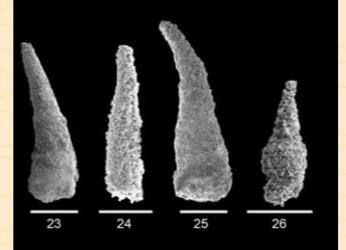
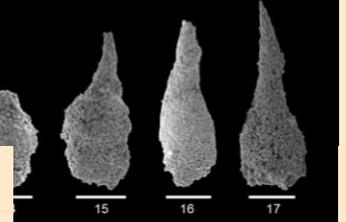
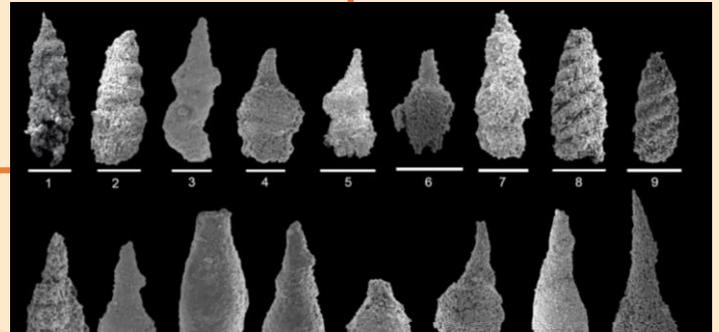
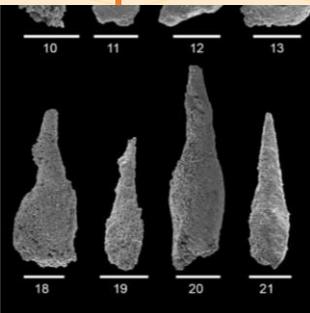
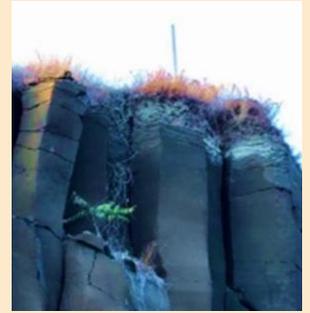




THAI GEOSCIENCE JOURNAL

Vol. 6 No. 10 July - December 2025



Published by
Department of Mineral Resources
Geological Society of Thailand
Coordinating Committee for Geoscience
Programmes in East and Southeast Asia (CCOP)

Editorial Committee

Honorary Executives; Executive Advisory Board

Mr. Pichit Sombatmak	Department of Mineral Resources, Thailand
Mr. Kanok Intharawijitr	Geological Society of Thailand, Thailand
Mr. Ma Yongzheng	Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (CCOP), Thailand

Advisory Editors

Prof. Dr. Clive Burrett	Palaeontological Research and Education Centre, Mahasarakham University, Thailand
Dr. Dhiti Dhanasuvannachote	Department of Mineral Resources, Thailand
Prof. Dr. Katsuo Sashida	Mahidol University, Kanchanaburi Campus, Thailand
Prof. Dr. Nigel C. Hughes	University of California, Riverside, USA
Prof. Dr. Punya Charusiri	Department of Mineral Resources and Geological Society of Thailand, Thailand

Editor in Chief

Dr. Apsorn Sardud	Department of Mineral Resources, Thailand
-------------------	---

Associate Editors

Prof. Dr. Punya Charusiri	Department of Mineral Resources, Thailand
Prof. Dr. Che Aziz bin Ali	University Kebangsaan Malaysia
Mr. Teerapon Wongprayoon	Department of Mineral Resources, Thailand
Dr. Santi Pailoplee	Chulalongkorn University, Thailand
Dr. Sanya Sarapirom	Suranaree University of Technology, Thailand

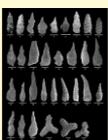
Editorial Secretary

Ms. Cherdchan Pothichaiya	Ms. Narisara Yamansabedean
Mr. Denchok Munjai	Ms. Paveena Kitbutrawat
Dr. Doungrutai Saesangseerung	Mr. Teerapon Wongprayoon
Mr. Inthat Chanpheng	Ms. Roongrawee Kingsawat
Mr. Kitti Khaowiset	Ms. Thapanee Pengtha
Dr. Kittichai Tongtherm	Ms. Warunee Maneerat

On the cover



1) ภาพขยายใหญ่ของเสาหินบะซอลต์ (*Nattarika Meesa et al. , p.7, fig. 2*)



2) Plate 1: Scanning electron micrographs of radiolarians from cherts of the studied sections TS13, TS14, NS07 and NS11 (*Waraphorn Phromsuwan et al. , p.35, plate 1*)



THAI GEOSCIENCE JOURNAL

Vol. 6 No. 10
July - December 2025



Published By

Department of Mineral Resources • Geological Society of Thailand
Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (CCOP)

Copyright © 2025 by the Department of Mineral Resources of Thailand
Thai Geoscience Journal website at <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/TGJ/index>



Thai Geoscience Journal
Vol. 6 No. 10
January-June 2025
ISSN 2730-2695 (Print)
ISSN 3056-9370 (Online)

LIST OF CONTENTS

	Page
ลักษณะเฉพาะทางธรณีสัณฐานของภูพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์: หลักฐานจากข้อมูลโทรสัมผัสและธรณีวิทยา ณัฐริกา hmeisa พัชรินทร์ ไคสุวรรณ จันทรดี พิชาวุฒิ มานพภาวี วิภาวี วิลัยสิทธิ์ ปัญญา จารุศิริ	1 – 25
Geomorphological Characteristics of Phu Phra Angkhan, Buriram Province: Evidence from Remote Sensing and Geological Data Nattarika Meesa Patcharin Kosuwan Jundee Pichawut Manopkawee Wipawee Wilaisit Punya Charusiri	
Permian radiolarian cherts and their geochemical characteristics in the Central Plain of Thailand: Implications for the geological affiliation and origin of the Permian chert Waraphorn Phromsuwan Yoshihito Kamata Thasinee Charoentitirat Katsumi Ueno and Apsorn Sardsud	26 – 50

Any opinions expressed in the articles published in this journal are considered the author's academic
Autonomy and responsibility about which the editorial committee has no comments, and upon which
the editorial committee take no responsibility.

ข้อคิดเห็นของบทความทุกเรื่องที่ดีพิมพ์ลงในวารสารฯ ฉบับนี้ถือว่าเป็นความคิดอิสระของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่มีส่วน
รับผิดชอบ หรือไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยกับข้อคิดเห็นนั้น ๆ แต่อย่างไร

ลักษณะเฉพาะทางธรณีสัณฐานของภูพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์:

หลักฐานจากข้อมูลโทรสัมผัสและธรณีวิทยา

Geomorphological Characteristics of Phu Phra Angkhan, Buriram Province: Evidence from Remote Sensing and Geological Data

ณัฐริกา hmeesa^{1*} พัชรินทร์ โคสุวรรณ จันทร์ดี² พิชาวุฒิ มานพกาวิ² วิชาวี วิลัยสิทธิ์¹ ปัญญา จารุศิริ^{1,3}

¹กองทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี กทม. 10400

²ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

³ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านลัทธิฐานวิทยาพื้นผิวโลกและธรณีพิบัติภัยขั้นสูง (MESA CE),

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กทม. 10330

*ผู้รับผิดชอบบทความ: ae.ntrkmeesa1@gmail.com, cpunya@chula.ac.th

วันที่รับบทความ 11 มีนาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ 27 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ 27 มิถุนายน 2568

Nattarika Meesa¹ Patcharin Kosuwan Jundee² Pichawut Manopkawe²

Wipawee Wilaisit¹ Punya Charusiri^{1,3}

¹ Economic Geology Division, Department of Mineral Resources, Bangkok 10400 Thailand

² Department of Geological Sciences, Faculty of Science,

Chiang Mai University, Chiang Mai 50200 Thailand

³ Morphology of Earth Surfaces and Advanced Geohazards Center of Excellence (MESA CE),

Chulalongkorn University, Bangkok 10330 Thailand

*Corresponding author: ae.ntrkmeesa1@gmail.com, cpunya@chula.ac.th

Received 11 March 2024; Revised 27 June 2025; Accepted 27 June 2025.

บทคัดย่อ

ภูพระอังคาร ซึ่งเป็นเขาลูกเล็ก ๆ และเป็นที่ตั้งของสถาปัตยกรรมทางโบราณคดีและศาสนา อยู่
ที่ ตำบลเจริญสุข อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์ ได้ถูกคัดเลือกให้เป็นพื้นที่ศึกษาวิจัย โดยมี
วัตถุประสงค์เพื่อป้องกันลักษณะเฉพาะของสภาพธรณีสัณฐานและภูมิลักษณะ ตลอดจนแนวทางการ
กำเนิดภูพระอังคาร โดยการวิจัยนี้เริ่มจากการรวบรวมข้อมูลธรณีวิทยา การแปลความหมายข้อมูลจาก
ภาพโทรสัมผัสและการออกสนาม รวมทั้งการสร้างแบบจำลองการเกิดโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์
หรือ GIS ผลการศึกษาโดยรวมพบว่า ภูพระอังคารเป็นภูเขาไฟขนาดเล็กที่ดับสนิทแล้ว โดยเทียบเคียง
จากอายุหินภูเขาไฟพบนมั้งใกล้เคียง ๆ กันซึ่งกำหนดอายุได้ 0.9 ล้านปี ภูพระอังคารประกอบด้วยหิน
ละลายบะซอลต์อัลคาลี-โอลีวิน ชั้นหนามากที่ปราศจากเศษหินและเถ้าภูเขาไฟ ผลการวิเคราะห์ข้อมูล
ทางธรณีเคมีหินบะซอลต์ของภูพระอังคารมีปริมาณซิลิกาออกไซด์ที่น้อย (< 55%) ทำให้มีความหนืดต่ำ
จึงแผ่ปกคลุมพื้นที่บริเวณกว้างได้ และทำให้เกิดเป็นภูมิลักษณะภูเขาไฟที่มีรูปลักษณะคล้ายกับฝาชีหรือโล่
นอกจากนั้นยังพบว่าปากปล่องมีรูปร่างค่อนข้างกลม กว้าง 1.0 ถึง 1.5 กิโลเมตร มีเส้นรอบวงของขอบ
ปากปล่อง 3.14 กิโลเมตร จากภาพตัดขวางทำให้ทราบว่าภูพระอังคารมีความชันที่หลากหลาย (shield
volcano) ความชันไม่เกิน 10 องศา และเป็นแบบไม่สมมาตร โดยความลาดชันที่ค่อนข้างมากจะปรากฏ
อยู่ทางด้านตะวันออกและเว้าโค้งลึกต่อไปจนถึงที่ราบ ส่วนด้านตะวันตกความลาดชันน้อยกว่า เมื่อ
จำแนกตามรูปร่างลักษณะและภูมิลักษณะทำให้สรุปแนวทางการเกิดได้ว่าภูพระอังคารจัดเป็นภูเขาไฟ

รูปโล่ที่มีปากปล่องแบบยุบตัว ซึ่งเกิดจากการทรุดถล่มโดยการระเบิดค่อนข้างแรงและเป็นวงซ้อนกันหลายชั้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีเนินเขาเล็ก ๆ ที่อยู่ด้านตะวันออก ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า เกิดจากรอยแตกของปากปล่องขนาดเล็ก อาจเป็นผลมาจากการปะทุครั้งสุดท้ายของภูเขาไฟพระอังคาร สถานที่ตั้งของวัดที่สร้างอยู่บริเวณขอบปากปล่องคาดว่าจะปลอดภัยจากพิบัติภัยดินถล่มเนื่องจากไม่ปรากฏอยู่ในส่วนที่ลาดชัน

คำสำคัญ: ธรณีสัณฐาน, ภูเขาไฟหมดพลัง, ภูมิลักษณ์, ภูเขาไฟพระอังคาร, บุรีรัมย์, หินบะซอลต์

Abstract

Phu Phra Angkhan, the small hill where the architectural and religious sites have been established, is in Buriram p, northwestern Thailand. The area has been selected for the current investigation with the aims of determining geomorphological characteristics and proposing the mode of occurrences using geographic information system (GIS). The current research commences from geological data compilation, remote-sensing image interpretation, field checking, and explanation of the landform. The result illustrates that Phu Phra Angkhan is a small extinct volcano, based upon the radiometric age (~ 0.9 Ma) of the volcanic rocks at the nearby Khao Phanom Rung volcano. The current field study demonstrates that Phu Phra Angkhan volcano consists of massive layers of alkali olivine basaltic lava without any pyroclastic debris. Previous geochemical data reveal that the silicon oxide is lower than 55 %, suggesting that the lava has low viscosity enough to spread over a wide area. The lava accumulation may have caused the cone - shaped volcanic landform to form shield or dish cover with relatively not gentle slopes. Additionally, it is also recognized that its crater has a circular shape with a radius of 1.0 to 1.5 km, and its circumference is about 3.14 km. The cross sections in several directions disclose that the Phu Phra Angkhan volcano has its various slope angles and asymmetrical shapes. The steeper slope angles are in the eastern flank with its deeply eroded slope surface whereas on the western flank more gentle slopes are encountered. Based on its morphology and landform characteristics and classification, it is concluded that Phu Pra Angkhan represents the extinct shield volcano with a collapsed crater, formed by explosion associated with surface subsidence. Its mode of occurrence is manifested by a complex crater forming as nested circumferences. Moreover, a very small mound or hill is found at the eastern edge crater, triggered by crater-ring fracturing, implying the last, relatively violent eruption. It is also anticipated that the temple located at the crater edge is considered to be safe from a landslide disaster.

Keywords: Geomorphology, Extinct volcano, Landform, Phu Phra Angkhan, Buriram, Basalt

1. บทนำ

พุทธระอังการเป็นแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติและทางธรณีวิทยาที่สำคัญ อีกทั้งเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงประวัติศาสตร์ โดยเฉพาะทางพุทธธรรมที่สอดคล้องกับตำนานอังการธาตุ และเป็นที่ประดิษฐานของพระพุทธรูปปางจำลอง (พนิดา สงวนเสรีวานิช, 2557) อีกทั้งยังเป็นที่ตั้งของวัดเขาอังการซึ่งเป็นวัดที่มีประติมากรรมและสถาปัตยกรรมหลายสมัย (ธัญญนันท์ เนาวรัตน์ และ ปัทมาวดี ชาญสุวรรณ, 2565) นอกจากนี้ยังมีแหล่งชุมชนโบราณ มีภาพจิตรกรรมฝาผนังอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ มีพระนอนกลางแจ้ง (Sukprasert และคณะ, 2017; McuTour, 2015) และยังพบใบเสมามากมาย (กิตติพงษ์ สนเล็ก, 2563) ที่เชื่อว่าสร้างขึ้นในสมัยทวารวดี พุทธศตวรรษที่ 13-18 (ศักดิ์ชัย สายสิงห์, 2547, ขยาภรณ์ สุขประเสริฐ และคณะ, 2560) ดังนั้นพุทธระอังการจึงจัดว่ามีความสำคัญทั้งทางประวัติศาสตร์ ศาสนา และโบราณคดีอย่างมาก

พุทธระอังการ เดิมชื่อ “ภูลอย” (ธรรมรัตน์ เนาวรัตน์ และ ปัทมาวดี ชาญสุวรรณ, 2565) เพราะมีลักษณะเหมือนภูเขาลูกนี้ลอยอยู่บนที่ราบ ส่วนพุทธระอังการได้ชื่อนี้เพราะเชื่อกันว่ามีการนำเอาพระอังการของพระพุทธเจ้ามาประดิษฐานที่ “ภูลอย” (ธัญญนันท์ เนาวรัตน์ และ ปัทมาวดี ชาญสุวรรณ, 2565) เชื่อกันว่าเมื่อมองจากด้านบนภูอังการมีลักษณะคล้ายพญาครุฑกางปีกบิน ดังนั้นจึงทำให้เหมาะสมในการสร้างสถานที่บรรจุพระอังการไว้ที่ไหล่ข้างซ้ายของพญาครุฑ (www.nkr.mcu.ac.th) ซึ่งบนเขาเป็นที่ตั้งของวัด และน่าจะสร้างในยุคสมัยเดียวกับปราสาทหินพนมรุ้ง พุทธระอังการอยู่ทางทิศตะวันตกของเขาพนมรุ้ง 12.5 กิโลเมตร ซึ่งเป็น

ภูเขาไฟที่ประกอบด้วยหินบะซอลต์ (กานตามณี วิชโรสินธุ์, 2563)

ในประเด็นการวิจัย ส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปทางโบราณคดีและประวัติศาสตร์ เช่น ศิลปกรรมบนใบเสมาของวัดเขาพุทธระอังการ (ธัญญนันท์ เนาวรัตน์ และ ปัทมาวดี ชาญสุวรรณ, 2565) และชุมชนโบราณสมัยทวารวดีที่เชื่อมต่อกับสมัยลพบุรี ในพุทธศตวรรษที่ 11– 18 (พระใบฎีกาสุพจน์ ตปสีโล, 2560) นอกจากนี้ยังเน้นการวิจัยไปที่การพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยว (พนิดา สงวนเสรีวานิช, 2557 และ สรรเพชร เพียรจัด และจารินี ม้าแก้ว, 2564) ในทางพระพุทธศาสนา มีการวิจัยที่สำคัญเกี่ยวกับคุณค่าของใบเสมา โดยเฉพาะจากผลงานของพระศรีสัญญาณมณี และคณะ (2560)

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับธรณีศาสตร์และธรณีวิทยาในด้านลึกหรือเชิงรายละเอียดของพุทธระอังการและบริเวณโดยรอบมีไม่มากนัก (ดู Barr และ Macdonald, 1978, Tritrangan, 1992, Barr และ Charusiri, 2011, Yan และคณะ, 2018, ธวัชชัย เชื้อเหล่าวานิช และคณะ, 2551 และ 2554) ส่วนการศึกษาวิจัยภูมิลักษณะโดยใช้การแปลความหมายข้อมูลภาพจากโทรสัมผัส (remote-sensing image data) แทบไม่มีผู้ศึกษาในรายละเอียดเลยในแถบอีสานใต้ (ดู ณัฐริกา หมีสา, 2564) ส่วนนอกพื้นที่ศึกษาก็มีอยู่บ้าง ที่สำคัญได้แก่ รายงานของกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม (2538), Charusiri และคณะ (1996), และปัญญา จารุศิริ และคณะ (2542)

พุทธระอังการตั้งอยู่ที่บ้านเจริญสุข ตำบลเจริญสุข อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดบุรีรัมย์

(รูป 1ก) และได้ถูกคัดเลือกเพื่อการศึกษาวิจัยนี้ ภูพระอังคารซึ่งอยู่ห่างจากตัวเมืองบุรีรัมย์ ประมาณ 74 กิโลเมตร และจากอำเภอนางรอง ไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ 12 กิโลเมตร ตาม ระยะแผนที่ (map length) และอยู่ทางทิศ ตะวันตกของเขาค้อสูง 12.5 กิโลเมตร (รูป 1ก) การเข้าถึงพื้นที่ทำได้ตลอดปีทั้งทางบกและอากาศ

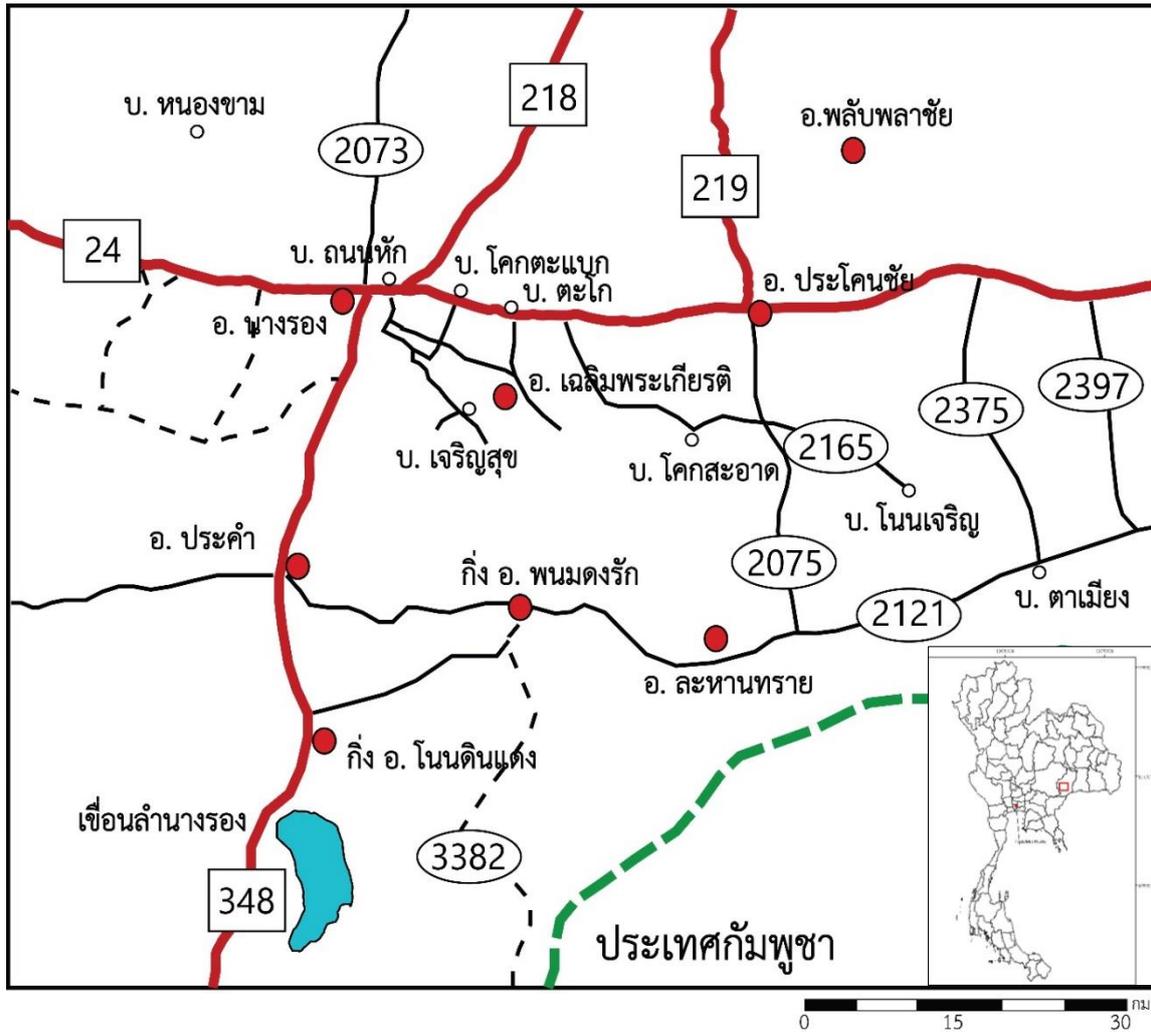
วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษา ลักษณะเฉพาะของภูมิลักษณะ (landform characteristics) และสภาพธรณีสัณฐาน (geomorphology) รวมถึงชนิดและการกำเนิด ของภูเขาไฟในพื้นที่ภูพระอังคาร โดยใช้ข้อมูลภาพ จากดาวเทียมและระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เบื้องต้น โดยใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมและ ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์

2. วัสดุและวิธีการศึกษา (Materials and Methods)

หลังจากการทบทวนวรรณกรรม (literature reviews) ที่เกี่ยวข้อง จึงได้ศึกษาและวิเคราะห์ ข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้ 1) ข้อมูลจากแผนที่ภูมิประเทศ ขนาดมาตราส่วน 1 : 50,000 ของกรมแผนที่ทหาร ระวัง 5538II อำเภอนางรอง (รูป 1ข และ ค) ภาพจากดาวเทียม google earth (รูป 2ง) 2) ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (digital elevation model) ของ USGS โดยระบบ SRTM (Shuttle radar topography mission) ที่มีค่า ความละเอียดของข้อมูล 20 เมตร (รูป 3ก) 3) การวิเคราะห์ข้อมูลได้ใช้ผ่านโปรแกรม ArcGIS หลังจากนั้นจึงใช้สีผสมเทียม (fault color composite) เพื่อจัดทำแผนที่ต่างระดับ (relief map) (รูป 5) ซึ่งรายละเอียดหาได้จาก ภูมิรัฐศาสตร์ (2564) 4) ขั้นตอนมาเป็นการจัดทำแผนที่ธรณีสัณฐาน (geomorphological mapping) โดย เริ่มจากการลากเส้นทางน้ำด้วยการวิเคราะห์ด้วย

สายตา (visual interpretation) ภายในพื้นที่ ศึกษาภูพระอังคารเพื่อจำแนกระบบทางน้ำ (drainage patterns) (รูป 4ก) 5) ต่อจากนั้นจึง สร้างภาพตัดขวาง (topographic profiles) ให้ ตัดผ่านพื้นที่ศึกษา (รูป 6ก, 6ข, 6ค, 6ง) ในหลาย ทิศทางเพื่อศึกษาและประเมินความลาดชันเขา (hill slope elevation) โดยเฉพาะ ทิศ ตะวันออก-ตะวันตก, เหนือ-ใต้, ตะวันตกเฉียง เหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และตะวันออกเฉียงเหนือ- ตะวันตกเฉียงใต้ และจัดทำแผนที่ความลาดเอียง และ 6) อธิบายลักษณะภูมิสัณฐานและอธิบาย ถึงแนวทางการเกิดของภูพระอังคาร โดยใช้ระบบ สารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) อนึ่ง ในการจัดทำ หรือสร้างแผนที่ความลาดชัน (slope map) จาก โปรแกรม ArcGIS desktop โดยใช้ Arcmap version 10 ที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยมีขั้นตอน รายละเอียดดังนี้:

1. สร้าง shapefile (.shp file) ให้ครอบคลุม พื้นที่ศึกษาภูพระอังคาร;
2. นำไฟล์ DEM (ของทั้งประเทศไทย) มาตัด (clip) เฉพาะพื้นที่ศึกษา และจัดเก็บในรูปแบบ shp ไว้;
3. สร้าง Slope Map ในไฟล์ DEM ที่ทำ การ clip แล้ว โดยไปที่ ArcToolbox >> 3D Analyst Tools >> Raster Surface >> Slope >> Input raster >> ช่อง output measurement (optional) >> DEGREE >> OK;
4. เปลี่ยนสี slope โดยปรับสีผสม (false colors) และเลือกชนิดสี จนได้รูปภาพที่เห็น ชัดเจนตามต้องการ; และ
5. นำไฟล์ hillshade มาซ้อนทับกับ พื้นที่ศึกษา ตรวจสอบความคมชัดของภาพ และ ปรับความเป็นภาพสามมิติ (3D)



รูป 1(ก): แผนที่เส้นทางแสดงการเข้าถึงพื้นที่ศึกษาภูพระอังคาร ซึ่งอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของ อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.บุรีรัมย์ และ รูปเล็ก เป็นแผนที่ประเทศไทยแสดงที่ตั้งพื้นที่ศึกษาภูพระอังคารในจังหวัดบุรีรัมย์ (กรอบสี่เหลี่ยมสีแดง)

อนึ่ง หลังการแปลความหมายภาพจากดาวเทียมแล้ว จึงได้ออกสำรวจในสนามเพื่อตรวจสอบสภาพธรณีสัณฐานละอรรณีวิทยาในพื้นที่ศึกษาและข้างเคียง

3. ธรณีวิทยาทั่วไป (General Geology)

ข้อมูลจากการตรวจสอบในสนามในครั้งนี้ ผนวกกับข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี (2545, 2550, และ 2553) และภาพจากดาวเทียม google ทำให้ทราบว่าพระอังคารและเนินเขาเล็ก ๆ ข้างเคียงจัดเป็นหินภูเขาไฟสีเข้ม (mafic volcanic rocks) ที่ส่วนใหญ่เป็นหินละลาย

บะซอลต์ (basaltic lava) ที่ปะทุผ่านชั้นหินตะกอนของกลุ่มหินโคราชมหายุคมีโซโซอิก (Mesozoic) ซึ่งรองรับข้างใต้ และส่วนใหญ่เป็นหินทรายและหินทรายแป้งของหมวดหินโคกกรวด (อายุปลายยุคครีเทเชียส - Late Cretaceous หรือ 90-100 ล้านปี) ส่วนบริเวณเนินเขาโดยรอบภูพระอังคารเป็นตะกอนธารน้ำ (fluvial deposits) ยุคปัจจุบัน (หรือ ยุคควอเทอร์นารี - Quaternary, ≤ 2.5 ล้านปี) และเป็นตะกอนร่วนไม่จับแข็ง (unconsolidated deposits) ดังนั้นในประเด็นโครงสร้างภูพระอังคารและภูเขาไฟอื่นข้างเคียง เช่น เขากระโดง เขาพนมรุ้งวางตัวในแนว



รูป 2 (ก): หินบะซอลต์ภูเขาไฟที่โผล่ตามธรรมชาติ (natural exposure) แสดงรอยแตกรูปเสาหิน (columnar joints) และการไหลซ้อนทับเป็นชั้นๆของหินละลาย (ข) ภาพขยายใหญ่ของเสาหินบะซอลต์ และ (ค) เสาหินบะซอลต์ที่โผล่จากการขุดอ่างเก็บน้ำเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนน้ำ บ้านโคกมะค่าโหรน ต. สะเดา อ. นางรอง จ. บุรีรัมย์

