

การกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิด

โดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

ศุภกิจ อรรถบุตร* และ ชยากริต สิริอุพัฒน์

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โทรศัพท์ 0 2218 6781, E-Mail: supakij_athabutra@yahoo.com.au, chyagrit@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ได้ทำการกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (*Carditidae*) โดยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (อีเอสอาร์) ซึ่งขุดค้นพบ ณ ตำแหน่งขุดค้นที่ 1 (S23W10) บริเวณเพิงผาล้าลอด แหล่งโบราณคดีเพิงผาล้าลอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน กำหนดค่าอายุได้ 33,200 - 18,700 ปี ของตัวอย่างเคลือบฟันของสัตว์ และ 32,300 ปีของตัวอย่างเปลือกหอยน้ำจืดโบราณตามลำดับ ผลการวิเคราะห์อีเอสอาร์สเปกตรัม ได้ค่า g-factor $g_1 (g_{||}, g_{center}) = 2.0030 - 2.0036$, $g_2 = 2.0040 - 2.0041$ และ $g_3 (g_{\perp}) = 1.997 - 1.9988$ ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic สำหรับเคลือบฟันของสัตว์ และได้ค่า g-factor (g_{center}) = 2.0042 ± 0.0003 ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของ SO_3^- จากตัวอย่างเปลือกหอยน้ำจืดโบราณ

คำสำคัญ: การกำหนดอายุโดยวิธีอีเอสอาร์ แหล่งโบราณคดีเพิงผาล้าลอด เคลือบฟันสัตว์ เปลือกหอยโบราณ

Electron Spin Resonance Dating

of Some Animal Teeth Enamel and Shell Fossils

Supakij Athabutra* and Chyagrit Siri-Upathum

Department of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phone: 66 2218 6781, E-Mail: supakij_athabutra@yahoo.com.au, chyagrit@chula.ac.th

Abstract

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, Thailand. Age estimation for wave-induced breaching of the cavity and initial sand deposition (Level 19-29) was 33,200 - 18,700 years and 32,300 years for teeth enamel and the shell fossils of *Nodularia scobinata sp. (Carditidae)* respectively. ESR spectra showed g-factor $g_1 (g_{||}, g_{center}) = 2.0030 - 2.0036$, $g_2 = 2.0040 - 2.0041$ and $g_3 (g_{\perp}) = 1.997 - 1.9988$ formed by CO_2^- orthorhombic free radical for teeth enamel and g-factor (g_{center}) = 2.0042 ± 0.0003 formed by SO_3^- free radical for fresh shell fossils.

Key words: ESR Dating, The Thamlod Rockshelter, Animal Teeth Enamel, Shell fossils

บทนำ

รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา ที่ปลดปล่อยมาจากธาตุกัมมันตรังสีเช่น ยูเรเนียม (^{238}U และ ^{235}U) ทอเรียม (^{232}Th) ธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ ธาตุโพแทสเซียม (^{40}K) ในสิ่งแวดล้อม และรังสีคอสมิก รวมถึงการแผ่รังสีธรรมชาติดังกล่าวจากตัวอย่างโบราณวัตถุเองด้วย ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีเหล่านั้นกับวัสดุหรือสารประกอบทางอนินทรีย์หรืออินทรีย์ภายในตัวอย่างโบราณวัตถุ ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่อง (Defect) ขึ้นในตัวอย่าง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เรียกว่า Radiation Damage หรือ Radiation Exposure ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนของวัสดุภายในตัวอย่างดังกล่าวได้รับพลังงาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอะตอมหรือโครงสร้างผลึกของวัสดุในตัวอย่างขึ้น เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ทำให้เกิดสภาพที่มีอิเล็กตรอนตัวหนึ่งซึ่งมีสปินตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งที่คู่กันนั้นถูกจับ (Trapped) โดยอนุมูลอิสระนั้น และจะย้ายจาก Valance Band ไปอยู่ใน Conduction Band และทำให้เกิด “หลุม” ขึ้นใน Valance Band ในบางโอกาสอิเล็กตรอนและหลุมนี้จะกลับมารวมตัวกันใหม่โดยทันที [1] แต่ส่วนใหญ่อิเล็กตรอนมักถูกตรึงหรือถูก Trapped โดยอนุมูลอิสระหรือ Impurity ที่อยู่ใน Conduction Band เป็นเวลานาน และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณรังสีที่ได้รับเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดอิเล็กตรอนไม่ครบคู่เหล่านั้นสะสมอยู่ตลอดเวลาอันยาวนาน เมื่อทำการตรวจจับสัญญาณของเรโซแนนซ์อิเล็กตรอน (Resonance Electron) เนื่องจากการดูดกลืนความถี่ช่วงไมโครเวฟของอิเล็กตรอนที่ไม่ครบคู่เหล่านั้น สัญญาณหรือความเข้มของอิเล็กตรอนโคเดเคียที่วัดได้ จะมีสัดส่วนแปรตามค่า “Total Dose of Natural Radiation (TD)” ซึ่งสามารถตรวจวัดได้โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (Electron Spin Resonance Spectrometer, ESR) [1]

