

ธาตุร่องรอยของหินงอก
บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

นายพศุทธิ์ รัตนศรีมงคล

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

TRACE ELEMENTS OF STALAGMITE
IN AMPHOE BAN RAI CHANGWAT UTHAI THANI

Mr. Pasut Rattanasrimongkol

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2016

หัวข้อโครงการ

ธาตุร่องรอยของหินงอก บริเวณอำเภอบ้านไร่

จังหวัดอุทัยธานี

โดย

นายพศุภ รัตนศรีมงคล

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย

วันที่ส่ง

.....

วันที่อนุมัติ.....

.....

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

(อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย)

พศุตม์ รัตนศรีมงคล : ธาตุร่องรอยของหินงอก บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี. (TRACE ELEMENTS OF STALAGMITE IN AMPHOE BAN RAI CHANGWAT UTHAI THANI) อ.ที่ปรึกษา
 โครงการหลัก : อ.ดร.สกลวรรณ ชาวไชย, 52 หน้า.

ในปัจจุบันมีการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมในอดีต โดยใช้ธาตุร่องรอยของหินงอกเป็นจำนวนมากในหลากหลายประเทศ โครงการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมในอดีต โดยใช้ธาตุร่องรอยของตัวอย่างหินงอกที่ถ้ำเขาแพระ อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี เริ่มจากนำตัวอย่างหินงอกไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) คัดเลือกธาตุร่องรอยที่จะนำไปใช้ศึกษา ทั้งหมด 12 ธาตุ จาก 36 ธาตุ ได้แก่ Mg, Sr, Ba, Fe, Zn, Mn, Al, Na, Si, Ti, Rb และ Th จากนั้นนำข้อมูลที่ ได้ไปหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 1 มิลลิเมตร จำนวน 199 มิลลิเมตร และนำธาตุร่องรอยไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในเชิง สถิติโดยวิธี Principal component analysis (PCA) สามารถแบ่งกลุ่มของธาตุร่องรอยได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) Mg, Sr และ Ba (2) Fe, Zn และ Mn (3) Na, Al, Si, Ti, Rb และ Th ธาตุร่องรอยในกลุ่มที่ (1) Mg, Sr และ Ba น่าจะถูกพัดพามาจากหินเหี้ยว ซึ่งสามารถบ่งบอกปริมาณน้ำฝนทางอ้อมได้ ธาตุร่องรอยในกลุ่มที่ (2) Fe, Zn และ Mn น่าจะมีถูกพัดพามาจากดินที่อยู่เหนือถ้ำ สามารถบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมที่มีความชุ่มชื้น ได้ และกลุ่มที่ (3) Na, Al, Si, Ti, Rb และ Th อาจจะถูกพัดพามาจากแร่ในบริเวณใกล้เคียง

จากการนำธาตุร่องรอยในแต่ละกลุ่มมาเปรียบเทียบพบว่าธาตุร่องรอยในกลุ่มที่ (1) Mg, Sr และ Ba สามารถแบ่งช่วงของปริมาณน้ำฝนออกได้ทั้งหมด 7 ช่วง โดยช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสูง ได้แก่ ช่วงที่ 1 (ค.ศ. 345-565) ช่วงที่ 3 (ค.ศ.845-965) และช่วงที่ 6 (ค.ศ.1565-1665) ช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนแปรปรวน ได้แก่ ช่วง ที่ 2 (ค.ศ.565-845) และช่วงที่ 4 (ค.ศ.965-1365) และช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนต่ำ ได้แก่ ช่วงที่ 5 (ค.ศ.1365- 1565) และช่วงที่ 7 (ค.ศ.1665-1940) และธาตุร่องรอยในกลุ่มที่ (2) Fe, Zn และ Mn สามารถแบ่ง สภาพแวดล้อมช่วงที่มีความชื้นอยู่ได้ทั้งหมด 5 ช่วง โดยช่วงที่มีความชุ่มชื้นสูง ได้แก่ ช่วงที่ 1 (ค.ศ.365-885) ช่วงที่ 3 (ค.ศ.1245-1465) และช่วงที่ 5 (ค.ศ.1665-1905) ช่วงที่มีความชุ่มชื้นต่ำ ได้แก่ ช่วงที่ 2 (ค.ศ.885- 1245) และช่วงที่ 4 (ค.ศ.1465-1665)

ภาควิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....ธรณีวิทยา.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก.....

ปีการศึกษา.....2559.....

5632731323 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : STALAGMITE / TRACE ELEMENT / PALEOCLIMATE / PALEOENVIRONMENT

PASUT RATTANASRIMONGKOL : TRACE ELEMENTS OF STALAGMITE IN AMPHOE BAN RAI
CHANGWAT UTHAI THANI. ADVISOR: SAKONVAN CHAWCHAI, Ph.D., 52 pp.

Trace elements of stalagmite are now established as important paleoclimate and paleoenvironment archives. This study detects trace elements of stalagmite, collected from Amphoe Ban Rai, Changwat Uthai Thani. First, detects trace elements from sample by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) and select 12 trace elements (Mg, Sr, Ba, Fe, Zn, Mn, Al, Na, Si, Ti, Rb and Th) from 36 elements. Then, average data every 1 millimeter for 199 millimeters, analyze the data by Principal component analysis (PCA), for the next step of PCA analysis that group trace elements which in high relationship, 3 groups include (1) Mg, Sr and Ba (2) Fe, Zn and Mn (3) Na, Al, Si, Ti, Rb and Th, the first group (Mg, Sr and Ba) derived from the carbonate host rock, implication for paleo-rainfall, second group (Fe, Zn and Mn) derived from soil over the cave walls, humidity proxy, and last group (Na, Al, Si, Ti, Rb and Th) maybe derived from minerals in study area.

The study result from the correlation of trace elements in the first group (Mg, Sr and Ba) can be divided in 7 phases, high rainfall in phase 1 (345AD-565AD), phase 3 (845AD-965AD) and phase 6 (1565AD-1665AD), Variable rainfall in phase 2 (565AD-845AD) and phase 4 (965AD-1365AD) and low rainfall in phase 5 (1365AD-1565AD) and phase 7 (1665AD-1940AD) and the second group (Fe, Zn and Mn) can be divided in 5 phases, high humidity in phase 1 (365AD-885AD), phase 3 (1245AD-1465AD) and phase 5 (1665AD-1905AD) and low humidity in phase 2 (885AD-1245AD) and phase 4 (1465AD-1665AD)

Department : Geology..... Student's Signature.....

Field of Study : Geology..... Advisor's Signature.....

Academic Year : 2016.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่องธาตุร่องรอยของหินงอก บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี นี้ได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ไม่ว่าจะเป็นในด้านความรู้ การใช้โปรแกรมต่างๆ ตลอดจนถึงคำแนะนำ คำตักเตือน และกำลังใจที่ได้รับจนทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

อันดับแรก ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย เป็นอย่างยิ่ง ที่ช่วยเหลือทั้งการออกภาคสนาม คอยให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา คำตักเตือน อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจอยู่ตลอดเวลาในทุกๆเรื่อง ตั้งแต่เริ่มต้นโครงการ จนกระทั่งเสร็จสิ้นโครงการ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.อัคนีวุธ ชะบางบอน ที่ช่วยเหลือในการออกภาคสนาม อีกทั้งยังเป็นผู้ที่คอยสละเวลาแนะนำการใช้โปรแกรมต่างๆให้ และยังคงคอยให้คำแนะนำ และเป็นกำลังใจให้อยู่เสมอ

ขอขอบคุณ คณาจารย์ และบุคลากรภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่คอยสนับสนุน ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกต่างๆให้

ขอขอบคุณ นางสาวชिरศรี สุวรรณสุข ผู้ทำโครงการวิจัยในที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำปรึกษา และทำให้โครงการนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อนๆธรณีวิทยา รุ่นที่ 57 (GEO' 57) และพี่ๆธรณีวิทยา รุ่นที่ 56 (GEO' 56) ที่คอยแนะนำ และช่วยเหลือสิ่งต่างๆ คอยให้ความรู้ ให้คำปรึกษา และยังคงคอยให้กำลังใจเสมอ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ครอบครัว ที่คอยสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำโครงการนี้ จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ (Introduction)	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and rationale)	1
1.2 พื้นที่ศึกษา (Study area)	2
1.3 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (General setting of study area)	3
1.4 วัตถุประสงค์ (Objectives)	7
1.5 สมมติฐาน (Hypothesis)	7
1.6 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)	7
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected output)	10
บทที่ 2 ระเบียบวิธีการดำเนินงาน (Methodology)	11
2.1 แผนการศึกษา	11
2.2 ระยะเวลาการศึกษา	13
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล (Results)	15
3.1 การคัดเลือกธาตุร่องรอยของหินงอก	15
3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอกในเชิงสถิติด้วยวิธี	

Principal component analysis (PCA)	20
3.3 ธาตุร่องรอยเชิงปริมาณ	21
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)	26
4.1 การคัดเลือกช่วงข้อมูลและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอก	26
4.2 ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสภาพแวดล้อมในอดีต	29
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)	38
บรรณานุกรม	41

สารบัญรูปลูกภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ถ้ำเขาแพร บริเวณบ้านพุบอน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	3
รูปที่ 1.2 ภูมิประเทศบริเวณจุดศึกษา	4
รูปที่ 1.3 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงสุด-ต่ำสุด, เฉลี่ย ตั้งแต่ปี 2518-2558 และปี 2559	
ห้วยกระเสียว บ้านทับคล้าย อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	5
รูปที่ 1.4 แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดอุทัยธานี	7
รูปที่ 1.5 ผังการทำงานของเครื่อง LA-ICP-MS	8
รูปที่ 2.1 แผนผังการดำเนินงาน	11
รูปที่ 2.2 หินงอกตัดขนานตามแนวแกนยาว 2 ส่วน	14
รูปที่ 2.3 ตัดหินงอกออกเป็น 3 ส่วน ตามแนวขวาง	14
รูปที่ 2.4 เครื่อง LA-ICP-MS	14
รูปที่ 3.1 กราฟ PCA แสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย 12 ตัว ในแกนที่ 1 และ 2	20
รูปที่ 3.2 กราฟแสดงปริมาณของธาตุร่องรอย (ppm) ในแต่ละช่วงความลึกจากส่วนบนสุดของหินงอก	
(a) กราฟแสดงปริมาณของธาตุ Na, Mg, Si, Mn, Fe และ Sr (ppm)	23
(b) กราฟแสดงปริมาณของธาตุ Al, Ti, Zn, Rb, Ba และ Th (ppm)	24
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งที่คาดว่าจะมีการปนเปื้อน และการซ้อนทับของชั้นการเจริญเติบโตของ	
ตัวอย่างหินงอก	26
รูปที่ 4.2 กราฟ PCA แสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยทั้ง 12 ธาตุ ในแกนที่ 1 และ 2	
(ข้อมูลที่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 168.5 มิลลิเมตร)	27

รูปที่ 4.3	กราฟแสดงปริมาณ และความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยในแต่ละช่วงความลึก	30
รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของธาตุ Mg, Sr และBa โดยแบ่งได้ทั้งหมด 7 ช่วง	32
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Fe, Zn และMn กับสีในชั้นของการเจริญเติบโตของหินงอก (ตัวอย่างที่บริเวณ 69 มิลลิเมตร และ 115 มิลลิเมตร)	34
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Fe, Zn และMn โดยแบ่งได้ทั้งหมด 5 ช่วง	36

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาดำเนินงาน	13
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุ ($\mu\text{g/g}$) ที่หาจากเครื่อง LA-ICP-MS ของตัวอย่างมาตรฐาน BCR-2G	15
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุ ($\mu\text{g/g}$) ที่หาจากเครื่อง LA-ICP-MS ของตัวอย่างมาตรฐาน MACS-3	16
ตารางที่ 3.3 ตารางเปรียบเทียบค่า %ความผิดพลาดของทั้ง 2 ตัวอย่างมาตรฐาน	17
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย (Pearson's correlation)	21
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย (Pearson's correlation) (ข้อมูลที่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 168.5 มิลลิเมตร)	28

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and rationale)

ความแปรปรวนของอุณหภูมิ สภาพอากาศ และปริมาณน้ำฝนในปัจจุบันนั้น นับเป็นการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อ ทำให้นักวิชาการและบุคคลทั่วไปให้ความสนใจและตระหนักถึงความสำคัญของปัญหาเหล่านี้ ซึ่งการศึกษาวินิจฉัยสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศบรรพกาล (Paleoenvironment and Paleoclimate) ของประเทศไทยนั้นยังคงมีอยู่น้อย ส่งผลให้การคาดการณ์และการสร้างแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันและอนาคตเป็นไปได้ยาก เนื่องจากไม่มีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการวิเคราะห์

จากข้อมูลการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาด้านสภาพแวดล้อมและ ภูมิอากาศในอดีตของประเทศไทย นั้น มีการศึกษาจากวงปีของต้นไม้ (Annual rings) (Gulbranson & Ryberg, 2013) ตะกอนทะเลสาบ (Lake Sediment) (Boonyatumanond et al., 2007) และละอองเรณู (Pollen) (Chaimanee et al., 2007) เป็นต้น นอกจากนี้หลักฐานทางธรณีวิทยาและทางธรณีวิทยาเบื้องต้นเหล่านี้ ประเทศไทยยังมีสถานที่ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปนั่นก็คือถ้ำ ซึ่งภายในถ้ำนั้นก็มีสิ่งที่สามารถเก็บข้อมูลที่สำคัญด้านสภาพแวดล้อมในอดีตคือ หินงอก (Stalagmites) และหินย้อย (Stalactites) ซึ่งเกิดมาจากการสะสมตัวของสารละลายคาร์บอนเนต

หินงอกมีความเหมาะสมในการนำมาศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีตเนื่องจาก หินงอกมีการสะสมตัวต่อเนื่องได้ยาวนานถึง 10^3 - 10^5 ปี ซึ่งสามารถหาอายุได้จากการใช้วิธียูเรเนียม-ทอเรียม (U-Th dating) ซึ่งมีความแม่นยำสูง (Fairchild et al., 2006) และหินงอกนั้นสามารถพบได้หลากหลายพื้นที่ในประเทศไทย

หินงอกมีองค์ประกอบหลัก คือ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยระหว่างที่หินงอกเจริญเติบโต และสะสมตัว จะเก็บข้อมูลที่สำคัญต่างๆ ในรูปแบบของธรณีเคมี ซึ่งหินงอกแต่ละอันก็จะมีอายุการสะสมตัวที่แตกต่างกันไป โดยอาจจะสะสมตัวต่อเนื่องได้เป็นพันปี หรือหมื่นปี ซึ่งสามารถนำหินงอกในช่วงอายุที่สนใจมาศึกษาร่วมกับลักษณะสีลาวรรณา (Petrography) ไอโซโทปเสถียร (Stable isotopes) และธาตุร่องรอย (Trace elements) เพื่อบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีตได้ (Huang et al., 2001; Johnson et al., 2006; Zhou et al., 2009) ยกตัวอย่างเช่น นำมาบ่งชี้การเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในอดีตหรือช่วงเวลาของฤดูต่างๆได้ (Tremaine & Froelich, 2013)

ในปัจจุบันมีเครื่องมือทันสมัยที่สามารถใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุร่องรอยในหินงอก อาทิเช่น Atomic absorption spectrometer (AAS), X-ray fluorescence spectrometer (XRF) และ Laser-ablation inductively-coupled plasma mass spectrometer (LA-ICP-MS) เป็นต้น เครื่อง LA-ICP-MS

