคลือบฟัน ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.1.7 ตู้อบสารอุณหภูมิสูง

3.6.1.8 ครูซิเบิล

3.6.1.9 ครก Agate motar

3.6.1.8 เครื่องซั่งอิเล็กทรอนิกส์ 4 ตำแหน่ง

3.6.1.10 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel

3.6.1.11 อุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว) (Shielding attenuation = 90 %)

3.6.1.12 หลอด Centrifuge ขนาดเล็ก

3.6.1.13 กล้องฟิล์มถ่ายรูป

3.6.1.14 โฟมสำหรับบรรจุหลอดตัวอย่างและหลอดสารละลาย Fricke ความสูง 5 เซนติเมตร

3.6.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับการวิเคราะห์ค่า g-factor ในสารมาตรฐาน)

3.6.2.1 ทำการซั่ง สารมาตรฐาน Hydroxylapatite, High Resolution ประมาณ 2 กรัม ในครูซิเบิล

3.6.2.2 ทำการอบสารมาตรฐาน Hydroxylapatite เพื่อกำจัด free radical ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.6.2.3 นำสารมาตรฐานที่ผ่านการอบแล้วมาซั่งน้ำหนัก และบรรจุในหลอด Centrifuge ขนาดเล็ก และเก็บไว้ในกล่องฟิล์มถ่ายรูป จากนั้นนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เป็นเวลา 2-3 วัน เพื่อทำการอบรังสีต่อไป

3.6.2.4 นำอุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว) (Shielding attenuation = 90 %) ครั้งหนึ่ง เข้าไปบรรจุใน Chamber ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel เพื่อทำการลดทอนรังสีแกมมา สำหรับเพิ่มเวลาการฉายรังสีให้นานเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ค่า dose ที่แน่นอนกว่า

3.6.2.5 นำตัวอย่างที่บรรจุในหลอดขนาดเล็ก บรรจุในโฟมที่เจาะรูบรรจุแล้ว เข้าไปใส่ใน Shielding ตะกั่ว และปิดด้วย Shielding ตะกั่วอีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.13

3.6.2.6 ปิด Chamber และทำการฉายรังสีสารมาตรฐานที่ 100 Gy

3.6.2.7 นำหลอดซึ่งบรรจุตัวอย่างออกใส่ในกล่องฟิล์มกล่องละ 1 ตัวอย่าง ทิ้งไว้ในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 2-3 วัน ก่อนนำไปวัดสัญญาณ Electron trap ด้วยเครื่อง ESR Spectrometer เพื่อให้เกิดอนุมูลอิสระอย่างสมบูรณ์

3.6.2.8 ทำการ Calibrate เครื่อง Electron Spin Resonance Spectrometer โดยการวัดสัญญาณอิเล็กตรอนไร้คู่ของ สารมาตรฐานแมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$) โดยการบรรจุสารมาตรฐานในหลอดแก้วควอร์ตซ์ประมาณ 0.15 กรัมใน cavity resonator เพื่อทำการปรับค่า

3.6.2.9 ทำการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของสารมาตรฐาน โดยบรรจุตัวอย่างที่เป็น powder ในหลอดแก้วควอร์ตซ์ประมาณ 0.15 กรัมใน cavity resonator ปรับค่าเพื่อหา condition ซึ่ง condition ที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณ

3.6.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยวิธี XRD)

3.6.3.1 นำ Enamel ที่บดแล้ว ตามหัวข้อ 3.2.2.12 และเปลือกหอยที่บดแล้ว ในหัวข้อ 3.2.2.8 นำแบ่งใส่หลอด และนำมาวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer เพื่อทำการวิเคราะห์และพิสูจน์โครงสร้างผลึก

3.6.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับการวิเคราะห์ถ่ายภาพพื้นผิว)

3.6.4.1 นำ Enamel ในหัวข้อ 3.2.2.10 และเปลือกหอยในหัวข้อ 3.2.3.8 แบ่งมาตัดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.8×0.8 เซนติเมตร มาทำการ coat ด้วยทอง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า

3.6.4.2 นำ Enamel และเปลือกหอยที่ทำการ coat ด้วยทอง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าแล้วมาถ่ายภาพพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

3.6.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย (สำหรับการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันน้ำตาลในเคลือบฟันสัตว์)

3.6.5.1 นำ Enamel ในหัวข้อ 3.2.2.10 และสารมาตรฐานที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ $50^{\circ}C$ แล้ว มาบดผสมกับ KBr ที่ใช้เป็นแบคกราวด์

3.6.5.2 นำสารผสมในหัวข้อ 3.6.5.1 มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันน้ำตาล ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose ในตัวอย่างดิน

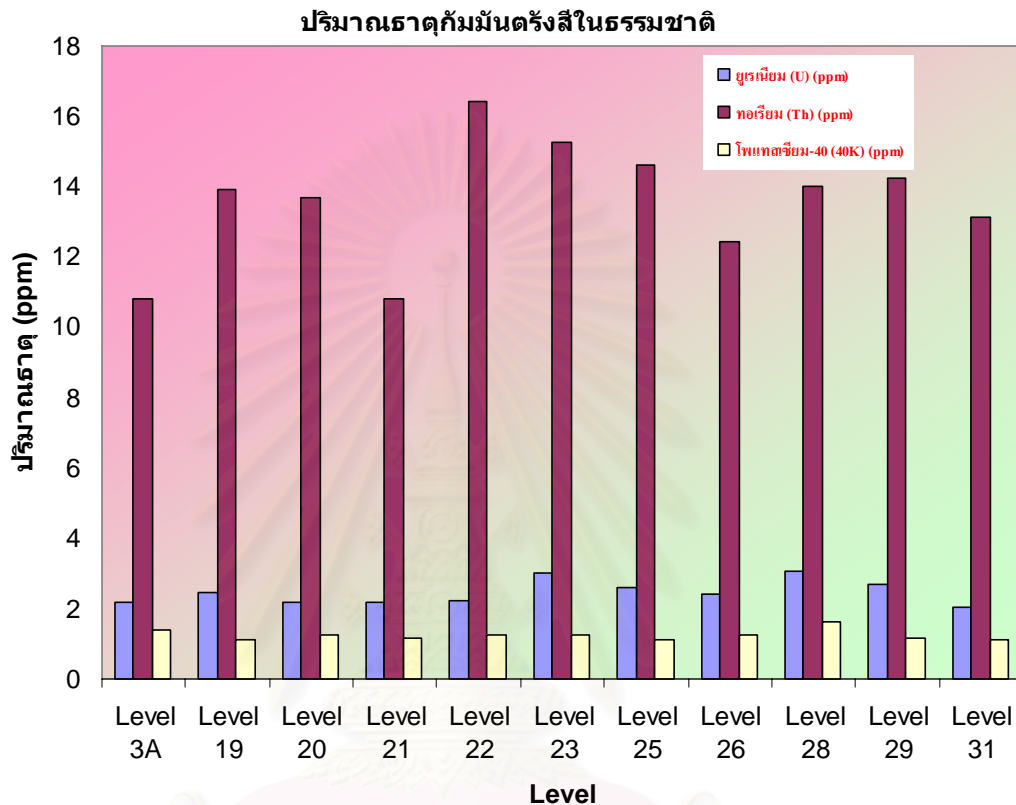
ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินเพื่อทำการวัด External Dose rate ประกอบการคำนวณอายุโดยวิธี Electron Spin Resonance Dating ณ หลุมขุดค้นที่ 1 Area I (S23W10) แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer โดยใช้หัววัดแบบ HPGe ขนาด 76×76 mm และเครื่องวิเคราะห์แบบ multichannel และเข้าอบรังสีนิวตรอนในตัวอย่าง โดยเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 โดยบรรจุตัวอย่างดินใน vial พลาสติกที่ seal ฝาสนิทแล้วหุ้มด้วยฟอยล์อะลูมิเนียม นำเข้าสู่ท่ออบรังสีนิวตรอนเป็นเวลา 1 วัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer

Level	ปริมาณธาตุ		
	ยูเรเนียม (U) (ppm)	ทอเรียม (Th) (ppm)	โพแทสเซียม-40 (⁴⁰ K) (ppm)
Level 19	2.45	13.92	1.13
Level 20	2.19	13.69	1.25
Level 21	2.20	10.81	1.14
Level 22	2.21	16.43	1.24
Level 23	3.02	15.27	1.24
Level 24,25*	2.59	14.60	1.10
Level 26	2.41	12.42	1.23
Level 28	3.08	14.03	1.63
Level 29	2.69	14.26	1.18
Level 31	2.06	13.12	1.11

* (ใช้ปริมาณธาตุที่หาได้ร่วมกันเนื่องจาก 2 Level นี้ตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างใกล้เคียงกัน)

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีต่างๆ แล้ว เมื่อนำมาพล็อตเป็นแผนภูมิแท่ง ได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกัมมันตรังสี และตำแหน่งสมมติของระดับชั้นความลึกของหลุมขุดค้นที่ 1(S23W10)

4.2 ผลการหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content, %W)

จากตารางที่ 4.1 เมื่อทำการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีต่างๆแล้วได้ทำการหา %W ในตัวอย่างดิน (ความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content, %W ซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำหรือความชื้นคิดเป็นร้อยละที่อยู่ในช่องว่างของตะกอนดิน) ซึ่งมีประสิทธิภาพการลดทอนที่แตกต่างกันในแต่ละอนุภาค (แอลฟา 50 %, เบตา 25% และแกมมา 14 %) และการหา %W ในตัวอย่างดินที่หา Annual dose นั้น สามารถหาได้จากสมการ (2.6) ดังนี้

$$\%W = \frac{(\text{weight of wet sample} - \text{weight of dried sample})}{\text{weight of dried sample}} \times 100$$

ซึ่งผลการหา %W ของตัวอย่างดินในแต่ละระดับแสดงดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการหา % Water content ในตัวอย่างดิน

Level	% Water content
Level 19	3.58
Level 20	3.49
Level 21	4.56
Level 22	3.85
Level 23	6.23
Level 24,25*	4.77
Level 26	3.08
Level 28	4.82
Level 29	5.28

* = เนื่องจากระดับชั้นดินที่ 24 มีชะง่อนหินแทรกตัวและใกล้เคียงกันจึงให้ผลเดียวกับของชั้นที่ 25

4.3 ผลการคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดิน

จากข้อมูลตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 นำมาคำนวณค่า External dose หรือ AD_{Ex} จะใช้ dose rate อันเนื่องมาจากรังสีเบตา และแกมมา และรังสีคอสมิก ตามเหตุผลในหัวข้อ 2.8 สมการที่ใช้หามานั้นมีอยู่ 3 สมการให้เลือกใช้สมการที่ (2.9) ในการคำนวณดังนี้

ขนาด Grain size 74 - 149 μm

$$AD = [((0.91 \times 0.1462 \times C_U) + (0.86 \times 0.0286 \times C_{Th}) + (0.97 \times 0.8303 C_K)) / (1 + 1.25 \times \%W)] + [(0.1148 \times C_U + 0.0514 \times C_{Th} + 0.2492 C_K) / (1 + 1.14 \times \%W)] + D_C$$

เมื่อ

AD = Annual dose (mGy/year)

C_U = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) (ppm)

C_{Th} = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (Th) (ppm)

C_K = ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียม (K) (%)

%W = Water content (%) ของตัวอย่างดิน ตามตารางที่ 4.2

D_C = ค่า Adsorb dose ของ รังสีคอสมิก (มีค่าเท่ากับ 0.15 mGy/year)

ซึ่งจากการคำนวณได้ผลตามตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่า Annual dose ในตัวอย่างดิน

Level	Dose rate (mGy/y.) จากรังสีเบตา	Dose rate (mGy/y.) จากรังสีแกมมา	Dose rate (mGy/y.) จากรังสีคอสมิก	Dose rate (mGy/y.) รวม
Level 19	0.29	0.25	0.15	0.69
Level 20	0.30	0.25	0.15	0.7
Level 21	0.22	0.18	0.15	0.55
Level 22	0.29	0.26	0.15	0.7
Level 23	0.20	0.18	0.15	0.53
Level 24,25*	0.23	0.20	0.15	0.58
Level 26	0.33	0.27	0.15	0.75
Level 28	0.29	0.23	0.15	0.67
Level 29	0.22	0.19	0.15	0.56

* = เนื่องจากระดับชั้นดินที่ 24 มีชะง่อนหินแทรกตัวและใกล้เคียงกันจึงใช้ผลเดียวกับของชั้นที่ 25

4.4 ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบพื้นและเปลือกหอยโบราณ

4.4.1 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบพื้น

เมื่อนำสารละลายในหัวข้อ 3.2.2.7 นำไปวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม หน่วยเป็น ppm ด้วยเครื่อง ICP-AES เพื่อคำนวณค่า Internal Annual dose โดยทำการวัดเฉพาะยูเรเนียมและทอเรียม ผลการวิจัยพบว่าสารละลายที่ได้มีสีเหลือง อาจสรุปในเบื้องต้นได้ว่าสารเคลือบพื้นสัตว์โบราณมีการแพร่และดูดซับเอาสารประกอบ UO_2^{+} ไว้ระดับหนึ่ง โดยเลือกเอาตัวแทนของตัวอย่างบวรหัสที่ทำการกำหนดอายุมาหาปริมาณธาตุจากสารละลายที่ได้จากการกรอง ได้ผลการทดลองดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.4 และแผนภูมิดังรูปที่ 4.2

4.4.2 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเปลือกหอยโบราณ

นำเปลือกหอย 1 เปลือกรหัส # 1583 เป็นตัวแทนบคให้เป็น powder เพื่อทำการวัดปริมาณธาตุปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วย

เทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ในการวัดปริมาณธาตุเพื่อคำนวณค่า Internal Annual dose โดยใช้หัววัดแบบ HPGe ขนาด 76×76 mm และเครื่องวิเคราะห์แบบ multichannel และเข้าอบรมรังสีนิวตรอนในตัวอย่าง โดยเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1 ได้ผลการทดลอง ดังรายละเอียดตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเคลือบฟันโดยวิธี ICP-AES

รหัสตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ	
	ยูเรเนียม (U) (ppm)	ทอเรียม (Th) (ppm)
#1163 Level 20	8.14	1.184
# 1151/1 Level 20	6.13	0.706
# 1151/2 Level 20	3.649	0.513
# 1695 Level 19	4.59	0.529
#1125 Level 19	3.459	0.401
# 919 Level 19	4.136	0.581
# 1453 Level 26	6.41	0.735
# 981/1 Level 20	7.82	0.987

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเปลือกหอยด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer

ตัวอย่าง	ปริมาณ		
	ยูเรเนียม (U) (ppm)	ทอเรียม (Th) (ppm)	โพแทสเซียม-40 (^{40}K) (ppm)
Level 29 (1)	<i>Not detected</i>	<i>Not detected</i>	0.07
Level 29 (2)	<i>Not detected</i>	<i>Not detected</i>	0.04

4.5 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟัน และเปลือกหอยโบราณ

จากข้อมูลตามตารางที่ 4.4 และ 4.5 นำมาคำนวณค่า Internal dose [26] หรือ AD_{in} จะใช้ dose rate อันเนื่องมาจากรังสีแอลฟา และเบตา ตามเหตุผลเดียวกันกับหัวข้อ 2.8 สมการที่ใช้คำนวณนั้น คือ

$$AD_{in} = \frac{[(0.1 \times 2.783 \times C_U) + (0.1 \times 0.738 \times C_{Th})] / (1 + (1.50 \times \%W))}{+[(0.1462 \times C_U) + (0.0286 \times C_{Th}) + (0.8303 \times C_K)] / (1 + (1.25 \times \%W))} \quad (2.12)$$

เมื่อ

- AD_{in} = Internal annual dose (mGy/year)
- C_U = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (U) ในเนื้อฟัน (Dentine) และเคลือบฟัน (Enamel) หรือเปลือกหอย (ppm)
- C_{Th} = ปริมาณความเข้มข้นของยูเรเนียม (Th) ในเนื้อฟัน (Dentine) และเคลือบฟัน (Enamel) หรือเปลือกหอย (ppm)
- C_K = ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียม (K) (%) ให้เท่ากับ 0.055 ppm
- $\%W$ = Water content (%) ของตัวอย่างฟันทั้งซี่หรือเปลือกหอยทั้งเปลือก ซึ่งในที่นี้ใช้ตัวแทนของฟันซี่ที่สมบูรณ์โดยได้ค่าเท่ากับ 9.75

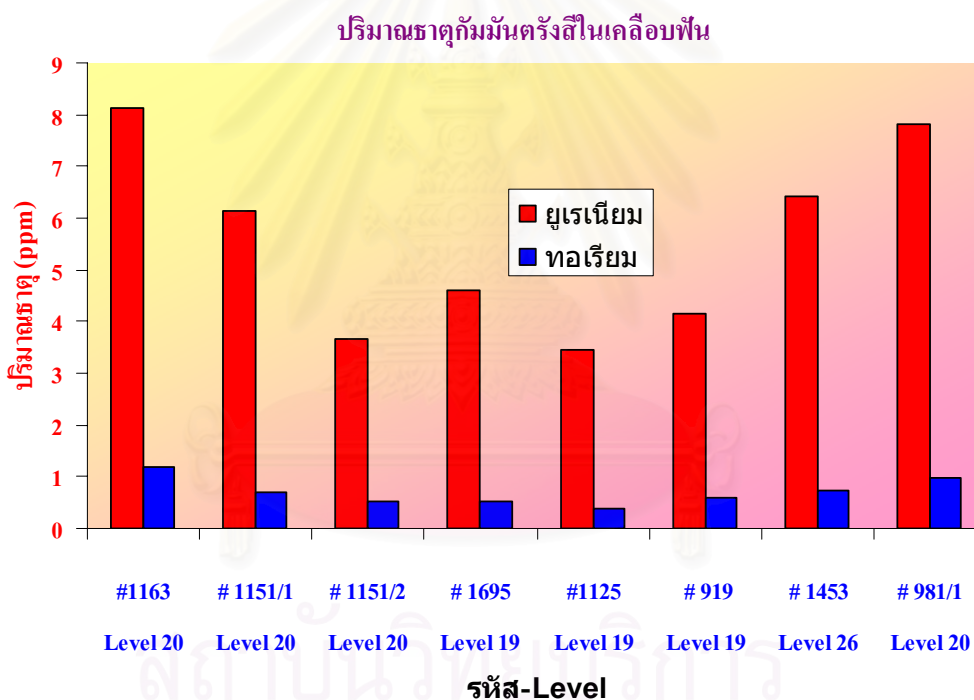
ซึ่งจากการคำนวณได้ผลตามตารางที่ 4.6 และ 4.7 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose) ในตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์

Level	Dose rate (mGy/y) จากรังสีแอลฟา	Dose rate (mGy/y) จากรังสีเบตา	Dose rate (mGy/y) รวม
#1163 Level 20	0.150	0.096	0.247
# 1151/1 Level 20	0.112	0.073	0.185
# 1151/2 Level 20	0.067	0.045	0.112
# 1695 Level 19	0.084	0.055	0.134
#1125 Level 19	0.063	0.043	0.106
# 919 Level 19	0.076	0.05	0.127
# 1453 Level 26	0.118	0.076	0.193
# 981/1 Level 20	0.144	0.092	0.236

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose) ในตัวอย่างเปลือกหอย

Level	Dose rate (mGy/y.) จากรังสีแอลฟา	Dose rate (mGy/y.) จากรังสีเบตา	Dose rate (mGy/y.) รวม
Level 29 (1)	-	0.0044	0.0044
Level 29 (2)	-	0.0025	0.0025



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุกัมมันตรังสีและตำแหน่งสมมติบอกรหัสตัวอย่างและระดับชั้นความลึกของตัวอย่างเปลือกหอย

4.6 ผลการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อ

สำหรับการหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose

ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแยกทางเคมีแล้วในขั้นตอนต่อไปคือการฉายรังสีแกมมาเป็นปริมาณ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 เท่าของปริมาณรังสีที่สารประกอบได้รับจากธรรมชาติ ซึ่งจะใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel และใช้สารละลาย Fricke เป็นตัวเทียบมาตรฐาน ปริมาณรังสีที่ฉายจริง ซึ่งในแต่ละตัวอย่างจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ในแต่ละส่วนจะประกอบด้วย dose ในช่วง 10-70 Gy หรือในช่วง 20-80 Gy ในการฉายรังสีเพิ่มเข้าไปในโครงสร้างผลึกดังมีรายละเอียดดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

ความลึก	รหัสตัวอย่าง	ปริมาณรังสีที่ฉายเพิ่ม (ปริมาณที่ต้องการ) , Gy	ปริมาณรังสีที่ฉายเพิ่ม , Gy (ปริมาณจริง)
330 – 340 cm.	# 919 /A3096	20, 40, 60, 80	20.4, 39.6, 59.1, 79.2
	#1695 /A3110	20, 40, 60, 80	20.4, 39.6, 59.1, 79.2
	# 1125 /A3120	20, 40, 60, 80	20.4, 39.6, 59.1, 79.2
340 – 350 cm	#1163 /A3671	20, 40, 60, 80	20.7, 40, 59, 79.5
	# 1151-1 /A4233	20, 40, 60, 80	21.2, 40.6, 59.8, 79.3
	# 1151-2 /A4234	20, 40, 60, 80	21.1, 40.5, 59.5, 79.1
	# 981-1	20, 40, 60, 80	20.8, 40, 60.7, 80.1
400 – 410 cm	# 1453	20, 40, 60, 80	20.8, 40, 60.7, 80.1
430-440 cm	# 1583-1	20, 40, 60, 80	20.8, 40, 60.7, 80.1
	# 1583-2	20, 40, 60, 80,100	21.1, 37.6, 55.8, 75.5, 96.2
	# 1583-3	20, 40, 60, 80,100	21.1, 37.6, 55.8, 75.5, 96.2
	# 1583-4	20, 40, 60, 80,100	21.1, 37.6, 55.8, 75.5, 96.2
	# 1583-5	20, 40, 60, 80,100	21.1, 37.6, 55.8, 75.5, 96.2
	# 1583-6	20, 40, 60, 80,100	21.1, 37.6, 55.8, 75.5, 96.2
	# 1583-7	20, 40, 60, 80	20, 39.9, 59.6, 78.7
	# 1583-8	20, 40, 60, 80	20, 39.9, 59.6, 78.7

4.7 ผลการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

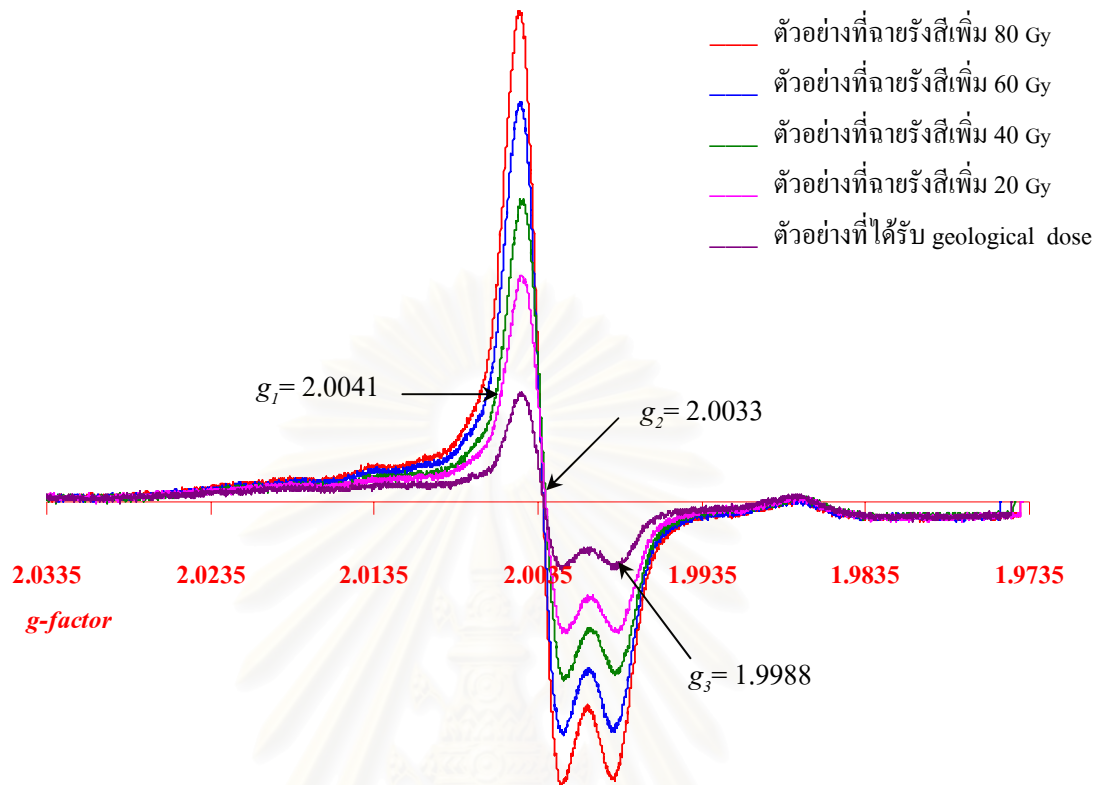
ผลการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณจากการคัดเลือกฟันสัตว์และเปลือกหอยที่มีความสมบูรณ์ ซึ่งสำหรับฟัน ได้คัดเลือกฟันที่มี Enamel ที่สมบูรณ์ ไม่ผุกร่อน สามารถนำมาเตรียมตัวอย่างได้ ดังรายละเอียดที่บอกตำแหน่งที่พบตัวอย่างจำนวน 8 ตัวอย่าง ตามข้อมูลในตารางที่ 3.1 นั้น สามารถจำแนกได้ดังนี้