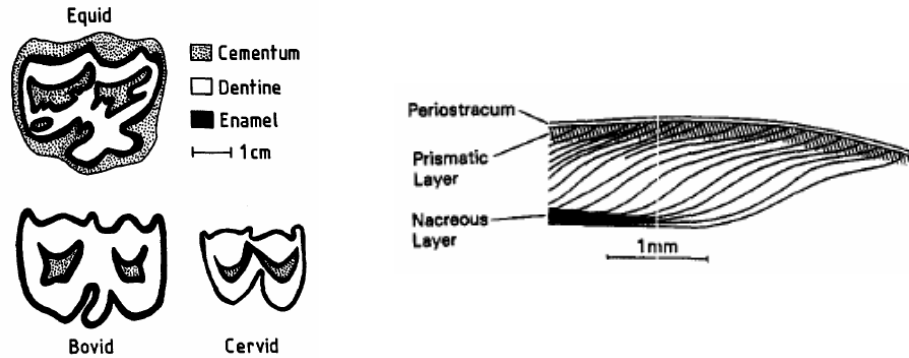
ในการตรวจวัดโดยเครื่อง ESR จะทำการตรวจวัด ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางของ Derivative Curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor อันเนื่องมาจากการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอิเล็กตรอนเดี่ยว (Paramagnetic Center) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของสัญญาณของเครื่อง ESR ปริมาณของการดูดกลืนพลังงานที่วัด ณ จุดศูนย์กลางของ Derivative Curve ขึ้นอยู่กับ Dose Rate และระยะเวลาที่ตัวอย่างได้รับรังสีเป็นเวลาอันยาวนาน ซึ่งอายุที่ได้ของการวิเคราะห์โดยวิธี ESR กำหนดได้จากสมการที่ (1)

$$AD = \int_0^T D(t) dt \quad (1)$$

โดยที่ค่า AD (Archaeological Dose) หาได้จากวิธี Additive Dose โดยการนำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการแยกทางเคมีแล้วมาฉายรังสีแกมมาเป็นปริมาณ 1/4, 1/2, 3/4 และ 1 เท่าของปริมาณรังสีที่สารประกอบได้รับจากธรรมชาติตามลำดับ แล้วนำสารประกอบเหล่านั้นไปวัดค่าสัญญาณของเรโซแนนซ์อิเล็กตรอน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ ด้วยวิธี Linear Extrapolation หรือ Exponential Extrapolation โดยแกน X คือ ค่า Additive Dose ที่เติมและแกน Y คือค่า ESR Signal จากนั้นต่อเส้นกราฟตัดแกน X จะได้ค่า AD

ค่า AD หรือ TD ที่ได้ เมื่อทราบค่าของ “Annual Dose Rate of Nature Radiation (D)” หรืออัตราการได้รับรังสีของวัสดุในตัวอย่างต่อเดือนหรือปี จะสามารถหาอายุของตัวอย่างโดยวิธี ESR หรือ T_{ESR} ได้จากสมการ (2) คือ

$$T_{ESR} = \frac{TD}{D} \quad \text{หรือ} \quad T_{ESR} = \frac{ED}{D} \quad (2)$$