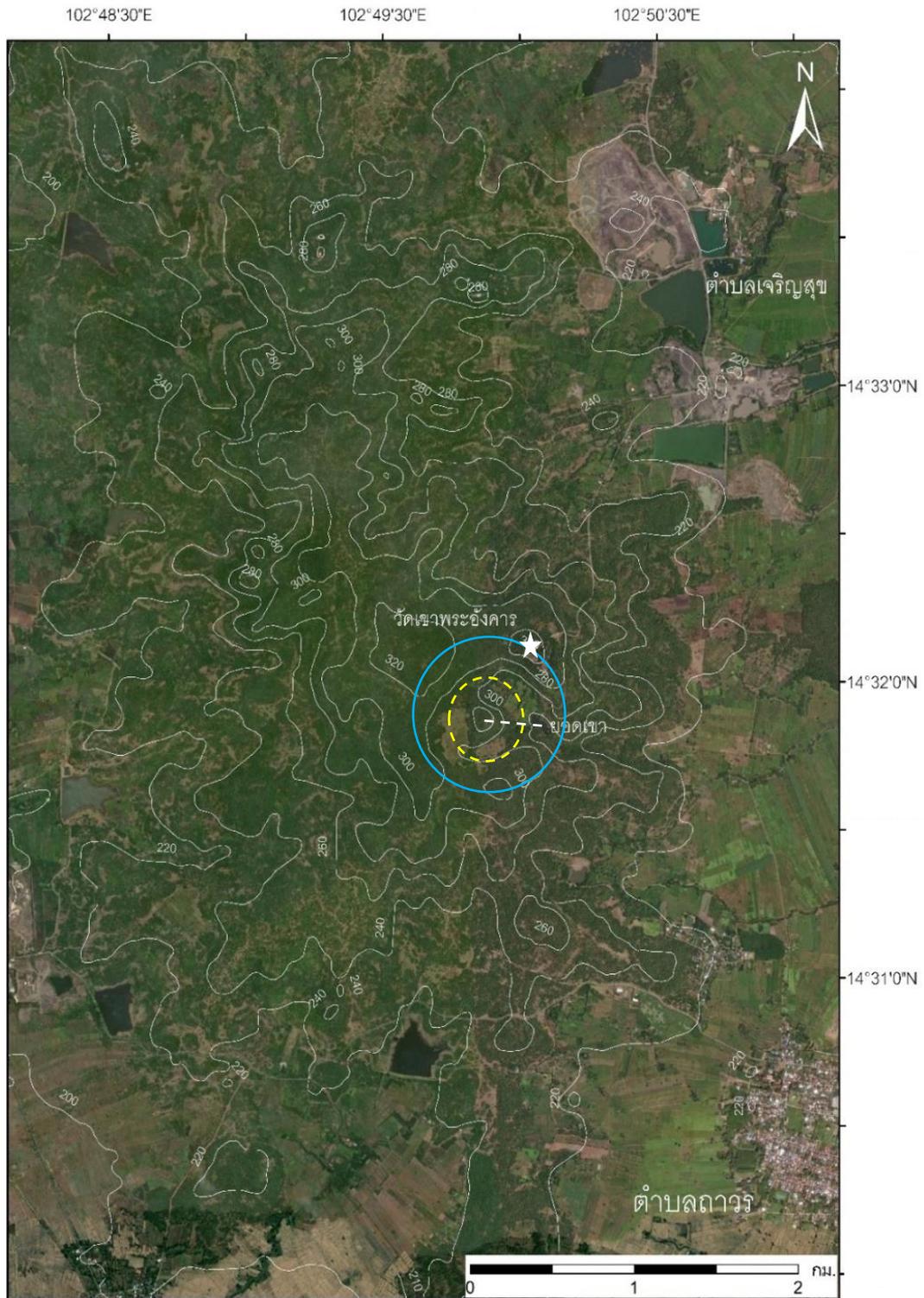
เกือบตะวันออก-ตะวันตก รายงานของกรมทรัพยากรธรณี (ดู <http://dmr.go.th/ภูเขาไฟ>) ได้สรุปว่า ภูเขาไฟมีรูปร่างเป็นโดมหินละลาย (lava domes) หรือหินละลาย (lava) ที่มีลักษณะคล้ายรูปฝาชีคว่ำและมีฐานกว้าง ผลการเดินสำรวจของคณะผู้วิจัยในการศึกษารั้งนี้ถึงปากปล่องภูเขาไฟ พบตะกัณฑ์ภูเขาไฟ (scoria) ที่เกิดจากการปะทุของหินละลาย และได้ประเมินความหนาของหินบะซอลต์ภูเขาไฟไว้ที่ 100-110 เมตร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นชั้นหินบะซอลต์ที่วางตัวในแนวเกือบราบ และประกอบด้วยชั้นหินละลาย (lava layers) อย่างน้อย 4 ชั้น โดยที่แต่ละชั้นหนามากกว่า 10 เมตร (ดูรูป 2) โดยไม่มีชั้นของเถ้าหรือเศษหินภูเขาไฟปรากฏ น่าสังเกตว่าชั้นหินบะซอลต์ นี้มีความหนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อถึงยอดเขา และบางลง

อย่างชัดเจนในจุดที่ห่างจากยอดเขาออกมา ทำให้คาดคิดว่าน่าจะเกิดจากการปะทุผ่านรอยแตก (fissure eruption) ในแนวดังกล่าวเป็นการปะทุแบบเงียบ (quiescent eruption) และไม่ใช่ระเบิดรุนแรง ในช่วงอายุควอเทอร์นารี ส่วนหินภูเขาไฟที่ยอดภูส่วนใหญ่เป็นพวกตะกัณฑ์ภูเขาไฟหรือหินสกอเรีย (scoria) ที่สด มักมีสีน้ำตาลแดงจนถึงน้ำตาลดำ และมีรูพรุนมาก ทำให้หินเบาสะสมตัวอยู่เป็นจำนวนมาก จึงดูเหมือนว่าภูเขาไฟเป็นภูเขาไฟที่อาจไม่สงบได้

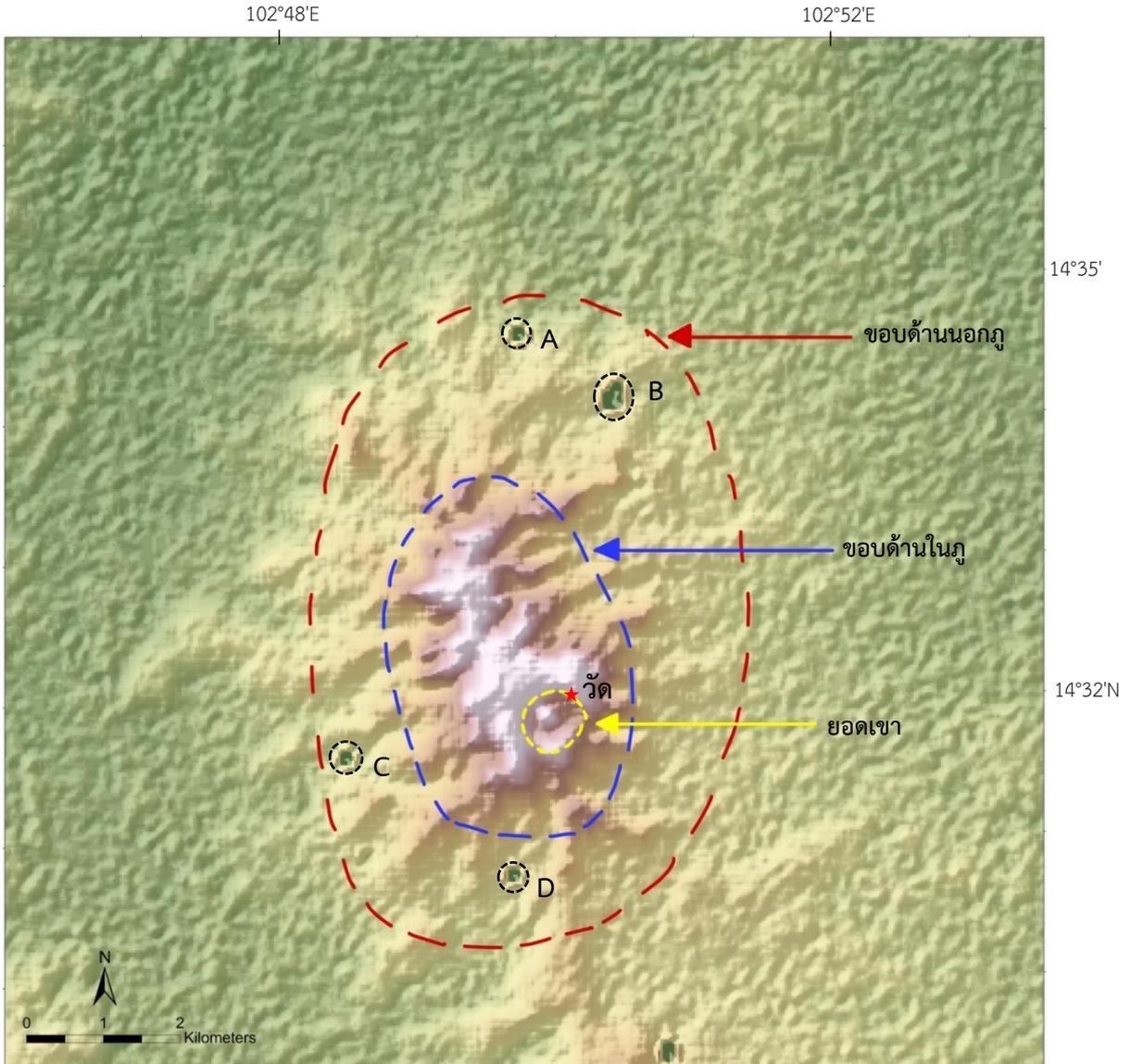
4. ผลการศึกษา

4.1 ลักษณะภูมิลักษณะทั่วไป

ผลการแปลความหมายจากโทรสัมผัส (remote sensing interpretation) ของพื้นที่ บริเวณกว้าง (regional area) ของอีสานใต้โดยอาศัยข้อมูลภาพ



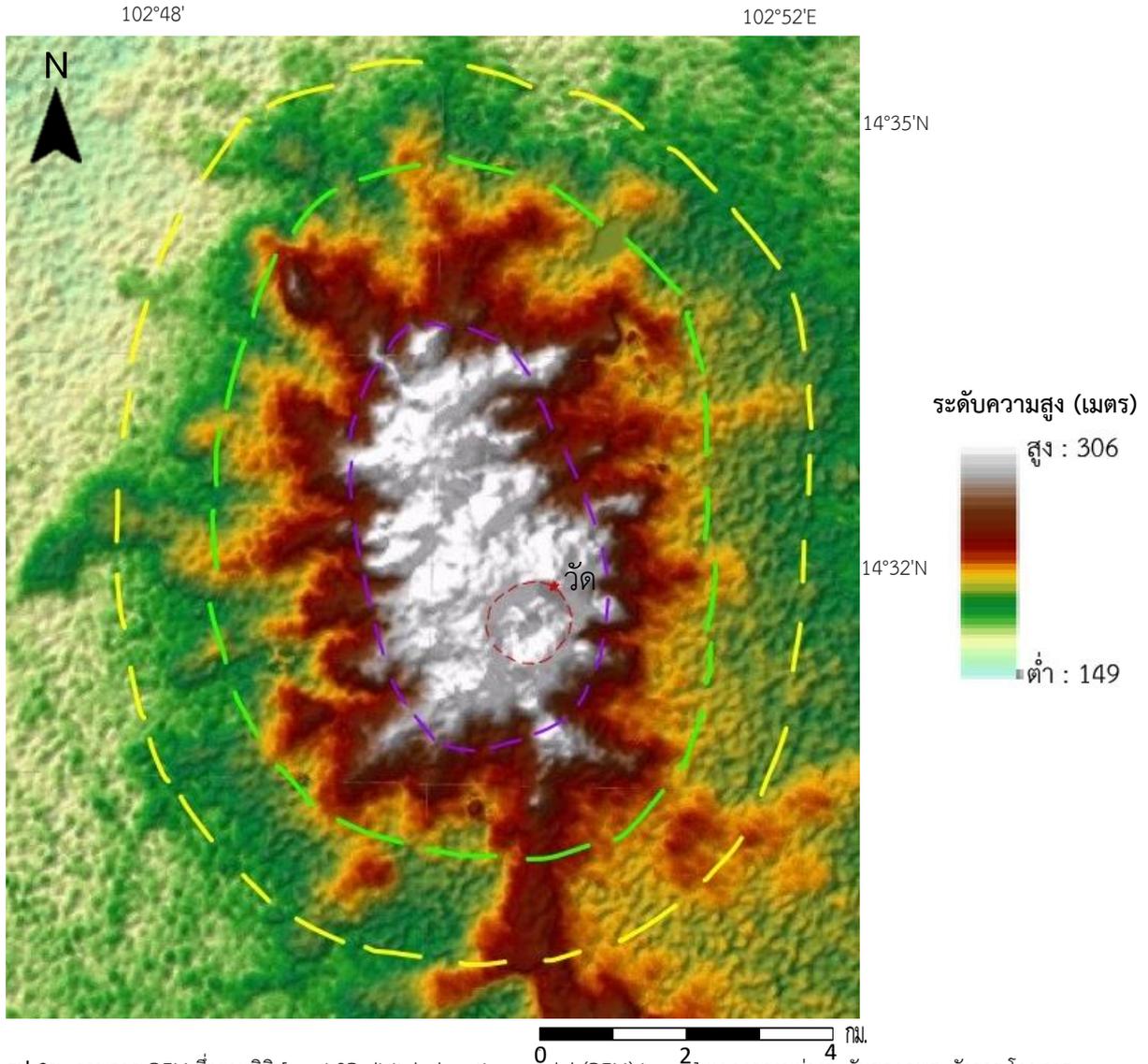
รูป 2(ง): ภาพจากดาวเทียมกูเกิลเอิร์ธ (google earth, ถ่ายเมื่อปี ค.ศ. 2021) ของพื้นที่ศึกษาพระอังกคาร แสดงขอบเขตภูเขา (วงกลมสีฟ้า), ที่ตั้งของวัดเขาพระอังกคาร (รูปดาว) ที่อยู่บริเวณขอบภูเขา และขอบวงกลมด้านในของเขา (เส้นประสีเหลือง) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงรอบส่วนในของยอดเขาหรือเนินเขา (วงกลมเล็กสีส้ม)



รูป 3ก: ภาพจากดาวเทียม SRTM DEM แสดงขอบด้านในภูเขาไฟ (เส้นประสีน้ำเงิน, 3 x 4.5 กม.) และขอบด้านนอก (เส้นประสีแดง, 5 x 8 กม.) รวมทั้งยอดเขา (เส้นประสีเหลือง) ของภูเขาไฟและวัดเขาพระอังคาร (จุดแดง)[หมายเหตุ : A, B, C และ D คือภาพที่เกิดจากการประมวลผลคลาดเคลื่อน (errors in image processing)]

จากดาวเทียม Google Earth ผนวกกับข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยา 1:250,000ของกรมทรัพยากรธรณี (2519) ทำให้ทราบว่า บริเวณพื้นที่ศึกษาโดยทั่วไปรอบ ๆ ภูเขาพระอังคาร ประกอบด้วยที่เนินเขาและภูเขาไฟขนาดเล็กที่เรียงตัวกระจกระบายในแนวเกือบตะวันออก-ตะวันตก และมีความสูงระหว่าง 265 - 386 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง โดยที่เขานมรุ้งที่อยู่ถัดจากภูเขาพระอังคาร

ไปทางตะวันออกจัดเป็นภูเขาไฟที่สูงที่สุด คือ 386 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ส่วนภูเขาพระอังคารมียอดสูงสุดที่ 331 เมตร ภูเขาปลายบัดสูง 289 เมตร และเขาระโดง สูง 265 เมตร จากระดับทะเลปานกลาง ภูเขาไฟเหล่านี้ถูกล้อมรอบด้วยที่ราบซึ่งเกิดจากการกระทำของทางน้ำ นอกบริเวณส่วนที่เป็นภูมิลักษณ์ภูเขาไฟระบบทางน้ำเป็นแบบกิ่งไม้ (dendritic system)



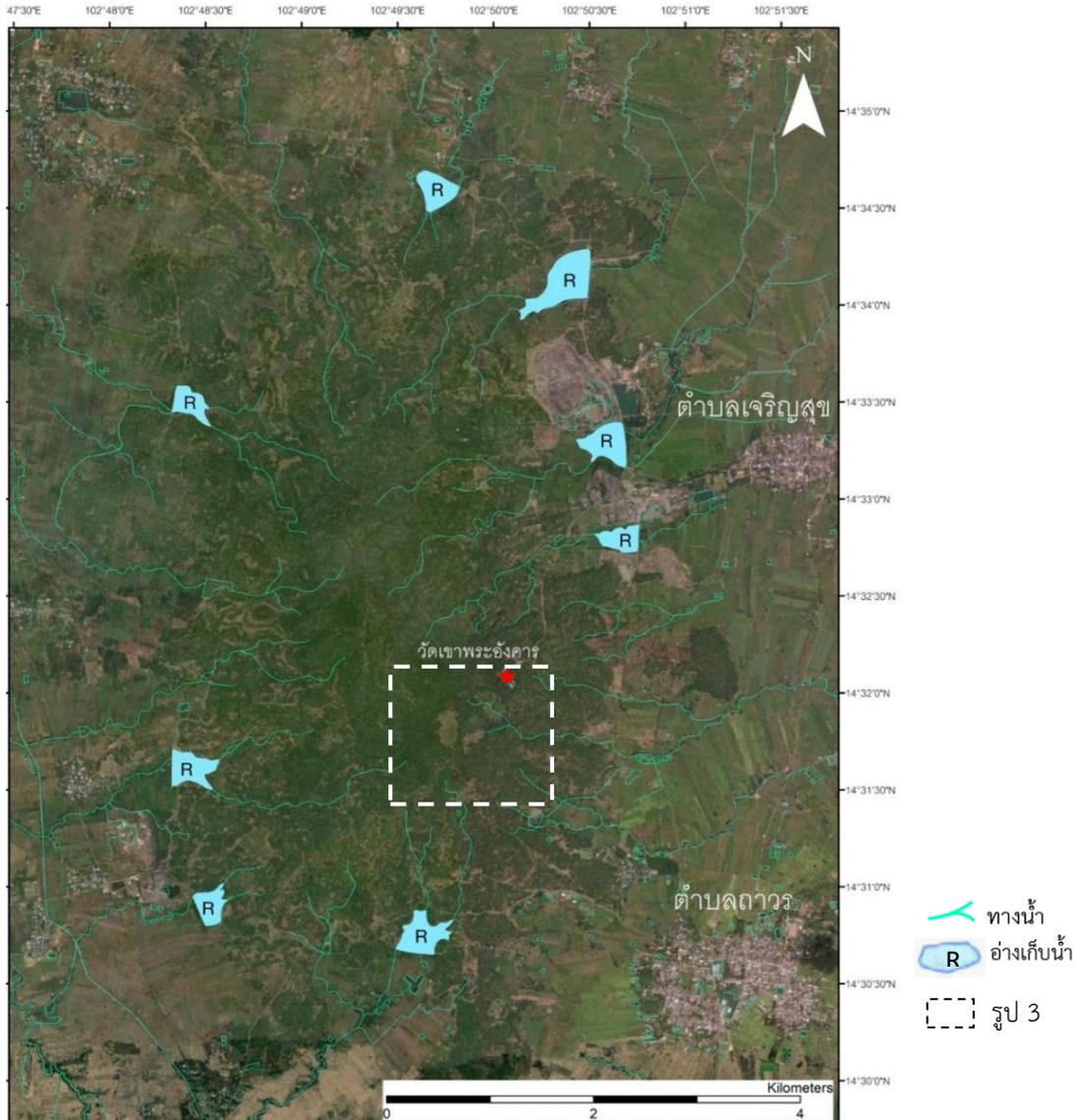
รูป 3ข: ภาพจาก DEM กึ่งสามมิติ [semi-3D digital elevation model (DEM) image] แสดงความต่างระดับของภูเขาพระอังคาร โดยการ
ใช้สีผสมเทียม (false-color composite) ด้วยโปรแกรม ArcGIS ทำให้เห็นลักษณะภูมิลักษณะเป็นวงกลมซ้อนกัน 3 วง โดยมียอดสูงสุดที่
ประมาณ 319 เมตร (วงกลมสีแดง) และขอบด้านนอกภูเขาพระอังคารแสดงด้วยสีต่างๆกัน (เหลืองวงนอกสุด, เขียววงกลาง, และม่วงวงในสุด)
ส่วนวัดเขาพระอังคารแสดงด้วยรูปดาว

แต่บริเวณภูเขาไฟระบบทางน้ำเป็นแบบรัศมี (radial system) ส่วนที่ไหลออกไปทางตอนใต้ เป็นพื้นที่ลาดลุ่มในเขตประเทศกัมพูชาตอนเหนือ ติดชายแดนไทย ที่มีระดับความสูงของพื้นดิน เฉลี่ยจากระดับทะเล 80-100 เมตร

4.2 แผนที่ ภูมิประเทศและแผนที่ ธรณีวิทยา (Topographic and geologic maps)

ผลการวิเคราะห์แผนที่ ภูมิประเทศ (topographic map) ของกรมแผนที่ทหาร มาตรฐาน

ส่วน 1:50000 (รูป 1ข) และแผนที่ธรณีวิทยา จังหวัดบุรีรัมย์ (กรมทรัพยากรธรณี, 2550) พบว่า พื้นที่ศึกษาภูเขาพระอังคารประกอบด้วยหินภูเขาไฟ จำพวกบะซอลต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยตะกอนที่ราบลุ่มแม่น้ำยุคปัจจุบัน (Quaternary alluvium) โดยไม่แสดงลักษณะภูมิลักษณะ (landform) ที่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะช่วงชั้นความสูง (contour interval) ทุก ๆ 20 เมตร อยู่ห่างกันเกินไป จนทำให้ไม่สามารถประเมินภาพได้ชัดเจน



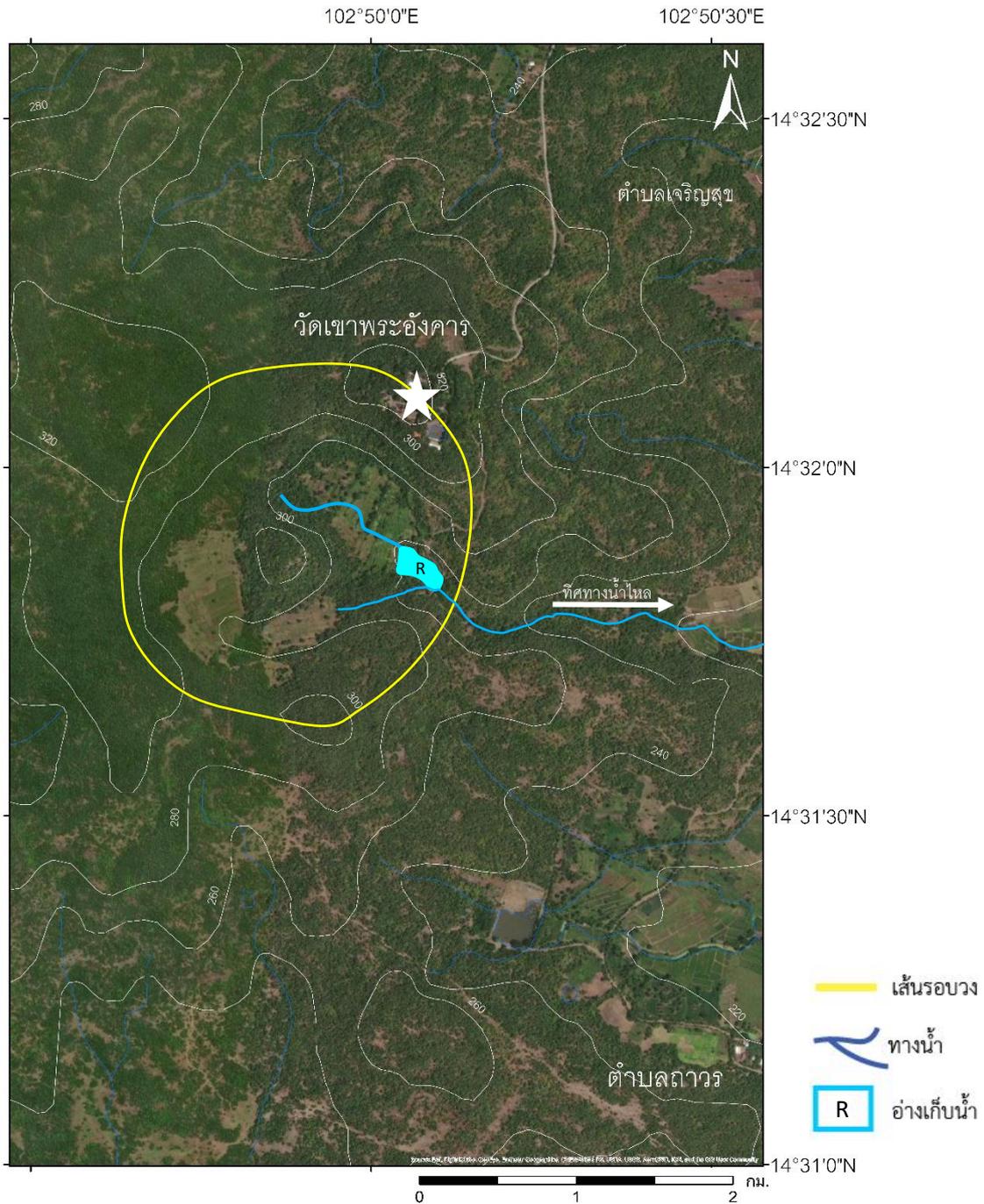
รูป 4ก ภาพถ่ายจากดาวเทียมกูเกิลเอิร์ธ (google earth ถ่ายเมื่อปี ค.ศ. 2021) แสดงพื้นที่ศึกษาภูพระอังคาร (เส้นประสีเหลือง) และระบบทางน้ำแบบรัศมี (radial drainage system) โดยรอบ ให้สังเกตระบบการไหลของทางน้ำจากจุดกลางยอดเขาออกไปโดยรอบ ซึ่งเป็นภูมิลักษณะพิเศษและโดดเด่น (unique and diagnostic landform) ของภูเขาไฟและวงขอบเขตด้านนอกสุด (เส้นประสีเหลือง) ของอ่างเก็บน้ำแสดงถึงจุดที่น้ำได้ดินไหลลงเข้าแอ่งได้เมื่อถึงฤดูฝน

ว่าภูพระอังคารแสดงหลักฐานทางภูมิประเทศ (physiographic evidence) ของภูเขาไฟอย่างไร อย่างไรก็ตามข้อมูลเชิงตัวเลข จากแผนที่ภูมิประเทศทำให้ทราบว่า ภูพระอังคารสูงจากระดับทะเลปานกลาง 110 เมตร ด้วยเหตุนี้จึงพอสรุปได้ว่าผลการแปลความหมายจากแผนที่ ภูมิประเทศในชั้นตอนนี้ ไม่ช่วยให้ปรากฏหลักฐานทางภูมิลักษณะภูเขาไฟ (volcanic landform) ได้

เท่าที่ควร

4.3 ภาพจากดาวเทียม Google Earth (Google Earth Image)

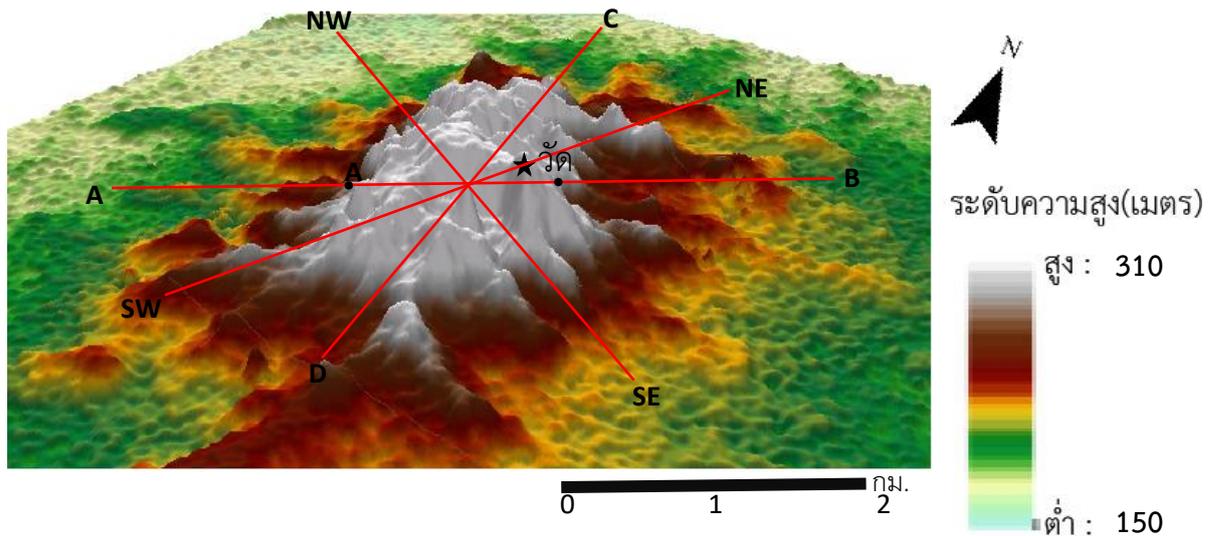
ผลการแปลความหมายภูมิลักษณะ ภูพระอังคารที่ตรวจสอบและตีความด้วยสายตา (visual interpretation) จากภาพ ดาวเทียม google earth ซึ่งถ่ายเมื่อ ปี 2564. ตามที่ได้แสดงในรูป 2 พบว่าภาพจากดาวเทียม Google Earth