4.7.1 ผลการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์

ตัวอย่างฟันสัตว์ที่แยกเคลือบฟันเพื่อวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึก Hydroxyapatite มีทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.7.1.1 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจากรadical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.3

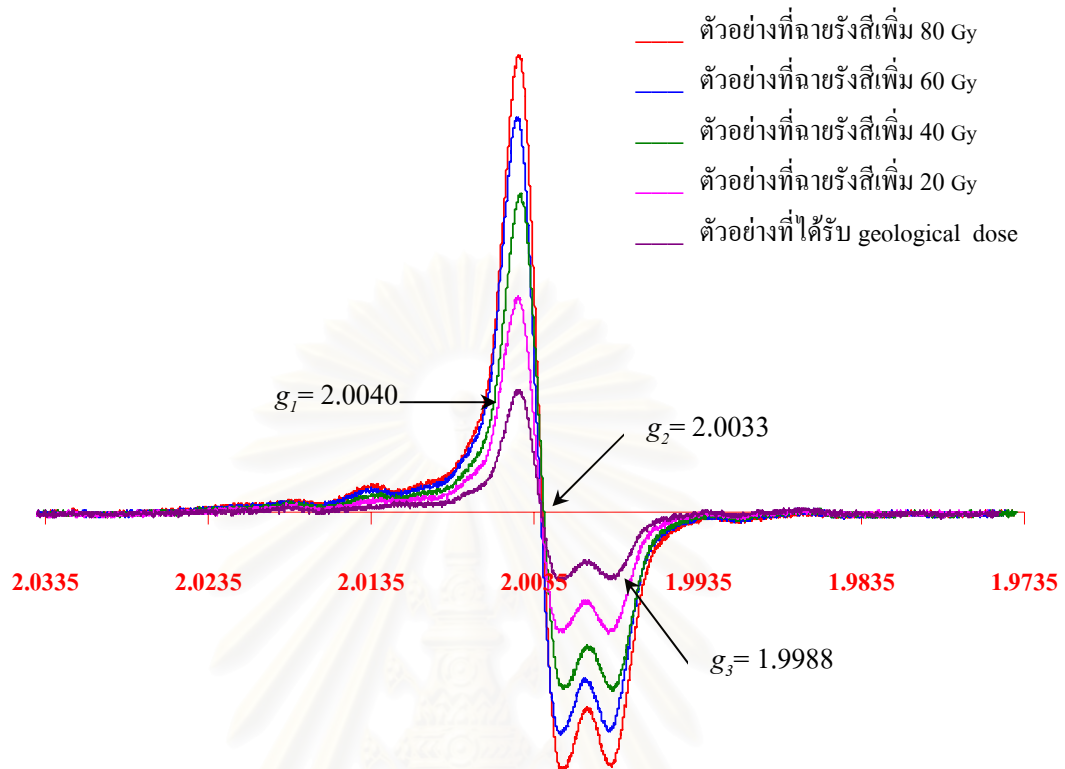


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0041$, $g_2 (g_{center}) = 2.0033$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.9988$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.2 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 3

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.4

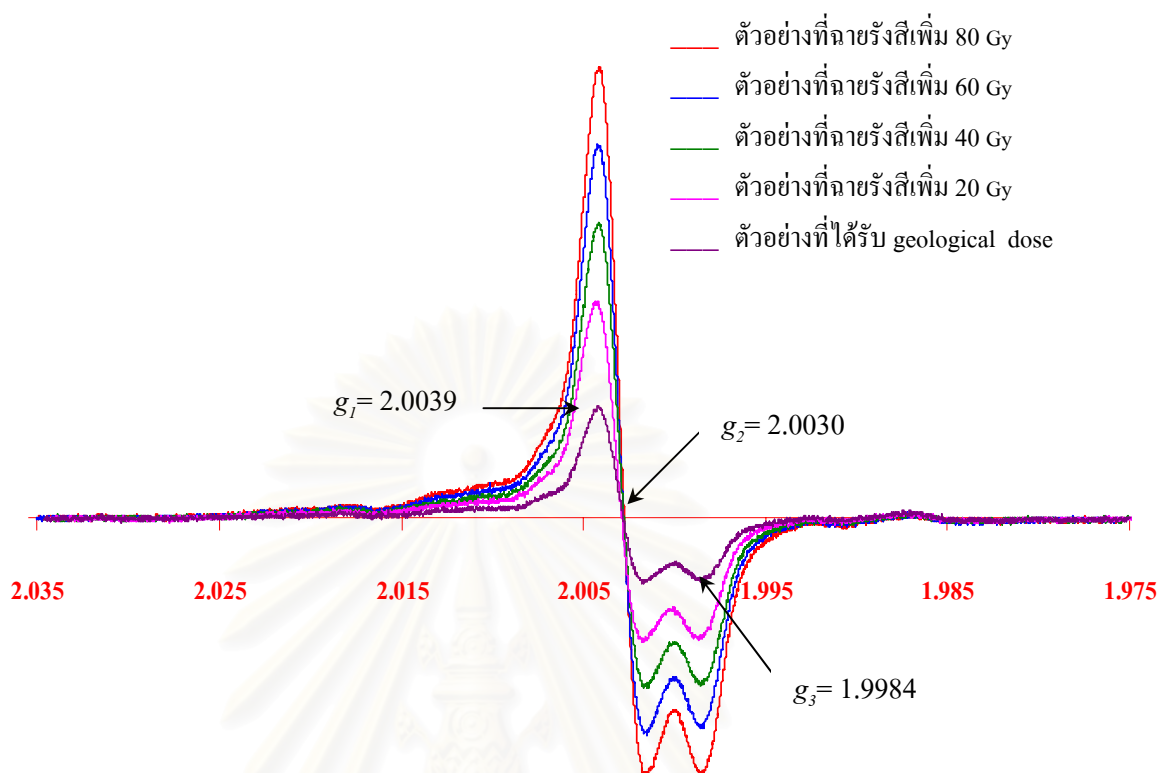


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0040$, $g_2 (g_{center}) = 2.0033$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.9988$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.3 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

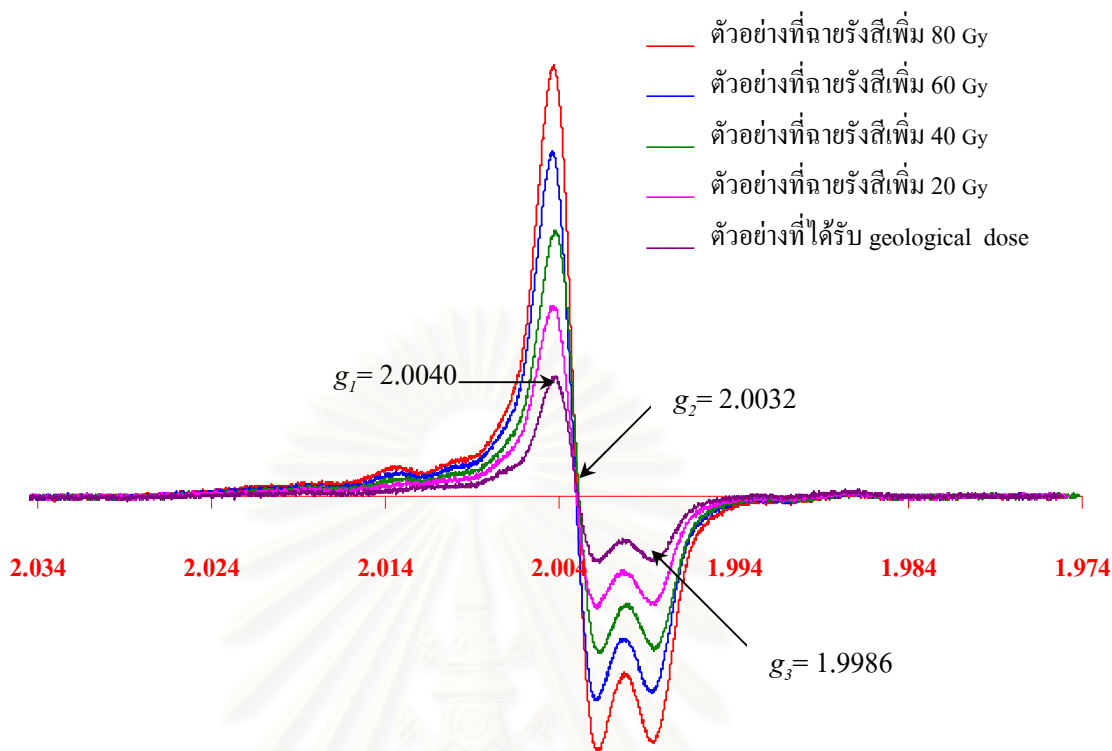
สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบจากข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0039$, $g_2 (g_{center}) = 2.0030$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.9984$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

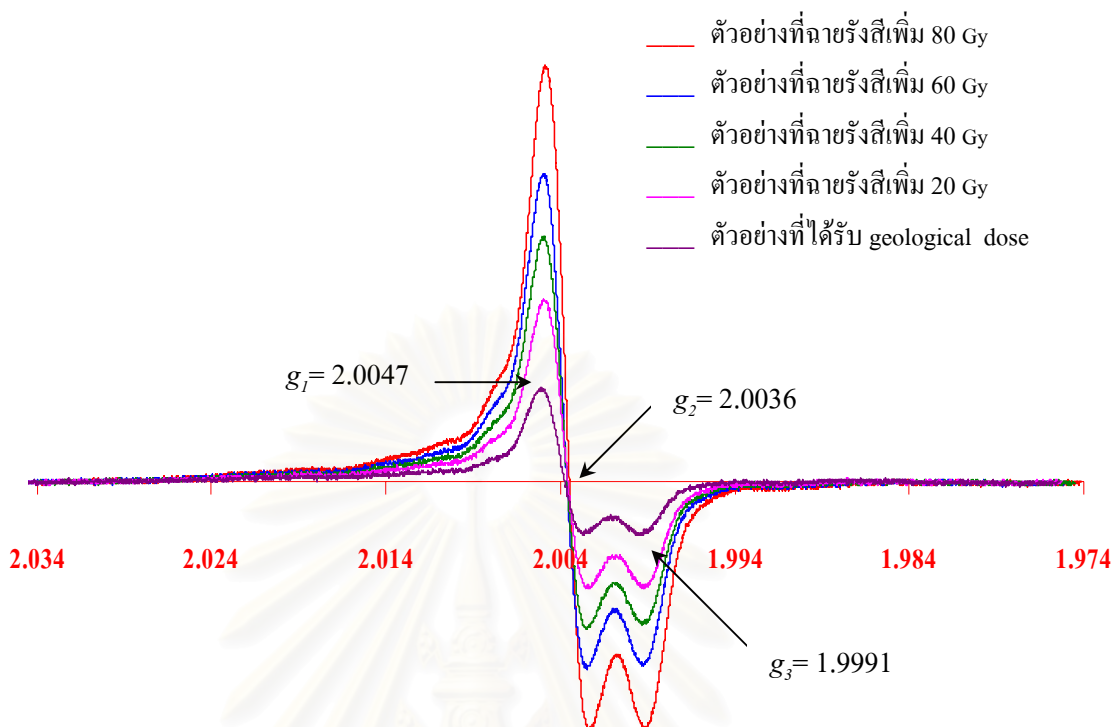
4.7.1.4 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151 /A4234 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3
สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151/A4234 Level 20 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151/A4234 Level 20

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0040$, $g_2 (g_{center}) = 2.0032$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.9986$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.5 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151 /A4233 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 1 สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151/A4233 Level 20 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.7

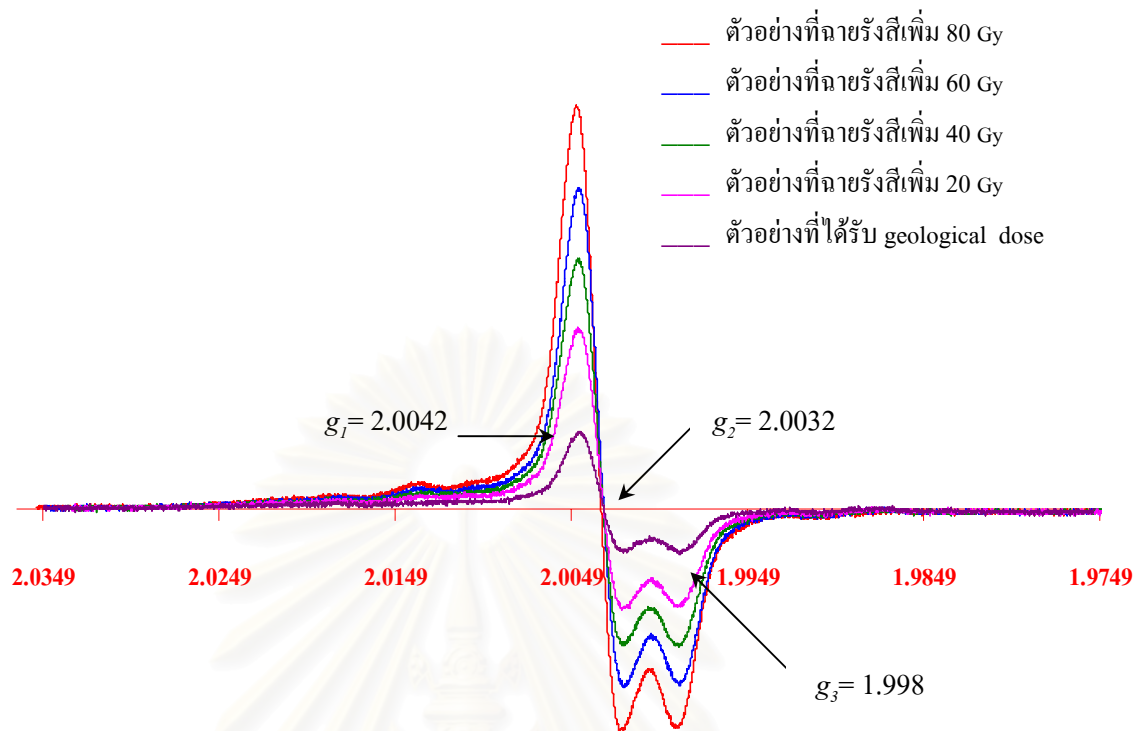


รูปที่ 4.7 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151/A4233 Level 20

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{\parallel}) = 2.0047$, $g_2 (g_{center}) = 2.0036$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.9991$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.6 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 1

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.8

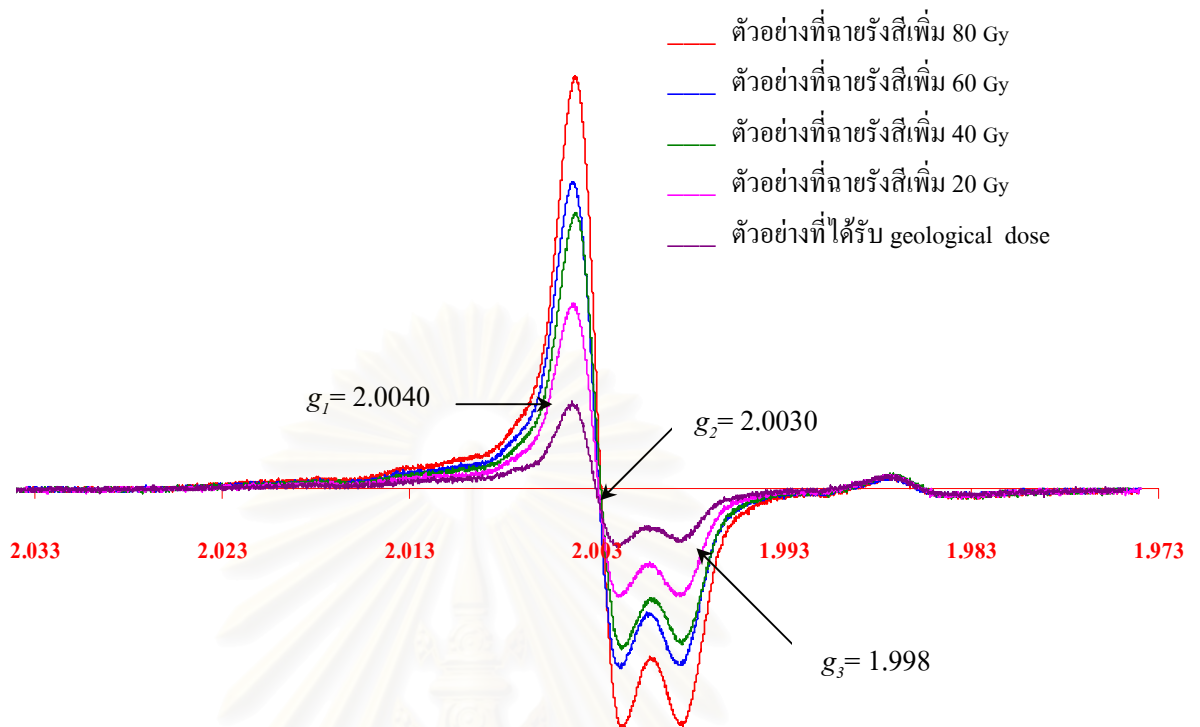


รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0042$, $g_2 (g_{center}) = 2.0032$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.998$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.7 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส #1163/A3671 Level 20 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.9

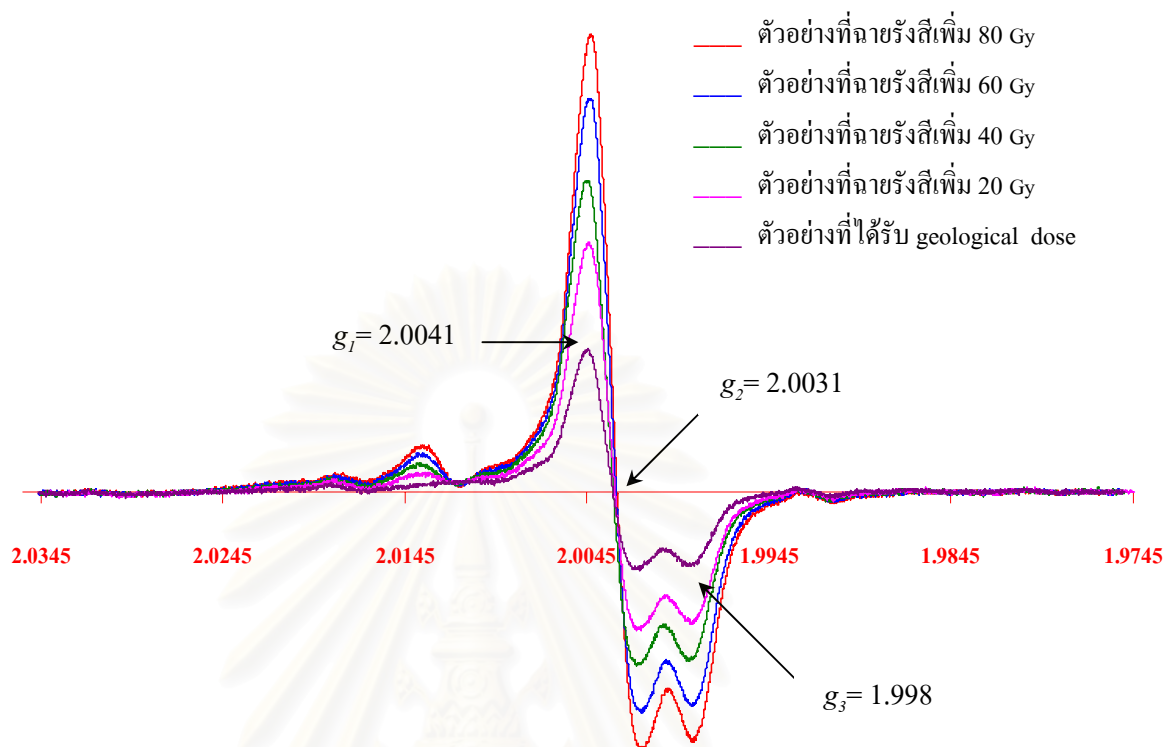


รูปที่ 4.9 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{\parallel}) = 2.0040$, $g_2 (g_{center}) = 2.0030$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.998$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $\text{CO}_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

4.7.1.8 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26 MHS'45 A.I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส #1453 Level 26 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $\text{CO}_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0041$, $g_2 (g_{center}) = 2.0031$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.998$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26]

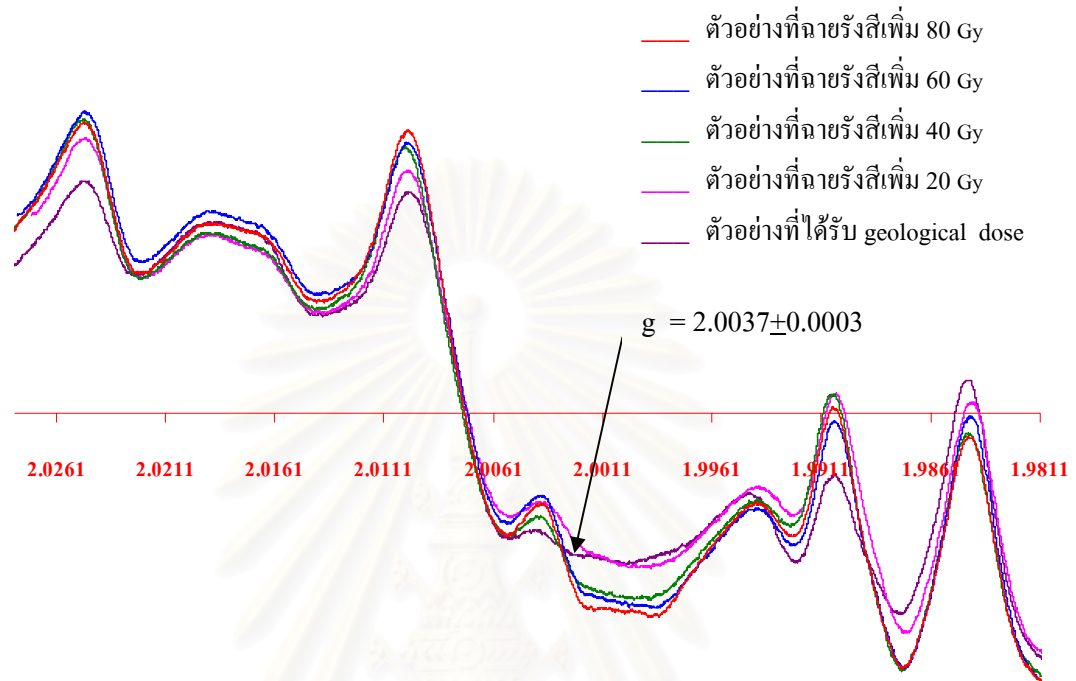
4.7.2 ผลการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเปลือกหอยโบราณ

ตัวอย่างเปลือกหอยโบราณสายพันธุ์ *Nodularia scobinata (Carditidae)* ที่ผ่านการเตรียมตัวอย่างแล้วเพื่อวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึก Aragonite มีทั้งหมด 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.7.2.1 เปลือกหอยรหัส # 1583-1 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-1 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $SO_3^{\cdot -}$ ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า

g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.11

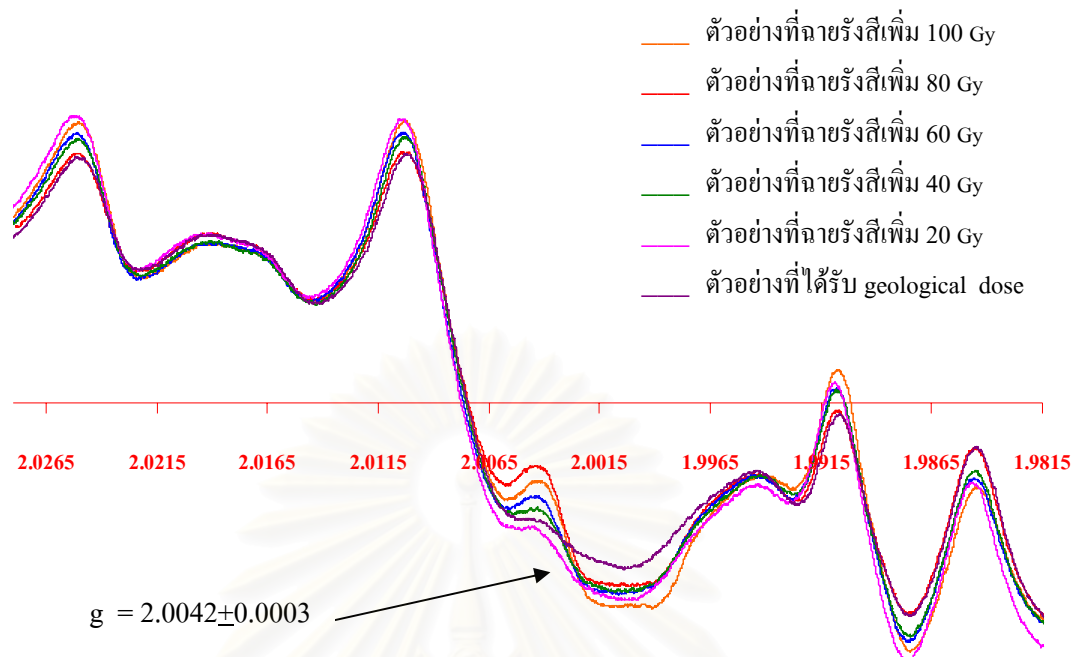


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-1 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0037 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.2 เปลือกหอยรหัส # 1583-2 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-2 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.12