รูปที่ 1 รูปแบบฟันคุด้านบนของโครงสร้างฟันจากฟอสซิลของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และแสดงภาคตัดขวางภายในของเปลือกหอยประเภท Aragonitic Mollusc Shell [2]

สารเคลือบฟันที่เป็นองค์ประกอบที่เคลือบเนื้อฟันนั้นจะมีส่วนประกอบของ PO_4^{3-} ไอออนเป็นประกอบที่สำคัญของแร่ธาตุในกลุ่มฟอสเฟต ซึ่งจะมีทั้งในส่วนของอินทรีย์สาร ได้แก่ Collagen และในส่วนของอนินทรีย์สาร ได้แก่ Apatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2]$ ($\text{X} = \text{OH}, \text{F}, \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) ซึ่งมีรูปผลึกระบบสามแกนราบ (Hexagonal System) โดยแร่ธาตุดังกล่าวเป็นส่วนหนึ่งของแร่ธาตุในกลุ่มฟอสเฟต ซึ่งในตัวอย่างโบราณวัตถุฟันและกระดูกนั้นจะมีแร่ธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบ ในปริมาณที่เพียงพอ โดยเฉพาะรูปผลึกของ Hydroxyapatite $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2]$ เมื่อเกิดกระบวนการทาง Radiation Damage ทำให้โครงสร้างของ Hydroxyapatite เปลี่ยนไปหรือแตกออกไปบางส่วน จนเกิด Impurity Ions หรือเกิด Defect ในโครงสร้างผลึก และในขณะเดียวกันจะทำหน้าที่ 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 ซึ่งโดยสรุปแล้ว ค่า g ที่ได้จากสเปกตรัม ESR ของเคลือบฟันโดยทั่วไปคือ Hydroxyapatite Orthorhombic CO_2^- ที่ $g = 2.0036, 1.9975$ [1]

ส่วนในตัวอย่างฟอสซิลประเภทเปลือกหอย (Shell Fossil) จะมีส่วนประกอบของส่วนที่เป็นแร่ธาตุ CaCO_3 คือส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกของ Aragonite และ Calcite และส่วนที่เป็นอินทรีย์วัตถุของโปรตีนที่เรียกว่า Conchiolin ซึ่งโดยสรุปคือจะเกิด 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^- ซึ่งโดยสรุปส่วนใหญ่แล้วสเปกตรัมของ ESR มักจะวัดค่าการดูดกลืนไมโครเวฟที่เกิดจากการ Defect ของ Aragonite และ Calcite จาก CO_2^- Radical เป็นสำคัญ [1]

งานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค ESR ในการกำหนดอายุเคลือบฟันของสัตว์และเปลือกหอยโบราณบางชนิด ที่ขุดค้นพบ ณ แหล่งโบราณคดีเพิงผาลำดอด ซึ่งตั้งอยู่ในศูนย์ศึกษาธรรมชาติและสัตว์ป่าถ้ำน้ำลอด ในเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่ากลุ่มแม่น้ำปายตอนเหนือ ในท้องที่ตำบลลำดอด อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน [3] ซึ่งแหล่งโบราณคดีเพิงผาลำดอด เป็นเพิงผาขนาดเล็ก สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 640 เมตร ตัวอย่างฟันที่ใช้เป็นตัวอย่างฟันสัตว์ประเภทกวางและกระบือโบราณ และเปลือกหอยโบราณที่มีอายุในช่วงสมัยไพลสโตซีน

ตอนปลาย [4] ประมาณ 22,190 -12,100 ปีมาแล้ว ตัวอย่างเหล่านี้พบในหลุมขุดค้นพื้นที่ที่ 1 ขนาด 4 เมตร× 4 เมตร ซึ่งอยู่ในความรับผิดชอบของโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน คณะโบราณคดี มหาวิทยาลัยศิลปากร