รูป 4ข ภาพถ่ายจากดาวเทียมกูเกิลเอิร์ธ (google earth ถ่ายเมื่อปี ค.ศ. 2021) (ขยายจากเส้นประในรูป 4ก) แสดงทางน้ำสายหลัก (major drainage pattern) ที่ไหลจากทิศตะวันตกไปทางทิศตะวันออกตามแนวหุบเขาเปิดกว้าง (widening valley) จากขอบภูพระอังคาร

แสดงขอบเขตของภูพระอังคารที่เห็นได้ชัดเจนมากกว่าผลจากการแปลความหมายจากแผนที่ภูมิประเทศของกรมแผนที่ทหาร โดยพบว่าพระอังคารแสดงภูมิลักษณะเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 กิโลเมตร โดยประมาณ

นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นตำแหน่งของวัดเขาภูพระอังคารที่อยู่ในบริเวณวงกลมด้านนอกของภูเขาไฟ ยิ่งกว่านั้นภาพยังแสดงให้เห็นขอบวงรอบด้านในของภูพระอังคาร ซึ่งอยู่ในพื้นที่รอบ ๆ จุดสูงสุดที่สุดของภูพระอังคาร (319 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง) อีกด้วย



รูป 5 ภาพถ่าย DEM กิ่งสามมิติ (จาก รูป2ค) แบบมุมมองเฉียง แสดงภูมิลักษณะของภูพระอังคารที่ปรากฏเป็นเนินกลมทรงสูงในบริเวณตอนกลาง เส้นสีแดง 4 เส้นแสดงแนวตัดภูมิประเทศในทิศต่างๆ 4 แนว คือ ทิศเหนือ-ใต้, ทิศตะวันออก-ตก, ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้, และทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ โดยที่ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ตัดผ่านวัด

4.4 ภาพจาก DEM และ SRTM DEM (DEM and SRTM DEM Images)

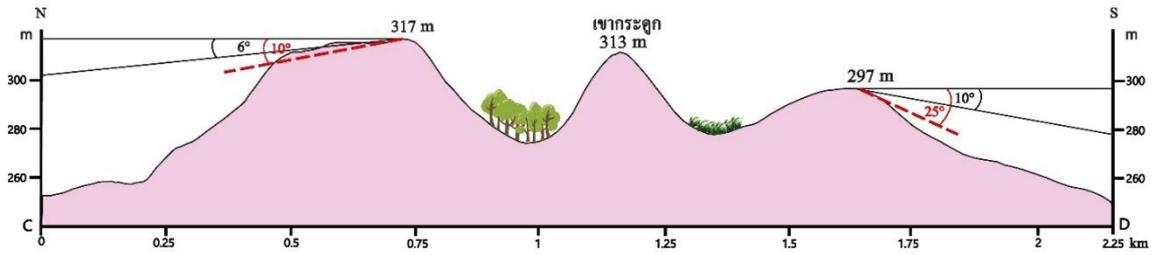
รูป 3ก แสดงผลการแปลความหมายของภูพระอังคารโดยใช้ข้อมูลภาพจาก DEM (Digital Elevation Model) และ SRTM DEM (Shuttle Radar Topography Mission DEM) สำหรับในรูป 3ก เป็นภาพจาก DEM ของภูพระอังคาร ซึ่งมองดูคล้ายวงรี หรือรูปไข่ (oval shape) โดยปรากฏขอบเขตด้านใน (เส้นประสีน้ำเงิน, ขนาด ~ 4.5 x 3 กิโลเมตร) และขอบเขตด้านนอก (เส้นประสีแดง, ขนาด ~ 5 x 8 กิโลเมตร) ชัดเจนขึ้นรวมทั้งยอดภูพระอังคารด้วย ให้สังเกตว่าการวางตัวของแนวภูเขาไฟอยู่ในทิศเหนือ-ใต้ ส่วนรูป 3ข เป็นภาพ SRTM DEM กิ่งสามมิติ ที่ข้อมูลถูกปรับปรุงคุณภาพเพิ่มเติมด้วยสีผสมรวม (false color composite หรือ FCC) ทำให้เห็นภูพระอังคารมีรูปร่างลักษณะเป็นวงกลมซ้อนกัน 3 วง โดยที่ปากปล่องมีรูปร่างค่อนข้างกลม วงในสุด (แสดงด้วยสีม่วง) ค่อนข้างกลม ขนาด 1 x 1.5 กิโลเมตร วงกลาง (สีเขียว) ขนาด ~ 3 x 4.5

กิโลเมตร และวงนอกสุด (สีเหลือง) ขนาด ~ 4.5 x 6 กิโลเมตร นอกจากนั้น ยังแสดงลักษณะภูมิลักษณะของภูพระอังคารที่ดูเหมือนวางตัวในแนวเกือบทิศเหนือ-ใต้ด้วย ส่วนแนวตะวันออกเฉียงเหนือ เห็นสภาพภูมิลักษณะ (พื้นสีขาว) ที่แสดงการเว้าห่างของพื้นผิวภูมิประเทศเข้าไปด้านในอย่างชัดเจน ซึ่งผลจากการแปลข้อมูลภาพ (image data - ในรูป 3ข) เมื่อมองดูจากระยะไกล สามารถตีความได้ว่าภูพระอังคารมีรูปร่างคล้ายกับพญาครุฑ (หรือบางมุมคล้ายเต่า) ที่มีหัวหันไปทางใต้ โดยที่ลักษณะดังกล่าวคล้าย ๆ กับที่บรรยายไว้ในตำนานโบราณ (สรรเพชร เพียรจัด และจารนิ ม้าแก้ว, 2564) ว่าเหมือนพญาครุฑนอนคว่ำหน้า และแปลกที่ว่าคนโบราณมองภาพภูพระอังคารได้อย่างไรจากมุมสูง โดยที่ไม่มีที่สูงล้อมรอบ

รูป 4ก แสดงลักษณะหรือระบบทางน้ำ (drainage system) ของภูพระอังคารที่ดูเหมือนแสดงการไหลในลักษณะที่ทางน้ำออกไปจากยอดเขาถูกโดดจัดเป็นทางน้ำแบบรัศมี (radial pattern)



รูป 6ก ภาคตัดขวางภูพระอังคาร (AB จากรูป 5) ในแนวตะวันออก-ตะวันตก (E-W) แสดงภูมิลักษณะโดยทั่วไปของภูเขาไฟและความชันของขอบภูพระอังคารทั้งสองด้าน โดยที่ด้านตะวันตกมีความสูง 311 เมตร และมีมุมลาดเอียง (slope angle) ประมาณ 7° ในส่วนบนและ 19° ในส่วนล่าง ส่วนด้านตะวันออกมีความสูง 275 เมตร และมีมุมลาดเอียงประมาณ 9° ในส่วนบนและ 26° ในส่วนล่าง โดยเฉลี่ย



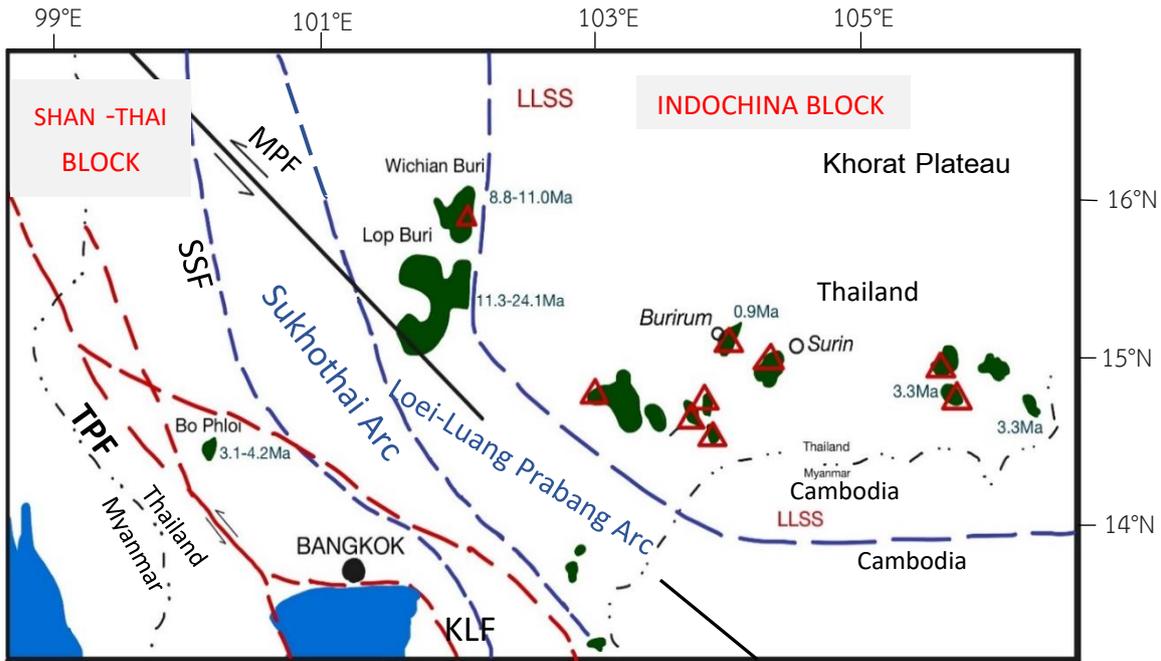
รูป 6ข ภาคตัดขวางภูพระอังคาร (CD, รูป 5) ในแนวเหนือ-ใต้ (N-S) แสดงภูมิลักษณะโดยทั่วไปของภูเขาไฟและความชันของขอบภูพระอังคารทั้งสองด้าน โดยที่ทิศเหนือมีความสูง 317 เมตร และมีมุมลาดเอียง (slope angle) ประมาณ 6° ในส่วนบนและ 20° ในส่วนล่าง ส่วนทิศใต้มีความสูง 297 เมตร และมีมุมลาดเอียงประมาณ 10° ในส่วนบนและ 25° ในส่วนล่าง โดยเฉลี่ย



รูป 6ค ภาคตัดขวางภูพระอังคาร (EF, รูป 5) ในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ (NE-SW) แสดงภูมิลักษณะโดยทั่วไปของภูเขาไฟและความชันของขอบภูพระอังคารทั้งสองด้าน โดยที่ทิศตะวันตกเฉียงใต้มีความสูง 307 เมตร และมีมุมลาดเอียง (slope angle) ประมาณ 10° ในส่วนบน และ 28° ในส่วนล่าง ส่วนทิศตะวันออกเฉียงเหนือมีความสูง 319 เมตร และมีมุมลาดเอียงประมาณ 10° ในส่วนบน และ 36° ในส่วนล่าง โดยเฉลี่ย



รูป 6ง ภาคตัดขวางภูพระอังคาร (GH, รูป 5) ในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ (NW-SE) แสดงภูมิลักษณะโดยทั่วไปของภูเขาไฟและความชันของขอบภูพระอังคารทั้งสองด้าน โดยที่ทิศตะวันตกเฉียงเหนือมีความสูง 326 เมตร และมีมุมลาดเอียง (slope angle) ประมาณ 3° ส่วนทิศตะวันออกเฉียงใต้มีความสูง 286 เมตร และมีมุมลาดเอียงประมาณ 7° ในส่วนล่าง และ 32° ในส่วนบน โดยเฉลี่ย

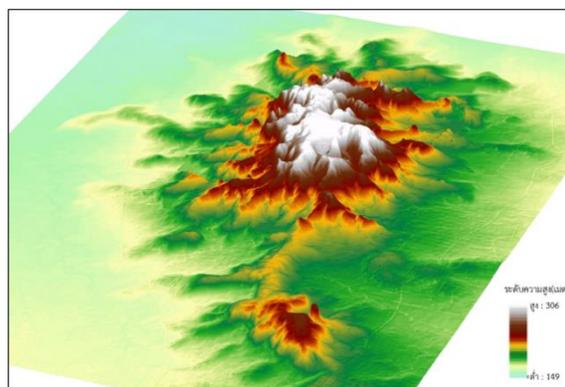
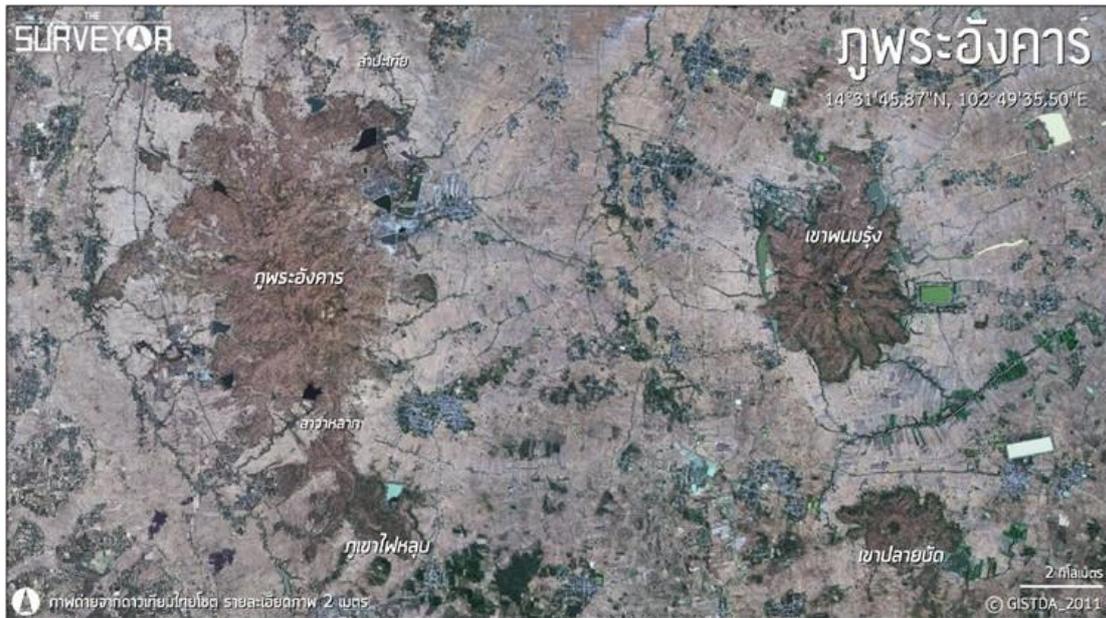


รูป 7 แผนที่ธรณีวิทยาอย่างง่ายของอีสานใต้และพื้นที่ใกล้เคียง แสดงการกระจายตัวของหินภูเขาไฟจำพวกบะซอลต์และอายุจากวิธีกัมมันตรังสี (radioactive age) (ธวัชชัย เชื้อเหล่านิช และคณะ 2551, Yan และคณะ 2018) ให้สังเกตว่า อายุการกระจายตัวของหินที่แก่กว่าจากตะวันออกไปตะวันตกของอีสานใต้ ขณะที่ทางภาคตะวันออกของประเทศอายุหินมักกระจายตัวจากแก่ทางใต้ไปยังอ่อนกว่าทางเหนือ หมายเหตุ : CCS = รอยตะเข็บเชียงใหม่-เชียงราย, NUSKS = รอยตะเข็บน่าน-อุตรดิตถ์-สระแก้ว, LLSS = รอยตะเข็บหลวงพระบาง-เลย-เสียมเรียบ, MPF = รอยเลื่อนแม่ปิง, TPF = รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์, SSF = รอยเลื่อนศรีสวัสดิ์, และ KLF คือ เขตรอยเลื่อนหรือรอยตะเข็บแกลง (Klaeng suture zone or tectonic line)

รูปแบบทางน้ำลักษณะนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นภูมิลักษณะที่เกิดจากภูเขาไฟโดยเฉพาะ เป็นที่น่าสังเกตว่าการแผ่รัศมีเป็นวงรอบมาสิ้นสุดบริเวณอ่างเก็บน้ำ ที่ปรากฏโดยรอบภูเขาพระอังคาร ซึ่งอาจแสดงถึงจุดที่ระดับน้ำใต้ดิน (หรือน้ำบาดาล) ตื้นที่สุดและเป็นบริเวณที่อาจเป็นการให้น้ำบาดาลกับอ่างเก็บน้ำซึ่งคล้ายกับการรับน้ำที่มีน้ำได้ตลอดปี (effluent stream) ส่วนรูป 4ข เป็นภาพถ่ายที่ขยายจากรูป 4ก ซึ่งแสดงถึงทางน้ำสายหลักที่ไหลจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก และการเปิดกว้างของหุบเขาในบริเวณขอบของภูเขาพระอังคาร และรูป 4ค เป็นภูมิลักษณะเชิงอุดมคติที่เกิดจากการลากเส้นตัดของวงในแนวตะวันตก-ตะวันออก ที่น่าจะสอดคล้องกับการไหลทะลักของหินละลายจากการปะทุครั้งใหญ่

4.5 ข้อมูลจากสนามและศิลาเคมี (ศิลาวรรณาและธรณีเคมี)

ผลการวิเคราะห์วิทยาหิน (lithology) จากในสนามของการศึกษานี้พบว่า ภูเขาพระอังคารประกอบด้วยหินละลายหลายชั้น (multiple lava layers) อย่างน้อย 4 ชั้น และรอยแตกรูปเสาหินชัดเจน มีทั้งที่ไหลตามธรรมชาติ (natural exposure, รูป 2 ก และ ข) และที่ไหลจากการขุดเจาะ (artificial exposure, รูป 2 ค) โดยมีทั้งที่เป็นเสาหินตรง (straight columns) เป็นแนวยาวที่เรียกกันว่า คอลอนเนต (colonnade) และที่เป็นเสาหินเอียงที่ไม่เป็นรูปร่างชัดเจน ซึ่งเรียกเอนทาบราเจอร์ (entablature) ตามการจำแนกของ Spry (1962) และ Sadowski (2012) ตามผนังบ่อน้ำโดยเฉพาะที่บริเวณ บ้านโคกมะค่าโหรน



รูป 8 (บน) “ภูเขาลอย” มีรูปร่างคล้ายภูเขาครุฑ (ตามจินตนาการของคนโบราณ) นอนคว่ำหน้าและหันหัวไปทางทิศใต้ ทางอยู่ทางทิศเหนือ ปีกซ้ายอยู่ทางทิศตะวันออก ส่วนปีกขวาอยู่ทางทิศตะวันตก จึงสันนิษฐานว่าน่าจะบรรจุพระอังคาร (ขี้เถ้า) ไว้ที่ไหลซ้ายภูเขาครุฑ เพื่อเป็นที่สักการบูชา (สรรเพชญและจาริณี, 2564) ให้สังเกตว่าภูมิลักษณะเขาพนมรุ้ง และเขาปลายบัด ที่เห็นเนินและธารหินละลาย (lava flow) ชัดกว่าพระอังคารและเหมือนว่าพระอังคารแสดงธารหินละลายไหล (lava flow) ไม่เป็นระบบ (ล่าง) - ซ้ายภาพถ่ายของชานกพิราบตาย (ภาพโดย ปัญญา จารุศิริ) - ขวา ภาพถ่ายมุมสูงที่ได้จากรูป

ตำบลสะเดา อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ (ที่เส้นรุ้ง (latitude) $14^{\circ} 33' 20''$ เหนือและที่เส้นแวง (longitude) $102^{\circ} 39' 56''$ ตะวันออก) ได้พบหินโผล่ที่เป็นเสาหินล้อมรอบอ่างเก็บน้ำทั้ง 4 ด้าน มีความยาวเฉลี่ยด้านละ 40- 45 เมตร และสูง 12 เมตร โดยที่ส่วนล่าง ๆ มักเป็นหินบะซอลต์เนื้อแน่น (massive) ส่วนชั้นบน ๆ มักมีรูพรุน (vesicular) ทำให้มั่นใจว่าหินบะซอลต์นี้แผ่เป็นบริเวณกว้างปกคลุมเขาและบริเวณโดยรอบ ผลการศึกษาสิลาวรรณจากแผ่นหินเรียบ (rock

slab) โดยคณะผู้วิจัยและแผ่นหินบางจากภายใต้กล้องจุลทรรศน์ โดยสุรเชษฐ์ บุญปัน และคณะ (2545) พบว่าหินบะซอลต์แสดงเนื้อดอกจนถึงเนื้อดอกขนาดเล็ก (porphyritic to micro-porphyritic textures) และประกอบด้วยแร่จำพวกโอลิวีนมากกว่าไพรอกซีน และแพลจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ (plagioclase feldspar) แคลเซียมสูง (An 55 - 65) โดยที่โอลิวีนมักเปลี่ยนสภาพ (altered) เป็นอิดดิงไซด์ (iddingsite) ข้อมูลจากสิลาวรรณจากการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษา

ของ Atayos และคณะ (2519) และ กานตามณี วัชรสินธุ์ (2563) ที่ว่าหินบะซอลต์ภูเขาไฟของ Ewart (1982) ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพของ Le Bas และคณะ (1986) และมีปริมาณ SiO_2 เฉลี่ย $\pm 50\%$ ทำให้จัดเป็นหินอัคนีสีเข้ม (mafic rock) และผลจากข้อมูลธรณีเคมีพบว่าปริมาณของ TiO_2 , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 , และ CaO มีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณของ Na_2O , K_2O , และ FeO^* มีค่ามากขึ้นเมื่อ ปริมาณ SiO_2 มีค่ามากขึ้น แสดงถึงสภาพการตกผลึกของหินหนืดจากที่ลึกในภาวะปกติ (กานตามณี วัชรสินธุ์, 2563)

5. บทอภิปราย (Discussion)

5.1 ลักษณะเฉพาะทางกายภาพ- อายุ, และการกำเนิด (Physical characteristics-ages and origin)

ข้อมูลภูเขาไฟของไทยจากหลาย ๆ หน่วยงานส่วนใหญ่ยังไม่ได้ให้ความสำคัญในเรื่อง ภูมิลักษณะหรือภูมิประเทศเท่าใดนัก (ดู กรมทรัพยากรธรณี, 2550; Barr และ Charusiri, 2011; Barr และ Macdonald, 2011, Atayos และคณะ, 2019, กานตามณี วัชรสินธุ์, 2563) อย่างไรก็ตาม ลักษณะเฉพาะของภูเขาไฟให้ทราบว่าเป็นภูเขาไฟลูกหนึ่งของแนวภูเขาไฟในอีสานใต้ที่ประกอบด้วยหินบะซอลต์ จำพวกอัลคาลิ (alkali basalt) และกรมทรัพยากรธรณี (2522) ได้กำหนดอายุให้เป็นช่วงอายุเทอร์เชียรี (60 – 2.6 ล้านปี) แต่จากการตรวจสอบเรื่องอายุหินบะซอลต์ของอีสานใต้ที่ได้จากการหาอายุด้วยกัมมันตรังสี ทำให้ทราบว่า ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ

ไพลโอ-ไพลสโตซีน (Pleio-Pleistocene) หรือปลายยุคนีโอจีน (Late Neogene) แม้ว่า ภูเขาไฟเป็นภูเขาไฟที่ไม่มีการคำนวณหาอายุ แต่เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการหาอายุจากภูเขาไฟลูกอื่น ใกล้เคียงในบุรีรัมย์และอีสานใต้พบว่าอยู่ในช่วง 3.3 – 0.32 ล้านปี (รูป 8)

ในทางภูมิศาสตร์ภูเขาไฟของประเทศไทย-กัมพูชา และในประเด็นอายุของภูเขาไฟ ทำให้พออนุมานได้ว่า ภูเขาไฟน่าจะมีความสำคัญเพราะมีผลในเรื่องการจัดชนิดและการกำเนิดของภูเขาไฟ เพราะ National Geographic Society (2022) ได้จัดแบ่งประเภทของภูเขาไฟโดยใช้อายุของกระบวนการปะทุ (eruption) หรือระเบิด (explosion) ออกเป็น 3 พวก ได้แก่ ภูเขาไฟดับสนิท (extinct volcano), ภูเขาไฟหลับอยู่ (dormant volcano), และภูเขาไฟมีพลัง (active volcano) และตามคำจำกัดความของภูเขาไฟมีพลังโดย USGS (2011) ได้กำหนดให้ภูเขาไฟมีพลังเป็นภูเขาไฟที่มีการบันทึกทางประวัติศาสตร์ว่ามีการปะทุ ในขณะที่ ก่อนหน้านั้น Decker (1991) และ Siebert และคณะ (2010) ได้เสนอว่าภูเขาไฟ มีพลังควรมีอายุไม่เกิน 11,000 ปี และมีแนวโน้มว่าจะปะทุอีกครั้งได้ในอนาคตจากลักษณะดังกล่าวทำให้เชื่อว่า ในกรณีของภูเขาไฟ และภูเขาไฟในแนวเดียวกันไม่สามารถจัดให้เป็นภูเขาไฟมีพลังได้ ทั้งนี้เนื่องจากอายุของภูเขาไฟในอีสานใต้ (เฉลี่ย > 0.32 ล้านปี) น้อยกว่าอายุภูเขาไฟที่ควรจะเรียกว่าภูเขาไฟหมดพลัง (extinct volcano) หรือยังหลับอยู่ (dormant volcano)

ในกรณีนี้จึงอาจสรุปได้ว่าภูเขาไฟอังคารไม่น่าจัดให้เป็นภูเขาไฟมีพลังหรืออาจจัดเป็นภูเขาไฟหลับอยู่ได้ และจัดเป็นภูเขาไฟที่ไม่ได้แสดงเหตุการณ์ความไม่สงบ (unrest phenomena) ซึ่งในปัจจุบันบางครั้งใช้ว่าภูเขาไฟศักย์มีพลัง (potentially active volcano) (ดู Yellowstone Volcano Observatory, 2022) เหมือนอย่างภูเขาไฟฟูจิของญี่ปุ่น หรือ ภูเขาไฟในวนอุทยานแห่งชาติเยลโลว์สโตน (Yellowstone) ของสหรัฐอเมริกา ดังนั้น บางครั้งจึงเลี่ยงและไปใช้คำว่า ภูเขาไฟยุคควอเทอร์นารี (Quaternary volcano) ที่หมายถึงภูเขาไฟที่ครั้งหนึ่งเคยปะทุหรือแสดงหลักฐานทางธรณีวิทยาว่ามีการระเบิดหรือปะทุในช่วงอายุตั้งแต่ 2.5 ล้านปีจนถึงปัจจุบัน (ดู www.wikipedia.org/wiki/) ซึ่งถ้าใช้คำจำกัดความดังกล่าวภูเขาไฟอังคารก็จัดอยู่ในภูเขาไฟยุคควอเทอร์นารีได้

สำหรับกำเนิดภูเขาไฟมักสัมพันธ์กับการแปรสัณฐานและแผ่นดินไหว (ดู Manga และ Brodsky, 2006, Walter และ Amelung, 2006) ซึ่งในอดีต เชื่อกันว่าหินบะซอลต์ในอีสานใต้ อาจมีความสัมพันธ์กับการกำเนิดหินบะซอลต์มหายุคซีโนโซอิกตอนปลาย (Late Cenozoic) และเป็นผลจากการแปรสัณฐานแบบบล็อกกี้ (extrusion tectonics) ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตามแนวรอยเลื่อนหลัก (Tapponier และคณะ, 1982, Charusiri และ Pum-Im, 2009) แต่ในปัจจุบันมีหลายแนวคิดเกี่ยวกับเรื่องนี้ และผลจากการศึกษานี้จากลักษณะภูมิลักษณะของภูเขาไฟอังคารและภูเขาไฟข้างเคียงพบว่าอยู่ในแนวตะวันออกเฉียง-ตะวันตก ขนานไปกับพรมแดนไทย-กัมพูชา จึงคาดคิดว่าน่าจะมีตัวควบคุมสำคัญคือโครงสร้างหลักในแนวตะวันออกเฉียง-ตะวันตก (east-

west trending major structure) ที่อาจสัมพันธ์กับแนวหินหนืดตะวันออกเฉียง-ตกทางตอนเหนือของกัมพูชาที่เกิดหลังจากการมุดตัวไปทางเหนือของหินแกรนิตปลาย-กลางยุคครีเตเชียส (Kasahara และคณะ, 2021) ที่ก่อให้เกิดร่องแยกหลังแนวโค้ง (back arc rifting) ในแนวตะวันออกเฉียง-ตะวันตกในอีสานใต้ จนทำให้เป็นช่องทางให้เกิดการแทรกดันของหินหนืด นอกจากนั้น Yan และคณะ (2018) เชื่อว่าหินหนืดยุคใหม่เหล่านี้ น่าจะสอดคล้องหรือเป็นผลจากการเกิดหินหนืดไหหลำ (Hainan magmatism) ขนาดใหญ่ในมหายุคนิวซีวิน (Cenozoic Era) จากการพวยพุ่งจากเนื้อโลก (mantle plume) ที่สัมพันธ์กับการเกิดแอ่งร่องแยกใหญ่ (major rift basins) ของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น แอ่งตะกอนปากแม่น้ำแดง เป็นต้น