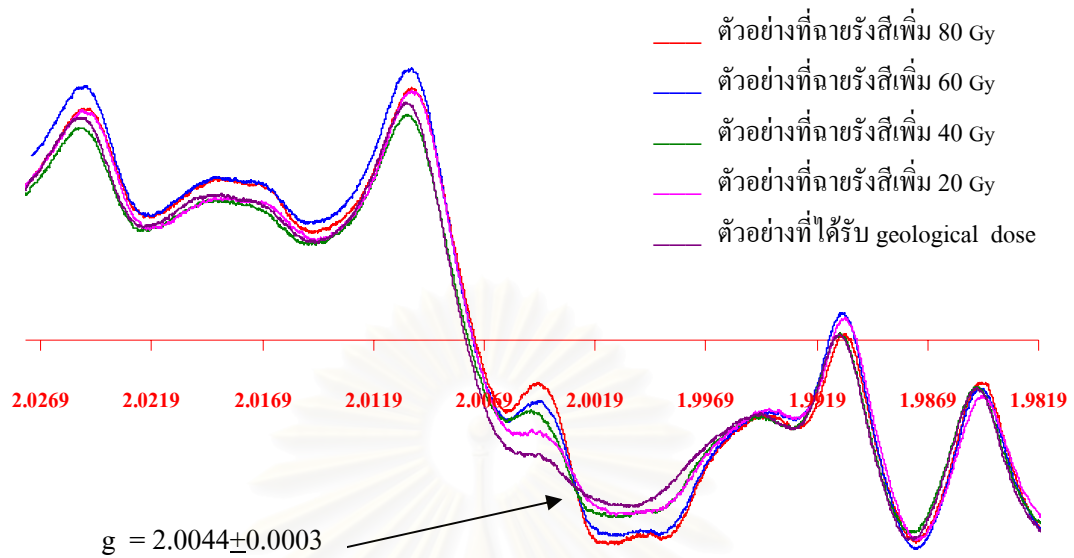


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ *Nodularia scobinata (Carditidae)* รหัส # 1583-2 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0042 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.3 เปลือกหอยรหัส # 1583-3 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-3 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; *et.al*) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.13

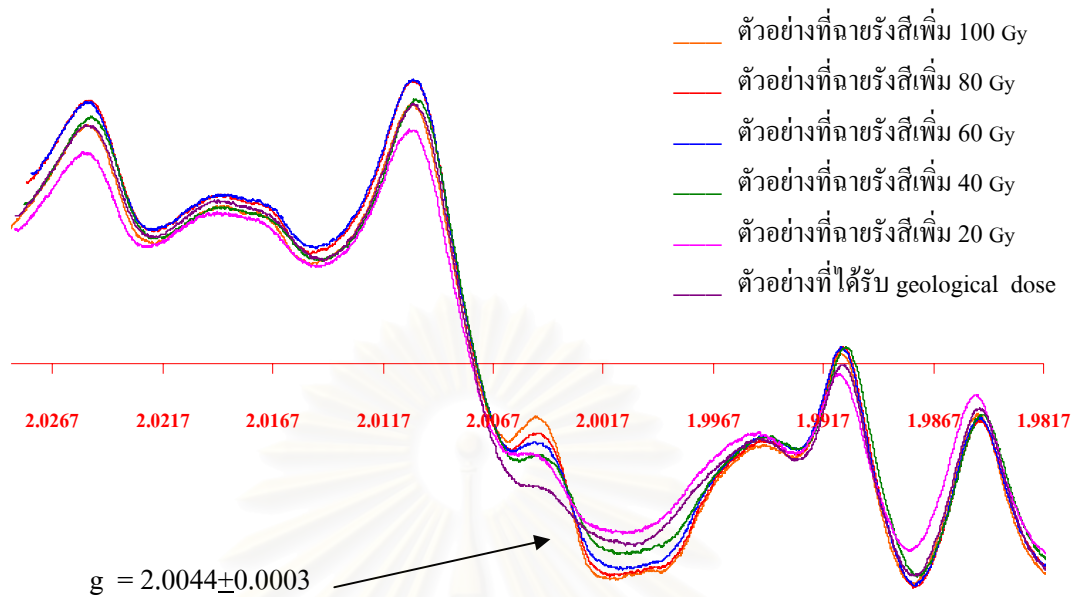


รูปที่ 4.13 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-3 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0044 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.4 เปลือกหอยรหัส # 1583-4 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-4 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.14



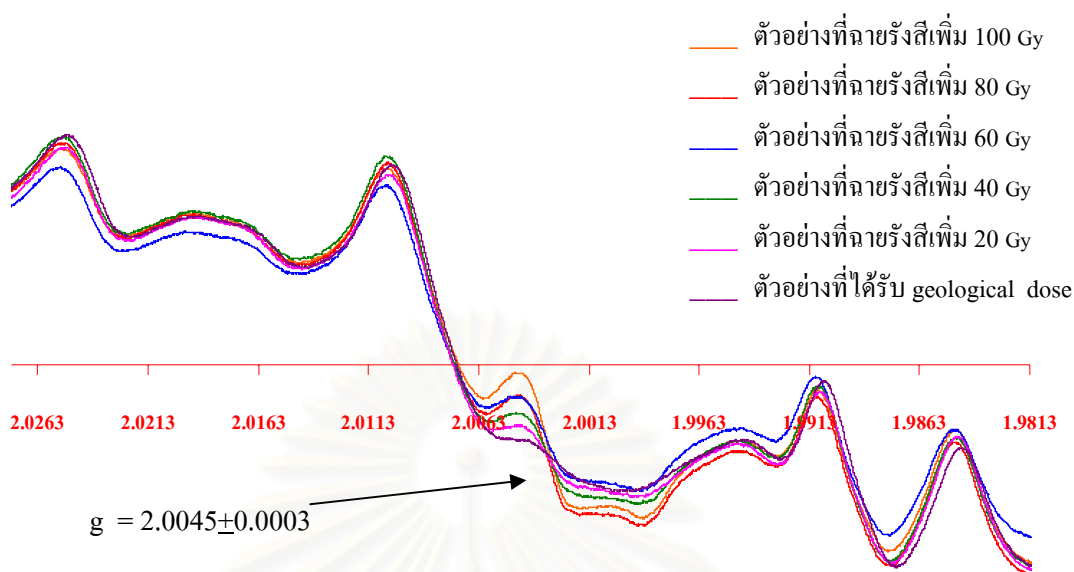
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-4 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0044 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.5 เปลือกหอยรหัส # 1583-5 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-5 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; *et.al*) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

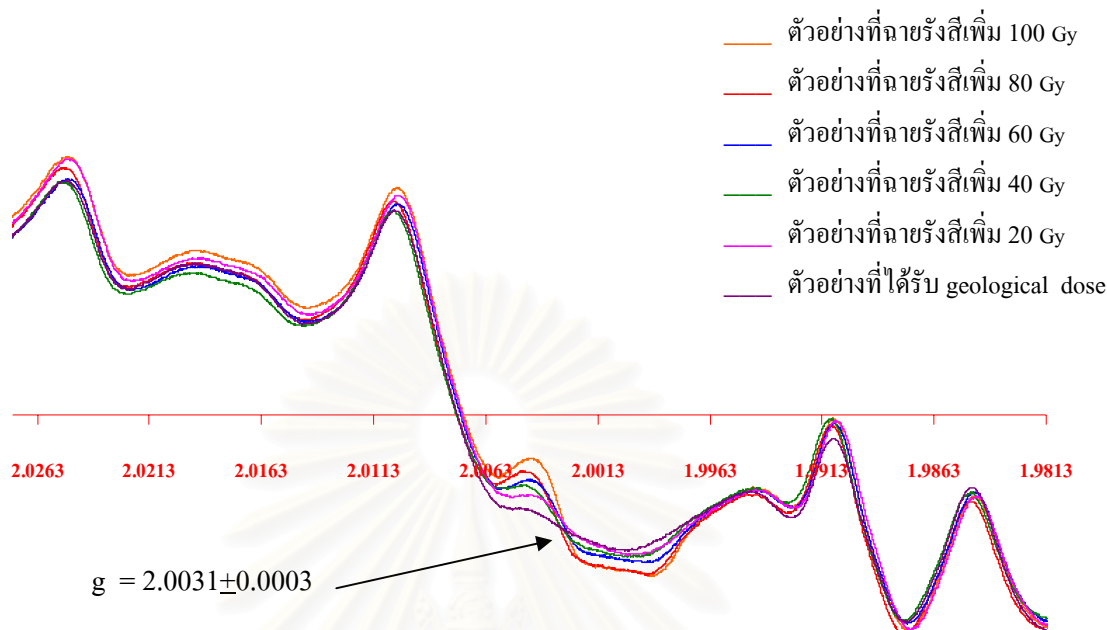


รูปที่ 4.15 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-5 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0045 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.6 เปลือกหอยรหัส # 1583-6 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-6 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.16

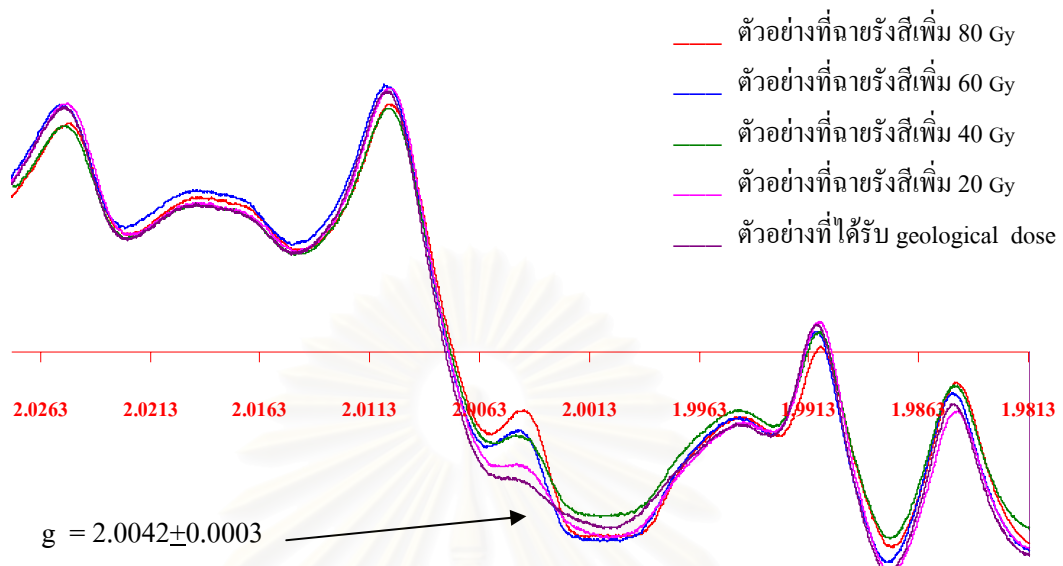


รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-6 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0031 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.7 เปลือกหอยรหัส # 1583-7 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-7 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.17

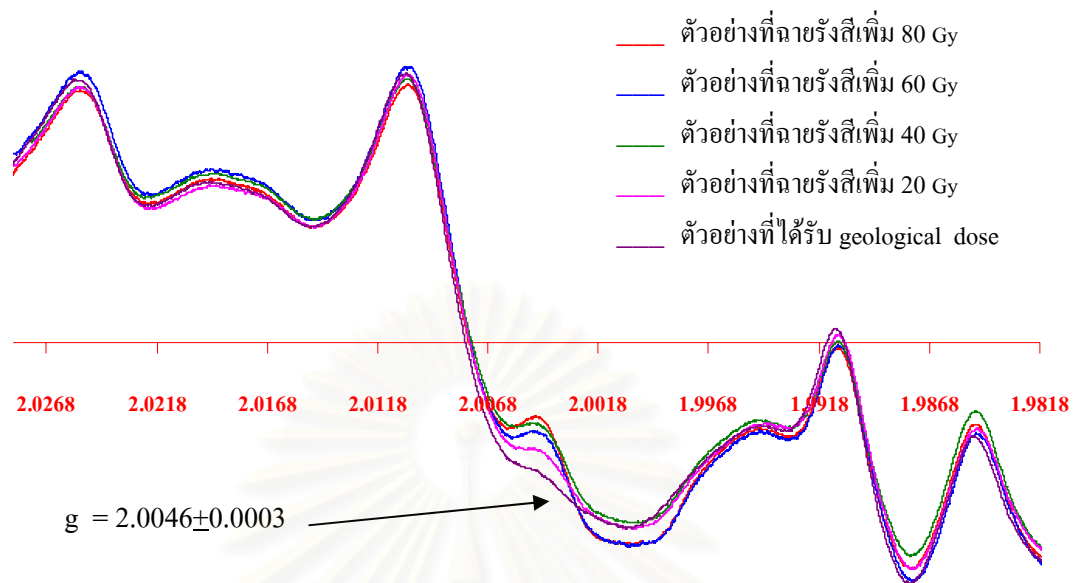


รูปที่ 4.17 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธ์ *Nodularia scobinata (Carditidae)* รหัส # 1583-7 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0042 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.7.2.8 เปลือกหอยรหัส # 1583-8 Level 29 MHS'45 A. I S23W10

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-8 Level 29 เกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^- ซึ่งอ้างอิงจาก (Barabus, 1991; Goede and Hitchman, 1987; et.al) ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (*Carditidae*) รหัส # 1583-8 Level 29

จากการวิเคราะห์ ESR สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g (g_{center}) = 2.0046 \pm 0.0003$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ SO_3^-

4.8 ผลการหาปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) โดยวิธี Additive dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

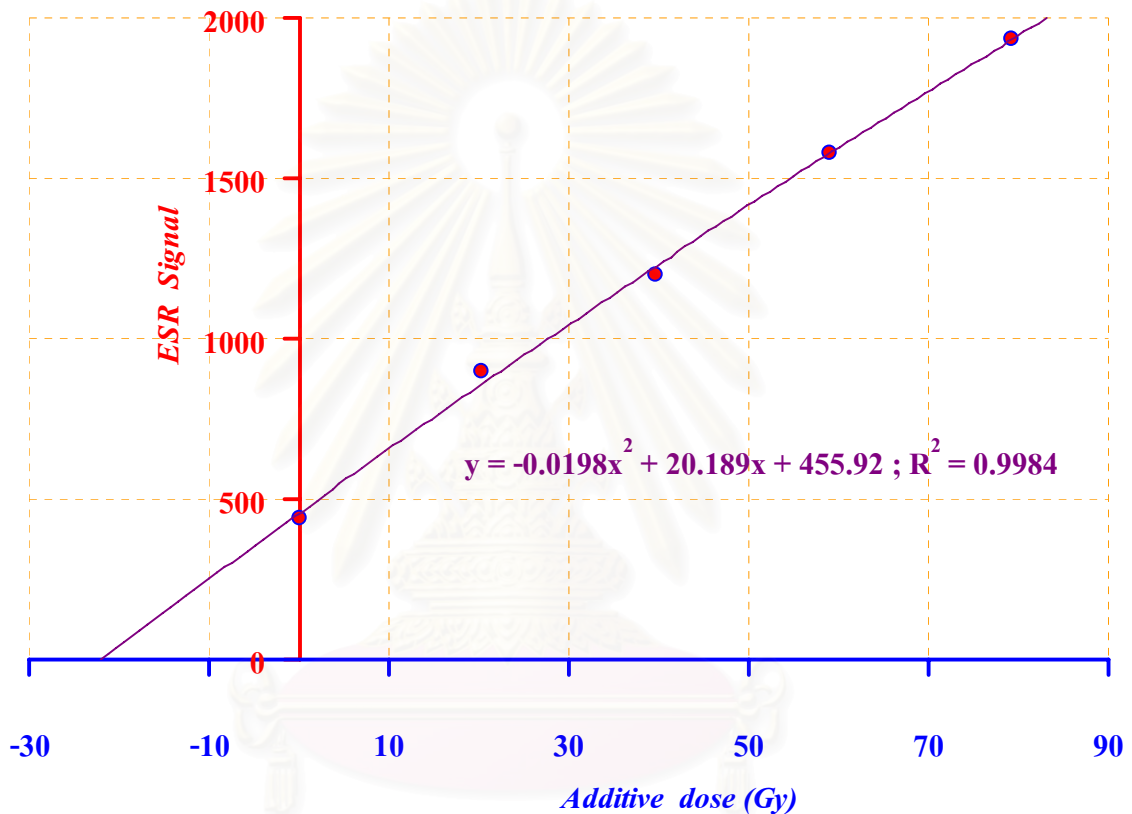
เมื่อทำการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณแล้วจะนำเอา ความสูงของพีค (Peak High) ของพีคที่ได้ ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของ derivative curve ซึ่งจะทำให้การวัดความสูงตั้งแต่ตำแหน่งที่ g_1 ถึง g_2 หรือ g_3 (ในกรณีที่ค่าความสูงของพีค ณ ตำแหน่ง g_3 น้อยกว่า g_2 ก็จะทำให้การวัดถึงแค่ตำแหน่ง g_2 ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.8.1 ผลการหาปริมาณ (TD) โดยวิธี Additive dose โครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์

ตัวอย่างฟันสัตว์ที่แยกเคลือบฟันและวัดสัญญาณ Electron Trap แล้วสามารถหาปริมาณ (TD) โดยวิธี Additive dose ทั้ง 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.8.1.1 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose

ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 919 /A3096 Level 19

จากความสัมพันธ์ของกราฟ เมื่อพิจารณาค่าในแกน x ค่าทางซ้ายมือนับจาก 0 Gy จนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดแกน x ณ จุดใดๆ จะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณที่ตัวอย่างได้รับปริมาณรังสีสะสมตั้งแต่เริ่มแรก (Total dose of natural radiation (*TD*)) ซึ่งสามารถแทนค่าในสมการ polynomial extrapolation โดยให้ค่า $y=0$ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = } \mathbf{22.103} \quad \text{Gy}$$

และจากตารางที่ 4.3 และ 4.6 สามารถคำนวณค่า **Annual dose** รวมได้ ซึ่งนำค่า Internal dose rate ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.12 และได้รายงานผลตามตารางที่ 4.6 นำมาบวกกับค่า External dose rate ตาม Level ที่ได้ระบุไว้ โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และได้รายงานผลตามตารางที่ 4.3 ซึ่งจะได้ว่า

ค่า Internal Annual dose	=	0.127	mGy
ค่า External Annual dose	=	0.69	mGy
รวม	=	0.817	mGy
หรือ	=	0.000817	Gy
และคำนวณค่าอายุตามสมการ 2.2 จะได้ค่าอายุ=		27,058	ปี
ซึ่งสามารถประมาณค่าอายุได้	=	27,000	ปี

และทำการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง ซึ่งอันดับแรกทำการคำนวณความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการคำนวณความสูงของพีคหรือปริมาณสัญญาณ (Numerical treatment of spectra) (σ_{TREAT}) ซึ่งการวัดปริมาณสัญญาณ (I_{ESR-i}) ได้ 3 ซ้ำ และนำมาหาค่า Experimental Standard Deviation (s) และนำผลที่ได้มาคำนวณค่า σ_{TREAT} ต่อจะได้ว่า

Experimental Standard Deviation (s)	=	0.4394
ค่า σ_{TREAT}	=	0.2537

จากนั้นนำค่า σ_{TREAT} ที่ได้มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่างรวม ($\sigma_{ESRDOSE}$) ตามสมการ 2.16 โดยนำผลของปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) ที่คำนวณได้มาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนอื่นๆ ในหัวข้อ 2.9 โดยเทียบตามจำนวนเปอร์เซ็นต์ที่ระบุไว้ จะได้ว่า

ค่า $\sigma_{ESRDOSE}$	=	3.475	Gy
------------------------	---	--------------	----

ดังนั้น

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)	=	22.103 ± 3.475	Gy
---	---	-----------------------	----

และนำค่า $\sigma_{ESRDOSE}$ ที่ได้มาคำนวณช่วงค่าอายุที่คลาดเคลื่อนได้ตามสมการ 2.2 จะได้ช่วงค่าอายุที่คลาดเคลื่อน

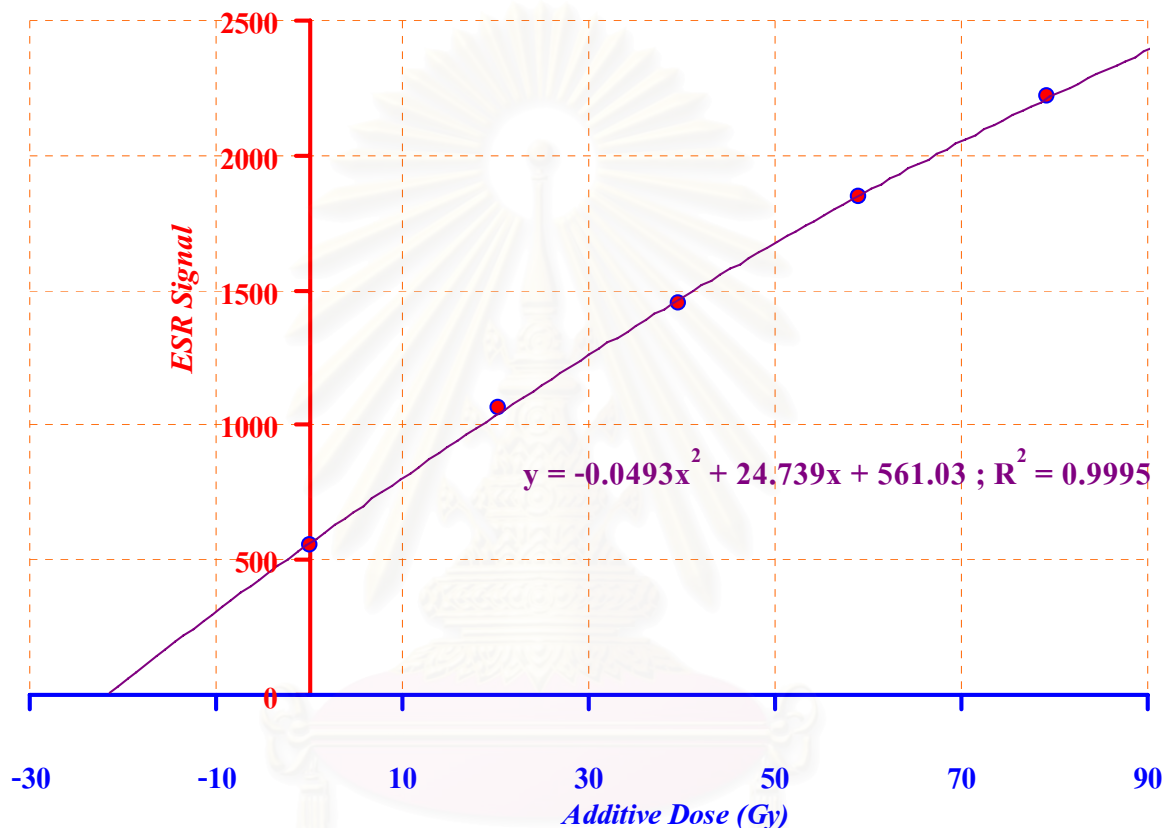
	=	4288	ปี
หรือประมาณ	=	4200	ปี

ดังนั้น

ค่าอายุ	=	27,000 ± 4,200	ปี
---------	---	-----------------------	----

4.8.1.2 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1125 /A3120 Level 19

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 21.7364 \pm 3.409 \text{ Gy}$$

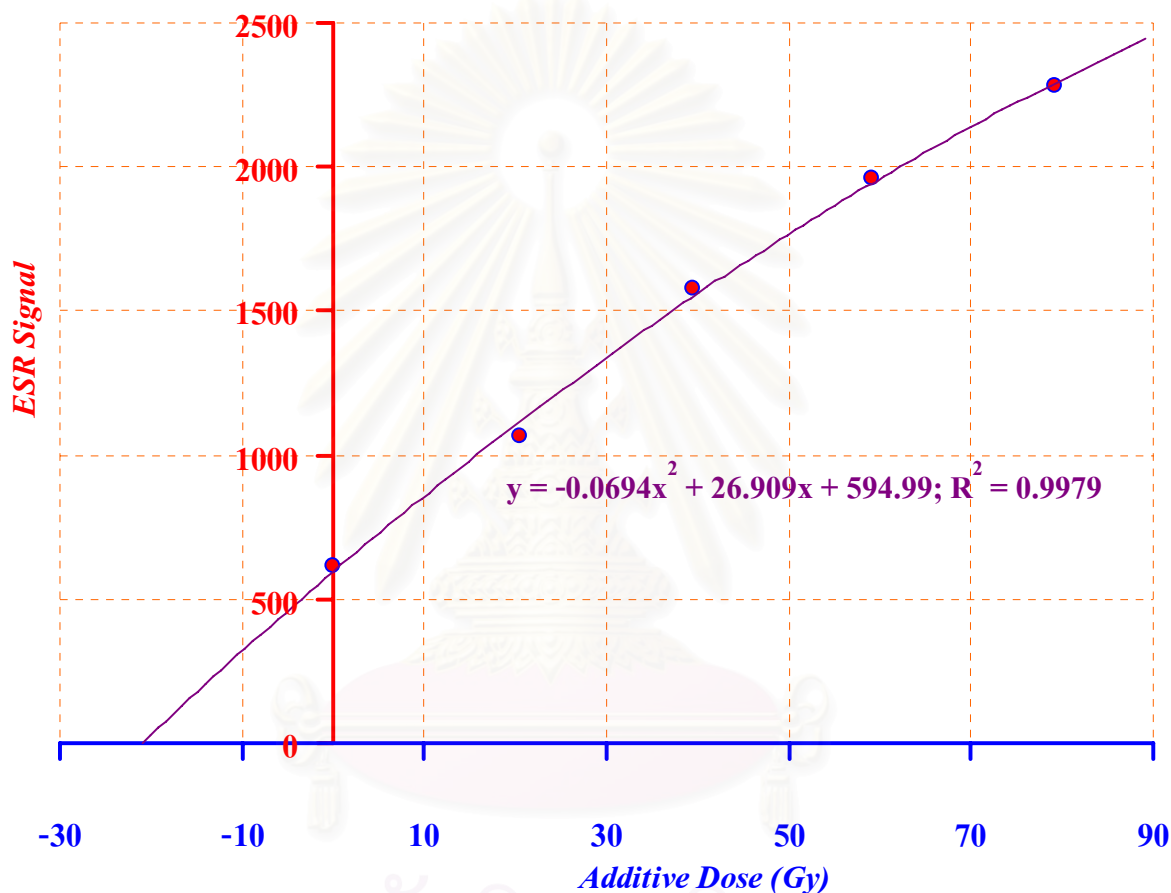
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000796 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 27,300 \pm 4,280 \text{ ปี}$$