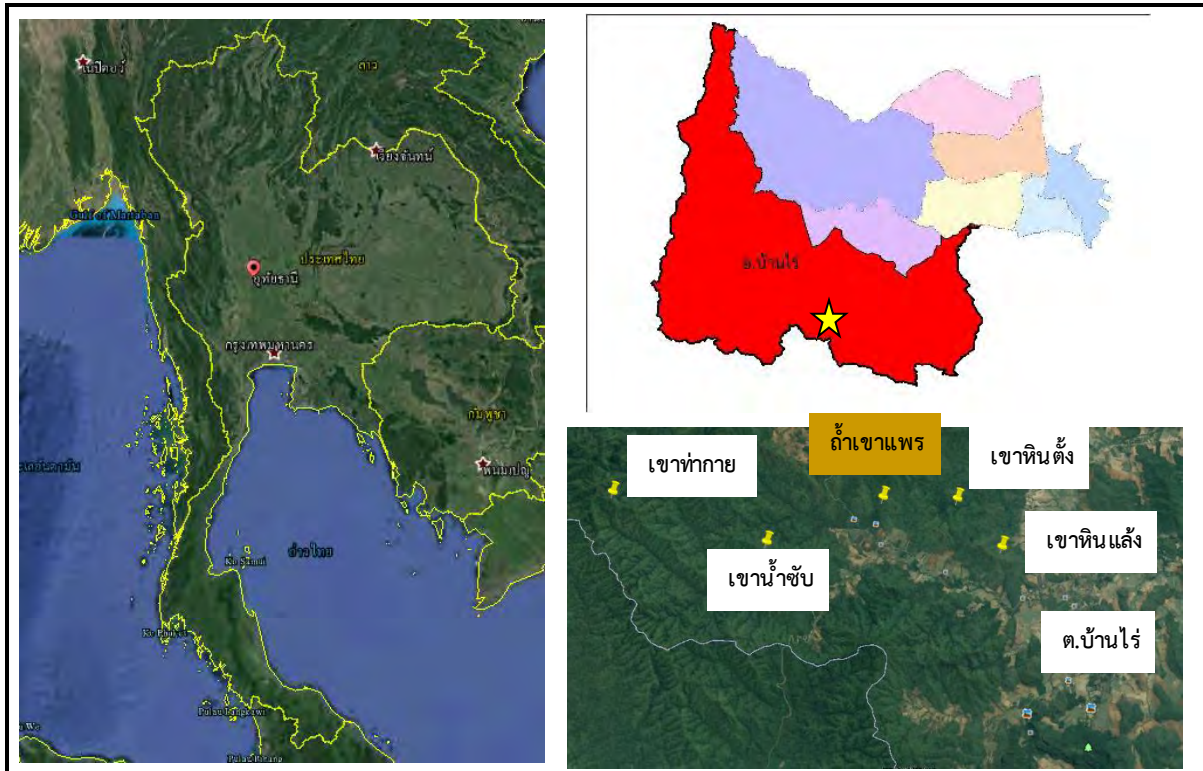
นั้นได้รับความนิยมในการศึกษาหินงอกในช่วง 5-10 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากมีการทำลายตัวอย่างน้อย วัตถุประสงค์ต่อเนื่อง และสามารถตรวจวัดธาตุที่มีปริมาณต่ำๆ ได้ (Low detection limit) จึงสามารถตรวจพบธาตุร่องรอยซึ่งมีปริมาณน้อยมาก ($< 1000\text{ppm}$) ที่มีในหินงอกได้เกือบทุกธาตุ (Fairchild & Treble., 2009)

การนำธาตุร่องรอยของหินงอกเพื่อมาใช้ศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีตนั้น ได้มีการศึกษากันในหลายพื้นที่ทั่วโลก ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Tremaine & Froelich (2010) ได้ทำการศึกษาธาตุร่องรอยของหินงอกภายในถ้ำ Hollow Ridge ที่รัฐฟลอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยนำสัดส่วนธาตุร่องรอยแมกนีเซียม (Mg) สตรอนเชียม (Sr) และโซเดียม (Na) เทียบกับแคลเซียม (Ca) โดยการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของธาตุร่องรอยสามารถใช้บ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในอดีตทางอ้อม นอกจากนี้ในแถบอเมริกาแล้ว ในแถบเอเชียก็มีนักวิชาการที่สนใจนำธาตุร่องรอยจากหินงอกมาศึกษา เช่น จากงานวิจัยของ Zhou et al (2011) ทำการศึกษาที่ถ้ำ Songjia ในบริเวณตอนกลางของประเทศจีน ได้ทำการศึกษาหาความเข้มข้นของธาตุร่องรอยแมงกานีส (Mn) และอาร์เซนิก (As) ในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก (Growth Layer) เพื่อใช้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่สัมพันธ์กับสภาพภูมิอากาศในอดีต เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เป็นต้น

พื้นที่ในประเทศไทยโดยเฉพาะทางฝั่งภาคตะวันตก และภาคใต้ สามารถพบถ้ำ หินงอก หินย้อยได้ทั่วไป โดยจากการสำรวจรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องเบื้องต้นพบว่ายังไม่มีการศึกษาธาตุร่องรอยของหินงอกในประเทศไทย ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้มีความสนใจการศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีตที่มีความซับซ้อน โดยศึกษาจากธาตุร่องรอยในหินงอกเป็นหลักฐานทางธรรมชาติที่สำคัญ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความเข้าใจในระบบถ้ำและเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีตของประเทศไทยต่อไป

1.2 พื้นที่ศึกษา (Study area)

ถ้ำเขาแพรเป็นถ้ำหินปูนบริเวณบ้านพุดอน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี เขต 47P พิกัด 0545152E 1667912N โดยถ้ำที่เลือกมาเป็นพื้นที่ศึกษาในโครงการนี้ได้ข้อมูลเบื้องต้นจากการสำรวจของนายกำปนาท จันทร์คำ และคณะในปี 2558 และ 2559 ซึ่งได้มีการสำรวจถ้ำและลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของหินงอก เช่น สี รูปร่าง พบว่าตัวอย่างหินงอกที่อยู่ภายในบริเวณถ้ำเขาแพรนั้น น่าจะมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีต



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ถ้ำเขาแพร บริเวณบ้านพุบอน อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี (จาก Google earth)

1.3 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (General setting of study area)

1.3.1 ภูมิประเทศ (Topography)

เขาหินปูนในบริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี เป็นเขาสูงสลับซับซ้อนกระจายอยู่ทั่วไปบริเวณรอบพื้นที่ศึกษา เช่น เขาหินตั้งและเขาหินแล้งทางทิศตะวันออก เขาน้ำซับและเขาท่ากายทางทิศตะวันตก เป็นต้น โดยแสดงลักษณะภูมิประเทศแบบคาสต์ (Karst topography) ชัดเจน

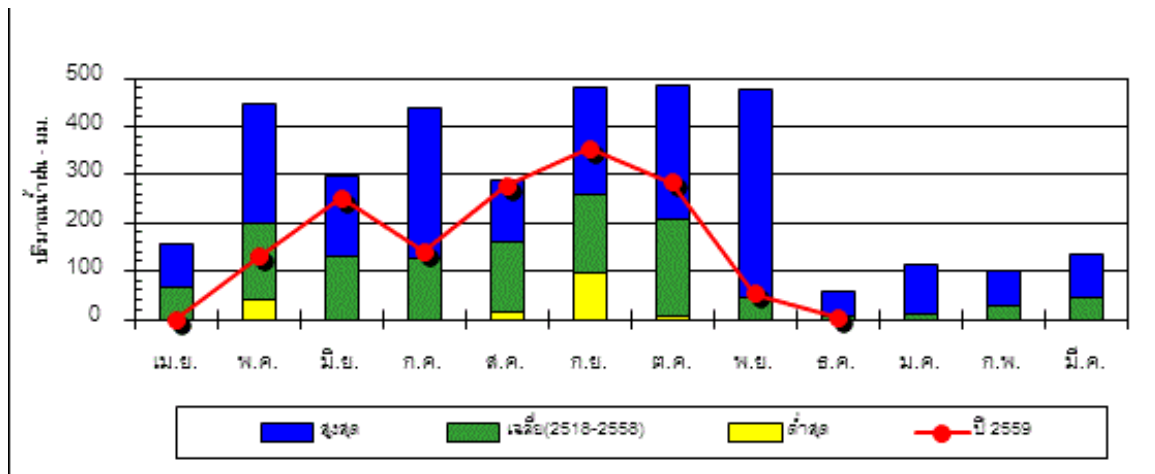


รูปที่ 1.2 ภูมิประเทศบริเวณจุดศึกษา (จาก Google earth วันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2560)

13.2 ภูมิอากาศ (Climate)

ลักษณะภูมิอากาศโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู โดยมีฤดูร้อนตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม เป็นช่วงว่างของฤดูมรสุม ฤดูฝนจะเริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม ซึ่งได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดจากมหาสมุทรอินเดีย เป็นลมร้อนและชื้นจึงทำให้มีฝนตกชุกทั่วไป และฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ซึ่งได้รับอิทธิพลมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดผ่านทำให้เกิดความแห้งแล้ง โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปี 26-28 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณน้ำฝนในจังหวัดอุทัยธานีอยู่ในเกณฑ์น้อย ปริมาณฝนเฉลี่ยตลอดปี 1,100-1,200 มิลลิเมตร และมีวันฝนตกปีละ 105-110 วัน

ปริมาณน้ำฝนรายเดือน



รูปที่ 1.3 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนสูงสุด-ต่ำสุด, เฉลี่ย ตั้งแต่ปี 2518-2558 และปี 2559 ห้วยกระเสียว บ้านทับคล้อ อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี (<http://www.hydro-5.com>)

1.3.3 ทรัพยากรป่าไม้ (Forest)

ทรัพยากรป่าไม้ของจังหวัดอุทัยธานี ประกอบด้วยป่าชนิดต่างๆตามสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศ แบ่งได้ 5 ลักษณะ (<https://nikonprofessional.wikispaces.com> และ <http://www.seub.or.th>) ได้แก่

1. **ป่าดิบเขา** เป็นป่าที่อยู่ในระดับสูงประมาณ 1,200 เมตร จากระดับน้ำทะเลขึ้นไป พันธุ์ไม้ที่เด่นสำหรับป่าชนิดนี้ได้แก่ ไม้ก่อต่างๆ ผสมกับพวกพญาไม้มะหาดป้อมดง เมื่อย ทะโล้ ยางบง และพืชจำพวกเฟิร์นและมอส

2. **ป่าดิบชื้น** เป็นป่าที่ส่วนใหญ่ต้นไม้ไม่ผลัดใบ ดินร่วนค่อนข้างดี สูงจากระดับน้ำทะเลไม่เกิน 600 เมตร และพบเจอในบริเวณที่มีฝนตกค่อนข้างมาก พันธุ์ไม้เด่นส่วนใหญ่เป็นพวกยาง ได้แก่ ยางยูง ยางกราด ตะเคียนทอง สยาขาว พันธุ์ไม้อื่นได้แก่ สะตอ เงาะป่า กระท้อน เป็นต้น

3. **ป่าดิบแล้ง** เป็นป่าที่มีไม้ผลัดใบขึ้นมาสสมอยู่มาก ในฤดูแล้งปริมาณใบจะสูงกว่าป่าดิบชื้นมาก พันธุ์ไม้เด่น ได้แก่ มะค่าโมง ตะแบกใหญ่ สมพง ปออีแก้ง ไม้ชันรองได้แก่ พลองใบเล็ก พลองใบใหญ่ ค้างคาว เป็นต้น

4. **ป่าเต็งรัง** เป็นป่าผลัดใบในช่วงฤดูแล้ง พบได้ในพื้นที่ดินเก็บความชื้นได้น้อย ป่าชนิดนี้ปรากฏสลับกับป่าผสมผลัดใบ ขึ้นอยู่ในช่วงความสูงมากกว่า 100 เมตร ไปจนถึง 1,000 เมตรจากระดับน้ำทะเล สำหรับต้นไม้ในป่าชนิดนี้จะเล็กแคระ ชนิดที่พบ ได้แก่ พันธุ์ไม้อย่างชนิดผลัดใบ และพวกไม้พุ่ม เช่น เต็ง รัง พุดป่า ผักหวาน

5. **ป่าเบญจพรรณ** หรือป่าผสมผลัดใบ พบในพื้นที่ความสูงประมาณ 50-800 เมตร ต้นไม้เกือบทั้งหมดจะผลัดใบในฤดูแล้ง มีพืชตระกูลหญ้าอยู่หลายชนิด มีพันธุ์ไม้เด่นอยู่ 5 ชนิด ได้แก่ ไม้สัก มะค่า แดง ประดู่ และชิงชัน

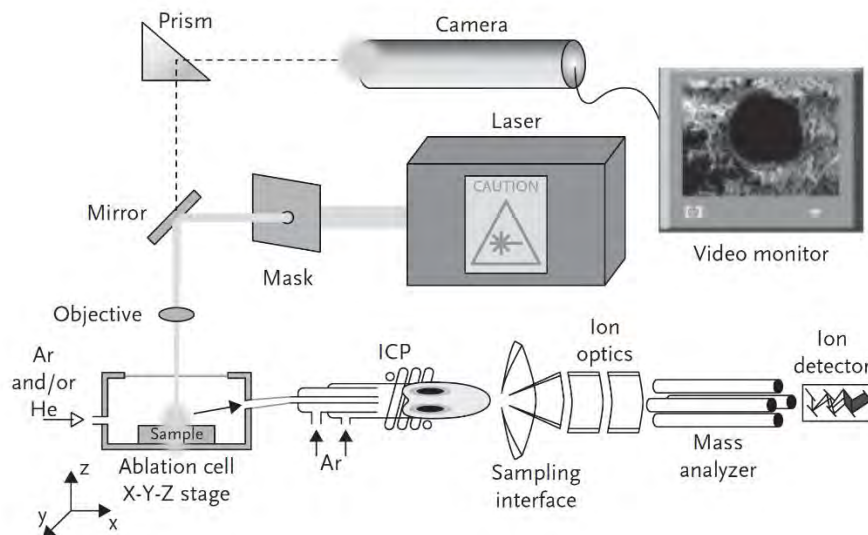
1.3.4 ธรณีวิทยาทั่วไป (General geology)

จากแผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดอุทัยธานี จากกรมทรัพยากรธรณี (2550; www.dmr.go.th) พบว่า บริเวณพื้นที่ศึกษา อยู่ในหน่วยหินปูนยุคออร์โดวิเซียน (O) หมวดหินปูนท่ามะนาว

หมวดหินปูนท่ามะนาว มีชั้นหินแบบฉบับพบมากบริเวณตอนเหนือของจังหวัดกาญจนบุรี พบชั้นหินนี้กระจายตัวทางทิศใต้และทิศตะวันตก ของจังหวัดอุทัยธานี บริเวณอำเภอบ้านไร่ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าห้วยขาแข้ง ระบายชั้นหินวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ลักษณะธรณีวิทยา ประกอบด้วยตอนล่างเป็นหินโคลนและหินปูนเนื้อดิน วางตัวต่อเนื่องอยู่บนหินควอร์ตไซต์ และหินควอตซ์ซีสต์ของหมวดหินควอร์ตไซต์เจ้าแณร จากนั้นค่อยๆ เปลี่ยนเป็นหินปูนชั้นหนาที่เป็นหน้าผา มีหินเชิร์ตก้อนกลมในชั้นหิน ถัดมาตอนบนเป็นหินปูนชั้นบางสีเทาที่มีการตกผลึกใหม่ บางส่วนมีการแปรสภาพเป็นหินอ่อน หินแคลก์ซิลิเกต มีหินทรายชั้นบางแทรกสลับแล้ว ค่อยๆ เปลี่ยนเป็นหินปูนชั้นหนา และพบหินควอร์ตไซต์ และหินฟิลไลต์แทรกสลับ ส่วนบนสุดของหมวดหิน ประกอบด้วยหินปูน สีเทาอ่อนถึงเทาเข้ม เป็นชั้นบางๆ วางตัวอย่างต่อเนื่องรองรับหินดินดานสีขาวย อายุไซลูเรียน - ดีโวเนียนจากหลักฐานซากดึกดำบรรพ์ที่ปรากฏหมวดหินปูนท่ามะนาวมีอายุตั้งแต่ยุคออร์โดวิเซียนตอนต้นถึงตอนปลาย (505-438 ล้านปี) ซากดึกดำบรรพ์ยุคออร์โดวิเซียนตอนต้นเป็นพวกซิสทอยด์และมักไม่มีซากโคโนดอนต์ซากดึกดำบรรพ์ที่บ่งถึงอายุ ออร์โดวิเซียนตอนกลางได้แก่ ซากดึกดำบรรพ์พวกนอทีลอยด์ชนิดอาร์มีโนเซอร์ัส