วิธีการ

1. การเก็บตัวอย่างดินสำหรับวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual Dose และคัดเลือกจากตัวอย่างฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณจากหลุมขุดค้นที่ 1 (S23W10) ในช่วงความลึกขุดค้นที่ระดับสมมติ 19 - 29 (Level 19- 29) ซึ่งตำแหน่งของตัวอย่างดินจะตรงกับตำแหน่งของตัวอย่างโบราณวัตถุ
2. ทำความสะอาดฟันให้สะอาดให้ปราศจากเศษดิน เช็ดให้แห้ง นำฟันที่ทำความสะอาดแล้วมาล้างและจذبน้ำหนัก และนำไปอบเพื่อในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำ บันทึบน้ำหนักเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำ (%W)
3. ล้างฟันให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้เศษดินหมดไป จากนั้นทำการแยก Enamel ให้แยกออกจากเนื้อฟันออกเป็น 2 ส่วน เพื่อความสะดวกในการวัดสัญญาณ ESR
4. นำเอาส่วนของ Enamel มาจัดหินปูนให้หมดไปด้วยสารละลายกรด HCl เข้มข้น 40% และกำจัด Radiation Damage ที่เกิดจากรังสีแอลฟาออกไป จากนั้นละลายเนื้อฟันลงในสารละลายกรด HCl 50 ml ในบีกเกอร์ให้หมด และนำสารละลายกรดที่ละลายแร่ธาตุส่วนหน้าของฟัน และละลายหินปูนออกจาก Enamel มาผสมรวมกัน และกรองสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป
5. นำสารละลายในข้อที่ 4 ไปหาปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม ในหน่วย ppm ด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) เพื่อคำนวณค่า Internal Annual Dose และนำ Enamel ที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วมาล้างน้ำกลั่นให้สะอาด และแช่ลงในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35% (v/v) เป็นเวลา 40 นาที และนำมาแช่ลงในน้ำกลั่นอีกครั้งให้สะอาด ใส่ลงในครุชีเบล และอบในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดให้ละเอียดเป็นผง ด้วยครก Agate ผ่านตะแกรงร่อนที่มีช่องขนาด 106 μm
6. นำเปลือกหอยที่ทำความสะอาดแล้วมาล้างและจذبน้ำหนัก และนำไปอบเพื่อในตู้อบที่ 50°C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อระเหยน้ำออกไป บันทึบน้ำหนักเพื่อคำนวณปริมาณความชื้น (%W) และนำเปลือกหอย 1 เปลือกเป็นตัวแทนบดให้เป็นผง เพื่อทำการวัดปริมาณธาตุปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วยเทคนิค Neutron Activation Analysis (NAA) โดยใช้วิธี Gamma Spectroscopy ในการวัดปริมาณธาตุเพื่อคำนวณค่า Internal Annual Dose
7. ล้างเปลือกหอยให้สะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้เศษดินหมดไป จากนั้นทำการจัดหินปูนส่วนหน้าออกด้วยการแช่ในกรดอะซิติก [5] และใช้มีดผ่าตัด ขูดผิวหน้าออกให้บางจนเหลือแต่เนื้อด้านใน นำเปลือกหอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้วมาล้างน้ำกลั่นให้สะอาด และแช่ลงในไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) 35% (v/v) เป็นเวลา 40 นาที และนำมาแช่ลงในน้ำกลั่นอีกครั้งให้สะอาด ใส่ลงในครุชีเบล อบที่ 50°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาบดให้ละเอียดเป็นผง ด้วยครก Agate ผ่านตะแกรงร่อนที่มีช่องขนาด 106 μm
8. นำตัวอย่างดินบรรจุไว้ในกระบอกพลาสติก และทำการวัดปริมาณธาตุปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียม, ทอเรียม และโพแทสเซียม-40 หน่วยเป็น ppm ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer ในการวัดปริมาณธาตุเพื่อคำนวณค่า External Annual Dose ในแต่ละระดับ

9. ทำการฉายรังสีแกมมาโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Gammacell 220 Excel และใช้สารละลาย Fricke เป็นตัวเทียบมาตรฐานปริมาณรังสีที่ฉายจริงเพื่อใช้ในการคำนวณ โดยการแบ่งตัวอย่างที่บดได้ออกเป็น 5 ส่วน ฉายรังสีที่มีปริมาณ 0, 20, 40, 60 และ 80 Gy ตามลำดับ

10. ทำการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบพื้นสัตว์และเปลือกหอยโบราณ ด้วยเครื่อง ESR Spectrometer รุ่น JEOL ES-IPRITS/RE-2X ที่ใช้หลอดกำเนิดรังสีไมโครเวฟที่ได้จากหลอดคลิสตรอน (Klystron), Cavity Resonator เป็นแบบ Cylindrical TE_{011} , Microwave Bridge ช่วง X – band และสารมาตรฐานแมกนีซีนในการปรับเทียบค่า g-factor โดยการบรรจุตัวอย่างทั้ง 5 ส่วนที่ทำการฉายรังสีแล้วบรรจุลงในหลอดแก้ววอร์ตซ์ประมาณ 0.15 กรัมใน Cavity Resonator ปรับค่าเพื่อหา Condition ที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณ

11. ทำการวัดความสูงของพีค (Peak Hight) ซึ่งแปรตามความเข้มสัญญาณจากการวัดความสูงของพีค รวม 5 ค่าตามค่า Additive Dose ที่ได้รับ

12. นำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟ ด้วยวิธี Linear Extrapolation หรือ Polynomial Extrapolation โดยแกน x คือค่า Additive Dose ที่เติมและแกน y คือค่า ESR Signal จากนั้นต่อเส้นกราฟตัดแกน x จะได้ค่า AD

13. หาอายุของตัวอย่าง (T_{ESR}) โดยวิธี ESR ได้จากสมการ (2) ซึ่งค่า AD หรือ TD ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 12 และค่า Annual Dose ที่ได้จากผลบวกของค่า External Annual Dose และค่า Internal Annual Dose ซึ่งได้จากการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสียูเรเนียมและทอเรียม หน่วยเป็น ppm ด้วยเครื่อง Gamma Spectrometer และ ICP-AES ตามลำดับ และทำการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของค่า Absorbed Dose ในตัวอย่าง หรือค่า Uncertainties (σ)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual Dose ในตัวอย่างดิน

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างดิน
ด้วยเทคนิค 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 26	2.41	12.42	1.23
Level 29	2.69	14.26	1.18

2. ผลการหาปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่างดินในธรรมชาติ (Water Content, %W)

ตารางที่ 2 ผลการหา % Water Content ในตัวอย่างดิน

Level	% Water content
Level 19	3.58
Level 20	3.49
Level 26	3.08
Level 29	5.28

จากข้อมูลตามตารางที่ 1 และ 2 นำมาคำนวณค่า External Dose หรือ AD_{Ex} จะใช้ Dose Rate อันเนื่องมาจากรังสีเบตา และแกมมา และรังสีคอสมิก ซึ่งจากการคำนวณได้ผลตามตารางที่ 3 ดังนี้

ตารางที่ 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 26	0.33	0.27	0.15	0.75
Level 29	0.22	0.19	0.15	0.56

3. ผลการวัดปริมาณธาตุกัมมันตรังสีเพื่อคำนวณ Annual Dose (Internal Dose Rate) ในตัวอย่างเคลือบพื้นและเปลือกหอยโบราณ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเคลือบพื้นโดยวิธี 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 5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในตัวอย่างเปลือกหอย
ด้วยเทคนิค NAA โดยใช้เครื่อง Gamma Spectrometer

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

จากข้อมูลตามตารางที่ 4 และ 5 นำมาคำนวณค่า Internal Dose หรือ AD_{in} จะใช้ Dose Rate อันเนื่องมาจากรังสีแอลฟา และเบตา ซึ่งจากการคำนวณได้ผลตามตารางที่ 6 และ 7 ดังนี้

