

ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก
บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

นางสาว วชิรศรี สุวรรณสุโข

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

CARBON AND OXYGEN ISOTOPE OF STALAGMITE
IN AMPHOE BANRAI, CHANGWAT UTHAI THANI

Miss. Wachirasee Suwansukho

A Project Submitted in Partial Fulfillment of
the Requirements for the Degree of Bachelor of Science

Department of Geology Faculty of Science
Chulalongkorn University

Academic Year 2016

หัวข้อโครงการ

ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก
บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี

โดย

นางสาว วชิรศรี สุวรรณสุข

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

.....
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย)

วชิรศรี สุวรรณสุโข : ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก บริเวณอำเภอบ้านไร่ จังหวัดอุทัยธานี. (CARBON AND OXYGEN ISOTOPE OF STALAGMITE IN AMPHOE BAN RAI, CHANGWAT UTHAI THANI) อ.ที่ปรึกษาโครงการ : อ.ดร. สกลวรรณ ชาวไชย, 45 หน้า

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกนิยมนำหินงอกมาศึกษาด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศบรรพกาล แต่สำหรับในประเทศไทยมีการศึกษาด้านนี้ไม่แพร่หลายนัก โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) และการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในการสะสมตัวของหินงอกในบริเวณพื้นที่ศึกษา โดยใช้ตัวอย่างหินงอก KPC-01 จากถ้ำเขาแพร อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี ความยาว 20.5 เซนติเมตร ตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามแนวยาว ส่วนแรกนำไปขีดมันเพื่อศึกษาสีและนับจำนวนชั้นการเจริญเติบโตโดยใช้เทคโนโลยีสแกนเลเซอร์กำลังขยาย $\times 20$ ส่วนที่สองนำไปเจาะตามชั้นการเจริญเติบโตทุกๆ 2 มิลลิเมตร และนำผงจากการเจาะไปวิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนด้วยเครื่อง IR-MS ผลการนับจำนวนชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอกข้างต้นพบว่ามีทั้งหมด 761 ชั้น มีค่าไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) อยู่ระหว่าง -12.31 ถึง -5.86 เปอร์มิลล์ และมีค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) อยู่ระหว่าง -12.07 ถึง -6.56 เปอร์มิลล์ จากการหาอายุเบื้องต้นของหินงอกด้วยวิธีการหาอายุเรเนียม – ทอเรียม โดยสกลวรรณ ชาวไชย (รอดตีพิมพ์) พบว่าหินงอกมีอายุอยู่ในช่วง 2000 ปี บริเวณ 0.5 มิลลิเมตรจากด้านบนของหินงอกมีอายุอยู่ในปี ค.ศ. 1929-1952 โดยประมาณ จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าสีของหินงอกมีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจน ส่วนค่าไอโซโทปคาร์บอนบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมเหนือถ้ำที่ถูกปกคลุมด้วยพืชตระกูล C3 สำหรับค่าไอโซโทปออกซิเจนในโครงการนี้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน ซึ่งมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1040 - ค.ศ. 1940 โดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในบริเวณพื้นที่ศึกษาคาดว่าได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แต่อย่างไรก็ตาม โครงการนี้แสดงให้เห็นว่าหินงอกในประเทศไทยมีความเหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาในด้านสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศบรรพกาล

ภาควิชา ธรณีวิทยา

ลายมือชื่อนิติ
.....

สาขาวิชา ธรณีวิทยา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
.....

ปีการศึกษา 2559

5632737123 : MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS : STALAGMITE / CARBON ISOTOPE / OXYGEN ISOTOPE / PALEOCLIMATE

CARBON AND OXYGEN ISOTOPE OF STALAGMITE IN AMPHOE BAN RAI,

CHANGWAT UTHAI THANI. Advisor : Sakonwan Chawchai, Ph.D., 45 pp.

Nowadays, stalagmite is one of the most popular proxies that are used for study about paleoenvironment and paleoclimate by scientist around the world although this study is not widespread in Thailand. The purpose of this project is to study physical properties (colors and numbers of layers), variation of carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$), and oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) in the growth layer of stalagmite to find the relationship between these factors and stalagmite's depositional environment changes in the study area. The sample, KPC-01, which was collected from Kao Prae cave, Ban Rai district, Uthai Thani, is 20.5 cm long. The sample was divided into two parts along the longitudinal section. The first section was polished to examine the color and to count growth layers by using Chula smart-lens technology. The second section was drilled along the growth layer every 2 mm. Then, they were crushed into powder and were sent to analyze the carbon and oxygen isotope by IR-MS. The result shows that there are total 761 growth layers in the sample. The carbon and oxygen isotope are ranging from -12.31 to -5.86 ‰ and -12.07 to -6.56 ‰ respectively. The geochronology from U-Th dating by Chawchai (in press) indicates that records from the sample can represent back to c. 2,000 yr. BP. In addition, at 0.5 mm from the top of the sample is dated as 1929-1952 AD. It can be concluded that the stalagmite color is related to oxygen isotope. Carbon isotope indicates C3 vegetation above the cave. Moreover, oxygen isotope indicates the variation of rainfall which tends to decrease from 1040 – 1940 AD. The variation of rainfall in the study area is under the influence of the Northwest monsoon. So, stalagmites in Thailand are highly recommended for further study on paleoenvironment and paleoclimate.