1.6.1.1 หลักการทำงาน

เครื่อง LA-ICP-MS จะทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยหลักการของอะตอมมิกสเปกโทรสโกปี (atomic spectroscopy) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการคายพลังงานของอะตอม (atomic emission) ซึ่งจะยิงเลเซอร์ไปที่ตัวอย่างเพื่อให้ธาตุแตกตัว โดยพลังงานที่เข้าไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากวงแหวนชั้นนอกของอะตอม ทำให้เกิดเป็นไอออนและถูกแยกด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 1.5 ผังการทำงานของเครื่อง LA-ICP-MS (<http://www.analchem.ugent.be>)

1.6.2 ธาตุร่องรอย (Trace elements)

คือ ธาตุที่ไม่จำเป็นต้องมีในส่วนประกอบของแร่หรือหินชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งอาจพบได้ในปริมาณที่น้อยมาก (น้อยกว่า 1,000 ppm) ซึ่งอาจมาจากลม น้ำฝน ชั้นของหินต้นกำเนิด ดิน พืชบนชั้นดิน หรือสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในดินได้

ในหินงอกสามารถพบธาตุร่องรอยได้มากมาย โดยที่ธาตุที่พบนั้นมีหลากหลาย เช่น Mg, Sr, แบเรียม (Ba), Na, อะลูมิเนียม (Al), ซิลิกอน (Si), ฟอสฟอรัส (P), Mn, เหล็ก (Fe), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn), Sr, ยูเรเนียม (U), ทอเรียม (Th) เป็นต้น ธาตุร่องรอยของหินงอกนั้นสามารถบ่งบอกได้ถึงสภาพภูมิอากาศในอดีตและการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับสารละลายคาร์บอเนตได้ (Borsato et al., 2007) ธาตุที่นิยมใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีตนั้นส่วนมากจะเน้นศึกษา Mg และ Sr เป็นหลัก โดยปกติแล้วจะทำควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร

1.6.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธาตุร่องรอย Mg สามารถนำมาใช้ในการบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝนทางอ้อมในบางพื้นที่ได้ (Tremaine & Froelich., 2013) เนื่องจาก Mg มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำฝน โดยต้นกำเนิดอาจมาจากการละลายของโดโลไมต์ (Dolomite) ในพื้นที่ (Treble et al., 2003) ซึ่ง Mg สามารถนำมาใช้ศึกษาควบคู่ไปกับไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) เพื่อให้การแปลผลสภาพแวดล้อม และสภาพภูมิอากาศแม่นยำยิ่งขึ้น (Fairchild & Treble., 2009) ในขณะที่ธาตุ Sr สามารถบ่งบอกช่วงเวลาที่มีความชุ่มชื้นได้ (Wassenburg et al., 2013) นอกจากนี้ ธาตุ Sr กับ Ba มีความสัมพันธ์กันโดยต้นกำเนิดอาจเกิดจากการละลายของหินปูน (Limestone) แล้วพัดพามาตกสะสมตัว (Treble et al., 2003)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง Treble et al (2003) ได้ทำการศึกษาธาตุร่องรอยของหินงอกที่ประเทศออสเตรเลีย โดยใช้ธาตุ Mg, P, U, Sr, Ba และ Na เพื่อใช้บ่งบอกสภาพภูมิอากาศในอดีต โดยกล่าวว่า Mg และ Sr นั้นถูกควบคุมโดยกระบวนการทางน้ำ ซึ่งอาจมาจากต้นกำเนิดที่แตกต่างกัน โดย Sr นั้นจะอ่อนไหวต่อการเจริญเติบโตที่รวดเร็วและอยู่ในช่วงเวลาที่น้ำใต้ดินมีอัตราการรับน้ำที่ต่ำ และธาตุ P นั้นมาจากการย่อยสลายของซากพืชซึ่งสามารถบอกถึงความชื้นและอุณหภูมิของดินได้

Wassenburg et al (2013) ได้ทำการศึกษาธาตุร่องรอยของหินงอก ได้แก่ ธาตุ Mg และ Sr ที่ประเทศโมร็อกโก (Morocco) โดยกล่าวว่า ธาตุ Mg และ Sr นั้นนิยมนำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมในอดีต โดยในงานวิจัยได้นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสภาพภูมิอากาศในอดีตในพื้นที่อื่นๆ เช่น ประเทศสกอตแลนด์ (Scotland), บริเวณเทือกเขาแอลป์ในแถบทวีปยุโรป และข้อมูลสภาพภูมิอากาศบริเวณทางตอนเหนือของมหาสมุทรแอตแลนติก (North Atlantic Oscillation; NAO) โดยผลที่ได้พบว่ามีความสัมพันธ์ไปในทางทิศทางเดียวกัน

นอกจากนี้ยังมีตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับธาตุร่องรอยของหินงอกเพื่อบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อม และสภาพภูมิอากาศในอดีตที่ศึกษาในบริเวณทวีปเอเชีย เช่น งานวิจัยของ Zhou et al (2011) ได้ทำการศึกษาที่ถ้ำซงเจีย (Songjia cave) ที่ประเทศจีน โดยได้นำธาตุ Mn และ As ใช้ในการบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมในอดีต เนื่องจาก ธาตุ Mn สามารถเคลื่อนย้ายไปกับน้ำซึม (Infiltrating water) ได้ โดยมาจากการละลายของหินเจ้าคาร์บอเนต (Carbonate host rock) และชั้นที่มีดินเป็นองค์ประกอบ และ As อาจมาจากน้ำใต้ดินที่มี As ปนเปื้อนอยู่มาก ทำให้ช่วงที่มีความเข้มข้นของ Mn และ As อยู่มากนั้นเป็นช่วงที่มีสภาพแวดล้อมแบบอบอุ่นและชื้น ส่วนช่วงที่มีความเข้มข้นของ Mn และ As อยู่ต่ำนั้นจะเป็นช่วงที่มีสภาพแวดล้อมแบบหนาวเย็นและแห้งแล้ง

แร่ที่มี Pb และ Zn สามารถปะปนอยู่ในชั้นหินปูนซึ่งเป็นหินฐาน (Bedrock) ได้ โดยสามารถถูกพัดพา มาด้วยน้ำที่ซึมผ่านชั้นหินฐาน ซึ่งปริมาณ Pb และ Zn ที่สูงนั้น จะสัมพันธ์กับฤดูใบไม้ร่วง (Fairchild et al., 2010)

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected output)

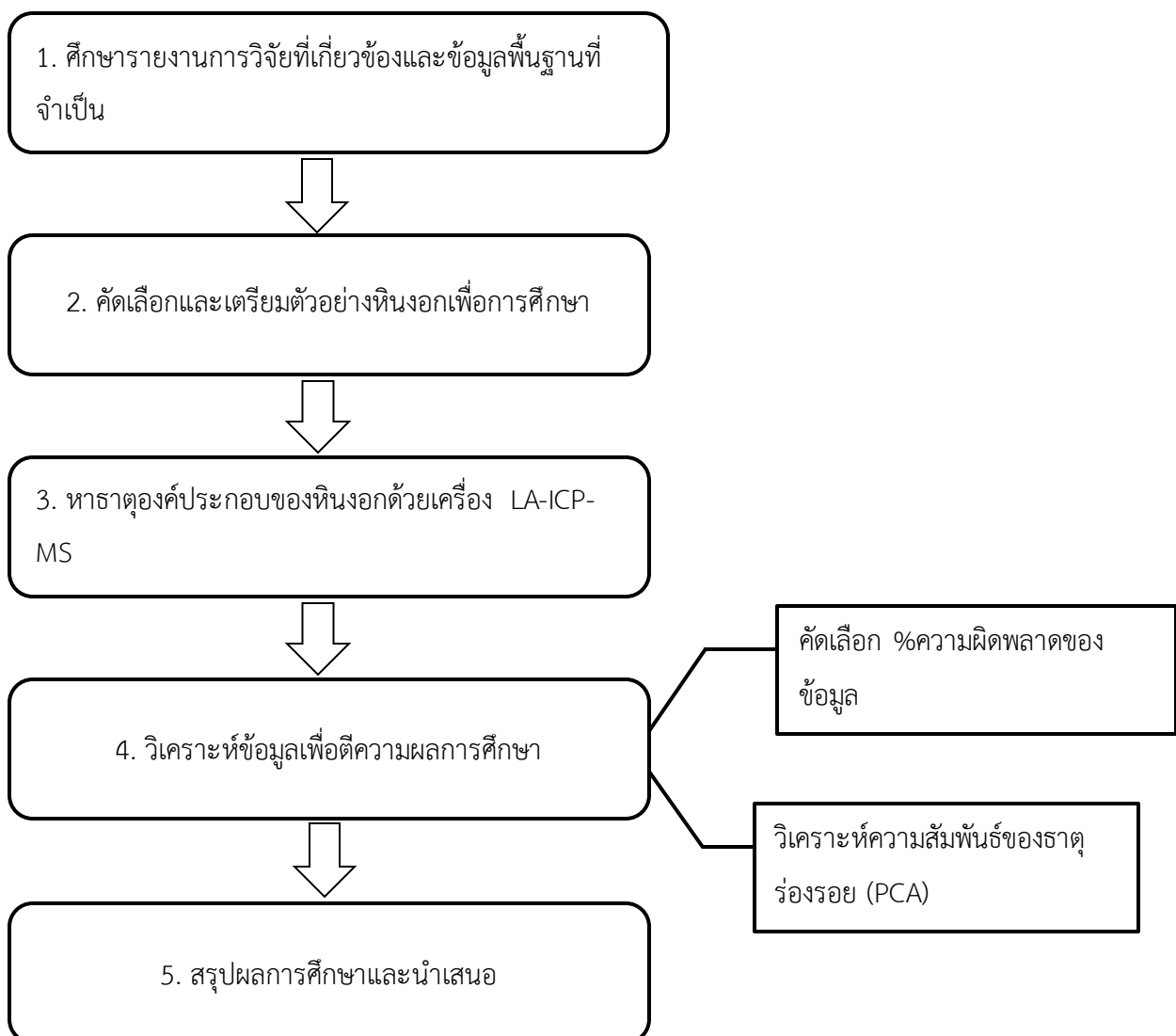
บ่งบอกความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของธาตุร่องรอยบางธาตุ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการ เปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีตในช่วงเวลาของการสะสมตัวของหินงอก

บทที่ 2

ระเบียบวิธีการดำเนินงาน (Methodology)

2.1 แผนการศึกษา

วิธีการดำเนินงานสามารถแบ่งได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 2.1 แผนผังการดำเนินงาน

2.1.1 การศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็น

ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับถ้ำและการเกิดตะกอนถ้ำ (Speleothem) (Fairchild et al., 2006) หลักการงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เครื่อง LA-ICP-MS ในการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยของหินงอก (Fairchild & Treble., 2009; Jochum et al., 2012) และตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำธาตุร่องรอยของหินงอกมาประยุกต์ใช้กับการหาสภาพแวดล้อมในอดีต เช่น (Huang et al., 2001; Borsato et al., 2007; Fairchild & Treble., 2009; Tremaine & Froelich., 2010; Zhou et al., 2011; Treble et al., 2013; Wassenburg et al., 2013; Tremaine & Froelich., 2013) เป็นต้น

2.1.2 การคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างหินงอกเพื่อการศึกษา

การเตรียมตัวอย่างหินงอก นำตัวอย่างไปทำความสะอาดด้วยการล้างน้ำ จากนั้นนำไปตัดให้ขนานตามแนวแกนการเจริญเติบโตของหินงอกเพื่อแบ่งครึ่งเป็น 2 ชิ้น หนาเท่าๆกัน (รูปที่ 2.1) จากนั้น ตัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ตามแนวขวางเท่าๆกัน ยาวประมาณ 7 cm (รูปที่ 2.2) เพื่อให้สามารถนำไปเข้าเครื่อง LA-ICP-MS เพื่อหาธาตุองค์ประกอบต่อได้ โดยล้างหินงอกด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath cleanser) อีกครั้ง ก่อนทำการทดลอง เพื่อลดการปนเปื้อนของหินจากฝุ่น และเครื่องตัดหิน

2.1.3 การหาธาตุองค์ประกอบของหินงอกด้วยเครื่อง LA-ICP-MS

นำตัวอย่างที่ตัดออกเป็น 3 ส่วนเท่าๆกันไปเข้าเครื่อง LA-ICP-MS (รูป 2.3) เพื่อหาธาตุองค์ประกอบของหินงอก

2.1.3.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา

- นำข้อมูลที่ได้จากเครื่อง LA-ICP-MS (ตาราง 2.2) มาวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาด (Error) จากการทดลอง โดยนำค่าเฉลี่ยของธาตุที่วัดได้จากเครื่อง LA-ICP-MS มาเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน (Standard Sample) จากเว็บไซต์ http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp เพื่อตรวจสอบธาตุองค์ประกอบ โดยธาตุที่มีค่าความผิดพลาดมากกว่า 25% จะไม่นำมาศึกษา

- นำธาตุร่องรอยที่วิเคราะห์ได้มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุ โดยใช้การวิเคราะห์โดย PCA (Principle component analysis)

2.1.4 การสรุปผลการศึกษาและนำเสนอ

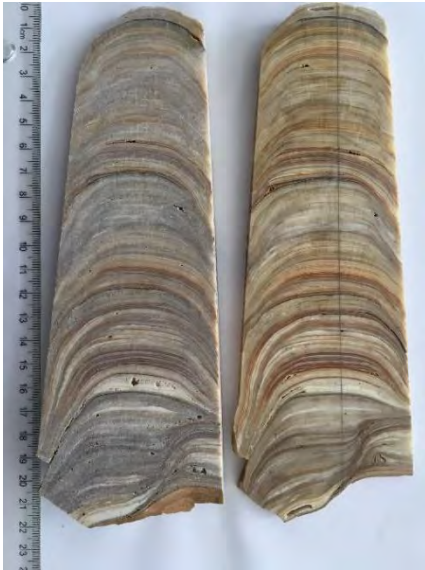
- นำปริมาณและชนิดของธาตุร่องรอยที่ได้มาจัดกลุ่มหาความสัมพันธ์
- บ่งบอกความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของธาตุร่องรอยบางธาตุ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีตในช่วงเวลาของการสะสมตัวของหินอก
- จัดทำรายงานรูปเล่ม และนำเสนอการศึกษาให้แก่คณาจารย์ภายในภาควิชา

2.2 ระยะเวลาศึกษา

เริ่มต้นโครงการวันที่วันที่ 1 เดือนกันยายน พ.ศ. 2559 เสร็จสิ้นโครงการ วันที่ 15 เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 โดยมีแผนการศึกษาและระยะเวลาดำเนินงานตาม ตารางที่ 2.1

แผนการศึกษา	ปี 2559				ปี 2560				
	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
ศึกษารายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องและข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็น									
คัดเลือกและเตรียมตัวอย่างหินอกเพื่อการศึกษา									
หาธาตุองค์ ประกอบของหินอกด้วยเครื่อง LA-ICP-MS									
วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อตีความผลการศึกษา -คัดเลือก %ความผิดพลาดของข้อมูล -วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย(PCA)									
สรุปผลและทำรายงาน									
นำเสนอโครงการ									