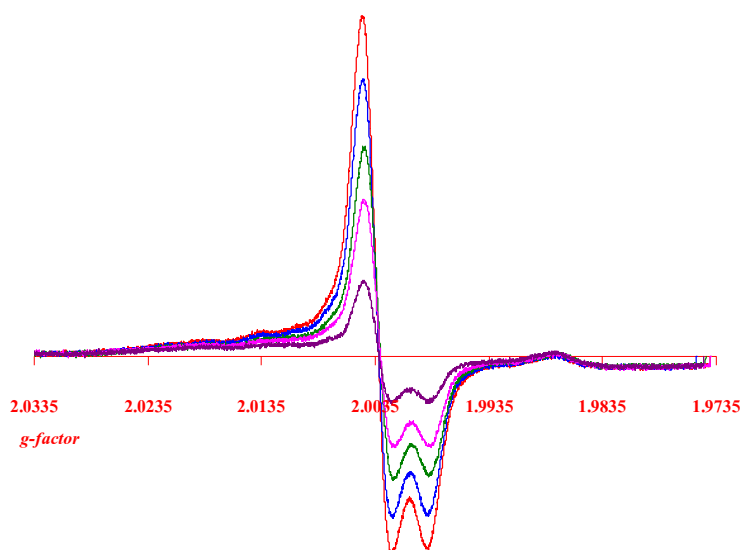
ตารางที่ 6 ผลการคำนวณค่า Annual Dose (Internal dose) ในตัวอย่างเปลือกหอย

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 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

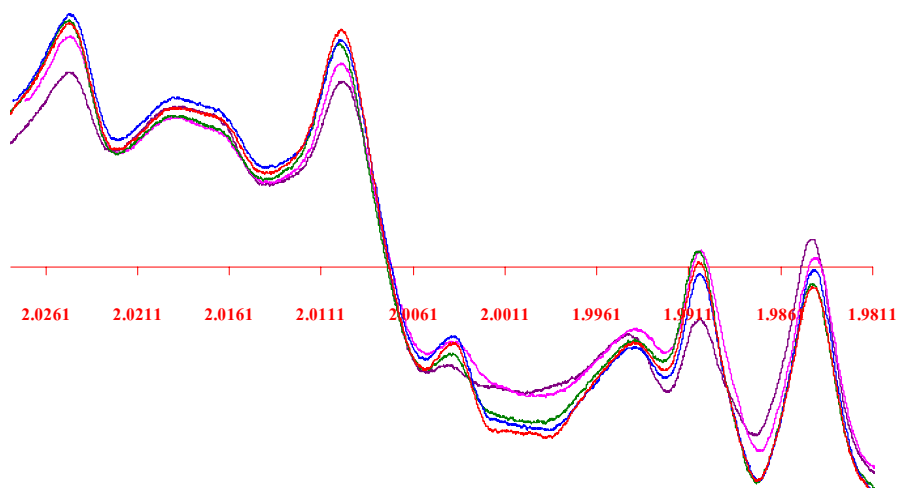
4. จากการนำตัวอย่างเปลือกหอยไปวัดด้วยเครื่อง ESR Spectrometer พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ Derivative Curve ของการเกิด Defect ของ Apatite ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic [1] ดังสเปกตรัมของ Derivative Curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ในรูปที่ 2



