

ศิลาวิทยาและธาตุร่องรอยของหินงอก จากอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

นางสาววริษา ไผ่สนจำลองศรี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

PETROLOGY AND TRACE ELEMENT OF STALAGMITES OF FROM
AMPHOE BAN RAI, CHANGWAT UTHAI THANI

Miss Warisa Paisonjumlongsri

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2015

วันที่ส่ง

____ / ____ / ____

วันที่อนุมัติ

____ / ____ / ____

ลงชื่อ _____

(อาจารย์ ดร. สกลวรรณ ชาวไชย)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย	ศิลาวิทยาและธาตุร่องรอยของหินงอกจาก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี
ผู้ทำการวิจัย	นางสาววิริษา ไผ่สนจำลองศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สกวรรรณ ชาวไชย
ภาควิชา	ธรณีวิทยา
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

ปัจจุบันงานวิจัยที่ใช้ธาตุร่องรอยในหินงอก เพื่อศึกษาสภาพสิ่งแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศ บรรพกาล จากถ้ำในหลากหลายประเทศได้รับการยอมรับและกำลังเป็นที่นิยม โครงการวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับธาตุร่องรอย ร่วมกับลักษณะทางศิลาวิทยาและความหนาแน่นของหินงอก จากถ้ำบริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี โดยลำดับแรกได้นำตัวอย่างหินงอกไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ผลที่ได้ คือค่าซีทีและภาพที่แสดงระดับสีเทา ซึ่งข้อมูลทั้งสองบ่งบอกถึงความหนาแน่นของหินงอก จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับลักษณะศิลาวรรณาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ ลำดับสุดท้ายจึงพิจารณาจุดที่มีลักษณะศิลาวรรณาและความหนาแน่นแตกต่างกันมาวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยโดยใช้เครื่อง Electron probe- micro-analyzer (EPMA) ทั้งนี้เพื่อหาความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอย ลักษณะศิลาวิทยาและความหนาแน่นของหินงอก ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการคัดเลือกหินงอกเพื่อทำการศึกษาต่อในเชิงสภาพภูมิอากาศบรรพกาลได้

ผลการศึกษาหินงอก 3 ทั้งตัวอย่าง จากถ้ำบริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานีนี้ แสดงให้เห็นว่า ลักษณะศิลาวรรณามีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น โดยโครงเนื้อแบบ Columnar มีความหนาแน่นมากที่สุด รองลงมาคือโครงเนื้อแบบ Dendritic ที่มีช่องว่างระหว่างผลึกแคบ และโครงเนื้อแบบ Dendritic ที่มีรูพรุนแทรกภายหลังหินงอกตกสะสมตัว มีความหนาแน่นต่ำที่สุด นอกจากนี้ ผลจากการศึกษาธาตุร่องรอยทั้ง 36 จุด พบว่าธาตุที่พบเกือบทุกจุดศึกษา คือ Mg (~ 413 ppm) และธาตุอื่นๆ ได้แก่ Pb Fe Na Zn Mn Si และ Sr พบรองลงมา โดยมีปริมาณมากน้อยต่างกันไปตามแต่ละจุดศึกษา (> 50 ppm) จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและปริมาณธาตุร่องรอยที่ปรากฏในเชิงสถิติเบื้องต้น พบว่า ทั้งสองค่านี้มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ ($-0.45 < r < 0.33$) และอาจมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางในทางตรงข้าม ยกตัวอย่างเช่น Pb ($r = -0.45$) เป็นต้น

คำสำคัญ: หินงอก; ศิลาวิทยา; ธาตุร่องรอย; ความหนาแน่นของหินงอก

Project title	PETROLOGY AND TRACE ELEMENT OF STALAGMITES FROM AMPHOE BAN RAI, CHANGWAT UTHAI THANI
Researcher	Miss Warisa Paisonjumlongsri
Department	Geology
Advisor	Dr. Sakonvan chawchai
Academic year	2015

ABSTRACT

Nowadays, studying of trace elements in stalagmite is able to indicate paleoclimate, or paleoenvironment. This study detects trace element content combining with bulk density of stalagmite, collected from amphoe Ban Rai, changwat Uthai Thani. Firstly, samples were scanned by CT scanner giving CT number data and grey scale images which corresponds to relative X-ray attenuation, the function of elemental composition and density (Mickler et al., 2004). Then, the results from Ct scanning would be compared with petrography under the polarized microscope. The selected interest spots, identified by the comparison of density and petrography, for the next step of EPMA analysis which aims to test the relationship of trace element content, petrography and bulk density of stalagmite. Since, the relationship may use as a basic knowledge in stalagmites sampling for further paleoclimate studies.

The study results from 3 samples of stalagmite show the relation between petrography and density. Columnar fabric has the highest density. Dendritic compact is the second and dendritic open with post depositional dissolution has the lowest density. Moreover, EPMA almost detect Mg (~ 413 ppm) in every analysis spots and other trace elements, including Pb, Fe, Na, Zn, Si, Sr and Mn are found in some spot. However, the amount of trace element depends on the analysis spots (< 50 ppm). Because the correlation coefficient (r) between trace element content and density value is low ($-0.45 < r < 0.33$). Consequently, these two values could be concluded to be the inconsistency or moderate negative relationship like Pb ($r = -0.45$).

Key words: Stalagmites; Petrology; Trace elements; Stalagmite density

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยเรื่อง ศิลาวทยาและธาตุร่องรอยของหินงอก จากอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี นี้สำเร็จได้ด้วย ความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย ที่ช่วยเหลือทั้งในการเก็บตัวอย่าง การออกภาคสนาม รวมถึงคอยให้ความรู้ คำแนะนำ คำตักเตือน และคำปรึกษาในทุกเรื่อง ตั้งแต่เริ่มต้นโครงงาน จนกระทั่งเสร็จสิ้นโครงงาน

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. วิชัย จุฑะโกสิทธิ์กานนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์ และ นายพีรพงศ์ ศรีตั้งศิริกุล ที่ช่วยเก็บตัวอย่างหินงอก จากถ้ำในอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

ขอขอบคุณ อาจารย์ศิริพงษ์ โทหนองตอ และครอบครัว ที่ช่วยเหลือในเรื่องที่พัก เสียสละเวลา กำลังกาย เพื่อหาถ้ำ ติดตามผู้นำทาง และยังช่วยอำนวยความสะดวกในการออกภาคสนาม

ขอขอบคุณ ผู้นำทาง และเจ้าหน้าที่กรมป่าไม้ ที่ช่วยเหลือในการค้นหา และสำรวจถ้ำ ทั้งยังอนุญาตให้เก็บตัวอย่างเพื่อทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวัลย์ภรณ์ สุขสันต์เจริญ และเจ้าหน้าที่ห้องควบคุมเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ แห่งศูนย์รังสีวินิจฉัย โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ทุกท่าน เป็นอย่างยิ่งที่เสียสละเวลาในการสอน คอยช่วยเหลือในการบันทึกข้อมูล ให้คำแนะนำ และการต้อนรับอย่างดีทุกครั้งที่ใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ คุณไศภิต พุ่มพวง เจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์ ผู้ช่วยเหลือในการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Electron probe micro-analyzer (EPMA) และเจ้าหน้าที่ในภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่าน

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นายกัมปนาท จันท์คำ ผู้ทำการวิจัยในที่ปรึกษาร่วม ครอบครัว เพื่อนุรธรณีวิทยา รุ่น 56 ทุกคน รวมไปถึงน้องธรณี และคณาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่านที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับโครงงาน ที่ความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจเสมอ

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 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)	7
1.7 ระเบียบวิธีวิจัย (Methodology)	7
1.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected output)	11
1.9 นิยามศัพท์ (Definition of Terms)	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)	15
2.1 เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray Computed Tomography)	15
2.2 ความหนาแน่น (Density)	16
2.3 ศิลาวรรณา (Petrography)	17
2.4 ธาตุร่องรอย (Trace elements)	23
บทที่ 3 ผลการศึกษา (Results)	24
3.1 เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT-scan)	24
3.2 ศิลาวรรณา (Petrography)	26
3.3 ธาตุร่องรอย (Trace elements)	30
บทที่ 4 อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)	33
4.1 ความหนาแน่นและลักษณะศิลาวรรณา (Density and Petrography)	33

4.2 ศีลาวรรณและสภาพแวดล้อมระหว่างการตกสะสมตัว (Petrography and Environment of Formation)	34
4.3 4.3 ธาตุร่องรอย ความหนาแน่น และศีลาวรรณ (Trace elements Density and Petrography)	35
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)	40
บรรณานุกรม	42

สารบัญรูปรภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ถ้ำหินปูนบริเวณบ้านห้วยป่าปก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	2
รูปที่ 1.2 ภูมิประเทศบริเวณจุดศึกษา	3
รูปที่ 1.3 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553-2557 ห้วยกระเสียว บ้านทับคล้าย อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	4
รูปที่ 1.4 อุดมภูมिरายเดือนเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2556-2557 จากสถานีอุตุนิยมวิทยา ชัยนาท สกข.	5
รูปที่ 1.5 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา, อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	6
รูปที่ 1.6 แผนผังการดำเนินงาน	7
รูปที่ 1.7 ตัวอย่างหินงอกทั้ง 3 ตัวอย่าง จากถ้ำบริเวณบ้านห้วยป่าปก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี	8
รูปที่ 1.8 บริเวณที่ตัดทำแผ่นหินขัดมัน (กรอบสี่เหลี่ยมสี่เทา) และจุดวิเคราะห์ธาตุร่องรอย (จุดสีแดง)	13
รูปที่ 1.9 เครื่องขัดปรับหน้าเรียบ สามารถเปลี่ยนแผ่นขัดสำหรับขัดด้วยน้ำและขัดด้วยผงเพชร (ซ้าย) เครื่องขัดหน้ามันด้วยผ้าสักหลาด (ขวา)	13
รูปที่ 1.10 เครื่อง EPMA ยี่ห้อ JOEL รุ่น JXA-8100 สำหรับวิเคราะห์ธาตุร่องรอย	14
รูปที่ 2.1 ผังการทำงานของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์	15
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-number และระดับสีเทาของรูปรภาพ (image gray scale)	16
รูปที่ 2.3 A) และ B) Columnar fabric แต่ B) จะมีรอยต่อระหว่างผลึกไม่เรียบและตรงเท่า A), C) Microcrystalline fabric และ D) Dendritic fabric รูปมุมบนขวาของภาพ A), D) คือ ภาพที่ได้จาก SEM (Fairchild et al, 2006)	19
รูปที่ 2.4 Micrite fabric (M) และ Dendritic fabric (D) (McDermott et al, 1999)	21
รูปที่ 2.5 Acicular Aragonite แสดงลักษณะใบพัด (fan-like) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (PPL) (Perrin et al., 2014)	22
รูปที่ 3.1 ภาพสองมิติตัดสามแนว คือ Coronal, Sagittal และ Axial ตามลำดับ	25
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบภาพหินงอกตัดตามยาวจากสแกนเนอร์ของเครื่องพิมพ์ (สี) และภาพจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (ขาว-ดำ) บริเวณที่มีสีเทาอ่อนมีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณสีเทาเข้ม สีดำแสดงถึงรูพรุนในเนื้อหิน, ตัวอย่าง BR2	25
รูปที่ 3.3 ภาพ 3 มิติเห็นลักษณะทางกายภาพภายนอกชัดเจน ทั้งรูและความขรุขระของเนื้อหิน สีเทาเข้มแสดงถึงการกระจายของรูและช่องว่างในเนื้อหิน, ตัวอย่าง BR2	26

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินงอก BR1 (ขวา) และ BR2 (ซ้าย) บริเวณด้านล่าง เห็นเส้นของแร่อราโกไนต์ได้ ค่อนข้างชัดเจนจากภายนอก	27
รูปที่ 3.5 Micrite fabric ตัวอย่าง BR2 ก) บริเวณใกล้ขอบนอกของหินงอก อยู่ระหว่างชั้น Columnar compact (PPL) ข) XPL, ค) ชั้นบางๆของ Micrite ที่มองสังเกตเห็นได้จากภายนอก (PPL), ง) XPL	28
รูปที่ 3.6 Columnar fabric ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR2	28
รูปที่ 3.7 Elongate columnar fabric ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR1	29
รูปที่ 3.8 ชั้นหินระหว่าง Dendritic open fabric (ลูกศรสีแดง) และ Dendritic compact fabric (ลูกศรสีเหลือง) ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR2	29
รูปที่ 3.9 Dendritic fabric แสดงลักษณะ Scaffold (Scaffold-like morphology) บริเวณลูกศรสีเหลือง แต่บริเวณข้างเคียงเป็น Columnar fabric ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR1	29
รูปที่ 3.10 ก) Dendritic fabric แสดงลักษณะ V-shape (XPL), ตัวอย่าง BR1 ข) Mosaic fabric (XPL), ตัวอย่าง BR3	30
รูปที่ 3.11 ผลึก Aragonite ขนาดใหญ่ ประมาณ 0.8 cm ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR2	30
รูปที่ 4.1 จากซ้ายไปขวา เป็นภาพหินงอกหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยภาพแรกภาพหินงอกด้านที่ถูกตัด ภาพที่สามเป็นภาพด้านหลัง บริเวณสีน้ำเงินคือบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อย ส่วนมากมีรู บริเวณสีเหลืองคือ บริเวณที่มีความหนาแน่นมากบริเวณสีส้มมีความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนมากพบ Columnar fabric และบริเวณสีเขียวมีความหนาแน่นปานกลาง	34
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลระหว่างธาตุร่องรอยของจุดวิเคราะห์ทั้ง 36 จุด และกราฟค่า CT-number ที่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ (บน) แบบจำแนกชนิดของธาตุร่องรอย (ล่าง) แบบปริมาณรวมของธาตุร่องรอย (กลาง) โดยตัวอย่างที่ 1-11 มีค่า CT-number น้อย พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic open และ Aragonite ตัวอย่างที่ 12-22 มีค่า CT-number ปานกลาง พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic compact, Aragonite และ Micrite และ ตัวอย่างที่ 23-36 มีค่า CT-number สูง พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic compact และ Micrite	36

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1.1 ตำแหน่งถ้ำที่ถูกสำรวจทั้งหมด 9 ถ้ำ โดยถ้ำที่ 9 คือจุดศึกษา	3
ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาการดำเนินงาน	11
ตารางที่ 1.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระดับของความสัมพันธ์ (ดัดแปลงจาก Hinkle D. E., 1998)	12
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-number ความหนาแน่นและลักษณะซิลารรณมา (ดัดแปลงจาก Vanghi, 2015)	17
ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HU ความหนาแน่น อัตราการเจริญเติบโต ลักษณะซิลารรณมา อัตราการหยุด และการตีความเกี่ยวกับสภาพอากาศ (ดัดแปลงจาก Walczak, 2015)	17
ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของแร่แคลไซต์และอราโกไนต์	22
ตารางที่ 3.1 ชนิด และปริมาณธาตุร่องรอย (ppm) ของจุดวิเคราะห์ทั้ง 36 จุด จากแผ่นหินขัดมัน ทั้งสามตัวอย่าง	31
ตารางที่ 4.1 ซิลารรณมา และข้อมูลทั่วไปของสภาพแวดล้อมขณะตกสะสมตัว (ดัดแปลงจาก Frisia, 2015)	35
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า CT-number และลักษณะซิลารรณมาที่ได้จากโครงการนี้ และผลที่ได้จาก งานวิจัยของ Vanghi et al. (2015) และ Walczak et al. (2015)	37
ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่น ลักษณะซิลารรณมา และปริมาณธาตุร่องรอยในแต่ละจุดวิเคราะห์	38
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า correlation coefficient (r) ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างข้อมูล CT-number และธาตุร่องรอยแต่ละชนิด บางธาตุ อาทิ Si ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือมากพอ เนื่องจากมีข้อมูลน้อยจึง ไม่นำมาหาความสัมพันธ์	39

บทที่ 1 บทนำ (Introduction)

1.1 ที่มาและความสำคัญ (Background and rationale)

การศึกษานิเวศวิทยาภูมิอากาศบรรพกาล (paleoclimate) นั้นสามารถบ่งบอกสภาพสิ่งแวดล้อมและสภาพอากาศในแต่ละช่วงเวลาในอดีต พร้อมทั้งสามารถนำข้อมูลทางสถิติที่ได้มาวางแผน เพื่อคาดการณ์และ เตรียมตัวรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตได้ (Robinson & Dowsett, 2010) ในปัจจุบันข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ และปริมาณน้ำฝน มีการบันทึกไว้อย่างน้อยเพียง 150 ปีก่อนเท่านั้น (National Oceanic and Atmospheric Administration[NOAA], 2012 : online) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้อาจจะไม่เพียงพอในทางสถิติที่จะใช้ในการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศในอนาคต นักวิทยาศาสตร์จึงต้องทำการศึกษาจากหลักฐานทางธรรมชาติต่างๆที่สามารถบันทึกสภาพแวดล้อม และภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลาได้ในระยะยาว อย่างเช่น แกนน้ำแข็ง (ice core) วงปีไม้ (tree ring) ละอองเรณู (pollen) ตะกอนทะเล (marine sediment) ตะกอนทะเลสาบ (lake sediment) และหินงอก (stalagmite) หินย้อย (stalactite) เป็นต้น

หินงอก มีความเหมาะสมในการนำมาใช้ศึกษาภูมิอากาศบรรพกาล เนื่องจาก 1) สามารถพบได้หลายบริเวณทั่วโลก 2) การหาอายุจากหินงอกโดยใช้วิธีเรเนียม-ธอเรียม (U-Th dating) มีความแม่นยำสูง 3) มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง และเป็นเวลานาน (10^3 - 10^5 ปี) (Fleitmann and Spötl, 2008) และยังสามารถวิเคราะห์ภูมิอากาศและสภาพแวดล้อมบรรพกาล ได้จากทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) เช่น สีลารรณา (petrography) ค่าระดับสีเทา (gray level) และคุณสมบัติทางเคมี (chemical properties) เช่น ธาตุร่องรอย (Trace element) ไอโซโทปเสถียร (stable isotope) โดยโครงการนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (density) ลักษณะสีลารรณา (petrography) และปริมาณธาตุร่องรอย (trace elements) ในหินงอก

จากการศึกษานงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การวิเคราะห์หินงอกด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray computed tomography) ทำให้ทราบค่า CT-number และระดับสีเทา (Grayscale) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มของรังสีเอกซเรย์ที่ลดลงเมื่อผ่านตัวอย่าง ความเข้มของรังสีเอกซเรย์ที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างและความหนาแน่น นอกจากนี้ลักษณะสีลารรณาของหินเองก็มีความเกี่ยวข้องกับค่า CT number เช่นกัน (Walczak et al., 2015; Vanghi et al., 2015)