4.8.1.3 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1695 /A3110 Level 19

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 20.9764 \pm 3.288 \text{ Gy}$$

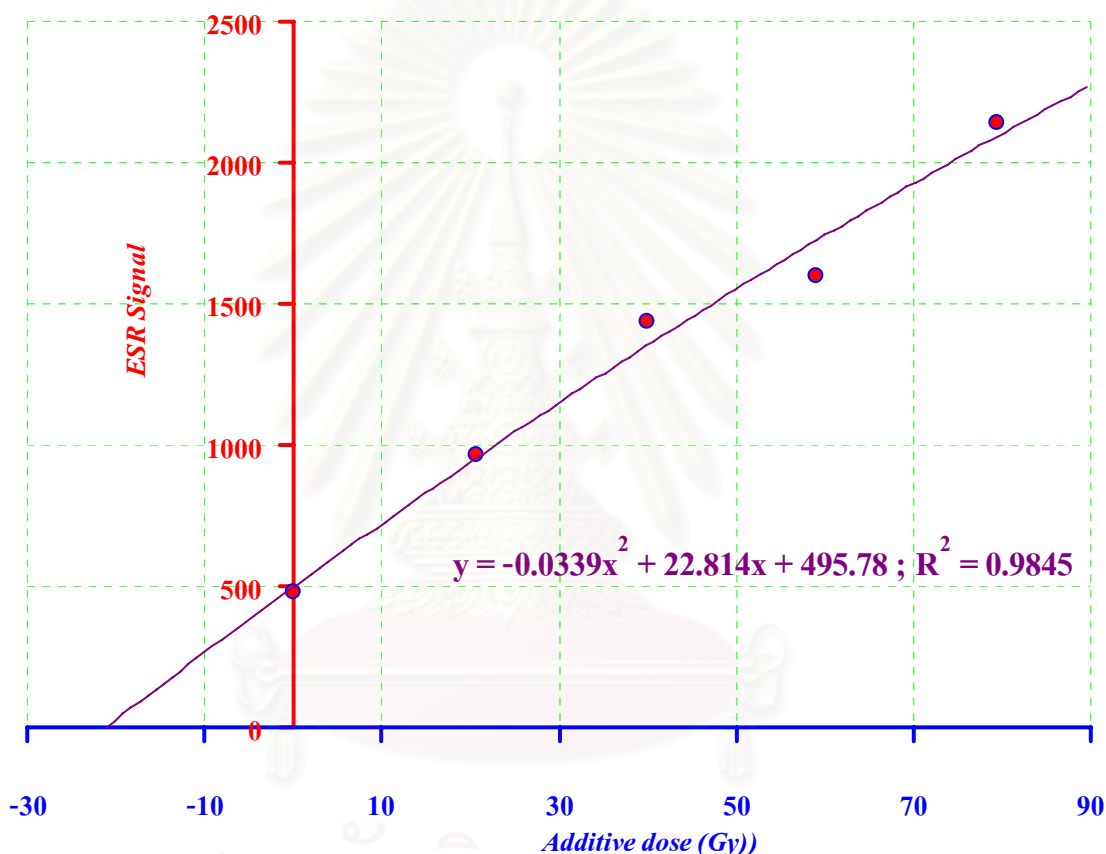
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000829 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 25,200 \pm 3,900 \text{ ปี}$$

4.8.1.4 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1163 /A3671 Level 20

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 21.0716 \pm 3.283 \text{ Gy}$$

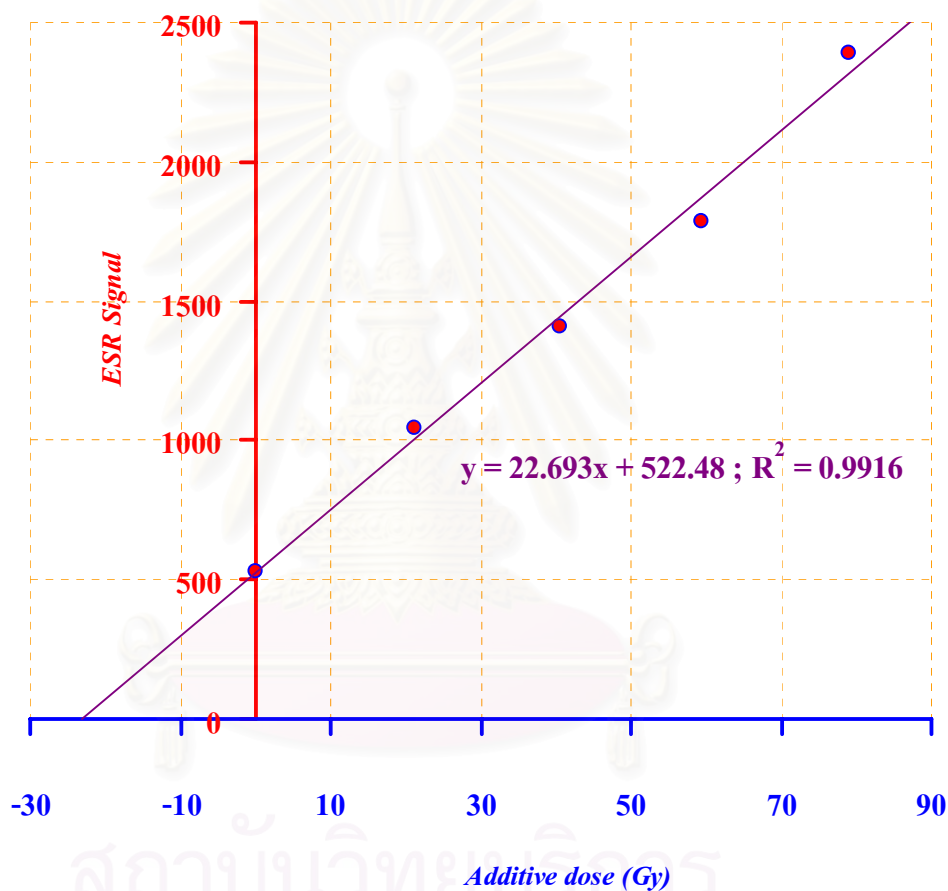
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000956 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 22,000 \pm 3,400 \text{ ปี}$$

4.8.1.5 เคลือบฟันสัตว์รหัส #1151-1/A4234 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 3

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151-1/A4234 Level 20 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151-1/A4234 Level 20

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 23.0238 \pm 3.648 \text{ Gy}$$

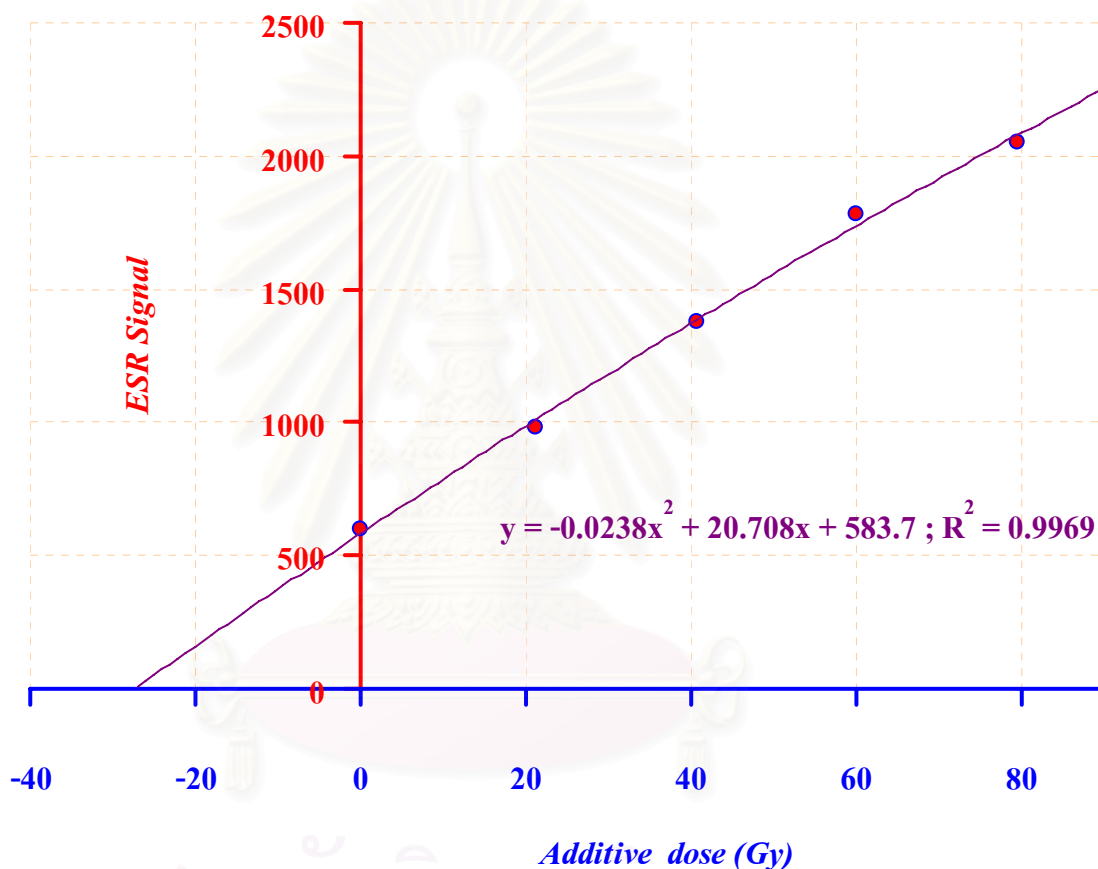
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000895 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 25,700 \pm 4,000 \text{ ปี}$$

4.8.1.6 เคลือบฟันสัตว์รหัส #1151-2/A4233 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NWQ 1

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151-2/A4233 Level 20 เมื่อนำค่าความสูงของพีก (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1151-2/A4233 Level 20

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 27.3288 \pm 4.648 \text{ Gy}$$

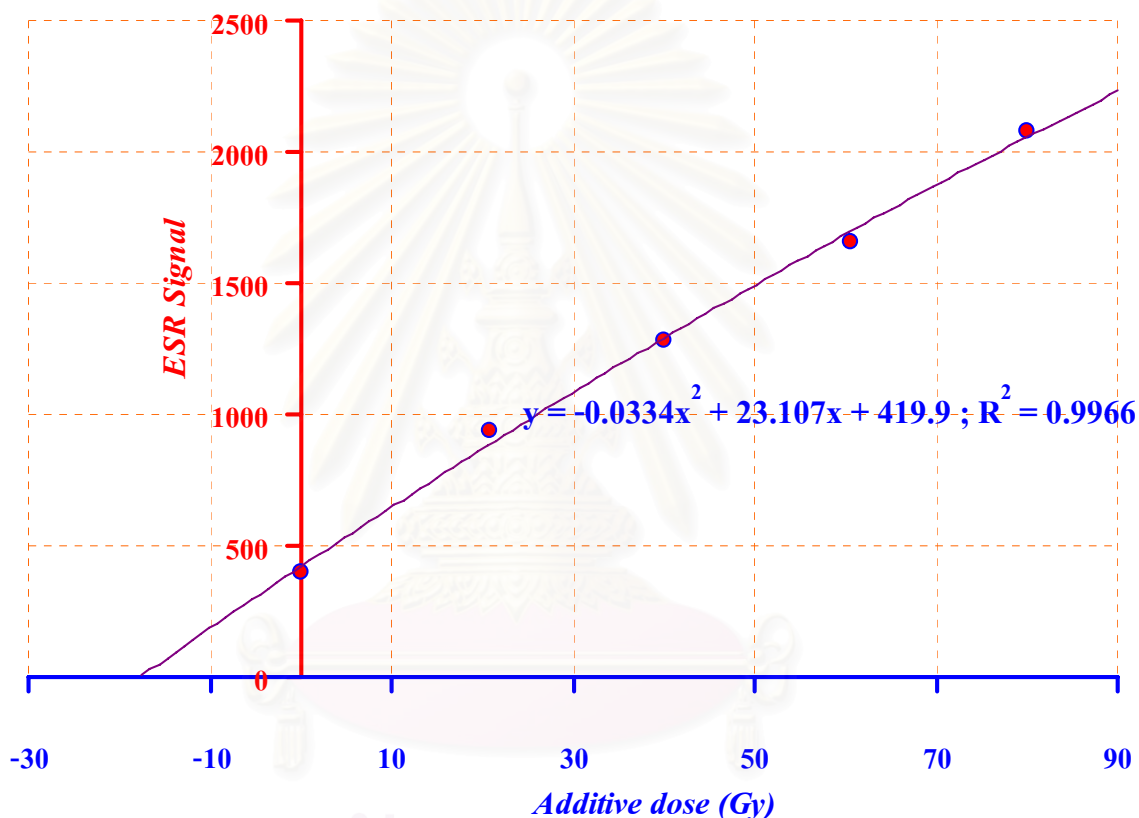
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000822 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 33,200 \pm 5,600 \text{ ปี}$$

4.8.1.7 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 1

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 981-1 Level 20

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 17.7182 \pm 2.695 \text{ Gy}$$

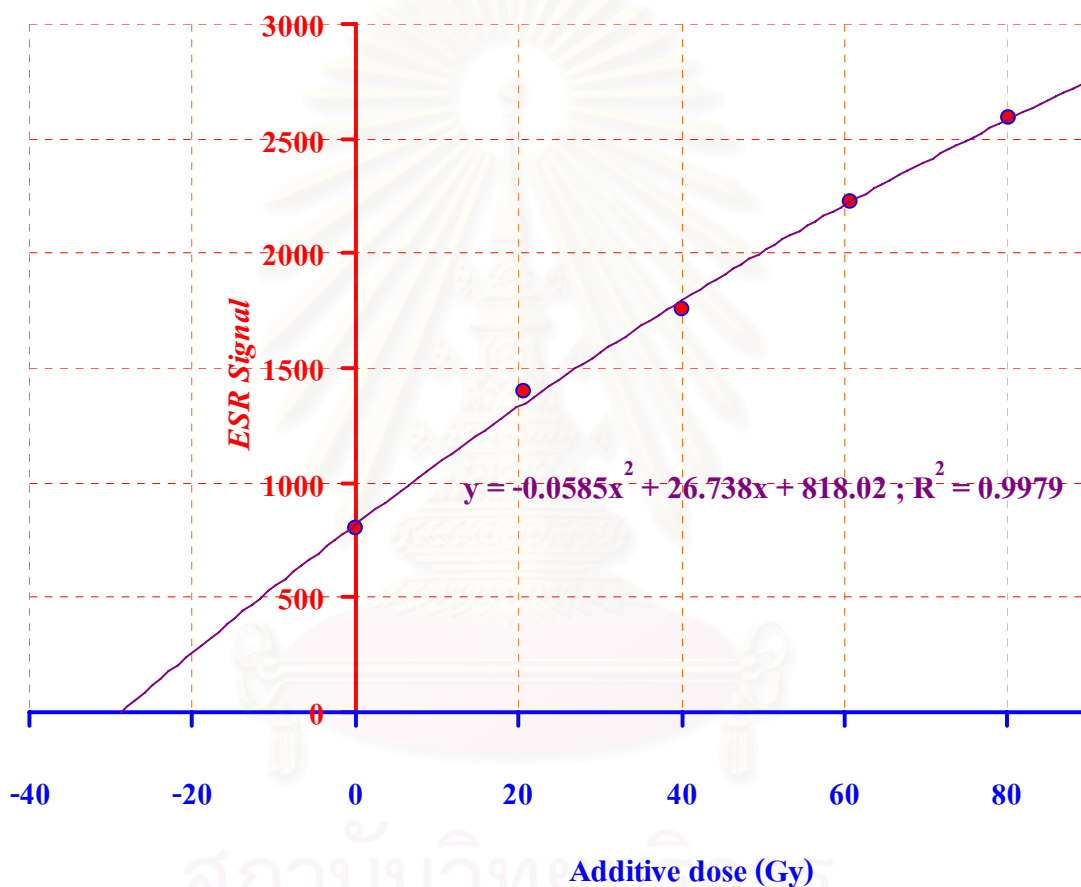
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000945 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 18,700 \pm 2,800 \text{ ปี}$$

4.8.1.8 เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เคลือบฟันได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เคลือบฟันสัตว์รหัส # 1453 Level 26

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 28.7815 \pm 4.793 \text{ Gy}$$

$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000948 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.1.1 จะได้ว่า

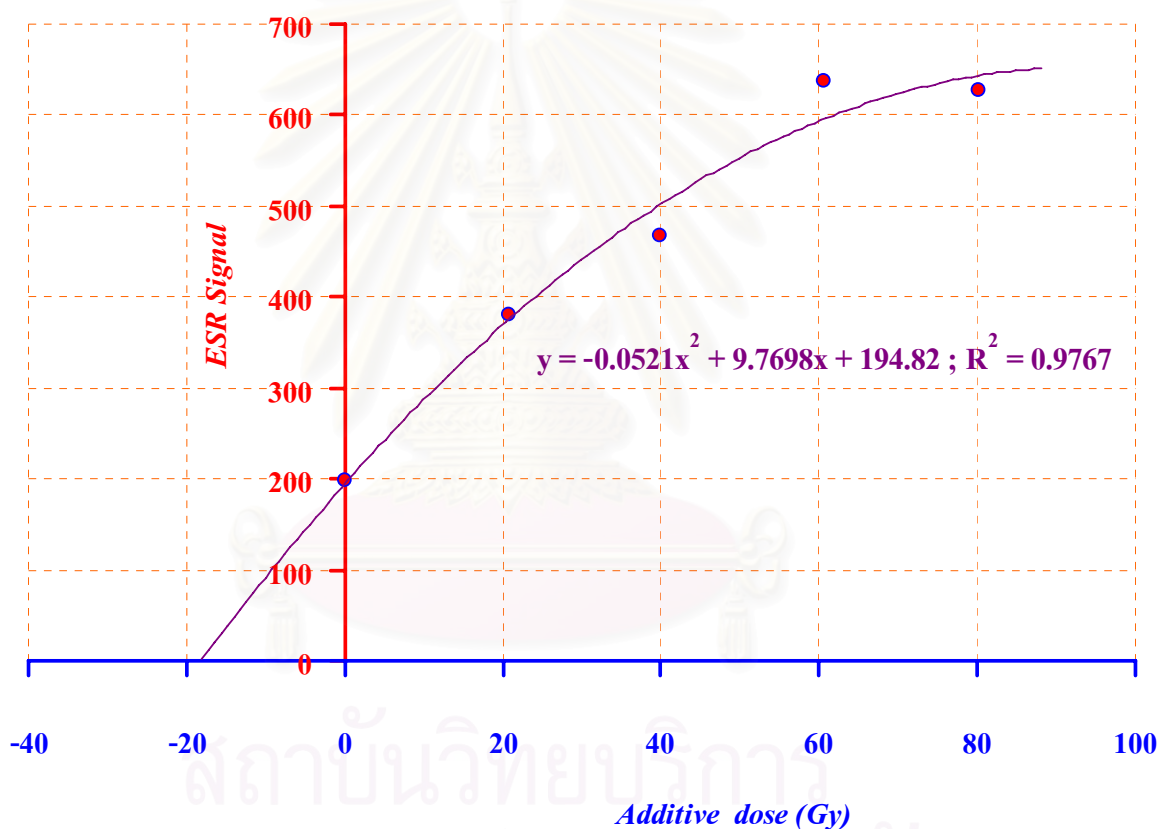
$$\text{ค่าอายุ} = 30,300 \pm 5,000 \text{ ปี}$$

4.8.2 ผลการหาปริมาณ (TD) โดยวิธี Additive dose โครงสร้างผลึกของเปลือกหอยโบราณ

ตัวอย่างเปลือกหอยที่ขจัดผิวหน้าออกและวัดสัญญาณ Electron Trapped แล้วสามารถหาปริมาณ (TD) โดยวิธี Additive dose ทั้ง 8 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.8.2.1 เปลือกหอยรหัส # 1583-1 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-1 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose

ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-1 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ เมื่อพิจารณาค่าในแกน x ค่าทางซ้ายมือ นับจาก 0 Gy จนถึงจุดที่เส้นกราฟตัดแกน x ณ จุดใดๆ จะเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณที่ตัวอย่างได้รับปริมาณรังสีสะสมตั้งแต่เริ่มแรก (Total dose of natural radiation (TD)) ซึ่งสามารถแทนค่าในสมการ polynomial extrapolation โดยให้ค่า $y = 0$ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = **18.1787** Gy

และจากตารางที่ 4.3 และ 4.7 สามารถคำนวณค่า **Annual dose** รวมได้ ซึ่งนำค่า Internal dose rate ที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.12 และได้รายงานผลตามตารางที่ 4.7 จำนวน 2 ค่านำมาเฉลี่ย และบวกกับค่า External dose rate ตาม Level ที่ได้ระบุไว้ (Level 29) โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 และได้รายงานผลตามตารางที่ 4.3 ซึ่งจะได้ว่า

ค่า **Internal Annual dose** = **0.00346** mGy

ค่า **External Annual dose** = **0.558** mGy

รวม = **0.561** mGy

หรือ = **0.000561** Gy

และจะใช้ค่า **Annual dose** รวมนี้ในเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณอายุสำหรับตัวอย่างเปลือกหอยทุกตัว

และคำนวณค่าอายุตามสมการ 2.2 จะได้ค่าอายุ = **32,343** ปี

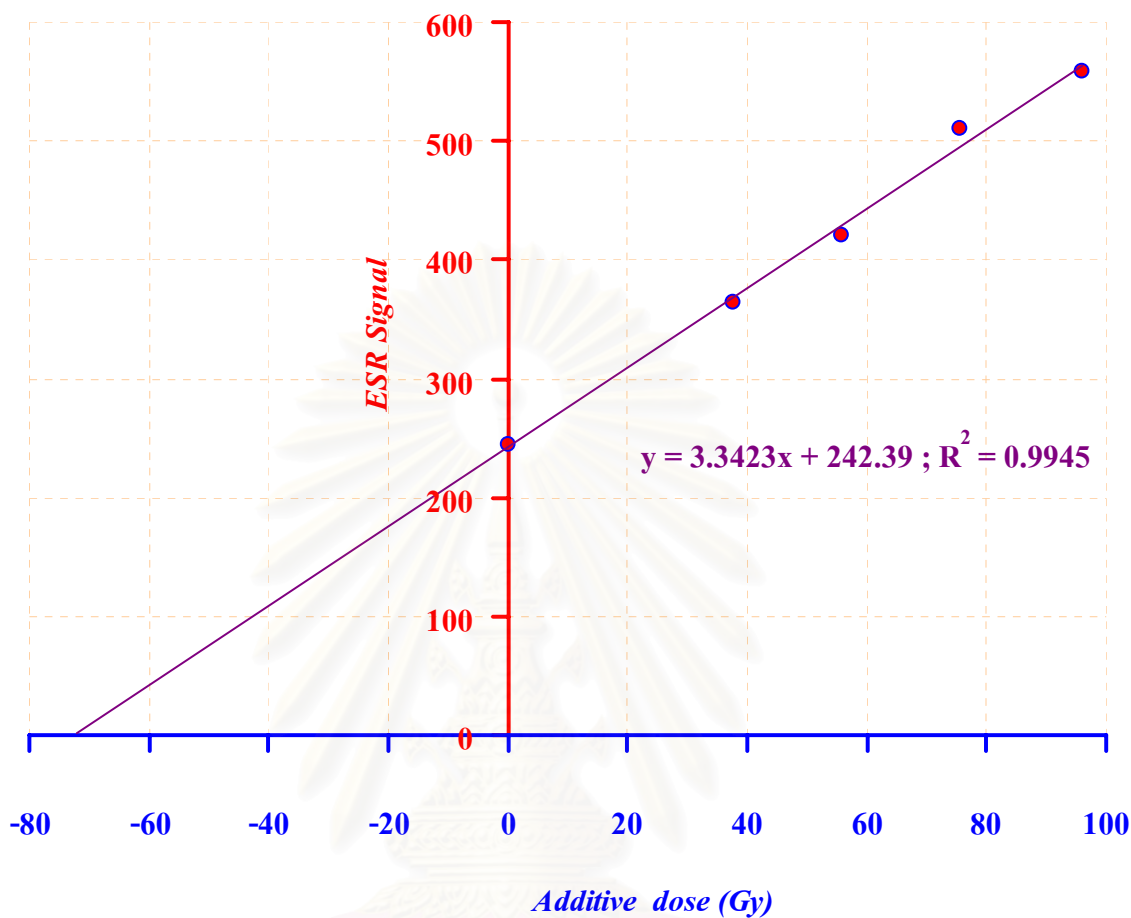
ซึ่งสามารถประมาณค่าอายุได้ = **32,300** ปี