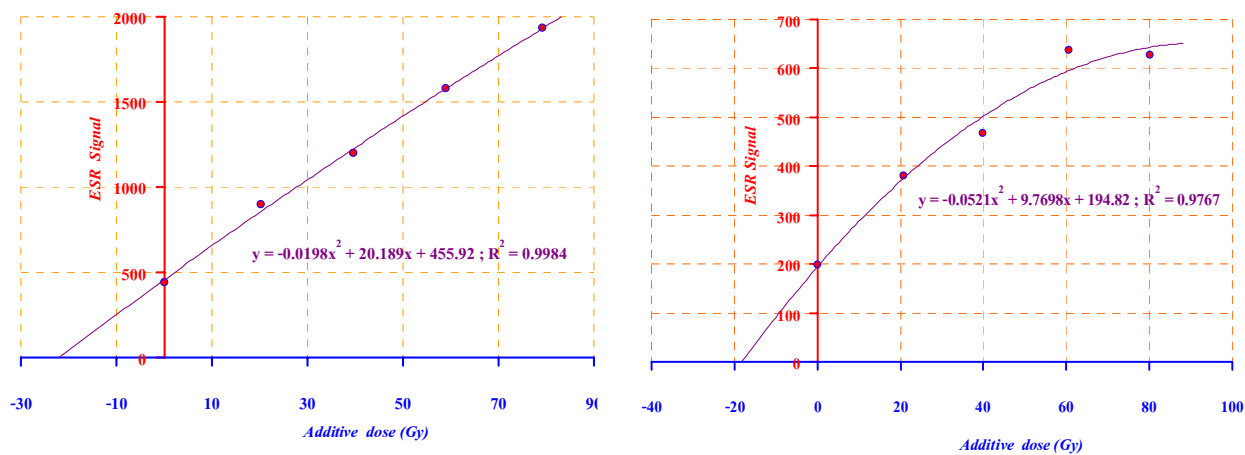
รูปที่ 2 สเปกตรัมของ Derivative Curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor

5. จากการนำตัวอย่างเปลือกหอยไปวัดด้วยเครื่อง ESR Spectrometer พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ Derivative Curve ของการเกิด Defect ของ Aragonite ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของ SO_3^- [6,7] ที่ได้ค่า g-factor ที่ 2.0037 ± 0.0003 ดังรูปที่ 3

6. นำค่าความเข้มสัญญาณที่ได้มาพลอตระหว่างค่าความเข้มสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ดังรูปที่ 4



รูปที่ 3 สเปกตรัมของ Derivative Curve ที่พลอตระหว่างค่าความเข้มของสัญญาณ ESR กับค่า g-factor ของเปลือกหอยสายพันธุ์ *Nodularia scobinata* (Carditidae)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR Signal กับค่า Additive Dose ด้วยวิธี Polynomial Extrapolation ของเกลือโพแทสเซียม (ซ้าย) และเปลือกหอยโบราณ (ขวา)

6. ทำการคำนวณอายุซึ่งผลการวิจัยการกำหนดค่าอายุได้สรุปผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปผลการกำหนดค่าอายุโดยวิธี Electron Spin Resonance ของเปลือกฟันสัตว์และเปลือกหอยโบราณ

430-440 cm.	# 1583-1	-	2.0037+0.0003 <i>g-factor</i>	-	18.17874	0.000562	32,300
ความลึก	รหัสตัวอย่าง		2.0042+0.0003		ปริมาณ Total dose of natural	ค่า Annual dose รวม	ค่าอายุ (ปี)
	# 1583-3	g_2	2.0044+0.0003	$g_3 (g_{\perp})$	18.4	0.000562	64,900
			2.0044+0.0003		radiation (TD) (Gy)	(Gy)	
					17.8	0.000562	
330 – 340 cm.	# 1583-4	-	2.0044+0.0003	-	13.3	0.000562	101,800
	# 919	2.0041	2.0033	1.9988	22.103±3.475	0.000816	27,000 ± 4,200
	# 1583-5	-	2.0045+0.0003	-	23.5	0.000562	116,600
	#1695	2.0040	2.0033	1.9988	20.9764±3.288	0.000829	25,200± 3,900
	# 1583-6	-	2.0031+0.0003	-	18.5	0.000562	101,900
	# 1125	2.0039	2.0030	1.9984	21.7364±3.409	0.000796	27,300 ± 4,280
	# 1583-7	-	2.0042+0.0003	-	15.1	0.000562	90,300
	# 1583-8	-	2.0046+0.0003	-	46.74	0.000562	77,100
	#1163	2.0040	2.0030	1.998	21.0716±3.283	0.000956	22,000± 3,400
340 – 350 cm	# 1151-1	2.0047	2.0036	1.9991	27.3288±4.648	0.000822	33,200± 5,600
	# 1151-2	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± 5,000