Department: Geology

Field of Study: Geology

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำโครงการขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.สกลวรรณ ชาวไชย อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง สำหรับการมอบโอกาสต่างๆในการทำโครงการด้านใหม่ๆที่มีความท้าทาย ขอบพระคุณสำหรับคำแนะนำ การดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดี การอบรมทั้งด้านวิชาการและการวางแผนในการดำเนินชีวิต พร้อมทั้งคอยให้กำลังใจ ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุกด้านมาโดยตลอด ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้คิดค้นเทคโนโลยีสมาร์ทเลนส์ ที่ได้กรุณาให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์สมาร์ทเลนส์ พร้อมทั้งให้แนวคิด คำแนะนำ ในการใช้อุปกรณ์ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลอง ขอขอบคุณ นิสิตปริญญาโทในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีสมาร์ทเลนส์ที่ให้ความช่วยเหลืออย่างเต็มความสามารถ ทำให้โครงการฉบับนี้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ และพี่บุคลากรทุกท่านในภาควิชาธรณีวิทยา ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี ขอขอบคุณกำลังใจต่างๆจากเพื่อนๆธรณีวิทยา รุ่นที่ 57 (Geo'57) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายพศุทธิ์ รัตนศรีมงคล นิสิตในที่ปรึกษาเดียวกัน ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาตลอดช่วงเวลาในการทำโครงการตั้งแต่ต้นจนจบ และนายกาญจน์ เผื่อนทอง ที่ได้คำแนะนำและช่วยเหลือในด้านการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่างๆ ทำให้โครงการฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวที่อบอุ่น ที่คอยให้คำปรึกษาที่ดี มอบความรัก กำลังใจ ให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน และเป็นแรงผลักดันที่สำคัญในการดำเนินการทุกขั้นตอนให้ประสบผลสำเร็จ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 พื้นที่ศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	14
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	21
3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของหินงอก	21
3.2 การวิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก	30
บทที่ 4 อภิปรายผล	31
4.1 ลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของหินงอก	31
4.2 การเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก	35
บทที่ 5 สรุปผล	42
รายการอ้างอิง	44

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1	3
2	4
3	7
4	9
	10
	10
	10
5	14
6	15
7	15
8	16
9	16
10	18
11	18
12	19
13	19
14	20
15	21

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
16	สีมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบสีของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก	22
17	ตารางบันทึกข้อมูลการนับชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก	29
18	กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูล (a) ไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) (b) ไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$)	30
19	การเปรียบเทียบค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) (กราฟสีอ่อน) และดัชนีสี ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก	32
20	ชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก KPC-01-1 ตั้งแต่มีลลิเมตรที่ 21-100 จากส่วนบนของหินงอก	33
21	(a) พื้นที่ศึกษา (b) ถ้ำน้ำจาง แม่ฮ่องสอน (c) ถ้ำ Dandak ในอินเดีย (d) ถ้ำ Wanxiang ในจีน (e) Lake Pa Kho (f) Tree ring	38
22	ช่วงการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน	39
23	การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในบริเวณใกล้เคียง	40

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในปัจจุบันได้รับความสนใจเป็นอย่างมากเพราะการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมดังกล่าวเริ่มส่งผลกระทบกับการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งสาเหตุเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น การกระทำของมนุษย์ การพัฒนาอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสมัยใหม่ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นต้น โดยตัวอย่างที่เห็นได้ชัดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความผิดปกติของฤดูกาลที่มีความรุนแรงเพิ่มขึ้น มลภาวะเป็นพิษ สภาวะโลกร้อน เป็นต้น ซึ่งไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายทั้งในระยะสั้นและระยะยาว ทำให้มนุษย์ต้องการเรียนรู้ที่จะปรับตัวในการดำรงชีวิต และเริ่มให้ความสำคัญกับการศึกษาข้อมูล การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงทางด้านสภาพภูมิอากาศ ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลการบันทึกปริมาณน้ำฝนของกรมอุตุนิยมวิทยา สามารถศึกษาย้อนหลังได้เพียง 50 ปีเท่านั้น

นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกได้ทำการวิจัยอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศบรรพกาลโดยศึกษาจากตะกอนทะเลสาบ (Lake sediment) แกนน้ำแข็ง (Ice core) วงปีต้นไม้ (Tree rings) ปะการัง (Coral) และตะกอนถ้ำ (Speleothem) เป็นต้น ซึ่งในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ตะกอนถ้ำได้รับความนิยมในการศึกษาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในรูปแบบหินงอก (Stalagmite) อันเนื่องมาจากหินงอกมีการกระจายตัวอย่างกว้างขวาง และมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องใช้ระยะเวลาอันยาวนาน อีกทั้งยังสามารถนำไปหาอายุได้ค่อนข้างแม่นยำด้วยเทคนิคลำดับยูเรเนียม (U-series dating) นอกจากนี้หินงอกยังมีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่หลากหลาย สามารถนำไปวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ เช่น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนในบริเวณเหนือถ้ำ โดยใช้สัดส่วนไอโซโทปออกซิเจน (O-isotope ratio) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพืชพันธุ์ที่ปกคลุมถ้ำโดยใช้สัดส่วนไอโซโทปคาร์บอน (C-isotope ratio) เป็นต้น (Fairchild et al., 2006)