ส่วนการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง ซึ่งอันดับแรกทำการคำนวณความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการคำนวณความสูงของพีคหรือปริมาณสัญญาณ (Numerical treatment of spectra) (σ_{TREAT}) นั้นไม่อาจคำนวณได้ เนื่องจากการวัดปริมาณสัญญาณ (I_{ESR-i}) ได้ครั้งเดียว จึงไม่สามารถประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่างรวม ($\sigma_{ESRDOSE}$) ตามสมการ 2.16 ได้

4.8.2.2 เปลือกหอยรหัส # 1583-2 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-2 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.28

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-2 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = 72.52 Gy

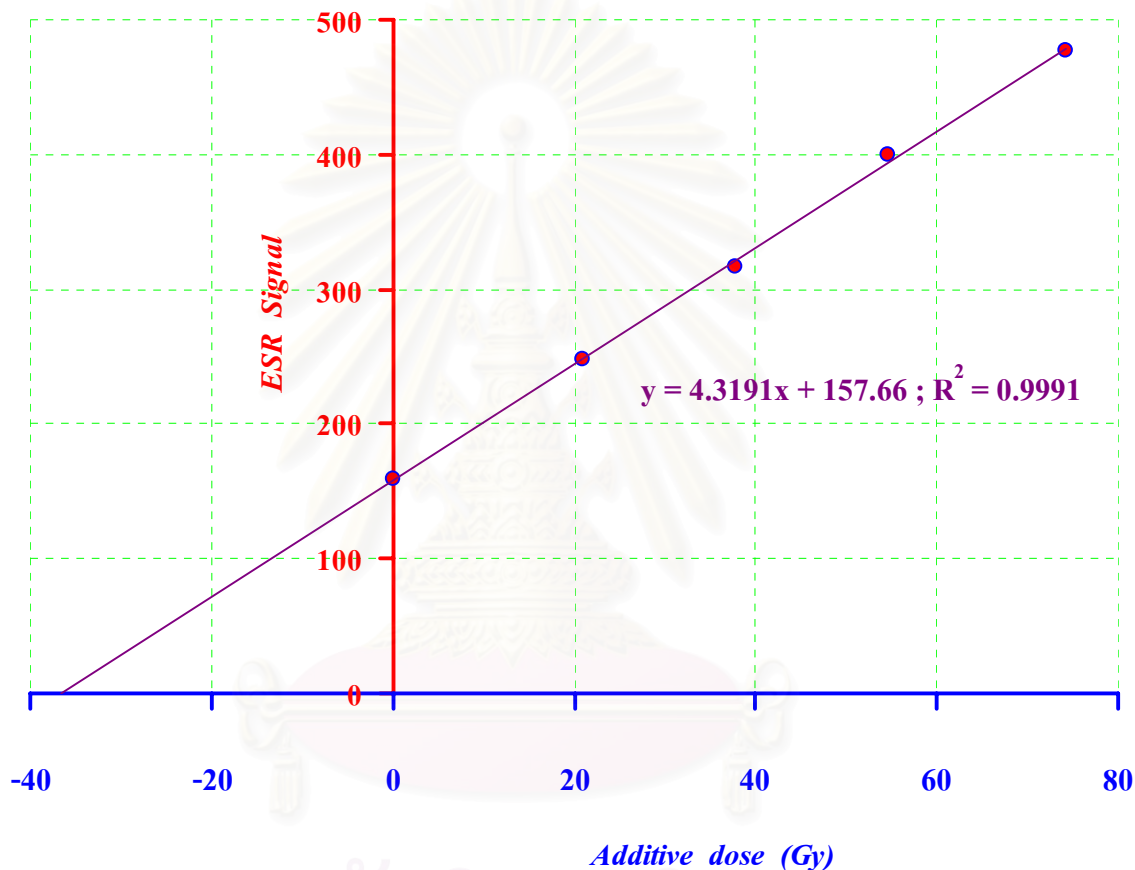
ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

เมื่อคำนวณค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 129,000 ปี

4.8.2.3 เปลือกหอยรหัส # 1583-3 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-3 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peck High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-3 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (*TD*) = 36.503 Gy

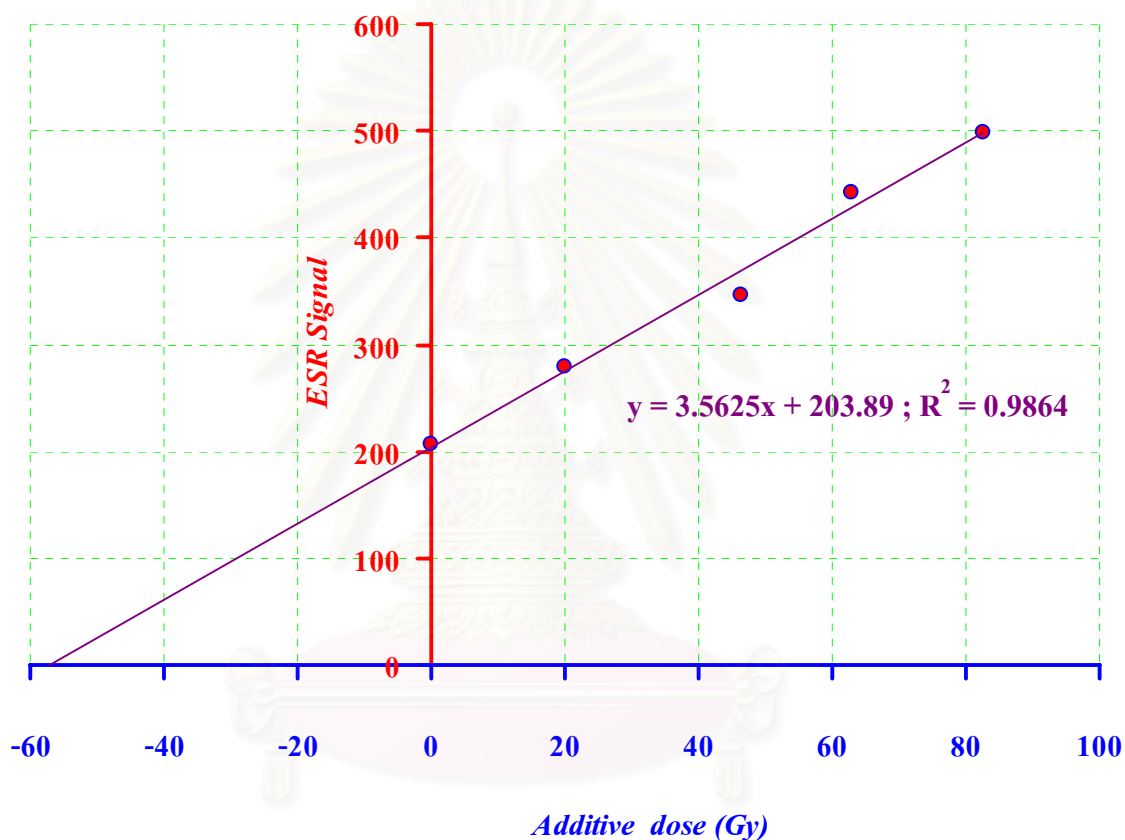
ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 64,900 ปี

4.8.2.4 เปลือกหอยรหัส # 1583-4 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-4 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose

ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-4 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

$$\text{ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD)} = 57.232 \text{ Gy}$$

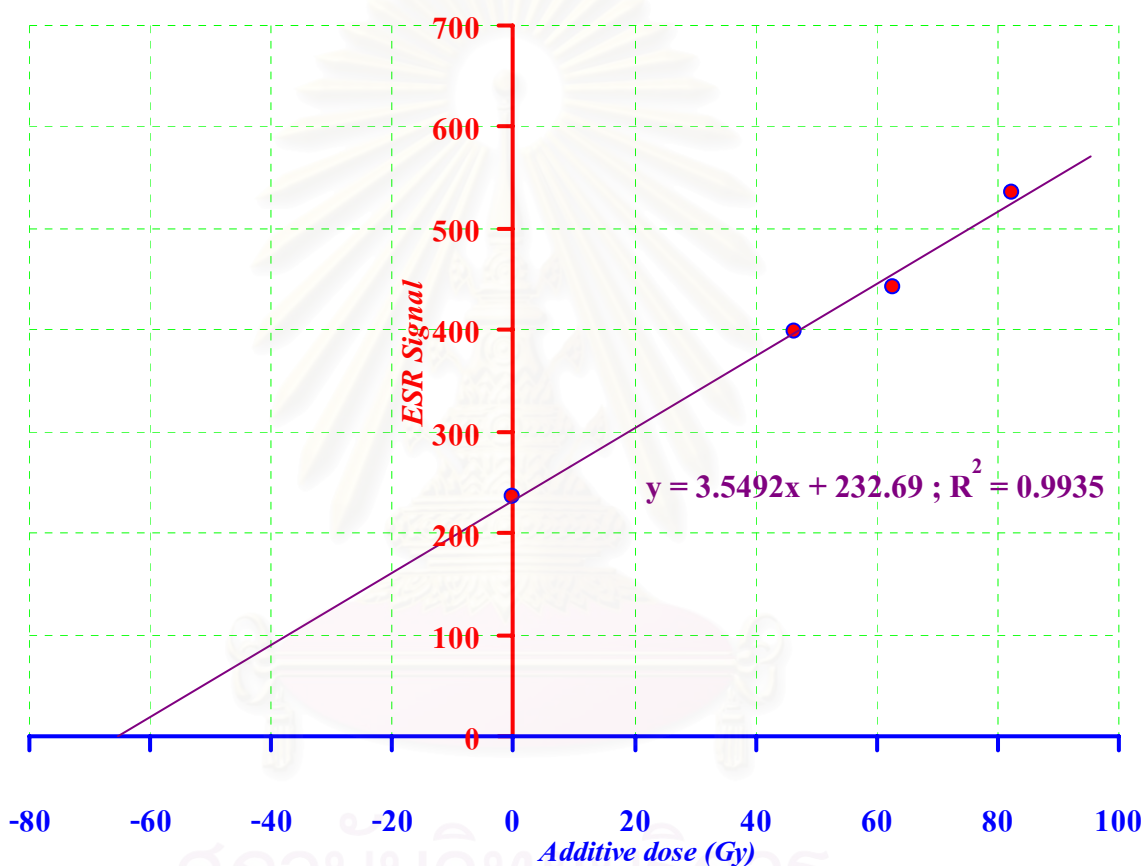
$$\text{ค่า Annual dose (Internal+External)} = 0.000562 \text{ Gy}$$

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

$$\text{ค่าอายุ} = 101,800 \text{ ปี}$$

4.8.2.5 เปลือกหอยรหัส # 1583-5 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-5 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-5 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = 65.56 Gy

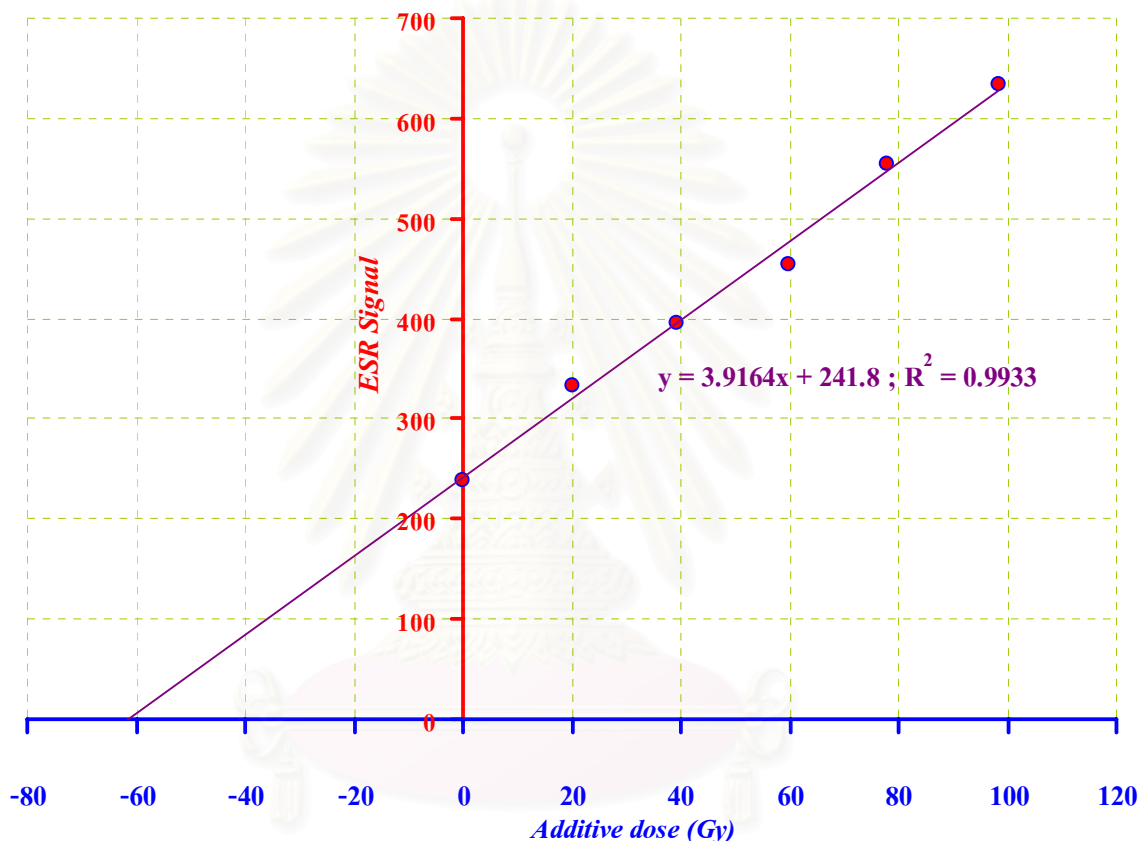
ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 116,600 ปี

4.8.2.6 เปลือกหอยรหัส # 1583-6 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-6 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-6 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = 61.74 Gy

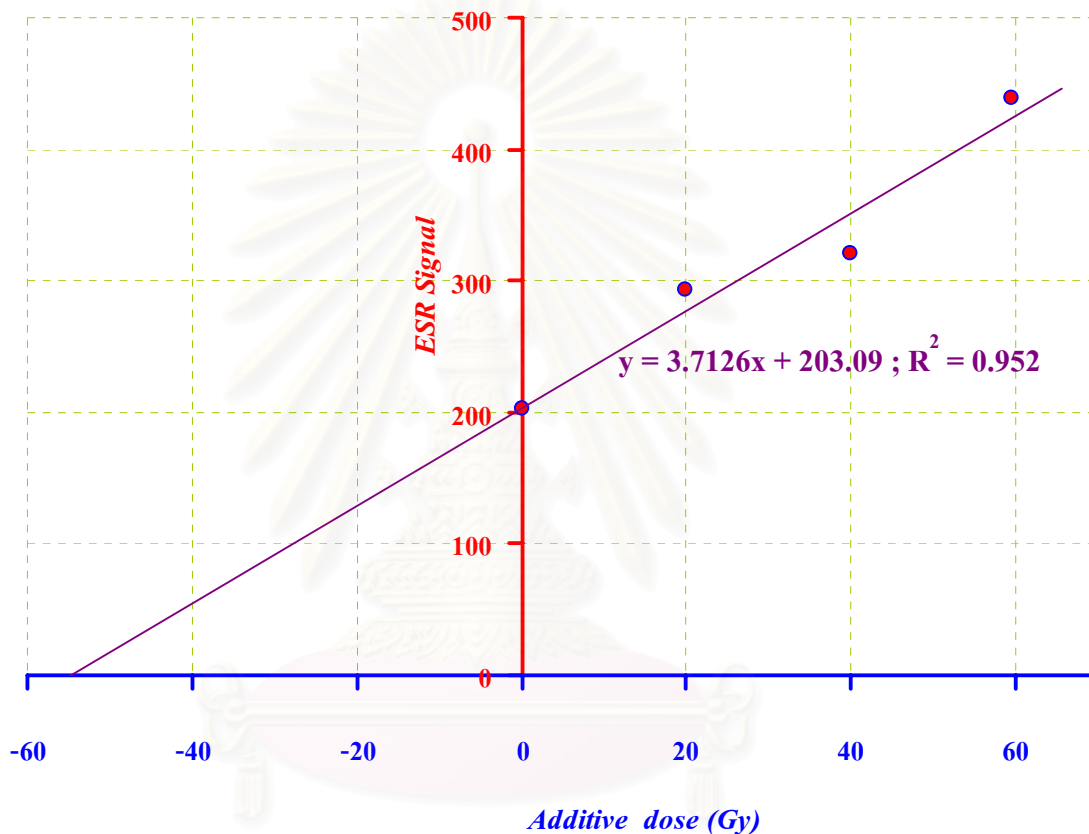
ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 101,900 ปี

4.8.2.7 เปลือกหอยรหัส # 1583-7 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-7 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี linear extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-7 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (*TD*) = 54.70 Gy

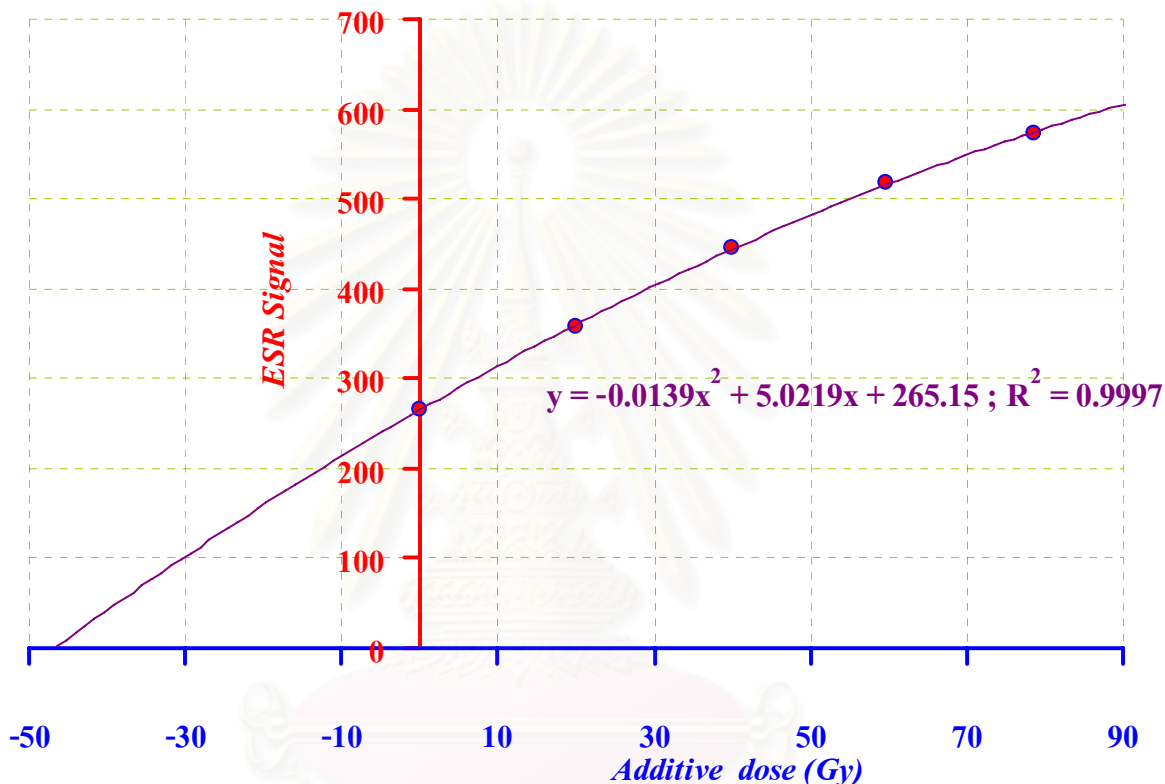
ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 90,300 ปี

4.8.2.8 เปลือกหอยรหัส # 1583-8 Level 29 MHS'45 A. I S23W10 NEQ 4

สำหรับตัวอย่างเปลือกหอยรหัส # 1583-8 Level 29 เมื่อนำค่าความสูงของพีค (Peak High) ที่วัดได้จาก Spectrum derivative curve ของ ESR Spectrometer มาพล็อตกับปริมาณรังสีที่เปลือกหอยได้รับเพิ่มโดยการฉายรังสีแกมมา ได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal กับค่า additive dose ด้วยวิธี polynomial extrapolation ของ เปลือกหอยโบราณรหัส # 1583-8 Level 29

จากความสัมพันธ์ของกราฟ จะได้ว่า

ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) = 46.74 Gy

ค่า Annual dose (Internal+External) = 0.000562 Gy

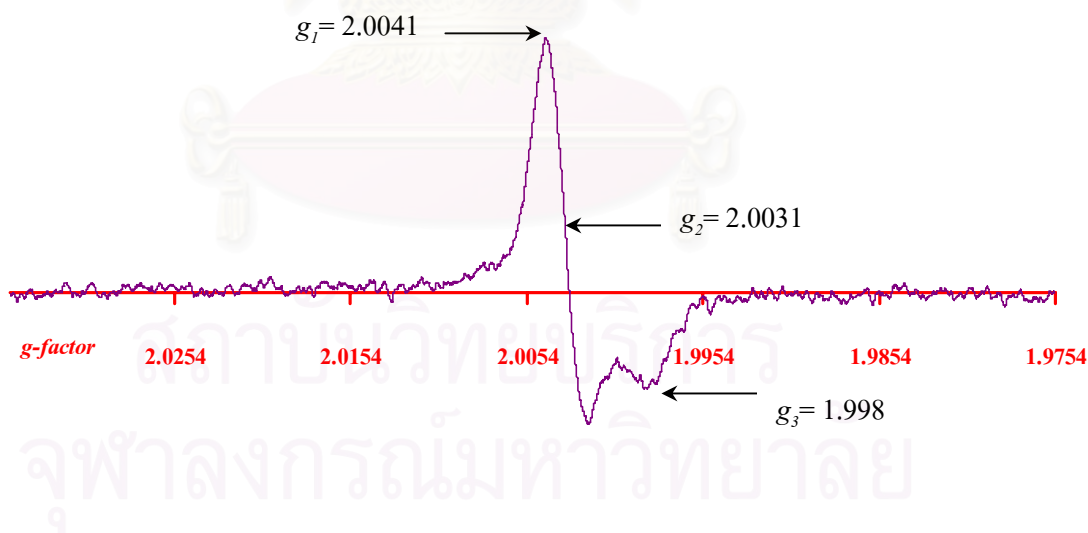
เมื่อกำหนดค่าอายุตามรายละเอียดในหัวข้อ 4.8.2.1 จะได้ว่า

ค่าอายุ = 77,100 ปี

4.9 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

4.9.1 การวิเคราะห์สเปกตรัม ESR ของสารประกอบ Hydroxylapatite มาตรฐานกับสารประกอบ Hydroxylapatite ที่มีอยู่ในเคลือบฟันธรรมชาติ

จากผลการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์จากฟันสัตว์ ทำการเทียบระหว่างสารประกอบ Hydroxylapatite มาตรฐานกับสารประกอบ Hydroxylapatite ที่มีอยู่ในเคลือบฟันธรรมชาติ ซึ่งสารมาตรฐานที่ใช้คือสารมาตรฐาน Hydroxylapatite, High Resolution ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 1004.6 CAS 1306-065 ของบริษัท Merck Germany โดยทำการอบสารมาตรฐาน Hydroxylapatite เพื่อกำจัด free radical ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งจากผลของสเปกตรัมที่ได้พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจากรadical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบจากข้อมูลในตารางที่ 2.1 ดังสเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 4.35