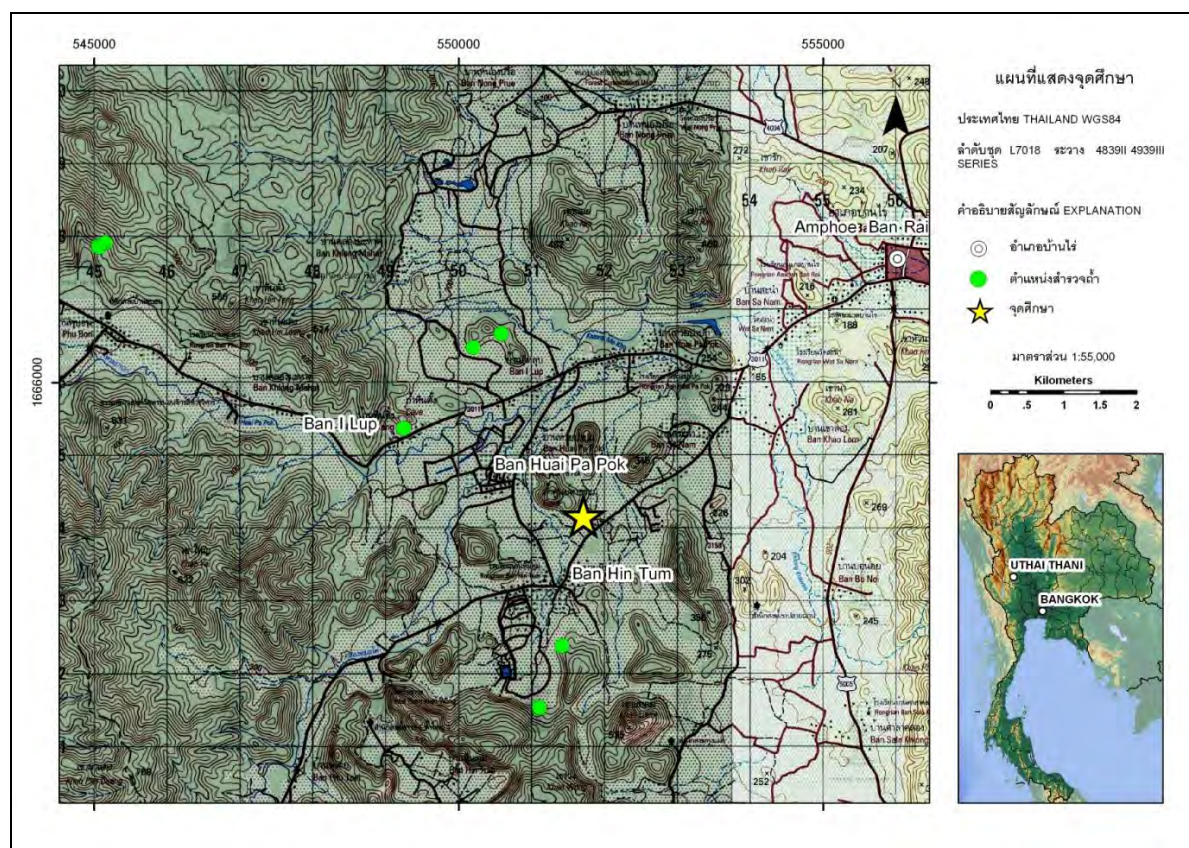
ธาตุร่องรอยที่พบในหินงอก มีมากมาย อาทิ Mg Sr Pb Fe Al Na Zn Ba ซึ่งแต่ละชนิดอาจบ่งบอกถึงภูมิอากาศบรรพกาล สภาพแวดล้อมบรรพกาล หินต้นกำเนิด อุทกวิทยาบรรพกาล (paleohydrology)

ซึ่งเป็นผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (Fairchild et al, 2000; Baldini et al, 2002; Treble, 2008)

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะศิวารรณของหินงอก และความหนาแน่นหรือค่า CT-number รวมถึงการเปรียบเทียบความหนาแน่นและปริมาณธาตุร่องรอย เพื่อทำความเข้าใจและสามารถตีความความสัมพันธ์ของลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของหินงอก ที่อาจเกี่ยวข้องกับภูมิอากาศบรรพกาลหรือสภาพแวดล้อมบรรพกาลในพื้นที่ศึกษา

1.2 พื้นที่ศึกษา (Study area)

ถ้ำหินปูน ในเทือกเขาหินปูนบริเวณบ้านห้วยป่าปก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี ณ เขต 48P พิกัด 0551851E 1664159N โดยถ้ำหินปูนนี้ไม่ได้เป็นสถานที่ท่องเที่ยว มีทางเข้าถ้ำที่เล็กและแคบ รวมถึงสภาพภายในของถ้ำมีหน้าผาและหินถล่มหลายที่ จึงค่อนข้างอันตรายสำหรับการสำรวจและไม่มีใครเข้ามานานแล้วจึงไม่ได้มีการตั้งชื่อถ้ำไว้ นอกจากนี้ยังได้ทำการสำรวจถ้ำบริเวณอำเภอบ้านไร่อีก 8 ถ้ำ เพื่อหาตัวอย่างหินงอกที่เหมาะสมในการศึกษาภูมิอากาศบรรพกาลต่อไป



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษา ถ้ำหินปูนบริเวณบ้านห้วยป่าปก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

ตาราง 1.1 ตำแหน่งถ้ำที่ถูกสำรวจทั้งหมด 9 ถ้ำ โดยถ้ำที่ 9 คือจุดศึกษา

ลำดับที่	UTM X	UTM Y	ELEVATION	GPS ACCURACY
1	551038	1661547	236	n/a
2	551107	1661542	247	15
3	550201	1666482	191	6
4	550583	1666670	230	3
5	549245	1665370	244	3
6	545056	1667878	385	4
7	545063	1667856	396	8
8	545152	1667912	447	15
9	551851	1664159	203	3

1.3 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (General setting of study area)

1.3.1 ภูมิประเทศ (Topography)

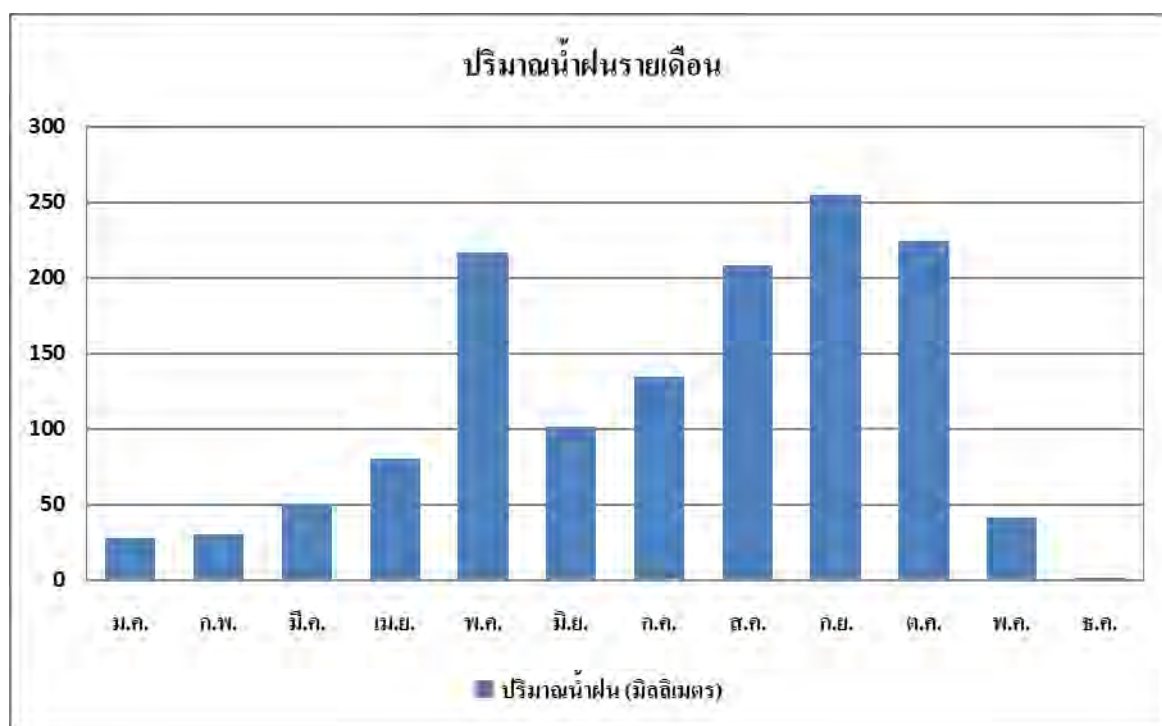
เขาหินปูนบริเวณอำเภอบ้านไร่เป็นเทือกเขามีหลายยอดหรือเขาโดด (Monadnock) กระจายอยู่ทั่วบริเวณที่ราบระหว่างเขาพุนันตีทางทิศตะวันออก และเทือกเขาถนนธงชัยทางตะวันตก แสดงลักษณะภูมิประเทศแบบคาสต์ (Karst topography) ชัดเจน



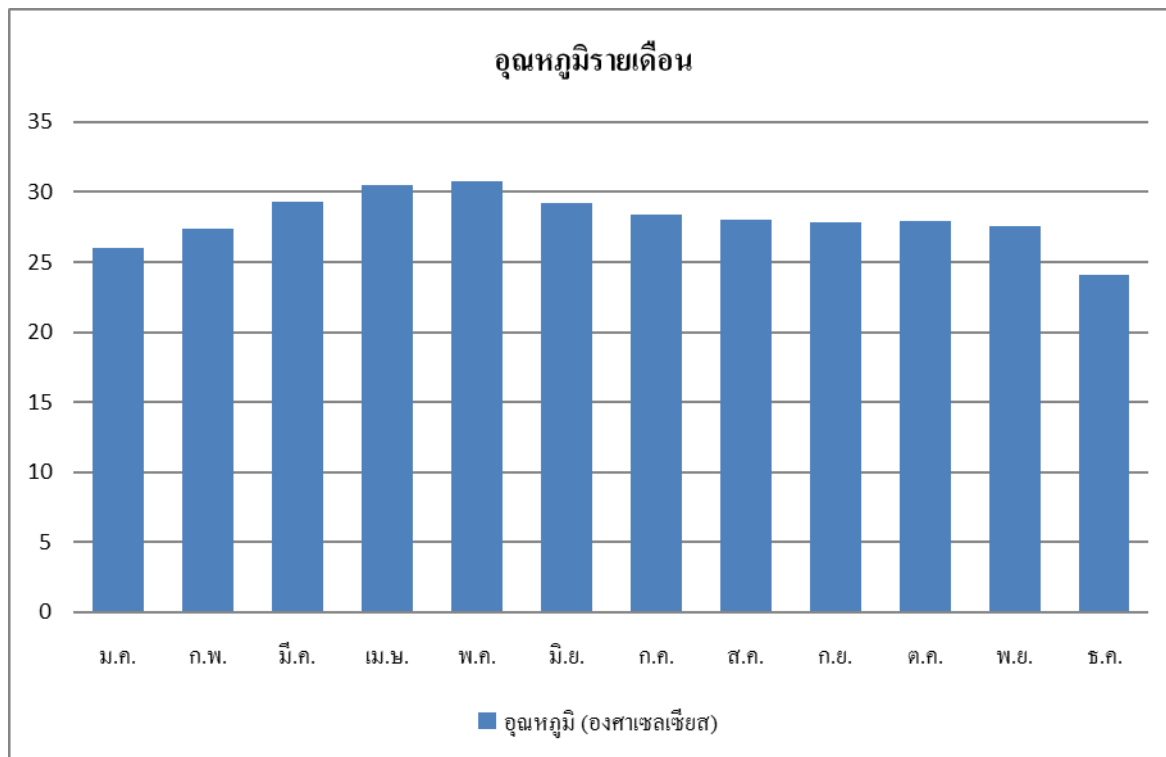
รูปที่ 1.2 ภูมิประเทศบริเวณจุดศึกษา (ดัดแปลงจาก Google earth)

1.3.2 ภูมิอากาศ (Climate)

ลักษณะภูมิอากาศจังหวัดอุทัยธานี มีตั้งแต่อากาศแบบกึ่งร้อนจนถึงอากาศแบบร้อนชื้น สภาพอากาศทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ฤดู โดยฤดูร้อนเริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์จนถึงกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมจนถึงตุลาคม โดยฝนจะตกทางด้านตะวันตกมากกว่า ด้านตะวันออก เนื่องจากอยู่ในเขตอิทธิพลของลมมรสุมและดีเปรสชัน ฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม จนถึงเดือนกุมภาพันธ์ปริมาณน้ำฝนโดยเฉลี่ยทั้งปี 1,770.3 มิลลิเมตร จำนวนวันฝนตกปีละ 105 วัน อุณหภูมิต่ำสุดจะอยู่ในช่วง 17.6 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง 36 องศาเซลเซียส



รูปที่ 1.3 ปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553-2557 ห้วยกระเสียว บ้านทับคล้าย อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี (<http://www.hydro-5.com>)



รูปที่ 1.4 อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2556-2557 จากสถานีอุตุนิยมวิทยา ชัยนาท สกช. (<http://www.tmd.go.th>)

1.3.3 ทรัพยากรป่าไม้ (Forest)

ลักษณะพืชพรรณบริเวณจังหวัดอุทัยธานี แบ่งได้เป็น 5 ลักษณะ

1. **ป่าดิบเขา** เป็นป่าไม่ผลัดใบ พบกระจายในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 1,000-1,554 เมตร ไม้เด่นที่สำคัญได้แก่ ตระกูลไม้ก่อ เช่น ก่อใบเลื่อย ก่อเดือย ก่อหนาม อบเชย จำปา เหมือดเขา ปอชี้แฮด ไม้พื้นล่าง ได้แก่ เฟิร์นและสกุลข่า

2. **ป่าดิบแล้ง** เป็นป่าผลัดใบพบในระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 400-1,000 เมตร ตามหุบเขาซึ่งมีน้ำเฉพาะในฤดูฝนเท่านั้น ดินค่อนข้างลิก เป็นดินร่วนปนทราย พรรณไม้ที่สำคัญ ได้แก่ ยางแดง สะเดา ยางโอน ตะเคียนทอง ยางนา ไม้ชั้นรอง ได้แก่ ค้างคาว กัดลิ้น ลำไยป่า กระเบาหลัก มะไฟป่า และคอนแลน

3. **ป่าเบญจพรรณ** เป็นป่าผลัดใบในช่วงฤดูแล้ง พบบริเวณที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 450-900 เมตร มักมีไม้ไผ่ขึ้นผสมอยู่ด้วย ไม้เด่น ได้แก่ มะค่าโมง สมพง เสลา ตะแบกเปลือกบาง อินทนิลบก คุณ สมสาร มะเฟืองช้าง และมีไม้ไผ่ขึ้นผสม ได้แก่ ไผ่หนาม ไผ่บง ไผ่ซาง ไผ่นวล ไผ่ไร่ และไผ่ข้าวหลาม ไม้พื้นล่าง ได้แก่ หญ้ารงกา หญ้าคมบาง หญ้าแฝก เป็นต้น

4. **ป่าเต็งรัง** เป็นป่าผลัดใบในช่วงฤดูแล้งพบในพื้นที่ดินเก็บความชื้นได้น้อยหน้าดินตื้น และมีหินมาก ไม้เด่นได้แก่ เต็ง รัง เหียง พลวง ไม้ชั้นรอง ได้แก่ พุดป่า ผักหวาน ประงเหล็กม เป้งดอย

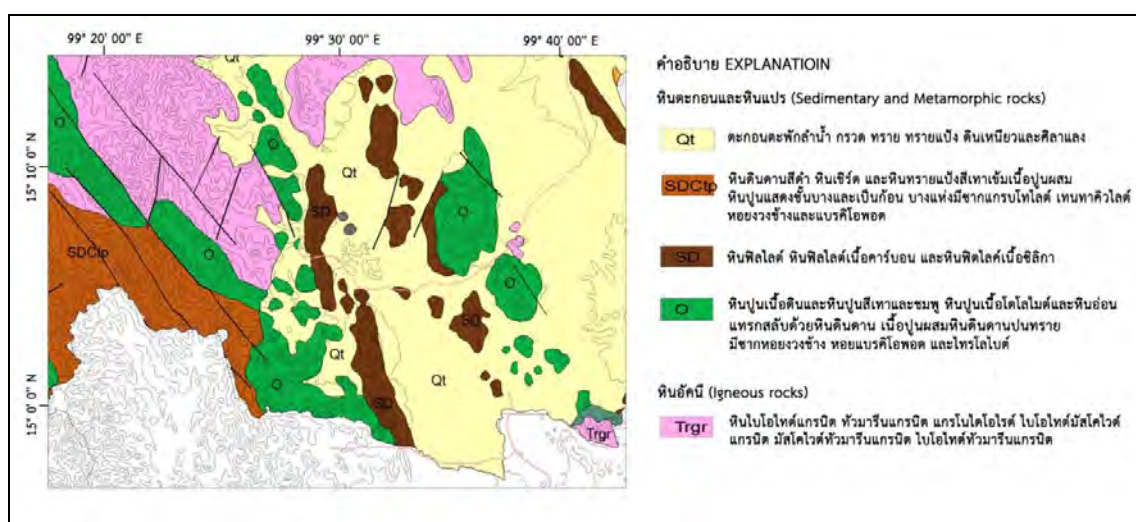
5. ป่าหญ้า มักพบทั่วไปบริเวณพื้นที่ที่เป็นไร่ร้าง หรือพื้นที่ที่ถูกไฟไหม้เป็นประจำ สังคมพืช เปลี่ยนไปกลายเป็นทุ่งหญ้า หญ้าที่สำคัญ ได้แก่ สาบเสือ หญ้าคา

โดยบริเวณพื้นที่ศึกษาและอำเภอบ้านไร่ ส่วนมากเป็นป่าเบญจพรรณที่พบผิวน้อยอยู่ทั่วไป ยกเว้นพื้นที่ที่ใกล้กับเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าทุ่งใหญ่นเรศวร-ห้วยขาแข้ง เป็นป่าดิบแล้งและป่าดิบเขา พืชที่ปลูก ส่วนใหญ่เป็น ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง และยาง

1.3.4 ธรณีวิทยาทั่วไป (General geology)

จากแผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดอุทัยธานี ของกรมทรัพยากรธรณี (2550) พบว่าพื้นที่ศึกษานี้อยู่ในหน่วย หินปูนยุคออร์โดวิเซียน (O) ในหมวดหินปูนท่ามะนาว มีรายละเอียดดังนี้

หมวดหินปูนท่ามะนาว มีชั้นหินแบบฉบับพบมากบริเวณตอนเหนือของจังหวัดกาญจนบุรี พบชั้นหินนี้ กระจายตัวทางทิศใต้และทิศตะวันตก ของจังหวัด บริเวณอำเภอบ้านไร่ เขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่า ห้วยขาแข้ง ระบายชั้นหินวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ลักษณะธรณีวิทยา ตอนล่างเป็นหินหิน โคลนและหินปูนเนื้อดิน วางตัวต่อเนื่องอยู่บนหินควอร์ตไซต์และหินควอตซ์ซีสต์ ของหมวดหินควอร์ตไซต์ เจ้าแฉกร จากนั้นค่อยๆ เปลี่ยนเป็นหินปูนชั้นหนาที่เป็นหน้าผา มีหินเชิร์ตก้อนกลมในชั้นหิน ถัดมาตอนบนเป็น หินปูนชั้นบางสีเทาที่มีการตกผลึกใหม่ บางส่วนมีการแปรสภาพเป็นหินอ่อน หินแคลซ์ซิลิเกต มีหินทรายชั้น บางแทรกสลับแล้วค่อยๆ เปลี่ยนเป็นหินปูนชั้นหนา และพบหินควอร์ตไซต์และหินฟิลไลต์แทรกสลับ ส่วนบนสุดของหมวดหิน ประกอบด้วยหินปูน สีเทาอ่อนถึงเทาเข้มเป็นชั้นบางๆ วางตัวอย่างต่อเนื่อง รองรับหินดินดานสีขาว อายุไซลูเรียน-ดีโวเนียน จากหลักฐานซากดึกดำบรรพ์ที่ปรากฏ หมวดหินปูนท่ามะนาว มีอายุตั้งแต่ ยุคออร์โดวิเซียนตอนต้นถึงตอนปลาย (505-438 ล้านปี) ซากดึกดำบรรพ์ยุคออร์โดวิเซียนตอนต้น เป็นพวกซิสทอยด์และมักไม่พบซากโคโนดอนต์ ซากดึกดำบรรพ์ที่บ่งถึงอายุออร์โดวิเซียนตอนกลาง ได้แก่ ซากดึกดำบรรพ์พวกนอทีลอยด์ ชนิดอาร์มีโนเซอร์รัส