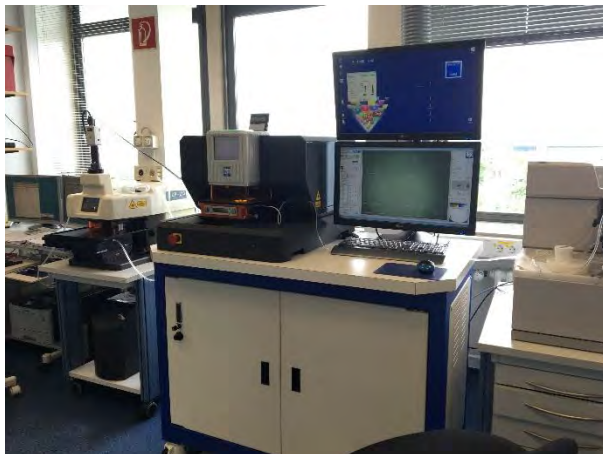
ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาดำเนินงาน



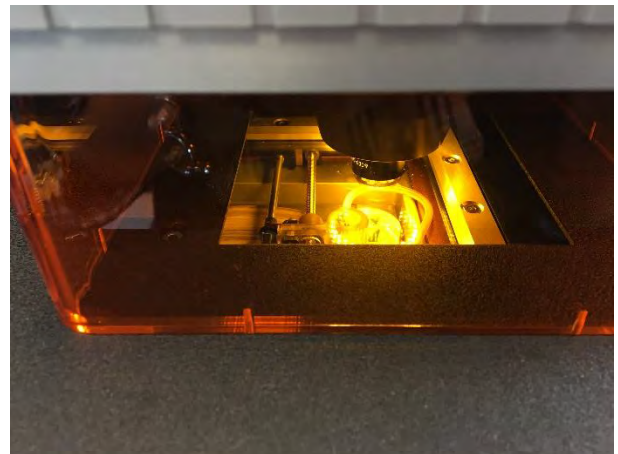
รูปที่ 2.2 หินงอกตัดขนานตามแนวแกนยาว 2 ส่วน



รูปที่ 2.3 ตัดหินงอกออกเป็น 3 ส่วน ตามแนวขวาง



รูปที่ 2.4 เครื่อง LA-ICP-MS



บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล (Results)

3.1 การคัดเลือกธาตุร่องรอยของหินงอก

จากการวัดปริมาณของธาตุร่องรอยของตัวอย่างมาตรฐานด้วยเครื่อง LA-ICP-MS พบว่ามีธาตุที่พบทั้งหมด 36 ธาตุ ได้แก่ Na, Mg, Al, Si, P, Ca, ไทเทเนียม (Ti), Mn, ^{56}Fe , ^{57}Fe , Cu, ^{66}Zn , ^{67}Zn , รูบิเดียม Rb, ^{86}Sr , ^{88}Sr , อิตเทรียม (Y), แคดเมียม (Cd), Ba, แลนทานัม (La), ซีเรียม (Ce), เพอร์ซีโอดีเมียม (Pr), นีโอดีเมียมNd, ซาแมเรียม (Sm), ยูโรเพียม (Eu), แกโดลิเนียม (Gd), เทอร์เบียม (Tb), ดิสโพรเซียม (Dy), โฮลเมียม (Ho), เออร์เบียม (Er), ทูเลียม (Tm) , อิตเทอร์เบียม (Yb), ลูทีเซียม (Lu), ตะกั่ว (Pb), Th และ U โดยปริมาณของธาตุร่องรอยมีหน่วย ($\mu\text{g/g}$) หรือ ppm แสดงดัง ตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุ ($\mu\text{g/g}$) ที่หาจากเครื่อง LA-ICP-MS ของตัวอย่างมาตรฐาน BCR-2G

BCR-2G	Na23	Mg25	Al27	Si29	P31	Ca43	Ti47	Mn55	Fe56
Median	21791	22019	75185	242233	1566	50458	13403	1461	92474
Mean	21814	21976	75008	240019	1571	50458	13133	1453	91747
BCR-2G	Fe57	Cu63	Zn66	Zn67	Rb85	Sr86	Sr88	Y89	Cd111
Median	20063	17	158	172	45	333	335	33	-
Mean	18760	17	158	170	45	333	334	33	-
BCR-2G	Ba138	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu151	Gd157	Tb159
Median	614	24	51	6	28	7	2	6	1
Mean	615	24	51	6	28	6	2	6	1
BCR-2G	Dy163	Ho165	Er167	Tm169	Yb173	Lu175	Pb208	Th232	U238
Median	6	1	4	0	3	0	10	6	2
Mean	6	1	4	0	3	0	10	6	2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงชนิดและปริมาณของธาตุ ($\mu\text{g/g}$) ที่หาจากเครื่อง LA-ICP-MS ของตัวอย่างมาตรฐาน MACS-3

MACS-3	Na23	Mg25	Al27	Si29	P31	Ca43	Ti47	Mn55	Fe56
Median	5798	1908	411	549	151	376900	51	519	12209
Mean	5813	1906	424	568	159	376900	54	522	12869

MACS-3	Fe57	Cu63	Zn66	Zn67	Rb85	Sr86	Sr88	Y89	Cd111
Median	2698	122	118	116	0	6562	6672	21	55
Mean	2702	122	119	118	0	6633	6661	21	56

MACS-3	Ba138	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147	Eu151	Gd157	Tb159
Median	62	11	11	12	11	10	11	10	10
Mean	63	11	12	12	11	11	11	10	10

MACS-3	Dy163	Ho165	Er167	Tm169	Yb173	Lu175	Pb208	Th232	U238
Median	10	11	10	11	11	10	70	54	2
Mean	10	11	11	11	11	10	72	53	2

จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาหาค่า %ความผิดพลาดของการวัดของเครื่องมือ โดยเทียบข้อมูลที่วัดตัวอย่างมาตรฐานที่ได้จากเครื่อง LA-ICP-MS โดยนำค่าเฉลี่ยของธาตุแต่ละตัวที่ได้ไปเทียบกับค่าเฉลี่ยตัวอย่างมาตรฐาน 2 ตัว ได้แก่ BCR-2G และMACS-3 จากเว็บไซต์ผู้ผลิตตัวอย่างมาตรฐาน http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/sample_query.asp ทั้งนี้เพื่อคัดเลือกธาตุร่องรอยที่จะนำไปศึกษา โดยธาตุที่จะใช้ในการศึกษาต้องมี ค่า %ความผิดพลาดน้อยกว่า 25%

จากการเปรียบเทียบข้อมูลพบว่าธาตุที่มีค่า %ความผิดพลาดของข้อมูล <25% มีจำนวน 28 ตัว ได้แก่ Na, Mg, Al, Si, Ti, Mn, ^{56}Fe , Cu, ^{66}Zn , Rb, ^{88}Sr , Y, Cd, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb, Lu และTh แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางเปรียบเทียบค่า %ความผิดพลาดของทั้ง 2 ตัวอย่างมาตรฐาน

		Na23	Mg25	Al27	Si29
จาก LA-ICP-MS ($\mu\text{g/g}$) BCR-2G	Mean	21814	21976	75008	240019
จาก GeoRem BCR-2G ($\mu\text{g/g}$)	Mean	21317	20393	71900	257285
% Error (BCR-2G)		$\frac{ 28114-21317 }{21814} \times 100$	$\frac{ 21976-20393 }{21976} \times 100$	$\frac{ 75008-71900 }{75008} \times 100$	$\frac{ 240019-257285 }{240019} \times 100$
		2.28	7.2	4.14	7.19
Data from LA- ICP-MS ($\mu\text{g/g}$) MACS-3	Mean	5813	1906	424	568
From GeoRem MACS-3 ($\mu\text{g/g}$)	Mean	5900	1756	497	543
% Error (MACS-3)		$\frac{ 5813-5900 }{5813} \times 100$	$\frac{ 1906-1759 }{1906} \times 100$	$\frac{ 424-497 }{424} \times 100$	$\frac{ 568-543 }{568} \times 100$
		5	7.87	17.22	4.4
		✓	✓	✓	✓

P31	Ca43	Ti47	Mn55	Fe56	Fe57
1571	50458	13133	1453	91747	18760
1481	-	12785	1550	96133	-
$\frac{ 1571-1481 }{1571} \times 100$		$\frac{ 13133-12785 }{13133} \times 100$	$\frac{ 1453-1550 }{1453} \times 100$	$\frac{ 91747-96133 }{91747} \times 100$	
5.79	-	2.65	6.68	4.78	-
159	376900	54	522	12869	2702
98	-	52.3	587.65	11200	-
$\frac{ 159-98 }{159} \times 100$		$\frac{ 54-52.3 }{54} \times 100$	$\frac{ 522-587.65 }{522} \times 100$	$\frac{ 12869-11200 }{12869} \times 100$	
38.36	-	3.17	12.58	12.97	-
x	x	✓	✓	✓	x

Cu63	Zn66	Zn67	Rb85	Sr86	Sr88	Y89
17	158	170	45	333	334	33
21	125	-	48	-	331	32.83
$\frac{ 17-21 }{17} \times 100$	$\frac{ 158-125 }{158} \times 100$		$\frac{ 45-48 }{45} \times 100$		$\frac{ 334-331 }{333} \times 100$	$\frac{ 33-32.83 }{33} \times 100$
23.52	20.89	-	6.67	-	0.9	0.52
122	119	118	0	6633	6661	21
120	111	-	-	-	6760	21.5
$\frac{ 122-120 }{122} \times 100$	$\frac{ 119-111 }{119} \times 100$				$\frac{ 6661-6760 }{6633} \times 100$	$\frac{ 21-21.5 }{21} \times 100$
1.64	6.72	-	-	-	1.49	2.38
✓	✓	x	✓	x	✓	✓

Cd111	Ba138	La139	Ce140	Pr141	Nd146	Sm147
-	615	24	51	6	28	6
-	683	24.54	53	6.7	28.9	6.6
	$\frac{ 615-683 }{615} \times 100$	$\frac{ 24-24.54 }{24} \times 100$	$\frac{ 51-53 }{51} \times 100$	$\frac{ 6-6.7 }{6} \times 100$	$\frac{ 28-28.9 }{28} \times 100$	$\frac{ 6-6.6 }{6} \times 100$
-	11.06	2.25	3.92	11.67	3.21	10
56	63	11	12	12	11	11
53	58.7	10.4	10.8	12.1	10.8	10.9
$\frac{ 56-53 }{56} \times 100$	$\frac{ 63-58.7 }{63} \times 100$	$\frac{ 11-10.4 }{11} \times 100$	$\frac{ 12-10.8 }{12} \times 100$	$\frac{ 12-12.1 }{12} \times 100$	$\frac{ 11-10.8 }{11} \times 100$	$\frac{ 11-10.9 }{11} \times 100$
5.36	6.82	5.45	10	0.83	1.81	0.91
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

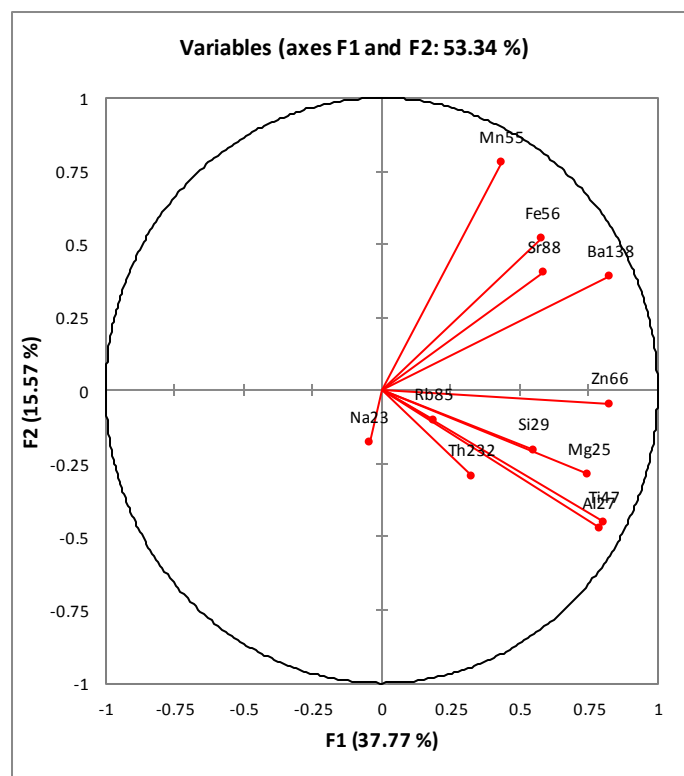
Eu151	Gd157	Tb159	Dy163	Ho165	Er167
2	6	1	6	1	4
1.97	6.7	1.02	6.44	1.27	3.48
$\frac{ 2-1.97 }{2} \times 100$	$\frac{ 6-6.67 }{6} \times 100$	$\frac{ 1-1.02 }{1} \times 100$	$\frac{ 6-6.44 }{6} \times 100$	$\frac{ 1-1.27 }{1} \times 100$	$\frac{ 4-3.48 }{4} \times 100$
1.5	11.67	2	7.33	27	13
11	10	10	10	11	11
11.8	10.8	9.8	10.7	11.3	11.2
$\frac{ 11-11.8 }{11} \times 100$	$\frac{ 10-10.8 }{11} \times 100$	$\frac{ 10-9.8 }{10} \times 100$	$\frac{ 10-10.7 }{10} \times 100$	$\frac{ 11-11.3 }{11} \times 100$	$\frac{ 11-11.2 }{11} \times 100$
7.27	8	2	3	2.72	1.81
✓	✓	✓	✓	x	✓

Tm169	Yb173	Lu175	Pb208	Th232	U238
0	3	0	10	6	2
-	3.39	-	11	5.9	1.69
	$\frac{ 3-3.39 }{3} \times 100$		$\frac{ 10-11 }{10} \times 100$	$\frac{ 6-5.9 }{6} \times 100$	$\frac{ 2-1.69 }{2} \times 100$
-	13	-	10	1.67	15.5
11	11	10	72	53	2
10.7	10.8	10.8	56.5	55.4	1.49
$\frac{ 11-10.7 }{11} \times 100$	$\frac{ 11-10.8 }{11} \times 100$	$\frac{ 10-10.8 }{10} \times 100$	$\frac{ 72-56.5 }{72} \times 100$	$\frac{ 53-55.4 }{53} \times 100$	$\frac{ 2-1.49 }{2} \times 100$
2.72	1.81	8	21.53	4.53	25.5
✓	✓	✓	x	✓	x

เมื่อทำการคัดเลือกธาตุร่องรอยของหินงอกจากการหาค่า %ความผิดพลาด ควบคู่กับการศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำธาตุร่องรอยของหินงอกมาศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีต ทำให้ในโครงการนี้ผู้วิจัย เลือกธาตุร่องรอยที่จะนำไปศึกษาทั้งหมด 12 ตัว ได้แก่ Na, Mg, Al, Si, Ti, Mn, ^{56}Fe , Zn, Rb, ^{88}Sr , Ba, และ Th โดยธาตุบางธาตุ (Cu, Y, Cd, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Tm, Yb และ Lu) เนื่องจากธาตุ เหล่านี้ไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้เพื่อศึกษาสภาพแวดล้อมในอดีต จึงไม่มีข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น ที่ใช้ศึกษา เปรียบเทียบได้

3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอกในเชิงสถิติด้วยวิธี Principal component analysis (PCA)

เมื่อทำการคัดเลือกธาตุร่องรอยของหินงอกที่จะนำมาใช้ศึกษาแล้ว จึงนำข้อมูลปริมาณของธาตุ ร่องรอยทั้ง 12 ตัวข้างต้น ที่วัดได้จากหินงอก โดยใช้เครื่อง LA-ICP-MS (ข้อมูลความละเอียดทุกๆ 0.0043 มิลลิเมตร รวมทั้งสิ้น 46538 ข้อมูล) มาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยแต่ละตัว โดยใช้ค่าเฉลี่ยทุกๆ 1 มิลลิเมตร รวมทั้งสิ้น 199 มิลลิเมตร (ข้อมูลตั้งแต่ 0.5 จนถึง 198.5) และนำข้อมูลที่ ได้มาวิเคราะห์โดยวิธีเชิงสถิติด้วย PCA จากโปรแกรม XLSTAT



รูปที่ 3.1 กราฟ PCA แสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย 12 ตัว ในแกนที่ 1 และ 2