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

จากการวัดสัญญาณในเคลือบฟันสัตว์พบว่าค่า g -factor และลักษณะพีคที่ได้ มีความใกล้เคียงกับค่าการเปลี่ยนแปลงตรงจุดศูนย์กลางของ Derivative Curve ของการเกิด Defect ของ Apatite ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระของ CO_2^- แบบ Orthorhombic แต่ในค่า g_1 อาจมีการเปลี่ยนแปลงไม่เหมือนกับฐานข้อมูลเดิม เพราะอาจเกิดการคลาดเคลื่อนเนื่องจากธรรมชาติของสารประกอบ Hydroxyapatite ในแต่ละตัวอย่างแต่ละห้องที่ที่ขุดค้นพบ แต่ในภาพรวม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับพีคของสารมาตรฐานที่ได้พบว่าค่า g -factor ที่ได้มีลักษณะที่คล้ายกัน และค่า g_2 ที่มีค่าความแตกต่างที่ไม่มากนัก

และผลจากการวัดสัญญาณในเปลือกหอยพบว่าเนื่องจากขีดจำกัดของเครื่อง ESR ที่ไม่สามารถใช้ Power (mW) ที่เกิน 1 mW ได้เนื่องจากกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ไม่แน่นอน อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องได้ และเนื่องจากสภาพของหอยที่มีมลทินสูง และมีปริมาณธาตุแมงกานีสในปริมาณสูงจนไม่สามารถที่จะมองเห็น Electron Trap ได้ ซึ่งสามารถทำการกำหนดอายุได้พอสังเขปในกำลัง Power (mW) ที่เท่ากับ 1 mW เท่านั้น ซึ่งผลการกำหนดอายุพอสังเขปพบว่าได้ค่าอยู่ในช่วงที่นาที่จะยอมรับได้ในระดับหนึ่ง ส่วนในการวัดปริมาณ Total Dose of Natural Radiation (TD) โดยวิธี Additive Dose ที่ได้จากการวัดสัญญาณ Electron Trap ในโครงสร้างผลึกของเคลือบฟันสัตว์ พบว่ามีปริมาณที่อยู่ในเกณฑ์เดียวกัน เมื่อทำการกำหนดอายุ ผลที่ได้จึงมีอายุที่ตรงและใกล้เคียงกับทางคณะวิจัยที่ทำการศึกษาได้เป็นอย่างดี ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ และมีระดับความเชื่อมั่นในระดับหนึ่ง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2549 ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย, ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งข้าราชการและเจ้าหน้าที่จากโครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน มหาวิทยาลัยศิลปากร, สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ และสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ ที่ได้ให้คำแนะนำเอื้อเพื่ออุปกรณ์เครื่องมือในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Motoji Ikeya. New Applications of Electron Spin Resonance Dating, Dosimetry and Microscopy. Singapore: World Scientific, 1993.
- [2] Rink W. J. Electron Spin Resonance (ESR) Dating and ESR Applications in Quaternary Science and Archaeometry. Radiation Measurements 27,5/6 (1997): 975-1025.
- [3] โครงการโบราณคดีบนพื้นที่สูงในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน, ผลการขุดค้นทางโบราณคดี, [Online]. <http://highland.trf.or.th/WebHAPP1/PM/excavation.html>.
- [4] รัศมิ ชูทรงเดช. 2549. ข้อนรอยความรู้จากแหล่งโบราณคดีเพิงผาลอดและเพิงผาบ้านไร่ อำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน. พลวัตทางสังคม วัฒนธรรม และสิ่งแวดล้อมบนพื้นที่สูง ในอำเภอปางมะผ้า จังหวัดแม่ฮ่องสอน :210-230.

- [5] Molodkov A. ESR Dating of Quaternary Shells : Recent Advances. Quaternary Science Reviews 7, (1988): 477-484.
- [6] Barabus, M., The Nature of the Paramagnetic centres at $g = 2.0057$ and $g = 2.0031$ in Marine Carbonates. Nuclear Tracks and Radiation Measurements 20 (1991) : 453 – 464.
- [7] Goede, A. and Hitchman, M.A., Electron Spin Resonance Analysis of Marine Gastropods from Coastal Archaeological Sites in South Africa. Archaeometry 29 (1987) : 163 – 174.