สำหรับการศึกษาทางด้านการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาลในประเทศไทยนั้นยังไม่แพร่หลายนัก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการศึกษาจากตะกอนทะเลสาบและวงปีของต้นไม้ (Chawchai et al., 2013, 2015, 2016; Muangsong et al., 2016)

จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาลในประเทศไทย โดยใช้หินงอกเป็นตัวบ่งชี้ทางอ้อม มีการศึกษาเพียงแค่พื้นที่เดียวเท่านั้น คือที่ถ้ำน้ำจาง อ.ปางมะผ้า จ.แม่ฮ่องสอน โดยคณะของ Cai et.al. (2010) และ Muangsong et.al. (2011) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก และศึกษาระดับสีเทา (Grey scale) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก ตามลำดับ จากการศึกษาในครั้งนี้พบว่า การเปลี่ยนแปลงไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) และระดับสีเทามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝน ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษาพบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกัน ซึ่งอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนส่วนใหญ่เกิดจากมรสุมเอเชีย (Asian monsoon) ดังนั้นจึงอนุมานได้ว่าหินงอกในประเทศไทยน่าจะมีศักยภาพที่สามารถใช้ในการศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาลได้

จากการศึกษางานวิจัยด้านสภาพภูมิอากาศบรรพกาลโดยใช้หินงอกที่มีเพียงที่เดียวในประเทศไทยนี้ทำให้ผู้ทำโครงการสนใจที่จะศึกษาหินงอกในพื้นที่อื่นของประเทศไทย ซึ่งจากการสำรวจภาคสนามของนายกำปนาท จันทร์คำและคณะในปี พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2559 พบว่าตัวอย่างที่พบในถ้ำเขาแพระ อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี มีลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมสำหรับนำไปศึกษาต่อ ผู้ทำโครงการจึงเลือกศึกษาตัวอย่างจากพื้นที่ดังกล่าวโดยจะศึกษาในด้านลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) รวมไปถึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก เพื่อนำไปสู่การอธิบายสภาพแวดล้อมในการสะสมตัวของหินงอก และตีความในด้านสภาพภูมิอากาศบรรพกาลของพื้นที่ศึกษาต่อไป

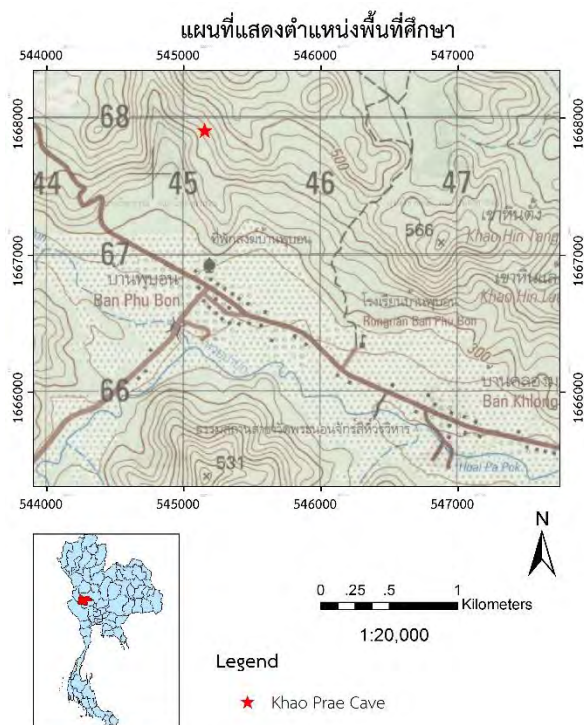
1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก
- 1.2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในหินงอกกับปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในช่วงการสะสมตัวของหินงอกในบริเวณพื้นที่ศึกษา