5.2 ลักษณะเฉพาะทางสัณฐานวิทยา (Morphologic and landform characteristics)

ในการจำแนกประเภทภูเขาไฟมีที่นิยมในปัจจุบันอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ การจำแนกตามระยะเวลาการเกิด (Global Volcanism Program, 2013) และการจำแนกตามทางสัณฐานวิทยา (ดู Watson, 2011) ซึ่งภูเขาไฟที่แบ่งตามระยะเวลาการเกิด (ดู <https://byjus.com> และ <https://education.nationalgeographic.org>) ได้กล่าวไปแล้ว ส่วนภูเขาไฟที่แบ่งตามทางสัณฐานวิทยามี 4 จำพวก ได้แก่ 1) ภูเขาไฟกรวยชัน (steep cone) เกิดจากหินละลายสีค่อนข้างจาง (felsic lava) ที่มีปริมาณซิลิกาที่ค่อนข้างสูงทำให้มีความหนืดมาก จึงไหลและเคลื่อนตัวไปอย่างช้า ๆ คล้ายกับการบีบยาสีฟัน จึงระเบิดรุนแรง แข็งตัวเร็ว และมีไหล่เขาชัน ภูเขาไฟ รูปกรวยคว่ำของภูเขาไฟเกิดจากการทับถมของหินละลาย (lava) เพราะประกอบ

ด้วยธาตุซิลิกอนมากกว่าธาตุอื่น ๆ ทำให้ความลาดชันอาจสูงถึง มีความชัน 30 องศา เช่น ภูเขาไฟฟูจิ เกาะฮอนชูของญี่ปุ่น 2) *ภูเขาไฟโล่ (shield volcano)* เกิดจากหินละลายสีเข้ม (mafic lava) เพราะประกอบด้วยแร่เหล็กและแมกนีเซียมสูง หินละลายมีลักษณะเหลว ไหลเร็ว แข็งตัวช้า และจึงระเบิดไม่รุนแรง มักมีตะกรัน มีเศษหิน และควันพ่นออกมาบริเวณปากปล่อง ปกติมีความชันที่น้อยกว่า 15 องศา เช่น ภูเขาไฟของหมู่เกาะฮาวาย 3) *ภูเขาไฟกรวยถ่าน (ash cone หรือ cinder cone)* มีลักษณะเป็นกรวยสูงชันฐานแคบ จัดเป็นภูเขาไฟที่มีการระเบิดรุนแรงที่สุด เกิดจากหินละลาย (lava) ที่พุ่งปะทุออกมาทับถมกัน หินละลาย (lava) จึงมีความหนืดสูง การไหลไม่ต่อเนื่อง และมีลักษณะเป็นหินละลาย (lava) ที่พุ่งออกมาจากปล่องเดี่ยว และทับถมกันบริเวณรอบปล่อง ทำให้ภูเขาไฟชนิดนี้ไม่ค่อยก่อให้เกิดความสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินมากนัก มีความชันเฉลี่ย 30 องศา เช่น ภูเขาไฟพาลิคูติน ในเม็กซิโก และ 4) *ภูเขาไฟแบบสลับชั้น (composite หรือ strato-volcano)* เป็นภูเขาไฟที่มีรูปร่างสมมาตร (symmetry) กรวยภูเขาไฟมีหลายชั้น บางชั้นประกอบด้วยหินละลาย (lava) และบางชั้นเป็นถ้ำถ่านสลับกันไป ปากปล่องมีขนาดใหญ่ และมีแอ่งปากปล่อง (crater) ขนาดใหญ่ด้วย มักเกิดบริเวณมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก ซึ่งแผ่นมหาสมุทรหนึ่งมุดตัวใต้แผ่นทวีปหรือแผ่นมหาสมุทรแผ่นอื่น การระเบิดหรือปะทุของภูเขาไฟจึงเป็นแบบธารเศษหินละลาย (pyroclastic flow - ซึ่งประกอบด้วยถ้ำถ่าน หิน ฝุ่นและไอน้ำจากปล่องภูเขาไฟ) มากกว่าแบบธารหินละลาย (lava flow) ทำให้เลื่อนไหลลงด้วยความเร็วสูง และมักมีอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส มี

ความเอียงที่ยอดเกือบ 30 องศา ส่วนที่ฐานมีความเอียง 5 องศา เช่น ภูเขาไฟวิซุเวียส ในอิตาลี

หินภูเขาไฟที่ภู่อังครนน่าจะผุพังไปได้ตามกาลเวลาอย่างรวดเร็ว ทำให้เห็นร่องรอยของการพังทลายหรือแตกสลาย (disintegration) และเปลี่ยนสภาพจากหินแข็งไปเป็นหินผุได้จนทำให้ภูมิลักษณะภูเขาไฟเปลี่ยนไปได้ ด้วยเหตุนี้ ช่างแกะสลักในสมัยนั้นจึงไม่นิยมนำหินบะซอลต์มาทำเป็นใบเสมาหรือองค์พระพุทธรูป แต่ส่วนใหญ่ปฏิมากรรมเหล่านี้มีหินต้นกำเนิดจากหินทรายในกลุ่มหินโคราชมากกว่าเพราะแข็งและทนทานกว่า ดังนั้น ตามรายงานที่เสนอว่า ใบเสมาโบราณสมัยทวารวดี (พุทธศตวรรษที่ 11-16) ที่แกะสลักจากหินบะซอลต์แห่งเดียวในประเทศไทย (วันดีเถียรสวัสดิ์กิจ, 2557 อ้างใน สรรเพชร เพ็ญจิต และ จารินี ม้าแก้ว, 2564.) จึงไม่น่าเป็นไปได้ ผลการศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่าในประเด็นธรณีสัณฐานวิทยา ภูเขาพระอังครนมีมุมลาดเทของความลาดชันภูเขาไฟสูงกว่าภูเขาไฟรูปโล่ปกติ ทำให้เกิดความสงสัยว่าภูเขาพระอังครนอาจไม่ใช่ภูเขาไฟรูปโล่ แต่เมื่อพิจารณาถึงข้อมูลการศึกษาในสนามในครั้งนี้ ผนวกกับข้อมูลศิลาเคมี (Atayos และคณะ, 2019, กานตามณี วัชรโรสินธุ์, 2563) ทำให้ทราบว่า หินภูเขาไฟภูเขาพระอังครนที่ศึกษาทั้งหมดเป็นหินละลายบะซอลต์ (basaltic lava) ที่ประกอบด้วยแร่จำพวกแคลซิโอเคลสแคลเซียมสูง (Ca-rich plagioclase) และไพรอกซีน อีกทั้งแสดงชั้นที่มวลหนาแน่น (massive) และเนื้อละลายไหล (flow texture) ในหลายบริเวณหินบะซอลต์ภูเขาพระอังครนแสดงโครงสร้างเสาหิน (columnar structure, รูป 1ง) และโครงสร้างเกลียวเชือก (ropy structure) นอกจากนั้นในประเด็นธรณีเคมี

ปริมาณซิลิกา (SiO_2 content) ที่ต่ำของหินบะซอลต์ยังแสดงให้เห็นถึงความเป็นของไหลที่สูง (high fluidity) และความหนืดต่ำ (low viscosity) ซึ่งทำให้หินละลายบะซอลต์ (basaltic lava) ไหลไปได้ไกล ๆ ภาวะดังกล่าวทำให้ได้ภูมิลักษณะภูเขาไฟรูปโล่ (shield volcanic landform) (Gharehchahi, 2017) ที่มีมุมเอียงเขาที่น้อยมาก 10 องศา อีกทั้งผลการศึกษาวินิจฉัยในภาคสนามของการศึกษานี้ผนวกกับซิลิการรณนาของ กานตามณี วัชรินทร์ (2563) ไม่พบว่ามีหินเถ้าภูเขาไฟ (volcanic clastic หรือ pyroclastic rocks) หรือแทรกสลับกับหินละลายบะซอลต์ (basaltic lava) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของภูมิลักษณะภูเขาไฟสลับชั้น (stratovolcano) และภูเขาไฟรูปกรวย (cinder cone) ตามลำดับ (ดู USGS, 2011) จนทำให้ภูเขาไฟมีความลาดชันที่สูงกว่ามาก เพราะประกอบด้วยหินละลายที่หนืดกว่าและมีความเป็นของไหลที่ต่ำกว่า (lower fluidity) ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ภูเขาไฟองค์การจัดเป็นภูเขาไฟรูโล่เช่นเดียวกับเขาพนมรุ้ง

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายทางอากาศในหลาย ๆ แนว (รูป 6 ก ถึง ง) พบว่าความลาดชันของภูเขาไฟทางฝั่งตะวันออกมากกว่าทางตะวันตกมาก และความลาดชันส่วนยอดภูเขาไฟมากกว่าส่วนฐานมาก ซึ่งมีสภาพคล้ายกับพื้นดินถูกคว้านออกไป (indentation) ซึ่งในกรณีนี้คณะผู้วิจัยวินิจฉัยว่าเป็นลักษณะโครงสร้างยุบตัว (collapse structure) หรือโครงสร้างหัวบวม จากการระเบิดรุนแรง เช่นเดียวกับภูเขาไฟเซนต์เฮเลนส์ (Saint Helens) ในรัฐวอชิงตันสหรัฐอเมริกา (Walter, 2011)

5.3 ธรณีพิบัติภัย ที่ตั้ง และความปลอดภัยของวัด (Geohazard, Settlement, and Safety of the Temple)

การเกิดพิบัติภัยธรรมชาติได้สร้างความวิตกกังวลและสับสนต่อผู้คนในบริเวณโดยรอบและบริเวณข้างเคียงเขาพนมรุ้งเป็นอย่างมาก ทำให้เกิดความรู้สึกกลัวว่าอาจมีภัยธรรมชาติอย่างอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามเป็นที่แน่ชัดในเรื่องความมีพลังของภูเขาไฟองค์การจัดเป็นภูเขาไฟดับสนิท (extinct volcano) แต่ในทางธรณีศาสตร์ปรากฏร่องรอยการยุบตัวหรือการถล่มตัวของภูเขาไฟเกิดในอดีตจนทำให้เกิดการพัฒนาเป็นร่องน้ำในหุบเขาขนาดใหญ่ได้ ทำให้คาดคิดว่าวัดเขาพระอังคารอาจไม่ปลอดภัยเพราะอาจมีภัยพิบัติแผ่นดินถล่ม (landslide hazard) และแรงลมที่พัดแรงตั้งพายุนวมซึ่งเกิดเมื่อวันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2565 จนทำให้โดมพระนอนของวัดพังถล่มลงมาเกือบทั้งหมด (ดู www.nationtv.tv) และประชาชนเกิดความตระหนก ดังนั้นหากพิจารณาจากรูป 6ค ที่แสดงที่ตั้งของวัดเขาพระอังคาร ซึ่งจะเห็นได้ว่าตำแหน่งของวัดเขาพระอังคารอยู่ในจุดที่สูงกว่าตำแหน่งอื่น นอกจากนั้นยังอยู่ห่างจากบริเวณที่ปรากฏโครงสร้างยุบตัว (collapse structures) ทำให้มั่นใจว่าวัดน่าจะถูกรักษาในบริเวณที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายเทียมจะเห็นว่าวัดตั้งอยู่บนยอดของขอบปล่องภูเขาไฟ ด้วยลักษณะดังกล่าวนี้ทำให้พอสรุปได้ว่าวัดตั้งอยู่ในบริเวณที่มีความเสถียรมาก ไม่น่าจะได้รับอิทธิพลจากการเกิดดินถล่ม อย่างไรก็ตามหากมีการเกิดดินถล่มในอนาคตก็ไม่น่าจะเกิดบริเวณใกล้เคียงกับวัด

ในประเด็นของธรณีพิบัติภัย มักมีคำถามว่าภูเขาไฟที่ดับสนิทแล้วหรือไม่ ถ้าพิจารณาจากการจำแนกชนิดของภูเขาไฟตามวิธีการของ Szakács (1994) ซึ่งเป็นที่นิยมในปัจจุบันและใช้ระยะเวลาการเกิด (mode of occurrences) เป็นเกณฑ์ (ดู <https://byjus.com> และ <https://education.nationalgeographic.org>) พบว่ามีภูเขาไฟมีพลังในโลกมากมายถึง 1,324 ลูก ซึ่งจัดเป็นภูเขาไฟที่คุกรุ่นอยู่ตลอดเวลาและอาจปะทุอีกได้ในอนาคต โดยมีการปะทุครั้งสุดท้ายเมื่อ 10,000 ปีมาแล้ว หรือประมาณในช่วงสมัยโฮโลซีน (ดู <https://volcano.si.edu>) อย่างไรก็ตามภูเขาไฟสงบอยู่ หรือภูเขาไฟหลับอยู่ (dormant volcano) ที่เป็นภูเขาไฟที่มีประวัติการปะทุในอดีต และปะทุหรือระเบิดรุนแรงครั้งสุดท้ายก่อนสมัยโฮโลซีน (> 10,000 ปี) แต่ในช่วงปัจจุบันยังคงสงบอยู่ และอาจเกิดการปะทุได้อีกในอนาคต เช่น ภูเขาไฟฟูจิ (Mt. Fuji) เกาะฮอนชู ประเทศญี่ปุ่น, ภูเขาไฟคิลิมานจาโร (Mt. Kilimanjaro) ประเทศแทนซาเนีย, ภูเขาไฟฟอร์พีค (Fourpeaked Mountain หรือ Fourpeaked Volcano) รัฐอะแลสกา สหรัฐอเมริกา อาจเป็นการยากที่จะบอกว่าหลับอยู่หรือไม่

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันการจำแนกดังกล่าวไม่ใช่วิธีที่นักวิทยาภูเขาไฟ (volcanologist) นิยมใช้ (ดู White และ McCausland, 2019) เพราะภูเขาไฟหลายลูกในสหรัฐอเมริกา เช่น ภูเขาไฟมานาโลอา (Mauna Loa) บนเกาะฮาวายซึ่งเป็นภูเขาไฟที่หลับอยู่ หรือแนวภูเขาไฟในอุทยานแห่งชาติเยลโลว์สโตน (Yellowstone National Park) ซึ่งเป็นภูเขาไฟที่หลับดับสนิทแล้ว แต่ค้นพบที่มีการไหวสะเทือนจากกระเปาะหินหนืดที่ยังมีพลังอยู่ (magma-related seismicity)

หรือการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นดิน (ground deformation) อย่างมีนัยสำคัญ หรือจากระบบน้ำร้อนใต้ดิน ที่ยังทำงานอยู่ (active hydrothermal system) จากการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ ทำให้นักวิทยาภูเขาไฟ (volcanologist) คิดว่าช่วงสมัยโฮโลซีนเป็นเพียงตัวเลขที่กำหนดขึ้นตามอำเภอใจ (arbitrary number) และเสนอให้ใช้ช่วงสมัยไพลสโตซีน (ตั้งแต่ 11,000 ปี – 2.5 ล้านปี) สำหรับภูเขาไฟที่ยังหลับอยู่ ดังนั้น ในปัจจุบันจึงนิยมใช้สภาพการไหวสะเทือน (seismicity) เป็นตัวการในการกำหนดว่าภูเขาไฟที่สนใจเป็นภูเขาไฟหลับอยู่หรือดับสนิทแล้ว ตามแนวคิดของ White และ McCausland (2019) สำหรับกรณีพื้นที่ศึกษาภูเขาไฟพระอังคาร เมื่อพิจารณาจากแผนที่ การไหวสะเทือนของ Charusiri และคณะ (2021) ทำให้สรุปได้ว่าภูเขาไฟพระอังคารเป็นภูเขาไฟที่ดับสนิทแล้ว เนื่องจากไม่มีการปรากฏของการไหวสะเทือนเลย

6. บทสรุป

การวิจัยนี้เป็นการนำข้อมูลแผนที่และภาพจากดาวเทียมหลายรูปแบบมาประมวลและประยุกต์ในการศึกษาภูมิลักษณ์ภูเขาไฟพระอังคาร โดยผนวกกับข้อมูลการศึกษาที่มีอยู่เดิมร่วมกับการออกภาคสนามและการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ผลการศึกษาพบว่าภูเขาไฟพระอังคารคือภูเขาไฟขนาดเล็กประกอบด้วยหินบะซอลต์ น่าจะดับสนิทแล้ว มีการระเบิดครั้งสุดท้ายเมื่อเก้าแสนปีที่ผ่านมาแล้ว ภูมิลักษณ์ที่เด่นคือมุมความลาดชันที่ต่ำในบางบริเวณ ธารน้ำที่ไหลออกเป็นรัศมีจากส่วนยอดของภูเขา และเนินเขาเล็กภายในปล่องภูเขาไฟ ภูเขาไฟพระอังคารจัดเป็นภูเขาไฟรูปโล่ที่ครั้งหนึ่งเคยมีการระเบิด

และยุบตัวอย่างรุนแรงจนทำให้เกิดความไม่สมมาตรของความลาดชัน ขอบเขตของภูเขาไฟสามารถตรวจพบจากแอ่งน้ำที่ปรากฏโดยรอบภูเขาไฟ และวัดที่สร้างบริเวณขอบภูเขาไฟนับว่าเสถียรและปราศจากอันตรายจากธรณีพิบัติภัยดินถล่ม

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านสิ่งแวดล้อมวิทยาพื้นผิวโลก และธรณีพิบัติภัยขั้นสูง (MESA CE), และกองทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี กทม. ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในด้านสถานที่และข้อมูลในการศึกษาวิจัย คณะผู้เขียนขอขอบคุณ ดร.วัชชัย เชื้อเหล่าวานิช ผู้อำนวยการส่วนมาตรฐานและข้อมูลทรัพยากรแร่ ที่ให้ข้อมูลธรณีวิทยาและงานวิจัยอายุหินบะซอลต์ และขอขอบคุณ นางสาวกานต์ พิชชา พุฒศิริ และนางสาวพิมพ์ลภัส เจริญใจ ที่ช่วยเตรียมแผนที่ และจัดการเรื่องรูปภาพและภาพถ่าย ในการวิจัยนี้ คณะผู้เขียนขอขอบคุณผู้ตรวจอ่านผลงานสำหรับคำแนะนำและข้อวิจารณ์จากงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมทรัพยากรธรณี. (2519). *แผนที่ธรณีวิทยา มาตราส่วน 1:250,000 ราววง ND 48-5 นครราชสีมา*. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี กรุงเทพฯ. สืบค้นจาก <https://www.dmr.go.th/แผนที่ธรณีวิทยามาตราส่วน-1250000/> (เมื่อ 6 พค 2564).

กรมทรัพยากรธรณี. (2545). *ธรณีวิทยาแหล่งหินบะซอลต์บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนใต้*. กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี. กรุงเทพฯ; หน้า 9-30.

กรมทรัพยากรธรณี. (2550). *แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดบุรีรัมย์*. กรุงเทพฯ: สำนักธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี

กรมทรัพยากรธรณี. (2553). *การจำแนกเขตเพื่อการจัดการด้านธรณีวิทยาและทรัพยากรธรณี จังหวัดบุรีรัมย์*. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 104 หน้า. สืบค้นจาก <http://library.dmr.go.th/elib/cgi-bin/opac.exe?op=mmww&db=Main&skin=s&m> (เมื่อ 10 มีนาคม 2564).

กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. (2538). *ธรณีสัณฐานประเทศไทยจากห้วงอวกาศ*. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: ด้านสุทธการพิมพ์.

กองบรรณาธิการเมืองโบราณ. (2559). *ละโว้: นคราโบราณถึงฐานที่มั่นของสมเด็จพระนารายณ์*. วารสารเมืองโบราณ ปีที่ ๔๒ ฉบับที่ ๒ เดือน เมษายน - มิถุนายน 2559

กานตามณี วัชโรสินธุ์. (2563). *ระบบรอยแตกของเสาหินบะซอลต์บริเวณภูพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์*. รายงานการศึกษาระบาดิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติพงษ์ สนเล็ก. (2563). *ใบเสมาในภูมิภาคอีสานใต้ ใบเสมาเขาพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์*. สำนักศิลปากร 10 นครราชสีมา กรมศิลปากร. กรุงเทพฯ สืบค้นจาก <https://www.finearts.go.th/main/view/25761-ใบเสมาในภูมิภาคอีสานใต้-ใบเสมาเขาพระอังคาร-จังหวัดบุรีรัมย์?type=3>. (เมื่อ 9 มีนาคม 2565).

ชยภรณ์ สุขประเสริฐ, พระครูศรีปัญญาภิรม, และไฉ ชีรัมย์. (2560). *เสมา: ประวัติศาสตร์ คุณค่า และการจัดการการอนุรักษ์ขององค์พระพุทธรูปศาสนาในจังหวัดบุรีรัมย์* วารสารสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม 4 (1) เดือน มกราคม-มิถุนายน พ.ศ. 2560, 135-153.

วัชชัย เชื้อเหล่าวานิช, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, และ วิสุทธิ์ พิสุทธอานนท์. (2554). *การกำเนิดของทับทิมสยามและหินแปลกปลอมที่เกี่ยวข้องกับพลอย: ในความสัมพันธ์ต่อหินบะซอลต์*, รายงานฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม

วัชชัย เชื้อเหล่าวานิช, ตรุณี สายสุทธิชัย, และปานใจ สารพันโชติวิทยา. (2551). *การวัดอายุหินบะซอลต์โดยวิธี $^{40}Ar/^{39}Ar$ ไอโซโทป*. กรุงเทพฯ : สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี, 67 หน้า

ธัญญนันท์ เนาวรัตน์ และ ปัทมาวดี ชาญสุวรรณ. (2565). *เทวะ ภูพระอังคาร: การสร้างสรรคานุกรมร่วมสมัยจากใบเสมา วัดเขาพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์*. มนุษยสังคมาสาร (มสส.) ปีที่ 20 ฉบับที่ 1 (มกราคม – เมษายน) 2565.

- ณัฐริกา หมีสา. (2564). *ธรณีสัณฐานของภูเขาไฟภูพระอังคาร อำเภอเฉลิมพระเกียรติจังหวัดบุรีรัมย์*. รายงานการศึกษาอิสระ ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 51 หน้า
- พนิดา สงวนเสรีวานิช. (2557). *ท่อง “ภูพระอังคาร” บนปากปล่องภูเขาไฟศักดิ์สิทธิ์*. หนังสือพิมพ์ มติชน 24 มกราคม 2557. สืบค้นจาก <http://nadoon.msu.ac.th/~isan/isan12/cps11952.pdf>. (เมื่อ 9 มีนาคม 2565).
- พระใบฎีกาสุพจน์ ตปสีโลม. (2560). *ประวัติศาสตร์ เส้นทาง การเผยแผ่พระพุทธศาสนา และหลักพุทธธรรมในสมัยลพบุรี*. วารสารสันติศึกษาปริทรรศน์ มจร 5(2) (พฤษภาคม-สิงหาคม 2560), 75-85.
- พระศรีสังฆาณมุนี, ปรรณ ปุระกัน; พูนศักดิ์ กมล. (2560). การศึกษาคุณค่าไบโसेมาเพื่อสร้างกระบวนการเรียนรู้ด้านพุทธจริยธรรม ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. รายงานการวิจัยเสนอต่อมหาจุฬาลงกรณราชวิทยาลัย, 149 หน้า.
- เมธี สุขสำเร็จ. (2544). *ความสัมพันธ์ของชุมชนโบราณในเขตจังหวัดลพบุรีกับชุมชนภายนอกในช่วงก่อนพุทธศตวรรษที่ 18*. วิทยานิพนธ์ [ศศ.ม. (โบราณคดีสมัยประวัติศาสตร์)]-มหาวิทยาลัยศิลปากร, 337 หน้า.
- สุรเชษฐ์ บุญปัน, ฤชงค์ พลัง, และนิคม จิงอยู่สุข. (2545). *ธรณีวิทยาแหล่งหินบะซอลต์ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนใต้*. รายงานวิชาการ กธ000/ 2545. กรุงเทพฯ กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี, 60 หน้า. สืบค้นจาก <http://library.dmr.go.th/elib/cgibin/opac.exe?op=mmw&db=Main&skin=s&mmid=9046&bid=24115> เมื่อ 10 มีนาคม 2564
- สำนักงานท่องเที่ยวและกีฬาบุรีรัมย์. (2561). *วัดเขาอังคาร*. งานสารบรรณ สำนักงานท่องเที่ยวและกีฬา จังหวัดบุรีรัมย์ 8 ก.พ. 2561. สืบค้นจาก https://buriram.mots.go.th/news_view.php?nid=433 (เมื่อ 9 มีนาคม 2565)
- บุรพา โชติช่วง. (2556). *ภาพสลักงามไบโเซมาพันปีเขาอังคารบุรีรัมย์ สยามรัฐ 5 มีนาคม หน้า 20*. สืบค้นจาก <https://siamrath.co.th/n/159108> (เมื่อ 9 มีนาคม 2565)
- ปัญญา จารุศิริ, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, วิโรจน์ ดาวฤกษ์, วนิดา ระงับพิชญ์, สน พงษ์อารยะ, และ กฤษณ์ วันอินทร์. (2542). *แนวภูเขาไฟและลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของหินภูเขาไฟ บริเวณลำน้ำรายณ์ จ.ลพบุรี โดยใช้ข้อมูลภาพจากดาวเทียมและธรณีฟิสิกส์ทางอากาศ*. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เสนอต่อกองสำรวจทรัพยากรธรณีชาติด้วยดาวเทียม สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ 138 หน้า
- ศักดิ์ชัย สายสิงห์. (2547). *ศิลปะทวารวดี: วัฒนธรรมทางศาสนายุคแรกเริ่มในดินแดนไทย*. กรุงเทพฯ: เมืองโบราณ, 296 หน้า.
- สรพร เพียรจัด และ จารินี ม้าแก้ว. (2564). การพัฒนาท่องเที่ยวเชิงสร้างสรรค์โดยชุมชนบนดินแดนภูเขาไฟบุรีรัมย์. วารสารวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ 16 (1) (มกราคม - มิถุนายน 2564), 41-50.
- อดุลย์ หลานวงศ์, พระภาณุวัฒน์ จันทวิพัฒน์, พระมหาภักฐิกรรณ์ อังสุมาลี. (2560). *พุทธศิลป์: ประวัติ พัฒนาการ และอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของประชาชน ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ* สืบค้นจาก <http://mcur.mcu.ac.th :8080/jspui/handle/123456789/504> (เมื่อ 10 มีนาคม 2564)
- Atayos, S., Srichan, W., and Limtrakul, P. (2019). *Petrography and Occurrence of Cenozoic Volcanic Rocks in Southern Margin of Khorat Plateau*. In Proceedings of the 10th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, November 20th- 23rd 2019, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus, Sakon Nakhon, Thailand.
- Barr S.M. and Charusiri, P. (2011). Volcanic rocks. In: Ridd, M.F., Barber, A.J. and Crow, M.J. (eds.) *The Geology of Thailand*. London: Geological Society. pp.415-439.
- Barr, S.M. and MacDonald, A.S. (1978). *Geochemistry and petrogenesis of Late Cenozoic alkaline basalts of Thailand*. Geological Society of Malaysia Bulletin, 10, 25-52.
- Barr, S.M. and Dostal, J. (1986). *Petrochemistry and origin of megacrysts in Upper Cenozoic basalts, Thailand*. Journal of Southeast Asian Earth Sciences 1(2), 107-116.
- Barr, S.M. and James, D.E. (1990). *Trace element characteristics of Upper Cenozoic basaltic rocks of Thailand, Kampuchea and Vietnam*. Journal of Southeast Asian Earth Sciences. 4 (3), 233-242.
- Barr, S.M. and MacDonald, A.S. (1981). *Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalts of Southeast Asia*. Geological Society of America Bulletin 92(8) Part II, 1069-1142.

- Bennett, D. (n.d.). *Three Types of Volcanoes: Cinder Cone, Shield and Composite*. sciencing.com. <https://sciencing.com/three-cinder-cone-shield-composite-8623282.html>. 12 June 2023.
- Charusiri, P. and Pum-Im, S. (2009). *Cenozoic Tectonic Evolution of Major Sedimentary Basins in Central, Northern, and the Gulf of Thailand*, Bulletin of Earth Sciences of Thailand 2 (1&2), 40-62.
- Charusiri, P., Daorerk, V. and Supajanya, T. (1996). Applications of Remote-Sensing Techniques to Geological Structures Related to Earthquakes and Earthquake-Prone Areas in Thailand and Neighboring Areas: A Preliminary Study. Journal of Scientific Research, Chulalongkorn University 21(1), 1-20.
- Charusiri, P., Pailoplee, S., Wiwegwin, W., and Choowong (2020) *Probabilistic and deterministic seismic hazard analyses of Thailand and Lao PDR: A new scenario*. In *Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering*, 17 WCEE, Sendai, Japan-September 13th to 18th 2020, Paper No C001464
- Ewart, A. (1982) *The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range*; p. 25-95. In, Thorp, R.S., ed., *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, John Wiley and Sons, New York, 724 p.
- Gharehchahi, S. (2017) *Volcanic process and Landforms*. In Richardson, D., Castree, N., Goodchild, M. F., Kobayashi, A., Liu, W., and Marston, R.A., (editors), *The International Encyclopedia of Geography*. New York, John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg.1183 (14 May 2023).
- Global Volcanism Program. (2013). *Volcanoes of the World*, v. 4.8.3. (02 Sep 2022). In Venzke, E. (ed.). Smithsonian Inst. (n.d.). <https://doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013> (accessed October 5, 2019).
- Harryposher. (2019). *เขาอังคาร สืบค้นจาก https://harryposher.wordpress.com/2019/09/07/เขาอังคาร-2/* (เมื่อวันที่ 7 กันยายน 2019)
- Jungyusuk, N. and Khositantont, S. (1992). *Volcanic rocks and associated mineralization in Thailand*. In C. Piancharoen (Ed. In chief) *Proceedings of the National Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development*. 17-24 November 1992. Department of Mineral Resources, Thailand, Bangkok: pp. 528-532.
- Jungyusuk, N. and Sirinawin, T. (1983). *Cenozoic basalts of Thailand*. In *Proceedings of the Conference on Geology and Mineral Resources of Thailand*. Vol.9. (19-28 November 1983). Department of Mineral Resources, Bangkok.
- Liza, D. (2018). Classification of Volcanoes. Available at <https://sciencing.com/kind-volcanoes-dont-erupt-anymore-12318772.html> (on 10 Jun 2566).
- Manga, M. and Brodsky, E.E. (2006). Seismic triggering of eruptions in the far field: Volcanoes and geysers, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34, 263– 291.
- McuTour. (2015). *วัดเขาพระอังคาร จ.บุรีรัมย์ ในกลุ่มวัดการท่องเที่ยวเชิงพุทธศิลป์*. สืบค้นจาก <https://nkr.mcu.ac.th/tour/?p=64>. (เมื่อ 6 มีค 2565).
- National Geographic Society. (2022). Volcano. Available from <https://education.nationalgeographic.org/resource/volcanoes/> (6 March 2023).
- Sadowski, G.R. (2012). A Short Review on the Importance of Colonnades, *Entablatures and "Fault Joints" for the Excavation of Basaltic Rocks*. *Soils and Rocks*, São Paulo, 35(3), 297-302.
- Siebert L, Simkin T, and Kimberley P. (2010). *Volcanoes of the world*, 3rd edn. University of California Press, Berkeley
- Spry, A. (1962). The origin of columnar jointing, particularly in basalt flows. *Australian Journal of Earth Sciences* 8, 191–216. doi: 10.1080/14400956285270061
- Sukprasert, D. C., Wikom, D. P., and Sueram, W. (2017). *Sema: History, Value and Conservation Management of Buddhist Organization in Buriram Province*. *Journal of Research and Development Institute Rajabhat Maha Sarakham University* 4(1), 135–153. Retrieved from <https://so03.tcithaijo.org/index.php/rdimu/article/view/209730> (10 March 2022).

- Sutthirat, C., Charusiri, P., Farrar, E., and Clark, A. H. (1994). *New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and characteristics of some Cenozoic basalts in Thailand*. In Proceedings of the International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia. 15-20 November 1994. Bangkok, Thailand: pp.306-321.
- Szakacs, A. (1994). *Redefining active volcanoes: a discussion*. Bull Volcanol 56, 321-325.
- Tapponnier P, Peltzer GL, Le Dain AY, Armijo R, and Cobbold P. (1982). *Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine*. Geology 10(12):611-616. doi: 10.1130/0091-7613(1982)10%3C61:PETIAN%3E2.0.CO;2
- Tritrangan, A. (1992). *Southern Khorat Plateau-Possibility of new gem deposits*. In Piancharoen, C. (Editor in chief) Proceedings of the National Conference on Geologic Resources of Thailand. Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, pp 393-460.
- Watson, J. (2011). Principal Types of Volcanoes. United States Geological Survey. Available at <https://pubs.usgs.gov/gip/volc/types.html> (on 20 March 2020).
- Wei, F., Wei, W., and Hongmei Yu, H. (2022). *The Cenozoic volcanic fields in northern Hainan Island and the Leizhou Peninsula, south China: eruption history, magma source and dynamic background*. In Xu, J., Oppenheimer, C., Hammond, J., and Wei, H. (Eds.). Active Volcanoes of China. Geological Society, London, Special Publications, 510, 179–196. <https://doi.org/10.1144/SP510-2020-64>.
- Walter, T.R. (2011). *Structural architecture of the 1980 Mount St. Helens collapse: An analysis of the Rosenquist photo sequence using digital image correlation*, Geology (2011) 39 (8): 767–770. <https://doi.org/10.1130/G32198.1>.
- Walter, T. R. and Amelung, F. (2006). Volcano-earthquake interaction at Mauna Loa volcano, Hawaii, J. Geophys. Res., 111, B05204, doi:10.1029/2005JB003861.
- White, A.R. and McCausland, W.A. (2019). *A process-based model of pre-eruption seismicity patterns and its use for eruption forecasting at dormant stratovolcanoes*, Journal of Volcanology and Geothermal Research 382, 267-297.
- Yan, Q., Shi, X., Metcalfe, I., Liu, S., Xu, T., Kornkanitnan, N., Sirichaiseth, T., Yuan, L., Zhang, Y., and Zhang, H. (2018). *Hainan mantle plume produced late Cenozoic basaltic rocks in Thailand, Southeast Asia*. Scientific Reports 8 (1), .26-40.
- Yellowstone Volcano Observatory. (2023). *Yellowstone Volcano Observatory 2022 annual report*: U.S. Geological Survey Circular 1508, 49 p. <https://doi.org/10.3133/cir1508>.
- Zhou, P. and Mukasa, S.B. (1997). *Nd-Sr-Pb isotopic, and major-and trace-element geochemistry of Cenozoic lavas from the Khorat Plateau, Thailand: Sources and petrogenesis*. Chemical Geology 137 (3-4, 175-193).

Website

<https://byjus.com/physics/volcanoes/> (สืบค้นเมื่อ 9 มิย 2566)

<https://education.nationalgeographic.org> (สืบค้นเมื่อ 10 มิย 2566)

<https://volcanoes.usgs.gov/vsc/glossary/quaternary.htm> (สืบค้นเมื่อ 10 ธค 2566)

<https://volcano.si.edu> (สืบค้น เมื่อ 11 มิย 2566)

<https://www.nationtv.tv/news/378865965> (สืบค้นเมื่อ 8 ธค 2566)

Permian radiolarian cherts and their geochemical characteristics in the Central Plain of Thailand: Implications for the geological affiliation and origin of the Permian chert.

Waraphorn Phromsuwan¹ Yoshihito Kamata² Thasinee Charoentitirat³
Katsumi Ueno⁴ and Apsorn Sardud⁵

¹Graduate School of Science and Technology, Degree Programs in Life and Earth Sciences, Doctoral Program in Geosciences, University of Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

²Institute of Life and Environmental Sciences, Department of Geosciences, The University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, 305-8572, Japan

³Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

⁴Department of Earth System Science, Fukuoka University, Fukuoka 814-0180, Japan

⁵Department of Mineral Resources, Bangkok 10400, Thailand

*Corresponding author: p.waraphorn245@gmail.com, yoshi_kamata@geol.tsukuba.ac.jp

Received 27 May 2025; Revised 15 September 2025; Accepted 15 September 2025.

Abstract

Improved geological constraints refine our understanding of Southeast Asia's and Thailand's geotectonic evolution. This study investigates Permian chert successions in the Central Thailand, where are the Sawan Khalok and the Nakhon Sawan–Uthai Thani areas, to elucidate their genesis, depositional environment, and implications for the tectonic evolution. The Central Thailand is interpreted as part of the Sukhothai Zone characterized by an island arc setting such Permian-Triassic volcanic rocks, formed by the subduction of the Paleo-Tethys Ocean with the Indochina Block. Permian cherts, previously considered enigmatic, are irregularly distributed in this zone. The research examines four chert sections, identifying the Early Permian radiolarians (Asselian) in TS13, specifically *Pseudoalbaillella simplex* and *Pseudo-albaillella cf. annulata*, and late Early – early Middle Permian (Kungurian–Roadian) in TS14, comprising *Albaillella sinuata* and *Albaillella cf. asymmetrica*. The Middle Permian radiolarians (Roadian–Capitanian) identified include *Pseudoalbaillella scalprata*, *Parafollicucullus fusiformis*, *Parafollicucullinoides cf. globosus*, *Parafollicucullus monacanthus*, *Follicucullus cf. scholasticus*, and *Follicucullus cf. bipartitus* form NS07. For NS11, the identified radiolarians are *Pseudoalbaillella cf. lomentaria*, *Pseudoalbaillella scalprata*, *Parafollicucullus monacanthus*, and *Follicucullus cf. scholasticus* indicating Wordian–Capitanian ages.

Geochemical analyses (ICP-OES and ICP-MS) of chert samples from the four sections provide insights into their origin and depositional setting. Samples of TS13 and TS14 exhibit origins of hydrothermal influence and show a negative Ce anomaly, suggesting depositing nearby a spreading ridge environment with limited hydrothermal activity. Samples of NS07 and NS11 plot close to biogenic chert origin and display a depleted Ce anomaly, indicating decreased hydrothermal material input or deposition near a continental margin. Based on lithological characteristics and radiolarian ages, chert successions in the Sawan Khalok and the Nakhon Sawan–Uthai Thani areas are considered to have same origins of the Khanu Chert and the Khao Gob Chert. In terms of depositional time intervals and geochemistry characteristics, those of the cherts can correlate with cherts from the Sa Kaeo area, representing the Early and Middle Permian chert sequences, originated in a back-arc basin setting rather than formed in a vast oceanic

setting of the Paleo-Tethys Ocean. This study confirms an existence evidence of a back-arc basin chert in the Central Thailand, extending the known distribution of the Sa Kaeo suture zone northwestward from the Uthai Thani and Nakhon Sawan areas into the Sawan Khalok area, and continues toward the Nan suture. These stratigraphic relationships can be explained by the fact that the bedded cherts were thrust onto the structurally higher rocks of the Sukhothai Zone, due to lateral shortening tectonics associated with the closure of the back-arc basin.

Keywords: Back-arc basin, Central Thailand, Geochemistry, Permian, Radiolarian chert

1. Introduction

Thailand included Southeast Asia, which comprises numerous continental blocks that rifted from Gondwanaland during the early Paleozoic and integrated with each continental block during the mid-Mesozoic. Numerous researches have presented interpretations of the geotectonic development of Thailand and its surrounding areas (e.g., Hara et al., 2020, Metcalfe, 2013, 2021 and Ueno et al., 2018). According to their disclosures, the formation of a back-arc basin in the Paleo-Tethys region was a response to Paleo-Tethys subduction, which took place beneath the Sukhothai Volcanic Arc and the Indochina Block (Metcalfe, 2013, 2021). This basin is identified as sutures prolonging from southeastern to northeastern Thailand, including the Sa Kaeo and Nan suture zones (**Fig. 1**). Prior studies indicate that these suture lines emerged from igneous rocks overlapped by specific rock assemblages, such Permian and Middle Triassic radiolarian chert, Permian limestone, and Triassic clastic sedimentary rock (Hada et al., 1999, Ito et al., 2020, Kamata et al., 2003, 2018, Saesaengseerung et al., 2009, Sashida et al., 1997, Udchachon et al., 2018). The original stratigraphy documents geological development of the back-arc basin from the Early Permian to the Late Triassic, reflecting its periods of opening and closure (Hara et al., 2018, Phromsuwan et al., 2024). Several studies of Permian sedimentary rocks, especially chert, fine-grained siliciclastic, and limestone, were discovered from the Central Plain of Thailand that it examined the depositional

age of rock, conducted comprehensive investigations on microfossils, and analyzed tectonic implications in the Central Plain region (e.g., Fontaine et al., 1996, Saesaengseerung, 2009, Sashida & Nakornsri, 1997, Ueno et al., 2012). Permian radiolarians were reported by Saesaengseerung, 2009, Sashida & Nakornsri, 1997 in the Sukhothai, Nakhon Sawan, and Uthai Thani provinces, whereas Fusulina and other microfossils were categorized by Fontaine et al., 1996, Ueno et al., 2012 in the Nakhon Sawan and Uthai Thani provinces, which are believed to have originated from carbonate rock of the Lampang Group situated within the Sukhothai Zone and of the Saraburi Group corresponded to Indochina Block. Additionally, chronological data, lithological features, and chemical characteristics were investigated using detrital zircon dating from the Sukhothai Zone, revealing the age and origin of clastic sedimentary rocks associated with the subduction system of the Paleo-Tethys Ocean (Hara et al. 2020). In fact, the Central Plain (e.g., Sukhothai, Kampaeng Phet, Nakhon Sawan, Uthai Thani, etc.) is recognized as a component of the Sukhothai Zone, mostly consisting of felsic-mafic volcanic and pyroclastic rocks dating from the Permian-Triassic period (Barr & Charusiri, 2011, Boonsue, 1986). The distribution of the volcanic material not only exposes a granitoid suite in the area from the Early to Late Triassic, but also provides corroborative evidence of the amalgamation between the Sibumasu block and the Indochina block following the most recent phase of the Sukhothai volcanic arc (Barr & Charusiri, 2011, Cobbing, 2011).

Sawan Khalok area, located in the central region of Sukhothai Province, represents a segment of the Sukhothai Zone, revealing the disruption of the Paleo-Tethys Ocean subduction as a volcanic island arc system. The area is predominantly characterized by dispersed mountains, suggestive of Permian rocks, along with granite intrusion outcrops. The geological sequence was characteristically marked for the Pha Haut Formation of the Ngao Group, comprising bedded chert, fine-grained siliciclastic material, and extensively metamorphosed sedimentary rock (DMR, 2008). The Nakon Sawan–Uthai Thani area features a sequence of Permian chert and siliciclastic rocks, classified as a part of Sab Bon Formation within the Saraburi Group (DMR, 2007). The outcrops are scattered broadly in Nakon Sawan and Uthai Thani cities resembling scattered little mountains, which are surrounded by Quaternary sediments from the Chao Phraya River, associated with volcanic rocks and granites (Barr & Charusiri, 2011, Cobbing, 2011).

Our research areas concentrate on both the Sawan Khalok and the Nakon Sawan–Uthai Thani areas, from which we examined chert sections. Many investigations have reported microfossil age, paleo-environment, and geotectonic history (Fontaine et al., 1996, Saesaengseerung, 2009, Sashida & Nakornsri, 1997, Ueno et al., 2012); however, there is limited information regarding the lithological characteristics and occurrences of cherts which restrict understanding of the origins of the cherts and their relationship with country rocks in the Sukhothai Zone. Some papers validated the geological setting for the region using siliceous or carbonate evidence, indicating that certain deposits are associated with the Sibumasu Block while others are in the edges of the Indochina Block (Sashida et al., 2022, Ueno et al., 2012). Therefore, we examine and describe the chert outcrops, addressing depositional age, rock occurrences, geochemical characteristics,

and geotectonic implications.

2. Geological outline

The Sukhothai Zone (Bar & Macdonald, 1991, Sone & Metcalfe, 2008, Ueno & Charoentitirate, 2011), or Sukhothai Volcanic Arc, is notably regarded as a disruption of the Paleo-Tethys Ocean, which subducted beneath the outer margins of the Indochina Block (Ueno & Hisada, 1999), extensively spanning the North-South region of central Thailand, particularly from Lampang and Sukhothai to Nakon Sawan and Uthai Thani provinces (Barr et al., 2000, Boonsue, 1986) (**Fig. 1**). This volcanic arc zone was developed as part of island-arc system extending to the south as the Chanthaburi Terrane, eastern Thailand. The region exhibits the appearance of pre-Cretaceous mafic to felsic volcanic rocks, as well as Paleozoic mixed siliciclastic-carbonate rocks and metamorphic rocks, which exist as isolated monadnocks (Sashida & Nakornsri, 1997, Ueno et al., 2012). The Paleozoic-Mesozoic rocks serve as the basement for predominantly younger sediments, including Quaternary sediment that constitute alluvial fan, fluvial, and coastal deposits (Choowong, 2011, DMR, 1999). Our research is mostly focused on chert-bearing fine grained siliciclastic rocks, therefore, mainly studied two areas (**Fig. 2A**): the main one takes place in the Sawan Khalok of Sukhothai Province, situated in the northern part of Central Thailand, while the second is in the Nakon Sawan–Uthai Thani Provinces, located in the southern part of Central Thailand.

The localities of the Sawan Khalok in Sukhothai Province, as shown in **Fig. 2B**, approximately 470 km NNW of Bangkok, exhibit poor exposures of the Paleozoic–Mesozoic rocks in flatland. The geological map of the Sukhothai Province indicates that the chert succession has been identified as the Pha Huat Formation of the Ngao Group which composes of thin chert with phyllite and siliceous shale

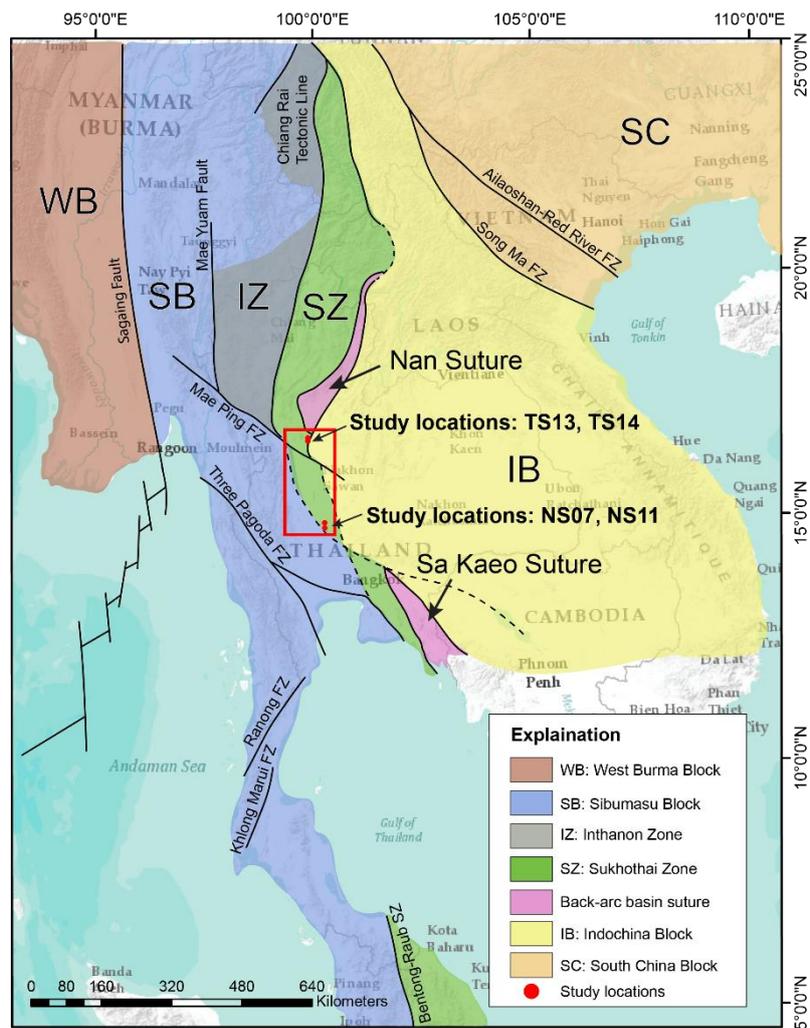


Fig.1: Geotectonic division of Thailand and its surrounding areas (modified after Hara et al., 2020, Metcalfe, 2013, and Ueno et al., 2018), showing four study locations.

interbedded with limestone (DMR, 2008). This region was referred to as Thung Saliam Chert, characterized by noticeable chert formations in several small hills situated between the Sawan Khalok and Thung Saliam, in the northern Sukhothai (Bunopas, 1983), which is re-designed to the Khanu Chert (Bunopas 1974, 1976c) found east of the Khanu Woraklaksaburi in Khamphaeng Phet Province. The comprehensive fossil documentation from the Thung Saliam Chert has been accurately dated to the Early Permian age based on radiolarians. *Pseudoalbaillella simplex*, *Ruzencevis-pongus* sp., and *Latentifistulid* gen. et sp. indet. were discriminated from red bedded chert by Sashida & Nakornsri (1997).

Nakon Sawan–Uthai Thani localities, approximately 200 km from Bangkok, include numerous hills oriented in a north-south direction, composed of chert-bearing fine-grained siliciclastic rocks. As DMR, 2007 designated that stratigraphically unit of these rocks in Nakon Sawan city to the Sap Bon Formation of the Saraburi Group (**Fig. 2C**), described as radiolarian chert, shale interbedded by limestone, and tuff which is controversy with a type section of this formation situated at Ban Sap Bon, Saraburi Province. The original Sap Bon Formation (Hinthon, 1981) is mainly constituted with a succession predominantly of fine-grained siliciclastics such as shale intercalated with siltstone and sandstone, and small outcrops of limestone and chert that it was referred deposition to

Khao Khwang Platform belonging in the Indochina Block. The Khao Gob chert is recognized in the northern region of Nakhon Sawan city (**Fig. 3A**) and plenty of small hills in northern Uthai Thani city (DMR, 1974, 1976). The chert had previously been regarded as Silurian-Devonian in earlier studies (DMR 1999); however, it was subsequently dated to the Early Permian radiolarian age (Sae-saengseerung et al. 2007) by fine-grained siliceous rocks in the Nakhon Sawan and Uthai Thani areas, that two distinct radiolarian assemblages are identified: *Pseudoalbaillella lomentaria* Assemblage, indicating an Early Permian (Artinskian), and *Follicucullus scholasticus* Assemblage, corresponding to the late Middle to early Late Permian (Capitanian-Wuchiapingian). Intermediate (diorite and andesite) to felsic (granite, rhyolite and rhyolitic tuff) rocks from the Permian-Triassic were reported in the west Nakhon Sawan (Boonsue, 1986, Jundee et al., 2017). Furthermore, chert-containing fine-grained siliciclastics are present in the northern Uthai Thani city which are also referenced to the Silurian-Devonian Khao Luang tuff (DMR, 2007) because almost the Khao Luang hill is covered primarily of tuffaceous sandstone, phyllitic tuff, and schist. It was believed that forming of the Khao Luang tuff was related with the Triassic granitoid suite (Cobbing, 2011) which huge intruded in the Central Plain of Thailand. Another Permian-Triassic carbonate rocks presumably appear as karsts and monadnocks. Ueno et al. (2012) indicated that Khao Pathawi Triassic limestone is visible in the eastern Uthai Thani Province, which is equivalent to the Triassic Lampang Group, whereas the eastern Nakhon Sawan limestone is classified as part of the Saraburi Group of the Indochina Block.

3. Lithology of Studied sections

Four research sections (NS07, NS11, TS13, and TS14) were examined in

the region between Sukhothai and Nakhon Sawan–Uthai Thani Provinces, Thailand (**Fig. 2B & C**). All these sections are distinguished as stratified cherts. It mostly occurs as scattered monadnocks surrounded by Quaternary sediments, with range strikes oriented about north-south. These small monadnocks are also formed as relatively isolated geomorphic features and exhibit limited continuity with the surrounding country rocks, like granite and volcanic rock. Four stratigraphic sections of radiolaria-bearing bedded chert were measured and samples were systematically collected at one-meter intervals. The lithology, petrography, radiolarian age, and geochemical elements of the chert sequence, Central Plain of Thailand, were examined to elucidate its characteristics and properties.

3.1 Section TS13

A section consisting weakly bedded red chert is obvious as a road cut outcrop on the western hill of Sawan Khalok city, Sukhothai Province (17° 16' 56" N, 99° 42' 25" E). The thickness of the layers range from 5 to 20 cm, with some small quartz vein. An outcrop of silicic shale with quartz veins is also found in the northeast Sawan Khalok (**Fig. 3B**). This section TS13 is SKT6 of Sashida & Nakornsri (1997). The observation of thin sections (**Fig. 3C**), a large number of radiolarians together with various microcrystalline quartz veins and the matrix consists of muddy clay are observed in this section.

3.2 Section TS14

This outcrop is in Wat Si Khongkha Ram, Sawan Khalok city, Sukhothai Province (17° 15' 50" N, 99° 41' 59" E), where is far from TS13 approximately 2.5 km south. A thin to thick layer of reddish bedded cherts are clearly exposed at a foothill totally 7 m thickness and other reddish-brown cherts are shown at an upper layer which have similar trending in NNE-SSW directions. Under polarized light microscope, there are abundance of

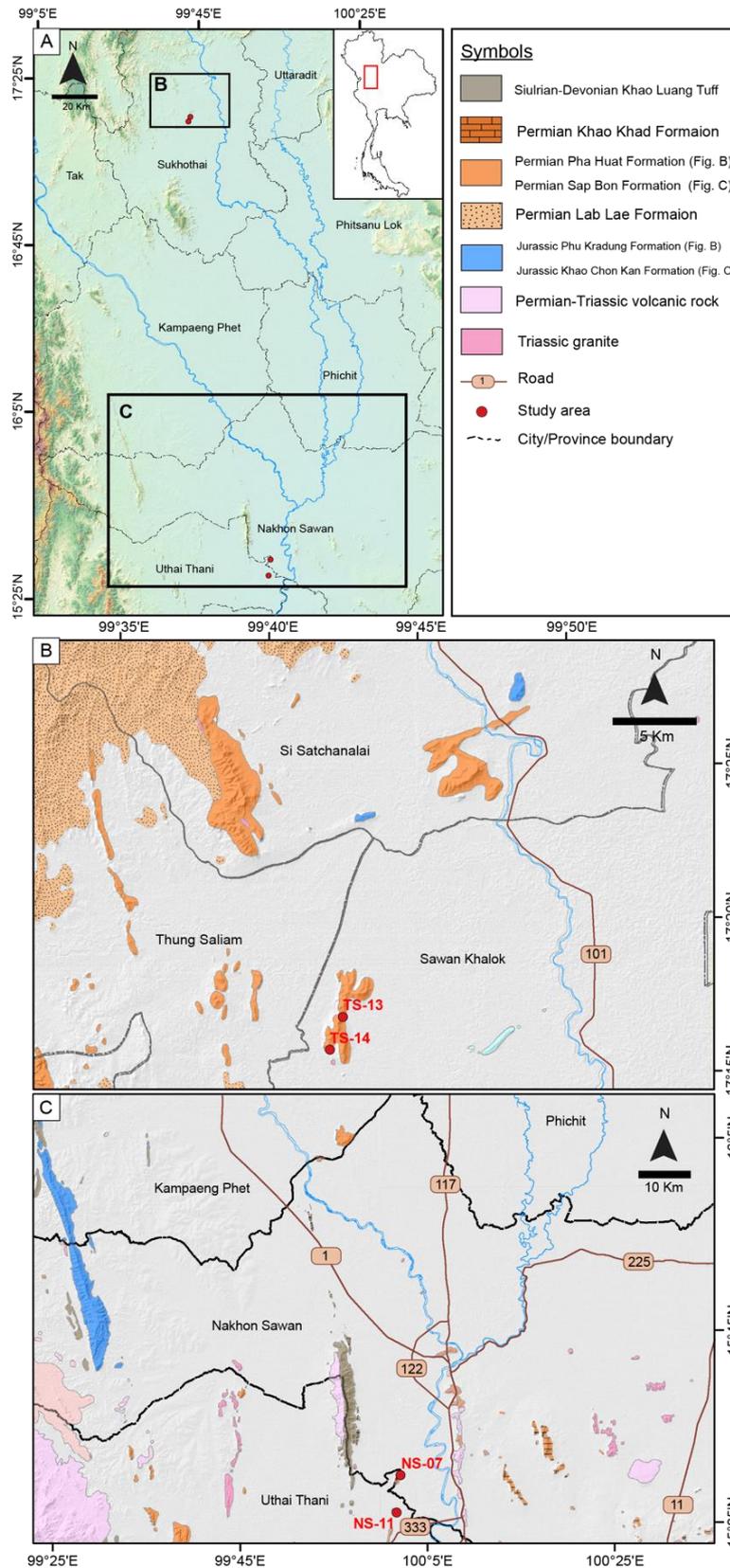


Fig.2: Maps covered the four studied regions in central Thailand. (A) Topographic map outlining the four sampling sites. The red spots mark the locations of the researched sections. (B) Geological map illustrating the two sampling sites in the Sawan Khalok area, modified from DMR (2008), and (C) the two sampling sites in the Nakhon Sawan–Uthai Thani area, modified from DMR (2007).

radiolarian and few sponge spicule traces were filled by microcrystalline quartz with a clay matrix (**Fig. 3D**). Small quartz veins are not common in the rock texture, but a pressure solution cleavage of muddy clay is clearly observed.

3.3 Section NS07

This study section is located north of Ban Noen Chaeng, Uthai Thani (15° 30' 24" N, 100° 01' 50" E), which is more near Nakhon Sawan city than Uthai Thani city approximately 25 km south of Nakhon Sawan city (**Fig. 3G**). The NS07 section consists of a 46 m thick continuous sequence of grey cherts with beds that are 1.5 to several centimeters in thickness. The chert generally shows microcrystalline to cryptocrystalline quartz and matrix of clay (**Fig. 3E**). Microscopic photo reveals a lot of micro-quartz vein and spherical radiolarian filled with microcrystalline quartz.

3.4 Section NS11

At Ban Nong Phai Baen, Uthai Thani (15° 26' 32" N, 100° 01' 23" E), the road cut outcrop of section NS11 exposes the south of section NS07, approximately 4 km away. The Permian limestone succession of the Saraburi Group surrounds this road cut outcrop, which appears as a single hill in east Uthai Thani Province. A thin layer of gray chert, about 1 to 5 centimeters thickness, is observed, trending in a NNE-SSW direction (**Fig. 3F**). The thin section observation reveals major compositions of the chert sample composed of microcrystalline to cryptocrystalline quartz, with a clay matrix displaying a pressure solution cleavage. There are also numerous micro-quartz veins, and the radiolarian tests are filled with micro-crystalline quartz.

4. Radiolarians from the Studied Sections and Their Geological Ages

As shown in **Fig. 4**, a total of 27 chert samples were collected from four sections. These samples were treated with

hydrofluoric acid (HF) in concentrations ranging from 5% to 10% for approximately 24 hours at room temperature. The extraction procedure was repeated three times to ensure the recovery of sufficient radiolarian specimens suitable for age determination. Residual materials were carefully examined and picked under a stereomicroscope. Radiolarians were successfully extracted from 17 samples. All specimens are archived at the Laboratory of Paleogeosphere Sciences, Department of Geosciences, University of Tsukuba, Japan. Radiolarian age determinations were made based on biostratigraphic studies such as Aitchison et al. (2017a), Ishiga (1986, 1990), Ito & Suzuki (2020), Kuwahara (1999), Kuwahara et al. (1998), and Xiao et al. (2018). Selected, moderately preserved radiolarian specimens are shown in Plate 1.

4.1 Section TS13

Only two samples from this section yielded radiolarians: *Pseudoalbaillella* cf. *annulata* Ishiga, 1984, *Ruzencevispongius* sp., and *Follicucullus* sp. *Pseudoalbaillella annulata* was first reported by Ishiga (1984) and is a diagnostic species of the *Curvalbaillella u-forma* Zone (UAZ 1 of Xiao et al., 2020, 2021), which corresponds to the latest Carboniferous (Gzhelian) to earliest Permian (early Asselian) (Ito & Suzuki, 2022). As previously noted, this section corresponds to SKT6 of Sashida & Nakornsri (1997), where *Pseudoalbaillella simplex* Ishiga & Imoto, 1980, *Ruzencevispongius* sp., and *Latentifistula* sp. have been reported. Based on the occurrence of *Pseudoalbaillella* cf. *annulata* and *Pseudoalbaillella simplex*, this section can be assigned to the *Pseudoalbaillella u-forma m I* to *u-forma m II* Zones (Ishiga, 1986), corresponding to the Asselian.

4.2 Section TS14

Seven chert samples from section TS14 yielded radiolarians, as shown in **Fig 4**. Identified taxa include *Albaillella sinuata* Ishiga et al., 1986, *Albaillella* cf. *asymmetrica*

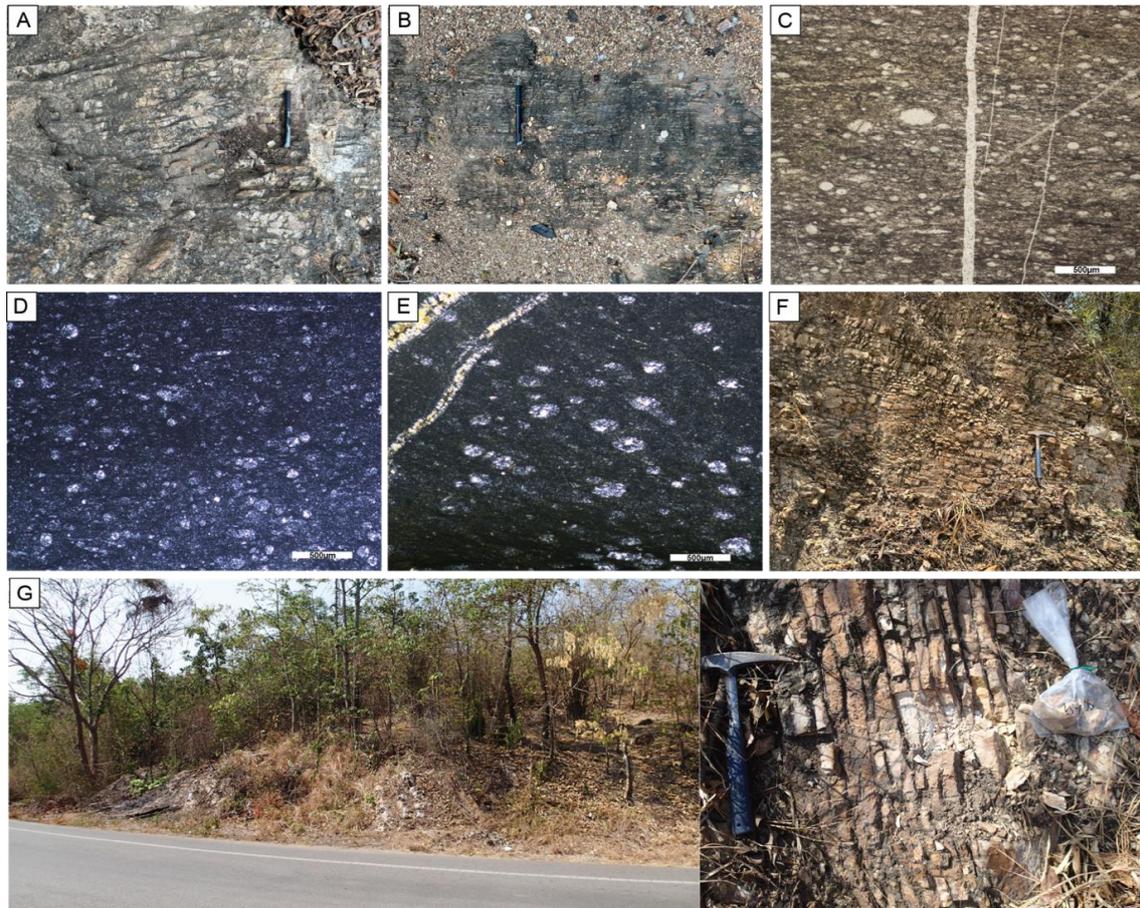


Fig.3: Photographs of outcrops and photomicrographs of chert and siliciclastic rocks. (A) Chert-containing fine-grained siliciclastic rocks found in Nakhon Sawan city (Khao Gob chert). (B) Silicic shale featuring minor and small quartz veins is exposed in the northeastern Sawan Khalok area. (C) Radiolarian-bearing chert from section TS13 seen under plane-polarized light, (D-E) Radiolarian-bearing chert from sections TS14, and NS07 seen under cross-polarized light. (F) Bedded chert (section NS11). (G) Road cut outcrop of NS07 locality showing an outcrop of bedded chert.

Ishiga & Imoto, 1982, *Pseudoalbaillella* cf. *annulata* Ishiga, 1984, *Albaillella* sp., *Pseudoalbaillella* sp., *Follicucullus* sp., and *Ruzencevispongus* sp. *Albaillella sinuata* is known from both the *A. sinuata* and *Parafollicucullus globosus* Zones, corresponding to the late Cisuralian (Kungurian) to early Guadalupian (Roadian) (Xiao et al., 2018). *Albaillella asymmetrica* also occurs within these zones and frequently co-occurs with *A. sinuata*. Although the preservation of the *A. cf. asymmetrica* specimen is poor, its co-occurrence with *A. sinuata* suggests that this assemblage likely correlates with the *A. sinuata* and *P. globosus* Zones, thus indicating a late Cisuralian to early Guadalupian age.

4.3 Section NS07

Identified radiolarians from the section NS07 are presented in **Fig. 4**. The radiolarian specimens from these samples exhibit moderate preservation. Identification of species is possible for only five samples: NS07-02, NS07-03, NS07-04, NS07-05 and NS07-07.

Sample NS07-02 contains of *Pseudoalbaillella* cf. *lomentaria* Ishiga & Imoto, 1980, and *Parafollicucullus monacanthus* Ishiga & Imoto, 1980. The presence of *Parafollicucullus monacanthus* suggests an age range from Wordian to Capitanian, corresponding to the *P. monacanthus* to *Follicucullus ventricosus* Zones (Ito & Suzuki, 2022, Xiao et al., 2018).

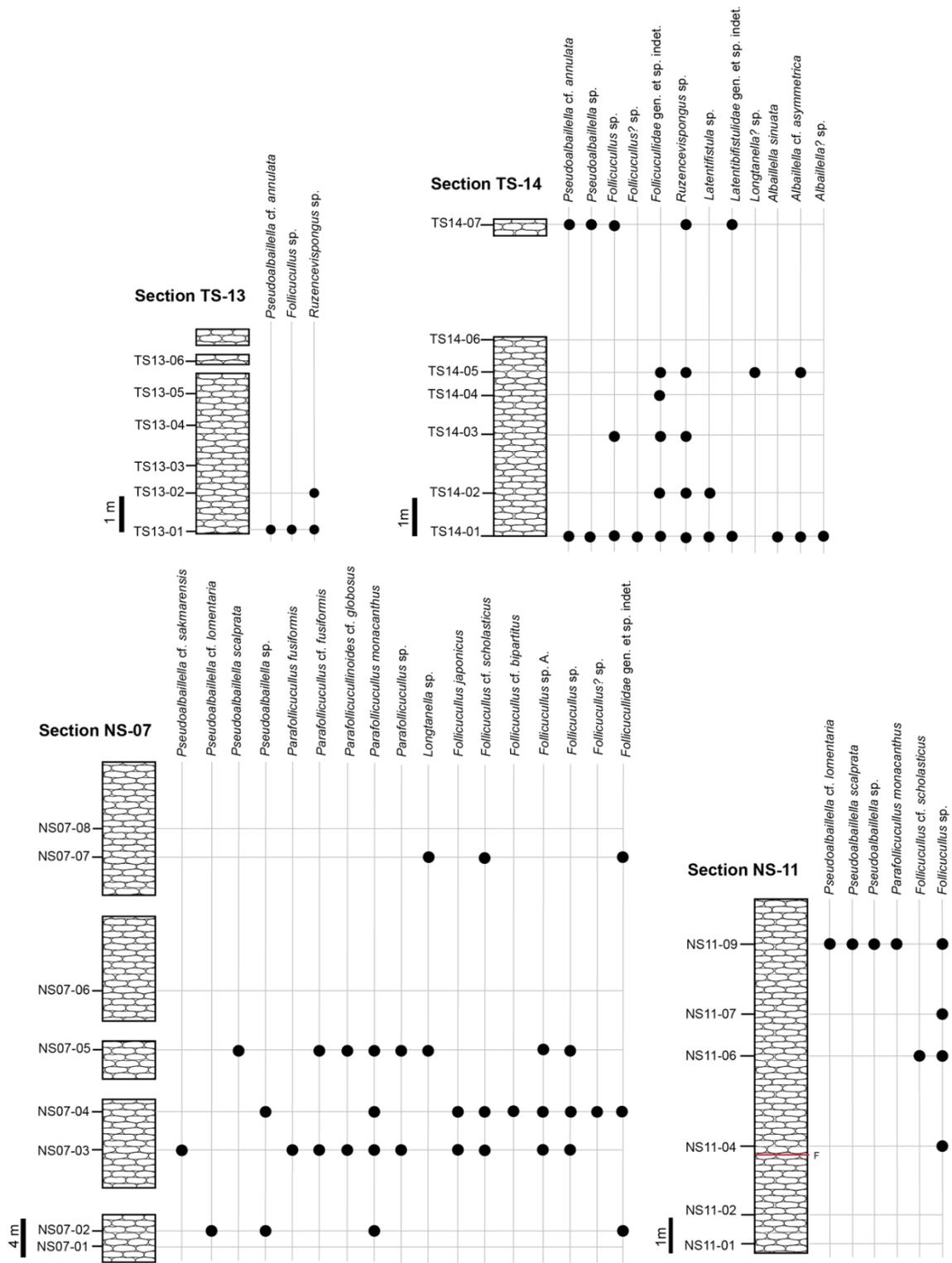


Fig.4: Lithostratigraphic columns and radiolarian occurrence columns in sections of TS13, TS14, NS07, and NS11.

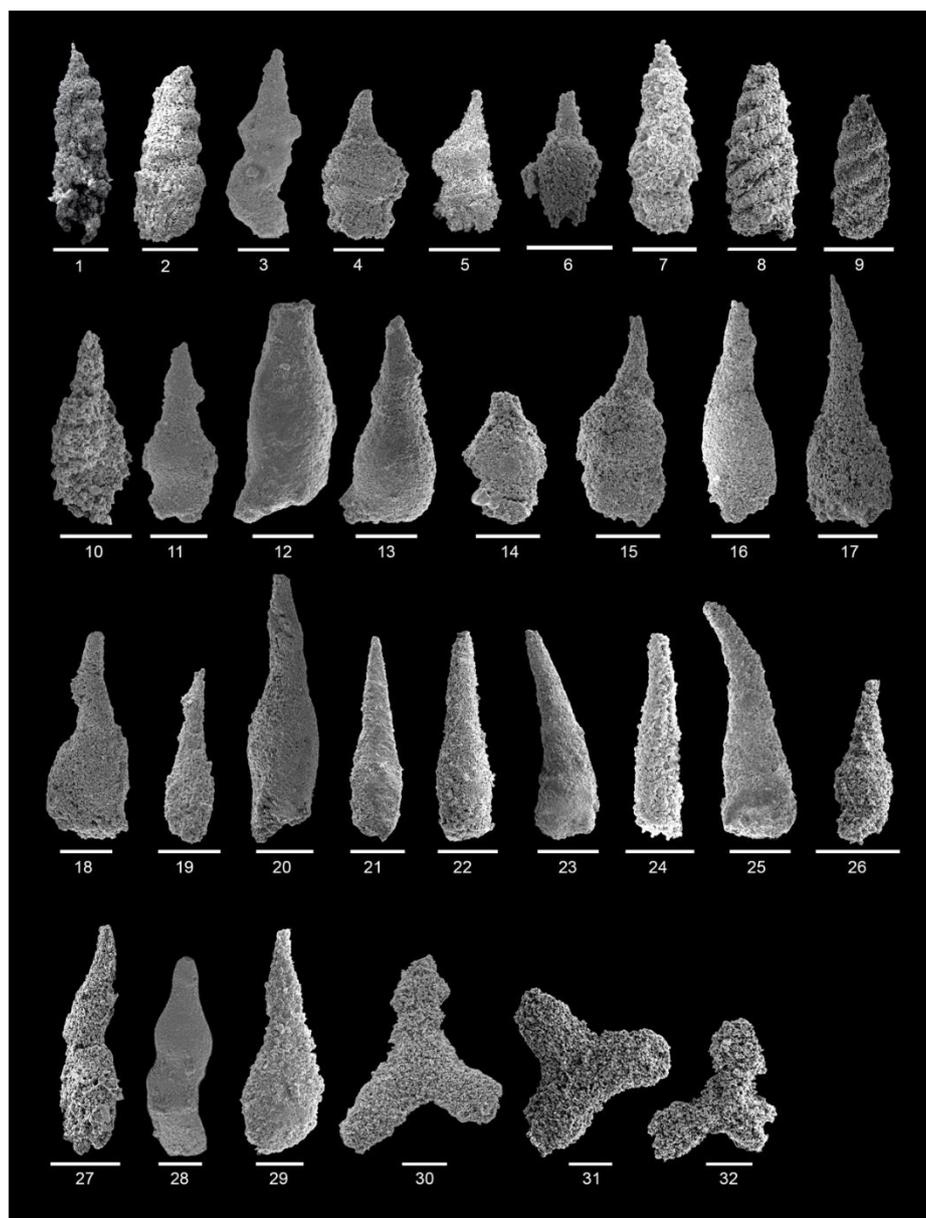


Plate 1: Scanning electron micrographs of radiolarians from cherts of the studied sections TS13, TS14, NS07 and NS11. All scale bars indicate 100 μm . **1.** *Pseudoalbaillella* cf. *annulata* Ishiga, 1984, 004, from TS13-01, **2.** *Pseudoalbaillella* cf. *annulata* Ishiga, 1984, 010, from TS14-01, **3.** *Pseudoalbaillella* cf. *sakmarensis* Kozur, 1981, 24, from NS07-03, **4.** *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth & Jones, 1980, 07, from NS07-05, **5.** *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth & Jones, 1980, 013, from NS11-09, **6.** *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth & Jones, 1980, 019, from NS11-09, **7.** *Pseudoalbaillella* cf. *lomentaria* Ishiga & Imoto, 1980, 001, from NS11-09, **8.** *Albaillella sinuata* Ishiga et al., 1986, 17, from TS14-01, **9.** *Albaillella sinuata* Ishiga et al., 1986, 23, from TS14-01, **10.** *Albaillella* cf. *asymmetrica* Ishiga & Imoto, 1982, 01, from TS14-05, **11.** *Parafollicucullus fusiformis* Holdsworth & Jones, 1980, 29, from NS07-03, **12.** *Parafollicucullus* cf. *fusiformis* Holdsworth & Jones, 1980, 13, from NS07-03, **13.** *Parafollicucullus* cf. *fusiformis* Holdsworth & Jones, 1980, 23, from NS07-05, **14.** *Parafollicucullinoides* cf. *globosus* Ishiga et al., 1982, 04, from NS07-05, **15.** *Parafollicucullinoides* cf. *globosus* Ishiga et al., 1982, 26, from NS07-05, **16.** *Parafollicucullus monacanthus* Ishiga & Imoto, 1980, 13 from NS07-03(2) **17.** *Parafollicucullus monacanthus* Ishiga & Imoto, 1980, 18 from NS07-05 **18.** *Parafollicucullus monacanthus* Ishiga & Imoto, 1980, 36, from NS07-05, **19.** *Parafollicucullus monacanthus* Ishiga & Imoto, 1980, 016, from NS11-09, **20.** *Follicucullus japonicus* Ishiga, 1991, 20, from NS07-03(2), **21.** *Follicucullus* cf. *scholasticus* Rudenko in Belyansky et al., 1984, 10, from NS07-04, **22.** *Follicucullus* cf. *scholasticus* Rudenko in Belyansky et al., 1984, 15, from NS07-04, **23.** *Follicucullus* cf. *scholasticus* Rudenko in Belyansky et al., 1984, 01, from NS07-04(2), **24.** *Follicucullus* cf. *scholasticus* Rudenko in Belyansky et al., 1984, 002, from NS11-06, **25.** *Follicucullus* cf. *bipartitus* Caridroit & De Wever, 1984, 40, from NS07-04, **26.** *Pseudoalbaillella* sp., 08(2), from TS14-07, **27.** *Pseudoalbaillella* sp., 05, from NS07-04(2), **28.** *Follicucullus* sp., 28, from NS07-03, **29.** *Follicucullus* sp., 009, from NS11-09, **30.** *Ruzencevispongus* sp., 015, from TS14-01, **31.** *Ruzencevispongus* sp., 01, from TS14-07, **32.** *Latentifistula* sp., 01, from TS14-02

The age of samples NS07-03 is indicated to range from late Roadian to Capitanian, based on co-occurrence of *Pseudoalbaillella* cf. *sakmarensis* Kozur, 1981, *Parafollicucullus fusiformis* Holdsworth & Jones, 1980, *Parafollicucullinoides* cf. *globosus* Ishiga et al., 1982, *Parafollicucullus monacanthus* and *Follicucullus* cf. *scholasticus* Rudenko in Belyansky et al., 1984, which were mainly reported from the *Parafollicucullinoides globosus* to *Follicucullus ventricosus* Zones (Ito and Suzuki, 2022). Other species that are recognized between the Guadalupian period include *Follicucullus japonicus* Ishiga, 1991, and *Follicucullus* A. sp.

Co-occurrence of *Parafollicucullus monacanthus* and *Follicucullus scholasticus* are notable characteristics of Sample NS07-04. According to recent biostratigraphic studies (Ito and Suzuki, 2022, Xiao et al., 2018), this co-occurrence interval of *Parafollicucullus monacanthus* and *Follicucullus* cf. *scholasticus* is limited to the *Follicucullus scholasticus* Zone to *Follicucullus ventricosus* Zone (UAZ 10-11), indicating a middle Capitanian age.

Sample NS07-05 contained radiolarians of *Pseudoalbaillella scalprata* Holdsworth & Jones, 1980, which typically has a range from Sakmarian to Guadalupian. This sample also contains radiolarian specimens identified as *Parafollicucullus* cf. *fusiformis* and *Parafollicucullinoides* cf. *globosus*. *Parafollicucullus fusiformis* is a typical species found in the *Parafollicucullus monacanthus* Zone, and it is known to exist from the Roadian to the late Capitanian time periods. On the other hand, *Parafollicucullinoides globosus* is a key species of the *Parafollicucullus globosus* Zone, and it is believed to have existed from the Roadian to the middle Capitanian. Our specimens were not well preserved and were identified as *Parafollicucullus* cf. *fusiformis* and *Parafollicucullinoides* cf. *globosus*, but it is likely that radiolarians from NS07-05 correspond to the period during which they

co-occurred from the Roadian to middle Capitanian.

Specimens from sample NS07-07 were poorly preserved, and only *Follicucullus* cf. *scholasticus*, *Longtanella* sp. and *Follicuculidae* gen. et sp. Indet. were yielded. *Follicucullus scholasticus* is a radiolarian that commonly occurs from late Guadalupian to Lopingian, thus it may indicate an interval from late Guadalupian to Lopingian, but the specific age of the sample NS07-07 is unknown.

Considering the radiolarian ages obtained from the five samples of the section NS07, the Roadian to Capitanian age is herein proposed.

4.4 Section NS11

Radiolarians from section NS11 were generally poorly preserved. Only four samples yielded identifiable taxa, three of which contained only *Follicucullus* sp. as shown in **Fig. 4**. Notably, sample NS11-09 contained *Follicucullus* sp., *Pseudoalbaillella* cf. *lomentaria* Ishiga & Imoto, 1980, *P. scalprata*, *Parafollicucullus monacanthus*, and *Pseudoalbaillella* sp. Considering the co-occurrence of these radiolarian species, the depositional age of samples NS11 can be estimated to be Wordian to Capitanian.

5. Geochemical analyses of the chert

Seventeen samples of bedded cherts are collected from four sections of the Central Plain, Thailand for geochemical analyses. This geochemistry provides an important tool for interpretation of their depositional environment and paleogeography (Aitchison & Flood, 1990, Girty et al., 1996, Murray et al., 1990 Yamamoto, 1987). Major oxides, trace elements, and rare earth elements were analyzed at Activation Laboratories (Actlabs), Canada with the Actlabs' innovative lithium metaborate tetraborate robotic fusion for Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP/MS) and Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy

(ICP/OES), controlled by detection limits of the Actlabs. The analytical results for the major, trace, and rare earth elements are listed in Tables 1, 2 and 3, respectively.

5.1 Major elements

The concentrations of the major elements are listed in Table 1. All bedded chert samples from sections TS13, TS14, and NS11 have relatively high concentrations of silica (95.09%–98.30%), represented as typical bedded cherts, containing with silica more than 95%. Meanwhile, the bedded cherts from section NS07 have less concentrations of silica than usual cherts (91.38%–95.53%). High silica contents correspond to small amounts of phosphate, as indicated by the trend in all four areas where silica increases while phosphate decreases. Aluminum (Al) and titanium (Ti) are frequently used as indicators of terrigenous intake in saltwater due to their limited solubility and increased immobility during the diagenesis process. In contrast, metalliferous sediments contain elevated concentrations of iron (Fe) and manganese (Mn), which are considered indicators of hydrothermal activity (Aitchison & Flood, 1990, Yamato, 1987). Al concentrations are considerably high in the chert samples of NS07 and NS11, which are 2.20%–3.50%, and 1.31%–2.09%, respectively, compared to the chert samples of TS13 and TS14, which are 0.56%–0.76%, and 0.47%–0.75%, respectively. There are opposite values in Fe concentrations compared with Al concentrations in which the cherts of TS13 and TS14 exhibit greater values (1.88%–1.90%, and 0.82%–1.68%, respectively), the cherts of NS07 have variable values (0.58%–3.55%), and of NS11 show small values (0.24%–0.38%).

As for $Al/(Al + Fe + Mn)$ ratio, it is a proxy for the influence of hydrothermal contribution in marine sediment and it generally decreases as hydrothermal input increases. A representation of the

contribution of hydrothermal influence in marine sediments can be provided by the ratio, which ranges from 0.01% (for hydrothermal cherts) to 0.6 (for biogenic cherts). The TS13 and TS14 cherts, which have The $Al/(Al + Fe + Mn)$ ratios between 0.26–0.32 and 0.25–0.45, record a mixed hydrothermal–biogenic origin, possibly linked to their proximity to hydrothermal sources or spreading center. In contrast, NS07 and NS11, which have the ratios 0.54–0.83 and (0.82–0.91), show a clear biogenic dominance, pointing to deposition in more distal or background marine settings. The Al–Fe–Mn diagram of Adachi et al. (1986) is used to identify the depositional origin of siliceous rocks. The diagram exhibits TS13 samples plot in the proximal hydrothermal chert field and show a similar origin to TS14, where two samples fall in the biogenic field and three in the hydrothermal field (**Fig. 5**). NS07 samples mainly indicate a biogenic origin, and most NS11 chert samples also plot close to the biogenic field. The ratio of $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ is a geochemical proxy used to assess the relative contributions of terrigenous and hydrothermal sources to marine sediments. This ratio continuously drops from the continental margin (0.5–0.9) and oceanic basin (0.4–0.7) to the mid-oceanic ridge (0.4) (Murray et al., 1990, 1992). Samples of TS13 and TS14 have similarly ratio (0.23–0.29 and 0.22–0.41) which is apparently contrast with NS07 (0.50–0.81) and NS11 (0.80–0.90). Such the $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ ratio, those are lied on the mid-oceanic ridge, pelagic, and continental environment. The discrimination diagrams of $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ against Fe_2O_3/TiO_2 (Murray, 1994) indicate that the bedded chert from TS13 and TS14 samples formed in a site close to spreading ridge environment (**Fig. 6**), whereas NS07 sample formed between an abyssal plain and continental margin, and NS11 sample formed in a continental margin.

Table 1 Content of major elements (wt%) in the chosen chert samples.

Sample	TS13-02	TS13-06	TS14-01	TS14-02	TS14-03	TS14-05	TS14-07	NS07-03	NS07-04	NS07-05	NS07-06	NS07-07	NS11-01	NS11-04	NS11-06	NS11-07	NS11-09
lithology	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert	chert						
SiO ₂	95.42	95.09	96.57	95.63	96.04	96.28	98.68	93.57	91.38	95.53	95.51	92.87	98.03	95.85	96.54	97.25	98.3
Al ₂ O ₃	0.76	0.56	0.75	0.74	0.47	0.52	0.57	2.45	3.5	2.61	2.2	2.68	1.31	1.67	2.09	1.95	1.22
Fe ₂ O ₃	1.88	1.9	1.33	1.36	1.68	1.5	0.82	0.58	3.55	0.97	1.25	1.19	0.33	0.38	0.24	0.3	0.24
MnO	0.015	0.01	0.012	0.01	0.01	0.012	0.011	0.007	0.013	0.01	0.015	0.016	0.009	0.008	0.007	0.007	0.007
MgO	0.06	0.03	0.07	0.02	0.03	0.04	0.04	0.11	0.13	0.17	0.13	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.05
CaO	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
K ₂ O	0.18	0.06	0.22	0.08	0.12	0.13	0.18	0.28	0.38	0.42	0.38	0.28	0.32	0.31	0.3	0.21	0.2
TiO ₂	0.028	0.030	0.033	0.023	0.025	0.023	0.023	0.069	0.11	0.09	0.044	0.094	0.023	0.050	0.048	0.060	0.027
P ₂ O ₅	0.03	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	< 0.01	0.05	0.03	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	0.54	0.89	0.5	0.49	0.41	0.27	0.34	0.97	1.7	0.97	0.93	1.14	0.44	0.64	0.84	0.72	0.53
Total	98.93	98.65	99.52	98.40	98.83	98.81	100.69	98.11	100.86	100.85	100.57	98.42	100.56	99.01	100.17	100.59	100.60
MnO/TiO ₂	0.54	0.33	0.36	0.43	0.40	0.52	0.48	0.10	0.12	0.11	0.34	0.17	0.39	0.16	0.15	0.12	0.26
Al/(Al+Fe+Mn)	0.32	0.26	0.4	0.39	0.25	0.29	0.45	0.83	0.54	0.76	0.67	0.72	0.82	0.84	0.91	0.89	0.86
Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	0.29	0.23	0.36	0.35	0.22	0.26	0.41	0.81	0.50	0.73	0.64	0.69	0.80	0.81	0.90	0.87	0.84

Table 2 Concentrations of trace elements (ppm) in the chosen chert samples.

Sample	TS13-02	TS13-06	TS14-01	TS14-02	TS14-03	TS14-05	TS14-07	NS07-03	NS07-04	NS07-05	NS07-06	NS07-07	NS11-01	NS11-04	NS11-06	NS11-07	NS11-09
lithology	chert																
Sc	2	2	2	2	2	2	1	3	6	4	3	5	1	2	3	3	2
Be	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
V	26	27	17	17	19	16	12	15	19	20	14	16	7	10	7	11	7
Cr	290	190	230	370	220	220	100	140	150	150	140	170	250	210	220	240	210
Co	3	2	3	4	2	2	1	2	5	2	2	3	3	2	2	3	2
Ni	140	100	110	180	110	110	50	60	80	70	60	80	120	100	110	130	90
Cu	<10	20	<10	20	<10	<10	<10	<10	30	<10	10	20	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	50	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30	<30
Ga	2	2	2	2	1	2	2	4	6	4	4	6	2	3	3	3	3
Ge	1	1.1	0.8	0.8	0.5	0.8	0.8	1.2	1.6	1	1.2	1.5	0.9	1.3	1.5	1.4	1.1
As	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Rb	8	3	8	3	5	5	6	11	15	18	17	12	13	13	13	9	8
Sr	7	9	9	6	8	5	11	17	36	10	48	35	4	4	5	11	5
Y	7	5.5	6.1	4.2	6.4	4.6	4.1	4.5	4.6	5.4	6.6	10.4	3.1	4.5	3.8	5.5	2.3
Zr	12	15	15	15	13	12	15	15	26	20	13	29	8	14	21	17	10
Nb	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.8	1.3	1.1	0.6	0.9	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Mo	6	5	5	8	5	5	2	3	4	3	3	4	6	5	6	6	5
Ag	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
In	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sn	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	1	<1	1	<1	<1	<1	<1	<1
Sb	0.4	0.4	<0.2	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	<0.2	0.2	<0.2	0.6	<0.2
Cs	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3
Ba	40	22	54	25	40	40	54	52	72	80	93	105	63	61	61	44	47

Table 3 Concentrations (ppm) of rare earth elements (REEs) in the chosen chert samples.

Sample	TS13-02	TS13-06	TS14-01	TS14-02	TS14-03	TS14-05	TS14-07	NS07-03	NS07-04	NS07-05	NS07-06	NS07-07	NS11-01	NS11-04	NS11-06	NS11-07	NS11-09
lithology	chert																
La	6.47	7.17	5.53	5.1	5.86	4.02	2.74	4.89	8.87	6.03	7.79	10.7	2.18	2.43	2.38	5.09	2.38
Ce	6.38	7.29	5.82	5.24	4.88	3.7	2.76	10.7	19.2	14.8	15.7	15.9	3.7	5.63	6.77	12.2	5.94
Pr	1.88	1.98	1.53	1.31	1.62	1.05	0.7	1.26	1.95	1.57	2.05	3.11	0.51	0.56	0.65	1.36	0.62
Nd	8.38	7.94	6.35	5.13	6.21	4.06	2.96	5.16	7.3	6.44	8.36	12.7	1.98	1.93	2.58	5.35	2.37
Sm	2.06	1.89	1.59	1.12	1.52	1	0.63	1.2	1.45	1.33	1.79	2.6	0.44	0.48	0.53	1.18	0.52
Eu	0.50	0.42	0.38	0.25	0.35	0.23	0.18	0.21	0.29	0.30	0.37	0.51	0.09	0.10	0.11	0.23	0.09
Gd	2.01	1.72	1.57	1.1	1.53	1.03	0.84	0.99	1.27	1.27	1.63	2.42	0.4	0.54	0.52	0.99	0.58
Tb	0.29	0.24	0.24	0.17	0.26	0.17	0.14	0.15	0.19	0.18	0.25	0.35	0.06	0.1	0.09	0.16	0.09
Dy	1.63	1.36	1.43	0.96	1.44	0.98	0.81	0.92	1.07	1.13	1.41	2.13	0.4	0.68	0.59	1.02	0.43
Ho	0.3	0.25	0.26	0.19	0.28	0.18	0.15	0.17	0.21	0.22	0.26	0.41	0.09	0.15	0.12	0.21	0.09
Er	0.82	0.7	0.68	0.51	0.75	0.53	0.43	0.48	0.64	0.59	0.72	1.18	0.25	0.43	0.38	0.59	0.27
Tm	0.11	0.10	0.10	0.07	0.11	0.08	0.06	0.07	0.09	0.08	0.09	0.16	0.04	0.07	0.06	0.09	0.04
Yb	0.7	0.64	0.61	0.47	0.69	0.49	0.38	0.42	0.62	0.57	0.55	1.02	0.22	0.42	0.39	0.56	0.24
Lu	0.097	0.093	0.09	0.071	0.101	0.073	0.055	0.062	0.092	0.085	0.075	0.152	0.035	0.06	0.058	0.083	0.036
LREE	27.68	28.41	22.77	19.25	21.97	15.09	10.81	24.41	40.33	31.74	37.69	47.94	9.30	11.67	13.54	26.40	12.50
HREE	3.95	3.39	3.41	2.45	3.63	2.50	2.03	2.27	2.92	2.86	3.36	5.40	1.09	1.91	1.68	2.72	1.20
ΣREE	31.63	31.79	26.18	21.70	25.60	17.59	12.83	26.68	43.25	34.59	41.05	53.34	10.39	13.57	15.22	29.11	13.70
Ce/Ce*	0.40	0.42	0.44	0.44	0.34	0.39	0.43	0.94	1.00	1.05	0.86	0.60	0.76	1.05	1.18	1.01	1.06
Eu/Eu*	1.07	1.01	1.06	1.00	1.00	0.98	1.04	0.84	0.95	1.00	0.96	0.89	0.96	0.83	0.91	0.93	0.70
La _n /Ce _n	2.31	2.24	2.17	2.22	2.74	2.48	2.26	1.04	1.05	0.93	1.13	1.54	1.34	0.98	0.80	0.95	0.91

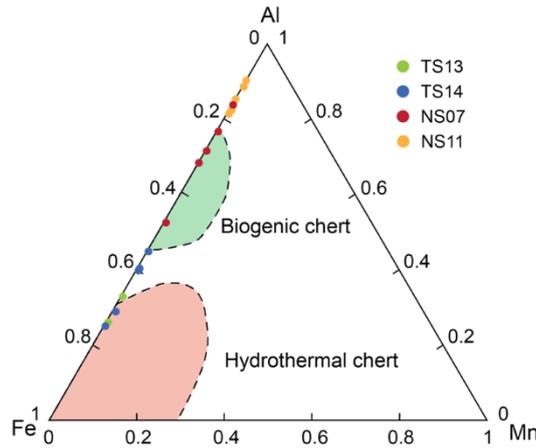


Fig. 5: Triangle diagram of the Al-Fe-Mn elements for the seventeen samples. The biogenic and hydrothermal chert fields originate from Adachi et al. (1986).

5.2 Trace elements

Trace elements are elements mostly present in very small quantities (Table 2), as typically less than 0.1%. Significant concentrations of Cr display outweigh other elements that range from 100 – 370 ppm, that there are samples of TS13 and TS14 reach to 300 ppm and samples of NS07 and NS11 fit average in 166 and 226 ppm, respectively. Data for Ni and Cu concentrations appear relatively clustered in chert from continental margin: NS07 has Ni concentrations for 60–80 ppm, NS11 limits for 90–120 ppm., TS13 ranges for 110–140 ppm, and TS14 appears for 50–180 ppm. In addition, the concentrations of Zr and Cr are traditionally associated with detrital heavy minerals, such as zircon, and are potentially more abundant in continental margin chert, which can reflect the source rock of the terrigenous contribution. It shows in the bedded chert of NS07 at 13–29

ppm and NS11 at 8–21 ppm, however not in the cherts of TS13 and TS14 (12–15 ppm and 12–15 ppm, respectively).

Ba concentrations may indicate deposition in upwelling zones or continental margin settings, where productivity is high. In this study, Ba concentrations are also slightly high in samples of NS07 (52–105 ppm), and NS11 (44–63 ppm) compared to samples of TS13 and TS14, which are 22–40 ppm, and 25–54 ppm, respectively. It contains an interestingly high Sr concentration from NS07 sample exceeding 10 ppm (10–48 ppm), that in some cases, hydrothermal fluids can influence Sr concentrations in chert. Elevated Sr levels in chert may indicate proximity to hydrothermal vents or other hydrothermal activity (Andersen and Hume, 1968). Other trace elements in the four areas are low and variable, that some elements are less than 1 ppm and up to a few ppm.

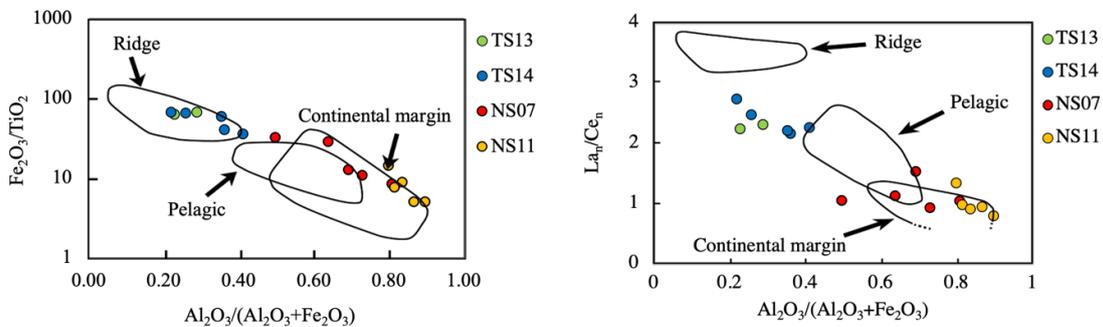


Fig. 6: Diagrams illustrating $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ against Fe_2O_3/TiO_2 and La_n/Ce_n effectively distinguish the depositional environments of the Permian bedded cherts within the fields of ridge, pelagic, and continental margin (Murray, 1994).

5.3 Rare earth elements (REEs)

Every REEs contents of the four localities are relatively low, as seen in Table 3, which is less than 1 ppm. A relatively low REEs were obtained from Light Rare Earth Elements (LREEs) and Heavy Rare Earth Elements (HREEs), samples of TS13, TS14, and NS11 also present the relatively low value of the total REEs (Σ REEs) from 31.63 to 31.79, 12.83 to 26.18, and 10.39 to 29.11 ppm, respectively excluded sample of NS07 an intermediate high value of Σ REEs (26.68–53.34). The NASC-normalized La_n/Ce_n and Ce/Ce^* ratios are extremely important markers for determinations of tectonic settings and depositional environments presented in marine sediments. Sedimentary settings are evaluated using the La_n/Ce_n ratio, whereas the Ce/Ce^* ratio may be found in a wide variety of rocks, ranging from oceanic basins to continental siliceous rocks. Cherts that are deposited along continental margins frequently feature La_n/Ce_n ratios that are close to 1, but those that are deposited on spreading ridges or pelagic settings have greater values, reaching 3.5 and ranging between 2 and 3 (Murray, 1994, Murray et al., 1990). The samples of TS13 and TS14 have a slightly high La_n/Ce_n ratios: TS13 has values between 2.24 and 2.31, and TS14 ranges between 2.17 and 2.74, whilst samples of NS07 and NS11 are a slightly low ranges that La_n/Ce_n ratios: NS07 present values from 0.93 to 1.54, and NS11 appear values from 0.80 to 1.38. Thus, these ratios are lied between the fields of pelagic and continental setting.

In terms of Ce/Ce^* ratios, proximal to spreading ridges, average Ce/Ce^* values are 0.29, whereas values in the abyssal plain of oceanic basins are 0.6, and continental margins exhibit values of 0.9 (Murray et al., 1990, 1991). The chert samples from TS13 exhibited consistent values Ce/Ce^* ratios ranging from 0.40 to 0.42 ppm. The chert samples from TS14 showed slightly low Ce/Ce^* ratios,

ranging from 0.34 to 0.44 ppm. In contrast, the cherts from N07 and NS11 displayed greater values in 0.60 to 1.05, and 0.76 to 1.18 ppm, respectively. The Ce/Ce^* ratios from the four sections suggest a nearby spreading ridge to abyssal plain and terrigenous sediment contributions.

Discrimination diagrams, more particularly $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ vs. La_n/Ce_n (Murray, 1994), provide additional evidence that the chert successions of TS13 and TS14 were deposited in a transitional environment. This environment was located between a mid-oceanic ridge and an oceanic basin. As presented in Fig. 6, the NS11 sample was deposited in a continental margin, and the NS07 sample was deposited during transitions from a pelagic plain to a continental zone. Moreover, the chondrite-normalized rare earth element distribution patterns were utilized as labels for the environmental setting of marine sediments. This is because the concentrations of cerium decrease with increasing distance from land. In general, REE patterns of sediments exhibit a strong negative Ce anomaly on a nearby spreading ridge, a negative Ce anomaly in the deep sea, and a positive anomaly on continental margins (Murray et al., 1990, 1991). The chondrite-normalized rare earth element patterns of the analyzed samples from the four sections are illustrated in Fig. 7. All profiles exhibit a downward slope, indicating an enrichment of LREEs and a depletion of HREEs. The TS13 section (Asselian) exhibits declared negative Ce anomalies, alike to those in the TS14 section (Kungurian–Roadian). The younger NS07 section (Roadian–Capitanian) exhibits totally no Ce anomalies (flat lines), with only one sample showing a significant negative anomaly. It is similar REE patterns in the NS11 section (Wordian–Capitanian) showing depletions of Ce anomalies.

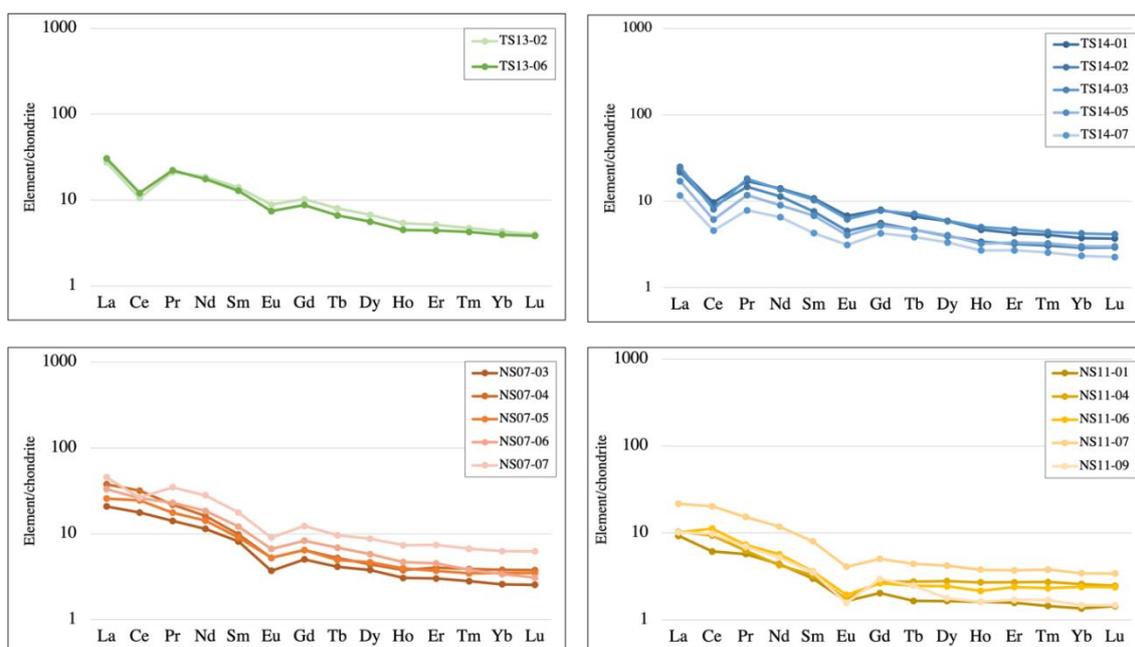


Fig. 7: The distribution patterns of rare earth elements (REE) in the analyzed samples are normalized to chondrite values, as referenced from McDonough & Sun (1995)

6. Discussions

6.1 Relationship of chert successions of the Sawan Khalok area and Nakhon Sawan–Uthai Thani area

The four sections examined in this study are TS13 and TS14 in the Sawan Khalok area, and NS07 and NS11 in the Nakhon Sawan–Uthai Thani area (**Fig. 2**). The chert exposed in the Sawan Khalok area was named the Khanu Chert by Bunopas (1976, 1981) and assigned to the member of Thung Salium Group (Bunopas, 1981). Whereas the chert in the Nakhon Sawan–Uthai Thani area was described as the Kho Gob Chert (Bunopas, 1976, 1980), and its succession was geologically compared with the Khanu Chert of the Sawan Khalok area (Bunopas, 1981). The geological ages of both the Khanu and Kho Gob Cherts were originally estimated to be Silurian–Devonian by Bunopas (1976, 1981) and Bunopas and Vella (1978). However, the depositional ages of the cherts in both areas were later revised to the Permian based on the occurrence of Permian radiolarians, as reported by Sashida and Nakornsri (1997) and Saesaengseerung et al. (2007). In agreement with these findings,

our analysis also yielded Permian radiolarians, confirming that the chert sequences in both areas are of Permian age.

In both areas, the chert successions consist of thin-bedded, reddish to gray or dark gray radiolarian chert. These cherts are interbedded with fine-grained siliciclastic rocks, particularly silicic shale. The successions are consistently oriented in a NNE–SSW direction and typically form small monadnocks. Microscopically, the chert comprises a microcrystalline quartz matrix with clay minerals and an abundance of densely packed radiolarian tests (**Figs. 3C, 3D, 3E**), while coarse terrigenous grains, such as quartz larger than silt-sized, are absent from the chert layers. These microscopic features are typical of pelagic radiolarian bedded chert, which is interpreted to have been deposited in a deep pelagic oceanic setting. This observation also supports the geological correlation of the bedded cherts from both areas (i.e., the Khanu Chert and the Khao Gob Chert).

In summary, the Khanu Chert and the Khao Gob Chert, distributed across the Central Plain of Thailand, are lithologically characterized by Permian bedded

radiolarian chert interbedded with siliciclastic rocks such as shale, siltstone, and sandstone. These features are lithologically and stratigraphically comparable to each other, particularly in terms of associated lithologies, microscopic characteristics, and geological ages as determined by radiolarian biostratigraphy. Based on lithological characteristics (thin-bedded radiolarian chert with silicic shale and/or tuffaceous rocks), stratigraphic relationships (consistent interbedding and NNE–SSW orientation), and radiolarian-based age data (Early to Middle Permian), the chert successions in the Sawan Khalok and Nakhon Sawan–Uthai Thani areas are thought to have the same origin.

6.2 Geological comparison with the Permian chert distributed in the Sa Kaeo area, southeastern Thailand

An age determination from radiolarian-bearing cherts in the four locations assigns the age of each section as follows: TS13 (Asselian), TS14 (Kungurian–Roadian), NS07 (Roadian–Capitanian) and NS11 (Wordian–Capitanian), based on radiolarian biostratigraphy. These ages are within the Permian period, similar to chert deposits in the Sa Kaeo suture zone, rather than the extended range of pelagic chert from the Paleo-Tethys Ocean, which spans from the Devonian to Triassic. As discussed in Section 6.1, the lithology and stratigraphy of the studied successions suggest that the Khanu Chert and the Khao Gob Chert could be correlated each other and have the same origin. However, to further evaluate their tectonic origin, a geochemical comparison with other Permian cherts requires more details.

Geochemical analysis of seventeen chert samples across the four sections provides key evidence of depositional settings. The discrimination diagrams, particularly $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ vs Fe_2O_3/TiO_2 and $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ vs La_n/Ce_n (Murray, 1992, 1994), reveal a progression in depositional environments from areas affected by hydrothermal activity

to areas affected by terrestrial materials. TS13 on the diagram exhibit low $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ ratios and high Fe_2O_3/TiO_2 ratios, plotting within the ridge-proximal fields (Fig. 6). The cherts were formed a site of the hydrothermal activity (Fig. 5). The Ce/Ce^* anomaly values are distinctly low (0.40–0.42), and chondrite-normalized REE patterns show a downward slope with strong negative Ce anomalies (Fig. 7). These signatures are characteristic of deposition influenced by hydrothermal input, likely near a spreading center. TS14 samples plot in both a ridge and a transitional zone between ridge and pelagic fields (Fig. 6), with high Fe_2O_3/TiO_2 ratios and Ce/Ce^* values ranging from 0.34 to 0.44. Their chert origins were from hydrothermal and non-hydrothermal activities (Fig. 5). The chondrite-normalized REE patterns exhibit significant negative Ce anomalies along a decreasing slope (Fig. 7). Although still showing hydrothermal characteristics, the influence is weaker than in TS13. This suggests deposition from a site of the hydrothermal activity such as the hydrothermal vent, within a more distal ridge environment. In contrast, samples from NS07 display higher $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ and lower Fe_2O_3/TiO_2 ratios, indicating reduced hydrothermal affect. The discrimination diagram of Murray (1994) plots display a transitional zone (Fig. 6), placing these samples in the open marine to continental margin field. Ce/Ce^* values range from 0.60–1.05, and REE patterns become smoother with depleted Ce anomalies. NS11 samples exhibit the most biogenic origin, with $Al_2O_3/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ ratios exceeding 0.80, and Fe_2O_3/TiO_2 consistently below 10. Ce/Ce^* values between 0.76–1.18 and flat Ce anomalies in REE patterns (Fig. 7) suggest continental margin influence. All NS07 and NS11 samples plot within the biogenic field in the Al–Fe–Mn diagram (Fig. 5), implying deposition deep marine basins where affected by terrestrial materials.

The sequential increase in Ce/Ce* values from TS13, TS14, NS07 to NS11 mirrors a depositional change from areas affected by hydrothermal activity to areas affected by terrestrial materials, arranged in stratigraphic order by age. This trend closely resembles the Sa Kaeo chert succession, where Early Permian cherts reflect deposition near hydrothermal activity, as indicated by strong negative Ce anomalies in REE patterns, high Fe₂O₃/TiO₂ ratios, and their origin with hydrothermal source (Phromsuwan et al., 2024). In contrast, Middle Permian cherts in the Sa Kaeo area show progressively diminished hydrothermal influence, with Ce/Ce* values increasing more than the Early Permian cherts, flattened Ce anomalies in REE profiles, and higher Al₂O₃/(Al₂O₃ + Fe₂O₃) ratios indicated to deposition in abyssal plains or distal continental margins dominated by biogenic origin accumulation (Phromsuwan et al., 2024).

By comparison, Chert sequences of the Inthanon Zone, which is thought to have been deposited in a vast paleocean of the Paleo-Tethys, has a wide age range over a much longer duration (~250 Ma), ranging from the Middle Devonian to the Middle Triassic (Caridroit, 1993, Kamata et al., 2012, Sashida et al., 2000, and Wonganan et al., 2005). The variations in cerium anomalies in the REE profiles with geological age observed in the Sa Kaeo area have not been reported in the chert sequences of the Inthanon Zone.

Based on depositional time intervals and geochemical evidence, the chert sequences distributed in the Central Plain can be geologically correlated with the Permian chert of the Sa Kaeo area, which is interpreted to have originated in a back-arc basin located between the Sukhothai Arc and the Indochina Block, rather than the chert sequence of the Inthanon Zone, which was deposited in the Paleo-Tethys Ocean. This contrast suggests that the studied successions were formed in a

back-arc basin rather than within a vast, long-lived pelagic realm of the Paleo-Tethys.

6.3 Geological affiliation (origin) of the Permian chert distributed in the Central Plain and the extension of the suture in the Central Plain

As previously mentioned, the Chao Phraya Central Plain is widely covered by thick Quaternary sediments, and the Paleozoic to Mesozoic basement rocks are poorly exposed, resulting in a lack of research on their stratigraphy, formation age, and origin. Recently, Ueno et al. (2012) examined the lithology and foraminiferal assemblages of limestone distributed in the Nakhon Sawan and Uthai Thani regions of the Central Plain and proposed a potential tectonic division of the area (see **Figs. 2 and 10** in Ueno et al., 2012).

According to their report, the western parts of Uthai Thani and Nakhon Sawan provinces expose Triassic S-type granite, attributed to the Central Belts (Main Range) of Cobbing (2011), Ordovician limestone correlating with the Thung Song Limestone of the Thai Peninsula (Ridd, 2011), Silurian -Devonian sedimentary rocks corresponding to part of the Thong Pha Phum Group, and the Uthai Thani Limestone, which is comparable to the Ratburi Limestone in the Peninsula. The distribution of these basement rocks suggests that this area belongs to the Sibumasu Continental Block. Conversely, the eastern parts of the Uthai Thani and Nakhon Sawan provinces are underlain by the Tak Fa Formation (a unit of the Saraburi Group) and the Phetchabun Volcanic Belt, which are interpreted as basement rocks associated with the eastern margin of the Indochina Continental Block. Between the basement rocks derived from the Sibumasu and Indochina blocks lies the Permian Khao Kob Chert (the subject of this study) as well as the Khao Pathawi Limestone (defined as a Triassic unit by Ueno et al., 2012) and the Permian?-Triassic

Nakhon Sawan Volcanics. Since the Khao Pathawi Limestone correlates with the Triassic Lampang Group in northern Thailand, Ueno et al. (2012) concluded that this area represents the southern extension of the Sukhothai Zone.

In other words, Central Thailand is divided into three tectonic domains from west to east: the Sibumasu Block, the Sukhothai Zone, and the Indochina Block that it is similar to the configuration observed in northern Thailand. The northwestern extension of the Sa Kaeo Suture, which separates the Sukhothai Zone and the Indochina Block, is inferred to lie between the rocks of Indochina Block origin (mainly the Tak Fa Formation) and those of Sukhothai Zone origin (e.g., the Nakhon Sawan Volcanics). This suggests that the suture extends north-south along the eastern side of Nakhon Sawan (see **Figs. 2 and 10** in Ueno et al., 2012). There are no exposures of ultramafic or mafic rocks such as serpentinite or gabbro, which is typical of suture zones, have been reported in the Chao Phraya Plain. In contrast, Permian bedded cherts containing radiolarians are exposed alongside ultramafic and mafic rocks in the Sa Kaeo and Nan suture zones and are therefore considered critical indicators for identifying sutures.

As mentioned above, the Permian bedded chert (Khao Kob Chert) exposed in the Nakhon Sawan and Uthai Thani areas can be geologically correlated with the Permian bedded chert (Khanu Chert) in the Sawan Khalok area based on age, lithology, stratigraphy, and geochemical characteristics. Accordingly, it is inferred that the Sa Kaeo Suture extends northwestward from the Uthai Thani and Nakhon Sawan areas into the Sawan Khalok area, and continues toward the Nan Suture. The monadnocks containing Permian bedded cherts (NS-07 and NS-11) in the Nakhon Sawan–Uthai Thani areas, as examined in this study, are located

slightly west of the inferred position of the Sa Kaeo Suture and lie within the region characterized by Sukhothai Zone rocks, including the Permian–Triassic Nakhon Sawan Volcanics and the Triassic Khao Pathawi Limestone (correlative with the Lampang Group). Although there are no outcrops that directly display the stratigraphic relationship between the cherts and surrounding units, this can be interpreted as the result of tectonic thrusting. The bedded cherts, which are considered part of the suture zone, have been thrust onto the structurally higher units of the Sukhothai Zone due to lateral shortening tectonics associated with the closure of the back-arc basin.

7. Conclusions

Several conclusions can be drawn from this study:

1. The radiolarian assemblages and ages from the Sawan Khalok and Nakhon Sawan–Uthai Thani areas of central Thailand predominantly date to the Early Permian and late Middle Permian, consecutively Asselian from TS13, Kungurian–Roadian from TS14, Roadian–Capitanian from NS07, and Wordian–Capitanian from NS11.

2. Geochemical examinations reveal a distinct depositional environment and origin for each age, indicating that the Early Permian chert (TS13 and TS14) originated from a hydrothermal source and were deposited nearby a spreading ridge zone. The contents of Ce anomalies confirm the considerable negative characteristics in the profile of REE chondrite patterns. The Middle Permian cherts (NS07 and NS11) had a biogenic origin, with NS07 deposited in a transitional zone between a pelagic and a continental margin, while NS11 was deposited in a continental margin region.

3. Based on the radiolarian assemblages and ages, geochemical characteristics, and lithological features,

it appears probable that the chert successions from the Sawan Khalok and Nakhon Sawan–Uthai Thani areas, which have similar origins to the Khanu Chert and the Khao Gob Chert, can be correlated with the back-arc basin cherts from the Sa Kaeo suture zone, despite the absence of outcrops of igneous rock basement.

4. This study proposes that the chert successions documented in the Central Plain, Thailand are considered evidence of radiolarian-bedded chert deriving from the back-arc basin. It is likely that cropping took place because of thrusting followed the closure of the back-arc basin.