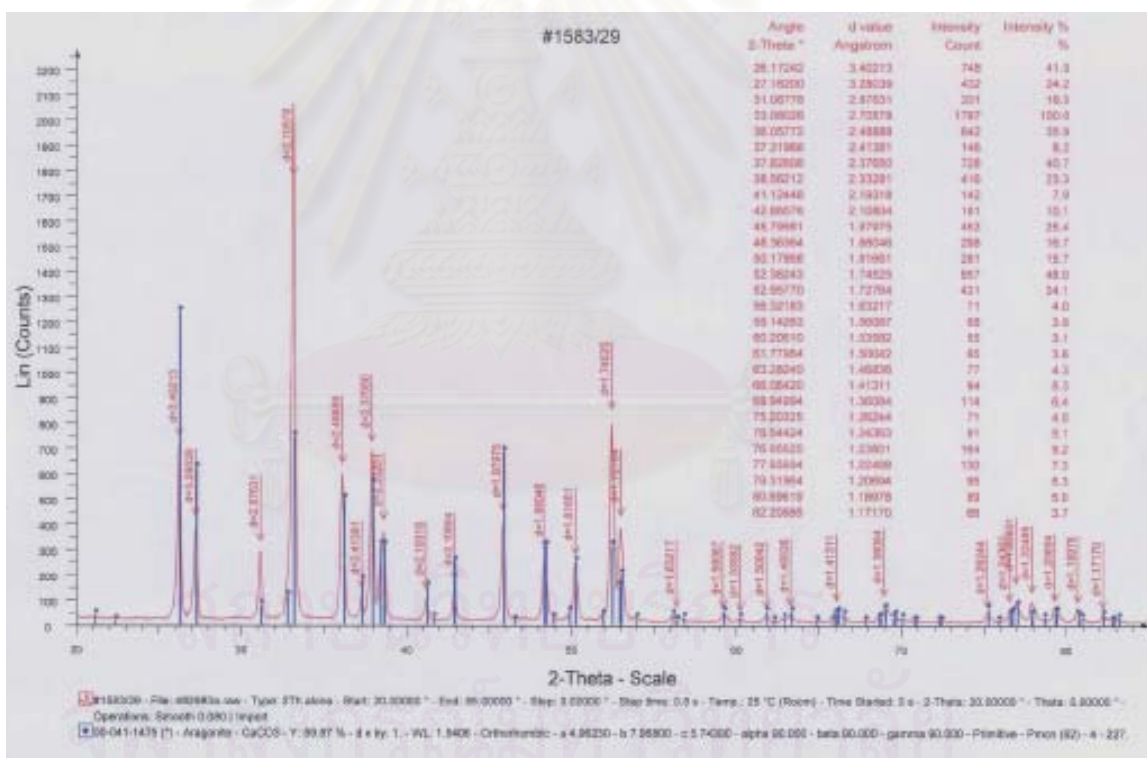


รูปที่ 4.35 สเปกตรัมของ derivative curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของสารมาตรฐาน Hydroxylapatite อบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

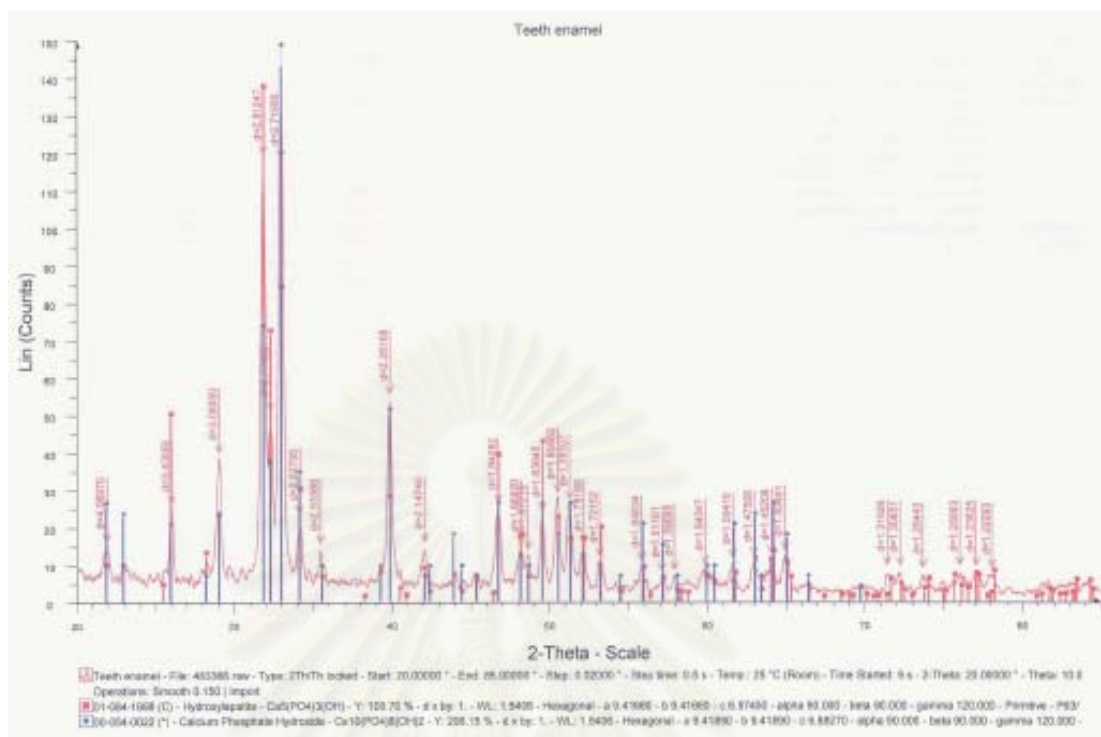
จากการวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่า ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}) = 2.0041$, $g_2 (g_{center}) = 2.0031$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.998$ ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ $CO_2^{\cdot -}$ แบบ Orthorhombic [26] ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ค่า g-factor ของสารประกอบ Hydroxylapatite มาตรฐานกับสารประกอบ Hydroxylapatite ที่มีอยู่ในเคลือบฟันธรรมชาตินั้นสอดคล้องกัน

4.9.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์ และเปลือกหอยโบราณโดยวิธี XRD

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้จากการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าในฐานข้อมูลของสารประกอบ Hydroxylapatite ในเคลือบฟันสัตว์ และ Aragonite จากเปลือกหอยโบราณพบว่าจากฐานข้อมูลในเครื่องมือและที่วัดการเลี้ยวเบนได้จากตัวอย่างสอดคล้องกันดังรูปที่ 4.36 และ 4.37



รูปที่ 4.36 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึก Aragonite ในเปลือกหอยโบราณรหัส # 1583



รูปที่ 4.37 ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโครงสร้างผลึก Hydroxylapatite
ในเคลือบฟันสัตว์โบราณรหัส #1163

4.9.3 ผลการวิเคราะห์ถ่ายภาพพื้นผิวเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

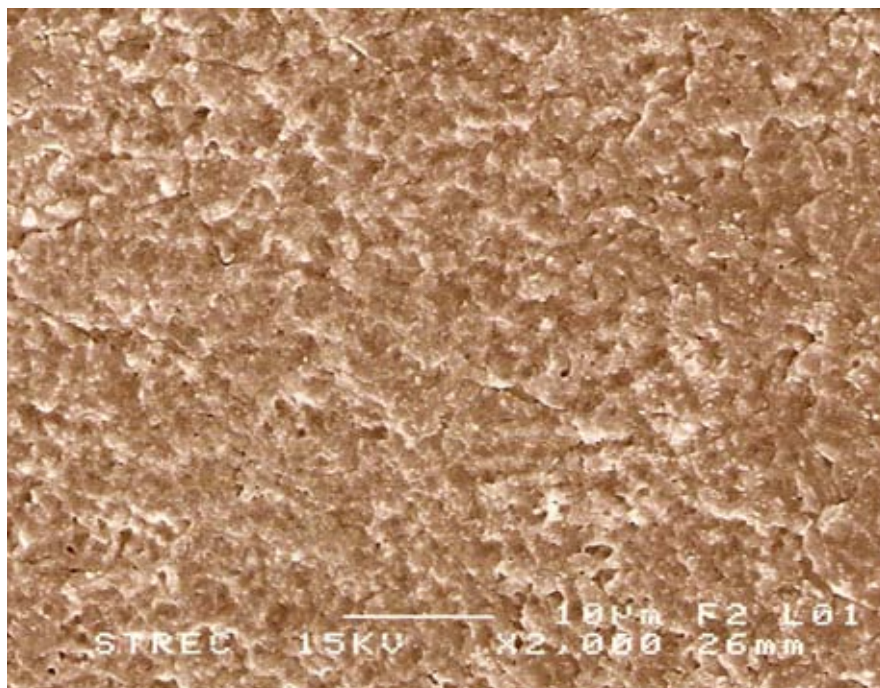
จากผลการวิเคราะห์พื้นผิวดตัวอย่างที่เตรียมแล้วโดยการแบ่งมาตัดเป็นพื้นที่ประมาณ 0.8×0.8 เซนติเมตร มาทำการ coat ด้วยทอง เพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าสำหรับพร้อมที่จะทำการวัดสัณฐาน พบว่าพื้นผิวมีความสม่ำเสมอทั้งรูปที่ 4.38, 4.39, 4.40 และ 4.41



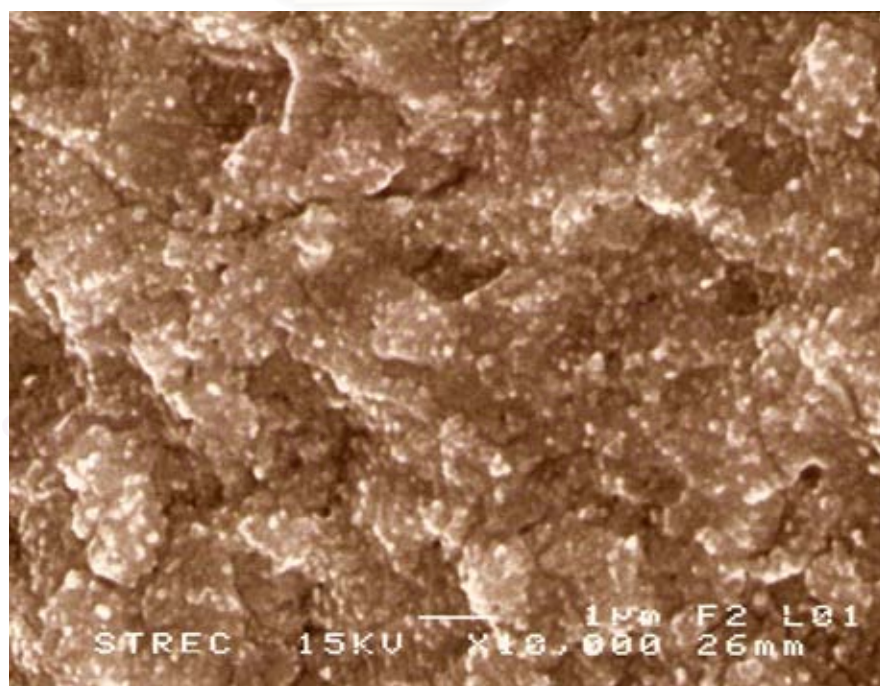
รูปที่ 4.38 ภาพถ่ายพื้นผิวของเคลือบฟันสัตว์ที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 500X



รูปที่ 4.39 ภาพถ่ายพื้นผิวของเคลือบฟันสัตว์ที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 2000X



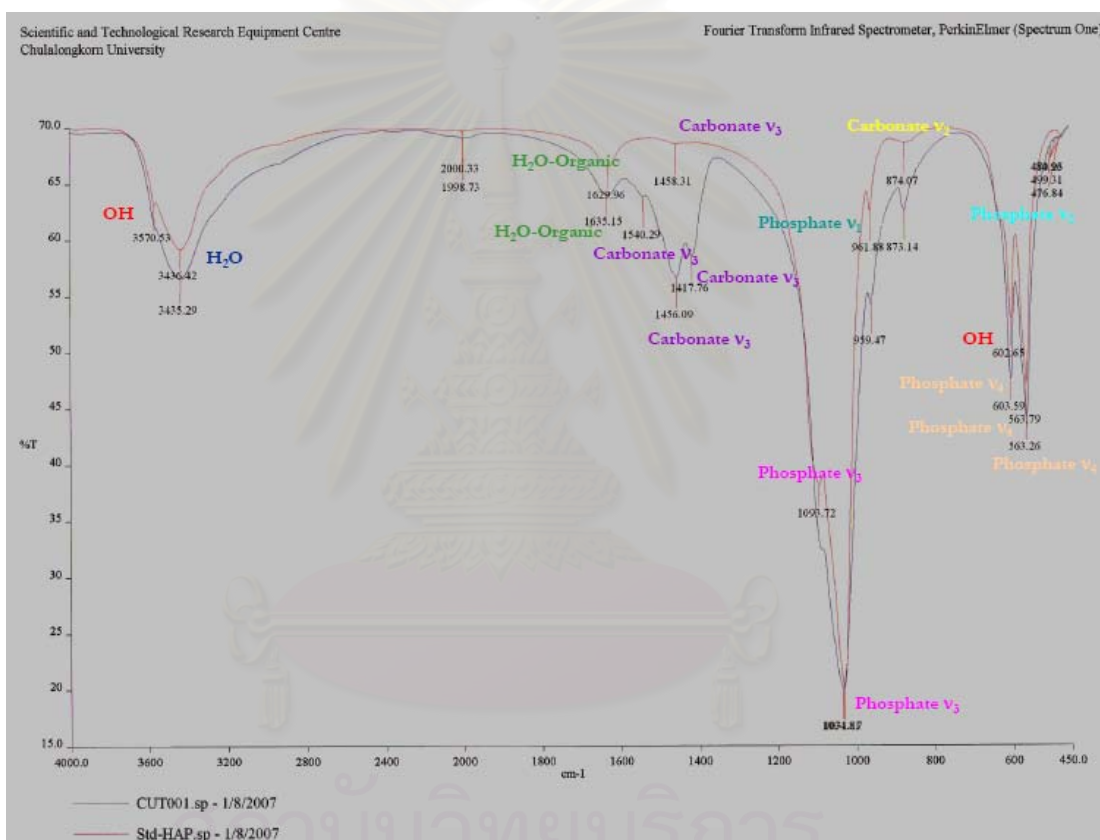
รูปที่ 4.40 ภาพถ่ายพื้นผิวของเปลือกหอยโบราณที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 500X



รูปที่ 4.41 ภาพถ่ายพื้นผิวของเปลือกหอยโบราณที่ผ่านการเตรียมแล้วที่กำลังขยาย 2000X

4.9.4 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในเคลือบฟันสัตว์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในเคลือบฟันสัตว์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) พบว่า เมื่อทำการเทียบสเปกตรัมของสารมาตรฐาน Hydroxylapatite, High Resolution กับเคลือบฟันสัตว์มีหมู่ฟังก์ชันที่มีเลขคลื่นที่สอดคล้องและตรงกันตามรายละเอียดในตารางที่ 2.3 และแสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในเคลือบฟันสัตว์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose ในตัวอย่างดิน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินเพื่อทำการวัด External Dose rate ประกอบการคำนวณอายุโดยวิธี Electron Spin Resonance Dating ณ หลุมขุดค้นที่ 1 Area I (S23W10) แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ตามข้อมูลในตารางที่ 4.1 พบว่าตัวอย่างที่ หลุมขุดค้นที่ 1 ในแต่ละ Level พบว่ามีปริมาณทอเรียมในดินสูง ส่วนธาตุยูเรเนียมและทอเรียมจะ อยู่ในปริมาณที่ต่ำ พบว่าจากปริมาณธาตุกัมมันตรังสีที่ใช้ในการคำนวณ Annual dose ที่ตรวจวัด ได้ เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณอายุ พบว่า ค่า Annual dose ที่ได้มีความสัมพันธ์กับอายุที่คำนวณ ได้ และปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและโพแทสเซียม-40 ที่คำนวณได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับการ วัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินครั้งแรก โดยคณะวิจัยที่ทำการวิจัยสรุปเกี่ยวกับกรณี โบราณคดี ของแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน (ชวลิต ขาว เขียว, 2547) ซึ่งทำการวัดที่ภาควิชาธรณีวิทยา มหาวิทยาลัยยะลา ประเทศญี่ปุ่น ยกเว้นทอเรียม ที่เมื่อใช้เทคนิค NAA ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติมาใช้ในการตรวจวัดปริมาณจะได้ค่าที่สูงกว่า มาก ซึ่งค่าปริมาณธาตุกัมมันตรังสีที่วัดได้อยู่ใน Level ที่ลึกที่สุดและตื้นที่สุด (230 -240 cm.dt. และ 450 – 460 cm.dt.) อาจสรุปได้ว่า Level ที่ทำการวัดปริมาณธาตุเพื่อนำผลมาประกอบกับการ หาอายุโดยวิธี ESR นั้นเป็นช่วงกลางของหลุมอาจมีปริมาณที่แตกต่างกันได้

5.2 การหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content , %W)

จากผลการหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water content , %W) พบว่า จากตารางที่ 4.2 ในแต่ละ Level นั้นจะมีความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินใน ธรรมชาติที่อยู่ในช่องว่างของตะกอนดินที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อนำผลการคำนวณ %W มาประกอบกับการคำนวณ ค่า Annual dose ร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีใน ตัวอย่างดิน พบว่าค่าที่ได้มีนัยสำคัญกับอายุที่คำนวณได้ และค่าที่คำนวณได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับการ วัด %W ในตัวอย่างดินครั้งแรก โดยคณะวิจัยที่ทำการวิจัยสรุปเกี่ยวกับกรณีโบราณคดี ของ แหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน (ชวลิต ขาวเขียว, 2547) อาจมี ความแตกต่างกันแต่มีค่าที่ไม่ต่างกันมาก

5.3 การคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดิน

จากผลการคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดินที่ใช้ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดินและการวัดค่าความชื้นหรือปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติที่อยู่ในช่องว่างของตะกอนดิน และใช้ตารางของ Bell ในการเปลี่ยนปริมาณธาตุในหน่วย ppm ให้เป็นปริมาณ dose rate (mGy/year) สามารถสรุปได้ว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับการคำนวณ dose rate ในตัวอย่างดินครั้งแรกในบาง Level คือ Level 20, Level 22 และ Level 26 (ค่าที่คำนวณได้เดิมคือ 0.768 mGy/year ซึ่งเป็นชั้นบนสุด)

5.4 การวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ

จากผลการคำนวณค่า Annual dose (External dose rate) ในตัวอย่างดินที่ใช้ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ พบว่าค่าที่ได้เมื่อใช้ตารางของ Bell ในการเปลี่ยนปริมาณธาตุในหน่วย ppm ให้เป็นปริมาณ dose rate (mGy/year) สามารถนำมาคำนวณอายุได้ใกล้เคียงกับทางโบราณสถานฐานวิทยา และค่าที่วัดได้มีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อใช้เทคนิควิธี ICP-AES พบว่าเหมาะสมกับสภาพของตัวอย่างเนื่องจากตัวอย่างนั้นเป็นฟันซี่ที่เล็กในการแยกเอาส่วนของ Enamel ออกมามีน้อย จึงต้องทำการใช้วิธีการลอกผิวหน้าออกโดยใช้กรด HCl ออกมาในสารละลาย Waste แล้วจึงนำเอาสารละลาย Waste นั้นมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุซึ่งพบว่าได้ผลออกมาสามารถวัดปริมาณได้ดีกว่าเทคนิค NAA ที่เมื่อนำไป Activate และวัดปริมาณด้วย Gamma Spectroscopy พบว่าฟลักของยูเรเนียมในเคลือบฟันและในเนื้อฟันไม่สามารถมองเห็นได้ จึงเปลี่ยนมาใช้วิธีหลัง ซึ่งสะดวกและได้ผลดีในระดับหนึ่ง ซึ่งพบว่าปริมาณธาตุยูเรเนียมเฉพาะในหลุมที่ปางมะผ้าตัวอย่างฟันได้รับปริมาณยูเรเนียมค่อนข้างสูง ส่วนปริมาณโพแทสเซียม-40 เนื่องจากไม่มีสารมาตรฐาน ผู้วิจัยจึงได้นำตัวอย่าง # 1163 ซึ่งบดของแข็ง (ฟัน) เป็นผงและนำไปวัดได้เพียงตัวอย่างเดียวด้วยเทคนิค XRF ซึ่งเท่ากับ 0.055 ppm โดยได้ใช้ค่านี้อ้างอิงในการคำนวณตัวอย่างฟันในทุกตัวอย่าง ซึ่งค่าอายุที่ได้ใกล้เคียงกับฐานข้อมูลเดิมและได้ผลดี แต่ข้อจำกัดของวิธีนี้ยังมีอยู่มาก เนื่องจากอาจเกิดการปนเปื้อนระหว่างการนำตัวอย่างเข้าวัด การวัดในสารละลาย waste ที่อาจคลาดเคลื่อนได้ และค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างวัดมีค่อนข้างสูง

5.5 การคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟัน และเปลือกหอยโบราณ

จากผลการคำนวณค่า Annual dose (Internal dose rate) ในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ ที่ใช้ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีโดยใช้เทคนิค ICP-AES พบว่าค่า dose rate ที่ได้มีค่าที่สูง เนื่องจากปริมาณของ UO_2^+ ที่แพร่เข้าไปในเนื้อฟันค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้ค่า dose rate สูง และสรุปได้ว่าเนื่องจากการแพร่ของธาตุยูเรเนียมในรูปของ UO_2^+ นั้นมีผลต่อค่า AD และค่าอายุ ซึ่งยังต้องปรับปรุงเทคนิควิธีการนี้ให้ดีกว่าเดิม

5.6 การฉายรังสีแกมมาตัวอย่างเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณเพื่อ การหาปริมาณสัญญาณ equivalent dose (ED) โดยวิธี Additive dose

จากผลการฉายรังสีแกมมาในตัวอย่างเคลือบฟันและเปลือกหอยโบราณ พบว่าได้ผลที่ดีและคำนวณค่า dose จริงได้ใกล้เคียงกับ dose ที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวเนื่องจากการใช้ ตะกั่วในการลดทอนความแรงรังสีเพื่อให้ฉายรังสีได้นานขึ้นเป็นการเพิ่มความแน่นอนในปริมาณ รังสีที่ต้องการได้ดี และการใช้ vial พลาสติกในการบรรจุตัวอย่างเข้าวัดนั้นมีความเหมาะสมกว่า การใช้วัสดุอื่น เพื่อลด effect ร่วมในการฉายรังสี ทำให้ผลการตรวจวัดปริมาณรังสีจริงค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับปริมาณรังสีที่ต้องการฉายเพิ่ม

5.7 การวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

จากการวัดสัญญาณในเคลือบฟันสัตว์พบว่าค่า g-factor ที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ derivative curve ของการเกิด defect ของ apatite ซึ่งเกิดจาก radical อิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลในตารางที่ 2.1 [36] แต่ในค่า g_1 อาจมีการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกับฐานข้อมูลเดิม เพราะอาจเกิดการคลาดเคลื่อน เนื่องจากธรรมชาติของสารประกอบ Hydroxylapatite ในแต่ละตัวอย่างแต่ละห้องที่ที่ขุดค้นพบ แต่ในภาพรวม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพีคของสารมาตรฐานที่ได้พบว่าค่า g-factor ที่ได้มีลักษณะที่คล้ายกัน และค่า g_2 ที่มีค่าความแตกต่างที่ไม่มากนัก

และผลจากการวัดสัญญาณในเปลือกหอยพบว่าเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่อง ESR ที่ไม่สามารถใช้ Power (mW) ที่เกิน 1 mW ได้เนื่องจากกำลังของ คลื่นไมโครเวฟที่ไม่แน่นอน อาจ

ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องได้ และเนื่องจากสภาพของหอยที่มีมลทินสูง และมีปริมาณธาตุแมงกานีสในปริมาณสูงจนไม่สามารถที่จะมองเห็น Electron trap ได้ ซึ่งสามารถทำการกำหนดอายุได้พอสังเขปในกำลัง Power (mW) ที่เท่ากับ 1 mW เท่านั้น ซึ่งผลการกำหนดอายุพอสังเขปพบว่าได้ค่าอยู่ในช่วงที่น่าที่จะยอมรับได้ในระดับหนึ่ง

5.8 การหาปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) โดยวิธี Additive dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

ในการวัดปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) โดยวิธี Additive dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์ พบว่ามีปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์เดียวกัน เมื่อทำการกำหนดอายุ ผลที่ได้จึงมีอายุที่ตรงและใกล้เคียงกับทางคณะวิจัยที่ทำการศึกษาได้เป็นอย่างดี ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และมีระดับความเชื่อมั่นในระดับหนึ่ง

ส่วนในกรณีของเปลือกหอย เนื่องจากเป็นเปลือกหอยชนิด 2 ฟา ซึ่งมีปริมาณของธาตุแมงกานีสที่สูง และข้อจำกัดในการเลื่อน power ของเครื่อง ESR จึงสามารถกำหนดอายุได้พอสังเขปพอเป็นข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นเท่านั้น ซึ่งต้องทำการหาข้อแก้ไขและปรับปรุงให้ดีขึ้น และเป็นที่น่าเชื่อถือได้ ซึ่งเมื่อยึดตัวอย่างเปลือกหอยรหัส #1583-1 เป็นแนวทางค่าอายุ นับว่าเป็นที่ยอมรับได้ในระดับหนึ่ง ส่วนเปลือกหอยรหัส #1583-1 ถึง #1583-8 1 นั้น พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก แต่สัญญาณสเปกตรัม ESR นั้นส่วนใหญ่จะให้ค่าความสูงพีคที่แน่นอน

สำหรับผลการวิจัยการกำหนดค่าอายุได้สรุปผลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการกำหนดค่าอายุโดยวิธี Electron Spin Resonance ของเคลือบฟันสัตว์ (330 -410 cm) และเปลือกหอยโบราณ (430 – 440 cm)