รูปที่ 1.5 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา, อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี (ดัดแปลงจาก กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

1.4 วัตถุประสงค์ (Objectives)

1. เพื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ลักษณะซิลิการรณ และธาตุร่องรอยในหินงอก
2. เพื่อทราบข้อดีของการใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ในการศึกษาหินงอก

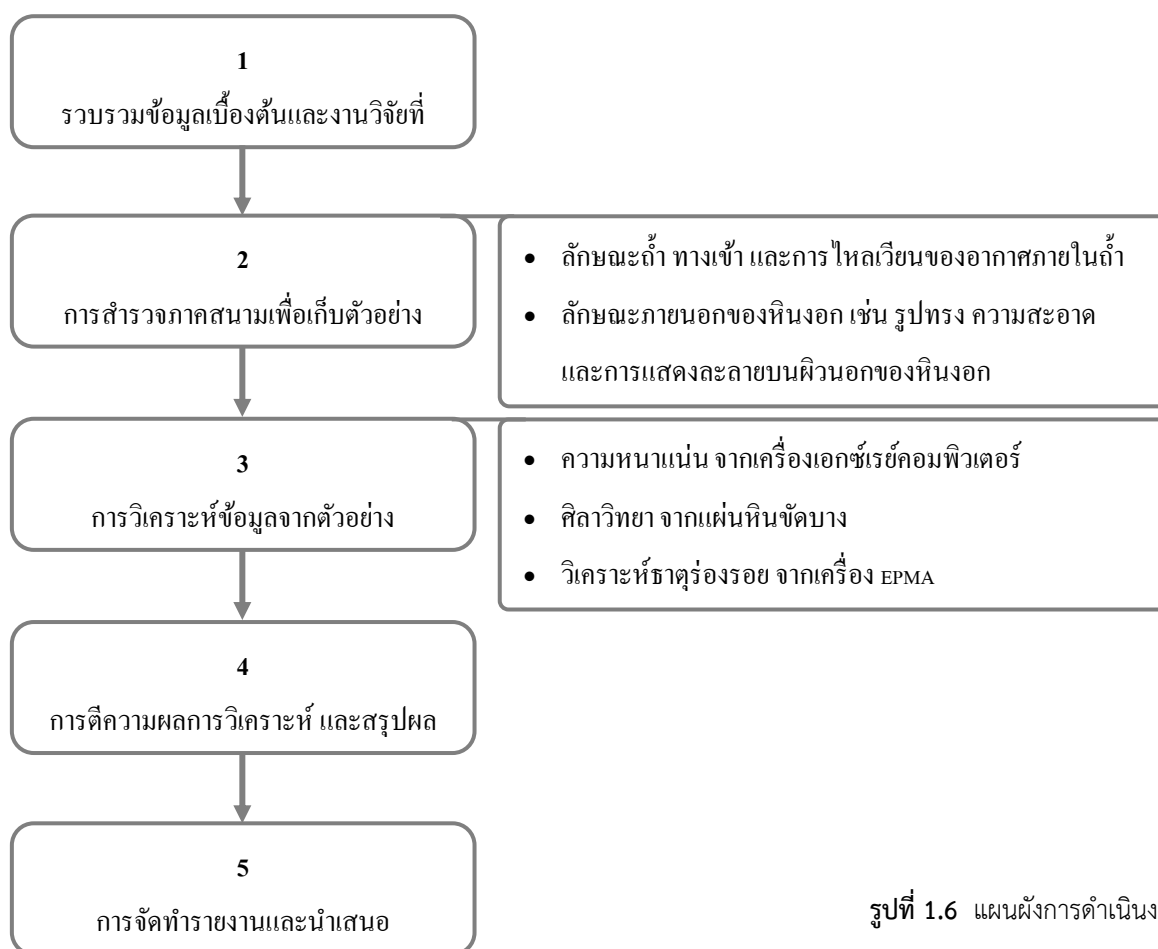
1.5 สมมติฐาน (Hypothesis)

ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับลักษณะซิลิการรณ และปริมาณของธาตุในแต่ละวงเจริญเติบโต (Growth band) ของหินงอก

1.6 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)

1. วัดค่าความหนาแน่นของหินงอก จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์
2. ศึกษาลักษณะซิลิการรณจากแผ่นหินขัดบาง (Thin section)
3. ตรวจสอบปริมาณธาตุร่องรอย โดยใช้เครื่อง EPMA (Electron Probe Micro-Analyzer)

1.7 ระเบียบวิธีการดำเนินงาน (Methodology)



รูปที่ 1.6 แผนผังการดำเนินงาน

1.7.1 แผนการศึกษา

วิธีการดำเนินงานสามารถแบ่งย่อยได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้ (รูป 2)

1.7.1.1 การรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลเบื้องต้นในการเลือกตัวอย่างสำหรับงานวิจัยภูมิอากาศบรรพกาล โดยใช้ตะกอนถ้ำ (speleothem) ในประเทศไทย (Phutong, 2008; Muangsong et al, 2011) รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์กับหินงอกและการวิเคราะห์ความหนาแน่น (Mickler et al, 2004; Vanghi et al, 2015; Walczak et al, 2015) ลักษณะศิลาวรรณาของหินงอก (Frisia et al, 2000; Perrin et al, 2014; Frisia, 2015; Vanghi et al, 2015) และธาตุร่องรอย (Huang & Fairchild, 1998; Fairchild, 2009; Fairchild et al, 2010)

1.7.1.2 การสำรวจภาคสนาม เพื่อเก็บตัวอย่าง

สำรวจถ้ำบริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี ทั้งหมด 8 ถ้ำ โดยถ้ำที่เป็นจุดศึกษาเป็นถ้ำที่มีปากถ้ำแคบ ภายในมีลักษณะเป็นหน้าผาที่เกิดจากการถล่มหลายแห่ง พบมีหินงอกที่แตกหลุดบริเวณพื้น คือตัวอย่าง BR1 และ BR2 และตัวอย่าง BR3 เป็นตัวอย่างที่ยังตั้งอยู่บนพื้นถ้ำ (รูปที่ 1.7)



รูปที่ 1.7 ตัวอย่างหินงอกทั้ง 3 ตัวอย่าง จากถ้ำบริเวณบ้านห้วยป่าปก อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี, สเกลยาว 10 cm

1.7.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ข้อมูล 3 ข้อมูล คือ ความหนาแน่น ศิลาวรรณา และธาตุร่องรอย โดยข้อมูลทั้งสามนี้วิเคราะห์โดยใช้วิธีและเครื่องมือต่างกัน

1) การวิเคราะห์ความหนาแน่น

การเตรียมตัวอย่างก่อนวิเคราะห์ นำตัวอย่างทั้งสามไปตัดแนวยาวด้วยเครื่องตัดหินน้ำมัน เนื่องจากความกว้างของใบมีดเครื่องตัดหินนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางสั้นกว่าความยาวของตัวอย่าง จึงต้องตัดแบ่งครึ่งในแนวขวางก่อนแล้วจึงตัดแนวยาวแบ่งครึ่งเป็น 2 ชิ้นหนาเท่าๆกัน คราบน้ำมันที่ติดอยู่นำไปทำความสะอาดด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath cleanser) 4 ครั้ง ครั้งละ 15-20 นาที เมื่อล้างเสร็จนำไปผึ่งให้แห้งก่อนจะเก็บตัวอย่างไว้ในที่แห้ง

การวิเคราะห์ความหนาแน่น

- วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray- computed tomography) รุ่น GE Discovery 750 HD ณ ศูนย์รังสีวินิจฉัย โรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์ ใช้แหล่งกำเนิดเอกซเรย์หรือหลอดเอกซเรย์ทั้ง 2 หลอด (dual energy) และ 1 หลอด (single- energy) โดยการตั้งค่าเครื่องมือก่อนวินิจฉัยนั้นปรับมาจาก Walczak et al. (2015) ดังนี้ แรงดันไฟฟ้าของหลอดเอกซเรย์ (voltage tube) 140 kV ความเข้มกระแส (current-intensity) 80 mA ความหนาของสไลด์ (slice thickness) 0.625 และการซ้อนกัน (overlap) 0.4 mm

- นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่องเอกซเรย์ ไปหาความหนาแน่น หรือ CT-number โดยใช้โปรแกรม MeVisLab 2.6.2 สร้างภาพหินงอกที่แสดงระดับสีเทา (grayscale) ออกมาสามแนว คือ แนวตัดขวาง (axial section) แนวตัดหน้าหลัง (coronal section) และแนวตัดด้านข้าง (sagittal section) จากนั้นเลือกบริเวณที่แสดงค่า CT-number และสีต่างกันเพื่อนำไปตัดแผ่นหินขัดมัน (polish thin section)

2) การวิเคราะห์สีลาบรรณา

เนื่องจากการแผ่นหินขัดมันนั้นสามารถศึกษาลักษณะสีลาบรรณาภายใต้กล้องได้เช่นเดียวกับแผ่นหินขัดบาง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างเพื่อศึกษาสีลาบรรณาภายใต้กล้องจึงเป็นขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างแผ่นหินขัดมันทั้งหมด โดยจากข้อมูลความหนาแน่น สามารถเลือกพื้นที่ศึกษาได้ 19 บริเวณด้วยกัน (รูปที่ 1.8)

การเตรียมตัวอย่างแผ่นหินแผ่นหินขัดมัน

- เริ่มด้วยการตัดหินขนาด กว้าง 2 cm ยาว 4 cm หนา 0.5 cm 19 ชิ้น จากนั้นนำไปขัดหยาบด้วยเครื่องขัดหยาบและขัดละเอียดด้วยเครื่องขัดละเอียดจนผิวหน้าที่ต้องการมีความมันวาว ตัดแผ่นหินใส่กระจกติดสไลด์สันขนาดกว้าง 2.5 cm ยาว 3.5 cm โดยใช้กาวอีพ็อกซี (epoxy) รอกจนกาวแห้งได้ที่ประมาณ 1 วัน จึงนำตัวอย่างมาขัดด้วยเครื่องขัดหิน

บาง จนกระทั่งหินมีความหนาประมาณ 1 mm จากนั้นจึงนำไปขัดด้วยเครื่องขัดปรับหน้าเรียบด้วยน้ำ และเครื่องขัดปรับหน้าเรียบด้วยผงเพชร (Diamond paste) เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้แผ่นหินจะมีความมัน และสามารถส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านได้ ทำความสะอาดสไลด์ด้วยเอธานอลจนสะอาด นำไปขัดต่อด้วยเครื่องขัดหน้ามันด้วยผ้าสักหลาดขนาด 3 μm และ 1 μm ตามลำดับ จนกระทั่งได้เป็นแผ่นหินขัดมัน โดยแผ่นหินขัดมันที่สามารถใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA ได้นั้นต้องมีหน้าเรียบและมัน เราสามารถตรวจสอบความเรียบของผิวหน้าจากการส่องกล้องจุลทรรศน์ไฟบน

- การวิเคราะห์ซิลิกาวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงโพลาไรต์ส่องผ่าน (Polarizing microscope)

3) การวิเคราะห์ธาตุร่องรอย

- เมื่อวิเคราะห์ซิลิกาพรรณมาแล้วจึงเลือกจุดวิเคราะห์คร่าวๆ โดยเลือกจากบริเวณที่มีความหนาแน่นและลักษณะซิลิกาพรรณต่างกัน รวมถึงบริเวณนั้นต้องมีความเรียบและมันเพียงพอ สไลด์ละ 4-5 จุด

- ก่อนการวิเคราะห์ธาตุร่องรอย ตัวอย่างแผ่นหินขัดมันจะต้องเคลือบคาร์บอนที่ผิวหน้าก่อน และเลือกธาตุร่องรอยที่จะศึกษา ซึ่งธาตุร่องรอยที่นำมาศึกษาในโครงการนี้ได้แก่ Mg Sr Pb Fe Na Zn Mn และ Si ทั้งนี้ในตัวอย่างหินงอกดังกล่าวอาจมีธาตุร่องรอยมากกว่าที่จะศึกษา แต่เนื่องจากเครื่อง EPMA ที่ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าขีดจำกัดของเครื่องที่สามารถวัดได้ (detection limit) คือ 50 ppm

- การวิเคราะห์ธาตุร่องรอย ใช้เครื่อง EPMA ยี่ห้อ JEOL รุ่น JXA-8100 ทำการเลือกจุดวิเคราะห์อีกครั้งภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และทำการบันทึกตำแหน่งลงคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ครั้งละ 3 สไลด์ ทั้งหมด 36 จุด (รูปที่ 1.8) โดยแต่ละจุดจะเลือกพื้นที่ใกล้เคียง 2-3 จุด ทำยสุดท้ายค่าที่ออกมาจะนำมาเฉลี่ยเป็นค่าเดียว เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของปริมาณของธาตุร่องรอยที่ได้

1.7.1.4 การอภิปรายและสรุปผล

1) การอภิปรายเรื่องความหนาแน่นและลักษณะของซิลิกาพรรณที่แตกต่างกัน โดยจำแนกว่าซิลิกาพรรณที่พบนั้นมีกี่ประเภท แต่ละประเภทมี CT-number ประมาณเท่าไร แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า (Vanghi et al, 2015; Walczak et al, 2015)

2) เปรียบเทียบปริมาณและชนิดธาตุร่องรอยในแต่ละจุดศึกษากับความหนาแน่นและลักษณะศิลาวรรณา ทั้งในเชิงทั่วไป และเชิงสถิติ อาทิ การหาความสัมพันธ์ของสองสิ่งจากค่า correlation coefficient (r)

1.7.1.5 การจัดทำรายงานและนำเสนอ

จัดทำรายงานรูปเล่มและนำเสนอการศึกษาให้แก่คณาจารย์ภายในภาควิชา

1.7.2 ระยะเวลาศึกษา

เริ่มต้นโครงการเมื่อต้นเดือนเดือนกันยายน 2558 และสิ้นสุดโครงการเมื่อต้นเดือนพฤษภาคม 2559 โดยมีแผนการศึกษาและระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนดังตาราง 1.2

ตารางที่ 1.2 ระยะเวลาการดำเนินงาน

แผนการศึกษา	ปี 2558				ปี 2559				
	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
รวบรวมข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	—————								
สำรวจภาคสนาม		—							
เตรียมตัวอย่างและวิเคราะห์ข้อมูล			—	—	—	—	—	—	
- ความหนาแน่น			—						
- ตัดหิน			—						
- ทำแผ่นหินขัดมัน				—	—	—	—	—	
- ศิลาวรรณา						—	—	—	
- ธาตุร่องรอย							—	—	
อภิปรายผล							—	—	—
ทำรายงานและสรุปผล					—	—	—	—	—
นำเสนอโครงการ								—	—

1.8 ผลที่คาดว่าจะได้รับ (Expected output)

- ทราบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ลักษณะศิลาวรรณา และธาตุร่องรอยในหินงอก
- ทราบข้อดีของการใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ในการศึกษาหินงอก

1.9 นิยามศัพท์ (Definition of Terms)

โครงเนื้อ (fabric) ลักษณะเนื้อหรือโครงสร้างของมวลหินซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการทางธรณีวิทยาที่ทำให้เกิดหินแต่ละชนิด เช่น การเรียงตัวของตะกอนหรือผลึกแร่ในหินตะกอน จะแสดงถึงสภาพจำเพาะของ

การตกตะกอนและการอัดตัวแน่น แร่แผ่นบางหรือแร่รูปแท่งในหินแปรอาจแสดงทิศทางการเรียงตัวซึ่งสัมพันธ์กับแรงที่กระทำในขณะที่หินเกิด

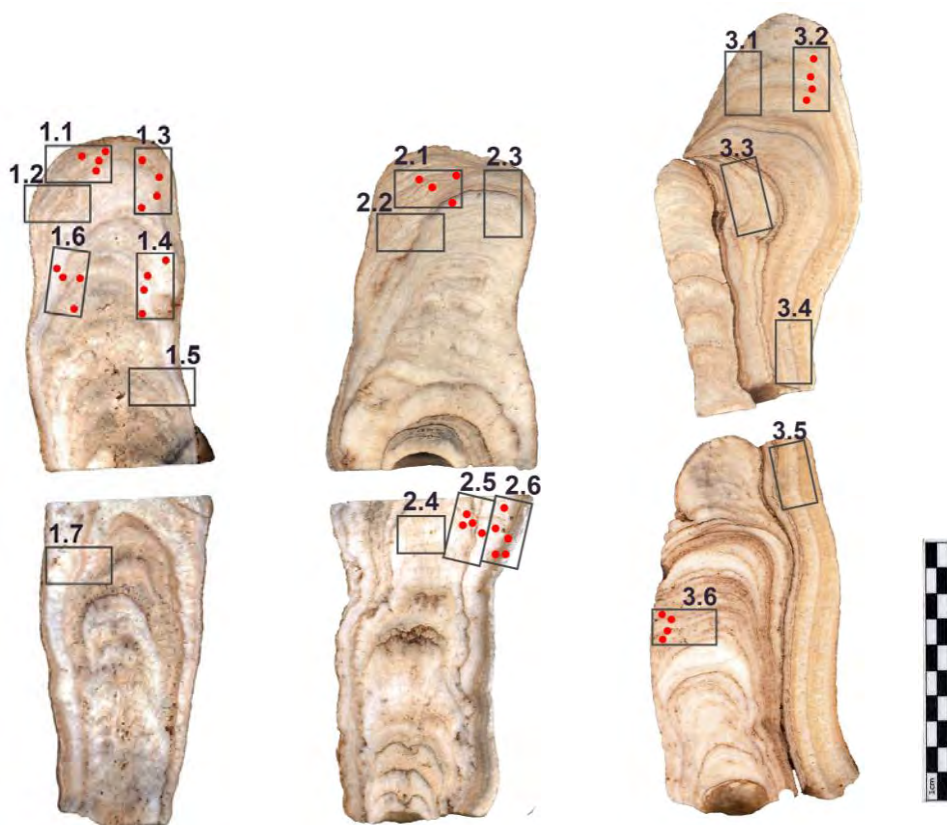
ตัวเลขซีที (CT number) เป็นค่าที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของเนื้อเยื่อต่างๆ กับน้ำ ในบริเวณต่างๆ ของภาพ มีหน่วยเป็น Hounsfield unit (เมื่อ ค่า K เป็นค่าคงที่=1000)

$$\text{CT number} = K [(\mu_{\text{tissue}} - \mu_{\text{water}}) / \mu_{\text{water}}]$$