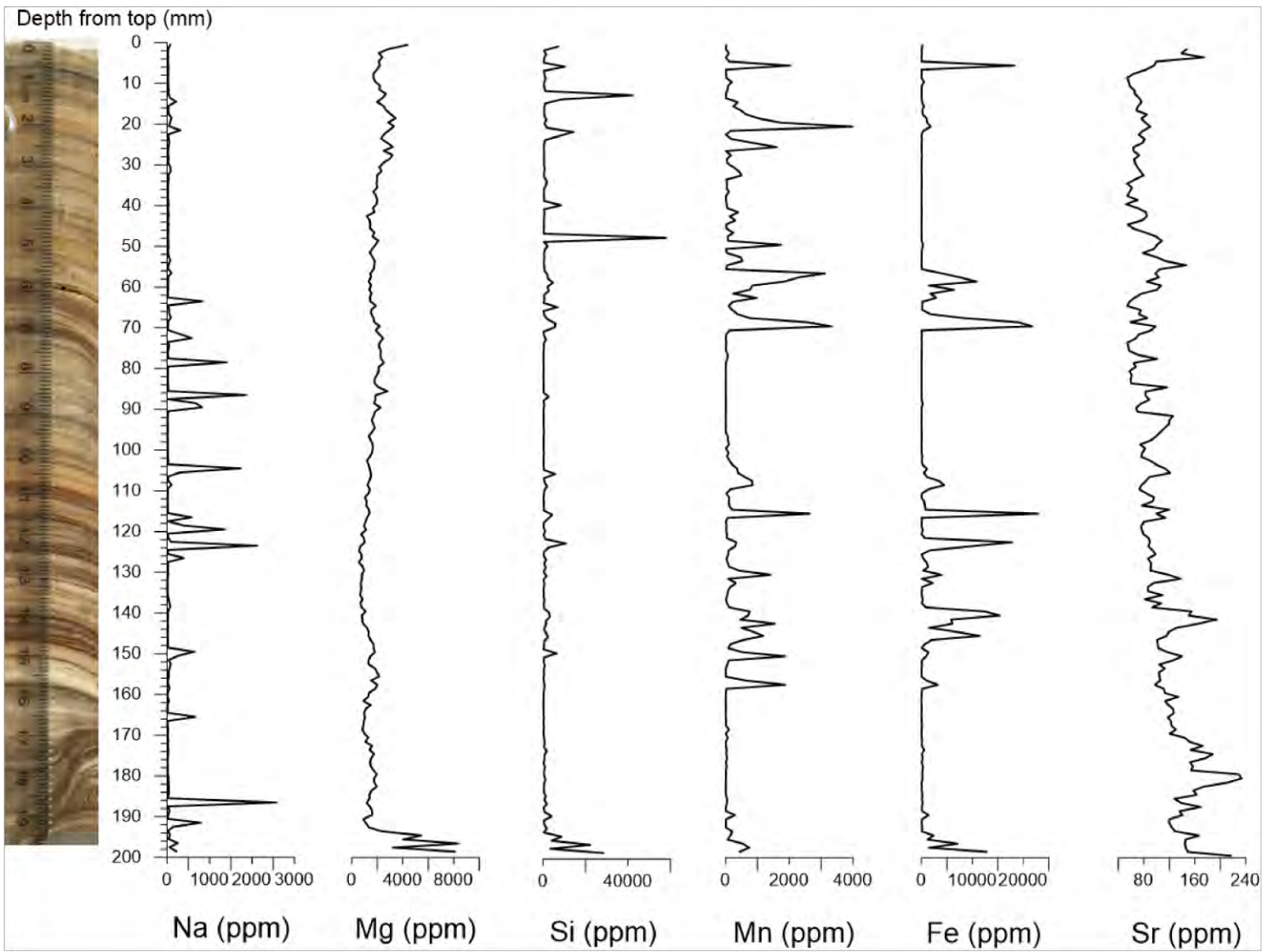
Variables	Na23	Mg25	Si29	Mn55	Fe56	Sr88	Al27	Ti47	Zn66	Rb85	Ba138	Th232
Na23	1	-0.027	0.014	-0.063	0.010	-0.140	0.023	0.016	0.012	0.007	-0.103	-0.007
Mg25	-0.027	1	0.379	0.095	0.076	0.555	0.659	0.709	0.465	0.120	0.550	0.228
Si29	0.014	0.379	1	0.072	0.230	0.241	0.421	0.408	0.374	0.061	0.354	0.239
Mn55	-0.063	0.095	0.072	1	0.627	0.469	0.018	0.030	0.339	0.002	0.572	-0.018
Fe56	0.010	0.076	0.230	0.627	1	0.217	0.283	0.226	0.677	0.031	0.583	0.044
Sr86	-0.140	0.555	0.241	0.469	0.217	1	0.126	0.265	0.221	0.107	0.770	0.153
Al27	0.023	0.659	0.421	0.018	0.283	0.126	1	0.871	0.772	0.127	0.440	0.266
Ti47	0.016	0.709	0.408	0.030	0.226	0.265	0.871	1	0.694	0.152	0.484	0.289
Zn66	0.012	0.465	0.374	0.339	0.677	0.221	0.772	0.694	1	0.111	0.545	0.184
Rb85	0.007	0.120	0.061	0.002	0.031	0.107	0.127	0.152	0.111	1	0.147	0.075
Ba138	-0.103	0.550	0.354	0.572	0.583	0.770	0.440	0.484	0.545	0.147	1	0.158
Th232	-0.007	0.228	0.239	-0.018	0.044	0.153	0.266	0.289	0.184	0.075	0.158	1

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย (Pearson's correlation)

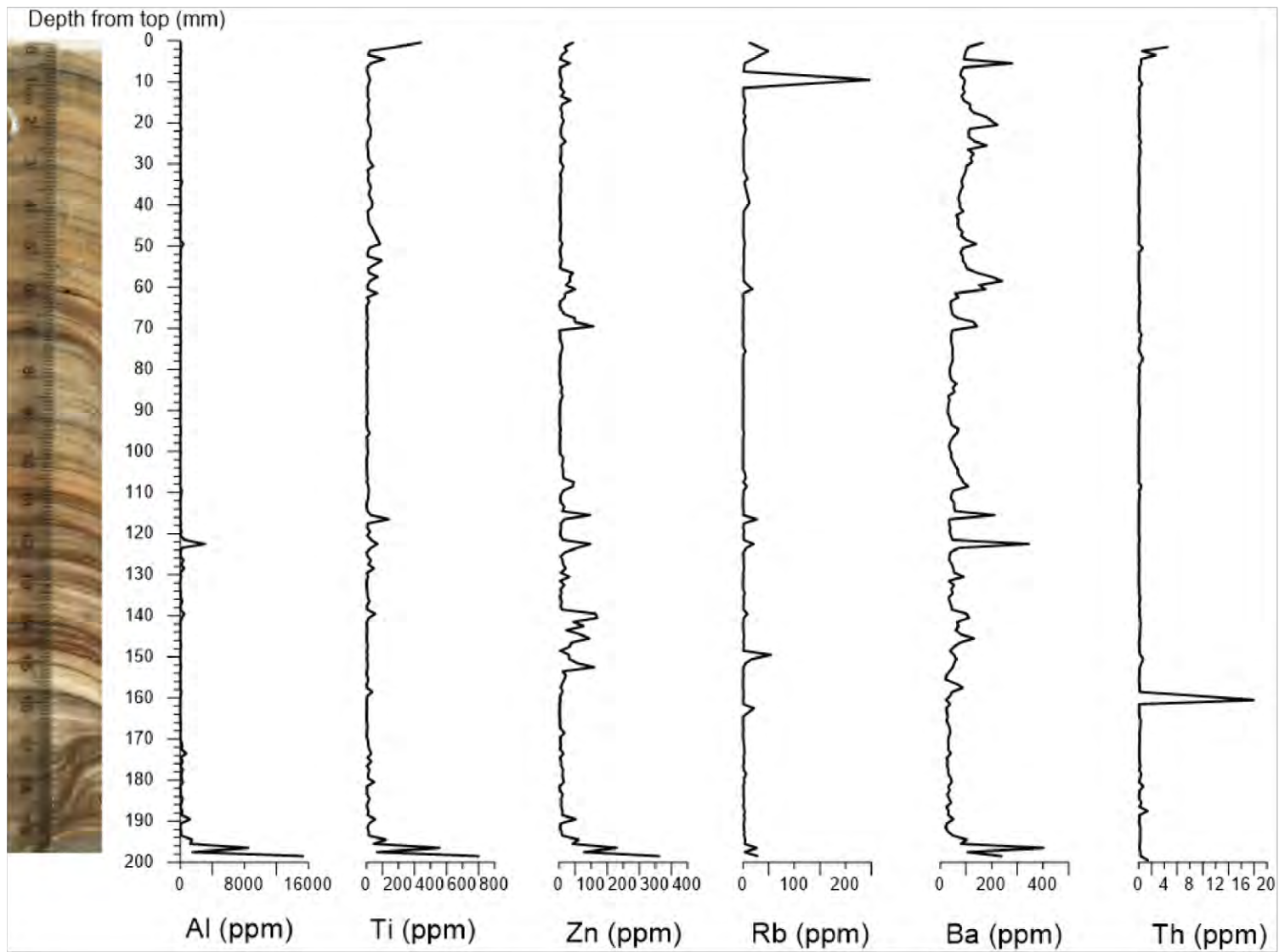
3.3 ธาตุร่องรอยเชิงปริมาณ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณธาตุร่องรอยของหินอกทั้ง 12 ธาตุที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยทั้ง 199 มิลลิเมตร พบว่า ธาตุ Na มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 187 มิลลิเมตร เท่ากับ 2570.07 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 165 มิลลิเมตร เท่ากับ 5.37902 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Mg มีค่าสูงสุดตำแหน่ง 196 มิลลิเมตร เท่ากับ 8345.54 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 128 มิลลิเมตร เท่ากับ 551.386 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Si มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 48 มิลลิเมตร เท่ากับ 57782.3 $\mu\text{g/g}$ และค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 71 มิลลิเมตร เท่ากับ 214.5523 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Mn มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 21 มิลลิเมตร เท่ากับ 3993.655 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 93 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.9753 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Fe มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 116 มิลลิเมตร เท่ากับ 22835 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 162 มิลลิเมตร เท่ากับ 8.692 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Sr มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร เท่ากับ 233.56 $\mu\text{g/g}$ และมี

ค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 161 มิลลิเมตร เท่ากับ 52.395 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Al มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 199 มิลลิเมตร เท่ากับ 15288 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 94 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.0063 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Ti มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 199 มิลลิเมตร เท่ากับ 699.01 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 161 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.4175 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Zn มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 199 มิลลิเมตร เท่ากับ 310.84 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 164 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.4161 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Rb มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 10 มิลลิเมตร เท่ากับ 246.84 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 186 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.1424 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Ba มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 197 มิลลิเมตร เท่ากับ 400.79 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 156 มิลลิเมตร เท่ากับ 21.133 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Th มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 40 มิลลิเมตร เท่ากับ 17.91 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 102 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.0258 $\mu\text{g/g}$



(a)



(b)

รูปที่ 3.2 กราฟแสดงปริมาณของธาตุร่องรอย (ppm) ในแต่ละช่วงความลึกจากส่วนบนสุดของหินงอก

(a) กราฟแสดงปริมาณของธาตุ Na, Mg, Si, Mn, Fe และ Sr (ppm)

(b) กราฟแสดงปริมาณของธาตุ Al, Ti, Zn, Rb, Ba และ Th (ppm)

บทที่ 4

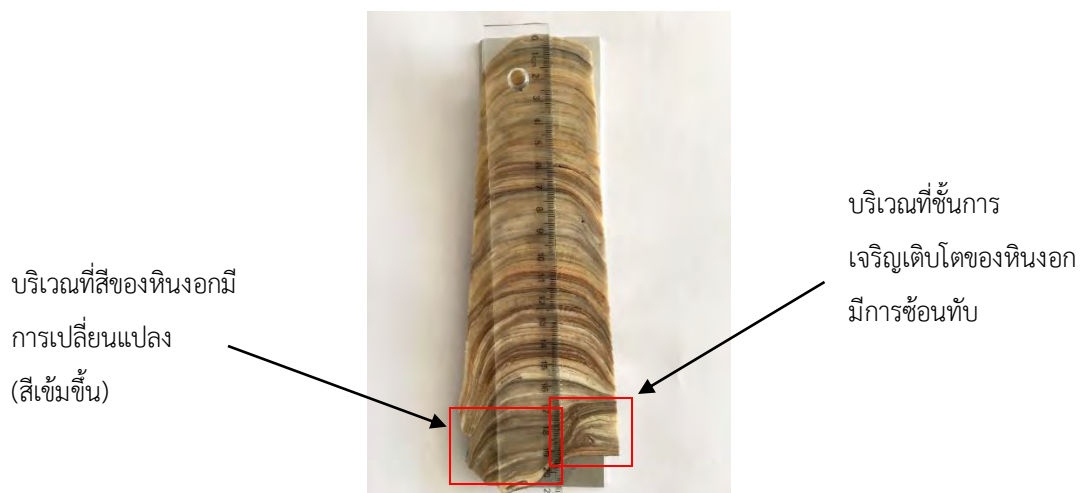
อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)

4.1 การคัดเลือกช่วงข้อมูลและการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอก

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ตำแหน่ง และปริมาณที่พบธาตุร่องรอยสูงสุด ต่ำสุด พบว่าข้อมูลธาตุร่องรอยในช่วงฐานของหินงอกนั้นมีค่าสูงผิดปกติ จึงทำการเทียบข้อมูลธาตุร่องรอยกับลักษณะทางกายภาพของหินงอก เพื่อพิจารณาคัดเลือกข้อมูลที่จะใช้ในการศึกษา

4.1.1 การคัดเลือกช่วงข้อมูลของธาตุร่องรอย

จากการวิเคราะห์ธาตุร่องรอย พบว่าปริมาณสูงสุดของธาตุร่องรอยที่พบอยู่ในตำแหน่งตั้งแต่ 170 มิลลิเมตร ถึง 199 มิลลิเมตร จากส่วนบนสุดของหินงอก มีธาตุจำนวน 6 ธาตุ จาก 12 ธาตุ ได้แก่ Na, Mg, Al, Ti, Zn และ Ba ซึ่งมีปริมาณสูงผิดปกติ จึงทำการเปรียบเทียบผลข้อมูลปริมาณธาตุร่องรอยที่ได้จากเครื่อง LA-ICP-MS กับ ตัวอย่างหินงอกที่ศึกษา พบว่าในบริเวณฐานของตัวอย่างหินงอก (ตำแหน่งที่ 170 มิลลิเมตร – 199 มิลลิเมตร) ดังแสดงใน รูปที่ 4.1 มีการเปลี่ยนแปลงสีของหินงอกที่เข้มขึ้น มีสีคล้ายสีของดิน ซึ่งเป็นฐานของการก่อตัวหินงอกในช่วงแรก โดยพื้นของการก่อตัวอาจจะประกอบด้วยดินทำให้สารละลายคาร์บอนเกิดการปนเปื้อนได้ และในตำแหน่งดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกที่ถูกบีบ และยกตัวขึ้น แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีหินงอกอีกอันเกิดการสะสมตัวในบริเวณข้างเคียง ทำให้เกิดการซ้อนทับกันในช่วงที่ตัวอย่างหินงอกกำลังเจริญเติบโต ทำให้ข้อมูลของธาตุร่องรอยในบริเวณดังกล่าวนั้นไม่เหมาะสมในการนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในการก่อตัวช่วงแรกของหินงอก