ความลึก	รหัสตัวอย่าง	g-factor			ปริมาณ Total dose of natural radiation (TD) (Gy)	ค่า Annual dose รวม (Gy)	ค่าอายุ (ปี)
		$g_1 (g_{\parallel})$	$g_2 (g_{center})$	$g_3 (g_{\perp})$			
330 – 340 cm.	# 919 /A3096	2.0041	2.0033	1.9988	22.103± 3.475	0.000816	27,000 ± 4,200
	#1695 /A3110	2.0040	2.0033	1.9988	20.9764±3.288	0.000829	25,200± 3,900
	# 1125 /A3120	2.0039	2.0030	1.9984	21.7364±3.409	0.000796	27,300 ± 4,280
340 – 350 cm	#1163 /A3671	2.0040	2.0030	1.998	21.0716±3.283	0.000956	22,000± 3,400
	# 1151-1 /A4233	2.0047	2.0036	1.9991	27.3288±4.648	0.000822	33,200± 5,600
	# 1151-2 /A4234	2.0040	2.0032	1.9986	23.0238±3.648	0.000895	25,700± 4,000
	# 981-1	2.0042	2.0032	1.998	17.7182±2.695	0.000945	18,700± 2,800
400 – 410 cm	# 1453	2.0041	2.0031	1.998	28.7815±4.793	0.000948	30,300± 5000
430-440 cm.	# 1583-1	-	2.0037±0.0003	-	18.17	0.000562	32,300
	# 1583-2	-	2.0042±0.0003	-	72.52	0.000562	129,000
	# 1583-3	-	2.0044±0.0003	-	36.50	0.000562	64,900
	# 1583-4	-	2.0044±0.0003	-	57.23	0.000562	101,800
	# 1583-5	-	2.0045±0.0003	-	65.56	0.000562	116,600
	# 1583-6	-	2.0031±0.0003	-	61.74	0.000562	101,900
	# 1583-7	-	2.0042±0.0003	-	54.70	0.000562	90,300
	# 1583-8	-	2.0046±0.0003	-	46.74	0.000562	77,100

5.9 การวิเคราะห์สารประกอบในกลุ่มแร่ apatite, Calcite และ/ หรือ Aragonite จากเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

5.9.1 จากการวิเคราะห์สารประกอบ Hydroxyl apatite มาตรฐานพบว่า เมื่ออบที่อุณหภูมิที่ 300°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการไล่อุณหภูมิอิสระที่มีอยู่ออกไป และทำให้เส้นสเปกตรัมดีขึ้น เมื่อพิจารณาค่า g-factor พบว่าค่า g ทั้ง 3 ค่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก และจะมีลักษณะพิคที่ใกล้เคียงกัน

5.9.2 จากการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณ เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลในเครื่องสำหรับเคลือบฟันของสารประกอบ Hydroxylapatite มีค่าที่ขึ้นส่วนใหญ่ตรงกัน ส่วนใน Aragonite ในเปลือกหอยพบว่าฐานข้อมูล

ในเครื่องตรงกันกับในตัวอย่าง จึงสรุปได้ว่าในตัวอย่างทั้ง 2 แบบนั้นมีโครงสร้างผลึกที่ใช้ในการกำหนดอายุที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์

5.9.3 จากการถ่ายภาพพื้นผิวเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope พบว่าพื้นผิวของตัวอย่างที่พร้อมบคนั้นมีความราบเรียบสม่ำเสมอ ซึ่งไม่พบวัสดุอื่นที่ปนมาจนมากเกินไปนัก

5.9.4 จากการจากการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันในเคลือบฟันสัตว์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) พบว่า เมื่อทำการเทียบสเปกตรัมของสารมาตรฐาน Hydroxylapatite, High Resolution กับเคลือบฟันสัตว์มีหุ้มฟังก์ชันที่มีเลขคลื่นที่สอดคล้องและตรงกัน สามารถดูคลื่อนตามเลขคลื่นในตำแหน่งที่เหมือนกัน จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างเคลือบฟันที่ทำการแยกนั้นเป็นสารประกอบ Hydroxylapatite

5.10 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกตัวอย่างมาใช้ในการศึกษา

จากงานวิจัยนี้ สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเลือกตัวอย่างมาใช้ในการศึกษาเพื่อกำหนดอายุโดยวิธีนี้ได้ดังนี้

5.10.1 เคลือบฟันสัตว์

5.10.1.1 ควรเลือกเอาฟันที่มีความสมบูรณ์ของ Enamel เมื่อเวลาเตรียมตัวอย่างสำหรับวัดสัญญาณ ESR ที่มีสัญญาณรบกวนของสารประกอบอื่นน้อย

5.10.1.2 การนำตัวอย่างดินเพื่อนำมาประกอบการวัด External dose rate ในดิน ควรนำตัวอย่างที่มีตำแหน่งที่ตรงกับตัวอย่าง และหลีกเลี่ยงการโดนแสง ควรเก็บตัวอย่างดินที่เกาะรอบตัวอย่างฟันได้ จะสามารถทำให้วัดค่า External dose rate ได้ดีและถูกต้อง

5.10.1.3 ฟันที่เลือกควรมีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างพอสมควร จะได้ทำการแบ่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ในแต่ละส่วนได้อย่างเพียงพอ

5.10.2 เปลือกหอยโบราณ

5.10.2.1 ควรเลือกเปลือกหอยที่มีความสมบูรณ์ ไม่ควรเลือกเปลือกหอยที่มีการแตกตัวของดินมาก ทำให้ยากต่อการเตรียมและการวัดสัญญาณ

5.10.2.2 การนำตัวอย่างดินเพื่อนำมาประกอบการวัด External dose rate ในดิน ควรนำตัวอย่างที่เกาะกับเปลือกหอยทั้งด้านในและด้านนอก และหลีกเลี่ยงการโดนแสง จะสามารถทำให้วัดค่า External dose rate ได้ดีและถูกต้อง

5.10.2.3 ควรเลือกตัวอย่างที่หลีกเลี่ยงเปลือกหอยมีการพอกขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพราะเปลือกหอยจะมีการแลกเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำทำให้ยากต่อการเตรียมตัวอย่าง และผลอายุคลาดเคลื่อน

5.10.2.4 เปลือกหอยที่เลือกควรมีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างพอสมควร จะได้ทำการแบ่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ในแต่ละส่วนได้อย่างเพียงพอ และไม่ควรมีเปลือกบางจนเกินไปจนยากต่อการเตรียม

5.11 ข้อเสนอแนะ

5.11.1 ตัวอย่างพินที่นำมากำหนดอายุจะต้องเป็นพินที่มีสภาพค่อนข้างสมบูรณ์ มีการเจือปนที่เคลือบบนผิวพินน้อย เพราะประโยชน์ในการเตรียม

5.11.2 เปลือกหอยที่นำมากำหนดอายุ ควรมีผิวเปลือกที่ค่อนข้างละเอียด เพื่อลดการเจือปนของสารประกอบอื่น เพื่อความสะดวกในการวัดปริมาณสัญญาณ

5.11.3 ควรใช้พื้นผิวของตัวอย่างอย่างประหยัดและรอบคอบ เพื่อให้ได้ผลการวัดสัญญาณที่ดีและได้องค์ประกอบเพื่อใช้ในการคำนวณอายุครบถ้วน

5.11.4 การวัดสัญญาณ ด้วยเครื่อง ESR ต้องทำการปรับเทียบเครื่องมือเสมอก่อนที่จะทำการวัดตัวอย่าง เพื่อความแม่นยำในการวัดสัญญาณ

5.11.5 ควรจัดทำโปรแกรมคอมพิวเตอร์การคำนวณอายุ เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการกำหนดอายุ และค่าความคลาดเคลื่อน

รายการอ้างอิง

- [1] โครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน, ผลการขุดค้นทางโบราณคดี, [Online]. <http://highland.trf.or.th/WebHAPP1/PM/excavation.html>
- [2] ศศิพันธุ์ ฌ สงขลา และคณะ. การแสดงลักษณะกายภาพของฟันและกระดูกจากสัตว์และมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์โดยวิธีนิวเคลียร์. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 8 “รังสีกับชีวิต” (Radiation and Life) ปีที่ 8 (20-21 มิถุนายน 2544): 704-714.
- [3] สมหมาย ช่างเขียน และพวงทิพย์ แก้วทับทิม. การตอบสนองต่อรังสีของผลึกแคลเซียมคาร์บอเนตในตัวอย่างสัตว์ทะเลชนิดมีเปลือกและกระดูก. การประชุมวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ครั้งที่ 8 “รังสีกับชีวิต” (Radiation and Life) ปีที่ 8 (20-21 มิถุนายน 2544): 535-538.
- [4] Blackwell B. A., et al. ESR Dating Tooth Enamel from the Paleolithic Site at Longola, Zambia. Application Radition and Isotopes 44,1/2 (1993): 253-260.
- [5] Tie-Mei Chen et al. ESR Dating of Tooth Enamel from YUNXIAN *Homo Erectus* Site, China. Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)16, (1997): 455-458.
- [6] Molodkov A., et al. The ESR Age of *Protlandia Arctica* Shells from Glacial Deposits of Central Latvia: an Answer to a Controversy on the Age and Genesis of their Enclosing Sediments. Quaternary Geochronology 17, (1998): 1077-1094.
- [7] Kinoshita A., et al. ESR dating of a subfossil shell from Couve Island, Ubatuba, Brazil. Application Radition and Isotopes 57, (2002): 497-500.
- [8] Chen S.M., et al. A Study on ESR Dating Character of Tooth Enamel. Advances in ESR Applications 18, (2002): 93-96.
- [9] Skinner A.R., et al. ESR dating at Mezmaiskaya Cave, Russia. Applied Radiation and Isotopes 62, (2005) :219–224.
- [10] ชาลิต ขาวเขียว. 2547. ธรณีโบราณคดีของพื้นที่เพิงผาถ้ำลอด จังหวัดแม่ฮ่องสอน ภาคเหนือของประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโลกศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [11] สว่างพงษ์ วัฒนะพิทักษ์สกุล. 2549. มุมมองจากการศึกษาฟันสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในสมัยไพลสโตซีนตอนปลาย. พลวัตทางสังคม วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน :125-147.
- [12] Grün R. Present Status of ESR- Dating. Application Radiation and Isotopes 40 ,(1989): 1045-1055.
- [13] บรรจง หวังเจริญรุ่ง. การกำหนดอายุโบราณวัตถุประเภทเครื่องปั้นดินเผาโดยวิธีเทอร์โมลูมิเนสเซนส์. การสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง การหาอายุวัตถุในงานด้านโบราณคดีและธรณีวิทยา (27 กรกฎาคม 2537): 40-45.
- [14] Dal.ca, Basic physical processes of TL, OSL& ESR:, [Online]. Available from: <http://www.dal.ca/~digs/t-basic.html> [2004,June 20]
- [15] Grün R., et al. Electron spin resonance Dating and The Evolution of Modern Humans. Archaeometry 33,2 (1991): 153-199.
- [16] คุณิต เครื่องาม และวิโรจน์ บุญโกสุมภ์. การประยุกต์ใช้งาน ESR ในทางวัสดุศาสตร์. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3,2 (2536): 111-140.
- [17] Martin J. Concepts and Methods of ESR Dating. Radiation Measurements 27,5/6 (1997): 943-973.
- [18] Shriver, D.F. and Atkins, P.W.. Inorganic Chemistry. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- [19] ณรงค์ ไชยสุด. วิธีการวิเคราะห์โดยอุปกรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2541.
- [20] Allen, J. Bard. Electron Spin Resonance. In Frank J. Welcher (ed.), Standard Methods of Chemical Analysis, pp. 616-635. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1966.
- [21] นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547.
- [22] Strec. Chula, Equipment Catalogue, [Online]. Available from: http://www.strec.chula.ac.th/Equip/Chemical_Analysis [2004, August 18]
- [23] อุทัย ดิยะวิสุทธิ์ศรี และมานพ ตีระรัตนสมโภช. การวัดหาอิเล็กตรอนไร้คู่ (unpair electron) ของสารที่ละลายในน้ำโดยใช้เทคนิคของ Electron Spin Resonance. วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7,1-2 (2542): 106-111.

- [24] กนกนาฏ จินตกานนท์. 2549. นิยามศัพท์ทางทันตแพทยศาสตร์ (Dental terminology). พลวัตทางสังคม วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมบนพื้นที่สูง ในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน :494-502.
- [25] Rink W. J. Electron Spin Resonance (ESR) Dating and ESR Applications in Quaternary Science and Archaeometry. Radiation Measurements 27,5/6 (1997): 975-1025.
- [26] Motoji Ikeya. New Applications of Electron Spin Resonance Dating, Dosimetry and Microscopy. Singapore: World Scientific, 1993.
- [27] ราชบัณฑิตยสถาน. พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: อรุณการพิมพ์, 2544.
- [28] Maria Vallet-Regi. Calcium phosphates as substitution of bone tissues. Progress in Solid State Chemistry 32, (2004) : 1–31.
- [29] รัศมี ชูทรงเดช. 2549. ย้อนรอยความรู้จากแหล่งโบราณคดีเพิงผาถ้ำลอดและเพิงผาบ้านไร่ อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน. พลวัตทางสังคม วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมบนพื้นที่สูง ในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน :210-230.
- [30] Grün, R. and Stringer, C.B. et.al., Direct Dating of Human Fossils www.rses.anu.edu.au/environment/eePages/eeDating/Direct_dating_info.html [2006, August 14]
- [31] Molodkov A. ESR Dating of Quaternary Shells : Recent Advances. Quaternary Science Reviews 7 ,(1988): 477-484.
- [32] Veronique Michel. Chemical and structural changes in *Cervus elaphus* tooth enamels during fossilization (Lazaret cave): a combined IR and XRD Rietveld analysis. Applied Geochemistry Vol. 10, (1995) : 145-159.
- [33] International Atomic Energy Agency IAEA (2002). Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment Report of a co-ordinated research project
- [34] Earthquake and Tectonics Geology Research Unit. Luminescence dating laboratory. www.geo.sc.chula.ac.th/EATGRU%20Homepage/Luminescence%20laboratory/Luminescence%20dating.html.

- [35] http://coastal.er.usgs.gov/sgd/mt_uthseries.html
- [36] <http://geosciences.geol.u-psud.fr/geochrono/fr/tech/chronk/pot40/pot40.html>.
- [37] B.A.B. Blackwell et al. External dose rate determinations for ESR dating at Bau de l'Aubesier, Provence, France. *Quaternary International* 68-71, (2000) :345-361.
- [38] www.rses.anu.edu.au/environment/eePages/eeDating/QuaternaryGeochronology/TCD.html
- [39] สันติ ภัยหลบลี้. 2547. การหาอายุตะกอนยุคควอเทอร์นารีด้วยวิธีแปลงแสงความร้อนชนิดโททับลีซและรีเจเนอเรชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาโลกศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [40] บรรจบ สุขทัต และอัจฉรา เจริญสุข. ความไม่แน่นอนของการวัด. เอกสารประกอบการสอน สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2549.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การใช้สารละลาย Fricke เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิง ในการวัดปริมาณรังสีระดับสูงสำหรับตัวอย่างโบราณวัตถุ

1. บทนำ

ความถูกต้องของการวัดปริมาณรังสี เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงถึงอย่างที่สุดในการวัดปริมาณรังสีของกระบวนการฉายรังสี เพราะจะเป็นสิ่งที่ยืนยันได้ว่าการฉายรังสีครั้งนั้นตัวอย่างที่นำมาฉายรังสี ได้รับปริมาณรังสีตรงตามต้องการหรือไม่ เช่น การนำเอาปริมาณรังสีที่ตัวอย่างทางโบราณวัตถุได้รับที่มีค่าที่แน่นอนจากกระบวนการฉายรังสีที่ต้องการความถูกต้องและเชื่อถือได้สูงมาก เพื่อประกอบการคำนวณอายุโบราณวัตถุ ดังนั้นสิ่งสำคัญที่จะยืนยันถึงปริมาณรังสีที่ได้รับคือเครื่องวัดปริมาณรังสี (Dosimeter) ซึ่งจะต้องวัดปริมาณรังสีได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้

เครื่องวัดปริมาณรังสีอาจแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติและการใช้ประโยชน์ ดังนี้

1. เครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary Standard Dosimeter) เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมาตรฐานปฐมภูมิ สำหรับการปรับเทียบสนามรังสี เครื่องวัดปริมาณรังสีที่นิยมใช้คือ Ionization Chamber และ Calorimeter ตัวอย่างห้องปฏิบัติการมาตรฐานปฐมภูมิ เช่น National Physical Laboratory (NPL), UK และ National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S.A.

2. เครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard Dosimeter) เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีที่มีคุณภาพและความแม่นยำในการวัดสูงมาก ใช้สำหรับปรับเทียบเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้งานประจำ (Routine Dosimeter) ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงเท่ากับ $\pm 3\%$ เครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ Fricke (สารละลาย ferrous sulfate ในกรดซัลฟูริก เข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร)

3. เครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้งานประจำ (Routine Dosimeters) เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้ในงานควบคุมคุณภาพ (process control) ในโรงงานฉายรังสี ตลอดจนห้องปฏิบัติการฉายรังสีเพื่องานวิจัย มีความสะดวกทั้งต่อการใช้งานและการอ่านวัดผล ในแต่ละชุดการผลิตของเครื่องวัดปริมาณรังสีชนิดนี้ จะต้องได้รับการปรับเทียบกับเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงก่อนการใช้งาน และปรับเทียบเป็นครั้งคราว ในช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ใช้งานประจำเท่ากับ $\pm 5\%$ ถึง $\pm 10\%$)

4. เครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานสำหรับการขนส่งระยะไกล (Transfer Standard Dosimeters) เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีที่ได้รับการเลือกสรรอย่างพิเศษ เหมาะสำหรับการเปรียบเทียบปริมาณรังสีจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานปฐมภูมิ ผู้ห้องปฏิบัติการมาตรฐานแห่งชาติหรือท้องถิ่น มีเสถียรภาพดีและมีความสะดวกต่อการขนส่งระยะไกล ปัจจุบันเครื่องวัดปริมาณรังสีชนิดนี้ ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางคือ Alanine

ห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดปริมาณรังสีระดับสูง สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้จัดตั้งห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดปริมาณรังสีระดับสูงขึ้น เพื่อให้บริการเปรียบเทียบแก่ห้องปฏิบัติการฉายรังสี และโรงงานฉายรังสีภายในประเทศ โดยที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานนี้ ได้รับการสอบเทียบมาตรฐานกับห้องปฏิบัติการมาตรฐานปฐมภูมิเป็นประจำ ทั้งจาก NPL และ IAEA (โครงการ IDAS – IAEA Dose Quality Audit Service (formerly-International Dose Assurance Service)) เครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิงที่ห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบมาตรฐานการวัดปริมาณรังสีระดับสูง ใช้ในการเปรียบเทียบคือ Fricke

Fricke เป็นสารละลายที่อิมัลชันด้วยอากาศของเฟอร์รัสซัลเฟต ในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ผู้ที่ศึกษาและใช้สารละลายนี้เป็นคนแรกคือ H. Fricke ส่วนประกอบทางเคมีของ Fricke คือ เฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 1 มิลลิโมล กรดซัลฟูริก 0.4 โมลและโซเดียมคลอไรด์ 1 มิลลิโมล ในน้ำกลั่นสามครั้ง (triply distilled water)

การวัดปริมาณรังสีด้วย Fricke อาศัยหลักการการออกซิเดชันของ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ไปเป็นเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เมื่อได้รับรังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (Ionizing Radiation) ใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 303 nm ในการอ่านผล โดยอาศัยหลักการการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของ Fe^{3+} เมื่อความเข้มข้นของ Fe^{3+} เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ได้รับมากขึ้น

2. ข้อจำกัดและข้อควรตระหนัก ในการใช้ Fricke เป็นเครื่องวัดปริมาณรังสีมาตรฐานอ้างอิง

- 2.1 ใช้วัดปริมาณรังสีในช่วง 40 ถึง 400 เกรย์
- 2.2 อัตราปริมาณรังสี (dose rate) ของต้นกำเนิดรังสี ต้องไม่เกิน 10^6 เกรย์ต่อวินาที
- 2.3 อุณหภูมิขณะฉายรังสีของสารละลาย Fricke ต้องอยู่ระหว่าง 10 - 60 องศาเซลเซียส

2.4 อุณหภูมิขณะฉายรังสีและอุณหภูมิขณะอ่านผลของ Fricke ที่สูงหรือต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส มีผลต่อการตอบสนองต่อรังสีแกมมาและค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิดความคลาดเคลื่อน จึงจะต้องมีค่าแก้ไขในการคำนวณผล (หัวข้อที่ 7 การวิเคราะห์ คำนวณผล)

2.5 ความไม่บริสุทธิ์ของ Fricke เป็นสาเหตุให้ผลการวัดคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ จึงต้องระวังมิให้เกิดการปนเปื้อนของสารอื่นในสารละลาย รวมทั้งต้องไม่ให้สารละลายสัมผัสกับอุปกรณ์หรือภาชนะที่เป็นพลาสติกหรือโลหะในทุกขั้นตอน เครื่องแก้วทุกชิ้นที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการเตรียม Fricke จะต้องไม่ใช้ปะปนกับสารอื่น

2.6 Fricke จะถูกออกซิไดส์อย่างช้าๆที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) เพิ่มขึ้น สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลจากการเก็บ Fricke เป็นระยะเวลานานหลังจากการเตรียม หากค่าการดูดกลืนแสง เพิ่มถึงหรือมากกว่า 0.1 ไม่ควรใช้สารละลายนั้นต่อไป

2.7 Fricke มีความไวเล็กน้อยต่อแสงเหนือม่วง (Ultraviolet light) จึงควรเก็บไว้ในที่มืด หากจะต้องเก็บเป็นระยะเวลานาน และต้องไม่ให้ถูกแสงแดดตรงๆ หากจะต้องนำพาออกจากห้องปฏิบัติการ

2.8 ก่อนการนำ Fricke ที่เตรียมขึ้นใหม่ไปใช้งาน จะต้องได้รับการปรับเทียบกับ Fricke เก่า ที่สามารถสอบย้อน (Traceability) ไปถึงห้องปฏิบัติการมาตรฐานปฐมภูมิได้

2.10 ควรเก็บ Fricke ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 22 - 24 องศาเซลเซียส และเป็นห้องที่มีการป้องกันแสง Ultraviolet

3. เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1 SHIMADZU UV-VIS-NIR SCANNING SPECTROPHOTOMETER Model UV-3101PC (หรือ Spectrophotometer ที่ได้รับการปรับเทียบแล้ว สามารถวัดค่าการดูดกลืนแสงได้ถึง 2 โดยมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดไม่มากกว่า $\pm 1\%$ ในย่านความยาวคลื่น 300 nm)

3.2 ตันกำเนิดรังสีแกมมา

3.3 เครื่องแก้ว ให้ใช้เครื่องแก้วชนิด Borosilicate glass หรือใกล้เคียงกัน

3.3.1 Volumetric Flask 1000 ml. หรือ 2000 ml สำหรับ Fricke และ 2000 ml. สำหรับกรดซัลฟูริก 0.4 โมลต่อลิตร

3.3.2 Beaker ขนาด 100 ml 2 ใบ 250 ml 1 ใบ (สำหรับถ่ายน้ำกลั่น 3 ครั้ง กรดซัลฟูริก และ Fricke จากขวดวัดปริมาตร

3.3.3 Pasturize pipet สำหรับฉีดล้างและเติม Fricke ลงหลอดยาคอแคบ

3.3.4 หลอดยาคอแคบขนาด 5 มิลลิลิตร

3.3.5 กรวยชั่งสาร

3.4 สารเคมี ให้ใช้สารเคมีในระดับเคมีวิเคราะห์ (Analytical grade)

3.4.1 น้ำกลั่นสามครั้ง (Triply-distilled water)

3.4.2 Ferrous Ammonium Sulfate $\{\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2(6\text{H}_2\text{O})\}$

3.4.3 Sodium Chloride (NaCl)

(โซเดียมคลอไรด์ ทำหน้าที่ช่วยลดผลกระทบที่จะเกิดกับ Fricke อันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ที่อาจมีขึ้นจากกระบวนการเตรียม)

3.4.4 Sulfuric Acid (H_2SO_4) 95-97%

4. การเตรียม Fricke

4.1 เตรียมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร โดยใช้ Pipet ดูดกรดซัลฟูริกเข้มข้น 95-97 % 45 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 2 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นสามครั้งบรรจุอยู่ประมาณสามส่วนเขย่า ปล่อยให้สารละลายเย็นลง แล้วทำให้เป็นปริมาตร 2 ลิตร

4.2 ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.392 กรัม และ โซเดียมคลอไรด์ 0.058 กรัม ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ปริมาตรประมาณ 40 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร และทำให้เป็นปริมาตร 1 ลิตร ด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร จากข้อ 4.1 เก็บสารละลาย Fricke ในที่มืดและอุณหภูมิไม่เกิน 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 สัปดาห์

หมายเหตุ 1. ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้คือ เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.001 โมลต่อลิตร

โซเดียมคลอไรด์ 0.001 โมลต่อลิตรและกรดซัลฟูริก 0.4 โมลต่อลิตร)

2. หากต้องการเตรียม Fricke ปริมาณมากกว่า 1 ลิตร ให้เพิ่มปริมาณสารตามอัตราส่วน

5. การดำเนินการฉายรังสีของสารละลาย Fricke

5.1 การบรรจุสารละลาย Fricke ลงในหลอดยาคอแคบขนาด 5 มิลลิลิตร

5.1.1 ตั้งหลอดยาคอแคบ ด้วย Fricke 2 ครั้ง โดยใช้หลอดดูด (pasteurize pipet) นี๊ดล้างแล้วดูดทิ้ง

5.1.2 เติม Fricke ลงในหลอดยาคอแคบนั้น ในระดับต่ำกว่าคอหลอดเล็กน้อย

5.1.3 ปิดปากหลอดด้วย parafilm และมัดกระดาษไม่ให้สารละลายในหลอดสัมผัสกับ parafilm

5.2 การฉายรังสีเพื่อทดสอบความเที่ยงตรง (Precision)

5.2.1 ใช้ Fricke ใหม่ 24 หลอด แช่ในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 25°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงก่อนฉายรังสี

5.2.2 ฉายรังสีให้แก่ Fricke ใหม่ ที่ปริมาณรังสีประมาณ 130 เกรย์ จำนวน 10 หลอด และที่ปริมาณรังสีประมาณ 250 เกรย์ จำนวน 10 หลอด เพื่อทดสอบความเที่ยงตรง

5.2.3 อ่านผลการวัดตามข้อ 6 หากผลการวัดเป็นปกติให้ดำเนินการข้อต่อไป แต่หากตรงกันข้าม ให้ทดสอบใหม่ ค้นหาสาเหตุและแก้ไขความผิดปกตินั้น หรือเตรียมชิ้นใหม่ตามความเหมาะสม

5.3 การฉายรังสีเพื่อการเปรียบเทียบ

5.3.1 ใช้ Fricke เก่า 15 หลอดและ Fricke ใหม่ 18 หลอด แช่ในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 25°C ก่อนการฉายรังสีเป็นเวลา 1 ชม.