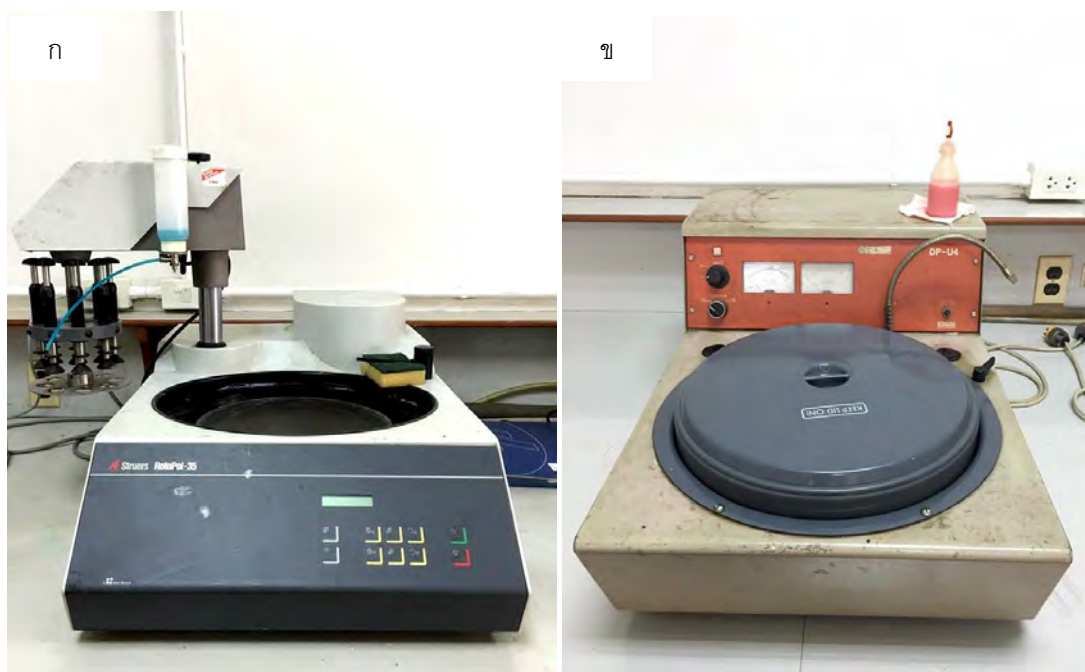
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ค่าที่ใช้วัดทิศทางและระดับของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรสองตัว (X และ Y) ใช้สัญลักษณ์ r แทนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เครื่องหมายของ r จะบอกทิศทางของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ถ้าเป็นลบ แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในทางตรงข้าม คือ เมื่อ X มีค่าเพิ่มขึ้น Y จะมีค่าลดลง ถ้าเป็นบวก แสดงว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์ในทางตรงกัน คือ เมื่อ X มีค่าเพิ่มขึ้น Y จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนระดับความสัมพันธ์ จะพิจารณาจากค่าของ r ถ้ามีค่าเท่ากับ 1 ไม่ว่าจะ + หรือ - แสดงว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างสมบูรณ์ ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงต่อกันเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้

ตารางที่ 1.3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระดับของความสัมพันธ์ (ดัดแปลงจาก Hinkle D. E., 1998)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	ระดับความสัมพันธ์
0.90 - 1.00	สูงมาก
0.70 - 0.90	สูง
0.50 - 0.70	ปานกลาง
0.30 - 0.50	ต่ำ
0.00 - 0.30	ต่ำมาก



รูปที่ 1.8 บริเวณที่ตัดทำแผ่นหินขัดมัน (กรอบสี่เหลี่ยมสีเทา) และจุดวิเคราะห์ธาตุร่องรอย (จุดสีแดง), สเกลความยาว 10 cm



รูปที่ 1.9 (ก) เครื่องขัดปรับหน้าเรียบ สามารถเปลี่ยนแผ่นขัดสำหรับขัดด้วยน้ำและขัดด้วยผงเพชร
(ข) เครื่องขัดหน้ามันด้วยผ้าสักหลาด (ขาว)



รูปที่ 1.10 เครื่อง EPMA ยี่ห้อ JOEL รุ่น JXA-8100 สำหรับวิเคราะห์ธาตุร่องรอย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

2.1 เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray Computed Tomography)

คือ การสร้างภาพแบบตัดเป็นส่วน ๆ (Tomography) ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนมากเทคนิคนี้จะใช้ในทางการแพทย์เพื่อตรวจหาความผิดปกติของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายด้วยลำแสงเอกซ์ โดยฉายลำแสงเอกซ์ผ่านอวัยวะที่ต้องการตรวจในแนวตัดขวาง และให้คอมพิวเตอร์สร้างภาพ ภาพที่ได้จึงเป็นภาพตัดขวางส่วนที่ต้องการตรวจอย่างละเอียด

2.1.1 หลักการทำงาน

เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ใช้หลักการสร้างภาพโดย หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray tube) ปล่อยรังสีเอกซ์เรย์ผ่านวัตถุในแนวตัดขวาง ซึ่งรังสีจะสามารถผ่านวัตถุได้มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของตัวกลาง (Linear attenuation coefficient) ที่แตกต่างกันในแต่ละวัตถุ รังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมาระทบเครื่องรับสัญญาณ (detector) ที่อยู่ตรงข้ามกับหลอดเอกซเรย์ และแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ประเมินผลต่อไป ภาพที่ได้จะเป็นภาพในแนวตัดขวางของวัตถุ ซึ่งภาพในแนวตัดขวางนี้สามารถแปลงเป็นภาพสามมิติได้

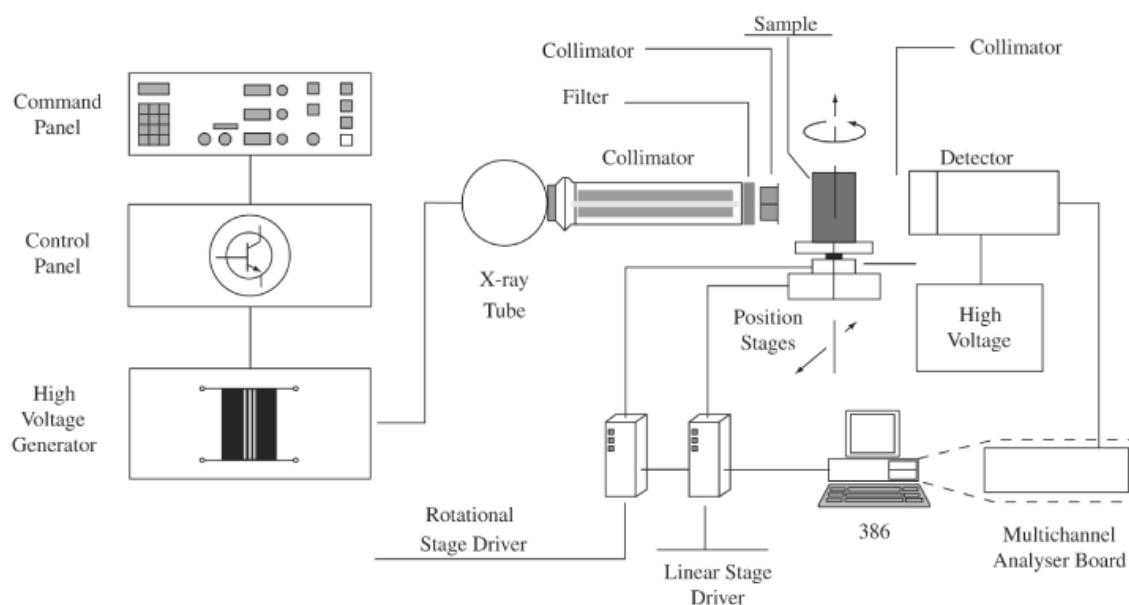


Figure 1. Block diagram of the CT scanner.

รูปที่ 2.1 ผังการทำงานของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (<http://www.scielo.br>)

2.1.2 การใช้เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์กับการศึกษาหินงอก

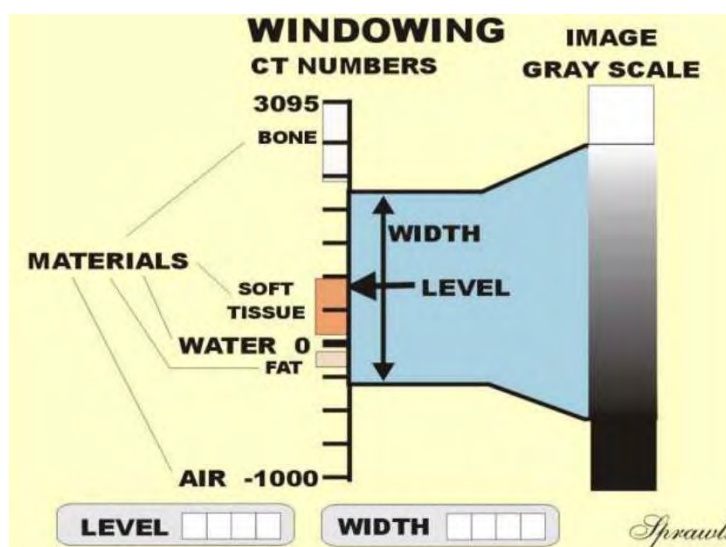
เมื่อไม่นานมานี้มีการนำเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้กับการศึกษาหินงอกมากขึ้น อาทิ

1. การหาความหนาแน่นโดยรวมของตัวอย่าง (Konečný et al., 2015)
2. การวิเคราะห์เกี่ยวกับความหนาแน่นกับลักษณะศิลาวรรณา (Vanghi et al, 2015; Walczak et al, 2015)
3. การเลือกตัวอย่างที่เหมาะสมแก่การศึกษาทางภูมิอากาศบรรพกาล (paleoclimate) และอุทกวิทยาบรรพกาล (paleohydrology) (Mickler et al., 2004)
4. การดูลักษณะรูภายในหินงอก (Shtober-Zisu et al, 2014)

2.2 ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่น (density) โดยทั่วไปหมายถึง การวัดมวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร ยิ่งวัตถุมีความหนาแน่นมากขึ้น มวลต่อหน่วยปริมาตรก็ยิ่งมากขึ้น มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) โดยความหนาแน่นในแต่ละชั้นหินบางของหินงอก มีนัยสัมพันธ์กับการไหลของน้ำและการอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) ของสารละลายแคลเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ถูกควบคุมโดย ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ลักษณะดินและพืชพรรณเหนือถ้ำ (Zhong et al, 2010)

ความหนาแน่นของเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์แสดงได้ออกมาในรูปแบบของ ตัวเลขซีที (CT number) และระดับสีเทา (Greyscale) ที่แตกต่างกันสัมพันธ์กับการลดลงของรังสีเอกซเรย์ ซึ่งการลดลงนี้เกี่ยวกับธาตุองค์ประกอบและความหนาแน่นของตัวอย่าง (Mickler et al, 2004) โดยมีการใช้ค่าความหนาแน่นที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับลักษณะศิลาวรรณา ดังตารางที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-number และระดับสีเทาของรูปภาพ (image gray scale) (<http://www.sprawls.org>)

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CT-number ความหนาแน่นและลักษณะคิลาวรรณา (ดัดแปลงจาก Vanghi et al., 2015)

CT-number (HU)	ความหนาแน่น	ลักษณะคิลาวรรณา
-1024-226	ต่ำมาก	มีรูพรุน
227-776	ต่ำ	Dendritic crystalline texture
777-1176	ปานกลาง	Closed dendritic crystalline texture
1177-1576	สูง	Collumnar crystalline texture
1577-3071	สูงมาก	Micritic crystalline texture

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า HU ความหนาแน่น อัตราการเจริญเติบโต ลักษณะคิลาวรรณา อัตราการหด และการตีความเกี่ยวกับสภาพอากาศ (ดัดแปลงจาก Walczak et al., 2015)

CT-number (HU)	ความหนาแน่น	อัตราการเจริญเติบโต	ลักษณะคิลาวรรณา (Frisia et al, 2015)	อัตราการหด (Frisia et al, 2015)	การตีความเกี่ยวกับภูมิอากาศ ในคาบสมุทรไอบีเรียตอนใต้
< 2000	ต่ำ, ความพรุนมาก	เร็ว	Columnar microcrystalline and Dendritic crystalline texture	ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับฤดูกาล	ฤดูกาลหลากหลาย (เขตภูมิอากาศแบบเมดิเตอร์เรเนียน)
2000-2400	ปานกลาง	ปานกลาง	Opened columnar crystalline texture	คงที่แต่มีอัตราการหดสูง	การกระจายตัวของฝนสม่ำเสมอ (เขตภูมิอากาศอบอุ่น)
>2400	สูง	ช้า	Compacted columnar crystalline texture	คงที่แต่มีอัตราการหดต่ำ	แห้งแล้ง

2.3 คิลาวรรณา (petrography)

การศึกษาลักษณะคิลาวรรณาของหินงอก หรือ การศึกษาโครงเนื้อ (fabric) จากลักษณะสัณฐาน (morphological) และโครงสร้างระดับจุลภาค (microstructural) ทำให้ทราบข้อมูลสำคัญหลายประการ เช่น กระบวนการเปลี่ยนแปลงหลังจากหินงอกตกสะสมตัวแล้ว การเปลี่ยนเฟสจากแร่แคลไซต์เป็นแร่อโรโก-

ไนต์ และกระบวนการแปรรูปใหม่ (neomorphism) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ส่งผลต่อสัญญาณทางเคมี (geochemical signal) (Fairchild & Baker, 2012) และยังสัมพันธ์กับกระบวนการเจริญเติบโตและสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตได้ (Frisia et al., 2000) การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาภายใต้ของหินงอกมีหลากหลายรูปแบบ ดังนี้

2.3.1 Columnar fabric ผลึกมีลักษณะยาวมากกว่าความกว้าง (Kendall & Broughton, 1978) ในอัตราส่วนประมาณ 6:1 (e.g., Folk, 1965) ส่วนมากแล้วรอยต่อระหว่างผลึกจะตรง จึงมักแยกชนิดของ columnar calcite ด้วยลักษณะผลึกที่ยาวและรอยต่อของผลึก (McDermott et al, 1999) อาทิ

1) **Compact และ Open columnar** เป็นลักษณะ columnar ปกติ ที่จำแนกจากรอยต่อระหว่างผลึก Columnar compact จะมีรอยต่อที่เชื่อมกันแน่น และไม่สามารถสังเกตรู (pore) ระหว่างผลึกได้ในกล้องจุลทรรศน์ Columnar open จะสังเกตเห็นว่าระหว่างผลึกจะมีรูหรือมลทินเป็นเส้นๆ (linear inclusion)

- **Compact columnar** เติบโตภายใต้อัตราการหยด (drip rate) คงที่ หยดช้า อัตราการไล่แก๊สสูง (degassing) สภาพอะอิมตัวยิ่งยวดของแคลไซต์ต่ำ (calcite supersaturation state, SI_{cc}) แต่มีค่ามากกว่า 0.35 มีความเข้มข้นของ Mg ในน้ำหยด (dripwater) น้อย (Mg/Ca ratio < 0.3) และพบการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ คอลลอยด์น้อย

- **Open columnar** จะเกิดจากการรวมตัวที่ไม่สมบูรณ์ของผลึก ภายใต้อัตราการหยดสูง อัตราการไล่แก๊สต่ำ และมีอัตราส่วนระหว่าง Mg/Ca ต่ำกว่า Compact columnar มาก โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.01

ความหลากหลายของธาตุร่องรอยที่พบ สะท้อนถึงความไม่บริสุทธิ์ (impurity) มักถูกเก็บไว้ในช่องว่างระหว่างผลึก (intercrystalline space) เนื่องจากการเกิดของ Compact columnar และ Open columnar ต่างกัน การจำแนกประเภทโครงสร้างเนื้อทั้งสองแบบนี้จึงสามารถบ่งบอกสภาพอากาศและอุทกวิทยาท้องถิ่นได้ (Belli et al., 2013)

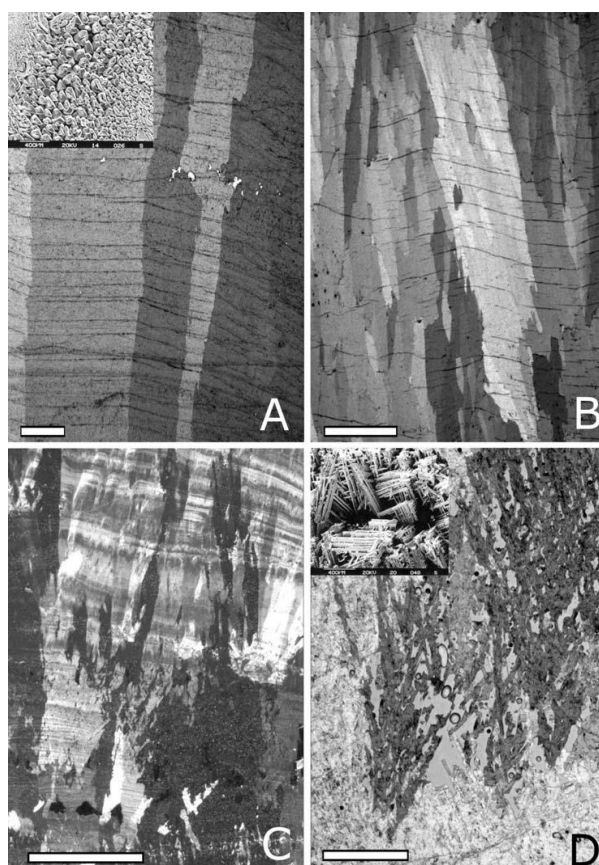
2) **Squat columnar** เกิดบางบริเวณเท่านั้น โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อยกว่าผลึกปกติโดยมีขนาด น้อยกว่า 4:1 หรือ 2:1 บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของผลึกเข้าใกล้สมดุล (equilibrium)

3) **Elongate columnar** พบมากในหินปูนฉาบ (flowstone) มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้าง ตั้งแต่ 4:1 ถึง 6:1 หรืออาจมากกว่า รอยต่อระหว่างผลึกมีลักษณะขรุขระเล็กน้อย และมักพบอนุภาคอินทรีย์คอลลอยด์ (organic colloid) ภายใน โครงสร้างเนื้อชนิดนี้เกิดจากการแย่งกันเจริญเติบโต อัตราการหยดที่คงที่ แต่มีอัตราส่วน Mg/Ca มากกว่า Compact และ Open

columnar บางครั้งอาจเรียก elongate columnar ว่า fibrous ได้ถ้าหากผลึกไม่มีความยืดหยุ่น (Kendall, 1993)

4) **Spherulitic** อาจแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบ คือ Fascicular optic และ Radialial ประกอบด้วยผลึกของ Columnar หลายผลึก มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างมากกว่า columnar ปกติ ($> 10:1$) ใช้ undulatory extinction เป็นตัวบ่งลักษณะ โครงเนื้อชนิดนี้เกิดอย่างรวดเร็ว ในช่วงภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดสูง (high supersaturation) (Sunagawa, 2005) และเกิดอาจภายใต้อิทธิพลของโมเลกุลสารอินทรีย์ (Gonzalez-Munoz et al., 2000)

5) **Microcrystalline** ไม่พบในหินปูนฉาบ พบลักษณะนี้ในชั้นหินงอก มีสีขาวขุ่น ทึบแสง และมีรูพรุนมากกว่า 10% พบมากในหินงอกช่วงอายุ Holocene ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลับกันของชั้นบางสีขาวขุ่นและสีเข้ม ภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นการแทรกของชั้นที่มีอินทรีย์คอลลอยด์ปนในชั้นมาก อัตราส่วนความยาวต่อความกว้างน้อยกว่า 6:1 รอยต่อระหว่างผลึกไร้รูปทรง (irregular) และรูจุลภาคภายในผลึกมาก (intercrystalline microporosity) หากวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope : TEM) จะเห็นผลึกซ้อนทับกันชัดเจน (defect ridden) พบน้อยในหินงอกที่ยังตกสะสมอยู่ (active stalagmite)

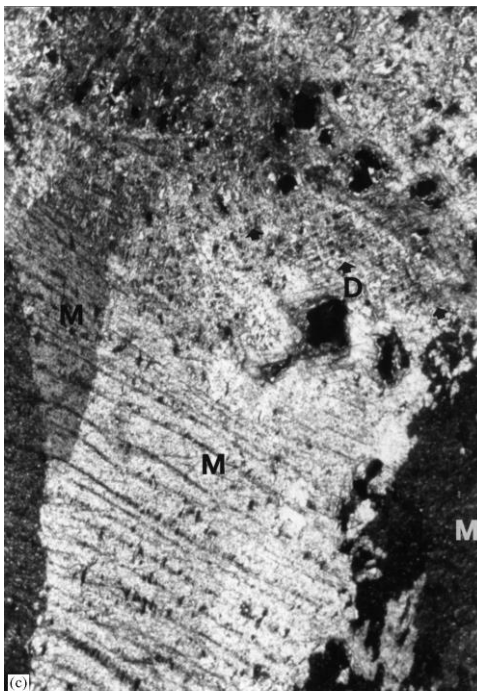


รูปที่ 2.3 A) และ B) Columnar fabric แต่ B) จะมีรอยต่อระหว่างผลึกไม่เรียบและตรงเท่า A), C) Microcrystalline fabric และ D) Dendritic fabric รูปมูมบนขวาของภาพ A), D) คือ ภาพที่ได้จาก SEM (Fairchild et al, 2006)

2.3.2 Dendritic fabric เป็นลักษณะของกลุ่มผลึก (aggregate) ที่แตกกิ่งก้านสาขาล้ำยกิ่งไม้ (dendritic) ทั้งสองกิ่งทำมุมตั้งฉากกัน หรือมีลักษณะแบบ V-shape มีรูพรุนมาก แตกต่างกับ Open columnar ตรงที่ช่องว่างระหว่างผลึกจะกลมกว่า ขณะที่ช่องว่างระหว่างผลึกของ Open columnar จะยาวกว่าตามขอบผลึก และขอบของผลึกมักแทรกกิ่งก้านเข้าไปในผลึกใกล้เคียง บางบริเวณพบโครงเนื้อแบบ Dendritic เพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่แทรกปนอยู่กับโครงเนื้อชนิดอื่น เช่น Columnar, Microcrystalline ขนาดผลึกหลากหลายตั้งแต่ 5 μm ถึงน้อยกว่า 1 μm

Dendritic อาจแยกได้เป็น Dendritic compact และ Dendritic open จากช่องว่างระหว่างผลึก เช่นเดียวกับ Columnar compact และ Columnar open เพียงแต่ซึ่งโครงเนื้อแบบนี้มักเกิดภายใต้สภาวะการอิมมัลชันของแคลไซต์ค่อนข้างสูง มีค่ามากกว่า 0.4 อัตราการหยดไม่สม่ำเสมอ และการไล่แก๊สสูง หากโครงเนื้อแบบ Dendritic ยังคงมีรูพรุนในตัวอย่าง และไม่มีการเติมเต็มรูพรุนโดยสารเชื่อมประสาน (cement) ระหว่างการงอกตกสะสมตัวของหินงอกแล้ว (syndepositional) ดังนั้นโครงเนื้อชนิดนี้สามารถเก็บรักษาสัญญาณทางเคมี ซึ่งบันทึกปริมาณน้ำฝน และดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Frisia, 2015)

2.3.3 Micrite fabric เป็นลักษณะที่ประกอบด้วยผลึกขนาดประมาณ 2 μm ใน PPL เป็นสีดำ และใน XPL จะเป็นสีน้ำตาลเข้ม บางครั้งอาจพบลักษณะชั้นที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆ หรือแบบสโตรมาโตไลต์ (Stromatolite-like) ได้ การศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่า micrite ต้องการ 1) นิเวศโลเริ่มต้นมากกว่าปกติ 2) สารละลายมีการอิมมัลชันสูง และ 3) มีสารอินทรีย์ปนอยู่ด้วย (organic compound) จากการศึกษาชั้นหิน Micrite พบว่า ค่าคาร์บอนไอโซโทปเลื่อนไปทางที่เป็นบวกมากขึ้น (cf. Kazmierczak et al., 1996) เมื่อเทียบกับชั้นหินอื่น อาทิ Columnar เหตุการณ์นี้อาจเกิดจากการผลกระทบของจุลินทรีย์บริเวณผิวของหินงอกจากกระบวนการ micritization ซึ่งบ่งบอกถึงช่วงที่ไม่มีการนำหยดหรืออากาศแห้งแล้ง (Frisia et al., 2012)



รูปที่ 2.4 Micrite fabric (M) และ Dendritic fabric (D) (McDermott et al, 1999)

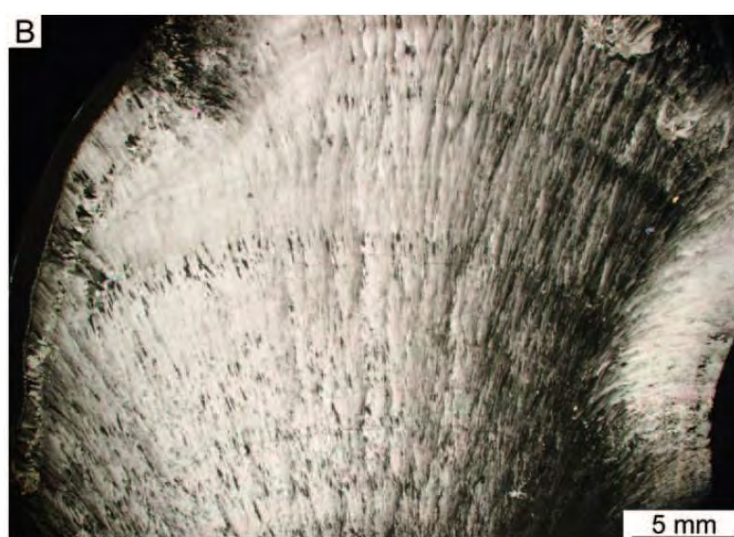
2.3.4 Microsparite and Mosaic fabric ทั้งสองเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นจากการก่อตัวใหม่ (diagenesis) ของแร่แคลไซต์ Microsparite ประกอบไปด้วยผลึกไร้รูปทรงถึงผลึกที่มีหน้าผลึกสมบูรณ์ปานกลาง (anhedral - sub-euhedral crystal) ขนาดผลึกประมาณ $2\ \mu\text{m} - 30\ \mu\text{m}$ จากการสังเกตพบว่า โครงเนื้อชนิดนี้มักจะสัมพันธ์กับ โครงเนื้อ Micrite แบบสโตรมาโตไลต์ และชั้นหินที่มีสารอินปนอยู่มาก (Frisia, 1996) และอาจเกิดจากการพอกของกระบวนการแปรรูปใหม่ของโครงเนื้อแบบ Micrite (Folk, 1965; Folk & Assereto, 1976)

Mosaic ประกอบไปด้วยผลึกที่มีหน้าผลึกสมบูรณ์ถึงสมบูรณ์ปานกลาง (euhedral - sub-euhedral crystal) ขนาด $30\ \mu\text{m} - 1\ \text{cm}$ มักแสดงลักษณะ triple junction และบางครั้งอาจพบลักษณะผลึกคางของแร่แคลไซต์หรืออราโกไนต์ได้ ปริมาณ Mg ที่พบค่อนข้างต่ำ อาจเกิดจากละลายผลึกแคลไซต์โดยน้ำที่ไม่อิ่มตัว (undersaturated water) และตกผลึกใหม่เป็นโครงเนื้อแบบ Mosaic

2.3.5 Aragonite เป็นโพลิมอร์ฟ (Polymorph) ชนิดหนึ่งของแร่แคลไซต์ มีสูตรเคมี คือ CaCO_3 เช่นเดียวกับแร่แคลไซต์ตัวอย่างหิน มักไม่พบแร่ชนิดนี้ในหินปูน แต่จะเจอในสิ่งมีชีวิตที่ประกอบด้วยแร่แคลไซต์อย่างหอย และหินงอก หินงอกโดยทั่วไปประกอบไปด้วยแคลไซต์และอราโกไนต์ปนกัน หรือเป็นแร่อราโกไนต์ หรือแคลไซต์อย่างเดียวกันได้

แร่อราโกไนต์ สามารถสังเกตได้จากตาเปล่า เป็นเส้นสีขาวขุ่น มีลักษณะผลึก (crystal habit) หลายแบบ ขนาดหลากหลาย ตั้งแต่ค่อนข้างเล็กของผลึก Needle-like กว้าง $1-2\ \mu\text{m}$ ยาว $10-15\ \mu\text{m}$ ถึงขนาด

ค่อนข้างใหญ่ของ Ray aragonite กว้าง 30-200 μm และยาวหลายมิลลิเมตร (Perrin et al., 2014) ซึ่งแต่ละลักษณะก็บ่งบอกเงื่อนไขในการเกิดที่แตกต่างกัน เช่น การไล่แก๊สเกิดอย่างช้าๆและมีการระเหยควบคู่กันมักเกิดลักษณะแบบ Needle เป็นต้น ออราโกไนต์ของหินงอกจากถ้ำ Cueva de las Espadas ตกสะสมภายใต้ 3 เฟส (triphasic phase) คือ อากาศ-น้ำ-หิน ซึ่งเกิดเมื่อระดับน้ำใต้ดินลดลง การพบออราโกไนต์ในหินงอกจึงอาจบ่งบอกถึง อัตราการหยดที่ลดลง เนื่องจากการแห้งแล้งของสภาพอากาศ หรืออุทกวิทยาท้องถิ่น (Frisia et al., 2002; Gázquez et al., 2012)



รูปที่ 2.5 Acicular Aragonite แสดงลักษณะใบพัด (fan-like) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (PPL) (Perrin et al., 2014)

ตารางที่ 2.3 ความแตกต่างของแร่แคลไซต์และออราโกไนต์ (Al-Hashim, n.d. : online)

ลักษณะกายภาพ	แร่แคลไซต์	แร่ออราโกไนต์
ระบบผลึก (Crystal system)	เฮกซะโกนอล	ออร์โธโรมบิก
แนวแตกเรียบ (Cleavage)	แนวแตกเรียบแบบรอมโบอีตรอลชัดเจน	ไม่พบแนวแตกเรียบแบบรอมโบอีตรอล
สี (Color)	- ไม่มีสี (PPL) - ค่าสีแทรกสอดสูง (High order interference color) แต่ปกติจะพบสีขาว (XPL)	- ไม่มีสี (PPL) - ค่าสีแทรกสอดสูง (High order interference color) แต่ปกติจะพบสีขาว (XPL)
ความสูงต่ำ (Relief)	ปานกลางถึงสูง (ลบ)	เปลี่ยนตามการหมุน
อื่นๆ (Others)	ปริมาณ Mg มีตั้งแต่สูงถึงต่ำ	ปริมาณ Mg ต่ำมาก

2.4 ธาตุร่องรอย (trace elements)

หมายถึง ธาตุที่ไม่จำเป็นต้องมีสำหรับแร่ชนิดใดชนิดหนึ่ง แต่อาจพบในปริมาณเล็กน้อยได้ (น้อยกว่า 1000 ppm) โดยธาตุนั้นอาจเกาะหรือเกิดอยู่ภายในโครงสร้างผลึกแร่หรือแร่อสัณฐาน

ธาตุร่องรอยที่พบในหินงอกนั้นมีหลากหลาย อาทิ Mg, Sr, H, F, Si, Fe, P, Mn, Pb, Ba, Na, U, Th แต่ส่วนมากจะศึกษา Mg และ Sr ควบคู่กับไอโซโทปเสถียร ธาตุร่องรอยอาจมาจากอนุภาคในลม น้ำฝน ชั้นหินฐาน ตะกอนที่ทับถม ดินอนินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตในดิน เป็นต้น Finch et al. (2001) กล่าวว่า ปัจจัยที่ทำให้ธาตุร่องรอยตกสะสมมีดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของแร่ธาตุในน้ำหยด (drip water)
- 2) ปัจจัยทางกายภาพระหว่างการเกิดผลึก อาทิ อุณหภูมิ
- 3) ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกที่ทำให้ธาตุร่องรอยสะสมตัวได้

ธาตุร่องรอยอย่าง Mg สามารถบ่งบอกอุทกวิทยาบรรพกาล และปริมาณน้ำฝนในบางพื้นที่ เนื่องจาก Mg มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำฝน การหาปริมาณ Mg ในตัวอย่างจึงมีความสำคัญมากหากจะเทียบเคียง ^{18}O กับปริมาณน้ำฝน บางครั้งจึงใช้ Mg เป็นตัวบ่งบอกภูมิอากาศที่รุนแรง อย่างเอลนีโญ (El Niño) หรือช่วงที่เกิดความแห้งแล้งยาวนานหลายสิบปี (Treble et al., 2003) เช่นเดียวกับ Sr ซึ่งสามารถบอกช่วงเวลาที่แห้งแล้งได้ หรือแม้แต่การปะทุภูเขาไฟจากปริมาณ S ที่สูงมาก (Frisia et al., 2008)

งานวิจัยจาก ถ้ำ Obir ในเทือกเขาแอนดีส พบว่า ปริมาณ Pb และ Zn ที่สูงนั้นมาจากน้ำที่ซึมผ่านชั้นหินฐาน (bedrock) ซึ่งสัมพันธ์กับฤดูใบไม้ร่วง (Fairchild et al., 2014)

Yang (2014) กล่าวว่า ธาตุ Mn, Pb สามารถเคลื่อนย้ายไปกับน้ำซึม (infiltrating water) ได้ โดยธาตุเหล่านี้มาจากการละลายหินเย้าคาร์บอเนต (carbonate host rock) และการฟุ้งของหินตะกอนที่มีดินเป็นองค์ประกอบ (Richter et al., 2004) โดยจะเคลื่อนย้ายไปรูปของอนินทรีย์คอลลอยด์หรืออนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การพบคอลลอยด์หรืออนุภาคขนาดเล็กในหินงอกบ่งบอกถึงการซึมที่เพิ่มขึ้น โดยจะพบธาตุ Mn และ Pb เป็นหลักแต่ก็รวมไปถึงธาตุอื่นๆที่เกี่ยวข้องอย่าง Al และ Si ได้

บทที่ 3

ผลการศึกษา (Results)

3.1 เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT-scan)

เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ สามารถสร้างภาพได้ทั้งสองมิติ และสามมิติ ทั้งนี้เพื่อความสามารถในการดูรูปร่าง ลักษณะ และความแตกต่างทางกายภาพภายในวัตถุได้มากขึ้น

3.1.1 ภาพ 2 มิติ

ภาพสองมิติที่สามารถสร้างได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ มีดังนี้

Axial ภาพในแนวตัดขวางวัตถุ หรือภาพในแนวแกน X-Y

Sagittal ภาพในแนวตัดด้านข้างของวัตถุ หรือ ภาพในแนวแกน X-Z

Coronal ภาพในแนวตัดด้านหน้าของวัตถุ หรือภาพในแนวแกน Y-Z



รูปที่ 3.1 ภาพสองมิติตัดสามแนว คือ Coronal, Sagittal และ Axial ตามลำดับ

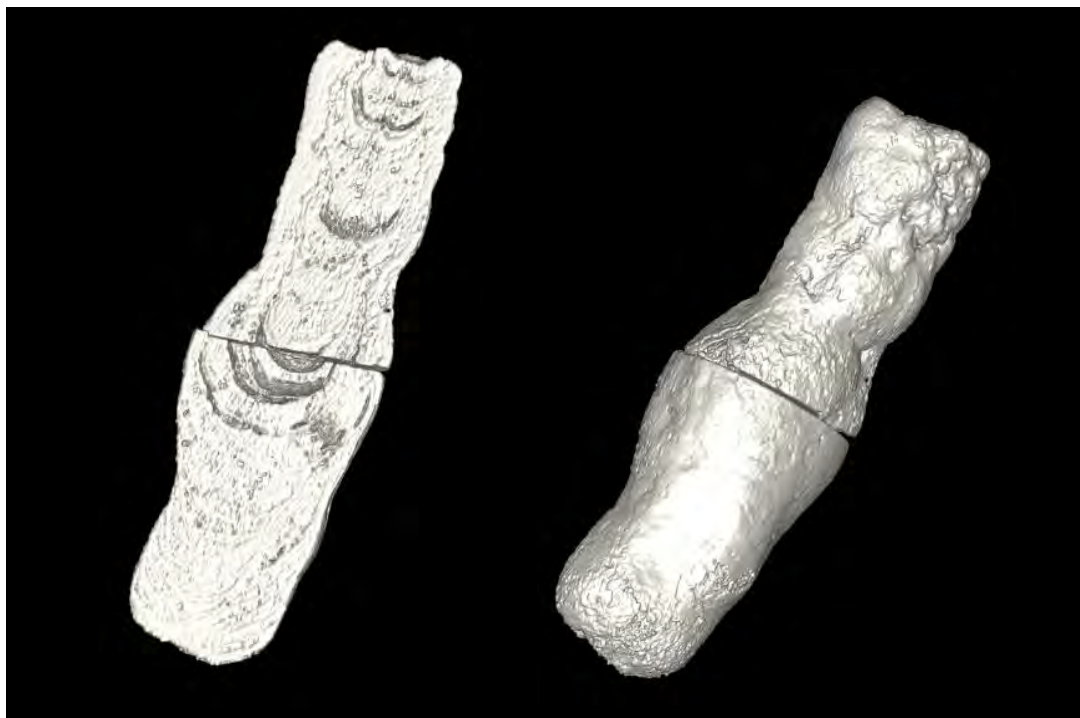


รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบภาพหิ้งงอกตัดตามยาวจากสแกนเนอร์ของเครื่องพิมพ์ (สี) และภาพจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (ขาว-ดำ) บริเวณที่มีสีเทาอ่อนมีความหนาแน่นมากกว่าบริเวณสีเทาเข้ม สีดำแสดงถึงรูพรุนในเนื้อหิ้ง, ตัวอย่าง BR2

ภาพสองมิติทั้งสามแกนสามารถมองเห็นตัวอย่างหิ้งงอกด้วยมุมมองที่ต่างกันไป และภาพแต่ละแนวสามารถเปลี่ยนโทนสี ความคมชัดและความสว่างของภาพ เพื่อให้เห็นบริเวณที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันได้ชัดเจนขึ้น

3.1.2 ภาพ 3 มิติ

การประมวลผลภาพจากสองมิติเป็นภาพสามมิตินั้น สามารถหมุนเพื่อดูรูปร่างของวัตถุได้เป็นทรงกลม 360° มองเห็นลักษณะภายนอกของวัตถุชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะรูของแต่ละตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 ภาพ 3 มิติเห็นลักษณะทางกายภาพภายนอกชัดเจน ทั้งรูและความขรุขระของเนื้อหิน สีเทาเข้มแสดงถึงการกระจายของรูและช่องว่างในเนื้อหิน, ตัวอย่าง BR2

3.2 ศิลาบรรณ (Petrography)

3.2.1 ลักษณะภายนอก

ตัวอย่างหินงอกบริเวณบ้านหินตุ้ม อำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี ทั้งสามตัวอย่าง BR1 BR2 และ BR3 มีลักษณะเป็นทรงกระบอกค่อนข้างตรง เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3.5-4.7 เซนติเมตร ยาวประมาณ 35-40 เซนติเมตร

เมื่อตัดหินงอกตามแนวยาวแล้วจะพบลักษณะชั้นหินบางภายใน ความหนาของชั้นหินบางน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร บางชั้นใส บางชั้นมีสีขาวขุ่น สีน้ำตาลแดง และสีน้ำตาลดำ บางบริเวณอาจสังเกตเห็นลักษณะผลึกยาวเป็นเส้น (รูปที่ 3.3) และผลึกสีเหลี่ยมสีน้ำตาลใสด้วยตาเปล่า นอกจากนี้สิ่งที่สังเกตได้จากการตัดหินงอกในแนวยาว คือ รูขนาดใหญ่ (macrohole) พบกระจายอยู่ทั่วไปในหินงอก มีทั้ง รูตามแกนกลาง (Axial hole) และรูนอกแกนกลาง (Off-axis hole) (Shtober-Zibu et al., 2014) บริเวณขอบนอกอาจพบได้บ้าง มีขนาดประมาณ 0.5-2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างหินอก BR1 (ขวา) และ BR2 (ซ้าย) บริเวณด้านล่าง เห็นเส้นของแร่อราโกไนต์ได้ค่อนข้างชัดเจนจากภายนอก

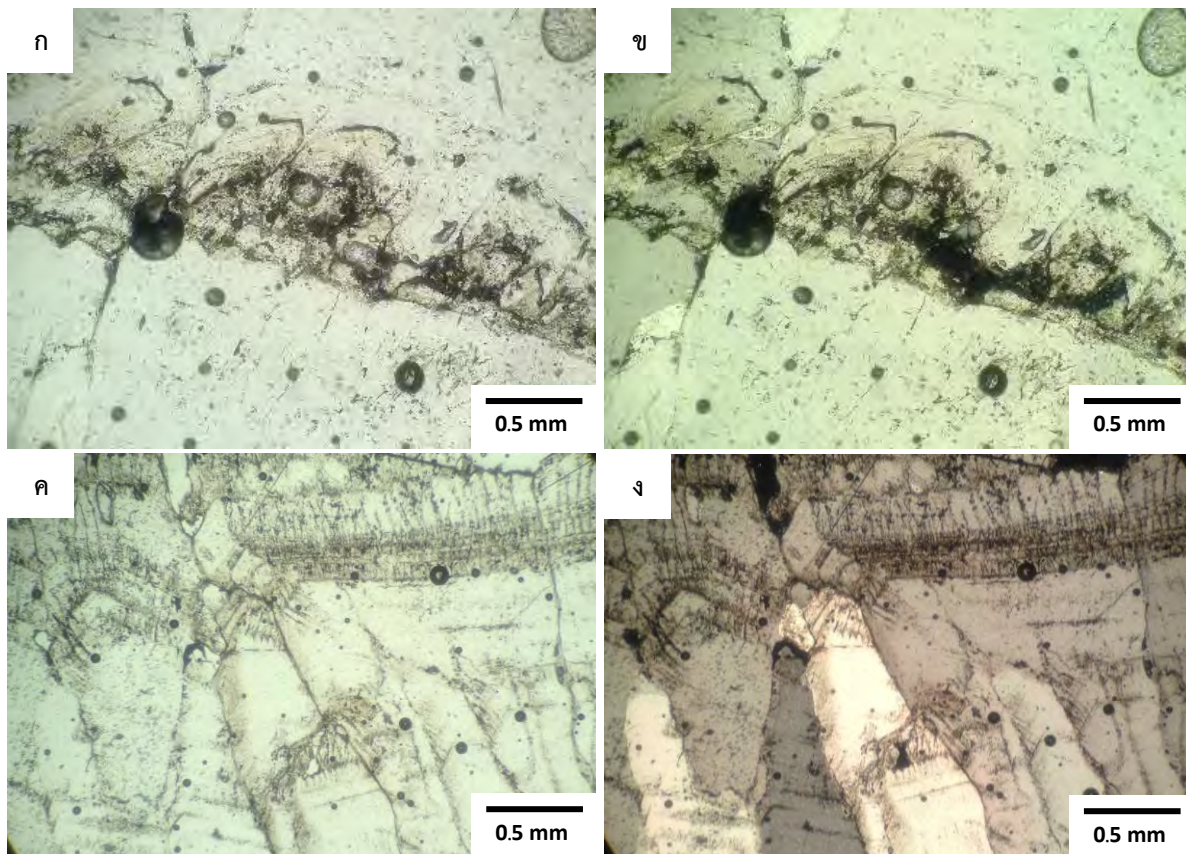
3.2.2 ลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์

ชั้นหินบางภายใต้กล้องจุลทรรศน์จะเห็นแตกต่างกันแล้วแต่บริเวณ อาทิ ชั้นหินบางสีน้ำตาลเข้มที่มองเห็นจากภายนอกชัดเจน คือ โคร่งเนื้อ อย่างหนึ่ง เรียกว่า Micrite (รูปที่ 3.5) บางครั้งก็อาจสังเกตเห็นได้จากภายนอก (รูป 3.5 (ค) (ง))

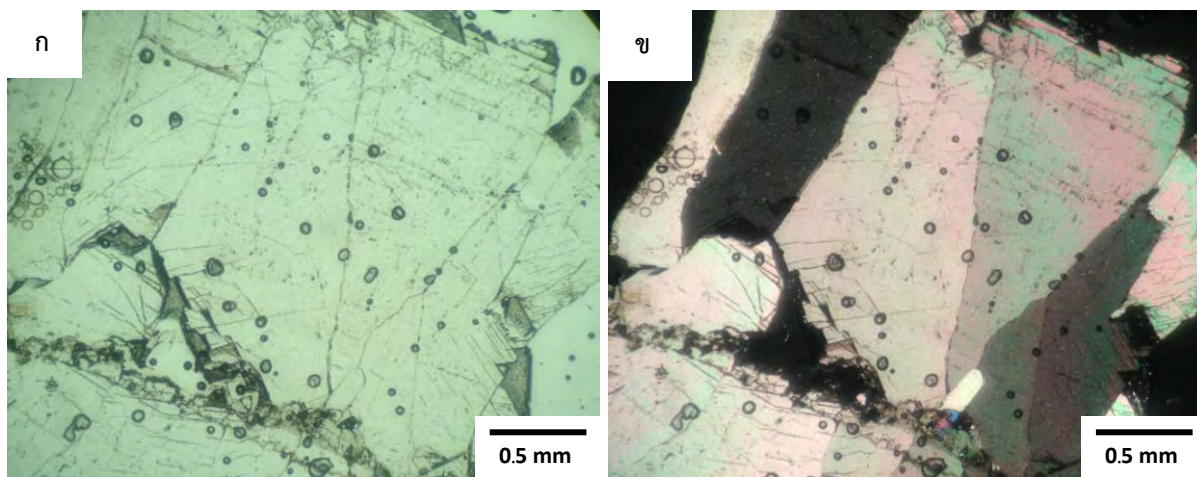
ลักษณะซิลิการรณนาที่พบมากจากทั้งสามตัวอย่างเป็นแบบ Columnar fabric ทั้ง Columnar open fabric, Columnar compact fabric, Columnar microcrystalline fabric, Elongate Columnar type และ Squat Columnar type ลักษณะ Dendritic fabric พบได้น้อยรองลงมา บางส่วนแทรกในโคร่งเนื้อแบบ Columnar (รูปที่ 3.9) แร่อราโกไนต์พบได้ใกล้เคียงกับโคร่งเนื้อแบบ Dendritic ส่วนลักษณะที่พบน้อยที่สุดคือ Micrite fabric

Columnar fabric ภายใต้กล้องจุลทรรศน์มีขนาดยาว ตั้งแต่ น้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ถึง 3 มิลลิเมตร Dendritic fabric มีขนาดเล็ก <math><0.3\text{ mm}</math> มักจะแสดงลักษณะ Scaffold หรือ Dendritic open (รูปที่ 3.9) มีช่องว่างระหว่างผลึกมาก เป็นชั้นสลับกับโคร่งเนื้อที่มีช่องว่างเล็กกว่า คือ Dendritic compact บางบริเวณเห็นเป็น V-shape แร่อราโกไนต์มีความแตกต่างของขนาดมากกว่า Columnar และ Dendritic คือ ตั้งแต่ 0.25 มิลลิเมตร ถึง 8 มิลลิเมตร

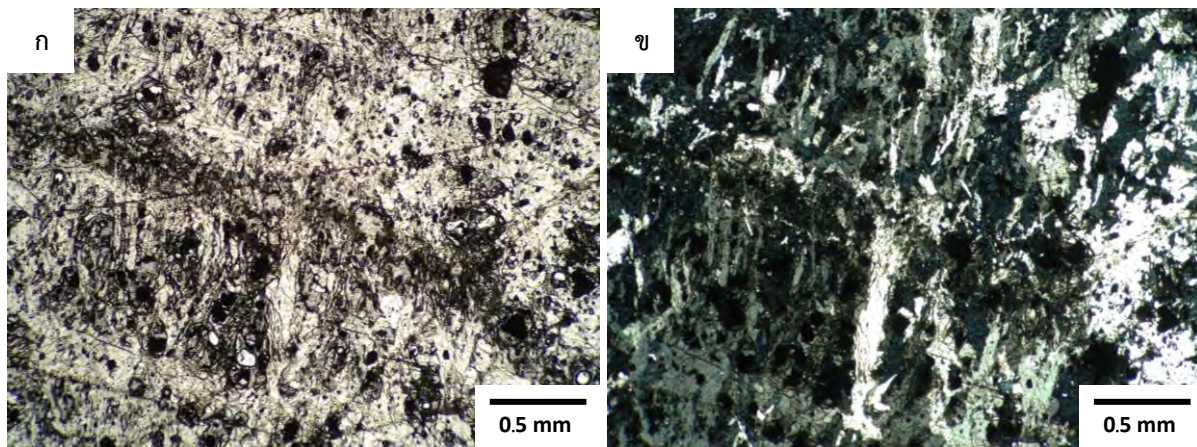
ลักษณะที่เกิดกระบวนการก่อตัวใหม่ (diagenesis) อย่าง Mosaic (รูปที่ 3.10 (ข)) ขนาด <math><0.25\text{ mm}</math> พบเพียงบริเวณเล็กๆบางพื้นที่เท่านั้น โดยเกิดจากการแทนที่ผลึกแคลไซต์เป็นส่วนใหญ่ (ไม่พบผลึกค้ำของอราโกไนต์อยู่)



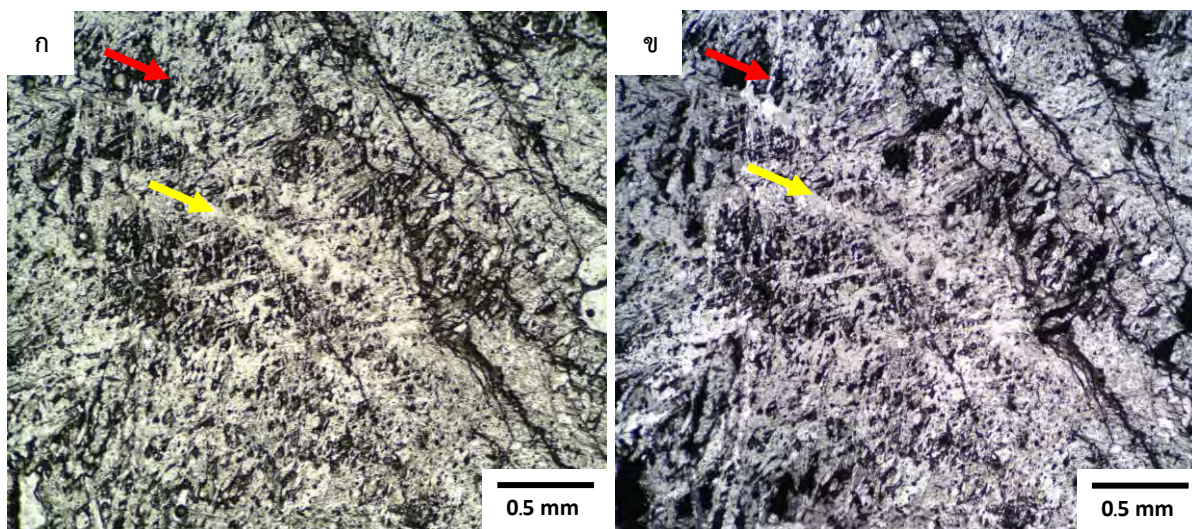
รูปที่ 3.5 Micrite fabric ตัวอย่าง BR2 ก) บริเวณใกล้ขอบนอกของหินงอก อยู่ระหว่างชั้น Columnar compact (PPL) ข) XPL, ค) ชั้นบางๆของ Micrite ที่มองสังเกตเห็นได้จากภายนอก (PPL), ง) XPL



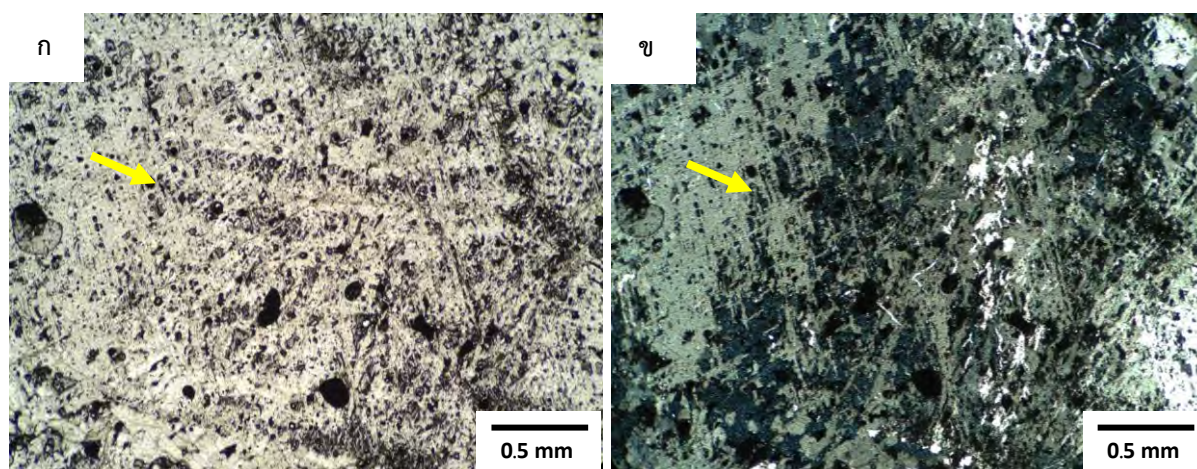
รูปที่ 3.6 Columnar fabric ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR2



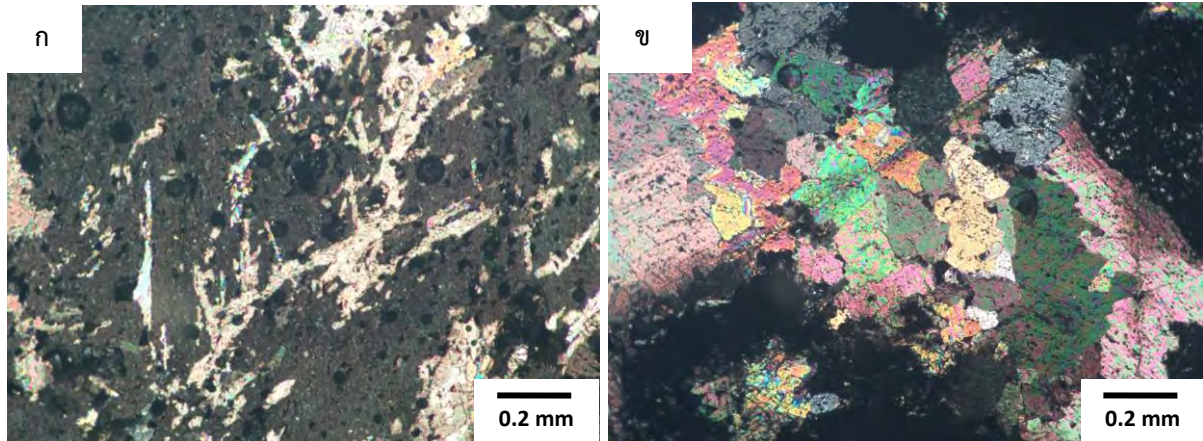
รูปที่ 3.7 Elongate columnar fabric (ก) PPL (ข) XPL, ตัวอย่าง BR1



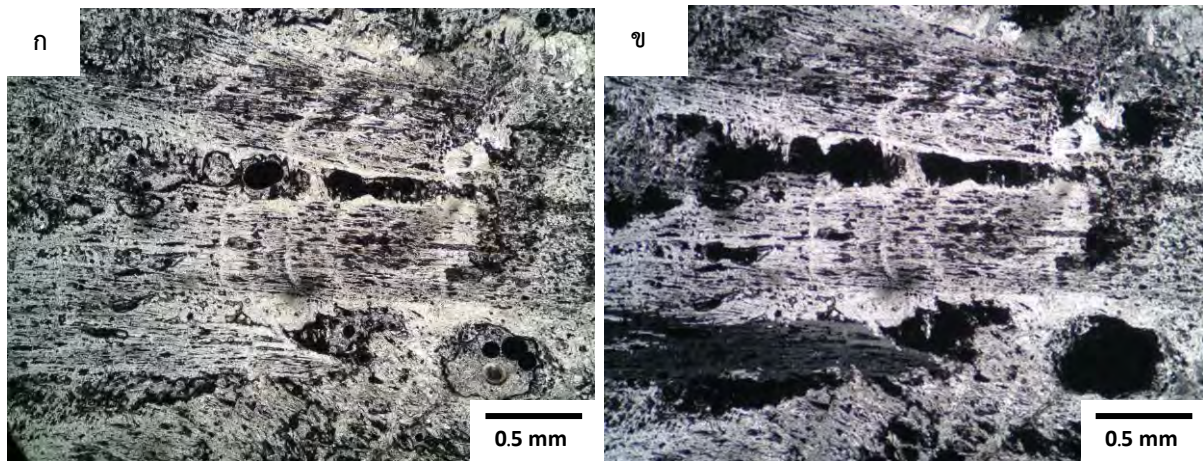
รูปที่ 3.8 ชั้นหินระหว่าง Dendritic open fabric (ลูกครีสีแดง) และ Dendritic compact fabric (ลูกครีเหลือง) (ก) PPL (ข) XPL, ตัวอย่าง BR2



รูปที่ 3.9 Dendritic fabric แสดงลักษณะ Scaffold (Scaffold-like morphology) บริเวณลูกครีเหลือง แต่บริเวณข้างเคียงเป็น Columnar fabric (ก) PPL (ข) XPL, ตัวอย่าง BR1



รูปที่ 3.10 ก) Dendritic fabric แสดงลักษณะ V-shape (XPL), ตัวอย่าง BR1 ข) Mosaic fabric (XPL), ตัวอย่าง BR3



รูปที่ 3.11 ผลึก Aragonite ขนาดใหญ่ ประมาณ 0.8 cm ก) PPL ข) XPL, ตัวอย่าง BR2

3.3 ธาตุร่องรอย (Trace elements)

วิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง EPMA จากตัวอย่างแผ่นหินขัดมันของทั้งสามตัวอย่าง ได้แก่ ตัวอย่างแผ่นหินขัดมันเลขที่ 1.1, 1.3, 1.4, 1.6, 2.1, 2.5, 2.6, 3.2 และ 3.6 รวมทั้งหมด 9 สไลด์ 36 จุด (ภาพที่ 1.8) ชนิดธาตุที่นำไปหาปริมาณนั้นได้มาจากการอ่านงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ท่านอื่น ธาตุบางธาตุ อาทิ Ba U Th Cr ไม่นำมาหาปริมาณเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่อง บางธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้ อย่างเช่น P แต่เมื่อวิเคราะห์ออกมาแล้วกลับมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้น จึงไม่สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ร่วมกับธาตุอื่นๆ ซึ่งพบหลายตำแหน่งได้

เครื่อง EPMA ที่ภาควิชาธรณีวิทยามีขีดจำกัดการวิเคราะห์ (detection limit) อยู่ที่ 50 ppm ข้อมูลดิบได้ค่าออกมาน้อยกว่า 50 ppm จึงต้องตัดทิ้งไป เนื่องจากเป็นข้อมูลที่ไม่มีความน่าเชื่อถือ ตาราง 3.1 คือ ข้อมูลที่จัดเรียงเสร็จแล้ว (เลขศูนย์บางตำแหน่งแสดงค่าวิเคราะห์ที่ต่ำกว่าขีดจำกัดการวิเคราะห์ของเครื่อง บางแห่งหมายถึงไม่มีธาตุนั้นเลย หรือมีจำนวนน้อยมาก)