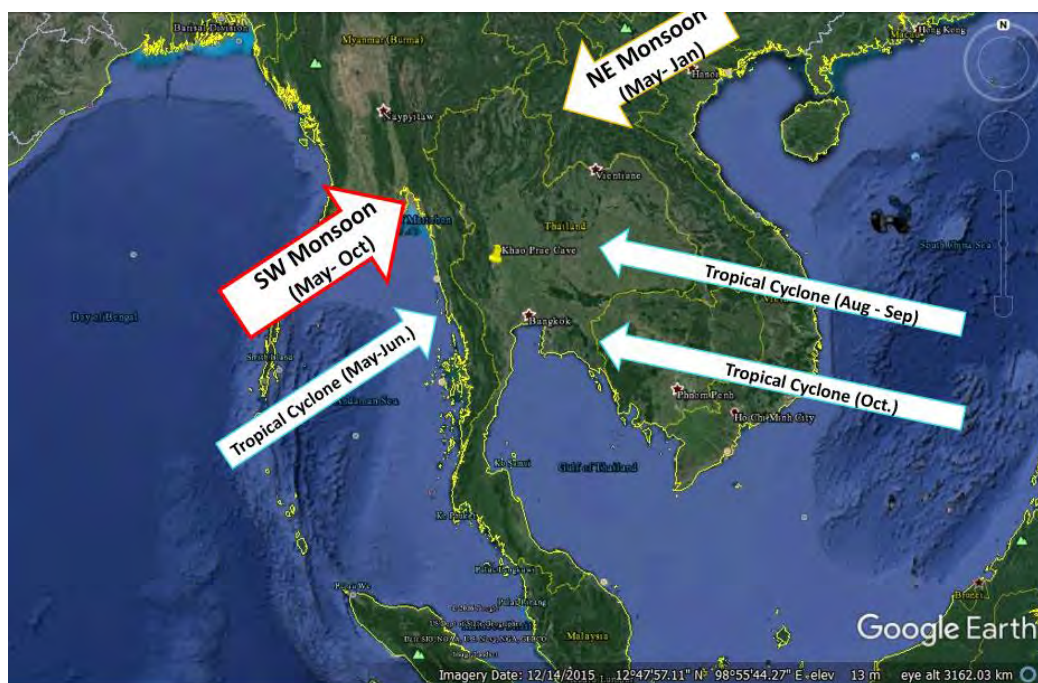
1.3 พื้นที่ศึกษา

จากการสำรวจของนายกำปนาท จันท์คำและคณะในปี พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2559 พบว่า ตัวอย่างหินนอกจากถ้ำเขาแพร อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี มีลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นที่เหมาะสม สามารถนำไปศึกษาต่อทางด้านสภาพภูมิอากาศบรรพกาล ทำให้ผู้ทำโครงการเลือกพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ศึกษาสำหรับการทำโครงการในครั้งนี้

ถ้ำเขาแพร อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี (รูปที่ 1) ตั้งอยู่ที่พิกัดทางภูมิศาสตร์ ละติจูด 15.086279° ลองจิจูด 99.420155° (พิกัดกริด UTM WGS84 Zone 47P 545152 E 1667912 W) เป็นพื้นที่ที่ตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทย ซึ่งได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทั้งหมด 3 ระบบ (รูปที่ 2) ได้แก่ อิทธิพลจากลมมรสุมที่พัดประจำเป็นฤดูกาล 2 ระบบ คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW Monsoon) และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (NE Monsoon) นอกจากนี้ในบางช่วงเวลายังได้รับอิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อน (Tropical cyclone) อีกด้วย พื้นที่ส่วนใหญ่ในจังหวัดอุทัยธานีเป็นพื้นที่ป่าและภูเขาสูงโดยเฉพาะในบริเวณทางด้านทิศตะวันตกของจังหวัด ในเขตอำเภอบ้านไร่จะเป็นภูเขาสลับซับซ้อนมีทิศทางลาดเอียงภูเขาจากทิศตะวันตกไปทางทิศตะวันออก โดยสามารถพบภูเขาหินปูนได้ทั่วไปและจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่ามีถ้ำเป็นจำนวนมาก (FIELDWORK II., 2015)



รูปที่ 1 : ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา ถ้ำเขาแพร อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี



รูปที่ 2 : อิทธิพลจากลมมรสุมที่มีต่อพื้นที่ศึกษา(หมุดสี่เหลี่ยม)

สภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปของพื้นที่แบ่งออกเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูหนาว (กลางเดือนตุลาคม - กลางเดือนกุมภาพันธ์) เกิดเนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (NE Monsoon) ฤดูร้อน (กลางเดือนกุมภาพันธ์ - กลางเดือนพฤษภาคม) และฤดูฝน (กลางเดือนพฤษภาคม - กลางเดือนตุลาคม) เกิดเนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW Monsoon) ที่พัดมาจากมหาสมุทรอินเดีย ทำให้ฝั่งตะวันตกมีปริมาณฝนมากกว่าฝั่งตะวันออกของพื้นที่ สำหรับพายุหมุนเขตร้อน (Tropical cyclone) ที่เคลื่อนผ่านจังหวัดอุทัยธานี ส่วนใหญ่จะอ่อนกำลังลงกลายเป็นพายุดีเปรสชันที่มีความรุนแรงไม่มากนัก แต่ส่งผลให้มีฝนตกหนักและลมกระโชกแรง ซึ่งถ้าเกิดขึ้นในช่วงเดือนพฤษภาคม - มิถุนายน จะเป็นอิทธิพลจากพายุไซโคลนในอ่าวเบงกอล แต่หากเกิดขึ้นในช่วงเดือนมิถุนายน - ตุลาคม จะเป็นอิทธิพลจากพายุที่เกิดในทะเลจีนใต้ จากสถิติบันทึกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 - พ.ศ. 2556 พบว่ามีพายุหมุนเขตร้อนเคลื่อนผ่านทั้งหมดเพียง 12 ครั้ง และมีกำลังแรงเป็นพายุดีเปรสชันทั้งหมด