5.3.2 ฉายรังสี Fricke เก่าที่ปริมาณรังสีประมาณ 50, 130, 250 และ 370 Gy ปริมาณรังสีละ 3 หลอด

5.3.3 ฉายรังสี Fricke ใหม่ ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกันกับ Fricke เก่า โดยที่ ปริมาณรังสี 130 เกรย์ และที่ปริมาณรังสี 250 เกรย์ สามารถใช้ข้อมูลจากข้อ 5.2 ได้ ทั้งนี้ต้องเป็นการฉายรังสีในวันเดียวกัน และผลการวัดยอมรับได้

หมายเหตุ ในการฉายรังสีนั้น ให้ใส่หลอด Fricke ในกระบอกพลาสติกชนิด Polystyrene หรือพลาสติกชนิดอื่น ที่มีก้นและมีฝาปิด มีผนังหนา 3 - 5 mm เพื่อให้เกิดความสมดุลของอิเล็กตรอน (Electron Equilibrium) รอบๆหลอด Fricke

6. การวัด

6.1 ตั้งค่า Spectral bandwidth (Slit Width) ของเครื่อง Spectrophotometer ที่ 1 nm และค่าความยาวคลื่นแสง 303 nm (ตรวจสอบค่าอ่านสูงสุดของค่าการดูดกลืนแสง โดย scan จาก Fricke ที่ฉายรังสีแล้ว ซึ่งควรอยู่ที่ 303 nm)

6.2 ควบคุมอุณหภูมิของห้องใส่ตัวอย่างในเครื่อง Spectrophotometer และ Fricke ที่ต้องการอ่านที่ 25°C

6.3 ตั้งค่าอ่านเป็นศูนย์ (set zero) เทียบกับอากาศ โดยไม่มี cuvette

6.4 ใส่น้ำกลั่น 3 ครั้งลงใน cuvette ที่สะอาด ทั้ง 2 ตัว เช็ด cuvette ด้านใน (ด้านที่แสงผ่าน) ด้วยกระดาษเช็ดเลนส์หรือผ้าที่ไม่มีขน ด้วยความระวัง และอย่าจับต้องด้านในของ cuvette ใสลงในช่องบรรจุในเครื่อง Spectrophotometer แล้วตั้งค่าอ่านเป็นศูนย์ (set zero)

6.5 เทน้ากลั่นจาก cuvette ที่ตำแหน่ง Sample ออก (cuvette ด้านนอก) นิดล้าด้วย Fricke จากหลอดยาครอบค้ำไม่ผ่านการฉายรังสี เดิม Fricke จากหลอดเดิมลงใน cuvette จนถึงระดับที่พอเหมาะ อ่านค่าและบันทึก

6.6 จาก Cuvette ที่ตำแหน่ง Reference ทำเช่นเดียวกับข้อ 6.5 (แต่ไม่ต้องอ่านและบันทึกค่า) แล้วตั้งค่าอ่านเป็นศูนย์(set zero)

6.7 เทสารละลายจาก Cuvette ในตำแหน่งด้านนอกออก นิดล้าด้วย Fricke จากหลอดที่ต้องการอ่านค่า เดิม Fricke จากหลอดเดิมลงไปจนถึงระดับพอเหมาะ อ่านและบันทึกผล ทำเช่นเดียวกันนี้กับ Fricke ที่ต้องการอ่านค่าทั้งหมด

หมายเหตุ

1. จากข้อ 6.4 ถึง 6.7 หมายถึงใช้เครื่อง Spectrophotometer ชนิด double beam
2. ค่าที่ได้ในข้อ 6.5 นี้คือค่า A_0
3. จากข้อ 6.6 จะทำให้ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่อ่านได้ในข้อ 6.7 ทั้งหมด คือค่า ΔA โดยอัตโนมัติ

7. การวิเคราะห์ คำนวณผล

7.1 สมการสำหรับคำนวณปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืน (absorbed dose) ใน Fricke คือ

$$D_F = \Delta A / (\rho \epsilon G d) \quad (1)$$

เมื่อ

D_F = ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนใน Fricke มีหน่วยเป็นเกรย์, Gy

ΔA = ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของ Fricke ที่เปลี่ยนแปลง ($A_1 - A_0$) ที่ 303 nm

ρ = ความหนาแน่นของ Fricke, $1.024 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

ϵ = molar linear absorption coefficient, $\text{m}^2.\text{mol}^{-1}$

G = radiation chemical yield of feric ions, mol.J^{-1}

d = optical pathlength of the dosimetric solution in the cuvette, m

7.2 การแปลงค่าปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนใน Fricke ไปเป็นปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนในน้ำ (absorbed dose in water, D_w) ทำได้โดยการใช้สมการ

$$D_w = 1.004 D_F \quad (2)$$

ซึ่งสมการนี้จะใช้ได้ ต่อเมื่ออุณหภูมิขณะฉายรังสีและอุณหภูมิขณะอ่านค่า ของ Fricke เท่ากับ

25°C

หมายเหตุ ค่า \mathcal{E} และ G ที่แนะนำโดย ASTM ที่อุณหภูมิ 25 °C คือ

$$\mathcal{E} = 219 \text{ m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$G = 1.61 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{J}^{-1}$$

7.3 ที่อุณหภูมิขณะฉายรังสีและอุณหภูมิขณะอ่านผล ที่ไม่เท่ากับ 25 °C ให้แก้ค่า \mathcal{E}, G โดยสมการ

$$\mathcal{E}_t, G_t = 352 \times 10^{-6} [1+0.007(t-25)] \times [1+0.0015(t'-25)] \quad (3)$$

เมื่อ

t = อุณหภูมิขณะอ่านผล

t' = อุณหภูมิขณะฉายรังสี

ในสมการ (3) นี้จะใช้ได้ ต่อเมื่ออุณหภูมิขณะฉายรังสีอยู่ระหว่าง 10 - 60 °C และอุณหภูมิขณะอ่านผลด้วย spectrophotometer อยู่ระหว่าง 15 - 35 °C

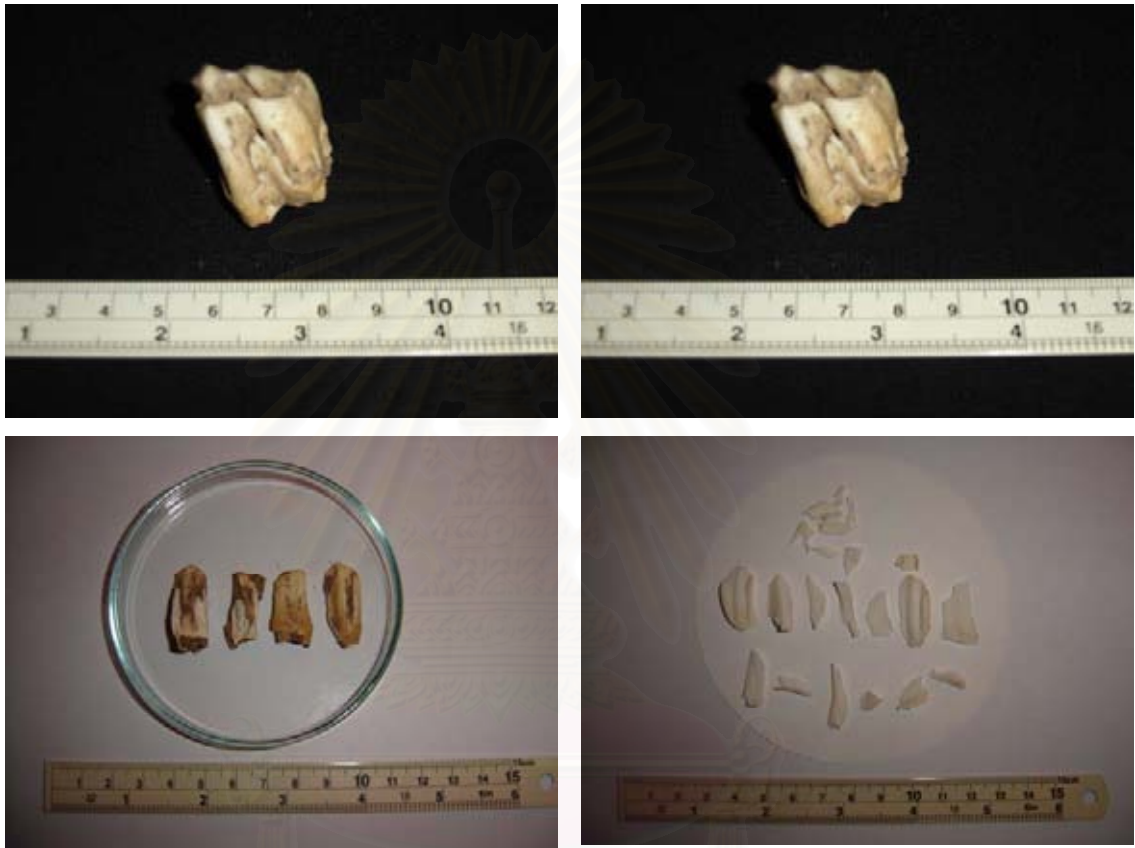
7.4 เมื่ออุณหภูมิขณะฉายรังสีเท่ากับ 25 °C อุณหภูมิขณะอ่านผลเท่ากับ 25 °C และอ่านด้วย cuvette ที่มีช่องแสงผ่านขนาดความกว้าง 1 cm และใช้ค่า \mathcal{E} และ G ตามที่แนะนำโดย ASTM นั้น จะทำให้ได้สมการที่ปรับค่าจากสมการ (2) เป็นดังนี้

$$D_w = 278 \Delta A \quad (4)$$

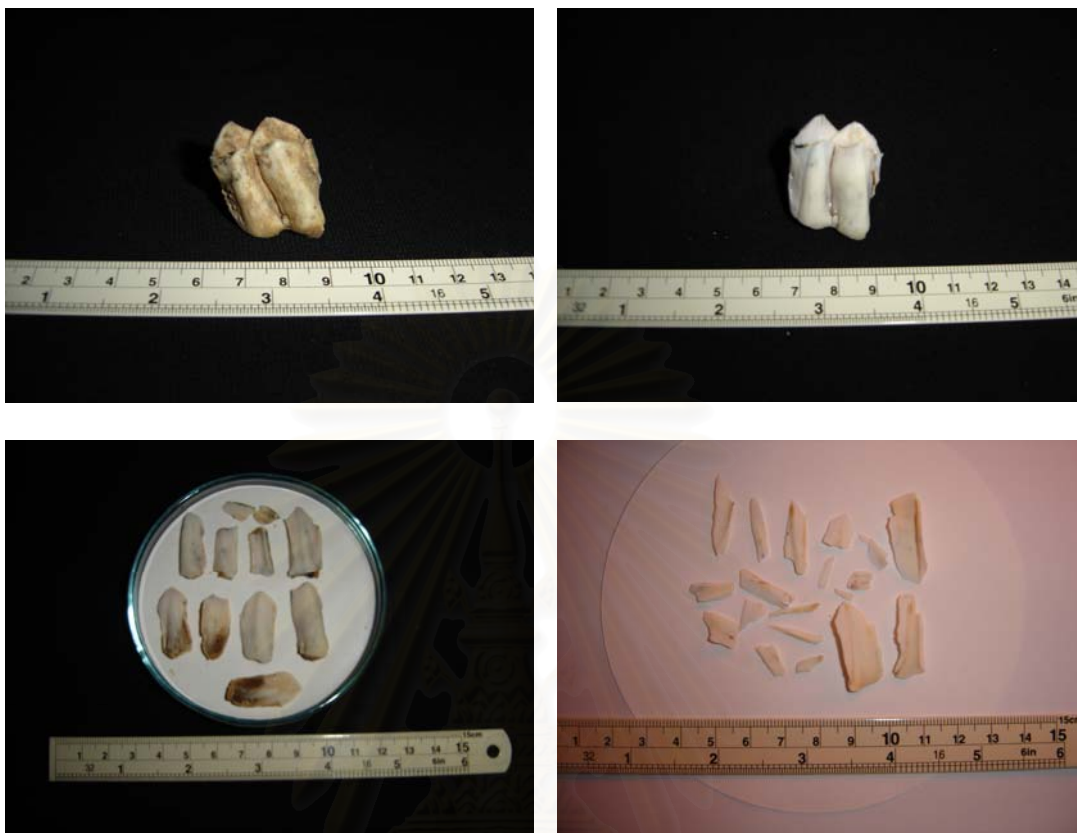
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

รูปภาพตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณที่ได้จากหลุมขุดค้นที่ 1 S23W10
ภายในแหล่งโบราณคดีเพิงผาล้อด อำเภอบางมะฝ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน



รูปที่ ข 1 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1163 -A3671 (#1163 -A3671 MHS'45 THAMLOD AREA I
S23W10 NWQ 3 Level 20. 340-350 cm.dt.) ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อ
เคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีกรงเขี้ยว



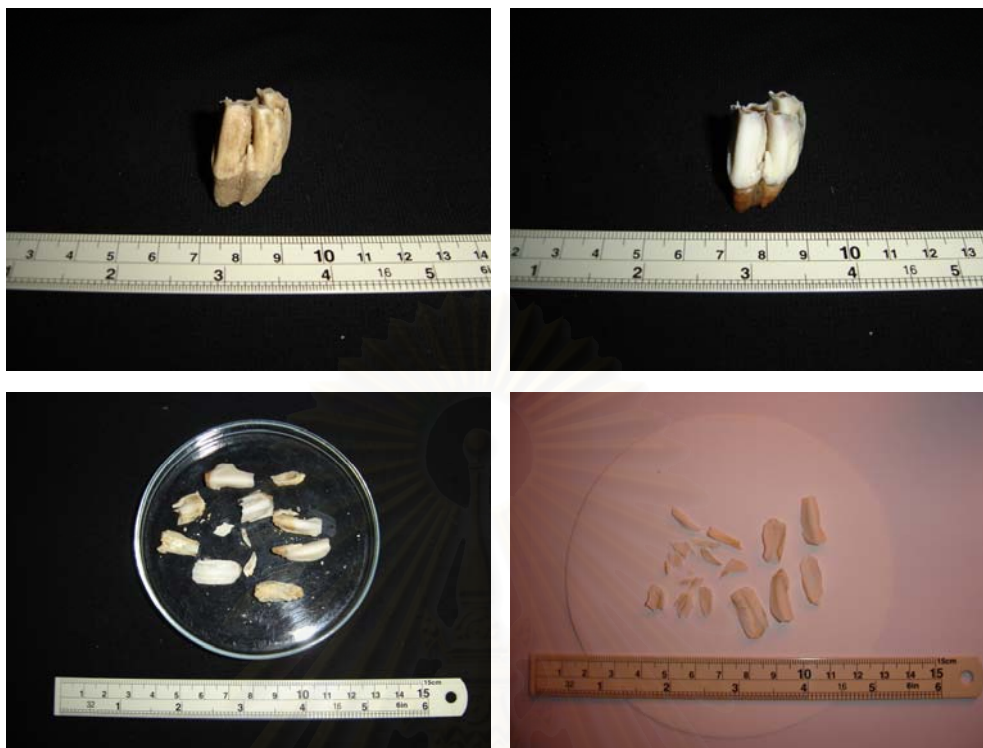
รูปที่ ข 2 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1453 (#1453 MHS'45 THAMLOD AREA I S23W10 NEQ 4 Level 26. 400-410 cm.dt.) เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีการเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการ ออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข3 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 919 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีกรเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข 4 ตัวอย่างพินสัตว์ รหัส # 1125 เป็นพินขนาดกลาง และไม่มีกรเผา ที่ผ่านการเอา ส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบพินที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



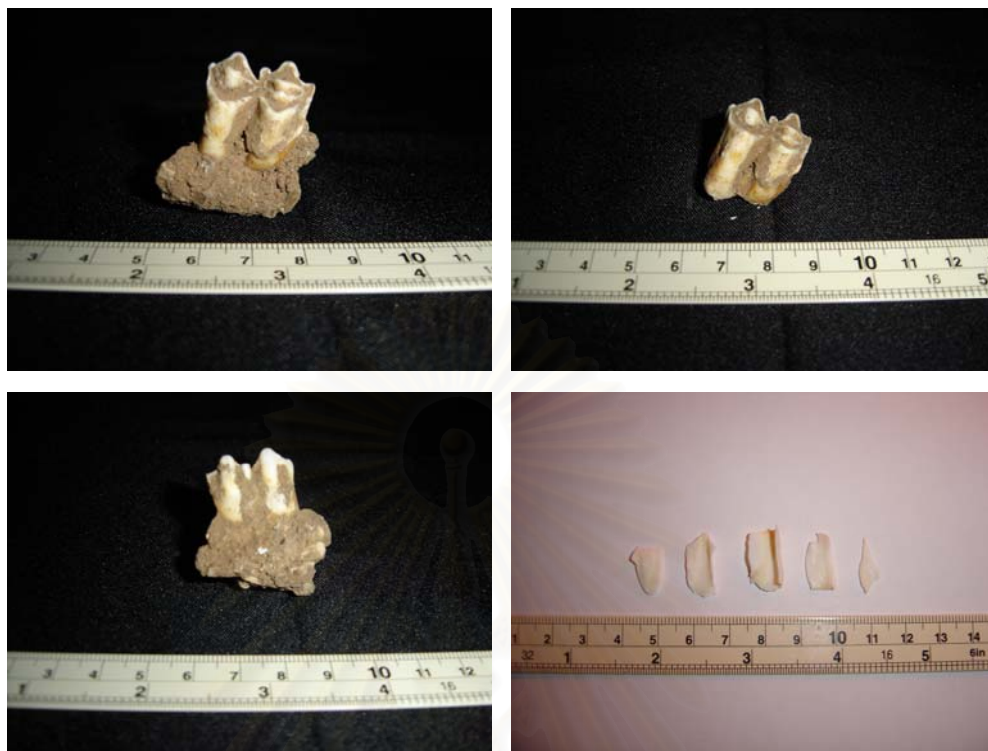
รูปที่ ข5 ตัวอย่างพินสัตว์ รหัส # 1695 เป็นพินขนาดกลาง และไม่มีรอยแผล ที่ผ่านการเอา ส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบพินที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข 6 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 981-1 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีกรเขา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



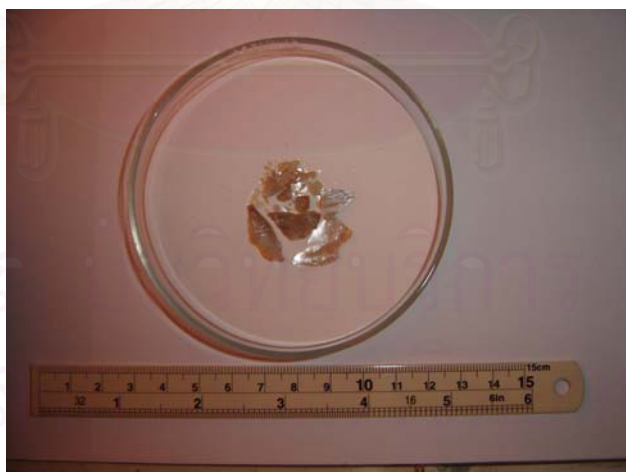
รูปที่ ข 7 ตัวอย่างฟันสัตว์ รหัส # 1151/A4233 เป็นฟันขนาดกลาง และไม่มีกรเขา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบฟันที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข 8 ตัวอย่างพินสัตว์ รหัส # 1151/A4234 เป็นพินขนาดกลาง และไม่มีกรเผา ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อเคลือบพินที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข9 ตัวอย่างเปลือกหอยหอยน้ำจืดโบราณสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae) รหัส # 1583-1 ที่ผ่านการเอาส่วนที่ไม่ต้องการออกจนเหลือเนื้อผิวชั้นในของกาบที่สะอาดพร้อมทำการอ่านสัญญาณ ESR

ภาคผนวก ค
รูปภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



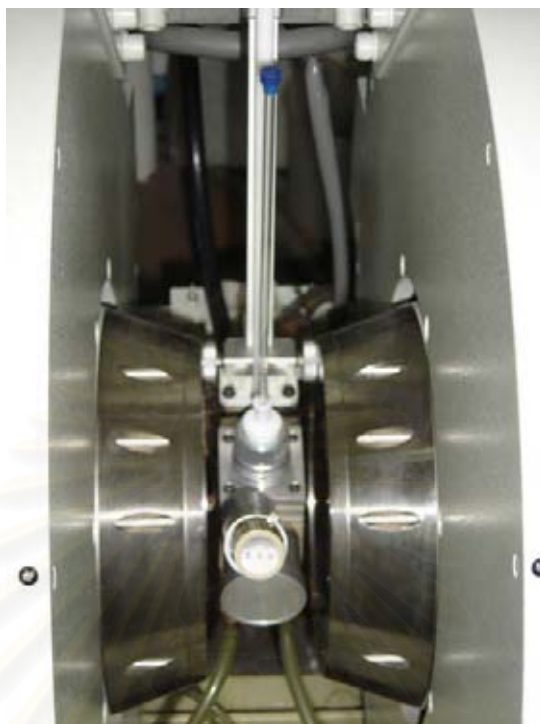
รูปที่ ค 1 เครื่อง Eletron Spin Resonance Spectrometer รุ่น JEOL ES-IPRITS/RE-2X ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron) cavity resonator เป็นแบบ cylindrical TE_{011} ใช้ Microwave Bridge ในช่วง X – band ของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค 2 เครื่องควบคุมป้อนสนามแม่เหล็ก



รูปที่ ค 3 Microwave Bridge ช่วง X – band



รูปที่ ค 4 cavity resonator แบบ cylindrical TE_{011}



รูปที่ ค 5 หลอดแก้วควอตซ์สำหรับบรรจุตัวอย่างที่บดเป็น powder แล้ว



รูปที่ ๖ ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel



รูปที่ ๗ อุปกรณ์ลดทอนรังสี (ตะกั่ว) (Shielding attenuation = 90 %) ที่ทำหน้าที่กำบังรังสีแกมมาเพื่อเพิ่มเวลาในการฉายรังสีใน Chamber ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel



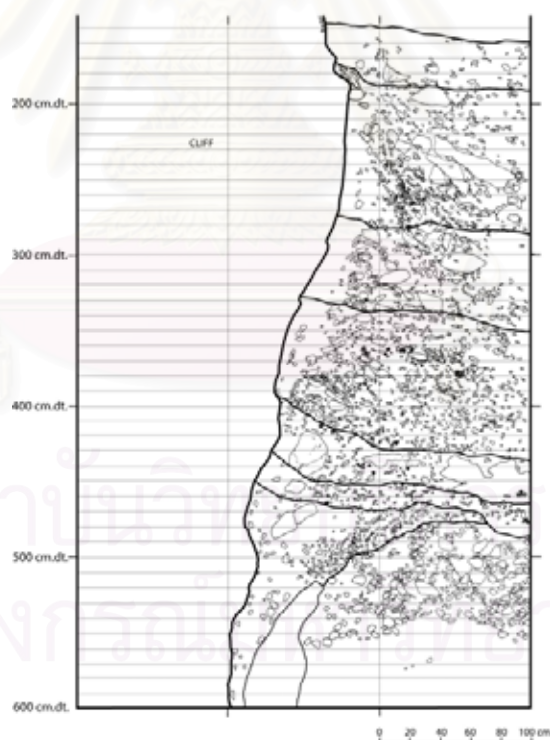
รูปที่ ๘ หัววัดรังสีแบบ HPGe ขนาด 76×76 mm



รูปที่ ๙ Amplifier และ multichannel analyzer



รูปที่ 10 Profile-Areal ของหลุมชุดคันที่ 1 S23W10



รูปที่ 11 Profile-Areal ด้านทิศตะวันตกของหลุมชุดคันที่ 1 S23W10
ผนังด้านที่เก็บตัวอย่างเพื่อทำการวิจัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภกิจ อรรถบุตร เกิดเมื่อวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2514 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัยนนทบุรี เมื่อปีการศึกษา 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง สาขาวิชาเคมี จากมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ เมื่อปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546 ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ 3 กลุ่มงานมาตรฐานการวัดรังสีและกัมมันตภาพรังสี สำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย