



วิวัฒนาการทางธรณีสัณฐานวิทยาสมัยโฮโลซีนของหาดทรายดำ อำเภอลำปาง จังหวัดตราด

ธีรพร ชื่นพี*

ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 06 4742 7018 อีเมล: fsocotoc@nontri.ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.002

รับเมื่อ 29 สิงหาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 25 ตุลาคม 2566 ตอรับเมื่อ 31 ตุลาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 8 มกราคม 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

พัฒนาการของหาดมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเล ดังนั้น การเข้าใจในกระบวนการทับถมของหาดจึงมีความสำคัญต่อการคาดการณ์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างภูมิประเทศชายฝั่งกับการผันแปรของสภาพภูมิอากาศและระดับน้ำทะเลในอนาคต อย่างไรก็ตามพบว่า ในปัจจุบันการอธิบายลำดับเหตุการณ์การทับถมของหาดยังคงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากข้อมูลทางกาลวิทยาเชิงละเอียดยังมีไม่มากพอ การวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่การกำหนดอายุตะกอนทรายซิลิกาที่เคลือบด้วยแร่เกอร์ไรต์จากหาดทรายดำในอ่าวไทยตอนกลางด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน โดยวิเคราะห์ปริมาณรังสีสมมูลด้วยวิธี Multiple-aliquot Regenerative Dose และวิเคราะห์ปริมาณรังสีรอบปีจากการวัดความเข้มข้นของ ^{238}U ^{232}Th และ ^{40}K จากการคำนวณอายุตัวอย่างตะกอนที่เก็บจากชั้นตะกอนในสองหลุมสำรวจ บริเวณหาดทรายดำ อำเภอลำปาง จังหวัดตราด พบว่า อายุของตัวอย่างตะกอนมีอายุระหว่าง $9,069 \pm 590$ ปีก่อนปัจจุบัน ถึง ปัจจุบัน และมีอัตราการทับถมของตะกอนที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาสลับกับช่วงเวลาของการหยุดทับถม โดยในระหว่าง $9,069 \pm 590$ ถึง $1,405 \pm 85$ ปีก่อนปัจจุบัน ตะกอนมีการทับถมในอัตรา 0.01 มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในระหว่าง $1,405 \pm 85$ ปีก่อนปัจจุบัน ถึง ปัจจุบัน มีอัตราการทับถมเท่ากับ 0.14 มิลลิเมตรต่อปี จึงสามารถสรุปได้ว่า การรुक้าของทะเลในระดับภูมิภาคส่งผลให้เกิดการทับถมของตะกอนทรายดำในพื้นที่มาตั้งแต่สมัยโฮโลซีนตอนต้น

คำสำคัญ: วิวัฒนาการทางธรณีสัณฐานวิทยา การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน หาดทรายดำ อำเภอลำปาง จังหวัดตราด



Holocene Geomorphic Evolution of Back Sand Beach, Laem Ngop District in Trat Province

Theeraporn Chuenpee*

Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 06 4742 7018, E-mail: fsoctoc@nontri.ku.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.01.002

Received 29 August 2023; Revised 25 October 2023; Accepted 31 October 2023; Published online: 8 January 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The development of coastal beaches is linked to climatic changes and sea-level fluctuations. Therefore, understanding the beach deposition processes is essential for predicting how coastal landscapes may react to future climatic and sea-level variability. However, at present, a high-resolution chronology is still limited which hinders the detailed interpretation of depositional history of coastal beaches. In this study, thermoluminescence dating was applied to establish the depositional history of the goethite-coated quartz sands in the Black Sand Beach in the Lower Gulf of Thailand. A multiple-aliquot regenerative-dose procedure was used to estimate equivalent doses of quartz grains extracted from the samples, whereas annual doses were obtained by determining concentrations of ^{238}U , ^{232}Th , and ^{40}K in the samples. Detailed thermoluminescence ages reveal that five samples collected from two excavation pits on the Black Sand Beach at Laem Ngop District in Trat Province produced ages ranging from $9,069 \pm 590$ a to present. This study also found variations in sediment deposition rates with a period of non-deposition, which are 0.01 mm/a during $9,069 \pm 590$ to $1,405 \pm 85$ a, and 0.14 mm/a during $1,405 \pm 85$ a to present. It is concluded that deposition of the beach started in the Early Holocene and coincides with a regional marine transgression.

Keywords: Geomorphic Evolution, Thermoluminescence Dating, Black Sand Beach, Laem Ngop District, Trat Province

1. บทนำ

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและกระแสน้ำชายฝั่งกับชายฝั่งทะเลก่อให้เกิดภูมิลักษณะชายฝั่งขึ้นอย่างเฉพาะตัวและหลากหลาย โดยหาด (Beach) เป็นหนึ่งในภูมิลักษณะชายฝั่งที่นักธรณีสัณฐานวิทยาให้ความสนใจในการศึกษา เนื่องจากสามารถบ่งบอกกระบวนการกำเนิด การพัฒนา และการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเล ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเลนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน [1] การอธิบายกระบวนการข้างต้นได้อย่างถูกต้องและเป็นระบบจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลอายุจากการกำหนดอายุเชิงสัมบูรณ์ ซึ่งในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีการ เช่น การกำหนดอายุด้วยคาร์บอนกัมมันตรังสี (Radiocarbon Dating) การกำหนดอายุด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioactive Isotope Dating) และการกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน (Thermoluminescence Dating) เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม วิธีการกำหนดอายุแต่ละวิธีมีความเฉพาะกับชนิดและช่วงอายุของตัวอย่าง โดยทั่วไปการกำหนดอายุด้วยคาร์บอนกัมมันตรังสีมีความเหมาะสมกับตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์ และคาดว่ามีความอายุระหว่าง 500–50,000 ปีมาแล้ว ส่วนการกำหนดอายุด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสีจะถูกใช้เมื่อคาดว่าอายุของตัวอย่างมากกว่าหนึ่งล้านปีมาแล้ว และเป็นตัวอย่างแร่ที่มีธาตุกัมมันตรังสีบางชนิดปะปนอยู่ เช่น โพแทสเซียม 40 และอาร์กอน 40 หรือ อาร์กอน 40 และอาร์กอน 39 ดังนั้นการกำหนดอายุด้วยคาร์บอนกัมมันตรังสีและการกำหนดอายุด้วยไอโซโทปกัมมันตรังสีจึงไม่เหมาะสมกับการกำหนดอายุตะกอนหาด ที่โดยทั่วไปพบสารอินทรีย์ และตัวอย่างแร่ที่มีธาตุกัมมันตรังสีอยู่น้อยมากหรืออาจไม่พบเลย ด้วยเหตุนี้การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อนจึงเป็นวิธีการกำหนดอายุที่ประยุกต์กับตะกอนหาดได้อย่างดีเยี่ยม เนื่องจากตะกอนหาดมักประกอบด้วยแร่ควอร์ตซ์ ซึ่งเป็นแร่ที่ใช้ในการกำหนดอายุด้วยวิธีนี้เป็นหลัก นอกจากนี้ การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อนยังสามารถกำหนดอายุตัวอย่างที่คาดว่ามีความอายุระหว่าง 100–1,000,000 ปีมาแล้ว จึงเหมาะสมกับการกำหนดอายุตะกอน

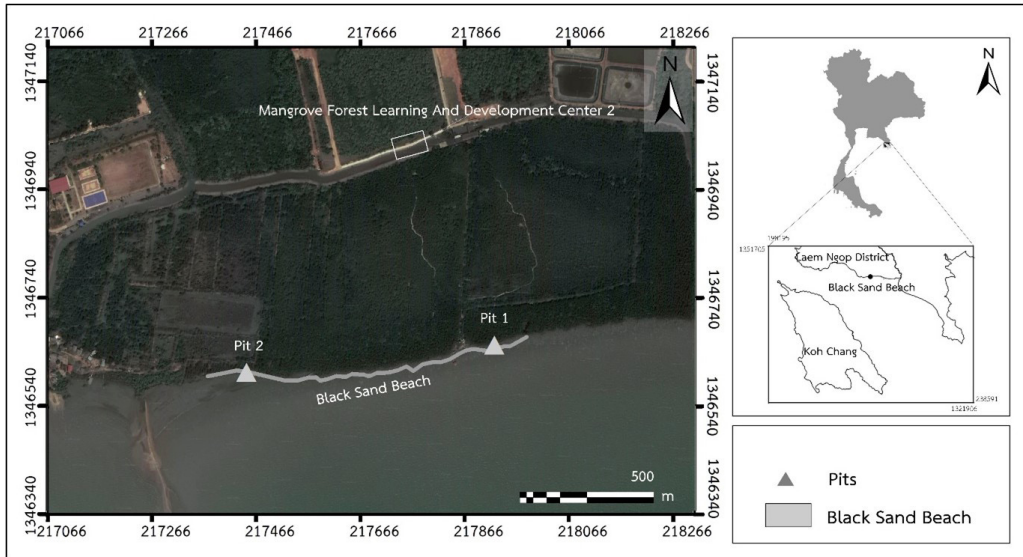
หาด เนื่องจากพบว่า กระบวนการทับถมของตะกอนหาดและการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลทั่วโลกมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลทั่วโลก (Eustatic Sea Level Change) ในสมัยไพลสโตซีนตอนปลายเป็นต้นมา [2], [3] การศึกษาทางธรณีสัณฐานวิทยาชายฝั่งทะเลไทยโดยใช้ข้อมูลอายุจากการกำหนดอายุตะกอนหาดได้เริ่มต้นขึ้นเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา [4]–[6] แต่ละงานวิจัยได้ข้อสรุปในประเด็นกระบวนการกำเนิด การพัฒนา และการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่งทะเลไทยที่ค่อนข้างแตกต่างกัน เนื่องจากพบว่า ปัจจัยทางกายภาพในแต่ละพื้นที่มีรูปแบบที่เฉพาะตัว [7] ด้วยเหตุนี้การได้มาซึ่งข้อมูลอายุจากหลายพื้นที่ศึกษาจึงนับเป็นสิ่งจำเป็นในการเชื่อมโยงเรื่องราวเกี่ยวกับกระบวนการทางธรณีสัณฐานวิทยาชายฝั่งทะเลไทยได้อย่างสมบูรณ์และถูกต้อง

การวิจัยในครั้งนี้จึงมุ่งเน้นที่การกำหนดอายุตะกอนหาดด้วยวิธีเรืองแสงความร้อน โดยมีพื้นที่เป้าหมายเป็นหาดทรายดำ ในอำเภอแหลมฉบัง จังหวัดตราด เนื่องจากเป็นหาดที่เกิดจากการทับถมของเม็ดตะกอนสีดำที่มีแร่ควอร์ตซ์และแร่เกอไทต์เป็นองค์ประกอบหลัก และมีลักษณะเป็นทรงกลมมนพื้นผิวเรียบต่างจากตะกอนทรายชายหาดทั่วไปที่มักมีพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ ซึ่งลักษณะหาดเช่นนี้พบได้ยากมากในธรรมชาติและพบได้เพียงไม่กี่แห่งในโลก [8] ผลจากการวิจัยในครั้งนี้จะช่วยให้ทราบช่วงเวลาและอัตราการทับถมของตะกอน อันนำไปสู่การอธิบายวิวัฒนาการทางธรณีสัณฐานวิทยาสมัยโฮโลซีนของหาดทรายดำที่สะท้อนการผันแปรของสภาพภูมิอากาศและระดับน้ำทะเลต่อเปลี่ยนแปลงของภูมิภาคชายฝั่งทะเลไทยนับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้เป็นอย่างดี

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

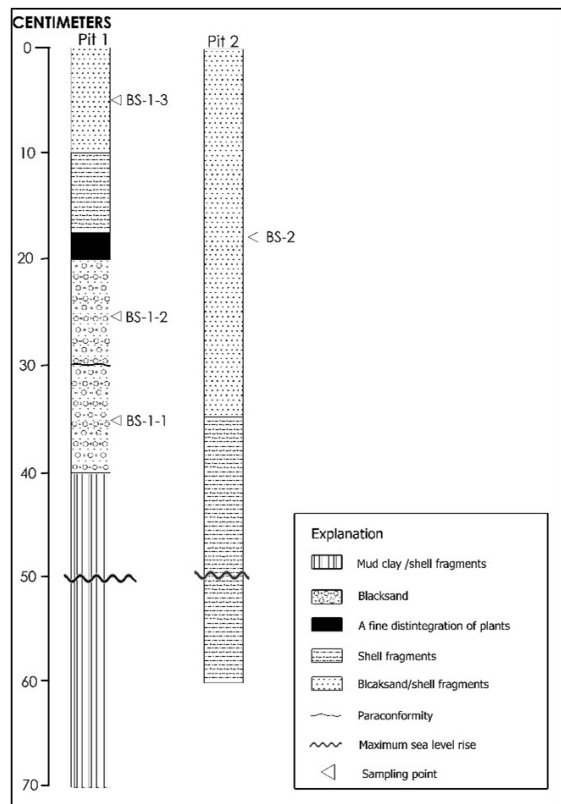
2.1 พื้นที่ศึกษาและการเก็บรวบรวมข้อมูลในภาคสนาม

พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้ คือ หาดทรายดำ ในอำเภอแหลมฉบัง จังหวัดตราด อยู่ระหว่างพิกัดฉาก Universal Transverse Mercator ที่ 48P 1346573 เหนือ ถึง 1346626 เหนือ และ 217406 ตะวันออก ถึง 217800 ตะวันออก โดยทั่วไปมีลักษณะภูมิประเทศทางตอนเหนือเป็นเนินเขาที่มี



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา และตำแหน่งของหลุมสำรวจที่ 1 และหลุมสำรวจที่ 2

ความสูงระหว่าง 50-200 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง และที่ราบลอนลาดที่มีความราบเรียบมากขึ้นทางทิศใต้ ส่วนพื้นที่ทางตอนใต้เป็นพื้นที่ชายฝั่งที่มีป่าชายเลน หาดโคลน และหาดทราย กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ จากการเก็บรวบรวม ข้อมูลในภาคสนามพบว่า หาดทรายดำทอดตัวขนานไป กับแนวชายฝั่งในแนวตะวันออก-ตะวันตก เป็นระยะทาง ประมาณ 800-900 เมตร เมื่อน้ำขึ้นสูงสุดมีหน้าหาด กว้างประมาณ 2-4 เมตร ตะกอนทรายดำที่ถมอยู่บนชั้น หาดโคลนตามรากค้ำยันของต้นโกงกางเป็นชั้นบาง ๆ โดย ความหนาของชั้นตะกอนในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ตะกอนทรายดำจะทับถมเป็นชั้นหนาไม่เกิน 1 เมตร พื้นที่ศึกษาเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงธรรมชาติจึงถูกรบกวนจากกิจกรรมต่าง ๆ เกือบทั้งหมด ทั้งนี้ยังคงเหลือพื้นที่ที่ยังไม่ได้ถูกรบกวน ซึ่งแสดงลักษณะชั้นตะกอนจากการทับถมตามธรรมชาติอยู่สองบริเวณ บริเวณแรกอยู่ใกล้ขอบทางทิศ ตะวันออก และบริเวณที่สองอยู่ใกล้ขอบทางทิศตะวันตก ผู้วิจัยจึงคัดเลือกพื้นที่ทั้งสองบริเวณในการขุดหลุมสำรวจ เรียกว่า หลุมสำรวจที่ 1 และหลุมสำรวจที่ 2 ตามลำดับ (รูปที่ 1) โดยมีรายละเอียดของหน้าตัดชั้นตะกอน (Sediment Profile) และลักษณะทางกายภาพของชั้นตะกอนดังนี้ (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 หน้าตัดชั้นตะกอนของหลุมสำรวจที่ 1 และหลุมสำรวจที่ 2

2.1.1 หลุมสำรวจที่ 1

หลุมสำรวจที่ 1 อยู่ที่พิกัดฉาก UTM ที่ 48P 1346573 เหนือ และ 217406 ตะวันออก จากการขุดหลุมสำรวจเพื่อทำหน้าที่ตัดชั้นตะกอนพบว่า ตะกอนทับถมเป็นชั้นบาง ๆ จำนวน 6 ชั้น มีความหนาเพียง 70 เซนติเมตร ชั้นตะกอนที่ 1 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 0-10 เซนติเมตร ซึ่งเป็นชั้นตะกอนที่อยู่ในระดับพื้นผิวและพบตะกอนทรายดำทับถมอยู่เป็นชั้นแรก สันฐานของตะกอนมีลักษณะเดียวกันกับตะกอนทรายดำที่พบในชั้นตะกอนอื่น ทั้งนี้มีเศษเปลือกหอยทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ทับถมร่วมอยู่ทั่วทุกบริเวณของชั้นตะกอน จึงเก็บตัวอย่างที่ระดับ 5 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยใช้ชื่อ BS-1-3 ในการกำหนดอายุ ชั้นตะกอนที่ 2 เป็นชั้นตะกอนที่มีความหนาประมาณ 8 เซนติเมตร เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 10-18 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว และไม่พบตะกอนทรายดำทับถมร่วมด้วย ตะกอนที่ทับถมอยู่ในชั้นนี้เป็นเศษเปลือกหอยที่มีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถระบุชนิดและสกุลของหอยได้เช่นเดียวกับที่พบในชั้นตะกอนอื่น ชั้นตะกอนที่ 3 เป็นชั้นตะกอนบาง ๆ มีความหนาประมาณ 2 เซนติเมตร เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 18-20 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว สิ่งที่ทับถมอยู่ในชั้นนี้เป็นเศษพืชที่สลายตัวและไม่คงสภาพเดิม ไม่พบตะกอนทรายดำทับถมในชั้นนี้อีกเช่นกัน

ชั้นตะกอนที่ 4 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 20-30 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว ตะกอนที่ทับถมอยู่ในชั้นนี้เป็นตะกอนทรายดำที่มีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับตะกอนที่ทับถมอยู่ในชั้นตะกอนที่ 5 ซึ่งอยู่ถัดไป ทั้งนี้ถูกแบ่งแยกออกจากกันด้วยความไม่ต่อเนื่องแบบขนาน (Para-conformity) ที่แสดงถึงการหยุดการทับถมของชั้นตะกอน จึงเก็บตัวอย่างที่ระดับ 25 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยใช้ชื่อ BS-1-2 ส่วนชั้นตะกอนที่ 5 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 30-40 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว พบตะกอนทรายดำทับถมอยู่เป็นชั้นสุดท้ายของหลุมสำรวจ และพบเศษเปลือกหอยที่มีสภาพแตกหักกร่วมด้วยในบางบริเวณ ชั้นตะกอนทรายดำทับถมอยู่เหนือระดับน้ำทะเลเมื่อขึ้นสูงสุด ดังนั้นจึงเป็นตัวอย่างที่เหมาะสมอย่างยิ่งในการกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสง

ความร้อน เนื่องจากตัวอย่างไม่ได้รับอิทธิพลจากน้ำที่เป็นตัวการสำคัญในการลดทอนการดูดกลืนรังสีตามธรรมชาติ ผู้วิจัยจึงเก็บตัวอย่างตะกอนจากบริเวณกึ่งกลางของชั้นตะกอน ที่ระดับ 35 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยใช้ชื่อ BS-1-1 ในการกำหนดอายุ ชั้นตะกอนที่ 6 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 40-70 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว ซึ่งเป็นชั้นตะกอนที่อยู่ในระดับลึกที่สุดของหลุมสำรวจและไม่พบตะกอนทรายดำทับถมร่วมด้วย ตะกอนส่วนใหญ่เป็นตะกอนที่มีขนาดโคลนปะปนอยู่กับเศษเปลือกหอยที่มีสภาพแตกหักซึ่งไม่สามารถระบุชนิดและสกุลของหอยได้ นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นตะกอนที่วางตัวอยู่ที่ระดับ 50-70 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว ยังคงได้รับอิทธิพลของน้ำขึ้น-น้ำลง

2.1.2 หลุมสำรวจที่ 2

หลุมสำรวจที่ 2 อยู่ที่พิกัดฉาก UTM ที่ 48P 1346626 เหนือ และ 217800 ตะวันออก จากการขุดหลุมสำรวจเพื่อทำหน้าที่ตัดชั้นตะกอนพบว่า ตะกอนทับถมเป็นจำนวน ทั้งหมด 2 ชั้น มีความหนารวม 60 เซนติเมตร โดยชั้นตะกอนที่ 1 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 0-35 เซนติเมตรจากระดับพื้นผิว เป็นชั้นตะกอนที่ค่อนข้างหนาเมื่อเทียบกับชั้นตะกอนในหลุมสำรวจที่ 1 ตะกอนที่ทับถมอยู่ในชั้นนี้เป็นตะกอนทรายดำทั้งหมด โดยมีลักษณะทางกายภาพคล้ายกับตะกอนทรายดำที่ทับถมอยู่ในหลุมสำรวจที่ 1 จึงเก็บตัวอย่างตะกอนจากบริเวณกึ่งกลางของชั้นตะกอน ที่ระดับประมาณ 17.5 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว จำนวน 1 ตัวอย่าง โดยใช้ชื่อ BS-2 ในการกำหนดอายุเพียงตัวอย่างเดียว ในส่วนของชั้นตะกอนที่ 2 เป็นชั้นตะกอนที่ระดับ 35-60 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว ซึ่งเป็นชั้นตะกอนที่อยู่ในระดับลึกที่สุดของหลุมสำรวจและไม่พบตะกอนทรายดำทับถมร่วมด้วย ตะกอนส่วนใหญ่เป็นเศษเปลือกหอยที่มีสภาพแตกหักที่ไม่สามารถระบุชนิดและสกุลของหอยได้ นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นตะกอนที่วางตัวอยู่ที่ระดับ 50- 0 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว ยังคงได้รับอิทธิพลของน้ำขึ้น-น้ำลง เช่นเดียวกับชั้นตะกอนที่ 6 ของหลุมสำรวจที่ 1

2.2 วิธีการวิจัย

การกำหนดอายุด้วยวิธีเรืองแสงความร้อนแบบ

Multiple-aliquot Regenerative Dose อาศัยการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent Dose; ED) และปริมาณรังสีคงเหลือ (Residual Dose; I_0) ในแร่ที่ต้องการตรวจวัด และปริมาณรังสีรอบปี (Annual Dose; AD) จากไอโซโทปกัมมันตรังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เพื่อทำการคำนวณอายุแร่ในตะกอนในหน่วยรอบปี (Annual; a) จากสมการที่ (1) [9], [10]

$$TL_{age} = \frac{ED - I_0}{AD} \quad (1)$$

การวิจัยในครั้งนี้จึงมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

2.2.1 วิเคราะห์ปริมาณรังสีสมมูลและปริมาณรังสีคงเหลือ นำตัวอย่างตะกอนทรายดำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 60 100 และ 250 แล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นและอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างตะกอนทรายดำที่ผ่านการอบแล้วไปสกัดเพื่อคัดเลือกเฉพาะแร่ควอตซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง กรดไฮโดรฟลูออริก ความเข้มข้นร้อยละ 24 โดยมวล เป็นเวลา 30 นาที และกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามลำดับ [11] นำตัวอย่างแร่ควอตซ์บริสุทธิ์ที่ผ่านการสกัดผ่านสารละลายกรดแล้วแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกที่ไม่ผ่านการฉายรังสีนำไปใช้ในการหาค่าสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ในตัวอย่างธรรมชาติ ส่วนที่สองนำไปตากแดดเพื่อหาสัญญาณรังสีคงเหลือในตัวอย่างธรรมชาติ ส่วนสุดท้ายนำไปเผาที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เพื่อฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 75 125 และ 250 เกรย์ สุดท้ายจึงนำตัวอย่างทั้งสามส่วนไปวิเคราะห์สัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ด้วยเครื่อง Thermoluminescence Reader โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิระหว่าง 100–400 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีก๊าซไนโตรเจน ทั้งนี้เพื่อหาปริมาณรังสีสมมูลและปริมาณรังสีคงเหลือในหน่วยเกรย์ (Grey; Gy) จากกราฟความสัมพันธ์แบบสองมิติ (Glow Curve) และกราฟความสัมพันธ์

ระหว่างปริมาณรังสีในตัวอย่างและค่าความเข้มของสัญญาณ (Growth Curve) ตามลำดับ

2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณรังสีรอบปี

แบ่งตัวอย่างตะกอนทรายดำออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง เพื่อหาความชื้นในตัวอย่าง (Water Content; W) ในหน่วยร้อยละ (Percent; %) จากน้ำหนักน้ำในตัวอย่าง (W_w) และน้ำหนักตัวอย่างแห้ง (W_s) ในหน่วยกรัม (Gram; g) จากสมการที่ (2) [12]

$$W = \left(\frac{W_w}{W_s} \right) \times 100 \quad (2)$$

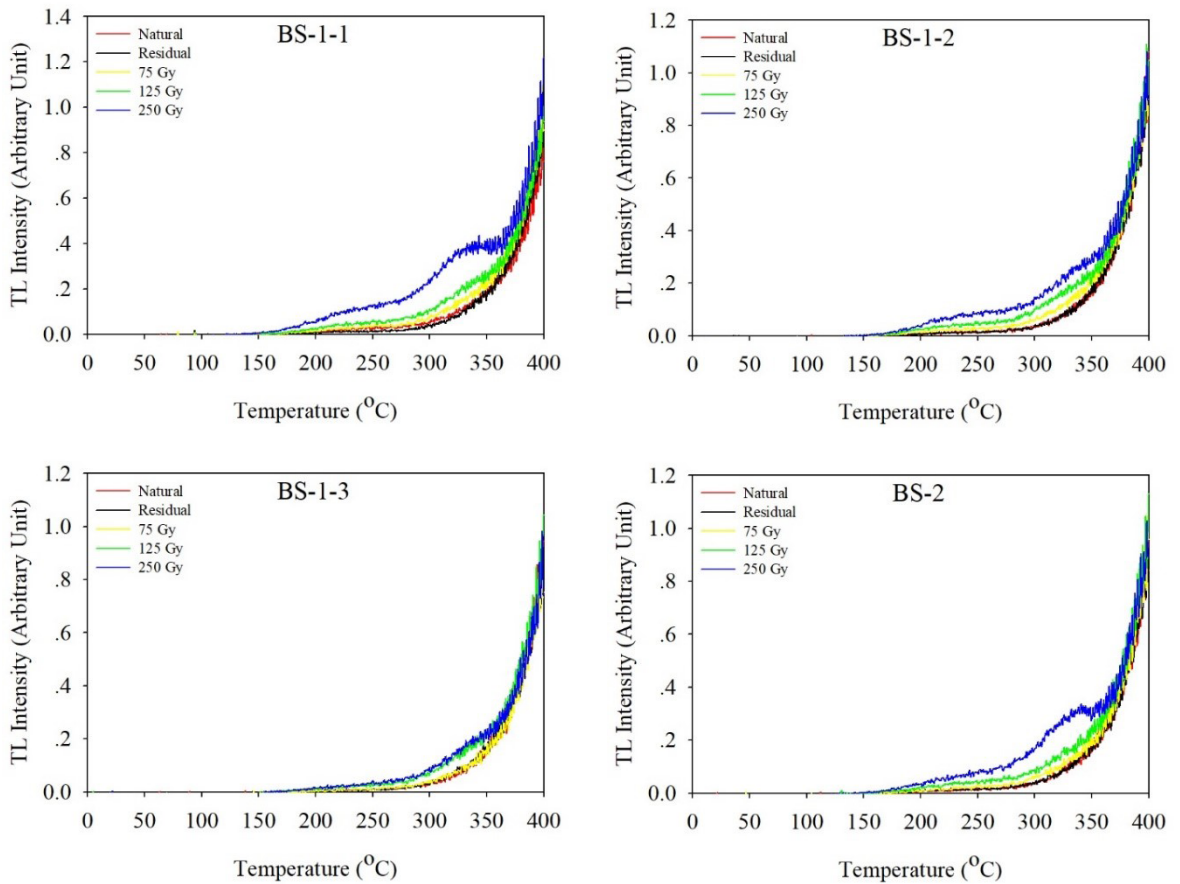
ส่วนที่สองนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 20 เพื่อคัดเลือกตะกอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 0.84 มิลลิเมตร และบรรจุลงในภาชนะเก็บไว้ประมาณ 1 เดือน เพื่อทำให้เกิดสมดุลกัมมันตรังสีแบบถาวร (Secular Equilibrium) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์ (Gamma Ray Spectrometer) ที่อุณหภูมิห้อง และคำนวณปริมาณรังสีรอบปีในหน่วยมิลลิเกรย์ต่อรอบปี (Milligray per Annual; mGy/a) จากปริมาณรังสีแอลฟา (D_α) ปริมาณรังสีบีตา (D_β) ปริมาณรังสีแกมมา (D_γ) และปริมาณรังสีคอสมิก (D_{cosmic}) จากสมการที่ (3) [13]

$$AD = D_\alpha + D_\beta + D_\gamma + D_{cosmic} \quad (3)$$

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสมมูลและปริมาณรังสีคงเหลือ

จากการตรวจวัดสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จากแร่ควอตซ์บริสุทธิ์ที่สกัดออกมาจากตัวอย่างตะกอนทรายดำทั้งสี่ตัวอย่างพบว่า กราฟความสัมพันธ์แบบสองมิติของทั้งสี่ตัวอย่างทั้งส่วนที่ไม่ผ่านการฉายรังสีและส่วนที่ผ่านการฉาย

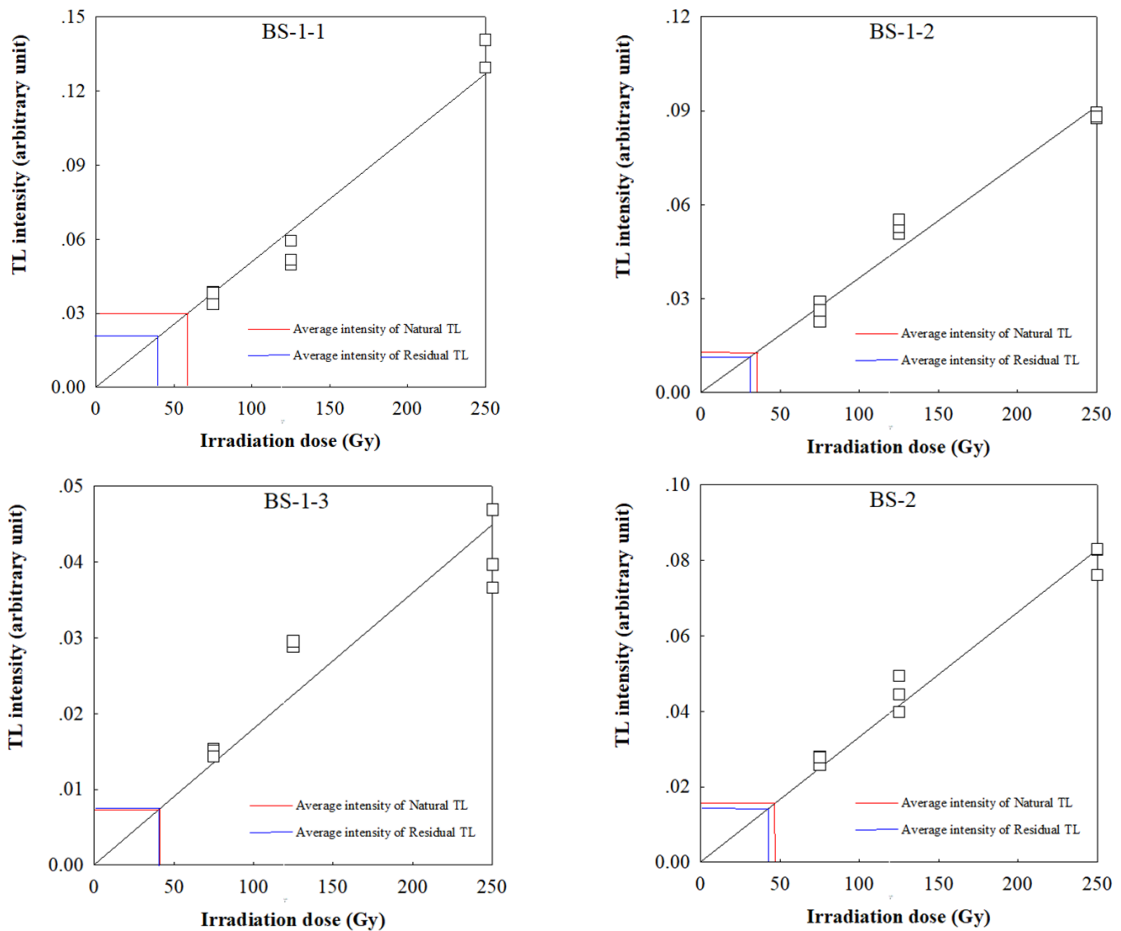


รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์แบบสองมิติของตัวอย่าง BS-1-1 BS-1-2 BS-1-3 และ BS-2

รังสีแกมมาที่ปริมาณรังสี 75 125 และ 250 เกรย์ มีจุดยอดของค่าความเข้มของอุณหภูมิกระตุ้นที่ 225 และ 340 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3 จึงคัดเลือกค่าความเข้มของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 225 องศาเซลเซียส ไปเป็นตัวแทนในการคำนวณปริมาณรังสีสมมูลและปริมาณรังสีคงเหลือ เนื่องจากค่าความเข้มของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 340 องศาเซลเซียสถูกรบกวนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำ ซึ่งเกิดจากการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าของแผ่นความร้อนที่ติดตั้งภายในตัวเครื่อง Thermoluminescence Reader ในขณะที่เกิดสภาวะสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ ดังเห็นได้จากความไม่เสถียรของเส้นกราฟที่อุณหภูมิสูง

เมื่อนำค่าความเข้มของสัญญาณเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ที่อุณหภูมิกระตุ้น 225 องศาเซลเซียส ทั้งจากส่วนที่ไม่ผ่านการฉายรังสีและส่วนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาของแต่ละตัวอย่างไปลงจุดในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีในตัวอย่างและค่าความเข้มของสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4 และคำนวณปริมาณรังสีสมมูลและปริมาณรังสีคงเหลือพบว่า ตัวอย่าง BS-1-1 จากหลุมสำรวจที่ 1 ที่ระดับ 30-40 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีปริมาณรังสีสมมูล 60.57 เกรย์ เมื่อหักลบปริมาณรังสีคงเหลือ 42.35 เกรย์ จึงคงเหลือปริมาณรังสีสมมูลจริงเท่ากับ 18.22 ± 0.76 เกรย์ ตัวอย่าง BS-1-2 จากหลุมสำรวจที่ 1 ที่ระดับ 20-30 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีปริมาณรังสีสมมูล 34.35 เกรย์ เมื่อหักลบปริมาณรังสีคงเหลือ 31.21 เกรย์ จึงคงเหลือปริมาณรังสีสมมูลจริงเพียง 3.15 ± 0.11 เกรย์ ตัวอย่าง BS-1-3 จาก



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีในตัวอย่างและค่าความเข้มของสัญญาณของตัวอย่าง BS-1-1 BS-1-2 BS-1-3 และ BS-2

หลุมสำรวจที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เก็บจากระดับพื้นผิว หรือ 0–10 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีปริมาณรังสีสมมูล 40.70 เกรย์ เมื่อหักลบปริมาณรังสีคงเหลือ 40.70 เกรย์ จึงคงเหลือปริมาณรังสีสมมูลจริงเท่ากับ 0 เกรย์ แสดงให้เห็นในเบื้องต้นว่าตัวอย่างดังกล่าวเป็นตัวอย่างตะกอนที่มีอายุในปัจจุบัน อีกทั้งยังสอดคล้องกับตำแหน่งของตัวอย่างในหลุมสำรวจเป็นอย่างดี ส่วนตัวอย่าง BS-2 ที่เก็บมาจากหลุมสำรวจที่ 2 ที่ระดับ 0–35 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีปริมาณรังสีสมมูล 46.22 เกรย์ เมื่อหักลบปริมาณรังสีคงเหลือ 42.07 เกรย์ จึงคงเหลือปริมาณรังสีสมมูลจริงเพียง 4.15 ± 0.16 เกรย์ ดังแสดงในตารางที่ 1

3.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีรอบปี

งานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างตะกอนทรายดำ จำนวน 4 ตัวอย่าง มาตรวจหาปริมาณ ^{238}U ^{232}Th และ ^{40}K ด้วยเครื่องแกมมาเรย์สเปกโตรมิเตอร์ โดยความเข้มข้นของ ^{238}U ในหน่วยหนึ่งในล้านส่วน (Part per Million; ppm) ได้จากการตรวจวัดตะกั่ว 214 (^{214}Pb) ความเข้มข้นของ ^{232}Th ในหน่วยหนึ่งในล้านส่วนได้จากการตรวจวัดเอกทินเนียม 228 (^{228}Ac) ส่วนความเข้มข้นของ ^{40}K ในหน่วยร้อยละ ได้จากการตรวจวัดนิวไคลด์กัมมันตรังสีของ K_2O โดยตรง ผลการวิเคราะห์พบว่า ตัวอย่าง BS-1-1 จากหลุมสำรวจที่ 1 ที่ระดับ 30–40 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีความเข้มข้นของ K_2O ^{238}U

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณรังสีสมมูล ปริมาณรังสีคงเหลือ ปริมาณรังสีรอบปี และอายุตะกอนทรายดำ

ตัวอย่าง	ED (Gy)	I ₀ (Gy)	K ₂ O (%)	U (ppm)	Th (ppm)	W (%)	ED - I ₀ (Gy)	AD (mGy/a)	TL age (a)
BS-1-1	60.57	42.35	0.94	1.58	9.83	17.68	18.22±0.76	2.01±0.10	9,069±590
BS-1-2	34.35	31.21	0.94	1.86	12.03	13.27	3.15±0.11	2.24±0.11	1,405±85
BS-1-3	40.70	40.70	1.13	1.59	11.86	14.39	0.00±0.00	2.32±0.12	0.00±0.00
BS-2	46.22	42.07	0.83	2.14	13.61	28.08	4.15±0.16	2.33±0.12	1,782±112

²³²Th และความชื้นในตัวอย่าง เท่ากับ 0.94% 1.58 ppm 9.83 ppm และ 17.68% ตามลำดับ จึงคำนวณปริมาณรังสีรอบปีได้ 2.01 ± 0.10 mGy/a ตัวอย่าง BS-1-2 จากหลุมสำรวจที่ 1 ที่ระดับ 20–30 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีความเข้มข้นของ K₂O ²³⁸U ²³²Th และความชื้นในตัวอย่าง เท่ากับ 0.94% 1.86 ppm 12.03 ppm และ 13.27% ตามลำดับ จึงคำนวณปริมาณรังสีรอบปีได้ 2.24 ± 0.11 mGy/a ตัวอย่าง BS-1-3 จากหลุมสำรวจที่ 1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เก็บจากระดับพื้นผิว (0–10 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว) มีความเข้มข้นของ K₂O ²³⁸U ²³²Th และความชื้นในตัวอย่าง เท่ากับ 1.13% 1.59 ppm 11.86 ppm และ 14.39% ตามลำดับ จึงคำนวณปริมาณรังสีรอบปีได้ 2.32 ± 0.12 mGy/a ในส่วนของตัวอย่าง BS-2 ที่เก็บมาจากหลุมสำรวจที่ 2 ที่ระดับ 0–35 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว มีความเข้มข้นของ K₂O เท่ากับ 0.83% ความเข้มข้นของ ²³⁸U เท่ากับ 2.14 ppm ความเข้มข้นของ ²³²Th เท่ากับ 13.61 ppm และมีความชื้นในตัวอย่างเท่ากับ 28.08% จึงคำนวณปริมาณรังสีรอบปีได้ 2.33 ± 0.12 mGy/a ดังแสดงในตารางที่ 1

3.3 ผลการคำนวณอายุและอัตราการทับถมของตะกอนทรายดำ

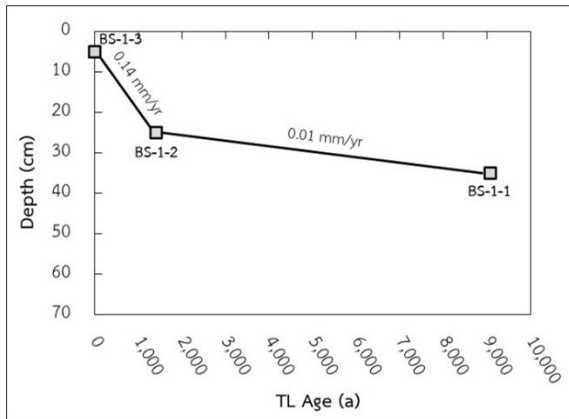
จากการคำนวณอายุตัวอย่างตะกอนทรายดำจากหลุมสำรวจที่ 1 และ 2 พบว่า ตัวอย่าง BS-1-1 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่เก็บจากชั้นตะกอนที่ระดับลึกที่สุดของหลุมสำรวจที่ 1 หรือที่ระดับ 30–40 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว กำหนดอายุได้ 9,069 ± 590 ปีก่อนปัจจุบัน ตัวอย่าง BS-1-2 ที่เก็บมาจากชั้นตะกอนของหลุมสำรวจที่ 1 ที่ระดับ 20–30 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิวกำหนดอายุได้ 1,405 ± 85 ปีก่อนปัจจุบัน

ตัวอย่าง BS-1-3 ซึ่งเป็นตัวอย่างจากบริเวณพื้นผิวของหลุมสำรวจที่ 1 มีผลการกำหนดอายุเป็นปัจจุบัน (0 ปีก่อนปัจจุบัน) ในส่วนของตัวอย่าง BS-2 ที่เก็บมาจากหลุมสำรวจที่ 2 เพียงตัวอย่างเดียว โดยเก็บจากระดับ 0–35 เซนติเมตร จากระดับพื้นผิว กำหนดอายุได้ 1,782 ± 112 ปีก่อนปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 1

เนื่องจากหลุมสำรวจที่ 2 พบตะกอนทรายดำทับถมเฉพาะในชั้นตะกอนที่ระดับ 0–35 เซนติเมตรจากระดับพื้นผิว เพียงชั้นเดียว จึงไม่สามารถนำค่าอายุมาใช้ในการวิเคราะห์หัตถการทับถมของตะกอนของทรายดำได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ผลการคำนวณอายุตัวอย่างตะกอนทรายดำจากหลุมสำรวจที่ 1 ในการวิเคราะห์หัตถการดังกล่าว โดยพบว่า ในระหว่าง 9,069 ± 590 ปีก่อนปัจจุบัน และ 1,405 ± 85 ปีก่อนปัจจุบัน ตะกอนทรายดำมีการทับถมในอัตรา 0.01 มิลลิเมตรต่อปี ในขณะที่ระหว่าง 1,405 ± 85 ปีก่อนปัจจุบัน จนถึงปัจจุบัน ตะกอนทรายดำมีอัตราการทับถมที่มากขึ้นเป็น 0.14 มิลลิเมตรต่อปี

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการกำหนดอายุตะกอนทรายดำแสดงให้เห็นว่าตะกอนทรายดำถูกพัดพามาทับถมในพื้นที่ครั้งแรกเมื่อราว 9,069 ± 590 ปีก่อนปัจจุบัน และหยุดทับถมสลับกับทับถมเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการกำหนดอายุตะกอนทรายจากสันดอนจะงอยทรายโบราณบริเวณปากแม่น้ำเวฬุที่อยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำเดียวกัน [14] ที่พบว่า ตะกอนทรายจากสันดอนจะงอยทรายโบราณเริ่มทับถมเมื่อ 17,210 ± 1280 ปีก่อนปัจจุบัน และมีการทับถมอย่างต่อเนื่องจนมาหยุดทับถมเมื่อ 460 ± 230 ปีก่อนปัจจุบัน



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอายุและความลึก และ อัตราการทับถมของตะกอนของทรายดำในหลุมสำรวจที่ 1

ผลการวิจัยในครั้งนี้นี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาวิวัฒนาการของอ่าวไทยในสมัยโฮโลซีน โดยใช้ข้อมูลธรณีวิทยาในชั้นตะกอนจากทะเลสาบสงขลา [15] และข้อมูลการกำหนดอายุอินทรีย์วัตถุด้วยคาร์บอนกัมมันตรังสีในชั้นตะกอนดินเหนียวจากดินดอนสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเจ้าพระยา [19] ที่พบว่า การละลายของน้ำแข็งทั่วโลกส่งผลให้เกิดการรุกถ้ำของทะเลในพื้นที่ยุโรปอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่สมัยโฮโลซีนตอนต้น จนเมื่อถึงสมัยโฮโลซีนตอนกลาง น้ำทะเลจึงมีระดับสูงสุดที่ประมาณ 4–5 เมตร จากระดับน้ำทะเลในปัจจุบัน จากนั้นจึงลดระดับลงอย่างช้า ๆ จนมีระดับที่ปรากฏในปัจจุบัน ข้อมูลที่สอดคล้องกันนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อหินต้นกำเนิดตะกอนทรายดำได้รับอิทธิพลจากคลื่นและกระแสน้ำชายฝั่งจากการเพิ่มสูงขึ้นของระดับน้ำทะเลในสมัยโฮโลซีนตอนต้น หินดังกล่าวจึงเกิดการผุพังและถูกพัดพามาทับถมเป็นหาดทรายดำขึ้น

การวิจัยในครั้งนี้นี้ยังพบว่า ตะกอนทรายดำมีการทับถมในอัตราที่ช้ามาก ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยในระหว่าง 9,069 ± 590 ถึง 1,405 ± 85 ปีก่อนปัจจุบัน มีการทับถมในอัตรา 0.01 มิลลิเมตรต่อปี ต่อมาระหว่าง 1,405 ± 85 ปีก่อนปัจจุบัน ถึง ปัจจุบัน มีอัตราการทับถมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเป็น 0.14 มิลลิเมตรต่อปี ต่างจากอัตราการทับถมของตะกอน

ทรายดำจากบ้านจะทิ้งพระ (3,548 ± 149 ถึง 1,761 ± 72 ปีก่อนปัจจุบัน) และบ้านมัจฉา (3,110 ± 256 ถึง 1,672 ± 67 ปีก่อนปัจจุบัน) บริเวณคาบสมุทรสทิงพระ จังหวัดสงขลา ที่พบว่ามีค่า 1.78 และ 1.66 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ [16] นอกจากนี้ในบางช่วงเวลาตะกอนทรายดำได้หยุดทับถมดังเห็นได้จากการแทรกสลับของโครงสร้างความไม่ต่อเนื่องแบบขนานและชั้นตะกอนชนิดอื่น การทับถมของตะกอนทรายดำที่เป็นไปด้วยอัตราที่ช้ามากและการหยุดทับถมสลับกันนี้ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการกำเนิดและพัฒนาเป็นตะกอนทรายดำที่สมบูรณ์ต้องอาศัยระยะเวลาที่ค่อนข้างยาวนานโดยตะกอนทรายดำในพื้นที่ศึกษาอาจเกิดจากการผุพังทางเคมีของหินเชิร์ตตามแนวชายฝั่งทะเล [8] ซึ่งเมื่อหินเชิร์ตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจน แร่เหล็กจะละลายออกมาจากเนื้อหินในรูปของ Fe^{2+} หลังจากนั้นจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ Fe^{3+} เมื่อค่าความเป็นกรด-เบส และอุณหภูมิในน้ำทะเลเหมาะสม Fe^{3+} จะเปลี่ยนเป็นแร่เฟอร์ริไฮโดรด์หรือแร่วัสไทต์ ทั้งนี้แร่เฟอร์ริไฮโดรด์หรือแร่วัสไทต์มีความเสถียรในเชิงเทอร์โมไดนามิกน้อยมาก จึงถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแร่เกอร์ไทต์หรือแร่เฮมาไทต์ [17], [18] ในส่วนของกระบวนการเกิดตะกอนทรายดำอาจเริ่มต้นพร้อมกับการกระบวนการข้างต้น โดยในระหว่างที่แร่เกอร์ไทต์หรือแร่เฮมาไทต์ตกผลึกจะพอกแกนกลางที่เป็นตะกอนซิลิกา ต่อมาเมื่อแข็งตัวแล้วจึงกลายเป็นตะกอนทรายซิลิกาที่เคลือบด้วยแร่เกอร์ไทต์หรือแร่เฮมาไทต์ในท้ายที่สุด

แม้ว่าการดำเนินงานวิจัยได้ดำเนินไปแล้วในพื้นที่ศึกษา ผู้วิจัยพบว่า ยังขาดข้อมูลด้านภูมิศาสตร์และธรณีวิทยาด้านอื่น เช่น ข้อมูลการผุพังอยู่กับที่ของหินกำเนิดตะกอนทรายดำ ข้อมูลการพัดพาตะกอนทรายดำ จึงมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไปให้ทำการวิเคราะห์แหล่งหินต้นกำเนิดตะกอนทรายดำ ตลอดจนวิเคราะห์ทิศทางการพัดพาตะกอนทรายดำโดยคลื่นและกระแสน้ำชายฝั่งในอดีต นอกจากนี้ ให้พิจารณาคัดเลือกหลุมสำรวจในพื้นที่ศึกษาที่ได้รับอิทธิพลจากการกระทำของมนุษย์น้อยที่สุด และทำการกำหนดอายุตะกอนทรายดำด้วยวิธีเรืองแสงความร้อนหรือการกำหนดอายุเชิงสัมบูรณ์อื่นเพิ่มเติม

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยเพื่อการศึกษาตีพิมพ์ของคณาจารย์ ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 และขอขอบคุณคุณสุมาลี นิลพฤกษ์ นักนิเวศลิยร์เคมีชำนาญการพิเศษ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์ฉายรังสีตัวอย่างแร่

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Seul, R. Bednarek, T. Kozłowski, and Ł. Maciąg, “Beach gravels as a potential lithostatistical indicator of marine coastal dynamics: The Pogorzelica–Dziwnów (Western Pomerania, Baltic Sea, Poland) case study,” *Geosciences*, vol. 10, no. 9, 2020.
- [2] R. S. Bradley, “Dating Methods I,” in *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*, 3rd ed. Massachusetts: Academic Press, 2015, pp. 55–101.
- [3] R. J. Huggett, “Glacial and glaciofluvial landscapes,” in *Fundamentals of Geomorphology*, 3rd ed. London, United Kingdom: Routledge, 2011, pp. 247–289.
- [4] P. Surakiatchai, E. Songsangworn, S. Pailoplee, M. Choowong, S. Phantuwongraj, A. Jirapinyakul, and P. Charusiri, “Optically stimulated luminescence dating reveals rate of beach ridge and sand spit depositions from the upper Gulf of Thailand,” *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 41, no. 5, pp. 1136–1145, 2019.
- [5] H. Zhang, S. Liu, K. Wu, P. Cao, H. J. Pan, H. Wang, J. Cui, J. Li, S. Khokiattiwong, N. Kornkanitnan, and X. Shi, “Evolution of sedimentary environment in the Gulf of Thailand since the last deglaciation,” *Quaternary International*, vol. 629, pp. 36–43, 2022.
- [6] R. Bissen and S. Chawchai, “Microplastics on beaches along the eastern Gulf of Thailand-A preliminary study,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 157, 111345, 2020.
- [7] M. Choowong, “Geomorphology and Coastal Evolution in Thailand,” in *Basic Geomorphology*. Phra Nakhon Si Ayutthaya: Tienwattana Printing, 2011, pp. 128–184 (in Thai).
- [8] W. Songtham, J. Sratongyung, S. Chompusri, D. C. Mildenhall, S. Sripirojthikul, S. Siammai, B. Komwongthep, and J. Kanmanee, “Provenance of a black sand deposit in Laem Ngob district, Trat province, eastern Thailand,” *Journal of the Geological Society of Thailand*, vol. 1, pp. 1–6, 2011 (in Thai).
- [9] M. J. Aitken, “Thermoluminescence dating: Past progress and future trends,” *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, vol. 10, no. 1–2, pp. 3–6, 1985.
- [10] T. Chuenpee, T. Matsu’ura, O. Nishikawa, T. Uchida, and I. Takashima, “Thermoluminescence age determination for chemically selected samples of WP tephra in the Kamikita plain, northeast Japan,” *Quaternary Research*, vol. 56, no. 2, pp. 51–58, 2017.
- [11] T. Chuenpee, O. Nishikawa, Y. Kon, K. Ninagawa, S. Toyoda, T. Ogata, T. Uchida, and T. Takashima, “Gamma radiation-induced thermoluminescence, trace element and paramagnetic defect of quartz from the Sambagawa metamorphic belt, Central Shikoku, Japan,” *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 120, pp. 30–39, 2017.



- [12] S. U. Susha Lekshmi, D. N. Singh, and M. S. Baghini, "A critical review of soil moisture measurement," *Measurement*, vol. 54, pp. 92–105, 2014.
- [13] E. Tsakalos, J. Christodoulakis, and L. Charalambous, "The dose rate calculator (DRc) for luminescence and ESR dating-a java application for dose rate and age determination," *Archaeometry*, vol. 58, pp. 347–352, 2015.
- [14] P. Surakiatchai, E. Songsangworn, S. Pailoplee, M. Choowong, S. Phantuwongraj, A. Chabangborn, and P. Charusiri, "Optically stimulated luminescence dating reveals rate of beach ridge and sand spit depositions from the upper Gulf of Thailand," *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 41, no. 5, pp. 1,136–1,145, 2019.
- [15] B. P. Horton, P. L. Gibbard, G. M. Mine, R. J. Morley, C. Purintavaragul, and J. M. Stargardt, "Holocene sea levels and palaeoenvironments, Malay-Thai Peninsula, southeast Asia," *The Holocene*, vol. 15, no. 8, pp. 1,199–1,213, 2005.
- [16] B. Tongsang, N. Chusiri, P. Kessaratikoon, and T. Putsukee, "Paleogeography of Sating-Pra Peninsula, Southern Thailand," *Journal of Yala Rajabhat University*, vol. 14, no. 1, pp. 73–84, 2019 (in Thai).
- [17] T. Yokoyama and S. Nakashima, "Color development of iron oxides during rhyolite weathering over 52,000 years," *Chemical Geology*, vol. 219, no. 1–4, pp. 309–320, 2005.
- [18] Y. Cudennec and A. Lecerf, "The transformation of ferrihydrite into goethite or hematite, revisited," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 179, no. 3, pp. 716–722, 2006.
- [19] S. Tanabe, Y. Saito, Y. Sato, Y. Suzuki, S. Sinsakul, S. Tiyaipairach, and N. Chaimanee, "Stratigraphy and Holocene evolution of the mud-dominated Chao Phraya delta, Thailand," *Quaternary Science Reviews*, vol. 22, no. 8–9, pp. 789–807, 2003.