References

- Adachi, M., Yamamoto, K., & Sugisaki, R. (1986). Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity. *Sedimentary Geology*, 47(1-2), 125–148.
- Aitchison, J. C., & Flood, P. G. (1990). Geochemical constraints on the depositional setting of Palaeozoic cherts from the New England orogen, NSW, eastern Australia. *Marine Geology*, 94(1-2), 79–95.
- Aitchison, J.C., Suzuki, N., Caridroit, M., Danelian, T., & Noble, P. (2017a). Paleozoic radiolarian biostratigraphy. *Geodiversities*, 39, 503–531.
- Andersen, N. R., & Hume, D. N. (1968). Determination of barium and strontium in sea water. *Analytica Chimica Acta*, 40, 207–220.
- Barr, S.M., & Charusiri, P. (2011). Volcanic rocks. In: Ridd, M.F., Barber, A.J., Crow, M.J. (Eds.), *The Geology of Thailand*. The Geological Society of London, 4151–439.
- Barr, S.M., & Macdonald, A.S. (1991) Toward a late Paleozoic–early Mesozoic tectonic model for Thailand. *Journal of Thai Geoscience*, 1, 11–22.
- Barr, S.M., Macdonald, A.S., Dunning, G.R., Ounchanum, P., & Yaowanoyothin, W. (2000). Petrochemistry, U–Pb (zircon) age, and palaeotectonic setting of the Lampang volcanic belt, northern Thailand. *Journal of the Geological Society, London*, 157, 553–63.
- Boonsue, S. (1986). Petrography and geochemistry of the volcanic rocks in Changwat Uthai Thani and Nakhon Sawan, Central Thailand (Doctoral dissertation, Chulalongkorn University).
- Bunopas, S. (1974). Geologic Map of Changwat Phitsanulok (Sheet NE 47-15, Scale 1:250,000). Geological Survey Division, Department of Mineral Resources, Bangkok.
- Bunopas, S. (1976). Stratigraphic succession in Thailand. A preliminary summary. *Journal of Geological Society of Thailand*, 2, 37–58.
- Bunopas, S. (1976c). Geology and mineral resources of Changwat Phitsanulok, Sheet NE47-15, Scale 1:250,000. Department of Mineral Resources, Report of Investigation 16 (1/2), 1–217. (in Thai with English summary)
- Bunopas, S. (1980). Geology and mineral resources of Changwat Nakhon Sawan, Sheet ND47-3, Scale 1:250,000. Department of Mineral Resources, Geological Survey Report 1, 1–75. (in Thai with English summary)
- Bunopas, S. (1981). Palaeogeographic History of Western Thailand and Adjacent Parts of Southeast Asia—A Plate-Tectonic Interpretation: [Dissertation]. University of Wellington, New Zealand. Reprinted as Geological Survey Paper No. 5, 810 p. Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand.
- Bunopas, S. (1983). Paleozoic succession in Thailand. In Proceedings of the workshop on stratigraphic correlation of Thailand and Malaysia, 1, 29–76. Geological Societies of Thailand and Malaysia Haad Yai, Thailand.
- Bunopas, S., & Vella, P. (1978). Late Palaeozoic and Mesozoic Structural Evolution of Northern Thailand: A Plate Tectonic Model. In: Nutalaya, P., ed., Proceedings of the 3rd Regional Conference on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia, Bangkok, 133–140.
- Caridroit, M. (1993). Permian radiolaria from NW Thailand. In: Thanasuthipitak, T. (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Biostratigraphy of Mainland Southeast Asia, Chiang Mai, January 31–February 5, 1993. Facies and Paleontology. 1, 83–96.
- Choowong, M. (2011). Quaternary. In: Ridd, M.F., Barber, A.J., Crow, M.J. (Eds.), *The Geology of Thailand*. Geological Society, London, 335–350.
- Cobbing, E.J. (2011). Granitic rocks. In: Ridd, M.F., Barber, A.J., Crow, M.J. (Eds.), *The Geology of Thailand*. Geological Society, London, 441–457.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (1974). Geological Map of Thailand 1:250,000, Changwat Phitsanulok Sheet, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.

- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (1976). Geological Map of Thailand 1:250,000, Changwat Nakornsawan Sheet, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (1999). Geological Map of Thailand, Scale 1:1,000,000. Geological Survey Division, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (2007). Geological Map of Changwat Nakhon Sawan, Scale 1:250,000. Geological Survey Division, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (2007). Report for geological and mineral resource management of Changwat Nakhon Sawan. Geological Survey Division, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (2008). Geological Map of Changwat Sukhothai, Scale 1:250,000. Geological Survey Division, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- DMR (Department of Mineral Resources of Thailand). (2008). Report for geological and mineral resource management of Changwat Sukhothai. Geological Survey Division, Department of Mineral Resources of Thailand, Bangkok.
- McDonough, W. F., & Sun, S. S. (1995). The composition of the Earth. *Chemical geology*, 120(3-4), 223–253.
- Feng, Q., Malila, K., Wonganan, N., Chonglakmani, C., Helmcke, D., Ingavat-Helmcke, R., & Caridroit, M. (2005). Permian and triassic radiolaria from northwest Thailand: paleogeographical implications. *Revue de Micropaléontologie*, 48, 237–255.
- Feng, Q., Shen, S., Liu, B., Helmcke, D., Qian, X., & Zhang, W. (2002). Permian radiolarians, chert and basalt from the Daxinshan Formation in Lancangjiang belt of southwestern Yunnan, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45, 63–71.
- Fontaine, H., Salyapongse, S., Suteethorn, V., Tansuwan, V., & Vachard, D. (1996). Recent biostratigraphic discoveries in Thailand: a preliminary report. *CCOP Newsletter*, 21 (2), 14–15.
- Girty, G. H., Ridge, D. L., Knaack, C., Johnson, D., & Al-Riyami, R. K. (1996). Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1), 107–118.
- Hada, S. (1999). Asian Accretion of Gondwanaland-derived Terranes and their Final Emplacement: IGCP Project 411. *Gondwana Research*, 2, 559–61.
- Hara, H., Ito, T., Tokiwa, T., Kong, S., & Lim, P. (2020). The origin of the Pailin Crystalline Complex in western Cambodia, and back-arc basin development in the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 82, 299–316.
- Hara, H., Kurihara, T., Kuroda, J., Adachi, Y., Kurita, H., Wakita, K., ... & Chaodumrong, P. (2010). Geological and geochemical aspects of a Devonian siliceous succession in northern Thailand: implications for the opening of the Paleo-Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297(2), 452–464.
- Hinthong, C., (1981). Geology and Mineral Resources of Changwat Phra Nakhon Si Ayutthaya (ND 47–8), Scale 1:250,000. Department of Mineral Resources, Geological Survey Report 4, 1–105. (in Thai with English summary)
- Holdsworth B. K., & Jones D. L. (1980). Preliminary radiolarian zonation for late Devonian through Permian time. *Geology*, 8 (6), 281–285.
- Ishiga, H. (1984). Follicucullus (Permian Radiolaria) from Maizuru Group in Maizuru Belt, Southwest Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, 38(6), 427–434a.
- Ishiga, H. (1986). Late carboniferous and permian radiolarian biostratigraphy of southwest Japan. *Journal of Geosciences, Osaka City University*, 29, 89–100.
- Ishiga, H. (1990). Paleozoic Radiolarians. In Ichikawa K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A., eds., *Pre-cretaceous Terranes of Japan*, IGCP Project, no. 224, 285–295.
- Ishiga, H. (1991). Description of a new Follicucullus species from Southwest Japan. *Mem. Fac. Sci., Shimane Univ.*, 25, 107-118.
- Ishiga, H., & Imoto, N. (1980). Some Permian radiolarians in the Tamba district, Southwest Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, 34, 333–345.
- Ishiga, H., Kito, T., & Imoto, N. (1982). Late Permian radiolarian assemblages in the Tamba district and an adjacent area, Southwest Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, 36, 10–22.
- Ishiga, H., Watase, H., & Naka, T. (1986). Permian radiolarians from Nishiki Group in Sangun-

- Chugoku Belt, Southwest Japan. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, 40(2), 124–136c.
- Ito, T., & Suzuki, N. (2022). Recent progress on research of Permian radiolarian Follicucullidae, Fossils (The Palaeontological Society of Japan), 112, 5–16 (in Japanese).
- Ito, T., Hara, H., Kong, S., & Lim, P. (2020). New materials of Cisuralian (early Permian) radiolarians from western Cambodia: Paleobiogeographic implications in the Paleotethys. *Palaeoworld*, 29, 568–576.
- Jundee, P. K., Limtrakun, P., Boonsoong, A., & Panjasawatwong, Y. (2017). Petrography and REE geochemical characteristics of felsic to mafic volcanic/hypabyssal rock in Nakhon Sawan and Uthai Thani Provinces, Central Thailand. *Chiang Mai J Sci*, 4, 1722–1734.
- Kamata, Y., Chutakositkanon, V., Hisada, K., Charusiri, P., & Ueno, K. (2003). Permian radiolarians from the Sa Kaeo–Chanthaburi area, eastern part of Thailand. *Proceedings of 1st International Conference on Palaeontology of Southeast Asia*, Mahasarakham, 27–30. *Mahasarakham University Journal* vol. 22 (Special Issue), 249–250.
- Kamata, Y., Maezono, A., Hara, H., Ueno, K., Hisada, K., Sardud, A., Charoentitirat, T., & Charusiri, P. (2012). Basaltic activity preserved in an Upper Permian radiolarian chert from the Paleo-Tethys in the Inthanon Zone, northern Thailand. *J. Asian Earth Sci*, 61, 51–61.
- Kamata, Y., Ueno, K., Hara, H., Charoentitirat, T., & Charusiri, P. (2018). Paleozoic and Mesozoic Back-arc basin chert of the Paleo-Tethys in Thailand, *Proceedings of the Second International Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (Great 2018)* 19–23 November, 2018, Bangkok, Thailand.
- Kozur, H. (1981). Albaillellidae (Radiolaria) aus dem Unterperm des Vorurals. *Geologische-Palaeontologische Mitteilungen Innsbruck*, 10, 263-274.
- Kuwahara, K. (1999). Phylogenetic Lineage of Late Permian *Albaillella* (*Albaillellaria*, Radiolaria). *Journal of Geosciences*, Osaka City University, 42, 85–101.
- Kuwahara, K., Yao, A., & Yamakita, S. (1998). Reexamination of Upper Permian radiolarian biostratigraphy. *Earth Science – (Chikyu Kagaku)*. *Journal of the Association for the Geological Collaboration in Japan*, 52, 391–404.
- Metcalf, I. (2013). Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66, 1–33.
- Metcalf, I. (2021). Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia, *Gondwana Research*, 100, 87–130.
- Murray, R.W. (1994). Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sedimentary Geology*, 90, 213–232.
- Murray, R.W., Buchholtz ten Brink, M.R., Jones, D.L., Gerlach, D.C., & Russ III, G.P. (1990). Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 18, 268–271.
- Murray, R.W., Ten Brink, M.R.B., Gerlach, D.C., Russ III, G.P., & Jones, D.L. (1991). Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: assessing REE sources to fine-grained marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 1875–1895.
- Murray, R.W., Ten Brink, M.R.B., Gerlach, D.C., Russ III, G.P., & Jones, D.L. (1992). Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 2657–2671.
- Phromsuwan, W., Kamata, Y., Hayashi, T., Kobayashi, K. I., Charoentitirat, T., Ueno, K., & Sardud, A. (2024). Radiolarian age and geochemical characteristics of the Permian bedded chert sequence in the Soi Dao area, Chanthaburi, Southeast of Thailand. *Revue de Micropaléontologie*, 85, 100786.
- Rudenko (1984), in Belyansky G. S., Nikita A. P., & Rudenko V. S., 1984. About Sebuchaz suite of Primorye, in Poya rkova Z. N. (ed.), *New Data an Detail Biostratigraphy of Phanerozoic of Far East*. DVNC Akademii Nauk SSSR, Vladivostok, 43-57.
- Saesaengseerung, D. (2009). Devonian to Triassic radiolarian biostratigraphy and depositional environments of these radiolarian-bearing rocks in Thailand, 220 p. PhD Thesis, University of Tsukuba, Tsukuba.
- Saesaengseerung, D., Agematsu, S., Sashida, K., & Sardud, A. (2009). Discovery of Lower Permian radiolarian and conodont faunas from the bedded chert of the Chanthaburi area along the Sra Kaeo suture zone, eastern Thailand. *Paleontological Research*, 13, 119–138.
- Saesaengseerung, D., Sashida, K., Sardud, A., & Poonpan, S. (2007). Discovery of Permian radiolarian faunas from the Nakhon Sawan and

- Uthai Thani areas, Central Thailand. In: Tantiwanit, W. (Ed.), Proceedings of the International Conference on Geology of Thailand (GEOTHAI'07): Towards Sustainable Development and Sufficiency Economy. Department of Mineral Resources, Bangkok, 72.
- Sashida, K., Adachi, S., Igo, H., Nakornsuri, N., & Ampornmaha, A. (1997). Middle to Upper Permian and Middle Triassic radiolarians from Eastern Thailand, Science Reports of the Institute of Geoscience University of Tsukuba, section B=Geological Sciences, v. 18, 1–17.
- Sashida, K. & Nakornsri, N. (1997). Lower Permian radiolarian faunas from the Khanu Chert Formation distributed in the Sukhothai area, northern central Thailand. In: Dfeeradilok, P. et al. eds., Proceedings of the International Conference on Stratigraphy and Tectonic Evolution of Southeast Asia and the South Pacific, Bangkok, 19–24.
- Sashida, K., Igo, H., Hisada, K., Ueno, K., Kajiwara, Y., Nakornsri, N., & Sardud, A. (2000). Late Permian to Middle Triassic radiolarian faunas from northern Thailand. *Journal of Paleontology*, 74, 789–811.
- Sashida, K., Ito, T., Hong, P., Fukushima, Y., Agematsu, S., Salyapongse, S., & Putthapiban, P. (2022). Occurrence of early Carboniferous radiolarians and Middle Triassic conodonts from Ban Rai, southwestern Uthai Thani, central Thailand and its geological significance. *Paleontological Research*, 26(4), 420–439.
- Sone, M., & Metcalfe, I. (2008). Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2-3), 166–179.
- Udchachon, M., Thassanapak, H., & Burrett, C. (2018). Early Permian radiolarians from the extension of the Sa Kaeo Suture in Cambodia–tectonic implications. *Geological Magazine*, 155, 1449–1464.
- Ueno, K., & Charoentitirat, T. (2011). Carboniferous and Permian. In: Ridd, M.F., Barber, A.J., Crow, M.J. (Eds.), *The Geology of Thailand*. The Geological Society of London, 71–136.
- Ueno, K., & Hisada, K. 1999. Closure of the Palaeo-Tethys caused by the collision of Indochina and Sibumasu. *Chikyū Monthly*, 21, 832–839 (in Japanese).
- Ueno, K., Kamata, Y., Ueno, K., Charoentitirat, T., Charusiri, P., Vilaykham, K., & Martini, R. (2018). The Sukhothai Zone (Permian–Triassic island-arc domain of Southeast Asia) in Northern Laos: insights from Triassic carbonates and foraminifers. *Gondwana Research*, 61, 88–99.
- Ueno, K., Miyahigashi, A., Kamata, Y., Kato, M., Charoentitirat, T., & Limruk, S. (2012). Geotectonic implications of Permian and Triassic carbonate successions in the Central Plain of Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61, 33–50.
- Wonganan, N., & Caridroit, M. (2005). Middle and Upper Devonian radiolarian faunas from Chiang Dao area, Chiang Mai province, northern Thailand. *Micropaleontology*, 51, 39–57.
- Xiao, Y. F., Suzuki, N., & He, W. H. (2018). Low-latitude standard Permian radiolarian biostratigraphy for multiple purposes with Unitary Association, Graphic Correlation, and Bayesian inference methods. *Earth-Science Reviews*, 179, 168–206.
- Xiao, Y., Suzuki, N., He, W., Benton, M. J., Yang, T., & Cai, C. (2020). Verifiability of genus-level classification under quantification and parsimony theories: a case study of follicucullid radiolarians. *Paleobiology*, 46(3), 337–355.
- Xiao, Y., Suzuki, N., Ito, T., & He, W. (2021). New Permian radiolarians from east Asia and the quantitative reconstruction of their evolutionary and ecological significances. *Scientific Reports*, 11(1), 6831.
- Yamamoto, K. (1987). Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52(1-2), 65–108.



If you are interested in earth sciences
Support geoscience with a subscription to

Thai Geoscience Journal



The **Thai Geoscience Journal** publishes original research
And review articles from the international community in all
Fields of geological sciences such as

Engineering Geology

Petrology

Geopark

Paleontology

Environmental Geology

Economic Geology

Structural Geology

Geophysics

Tectonics

Geochemistry

All articles published by the **Thai Geoscience Journal**
are made freely and permanently accessible online
Immediately upon publication, **without subscription
charges or registration barriers.**

Make a submission and visit us via 



Please scan here

Contact

Geological Survey Division

Department of Mineral Resources 75/10 RAMA VI Road,
Ratchatewee, Bangkok 10400 Phone: +66(0)-2-621-9650

Website : <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/TGJ/index>

E-mail : tgj.2020@gmail.com



Published by





CONCEPT DESIGN

This logo composes of Abbreviations of Thai Geoscience Journal

T = THAI G = GEOSCIENCE J = JOURNAL

Coexistence of 3 abbreviations design in a concept of modernity blend with a Thainess
Modification of G alphabet in a shape of ammonoid shows relevance to geology
and infinite development of Thai Geoscience Journal

- **SCOPE AND AIM OF THAI GEOSCIENCE JOURNAL (TGJ):** TGJ is an international (Thai and English) journal publishing original research articles dealing with the geological sciences. It focuses, mainly but not exclusively, on: Sedimentology and Geomorphology, Palaeontology, Quaternary, Geology and Environment Change, Geological Hazards, Environmental Geosciences, Geophysics, Mineral and Petroleum Geology, Tectonics and Structural Geology, Geochemistry and Geochronology, Metamorphic Geology and Volcanic and Igneous Geology. Two types of articles are published in the Journal: Research Articles and Reviews. Research Articles are new original articles, normally not exceeding 25 pages. Review Articles are those papers that summarize the current state of knowledge on specific fields or topics of geosciences. They analyze and discuss previously published research results, rather than report new results. TGJ Aim is to provide valuable geoscience knowledge and information and push more inspiration for readers and researchers to produce treasure research in the future.
- **FEEDBACK AND CONTACT:** We welcome your feedback, comments and suggestions for the development of TGJ

Please contact: Dr. Apsorn Sardud (Editor-in-Chief, TGJ)
Department of Mineral Resources
75/10 RamaVI Road Ratchathewe Bangkok 10400, Thailand



Phone: +66 (0)2 6219650



Email: tgi.2020@gmail.com



Website: <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/TGJ/index>

INSTRUCTIONS TO AUTHORS FOR TGJ



The Thai Geoscience Journal (TGJ) is an international (Thai and English) journal publishing original research articles dealing with the geological sciences. Two types of articles are published in the Journal: Research Articles and Reviews. Research Articles are new original articles. Review Articles are those papers that summarize the current state of knowledge on specific fields of geosciences and discuss previously published research results, rather than report new results. **Copyright of all the contents of Thai Geoscience Journal belong to the Department of Mineral Resources in Thailand.**

The important instructions for manuscript submission are as follows:

1. TGJ member registration

Firstly, author must register the TGJ member before manuscript submission process. Please register TGJ members online on TGJ website at <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/TGJ/about/submissions>

2. Submission of manuscripts

The second, authors must completely fill up the online manuscript submission form on TGJ website. *The last important submission step is sending the required electronic manuscript (word file) and Figure files to TGJ editorial team via ThaiJO system.* Editorial team will send you manuscript submission confirmation, manuscript number and all publication processes by email.

3. Electronic file requirements for submission

1) The manuscript should be prepared both in word and pdf files. TGJ manuscript form can download from TGJ website.

2) Figure files (JPEG, PNG, TIFF, EPS, PSD or AI); Resolution of all figures must be 300 – 600 dpi. The name of the figure file should be beginning with “Fig.” and followed by the number and name of figure that related to the manuscript. *For publication, the high-resolution figure file (300-600 dpi) may be sent after the accepted manuscript process via ThaiJO system.*

4. Manuscripts Information

The main document, containing cover sheet, main text, acknowledgement (if applicable), references, figure, table, figure and table captions. *Cover sheet:* Cover sheet should contain 1) title, 2) full names and affiliations and the addresses of all authors and 3) postal and e-mail addresses, phone and fax numbers of the Corresponding author who will take responsibility for the proofs.

Title: A title is to be brief and summarizes the major results of the paper.

Abstract: An abstract should be condensation and concentrate on the essential qualities of the paper. All papers, excluding short notes, are to be accompanied by an abstract not exceeding 500 words or as appropriate.

Key words: Select keywords (should be 4-8 words or phrases) which identify the most important subjects covered by the paper and arrange them in alphabetical order

Main text: The main text should contain Introduction, Methods, Results, Discussions, and Conclusions, or as appropriate.

Figures and tables: Each figure and table should be sequentially placed in the main text near the first time mentioned. Figure captions and mentions in text begin with the term “Fig.” in bold type, followed by the figure number, also in bold type. Each table must have a heading. Captions and headings should be explicit enough that the reader can understand the significance of the illustration or table without reference to the text.

Acknowledgements: Brief acknowledgement of funding sources and assistance provided.

References: The references should be in a common citation format as shown below.

5. References Format Suggestion

In-text citation: the **APA 6th style** requires the references in content, tables and images should specify author-date, with the researcher’s surname followed by a comma (,) and the year of publication of the document behind the quote. If there are 2-5 authors, cite all names and use & before the last name for the first time, thereafter only the first name followed by et al. but if there are 6 or more authors, cite only the surname of the first author followed by et al. and the year. For examples as followings: (Mogen, 2001), (Jones & Miler, 2008), (Mogen, Jones & Miler, 2008), (Halano et al., 2009)

In Reference Page: Citation guide in APA 6th Style. For footnote citation should be at the end of manuscript.

List authors in the reference as:

- For 1 author: Author, A. A.
- For 2 authors: Author, A. A., & Author B. B.
- For 3-7 authors: Author, A. A., Author, B. B., Author, C. C., Author, D. D., Author, E. E., Author, F. F., & Author, G. G.
- For 8 or more authors (list first six authors, add a three dot, then last author): Author, A. A., Author, B. B., Author, C. C., Author, D. D., Author, E. E., Author, F. F., ... Author, Z. Z.

Types of cited references:

1. Book

Author, A. A. (Year). *Title of book*. City, Country: Publisher’s Name.

Example:

Luffman, J. M., Bulleen, C. V., Liano, A. D., McLeod, P. K., Nash, E. O., & Neuman, C. C. (2004). *Information technology resources management* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: John & Sons Press.

2. Book Chapter

Author, A. A. (Year). Title of chapter. In A. Editor, & B. Editor (Eds.), *Title of book* (pp.xx-xx). Location: Publisher.

Example:

Ogg, J. G., Ogg, G. M., & Gradstein, F. M. (2016). 5 - Cambrian. In J. G. Ogg, G. M. Ogg, & F.M. Gradstein (Eds.), *A Concise Geologic Time Scale* (pp. 41-55). UK: Elsevier.

3. Journal Article

Author1, A. A., & Author2, B. B. (Year). Title of article. *Journal name*, volume number (issue number), pages-pages. doi:xx. xxxxxxxxxx

Example:

Jackson, J. J., & Samuel, T. S. (2001). The impact of climate change on sea levels. *Journal of Environmental Science*, 55(4), 233-277. doi:10.1070/8567-6582.33.5.



TGJ Contributors

- Assoc. Prof. Dr. Apichet Boonsoong
Dr. Apsorn Sardud
Prof. Dr. Che Aziz bin Ali
Prof. Dr. Clive Burrett
Assoc. Prof. Dr. Danupon Tonnayopas
Dr. Dhiti Dhanasuvarnachote
Dr. Ian Watkinson
Mr. Jittisak Premmanee
Prof. Dr. Katsumi Ueno
Prof. Dr. Katsuo Sashida
Prof. Dr. Ken-Ichiro Hisada
Assoc. Prof. Dr. Kieren Howard
Prof. Dr. Koji Wakita
Assoc. Prof. Dr. Kriengsak Srisuk
Assoc. Prof. Dr. Lindsay Zanno
Dr. Mallika Nillorm
Dr. Martin Smith
Adj. Prof. Dr. Michael Ryan King
Prof. Dr. Montri Choowong
Assoc. Prof. Dr. Mongkol Udchachon
Prof. Dr. Nigel C. Hughes
Mr. Niwat Boonnop
Asst. Prof. Nussara Surakotra
Asst. Prof. Dr. Passkorn Pananont
Dr. Phumee Srisuwan
Prof. Dr. Pitsanupong Kanjanapayont
Dr. Pol Chaodumrong
Dr. Pradit Nulay
Dr. Prinya Putthapiban
Prof. Dr. Punya Charusiri
Asst. Prof. Dr. Rattanaporn Hanta
Assoc. Prof. Runguang Lertsirivorakul
Assoc. Prof. Dr. Sachiko Agematsu-Watanabe
Dr. Sasiwimol Nawawitphisit
Dr. Seung-bae Lee
Dr. Siriporn Soonpankha
Asst. Prof. Dr. Sombat Yumuang
- Mr. Somchai Chaisen
Dr. Surin Intayos
Mr. Sutee Chongautchariyakul
Dr. Tawatchai Chualaowanich
Mr. Thananchai Mahatthanachai
Assoc. Prof. Dr. Thasinee Charoentitirat
Dr. Toshihiro Uchida
Mr. Tritip Suppasoonthornkul
Dr. Weerachat Wiwegwin
Assoc. Prof. Dr. Yoshihito Kamata
Dr. Andrew Mitchell
Dr. Jingwen SU
Dr. Songyang WU
- Dr. Apivut Veeravinantanakul
Dr. Namphon Khampilang
- Chiang Mai University, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia
Mahasarakham University, Thailand
Prince of Songkla University, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
University of London, England
Department of Mineral Resources, Thailand
Fukuoka University, Japan
Mahidol University, Kanchanaburi campus, Thailand
University of Tsukuba, Japan
Kingsborough Community College, City University of New York, USA
Yamaguchi University, Japan
Khon Kaen University, Thailand
North Carolina State University, USA
Department of Mineral Resources, Thailand
Global Geoscience, British Geological Survey, UK
Western Colorado University, Thailand
Chulalongkorn University, Thailand
Mahasarakham University, Thailand
University of California, Riverside, USA
Department of Mineral Resources, Thailand
Khon Kaen University, Thailand
Kasetsart University, Thailand
Department of Mineral Fuels, Thailand
Chulalongkorn University, Thailand
Geological Society of Thailand, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Mahidol University Kanchanaburi Campus, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Suranaree University of Technology, Thailand
Khon Kaen University, Thailand
University of Tsukuba, Japan
Department of Mineral Resources, Thailand
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Republic of Korea
Department of Mineral Resources, Thailand
Geo-Informatics and Space technology Development Agency, Ministry of Science and Technology (GISTDA), Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Burapha University, Chanthaburi Campus, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
Department of Mineral Fuels, Thailand
Chulalongkorn University, Thailand
Retired geophysicist, Japan
Department of Mineral Fuels, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand
University of Tsukuba, Japan
Consultant, Myanmar Precious Resources Group, Yangon, Myanmar
Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, China
Coordinating Committee for Geoscience Programmes in East and Southeast Asia (CCOP), Thailand
Mahidol University, Kanchanaburi campus, Thailand
Department of Mineral Resources, Thailand



Thai Geoscience Journal
Vol. 6 No. 10
July – December 2025
ISSN 2730-2695 (Print)
ISSN 3056-9370 (Online)

CONTENTS

Honorary Executives; Executive Advisory Board

Mr. Pichit Sombatmak

Mr. Kanok Intharawijitr

Mr. Ma Yongzheng

Advisory Editors

Prof. Dr. Clive Burrett

Dr. Dhiti Tulyatid

Prof. Dr. Katsuo Sashida

Prof. Dr. Nigel C. Hughes

Prof. Dr. Punya Charusiri

Editor in Chief

Dr. Apsorn Sardud

Associate Editors

Prof. Dr. Punya Charusiri

Prof. Dr. Che Aziz bin Ali

Mr. Teerapon Wongprayoon

Dr. Santi Pailoplee

Dr. Sanya Sarapirom

- 1- 25 ลักษณะเฉพาะทางธรณีสัณฐานของภูพระอังคาร จังหวัดบุรีรัมย์: หลักฐานจากข้อมูลโทรสัมผัสและธรณีวิทยา
ณัฐริกา hmeisa พชรินทร์ โคสุวรรณ จันทร์ดี พิชาวุฒิ มานพภาวี วิกาวี วิลัยสิทธิ์ ปัญญา จารุศิริ
Geomorphological Characteristics of Phu Phra Angkhan, Buriram Province:
Evidence from Remote Sensing and Geological Data
**Nattarika Meesa Patcharin Kosuwan Jundee Pichawut Manopkawee
Wipawee Wilaisit Punya Charusiri**
- 26-50 Permian radiolarian cherts and their geochemical characteristics in the Central
Plain of Thailand: Implications for the geological affiliation and origin of the
Permian chert
**Waraphorn Phromsuwan Yoshihito Kamata Thasinee Charoentitirat
Katsumi Ueno and Apsorn Sardud**

Published by

Department of Mineral Resources

Geological Society of Thailand

Coordinating Committee for
Geoscience Programmes in
East And Southeast Asia (CCOP)



Copyright © 2025 by the Department of Mineral Resources of Thailand
Thai Geoscience Journal website at <https://ph03.tci-thaijo.org/index.php/TGJ/index>