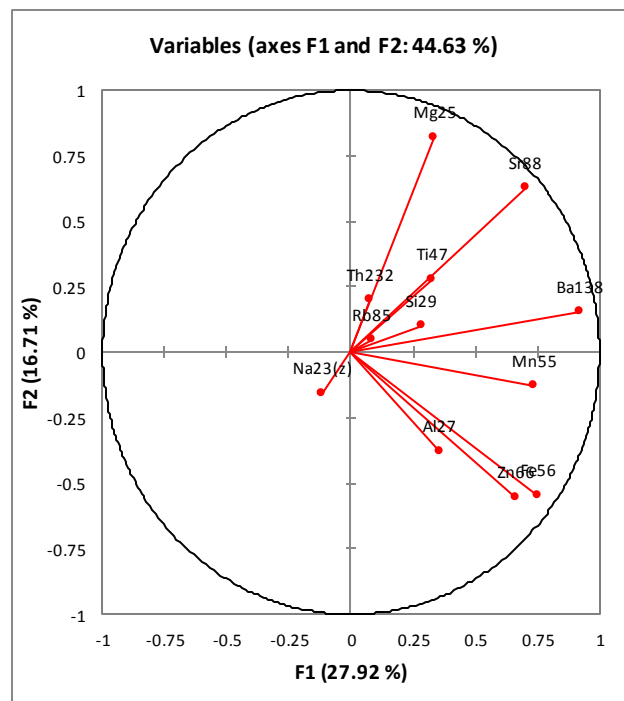
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งที่คาดว่าจะมีการปนเปื้อน และการซ้อนทับของชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอก

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลธาตุที่ได้กับตัวอย่างหินงอกแล้ว จึงทำการคัดเลือกข้อมูลสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยคือช่วงตำแหน่งที่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 168.5 มิลลิเมตร โดยทำการตัดช่วง 170 มิลลิเมตร ถึง 199 มิลลิเมตร ออกไป

4.1.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอกในเชิงสถิติด้วยวิธี Principal component analysis (PCA)

เมื่อทำการคัดเลือกช่วงของข้อมูลธาตุร่องรอยแล้ว จึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยด้วยวิธี PCA ใหม่ โดยก่อนจะทำการวิเคราะห์ ได้ทำการหาค่า Z-score $(X_i - X_{avg})/X_{SD}$ โดย X_i คือข้อมูลแต่ละความลึก, X_{avg} คือค่าเฉลี่ย และ X_{SD} คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Lopez et al., 2011; Cortizas et al., 2013; Kylander et al., 2013a) เพื่อพัฒนาข้อมูลให้ดีขึ้น

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยแต่ละตัวพบว่าธาตุร่องรอยที่มีความสัมพันธ์สูง โดยมีค่า correlation coefficient ($r > 0.5$) ได้แก่ Fe:Zn (+0.789), Sr:Ba (+0.780), Mg:Sr (+0.708), Mn:Fe (+0.634), Mn:Ba (+0.623) และ Fe:Ba (+0.573) ธาตุร่องรอยที่มีความสัมพันธ์ปานกลางได้แก่ Mn:Zn (+0.475), Mn:Sr (+0.447) และ Zn:Ba (+0.417) ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 กราฟ PCA แสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยทั้ง 12 ธาตุ ในแกนที่ 1 และ 2 (ข้อมูลที่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 168.5 มิลลิเมตร)

Variables	Na23	Mg25	Si29	Mn55	Fe56	Sr88	Al27	Ti47	Zn66	Rb85	Ba138	Th232
Na23(z)	1	-0.038	0.003	-0.067	0.012	-0.161	0.022	0.016	0.007	0.022	-0.137	-0.009
Mg25	-0.038	1	0.117	0.112	-0.145	0.708	-0.141	0.277	-0.173	0.027	0.381	0.074
Si29	0.003	0.117	1	0.060	0.149	0.184	0.119	0.069	0.105	0.017	0.207	0.150
Mn55	-0.067	0.112	0.060	1	0.634	0.447	-0.007	0.005	0.475	-0.010	0.623	-0.038
Fe56	0.012	-0.145	0.149	0.634	1	0.164	0.332	0.058	0.789	0.008	0.573	-0.021
Sr88	-0.161	0.708	0.184	0.447	0.164	1	-0.048	0.257	0.142	0.048	0.780	0.104
Al27	0.022	-0.141	0.119	-0.007	0.332	-0.048	1	0.176	0.329	0.059	0.396	0.036
Ti47	0.016	0.277	0.069	0.005	0.058	0.257	0.176	1	0.149	0.085	0.270	0.122
Zn66	0.007	-0.173	0.105	0.475	0.789	0.142	0.329	0.149	1	0.044	0.417	-0.020
Rb85	0.022	0.027	0.017	-0.010	0.008	0.048	0.059	0.085	0.044	1	0.073	0.047
Ba138	-0.137	0.381	0.207	0.623	0.573	0.780	0.396	0.270	0.417	0.073	1	0.043
Th232	-0.009	0.074	0.150	-0.038	-0.021	0.104	0.036	0.122	-0.020	0.047	0.043	1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย (Pearson's correlation) (ข้อมูลที่ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 168.5 มิลลิเมตร)

4.1.3 การวิเคราะห์ธาตุร่องรอยเชิงปริมาณ

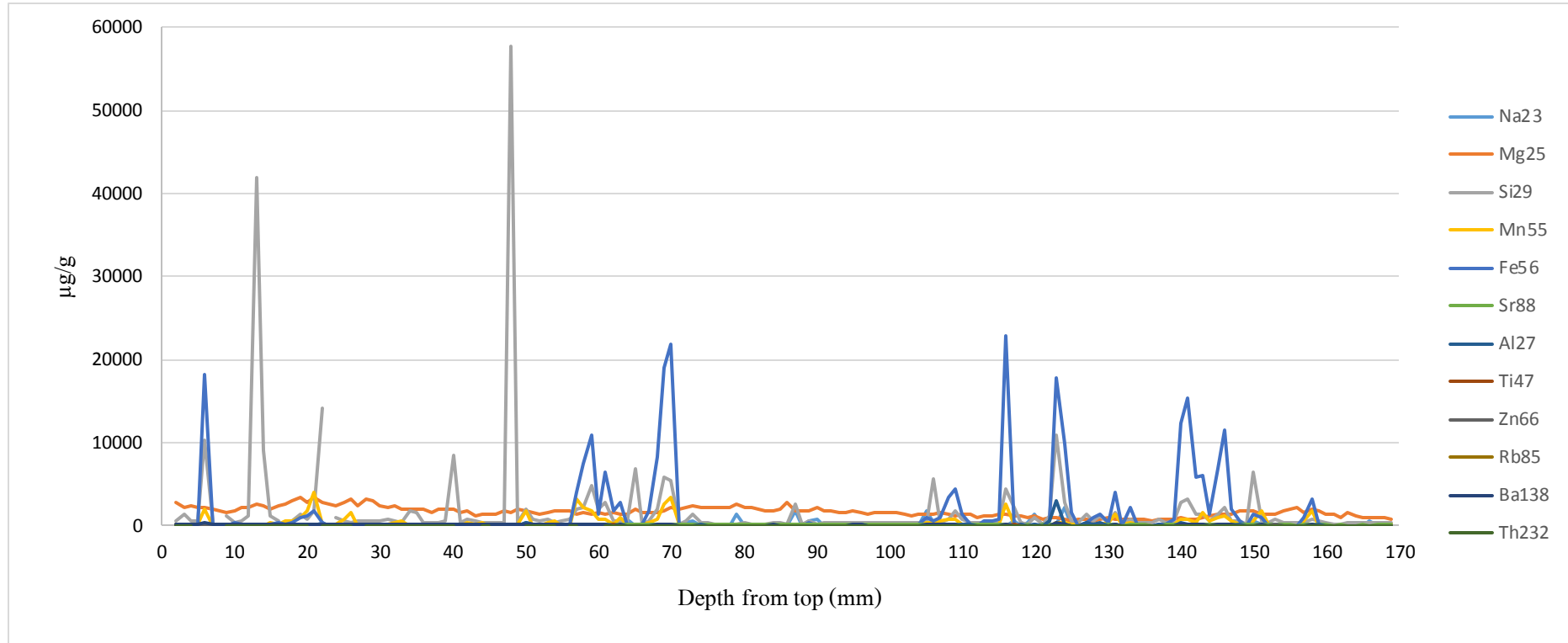
จากข้อมูลปริมาณสูงสุด ต่ำสุดของธาตุร่องรอยที่พบแต่ละตำแหน่งโดยทำการตัดข้อมูลในตำแหน่งที่ 1 มิลลิเมตรออก เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีค่าสูงผิดปกติอาจเป็นผลมาจากเลเซอร์จากเครื่อง LA-ICP-MS ที่เพิ่งเริ่มใช้งาน อาจจะไม่เสถียร ได้แก่ ธาตุ Na มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 124 มิลลิเมตร เท่ากับ 2121.37 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 165 มิลลิเมตร เท่ากับ 5.37902 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Mg มีค่าสูงสุดตำแหน่ง 19 มิลลิเมตร เท่ากับ 3440.22 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 128 มิลลิเมตร เท่ากับ 551.386 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Si มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 48 มิลลิเมตร เท่ากับ 57782.3 $\mu\text{g/g}$ และค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 71 มิลลิเมตร เท่ากับ 214.5523 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Mn มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 21 มิลลิเมตร เท่ากับ 3993.655 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 93 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.9753 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Fe มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 116 มิลลิเมตร เท่ากับ 22835 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 162 มิลลิเมตร เท่ากับ 8.692 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Sr มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร เท่ากับ 233.56 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 161 มิลลิเมตร เท่ากับ 52.395 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Al มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 123 มิลลิเมตร เท่ากับ 3025.59 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 94 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.0063 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Ti มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 2 มิลลิเมตร เท่ากับ 191.97 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 161 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.4175 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Zn มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 141 มิลลิเมตร เท่ากับ 119.29 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 164 มิลลิเมตร เท่ากับ 1.4161 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Rb มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 10 มิลลิเมตร เท่ากับ 246.84 $\mu\text{g/g}$ และ

มีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 162 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.169 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Ba มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 123 มิลลิเมตร เท่ากับ 345.304 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 156 มิลลิเมตร เท่ากับ 21.133 $\mu\text{g/g}$, ธาตุ Th มีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 40 มิลลิเมตร เท่ากับ 17.91 $\mu\text{g/g}$ และมีค่าต่ำสุดที่ตำแหน่ง 102 มิลลิเมตร เท่ากับ 0.0258 $\mu\text{g/g}$

4.2 ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสภาพแวดล้อมในอดีต

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย สามารถจัดธาตุร่องรอยที่มีแนวโน้ม และความสัมพันธ์ได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม คือ (1) Mg, Sr และ Ba (2) Fe, Zn และ Mn (3) Na, Al, Si, Ti, Rb และ Th ซึ่งแต่ละกลุ่มที่แยกมานั้นได้มาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยวิธีเชิงสถิติ และต้นกำเนิดที่พดพาธาตุร่องรอยเหล่านี้มาสะสม

ตัวอย่างหินงอกที่นำมาศึกษานั้นได้ทำการหาอายุของหินงอกโดยใช้วิธีการหาอายุด้วยยูเรเนียม-ทอเรียม โดย อ.ดร.สกลวรรณ ชาวไชย ได้อายุของหินงอกประมาณ 2000 ปี โดยผู้ทำโครงการประมาณอายุเบื้องต้นโดยมีสมมติฐานว่าหินงอกไม่มีการหยุดการเจริญเติบโต โดยความยาวของหินงอกประมาณ 200 มิลลิเมตร เฉลี่ย 1 มิลลิเมตร \sim 10 ปี และในบริเวณ 0.5 มิลลิเมตร จากส่วนบนของหินงอกมีอายุประมาณอยู่ในปี ค.ศ.1929-ค.ศ.1952 (\sim ค.ศ.1940) จึงสามารถคำนวณอายุเบื้องต้นของหินงอกในช่วงตำแหน่งต่างๆได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงปริมาณ และความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยในแต่ละช่วงความลึก

4.2.1 ธาตุ Mg, Sr และ Ba กับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีต

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงสถิติ พบว่า ธาตุทั้ง 3 ตัว ได้แก่ Mg, Sr และ Ba มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงในทิศทางเดียวกัน และจากการศึกษางานวิจัย (Treble et al., 2003; Borsato et al., 2007; Fairchild & Treble., 2009; Wassenburg et al., 2012) พบว่าธาตุร่องรอย Mg, Sr และ Ba ในหินงอกส่วนใหญ่ นั้นมาจากหินต้นกำเนิดที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ศึกษานั้นๆ โดย Mg อาจจะถูกพัดพามาจากการผุพังหรือการละลายของหินโดโลไมต์ในพื้นที่ ส่วน Sr และ Ba นั้น มาจากหินปูนในพื้นที่ โดยธาตุทั้ง 2 เข้าไปแทรกใน Ca^{2+} เนื่องจากมีขนาดและประจุใกล้เคียงกันและเมื่อหินปูนละลายหรือผุพัง จึงถูกพัดพามาโดยน้ำฝนหรือน้ำใต้ดินและสะสมตัวอยู่ในหินงอก ธาตุในกลุ่มนี้จึงสามารถบ่งบอกปริมาณน้ำฝนทางอ้อมได้

จาก รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบกราฟของธาตุ Mg, Sr และ Ba โดยจากกราฟสามารถแบ่งออกได้ทั้งหมด 7 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 (~ ค.ศ.345 ถึง ค.ศ.565) เป็นช่วงที่ปริมาณของธาตุ Mg, Sr และ Ba มีค่าสูงขึ้น จึงคาดการณ์ว่าเป็นช่วงที่พื้นที่ศึกษามีปริมาณน้ำฝนสูงขึ้น (Wetter) ซึ่งทำให้สามารถพัดพาธาตุร่องรอยเหล่านี้มาสะสมอยู่ในตัวอย่างหินงอกนี้ได้

ช่วงที่ 2 (~ ค.ศ.565 ถึง ค.ศ.845) เป็นช่วงที่มีปริมาณของธาตุ Mg, Sr และ Ba ลดต่ำลงเป็นส่วนใหญ่ แต่จะมีบางจุดที่มีปริมาณของธาตุ Mg, Sr และ Ba สูงขึ้น ซึ่งอาจบ่งบอกได้ว่าในช่วงนี้เป็นช่วงที่มีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝน (Variable rainfall) โดยมีแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนที่จะลดต่ำลง (Drier)

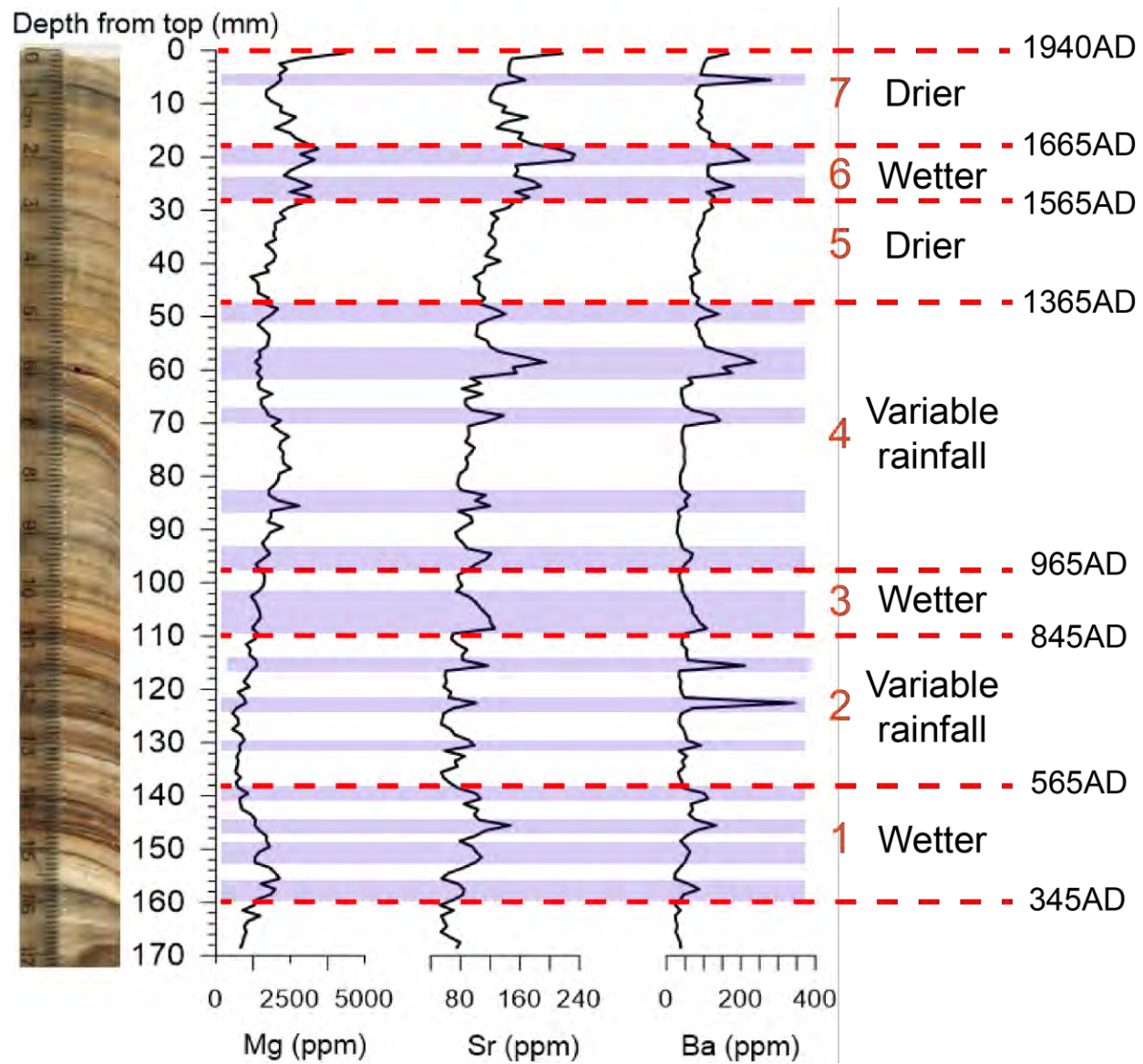
ช่วงที่ 3 (~ ค.ศ.845 ถึง ค.ศ.965) เป็นช่วงที่ปริมาณน้ำฝนมีแนวโน้มที่จะกลับมาเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง

ช่วงที่ 4 (~ ค.ศ.965 ถึง ค.ศ.1365) เป็นช่วงที่ปริมาณของธาตุ Mg, Sr และ Ba มีค่าสูงขึ้น และลดลง สลับไปมาหลายครั้ง ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้น และลดลงสลับไปมา หรือมีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝนในช่วงอายุนี้

ช่วงที่ 5 (~ ค.ศ.1365 ถึง ค.ศ.1565) เป็นช่วงที่ปริมาณของธาตุ Mg, Sr และ Ba ลดต่ำลง ไม่มีจุดสูงสุด (Peak) ของธาตุทั้ง 3 ธาตุ จึงบ่งบอกได้ว่าเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนลดต่ำลง

ช่วงที่ 6 (~ ค.ศ.1565 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงสั้นๆ (Short Period) ที่มีปริมาณน้ำฝนเพิ่มสูงขึ้น

ช่วงที่ 7 (~ ค.ศ.1565 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงที่มีแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนลดต่ำลงเรื่อยๆ



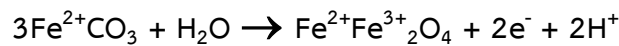
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของธาตุ Mg, Sr และ Ba โดยแบ่งได้ทั้งหมด 7 ช่วง

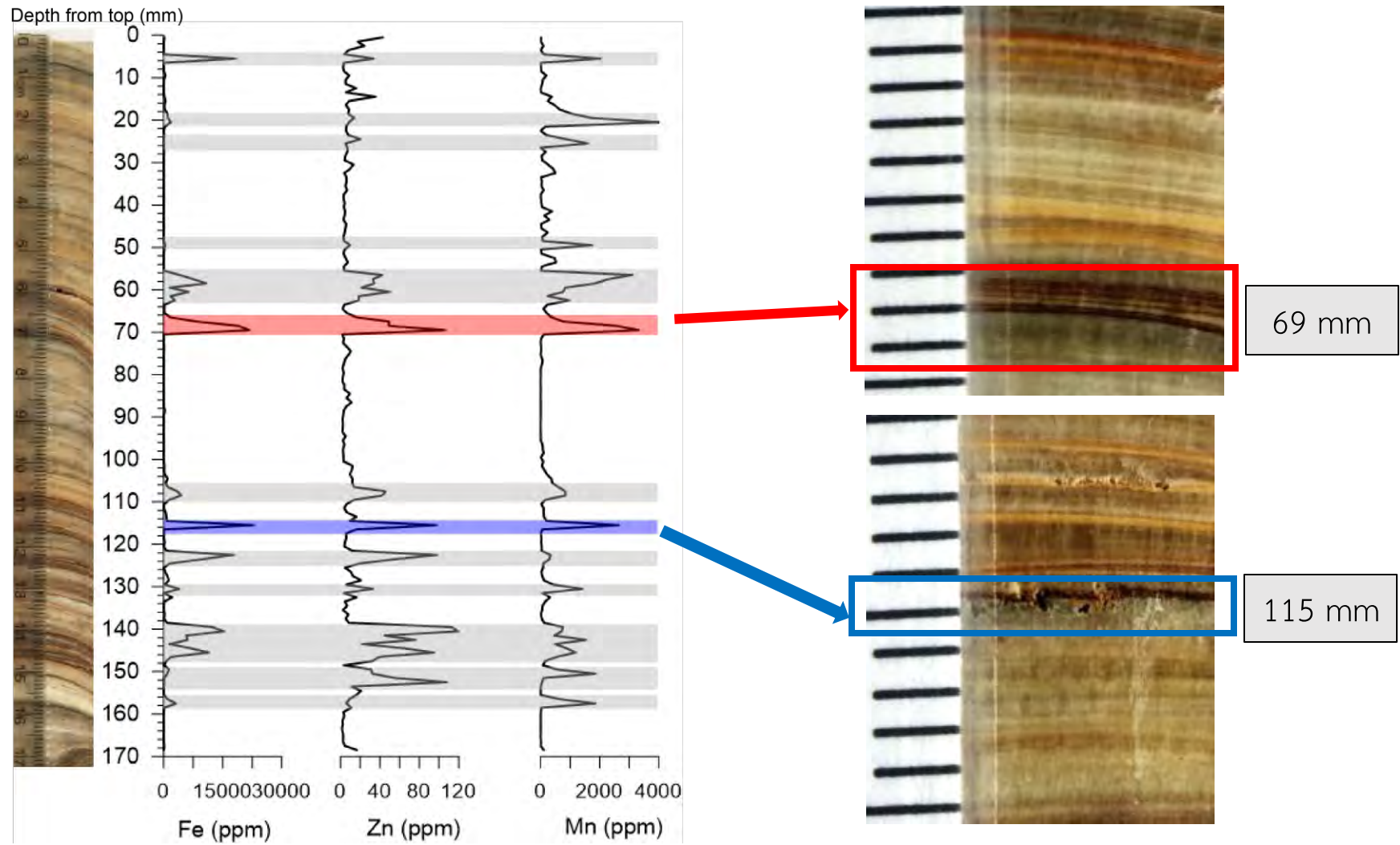
4.2.2 ธาตุ Fe, Zn และ Mn กับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีต

ความสัมพันธ์เชิงสถิติ แสดงว่าธาตุ 3 ตัว Fe, Zn และ Mn มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูงในทิศทางเดียวกัน โดยจากงานวิจัยของ Fairchild et al (2010) ได้กล่าวไว้ว่า ธาตุเหล่านี้อาจจะมีต้นกำเนิดมาจากพวกอินทรีย์สาร หรือมาจากการผุพังของแร่ที่มีธาตุพวกนี้เป็นองค์ประกอบ ซึ่งจากข้อมูลธรณีวิทยาในพื้นที่พบว่าในบริเวณรอบข้างของพื้นที่ศึกษานั้นประกอบไปด้วยหินอัคนี (Igneous rock) อยู่มาก ซึ่งอาจเป็นต้นกำเนิดหลักในกระบวนการชะล้างผุพังและการพัดพาธาตุเหล่านี้มาสะสมตัว โดย Fe, Zn และ Mn อาจจะมาจากรุ่นกลุ่มไพโรอกซีน (Pyroxene) หรือแร่อื่นๆ โดยจากการศึกษาของงานวิจัยเบื้องต้นพบว่าธาตุ Fe, Zn และ Mn สามารถที่จะบ่งบอกสภาพแวดล้อมช่วงที่มีความชุ่มชื้นได้ (Zhou et al., 2011)

เมื่อนำข้อมูลของธาตุกลุ่มนี้ไปสร้างกราฟ แสดงในรูปที่ 4.5 จะพบว่า บางจุดที่ธาตุ Fe, Zn และ Mn มีปริมาณสูงขึ้น เมื่อนำไปเทียบกับสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก พบว่าในช่วงนั้นจะมีสีในชั้นการเจริญเติบโตเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม (Terra brown) ตามการเปรียบเทียบกับสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก จากงานวิจัยของนางสาวชิรศรี สุวรรณสุข โดยสีที่ได้นั้นอาจเกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation) ของแร่ เนื่องจากมีความชื้นซึ่งอาจเกิดที่บริเวณดินเหนียวถ้าได้ (Perrin et al., 2014) เช่น แร่ซิเดอไรต์ (Siderite; FeCO_3) มีการออกซิไดซ์ของธาตุ Fe จาก Fe^{2+} กลายเป็น Fe^{3+} ดังสมการด้านล่าง

Siderite to Magnetite in wet environment





รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Fe, Zn และ Mn กับสีในชั้นของการเจริญเติบโตของหินงอก (ตัวอย่างที่บริเวณ 69 มิลลิเมตร และ 115 มิลลิเมตร)

จากการพิจารณาความสัมพันธ์ของธาตุกลุ่มต่างๆ และสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก พบว่าธาตุร่องรอยในกลุ่มที่ 2 ได้แก่ธาตุ Fe, Zn และ Mn มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก โดยเมื่อธาตุมีปริมาณที่สูงจะส่งผลให้สีในชั้นการเจริญเติบโตมีสีน้ำตาลเข้ม แต่สำหรับธาตุในกลุ่มที่ 1 ได้แก่ธาตุ Mg, Sr และ Ba ไม่เห็นความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุร่องรอย และสีในชั้นการเจริญเติบโตที่ชัดเจน แต่อาจคาดเดาได้ว่าปริมาณของธาตุร่องรอยที่เพิ่มมากขึ้น อาจส่งผลให้มีสีที่เข้มขึ้น ซึ่งอาจบ่งบอกต่อได้ว่าเป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ต้องทำการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป โดยอาจศึกษาจากประจุของธาตุร่องรอย หรือปริมาณของธาตุร่องรอยที่มีประจุต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของธาตุ Fe, Zn และ Mn โดยแบ่งออกได้ทั้งหมด 5 ช่วง ได้แก่

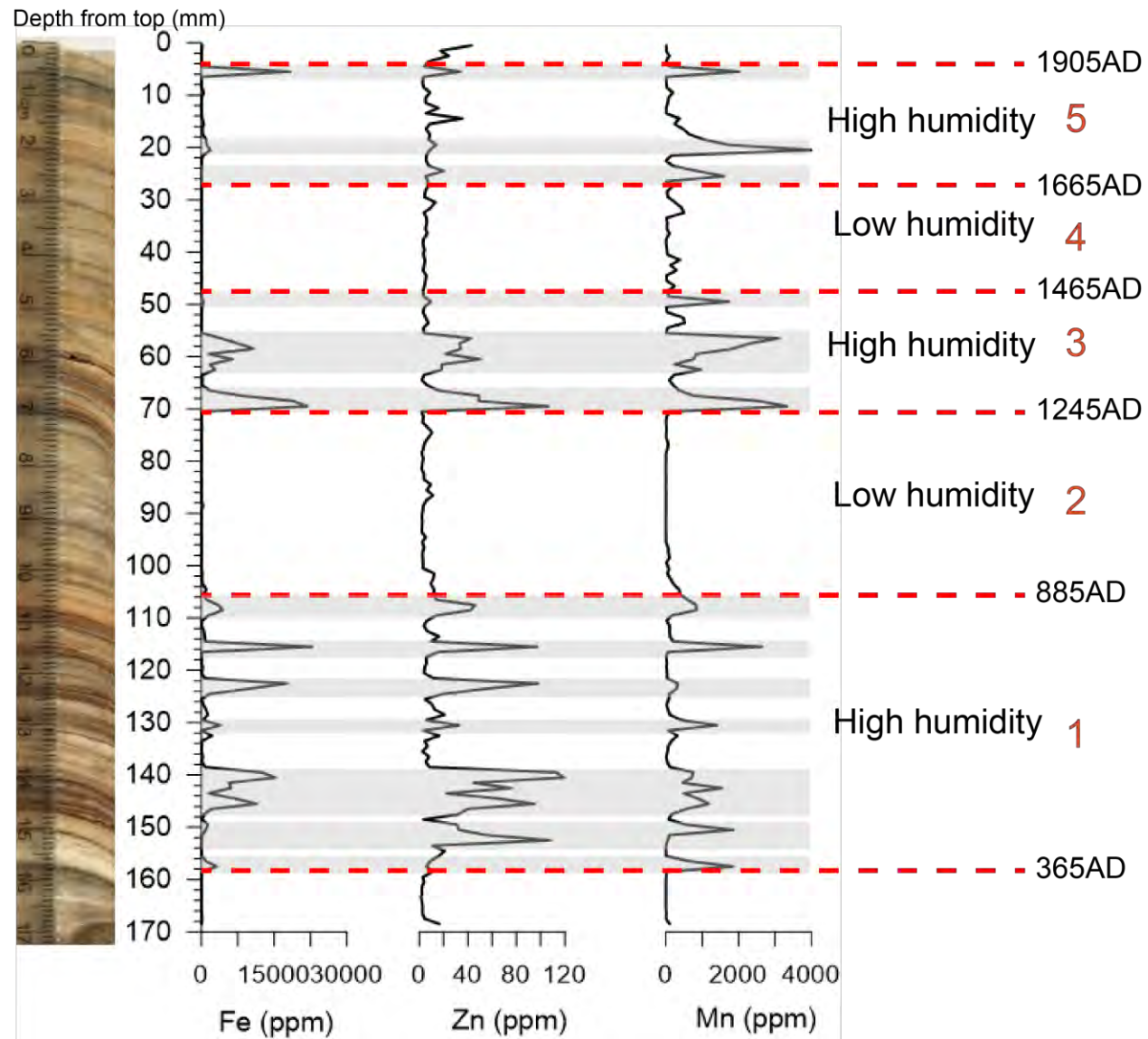
ช่วงที่ 1 (~ ค.ศ.365 ถึง ค.ศ.885) ในช่วงนี้มีปริมาณของธาตุ Fe, Zn และ Mn ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากการพัดพาธาตุร่องรอยจากน้ำฝนหรือน้ำใต้ดินในรูปของสารคอลลอยด์ (Fairchild & Treble., 2009) โดยสามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นช่วงที่สภาพแวดล้อมมีความชุ่มชื้นมาก (High humidity)

ช่วงที่ 2 (~ ค.ศ.885 ถึง ค.ศ.1245) พบว่าช่วงนี้ปริมาณของธาตุ Fe, Zn และ Mn ต่ำ ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นอยู่น้อย (Low humidity)

ช่วงที่ 3 (~ ค.ศ.1245 ถึง ค.ศ.1465) เป็นช่วงที่มีปริมาณของธาตุ Fe, Zn และ Mn สูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าช่วงนี้เป็นช่วงที่มีความชุ่มชื้นในพื้นที่ศึกษาสูงมาก

ช่วงที่ 4 (~ ค.ศ.1465 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงที่ปริมาณของธาตุ Fe, Zn และ Mn ต่ำมาก หรือแทบจะไม่พบ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่า เป็นช่วงที่สภาพแวดล้อมมีความชุ่มชื้นต่ำมาก