Mg, Sr, Pb, Fe, Na, Zn, Mn และ Si คือธาตุที่วิเคราะห์แล้วพบหลากหลายตำแหน่งหรือมีปริมาณมาก โดย Mg เป็นธาตุที่พบเกือบทุกตำแหน่งวิเคราะห์มีค่าประมาณ 413 ppm รองลงมาคือ Zn ธาตุอื่นพบบางตำแหน่งเท่านั้น บางธาตุพบไม่ก็ตำแหน่งเท่านั้นแต่มีปริมาณสูงถึง 10000 ppm เช่น Fe และ Si เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 ชนิด และปริมาณธาตุร่องรอย (ppm) ของจุดวิเคราะห์ทั้ง 36 จุด จากแผ่นหินขัดมันทั้งสามตัวอย่าง

#	Ca	Mg	Sr	Pb	Fe	Na	Zn	Mn	Si	Total	Slice no.	Analysis spot
1	391347	213	0	0	0	220	750	0	0	392580	1.1	1
2	401050	370	0	0	87	160	727	0	0	402443	1.1	2
3	394785	260	0	0	65	120	830	0	0	396130	1.1	3
4	397100	510	0	0	95	125	0	0	0	397860	1.1	4
5	397453	210	0	0	0	0	1880	0	0	399720	1.3	1
6	394813	187	0	0	50	73	1767	67	0	397013	1.3	2
7	324105	460	0	70	0	135	990	0	0	325800	1.3	3
8	391285	410	0	0	185	175	0	70	0	392340	1.3	4
9	395020	333	547	0	0	0	113	110	67	396267	1.4	1
10	395950	250	1420	0	0	0	0	133	87	397933	1.4	2
11	395743	667	120	2540	0	0	453	0	0	400793	1.4	3
12	397873	457	0	70	227	2390	237	120	0	403080	1.4	4
13	405257	53	0	107	0	0	63	0	0	405537	1.6	1
14	403395	0	0	315	0	7210	0	0	0	410935	1.6	2
15	407025	0	0	190	365	0	0	0	10660	418280	1.6	3
16	408205	140	0	0	0	175	0	0	0	408990	1.6	4
17	397427	436	0	200	15170	70	546	0	2737	416620	2.1	1
18	397310	645	0	0	755	730	190	145	4415	404225	2.1	2
19	398195	380	0	0	185	0	400	0	0	399160	2.1	3
20	391995	395	0	55	0	0	0	0	0	392470	2.1	4
21	393200	640	165	0	145	215	200	105	0	394730	2.5	1

#	Ca	Mg	Sr	Pb	Fe	Na	Zn	Mn	Si	Total	Slice no.	Analysis spot
22	396475	675	425	90	0	135	0	0	0	398255	2.5	2
23	393140	1235	175	75	305	110	0	0	95	395395	2.5	3
24	395530	485	2185	90	0	75	95	80	0	398540	2.5	4
25	393675	680	275	155	55	0	0	0	0	394900	2.6	1
26	393833	1557	0	460	320	0	117	0	137	396833	2.6	2
27	394780	423	1527	120	63	0	0	0	0	396997	2.6	3
28	393050	405	2220	0	0	0	0	85	0	395990	2.6	4
29	394700	365	150	295	65	100	235	0	0	395965	2.6	5
30	383700	477	0	0	217	123	83	210	0	388243	3.2	2
31	398760	557	0	0	510	160	443	163	0	400627	3.2	3
32	404560	680	0	0	195	110	0	65	0	405655	3.2	4
33	399650	0	0	0	53	0	923	107	0	402863	3.6	1
34	402710	0	0	0	0	225	600	125	0	403885	3.6	2
35	398923	200	0	0	683	0	237	0	0	400177	3.6	3
36	398315	125	0	70	60	0	655	65	0	399310	3.6	4

บทที่ 4

อภิปรายผลการศึกษา (Discussion)

4.1 ความหนาแน่นและลักษณะคิลาวรรณา (Density and Petrography)

จากการศึกษาลักษณะหินงอกภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เทียบกับค่า CT-number ที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2

จาก ตารางที่ 4.2 เห็นได้ชัดว่าค่า CT-number ที่ได้จากการศึกษาโครงการนี้มีความคล้ายคลึงกับทั้งงานวิจัยของ Vanghi et al. (2015) และ Walczak et al. (2015) โดยผลการศึกษาทั้งสามได้มีการแบ่งช่วงค่า CT-number ไม่เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาจากลักษณะคิลาวรรณาแล้ว ก็จัดว่าอยู่ในช่วงเดียวกัน คือ

1) ความหนาแน่นต่ำ (<2000 HU) จะพบลักษณะของ Dendritic มีรูปะปนอยู่ทั่วไป Walczak et al. (2015) จัดลักษณะ Columnar microcrystalline อยู่ในช่วงความหนาแน่นต่ำ แต่เนื่องจากตัวอย่างหินงอกจากอำเภอบ้านไร่ มีการพบลักษณะเช่นนี้น้อยมาก จึงไม่นำไปรวมอยู่ในช่วงดังกล่าว

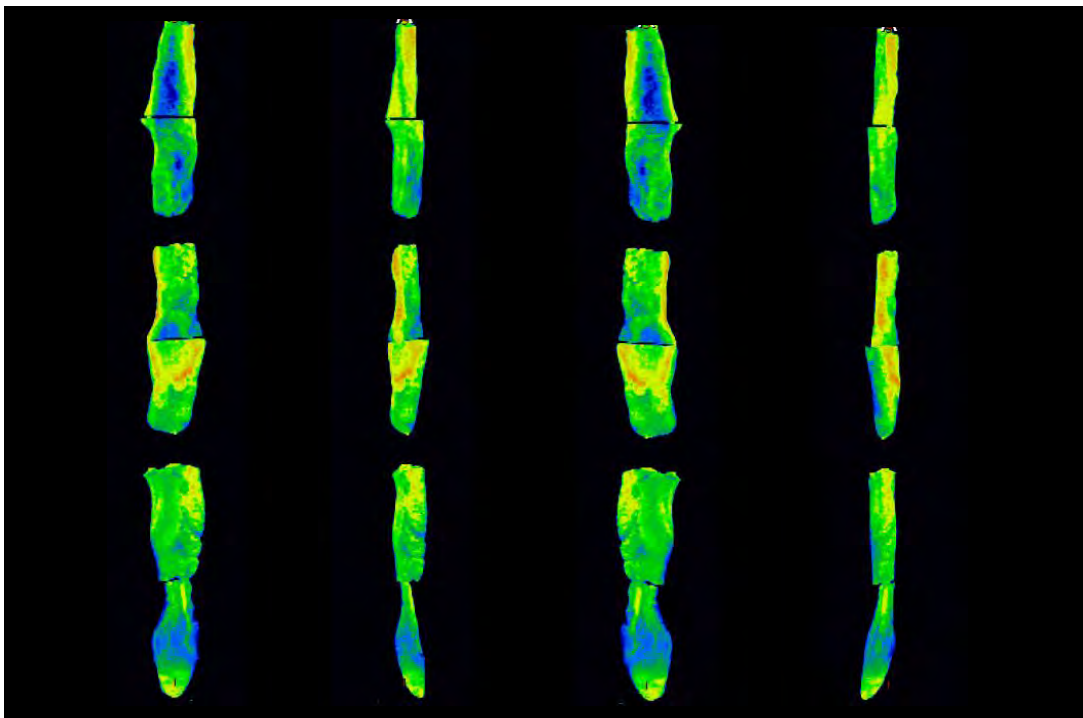
2) ความหนาแน่นปานกลาง (2000-2400 HU) ได้แก่ Closed dendritic และ Opened columnar

3) ความหนาแน่นสูง (>2400 HU) ได้แก่ Compacted columnar

ความหนาแน่นต่ำ กลาง และสูงมาจากลักษณะคิลาวรรณาที่มีปริมาณรูไม่เท่ากัน ทำให้ความหนาแน่นต่างกันด้วย บริเวณที่มีรูมากย่อมมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งลักษณะการเรียงตัวของโครงเนื้อแบบ Dendritic มักจะเกิดช่องว่างปฐมภูมิมากกว่าแบบ Columnar เนื่องจากตกสะสมตัวเร็ว (Walczak et al., 2015) โครงเนื้อแบบ Dendritic จึงมีความหนาแน่นต่ำกว่า ถึงแม้ว่าโครงเนื้อแบบ Columnar บางชนิด อาทิ Opened columnar พบช่องว่างระหว่างผลึกเช่นกัน เนื่องจากมีอัตราการหยุดเร็วกว่า Closed columnar ความหนาแน่นจึงต่ำกว่าและถูกจัดอยู่ระดับปานกลางแทน แต่ยิ่งถือว่าหนาแน่นกว่า Dendritic ส่วนโครงเนื้อแบบ Columnar microcrystalline มีสภาพแวดล้อมการเกิดคล้ายคลึงกับ Dendritic คือ อัตราการหยุดไม่คงที่ และถูกปะปนจากพวกอินทรีย์คอลลอยด์ (Frisia, 2015)

ลักษณะแบบ Micrite ที่พบในหินงอกจากอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี และ Novella มีความหนาแน่นเฉลี่ยค่อนข้างต่างกัน อาจเกิดจากปัจจัยในตัวอย่งหินงอก อาทิ สารอินทรีย์ที่ปะปนอยู่ในชั้น Micrite มีองค์ประกอบและปริมาณสารต่างกัน รวมถึงอาจมีปริมาณความพรุนปฐมภูมิ (primary porosity) หรือ micro-inclusions ต่างกัน จึงส่งผลถึงความหนาแน่นที่วัดได้ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่ได้ หรืออาจมาจากปัจจัยที่เกิดจากผู้ศึกษา รวมถึงวิธีการศึกษา เช่น ความหนาแน่นที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ไม่ใช่ความหนาแน่นเฉพาะจุด แต่เป็นความหนาแน่นเทียบเคียงกับทั้งตัวอย่าง บริเวณที่ควรมีความหนาแน่นมากจึงมีความหนาแน่นลดลงเพราะมีรูพรุนแทรกอยู่ในเนื้อหิน นอกจากนี้ อาจเกิดจากความผิดพลาดของผู้ศึกษาในการเทียบเคียงชั้น เป็นต้น

ช่วงความหนาแน่นที่ไม่มีให้เปรียบกับงานเก่าคือ 1000-1300 HU ของแร่ธาไนด์ เนื่องจากตัวอย่าง หินงอกของทั้งสองงานวิจัยไม่มีรายงานว่าพบแร่ธาไนด์ในเนื้อหิน จึงอาจเกิดเป็นคำถามว่าความหนาแน่น ในช่วงที่ค่อนข้างต่ำนี้แสดงถึงการแสดงออกของแร่ธาไนด์ในเนื้อหินหรือไม่ เช่นเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้น เกี่ยวกับความผิดพลาดของผู้ศึกษา รวมถึงเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ แร่ธาไนด์อาจมีเหตุผลให้ไม่น่าเชื่อถือมากกว่า ตั้งแต่การพิจารณาว่าเป็นแร่ธาไนด์จริงหรือไม่ภายใต้กล้อง การจำแนกแร่ธาไนด์ และแคลไซต์ออกภายใต้กล้องค่อนข้างยาก และเมื่อดูจากรูปลักษณะภายนอกแล้วก็อาจคล้ายโครงเนื้อแบบ Dendritic และ Acicular calcite ทั้งนี้อาจต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม



รูปที่ 4.1 จากซ้ายไปขวา เป็นภาพหินงอกหมุนตามเข็มนาฬิกา โดยภาพแรกภาพหินงอกด้านที่ถูกตัด ภาพที่สามเป็นภาพ ด้านหลัง บริเวณสีน้ำเงินคือบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อย ส่วนมากมีรู บริเวณสีเหลืองคือบริเวณที่มีความหนาแน่นมาก บริเวณสีส้มมีความหนาแน่นมากที่สุด ส่วนมากพบ Columnar fabric และบริเวณสีเขียวมีความหนาแน่นปานกลาง

4.2 ศิลาวรรณาและสภาพแวดล้อมระหว่างการตกสะสมตัว (Petrography and Environment of Formation)

ลักษณะศิลาวรรณาที่แตกต่างกัน เนื่องจากมีกระบวนการเกิดแตกต่างกัน เช่น อัตราการเจริญเติบโต อัตราการหยุด การอิมมูตยั้งยวดของแคลไซต์ การไล่แก๊สออก ปริมาณนิวคลีโอเริ่มต้น ซึ่งแสดงออกถึง สภาพแวดล้อมขณะเกิดที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ศิลาวรรณา และข้อมูลทั่วไปของสภาพแวดล้อมขณะตกสะสมตัว (ดัดแปลงจาก Frisia, 2015)

ศิลาวรรณา	สภาพแวดล้อม
Aragonite	อาจบ่งบอกถึงช่วงที่แห้งแล้ง
Dendritic	อัตราการหยดไม่คงที่ การไล่แก๊สสูง มักพบอนุภาค ไอออน หรือการรบกวนทางชีวภาพ
Columnar microcrystalline	อัตราการหยดไม่คงที่ ฤดูกาลหลากหลาย มักพบการปนเปื้อนของอนุภาคคอลลอยด์
Columnar open	อัตราการหยดคงที่ หยดเร็วกว่า Columnar compact ปริมาณสารปนเปื้อนน้อย
Columnar compact	อัตราการหยดคงที่ หยดช้า ปริมาณสารปนเปื้อนน้อย
Micrite	การรบกวนทางชีวภาพ อัตราการไหลช้า อาจบ่งบอกถึงสภาพอากาศที่แห้งแล้ง
Mosaic	เกิดจากการ diagenesis หากเกิดการแทนที่ของผลึกแร่แคลไซต์จะไม่พล่องรอยผลึกเก่า

4.3 ธาตุร่องรอย ความหนาแน่น และศิลาวรรณา (Trace element Density and Petrography)

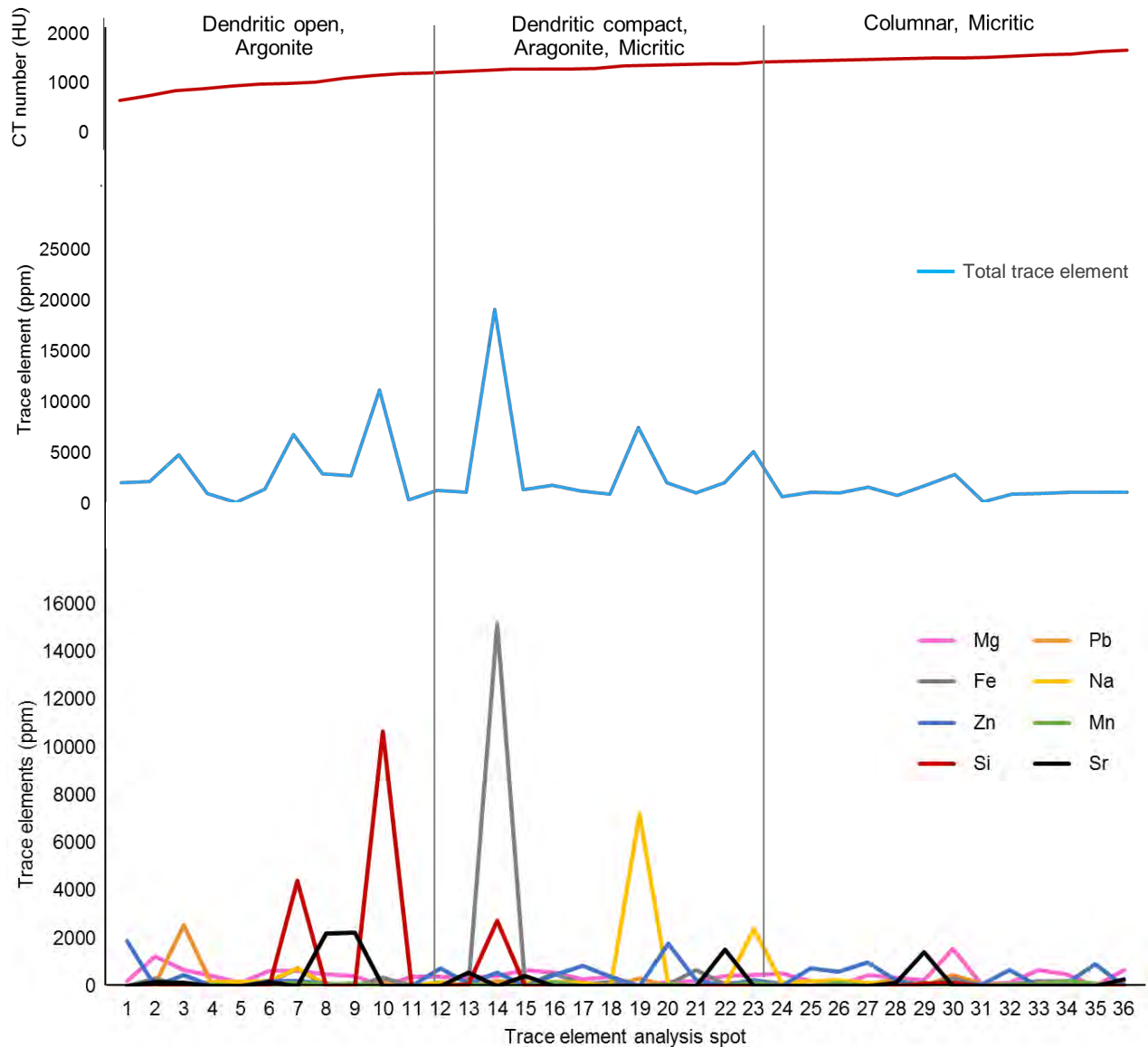
ผลการศึกษาปริมาณธาตุร่องรอยในหินงอก เมื่อเทียบกับตัวเลขซีที และลักษณะศิลาวรรณาประกอบกันแล้ว (ตาราง 4.2) พบว่าปริมาณธาตุร่องรอยมีความสัมพันธ์กับลักษณะศิลาวรรณาอย่างเด่นชัด แต่แสดงความสัมพันธ์กับความหนาแน่นที่ไม่ชัดเจน เมื่อหาความสัมพันธ์โดยการเทียบสหสัมพันธ์ (correlation) (ตาราง 4.3) พบว่าปริมาณธาตุแต่ละชนิดและตัวเลขซีทีที่มีความสัมพันธ์ในระดับต่ำมาก ($-0.1740 < r < 0.1355$) ได้แก่ Mg Ca Al Na Zn และ Sr ความสัมพันธ์ในระดับต่ำ ได้แก่ Pb ($r = -0.4429$), Fe (-0.3157) และ Mn ($r = 0.3197$)

กราฟรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าปริมาณธาตุร่องรอยมีมากในช่วงความหนาแน่นประมาณ 1100 – 1330 ซึ่งอยู่ระหว่างช่วงความหนาแน่นต่ำถึงปานกลางในรายงานนี้ แต่อยู่ในความหนาแน่นระดับต่ำเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Vanghi et al. (2015) และ Walczak et al. (2015)

จากตารางที่ 4.3 ตำแหน่งวิเคราะห์ที่มีปริมาณธาตุร่องรอยจำนวนมาก ส่วนมากพบโครงเนื้อแบบ Dendritic open ซึ่งมีช่องว่างปฐมภูมิมาก Frisia (2015) กล่าวว่า หากโครงเนื้อแบบ Dendritic ยังคงมีรูพรุนในตัวอย่าง และไม่มีการเติมเต็มรูพรุนโดยสารเชื่อมประสาน (cement) ระหว่างการงอกตกสะสมตัวของหินงอกแล้ว (syndepositional) ดังนั้นโครงเนื้อชนิดนี้สามารถเก็บรักษาสัญญาณทางเคมี ซึ่งบันทึกปริมาณน้ำฝน

และดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากค่ากล่าวนี้แสดงว่าโครงเนื้อแบบ Dendritic อาจสัมพันธ์กับไอโซโทปเสถียรหรือปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่าง

ขณะที่ Baker et al., (2000) กล่าวว่า ในช่วงฤดูแล้งมักจะพบว่าปริมาณธาตุร่องรอยเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น โครงเนื้อแบบ Micrite จึงอาจพบธาตุร่องรอยปริมาณมากได้เช่นกัน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลระหว่างธาตุร่องรอยของจุดวิเคราะห์ทั้ง 36 จุด และกราฟค่า CT-number ที่มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ (บน) แบบจำแนกชนิดของธาตุร่องรอย (ล่าง) แบบปริมาณรวมของธาตุร่องรอย (กลาง) โดยตัวอย่างที่ 1-11 มีค่า CT-number น้อย พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic open และ Aragonite ตัวอย่างที่ 12-22 มีค่า CT-number ปานกลาง พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic compact, Aragonite และ Micrite และ ตัวอย่างที่ 23-36 มีค่า CT-number สูง พบลักษณะคิลาวรรณาแบบ Dendritic compact และ Micrite

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า CT-number และลักษณะคิลาวรรณาที่ได้จากโครงการนี้ และผลที่ได้จากงานวิจัยของ Vanghi et al. (2015) และ Walczak et al. (2015)

โครงการนี้		Vanghi et al. (2015)		Walczak et al. (2015)				
CT-number (HU)	คิลาวรรณา	CT-number (HU)	คิลาวรรณา	CT-number (HU)	ลักษณะคิลาวรรณา (Frisia et al, 2015)	ความหนาแน่น	อัตราการเจริญเติบโต	อัตราการหยุด (Frisia et al, 2015)
<1200	Opened dendritic	<226	รูพรุน	< 2000	Columnar microcrystalline , Dendritic	ต่ำ, รูพรุน	เร็ว	ไม่คงที่, ฤดูกาลเปลี่ยนแปลงบ่อย
	open , Aragonite	227-776	Dendritic					
1200-1400	Closed dendritic, Micrite, Aragonite	777-1176	Closed dendritic					
1401-1550	Columnar, Micritic	1177-1576	Columnar					
		1577-3071	Micrite	2000-2400	Opened columnar	ปานกลาง	ปานกลาง	คงที่ แต่มีอัตราการหยุดสูง
				>2400	Compacted columnar	สูง	ช้า	คงที่ แต่มีอัตราการหยุดต่ำ

หมายเหตุ ตารางของโครงการนี้จำแนกความหนาแน่นตามลักษณะคิลาวรรณาที่เห็นได้ชัด และพบมากภายใต้แผ่นหิน
 ชัดบางเท่านั้น

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาแน่น ลักษณะซิลิการรรมมา และปริมาณธาตุร่องรอยในแต่ละจุดวิเคราะห์

#	Mg	Pb	Fe	Na	Zn	Mn	Si	Sr	Total trace element	Ca	CT number (HU)	Petrography
1	210	0	0	0	1880	0	0	0	2090	397453	936	Dendritic open
2	1235	75	305	110	0	0	95	175	1995	393140	1031	Micrite
3	667	2540	0	0	453	0	0	120	3780	395743	1062	Dendritic open
4	410	0	185	175	0	70	0	0	840	391285	1086	Dendritic open
5	140	0	0	175	0	0	0	0	315	408205	1117	Aragonite
6	640	0	145	215	200	105	0	165	1470	393200	1129	Micrite
7	645	0	755	730	190	145	4415	0	6880	397310	1150	Dendritic open
8	485	90	0	75	95	80	0	2185	3010	395530	1201	Mosaic
9	405	0	0	0	0	85	0	2220	2710	393050	1203	Mosaic
10	0	190	365	0	0	0	10660	0	11215	407025	1205	Dendritic open
11	395	55	0	0	0	0	0	0	450	391995	1214	Columnar open
12	370	0	867	160	727	0	0	0	2124	401050	1234	Columnar
13	333	0	0	0	113	110	67	547	1170	395020	1268	Dendritic compact
14	437	200	15170	70	547	0	2737	0	19161	397427	1287	Dendritic open
15	675	90	0	135	0	0	0	425	1325	396475	1290	Columnar
16	557	0	510	160	443	163	0	0	1833	398760	1294	Dendritic compact
17	260	0	65	120	830	0	0	0	1275	394785	1300	Dendritic compact
18	380	0	185	0	400	0	0	0	965	398195	1306	Dendritic compact
19	0	315	0	7210	0	0	0	0	7525	403395	1335	Columnar
20	187	0	50	73	1767	67	0	0	2144	394813	1342	Columnar
21	200	0	683	0	237	0	0	0	1120	398923	1360	Columnar microcrystalline

#	Mg	Pb	Fe	Na	Zn	Mn	Si	Sr	Total trace element	Ca	CT number (HU)	Petrography
22	423	120	63	0	0	0	0	1527	2133	394780	1368	Micrite
23	457	70	227	2390	237	120	0	0	3501	397873	1370	Columnar
24	510	0	95	125	0	0	0	0	730	397100	1386	Columnar
25	213	0	0	220	750	0	0	0	1183	391347	1393	Columnar
26	0	0	0	225	600	125	0	0	950	402710	1395	Columnar
27	460	70	0	135	990	0	0	0	1655	324105	1404	Columnar
28	365	295	65	100	235	0	0	150	1210	394700	1404	Dendritic compact
29	250	0	0	0	0	133	87	1420	1890	395950	1417	Columnar
30	1557	460	320	0	117	0	137	0	2591	393833	1418	Micrite
31	53	107	0	0	63	0	0	0	223	405257	1433	Columnar
32	125	70	60	0	655	65	0	0	975	398315	1445	Dendritic compact
33	680	0	195	110	0	65	0	0	1050	404560	1450	Columnar
34	477	0	217	123	83	210	0	0	1110	383700	1463	Columnar
35	0	0	53	0	923	107	0	0	1083	399650	1500	Columnar
36	680	155	55	0	0	0	0	275	1165	393675	1553	Columnar

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า correlation coefficient (r) ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างข้อมูล CT-number และธาตุร่องรอยแต่ละชนิด บางธาตุ อาทิ Si ข้อมูลไม่น่าเชื่อถือมากพอ เนื่องจากมีข้อมูลน้อยจึงไม่นำมาหาความสัมพันธ์

	Mg	Ca	Pb	Fe	Al	Na	Zn	Mn	Sr
CT number	0.0089	-0.1740	-0.4429	-0.3157	0.1139	-0.0061	0.1355	0.3197	-0.0644

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

จากการผลัฟท์ความหนาแน่นที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ลักษณะศีลาบรรณาภายใต้กล้องจุลทรรศน์ และปริมาณธาตุร่องรอยจากเครื่อง EPMA นำมาหาความสัมพันธ์ของทั้งสามสิ่งซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ก่อนหน้านี้แล้ว โดยสรุป สิ่งที่ได้จากโครงการ มีดังต่อไปนี้

1. ความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับลักษณะศีลาบรรณา สามารถแบ่งระดับความหนาแน่นได้ 3 ระดับ ดังนี้
 - 1) บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำสุด (<1200 HU) คือบริเวณที่มีโครงเนื้อแบบ Dendritic open และ Aragonite และมีรูพรุนในเนื้อหินแทรกอยู่เยาะ
 - 2) บริเวณที่มีความหนาแน่นปานกลาง (1200-1350 HU) คือบริเวณที่มีโครงเนื้อแบบ Dendritic compact, Micrite และ Aragonite มีรูพรุนในเนื้อหินแทรกบ้าง
 - 3) บริเวณที่มีความหนาแน่นสูง (1350-1550 HU) พบโครงเนื้อแบบ Columnar และ Micrite มีรูพรุนในเนื้อหินแทรกน้อยมาก
2. ค่า r หรือ correlation coefficient ของความหนาแน่นและปริมาณธาตุร่องรอย มีค่า -0.45 ถึง 0.35 แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างน้อยในทางสถิติ
3. Pb มีค่า r = -0.45 แสดงว่าปริมาณ Pb ที่พบในหินงอกอาจสัมพันธ์กับความหนาแน่นในทางตรงข้าม ทั้งนี้เนื่องจากจุดวิเคราะห์ที่พบธาตุ Pb อาจมีน้อยเกินไป สำหรับความเชื่อถือในทางสถิติ จึงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม
4. ปริมาณธาตุร่องรอยที่มีมากจะอยู่บริเวณที่มีโครงเนื้อแบบ Dendritic open เป็นส่วนมาก ซึ่งหมายถึงบริเวณที่มีความหนาแน่นค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้อาจกล่าวสรุปไม่ได้แน่นอนว่า หากหินงอกมีความหนาแน่นต่ำบริเวณนั้นจะมีปริมาณธาตุร่องรอยสูง เนื่องจาก ความหนาแน่นของหินงอกที่ได้จากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ นั้นเป็นความหนาแน่นแบบสัมพัทธ์หรือวัดโดยรวมทั้งจากตัวอย่างทั้งก้อน การเอกซเรย์ดูแค่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำนั้น อาจรวมไปถึงโครงเนื้อแบบอื่นๆ ด้วยอาทิ Micrite, Microcrystalline หรือ Aragonite

ข้อเสนอแนะ

1. รายงานฉบับนี้เป็นเพียงการเริ่มต้นศึกษาเกี่ยวกับความหนาแน่นและปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างหินงอกเท่านั้น เนื่องจากผลการวิเคราะห์ที่ได้อาจมีปริมาณไม่มากพอที่จะเชื่อถือหรือนำไปอ้างอิงได้ เหตุจากทั้งเวลา และตัวผู้ศึกษาเอง ความสัมพันธ์ที่ได้จึงไปในทางการคาดเดามากกว่า

2. ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะศัลยารรณและความหนาแน่นค่อนข้างสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ทั้งนี้ยังมีการแบ่งช่วงของความหนาแน่นและ ค่า CT-number ที่ได้ไม่เท่ากัน สาเหตุอาจมาจากตัวอย่างซึ่งอยู่ต่างพื้นที่ ต่างสภาพแวดล้อม หรือแม้แต่การใช้โปรแกรม การตั้งค่าตัวเครื่องและการคำนวณค่า CT-number หากมีฐานข้อมูลเกี่ยวกับ CT-number และลักษณะศัลยารรณที่มากกว่านี้ อาจเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้านภูมิอากาศบรรพกาลไม่มากนักน้อย
3. ศัลยารรณเป็นเพียงการศึกษาเบื้องต้น ถึงแม้ว่าโครงเนื้อแต่ละชนิดจะสามารถบ่งบอกสิ่งแวดล้อมขณะเกิดผลึกได้ แต่ข้อมูลที่ได้อาจไม่ถูกต้องนักหากจะตีความเกี่ยวกับภูมิอากาศบรรพกาล ควรใช้การวิเคราะห์ไอโซโทปเสถียร หรือธาตุร่องรอยร่วมด้วย
4. การใช้เครื่องซีทีในการวิเคราะห์ควรทำตัวอย่างให้อยู่ในระนาบเดียวกัน (กรณีเป็นตัวอย่างที่ถูกต้องแล้ว) หากไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน อาจทำให้ภาพบางส่วนบริเวณผิวหน้าหายไป

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี, 2550. แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดอุทัยธานี. กรุงเทพมหานคร: กองธรณีวิทยา, กรมทรัพยากรธรณี
- “ปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ย”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.hydro-5.com/HD-03/3-02%20M-RAIN.html> 2558
- “อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ย”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.tmd.go.th> 2558
- Al-Hashim, M., n.d. Carbonate [online]. Available from: [http://faculty.ksu.edu.sa/17033/carbonate%20petrography%20labs/carbonate%20petrography%20\(2\).pdf](http://faculty.ksu.edu.sa/17033/carbonate%20petrography%20labs/carbonate%20petrography%20(2).pdf) [2016, Feb 15]
- Baldini, J.U.L., McDermott, F., & Fairchild, I.J., 2002. Structure of the 8200-Year Cold Event Revealed by a Speleothem Trace Element Record. *Science*, 296 (5576), 2203-2206.
- Belli R., et al., 2013. Regional climate variability and ecosystem responses to the last deglaciation in the northern hemisphere from stable isotope data and calcite fabrics in two northern Adriatic stalagmites. *Quaternary Science Reviews*, 7, 146-158.
- Fairchild, I.J., et al., 2000. Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology* 166, 255-269.
- Fairchild, I.J., Frisia, S., Borsato, A. & Tooth, A.F., 2006. Speleothems. In: *Geochemical Sediments and Landscapes* (ed. Nash, D.J. and McLaren, S.J.), Blackwells, Oxford (in press)
- Fairchild I.J., & Treble, P.C., 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Review*, 28 (5-6), 449-468.
- Fairchild, I.J., et al. 2010. Petrology and geochemistry of annually laminated stalagmites from an Alpine cave (Obir, Austria): seasonal cave physiology, Geological Society, London, 336, 295-321.
- Fairchild I.J. & Baker A., 2012. *Speleothem science: from process to past environments*. John Wiley & Sons. Oxford, UK.
- Fairchild, I.J., et al. 2014. Seasonality in speleothems. *PAGES MAGAZINE*, 22(1), 24-25.

- Finch, A.A., et al., 2001. Trace element variation in speleothem aragonite: potential for paleoenvironmental reconstruction. *Earth and Planetary Science Letter*, 186, 255-267.
- Fleitmann, D., & Spötl, C., 2008. Editorial: Advance in speleothem research. *PAGES News*, 16(3), 2
- Folk, R.L., 1965. Some aspects of recrystallization in ancient limestones. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications*, 13, 14-48.
- Folk, R.L., & Assereto, R., 1976. Comparative fabric of length-slow and length-fast calcite and calcitized aragonite in a Holocene speleothem, Carlsbad cavern, New Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology*, 46(3), 486-496.
- Frisia, S., 1996. Petrographic evidences of diagenesis in speleothems: some examples. *Speleochronos*, 7, 21-30.
- Frisia, S., Borsato A., Fairchild I.J. & McDermott F., 2000. Calcite fabrics, growth mechanisms, and environments of formation in speleothems from the Italian Alps and Southwestern Ireland. *Journal of Sedimentary Research*, 70, 1183-1196.
- Frisia, S., et al., 2002. Aragonite-Calcite Relationships in Speleothems (Grotte De Clamouse, France): Environment, Fabrics, and Carbonate Geochemistry. *Journal of Sedimentary Research*, 72(5), 687-699.
- Frisia, S., et al., 2008. The use of stalagmite geochemistry to detect past volcanic eruptions and their environment impacts. *PAGES News*, 16(3), 25-26.
- Frisia, S., 2015. MICROSTRATIGRAPHIC LOGGING OF CALCITE FABRICS IN SPELEOTHEMS AS TOOL FOR PALEOCLIMATE STUDIES. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SPELEOLOGY*, 44(1), 1-16.
- Gázquez, F., et al., 2012. Gypsum-carbonate speleothem from Cueva de las Espadas (Naica mine, Mexico). mineralogy and palaeohydrogeological implication, *International Journal Speleology*, 41(2), 211-220.
- Gonzalez-Munoz, M.T., et al., 2000. Bacterially Induced Mg-Calcite Formation: Role Of Mg²⁺ in Development of Crystal Morphology, *Journal of Sedimentary Research*, 70 (3), 559-564.

- Huang, Y., & Fairchild, I.J., 1998. Annual trace element records in speleothem from Grotta di Ernesto, NE Italy. *GOLDSCHMIDT CONFERENCE TOULOUSE. Mineralogy Magazine*, 62A, 661-662.
- Kendall, A. C., & Broughton, P. L., 1978. Origin of fabric in speleothems composed of columnar calcite crystals. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48, 519-538.
- Kendall A.C., 1993. Columnar calcite in speleothems. Discussion. *Journal of Sedimentary Research*, 63: 550-553.
- Konečný, P., et al., 2015. Determination of dynamic Young's modulus of vulnerable speleothems. *Acta Montanistica Slovaca*, 20(2), 156-163.
- Kowalczyk, A.J., 2009. High Resolution Microclimate Study of Hollow Ridge Cave: Relationships Between Cave Meteorology, AirChemistry, and Hydrology and the Impact on Speleothem Deposition. *Electronic Theses, Treatises and Dissertations*. Paper 2853.
- Hinkle, D.E., William ,W., & Stephen G. J., 1998. *Applied Statistics for the Behavior Sciences*. 4th ed. New York : Houghton Mifflin.
- McDermott F., et al., 1999. Holocene climate variability in Europe: Evidence from $\delta^{18}O$, textural and extension-rate variations in three speleothems, *Quaternary Science Reviews* 18, 1021-1038.
- Mickler. P.J., et al. 2004. Application of High-resolution X-ray computed tomography in determining the suitability of speleothem for use in paleoclimatic, paleohydrologic reconstruction. *Journal of Cave and Karst Studies*, 66(1), 4-8.
- Muangsong, C., Pumijumnong, N., Cai, B., & Tan, M., 2011. Stalagmite gray level as a proxy of the paleoclimate in Northwestern Thailand. *ScienceAsia*, 37, 262-267.
- Muñoz-García, M.B., et al., 2012. Porosity and hydric behavior of typical calcite microfabrics in stalagmites. *Sedimentary Geology*, 265–266, 72-86.
- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2002. Why should We Care Climate Change? [online]. Available from: http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/primer_care.html [2016, Jan 21]
- Perrin, C., et al., 2014. ARAGONITE–CALCITE SPELEOTHEMS: IDENTIFYING ORIGINAL AND DIAGENETIC FEATURES. *Journal of Sedimentary Research*, 84, 245–269

- Phutong, P., 2008. Mineralogy and isotopic geochemistry of stalagmites in Namjang cave, Pangmapha, Maehongson province, Thailand. Master's Thesis, Technology of Environmental of Science, Mahidol University.
- Richter, D.K., Götte, T., Niggemann, S., Wurth, G., 2004. REE³⁺ and Mn²⁺ activated cathodoluminescence in lateglacial and Holocene stalagmites of central Europe: evidence for climatic processes? *Holocene* 14, 759-767.
- Robinson, M.M., & Dowsett, H.J., 2010. Why Study Paleoclimate?. U.S. Geological Survey Fact Sheet, v. 2010-3021
- Shtober-Zisu, N., et al., 2014. Caves in caves: evolution of post-depositional macroholes in stalagmites, *International Journal of Speleology* 43.3, 323-334.
- Sunagawa I., 2005. Crystals: growth, morphology, & perfection. Cambridge University
- 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*, 216, 141-153.
- Treble, P.C., et al, 2008. Understanding climate proxies in southwest-Australian speleothems. *PAGES News*, 16(3), 17-19.
- Vanghi, V., Iriarte, E., & Aranburu, A., 2015. High resolution X-ray computed tomography for petrological characterization of speleothems. *Journal of Cave and Karst Studies*, 77(1), 75–82.
- Walczak, I.W., et al., 2015. Reconstructing high-resolution climate using CT scanning of unsectioned stalagmites: A case study identifying the mid-Holocene onset of the Mediterranean climate in southern Iberia, *Quaternary Science Reviews*, 1-12.
- Yang, Q., 2014. Paleoclimate reconstruction using LA-ICP-MS analyses of ostracods and stalagmite. Max Planck Graduate Center mit der Johannes Gutenberg-Universität.
- Zhong, Z.D., et al., 2010. Implication of stalagmite density for past climate change: An example from stalagmite growth during the last deglaciation from Wanxiang Cave, western Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 55, 3936-3943.