จากข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาพบว่าจังหวัดอุทัยธานีมีปริมาณน้ำฝนอยู่ในเกณฑ์น้อย อากาศจึงค่อนข้างแห้งแล้ง โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปีอยู่ที่ 1,100 - 1,200 มิลลิเมตร และมีฝนตก 100 - 105 วัน เดือนที่มีฝนตกมากที่สุดคือเดือนกันยายน มีปริมาณน้ำฝน 220 - 240 มิลลิเมตร มีอากาศร้อนจัด

ในช่วงเดือนเมษายน – พฤษภาคม อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 34 องศาเซลเซียส และมีอากาศหนาวจัดในเดือน ธันวาคม อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 20 องศาเซลเซียส

สำหรับข้อมูลทางด้านลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปจากกรมทรัพยากรธรณี (DMR, 2008) ระบุว่า ลักษณะธรณีวิทยาทั่วไปของจังหวัดอุทัยธานี ประกอบด้วย หินแปร หินอัคนี หินตะกอน และตะกอนร่วน อายุตั้งแต่มหายุคพรีแคมเบรียนจนถึงปัจจุบัน สำหรับบริเวณพื้นที่ศึกษาในอำเภอบ้านไร่ที่ตั้งอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของจังหวัดอุทัยธานีทำให้ลักษณะธรณีวิทยาบริเวณนี้มีความซับซ้อนสูง เนื่องจากด้านทิศตะวันตกของพื้นที่จังหวัด มีภูเขาสูงที่ต่อเนื่องลงมาจากแนวของจังหวัดตาก เรียกว่า ธรณีวิทยาแนวรอย อินทนนท์ - ตาก ซึ่งการทำโครงการในครั้งนี้ให้ความสนใจในการศึกษาหินงอกภายในถ้ำ จึงนำเสนอ เฉพาะลักษณะธรณีวิทยาที่เป็นหินปูนในพื้นที่ศึกษาเท่านั้น หินปูนที่พบกระจายตัวอยู่ในบริเวณพื้นที่ศึกษา (อำเภอบ้านไร่) อยู่ในหมวดหินปูนท่ามะนาว อายุออร์โดวิเซียน โดยระนาบชั้นหินวางตัวในแนว ตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ ลักษณะธรณีวิทยาประกอบด้วย ตอนล่างเป็นหินโคลนและ หินปูนเนื้อดิน วางตัวต่อเนื่องอยู่บนหินควอร์ตไซต์และหินควอร์ตซีสต์ จากนั้นค่อยๆเปลี่ยนเป็นหินปูนชั้น หนาที่เป็นหน้าผามีหินเชิร์ตก้อนกลมในชั้นหิน ตอนบนเป็นหินปูนชั้นบางสีเทาที่มีการตกผลึกใหม่ บางส่วนมีการแปรสภาพเป็นหินอ่อนและหินแคลก์ซิลิเกต มีหินทรายชั้นบางแทรกสลับและค่อยๆ เปลี่ยนเป็นหินปูนชั้นหนา พบหินควอร์ตไซต์และหินฟิลไลต์แทรกสลับ ส่วนบนสุดของหมวดหินนี้ ประกอบด้วย หินปูนสีเทาอ่อนถึงเข้มเป็นชั้นบางๆวางตัวต่อเนื่องรองรับหินดินดานสีขาว อายุไซรูเลียน - ดีโวเนียน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เข้าใจลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้นของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก) ที่บ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมในการสะสมตัวของหินงอกได้
- 1.4.2 เข้าใจความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกและสามารถเชื่อมโยงถึงสภาพแวดล้อมในการสะสมตัวของหินงอกได้
- 1.4.3 เป็นการเพิ่มข้อมูลในเชิงวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาหินงอกภายในถ้ำของประเทศไทยที่นอกจากจะมีประโยชน์ในด้านการท่องเที่ยวแล้วยังสามารถใช้ศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ได้ด้วย ทั้งนี้การศึกษาด้านไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนในประเทศไทยยังไม่แพร่หลาย โครงการฉบับนี้จึงเป็นการเพิ่มข้อมูลการวิจัยในด้านสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศบรรพกาล ซึ่งอาจใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสภาพภูมิอากาศในอดีตและปัจจุบันได้ในการศึกษาเชิงลึกต่อไป