ช่วงที่ 5 (~ ค.ศ.1665 ถึง ค.ศ.1905) เป็นช่วงที่มีความชื้นสูงในช่วงประมาณปี ค.ศ.1665 ถึง ค.ศ.1785 โดยหลังจากนั้นความชื้นค่อยๆลดต่ำลง และมีความชื้นสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณปี ค.ศ.1885 ถึง ค.ศ. 1905



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ Fe, Zn และ Mn โดยแบ่งได้ทั้งหมด 5 ช่วง

4.2.3 ธาตุ Na, Al, Si, Ti, Rb และ Th กับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีต

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ กลุ่มของธาตุร่องรอยกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่แทบจะไม่มีความสัมพันธ์กับธาตุตัวอื่นๆ จาก รูปที่ 4.1 แต่จากการอ่านงานวิจัย ธาตุเหล่านี้อาจสามารถบ่งบอกได้ถึงสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้ เช่น Na เป็นธาตุหลักในดินซึ่งอาจจะสามารถบ่งบอกได้ถึงอัตราการเจริญเติบโตของหินงอกได้ (Treble et al., 2003) สำหรับ Al, Si และ Ti หากเทียบกราฟจะพบว่า มีความสัมพันธ์กับ ธาตุร่องรอย Fe, Zn และ Mn อยู่ในบางช่วง แต่ถือว่ามีความสัมพันธ์ต่ำในเชิงสถิติ ($r < 0.4$) ซึ่ง Al, Si และ Ti นั้น อาจมีต้นกำเนิดเช่นเดียวกับ Fe, Zn และ Mn คือ Al, Si นั้นอาจจะมาจากการฟุ้งของแร่ โดย Al, Si เป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว (Clay mineral) หรือเฟลด์สปาร์ (Feldspar) หรือควอตซ์ (Quartz) และ Ti อาจมาจากหินอัคนีบริเวณข้างเคียงแล้วถูกพัดมาสะสม และสำหรับ Rb และ Th นั้นไม่มีความสัมพันธ์กับธาตุตัวใดเลย แต่จากงานวิจัยของ Treble et al (2003) กล่าวว่า ข้อมูล Al และ Th นั้นอาจจะบ่งบอกถึงช่วงที่ขึ้นหินขาดหายไป (Hiatus) ได้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยของหินงอกในเชิงสถิติโดยวิธี PCA เพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสีในชั้นของการเจริญเติบโตของหินงอก และความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสภาพแวดล้อมในอดีตซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้านี้แล้ว สามารถสรุปสิ่งที่ได้จากโครงการ มีดังต่อไปนี้

1. กลุ่มของธาตุร่องรอย โดยใช้การวิเคราะห์จากค่าความสัมพันธ์ในเชิงสถิติ คือค่า r หรือ correlation coefficient ของธาตุร่องรอย สามารถจัดออกมาได้ทั้งหมด 3 กลุ่ม ได้แก่

(1) ธาตุ Mg, Sr และ Ba โดยมีค่าความสัมพันธ์กันสูง ($r > 0.5$) ได้แก่ Sr:Ba (+0.780) และ Mg:Sr (+0.708)

(2) ธาตุ Fe, Zn และ Mn โดยมีค่าความสัมพันธ์กันสูง ($r > 0.5$) ได้แก่ Fe:Zn (+0.789), Mn:Fe (+0.634) และปานกลาง ($0.5 > r > 0.4$) ได้แก่ Mn:Zn (+0.475)

(3) ธาตุ Na, Si, Al, Ti, Rb และ Th โดยมีค่าความสัมพันธ์กันต่ำ ($r < 0.4$)

2. ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก โดยธาตุร่องรอย Fe, Zn และ Mn มีความสัมพันธ์กับสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก โดยบริเวณที่มีปริมาณของธาตุในกลุ่มนี้มาก จะส่งผลให้มีสีน้ำตาลเข้ม (Terra brown) ทั้งนี้สำหรับธาตุร่องรอยในกลุ่มอื่นนั้นไม่สามารถสรุปได้แน่นอนว่า หากบริเวณชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกนั้นมีปริมาณของธาตุร่องรอยที่มากขึ้น หรือน้อยลง จะส่งผลให้สีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกมีสีเข้มขึ้นหรืออ่อนลง เนื่องจากในแต่ละชั้นการเจริญเติบโตนั้นมีปริมาณธาตุในแต่ละตัวที่มาก-น้อย แตกต่างกันไป ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

3. ธาตุร่องรอยมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณน้ำฝน และการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม โดยพิจารณาจากธาตุร่องรอย 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) ธาตุ Mg, Sr และ Ba สามารถบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนทางอ้อมได้ (2) ธาตุ Fe, Zn และ Mn สามารถบ่งบอกสภาพแวดล้อมในช่วงที่มีความชื้นได้ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

(1) ธาตุ Mg, Sr และ Ba สามารถแบ่งช่วงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนได้ทั้งหมด 7 ช่วง

ช่วงที่ 1 (~ ค.ศ.345 ถึง ค.ศ.565) เป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนสูงขึ้น (Wetter)

ช่วงที่ 2 (~ ค.ศ.565 ถึง ค.ศ.845) เป็นช่วงที่มีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝน (Variable rainfall) โดยมีแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนที่จะลดต่ำลง (Drier)

ช่วงที่ 3 (~ ค.ศ.845 ถึง ค.ศ.965) เป็นช่วงที่ปริมาณน้ำฝนกลับมาเพิ่มสูงขึ้น

ช่วงที่ 4 (~ ค.ศ.965 ถึง ค.ศ.1365) เป็นช่วงที่มีความแปรปรวนของปริมาณน้ำฝน

ช่วงที่ 5 (~ ค.ศ.1365 ถึง ค.ศ.1565) เป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนลดต่ำลง

ช่วงที่ 6 (~ ค.ศ.1565 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนเพิ่มสูงขึ้น

ช่วงที่ 7 (~ ค.ศ.1565 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงที่มีแนวโน้มของปริมาณน้ำฝนลดต่ำลงเรื่อยๆ

(2) ธาตุ Fe, Zn และ Mn สามารถแบ่งช่วงที่มีความชุ่มชื้นของสภาพแวดล้อมได้ทั้งหมด 5 ช่วง ได้แก่

ช่วงที่ 1 (~ ค.ศ.365 ถึง ค.ศ.885) ในช่วงนี้เป็นช่วงที่สภาพแวดล้อมมีความชุ่มชื้นสูง (High humidity)

ช่วงที่ 2 (~ ค.ศ.885 ถึง ค.ศ.1245) เป็นช่วงที่มีสภาพแวดล้อมที่มีความชุ่มชื้นอยู่ต่ำ (Low humidity)

ช่วงที่ 3 (~ ค.ศ.1245 ถึง ค.ศ.1465) เป็นช่วงที่มีความชุ่มชื้นในพื้นที่ศึกษาสูงมาก

ช่วงที่ 4 (~ ค.ศ.1465 ถึง ค.ศ.1665) เป็นช่วงที่สภาพแวดล้อมมีความชุ่มชื้นต่ำ

ช่วงที่ 5 (~ ค.ศ.1665 ถึง ค.ศ.1905) เป็นช่วงที่มีความชื้นสูงในช่วงประมาณปี ค.ศ.1665 ถึง ค.ศ.1785 โดยหลังจากนั้นความชื้นค่อยๆลดต่ำลง และมีความชื้นสูงขึ้นเล็กน้อยประมาณปี ค.ศ.1885 ถึง ค.ศ. 1905

ทั้งนี้เมื่อนำผลที่ได้ไปเทียบกับงานวิจัยของนางสาวชिरศรี สุวรรณสุโข ซึ่งใช้ไอโซโทปคาร์บอน และ ออกซิเจน ของหินงอก พบว่าช่วงของปริมาณน้ำฝนที่พบส่วนใหญ่มีความใกล้เคียงกัน อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่ใช้หลักฐานทางธรณีวิทยา หรือหลักฐานทางธรณีวิทยาประเภทอื่น ๆ ในบริเวณรอบๆพื้นที่ศึกษา พบว่าช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนมีความใกล้เคียงกัน

ข้อเสนอแนะ

1. การอภิปรายผลของโครงการเล่มนี้เป็นเพียงผลที่ได้จากความคิดเห็นของผู้ศึกษาเท่านั้น เนื่องจากยังไม่มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมในอดีต โดยใช้ธาตุร่องรอยของหินงอกในประเทศไทยอยู่เลย จึงไม่สามารถเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ และสภาพแวดล้อมในอดีต ได้ชัดเจน

2. ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกนั้น เป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้นที่ได้มาจากการสังเกตปริมาณของธาตุร่องรอยในกลุ่ม Fe, Zn และ Mn และสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของสีกับธาตุร่องรอยในกลุ่มอื่นๆ โดยต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น ประจุของธาตุร่องรอย หรือปริมาณของธาตุร่องรอยที่มีประจุต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

3. ความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในอดีต ของธาตุร่องรอยกลุ่มที่ (1) ธาตุ Mg, Sr และ Ba กับกลุ่มที่ (2) ธาตุ Fe, Zn และ Mn นั้นพบว่ามีความสัมพันธ์ และไม่มีความสัมพันธ์กันในบางช่วง เนื่องจากสภาพแวดล้อมในประเทศไทยนั้นมีภูมิอากาศลักษณะแบบร้อนชื้น คือ มีฝนตกเกือบตลอดทั้งปี ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงที่แห้งแล้ง ทำให้ช่วงบางช่วง เช่น ช่วงที่มีปริมาณน้ำฝนต่ำ แต่ยังมี ความชื้นสะสมอยู่ในดิน จึงสามารถพัดพานำธาตุร่องรอยบางอย่าง Fe, Zn และ Mn ไปสะสมตัวได้

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี, 2550. แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดอุทัยธานี. กรุงเทพมหานคร: กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี
- “ทรัพยากรป่าไม้ของจังหวัดอุทัยธานี”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <https://nikonprofessional.wikispaces.com> และ <http://www.seub.or.th>
- “ปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย” <http://www.hydro-5.com>
- “หลักการการทำงานของเครื่อง LA-ICP-MS”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.analchem.ugent.be>
- “อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ย”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้ <http://climate.tmd.go.th>
- Buckley, B. B., Anchukaitis, K. J., Penny, D., et al. (2010). Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia. *PNAS*, 6748-6752
- Chawchai, S., Kylander, M. E., Chabangborn, A., et al. (2015). Testing commonly used X-ray fluorescence core scanning-based proxies for organic-rich lake sediments and peat. *BOREAS*, 180-189
- Fairchild, I.J., et al., 2000. Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climate records *Chemical Geology* 166, 255-269.
- Fairchild, I. J., Frisia, S., Borsato, A., & Tooth, A. F., 2006. Speleothems. *Geochemical Sediments and Landscapes*, 200-245
- Fairchild, I., Smith, C., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., & Mcdermott, F. (2006). Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 105-153.
- Fairchild, I., & Treble, P. (2009). Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 449-468

- Fairchild, I., Spötl, C., Frisia S., Borsato A., et al. (2010). Petrology and geochemistry of annually laminated stalagmites from an Alpine cave (Obir, Austria): seasonal cave physiology. *Geological Society, London, Special Publications* 2010, 295-321
- Fairchild, I.J. & Baker A., 2012. *Speleothem science: from process to past environments*. John Wiley & Sons. Oxford, UK.
- Finch, A., Shaw, P., Weedon, G., & Holmgren K. (2001). Trace element variation in speleothem aragonite: potential for paleoenvironmental reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 255-267.
- Griffiths, M., Drysdale, R., Gagan, M., Frisia, S., Zhao, J., Ayliffe, L., Hantoro, W., Hellstrom, J., Fischer, M., Feng, Y., & Suwargadi, B. (2010). Evidence for Holocene changes in Australian–Indonesian monsoon rainfall from stalagmite trace element and stable isotope ratios. *Earth and Planetary Science Letters*, 27-38
- Jochum, K. P., Scholz, D., Stoll, B., et al. (2012). Accurate trace element analysis of speleothems and biogenic calcium carbonates by LA-ICP-MS. *Chemical Geology* 318–319, 31–44
- Johnson, K., Hu, C., Belshaw, N., & Henderson, G. (2006). Seasonal trace-element and stable-isotope variations in a Chinese speleothem: The potential for high-resolution paleomonsoon reconstruction. *Earth and Planetary Science Letters*, 394-407
- Lewis, S., Gagan, M., Ayliffe, L., Zhao, J., Hantoro, W., Treble, P., Hellstrom, J., LeGrande, A., Kelley, M., Schmidt, G., & Suwargadi, B. (2011). High-resolution stalagmite reconstructions of Australian–Indonesian monsoon rainfall variability during Heinrich stadial 3 and Greenland interstadial 4. *Earth and Planetary Science Letters*, 133-142
- Mcdermott F., et al., 1999. Holocene climate variability in Europe: Evidence from $\delta^{18}\text{O}$, textural and extension-rate variations in three speleothems, *Quaternary Science Reviews* 18, 1021-1038

- Perrin, C., Prestimonaco, L., Servelle, G., Tilhac, R., Maury, M., & Cabrol, P., 2014. Aragonite-Calcite Speleothems: Identifying Original and Diagenetic Features. *Journal of Sedimentary Research*, 84(4), 245-269.
- Rutledge, H., Baker, A., Marjo, C., Andersen, M., Graham, P., Cuthbert, M., Rau, G., Roshan, H., Markowska, M., Mariethoz, G., & Jex, C. Dripwater organic matter and trace element geochemistry in a semi-arid karst environment: Implications for speleothem paleoclimatology. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 217-230
- Smith, C., Fairchild, I., Spötl, C., Frisia S., Borsato A., Moreton S., Wynn P. (2009). Chronology building using objective identification of annual signals in trace element profiles of stalagmites. *Quaternary Geochronology*, 11-21
- Treble, P., Shelley, J.M.G., & Chappell, J. (2003). Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911-1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 141-153
- Tremaine, D., & Froelich, P. (2013). Speleothem trace element signatures: A hydrologic geochemical study of modern cave dripwaters and farmed calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 522-545
- Wassenburg, J.A., Immenhauser, A., Richter, D. K., et al. (2012). Climate and cave control on Pleistocene/Holocene calcite-to-aragonite transitions in speleothems from Morocco: Elemental and isotopic evidence. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 92 (2012), 23–47
- Wassenburg, J.A., Immenhauser, A., Richter, D.K., Niedermayr, A., Riechelmann, S., Fietzke, J., Scholz, D., Jochum, K.P., Fohlmeister, J., Schroder-Ritzrau, A., Sabaoui, A., Riechelmann, D.F.C., Schneider, L., Esper, J. (2013). Moroccan speleothem and tree ring records suggest a variable positive state of the North Atlantic Oscillation during the Medieval Warm Period. *Earth and Planetary Science Letters*, 291-302.

- Yamoah, K. A., Chabangborn, A., Chawchai, S., et al. (2016). A 2000-year leaf wax-based hydrogen isotope record from Southeast Asia suggests low frequency ENSO-like teleconnections on a centennial timescale. *Quaternary Science Reviews* 148, 44-53
- Yamoah, K. A., Higham, C. FW., Wohlfarth, B., Chabangborn, A., Chawchai, S., et al. Societal response to monsoonal fluctuations in NE Thailand during the demise of Angkor Civilisation. *The Holocene*, 1-10
- Zhou, J., Lundstrom, C., Fouke, B., Panno, S., & Hackley, K. (2005). Geochemistry of speleothem records from southern Illinois: Development of $(^{234}\text{U})/ (^{238}\text{U})$ as a proxy for paleoprecipitation. *Chemical Geology*, 1-20.
- Zhou, H., Greig, A., You, C., Lai, Z., Tang, J., Guan, Y., & Yuan, D. (2011). Arsenic in a Speleothem from Central China: Stadial-Interstadial Variations and Implications. *Environmental Science & Technology*, 1278-1283.