1.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของคณะ Fairchild et. al. (2006) กล่าวว่าในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบความจริงของตะกอนถ้ำ (Speleothem) ว่าสามารถใช้ในการศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาลได้ เนื่องจากตะกอนถ้ำเหล่านี้มีลักษณะเฉพาะในการสะสมตัวที่แสดงในชั้นการเจริญเติบโตเหมือนกับวงปีของต้นไม้ที่ได้เก็บความลับของธรรมชาติไว้อย่างหลากหลาย เช่น ความหลากหลายของการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล ค่าเฉลี่ยรายเดือนของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของความชื้นในบรรยากาศ ระบบนิเวศวิทยาและคุณสมบัติของดินที่วางตัวอยู่เหนือถ้ำ การตกตะกอนของแคลไซต์และออร์กาโนइट เป็นต้น นอกจากนี้ยังจำแนกแหล่งกำเนิดของความผันผวนที่มีอิทธิพลต่อลักษณะทางธรณีเคมีของตะกอนถ้ำออกเป็น 5 แหล่งกำเนิด ได้แก่ 1) สภาพบรรยากาศ 2) พืชพันธุ์และดิน 3) ชั้นหินปูนให้น้ำ 4) การเจริญเติบโตของผลึกหินงอกปฐมภูมิ และ 5) การเปลี่ยนแปลงในชั้นหุติภูมิ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้ตะกอนถ้ำในแต่ละพื้นที่มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันออกไป

รูปแบบของตะกอนถ้ำ (Speleothem) ที่นำมาใช้ในการศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาลแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบหลัก ดังนี้

- รูปแบบที่ 1 : หินไหล (Flowstone) รูปที่ 3a
มีการสะสมตัวเป็นชั้นๆบนพื้นหรือผนังของถ้ำ หินไหลเกิดจากการไหลของมวลน้ำที่ค่อนข้างแรง ทำให้ผลึกแคลไซต์ภายในตะกอนถ้ำรูปแบบนี้เจริญเติบโตด้วยอัตราที่ไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีความซับซ้อนและการปนเปื้อนสูง ยากที่จะหาอายุด้วยวิธีลำดับยูเรเนียม จึงไม่เป็นที่นิยมในการนำไปศึกษา
- รูปแบบที่ 2 : หลอดหินย้อยหรือหินหลอดกาแฟ (Hollow cylindrical soda - straw stalactite) รูปที่ 3b
การเกิดตะกอนถ้ำรูปแบบนี้มักมีความเกี่ยวข้องกับโซนาการซึมบนเพดานถ้ำ ลักษณะของโครงสร้างค่อนข้างละเอียดอ่อน เปราะ แตกหักได้ง่าย และมีอายุน้อย
- รูปแบบที่ 3 : หินงอก (Stalagmite) รูปที่ 3c
นิยมใช้ในการศึกษาวิจัยมากที่สุด เพราะรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของหินงอกขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ (ยิ่งแคบยิ่งไหลช้า) ภาวะน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด (น้ำอิ่มตัวยิ่งยวดมากยิ่งขึ้นทำให้เกิดการสะสมตัวที่ไม่

สม้ำเสมอ) ความสูงของการหยด (เส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้นตามระดับความสูง) นอกจากนี้หินงอกยังมีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างต่อเนื่องและยาวนาน มักแสดงให้เห็นร่องรอยการหยุดการสะสมตัวชั่วคราวที่แสดงหลักฐานของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการหยด



a: หินไหล

(<http://www.goodearthgraphics.com/virtcave/flowstone/riwaka2r.jpg>)



b: หลอดหินย้อยหรือหินหลอดกาแฟ

(<http://blog.visitmo.com/wp-content/uploads/media/soda-straws-at-jacobs-cave.jpg>)



c: หินงอก

(<https://f.ptcdn.info/756/017/000/1397353575-stalagmite-o.jpg>)

รูปที่ 3 : รูปแบบของตะกอนถ้ำ (a) หินไหล (b) หลอดหินย้อยหรือหินหลอกคาแพ (c) หินงอก

สภาพแวดล้อมและการฟอร์มตัวของตะกอนถ้ำ

สภาพแวดล้อมของตะกอนถ้ำก็คือสภาพแวดล้อมของถ้ำ ดังนั้นสภาพแวดล้อมเหนือถ้ำจึงมีอิทธิพลอย่างมากกับลักษณะของตะกอนถ้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของเนื้อคาสต์ (Epikarst) หรือชั้นใต้พื้นผิว (Subcutaneous zone) คือชั้นดินที่มีรอยแตกสูง ซึ่งเป็นบริเวณที่มวลน้ำหรือหยดน้ำ (Drip water) สามารถซึมผ่านเข้าไปในถ้ำและเข้าสู่กระบวนการฟอร์มตัวของตะกอนถ้ำในขั้นตอนต่อไป (Fairchild et al., 2006)

ในการฟอร์มตัวของตะกอนถ้ำนั้นเกิดจากความแตกต่างทางด้านธรณีเคมีของ 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณการละลาย (Dissolution zone) และบริเวณการสะสมตัว (Precipitation zone) ดังนี้

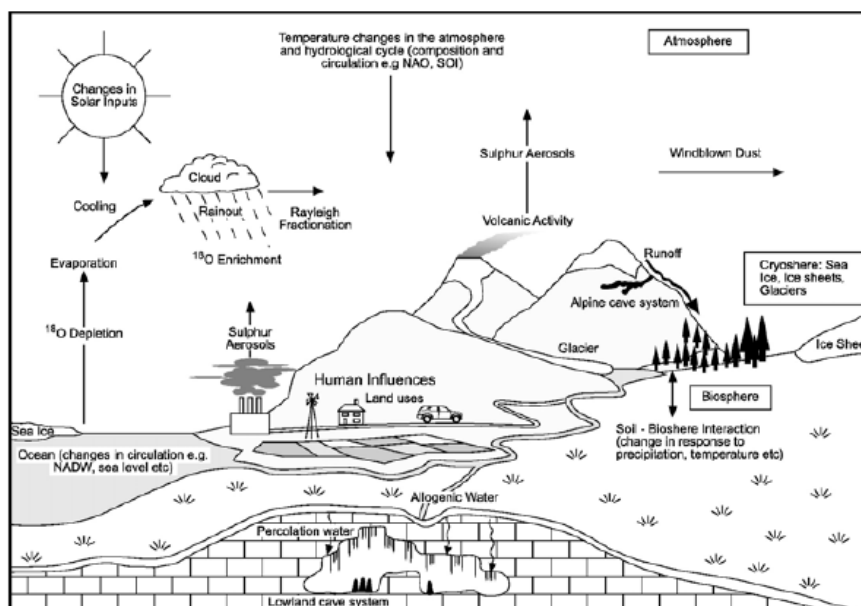
- บริเวณการละลาย (Dissolution zone) คือส่วนของชั้นดินและด้านบนของชั้นเนื้อคาสต์ ที่ถูกควบคุมโดยกระบวนการการละลายของคาร์บอนเนต ซึ่งสัมพันธ์กับน้ำและความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (PCO_2) ที่มีปริมาณสูงเพราะได้รับจากการหายใจของพืชและการสลายตัวของซากสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้น ดังสมการ



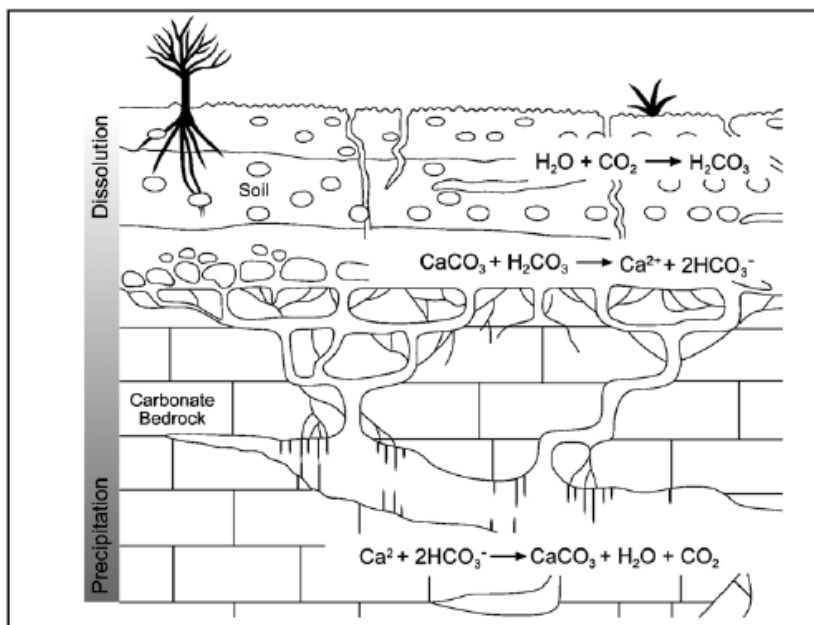
- บริเวณการสะสมตัว (Precipitation zone) คือบริเวณที่สารละลายคาร์บอเนตอิ่มตัวยิ่งยวด นั่นคือตะกอนถ้ำจะสะสมตัวได้เมื่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (Degassing process) ดังสมการ



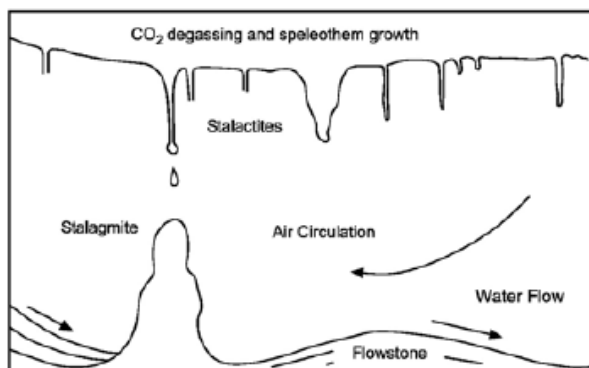
แม้ว่าอุณหภูมิภายในถ้ำจะผันผวนเล็กน้อย แต่ฤดูกาลที่เกิดขึ้นภายนอกถ้ำก็สามารถวัดได้จากการเปลี่ยนแปลงปริมาณและคุณสมบัติทางเคมีของหยดน้ำ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในถ้ำ



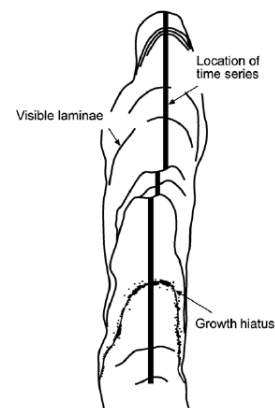
a: ความสัมพันธ์ของตะกอนถ้ำกับสภาพแวดล้อมภายนอก (adapted from Houghton et al., 2001)



b: บริเวณการละลายและการสะสมตัว (adapted from Tooth, 2000)



c: กระบวนการเกิดตะกอนถ้ำและสภาพแวดล้อมภายในถ้ำ



d: ภาพตัดตามยาวแสดงโครงสร้างภายในหินงอก

รูปที่ 4 : (a) ความสัมพันธ์ของตะกอนถ้ำกับสภาพแวดล้อมภายนอก (b) บริเวณการละลายและการสะสมตัว

(c) กระบวนการเกิดตะกอนถ้ำและสภาพแวดล้อมภายในถ้ำ (d) ภาพตัดตามยาวแสดงโครงสร้างภายในหินงอก

ไอโซโทปเสถียร

ไอโซโทป คือ ธาตุชนิดเดียวกัน (เลขอะตอมเท่ากัน) แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกันส่งผลให้มีเลขมวลต่างกัน ซึ่งในธรรมชาติประกอบไปด้วยไอโซโทป 2 ชนิด ได้แก่ ไอโซโทปเสถียร (Stable isotope) และไอโซโทปกัมมันตรังสี (Radioactive isotope)

ไอโซโทปเสถียร คือ ไอโซโทปของธาตุที่นิวเคลียสไม่มีการปลดปล่อยกัมมันตรังสี ซึ่งการศึกษาไอโซโทปเสถียรทำได้โดยการหาสัดส่วนของไอโซโทป (Isotope ratio) โดยใช้หลักการประจุมวลแยกความแตกต่างระหว่างไอโซโทปของแต่ละธาตุ ซึ่งการคำนวณค่าองค์ประกอบของไอโซโทป (δ) ต้องมีการเทียบกับมาตรฐาน ดังสมการ

$$\delta \text{ (เปอร์มิลล์)} = (R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}} - 1) \times 1000, R \text{ คือ สัดส่วนไอโซโทปหนัก/เบา}$$

δ positive หมายถึง สารตัวอย่างมีไอโซโทปหนักกว่ามาตรฐาน

δ negative หมายถึง สารตัวอย่างมีไอโซโทปหนักน้อยกว่ามาตรฐาน

มาตรฐานที่ถูกใช้ในการรายงานองค์ประกอบของไอโซโทปมีอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละมาตรฐานจะถูกกำหนดให้มีค่าองค์ประกอบไอโซโทปเท่ากับ 0 เปอร์มิลล์ เช่น

- SMOW (Standard Mean Ocean Water (Craig, 1961b)) หรือ VSMOW (Vienna SMOW) ใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบในการรายงานองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรของออกซิเจนและไฮโดรเจน
- PDB (Pee Dee Belemnite) หรือ VPDB (Vienna PDB) ใช้เป็นมาตรฐานเปรียบเทียบในการรายงานองค์ประกอบไอโซโทปเสถียรคาร์บอนและไอโซโทปเสถียรออกซิเจนของพวกคาร์บอนेट

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ VSMOW และ VPDB ได้รับความนิยมมากกว่าการใช้ SMOW และ PDB เพราะเป็นมาตรฐานที่ได้รับการปรับเทียบกับ IAEA (International Atomic Energy Agency) ที่ใช้อ้างอิงในหน่วยเปอร์มิลล์ (Coplen, 1996)

เนื่องจากความแตกต่างของมวลของแต่ละไอโซโทป ส่งผลให้ไอโซโทปมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งในธรรมชาติกระบวนการแยกไอโซโทปออกจากกันมี 2 กระบวนการที่สำคัญ ได้แก่ การตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปแบบสมดุล (Equilibrium isotope fractionation) และการตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปแบบจลนศาสตร์ (Kinetic isotope fractionation)

การตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทป (Isotope fractionation)

การตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทป เกิดขึ้นในขณะที่ไอโซโทปกำลังจะเปลี่ยนแปลงสถานะ (Transition phase) ทำให้องค์ประกอบของไอโซโทป (สัดส่วนของไอโซโทปหนัก/ไอโซโทปเบา ใช้สัญลักษณ์คือ δ) เปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่อไอน้ำกำลังควบแน่นในสถานะสมดุล (ณ อุณหภูมิ T) ไอโซโทปหนักของน้ำ (^{18}O , ^2H) จะเพิ่มมากขึ้นในสถานะของเหลว (Liquid phase) ขณะที่ไอโซโทปเบาของน้ำ (^{16}O , ^1H) กำลังเข้าสู่สถานะแก๊ส (Vapor phase) เนื่องจากพันธะที่ยึดระหว่างไอโซโทปหนักมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะที่ยึดระหว่างไอโซโทปเบา ดังนั้นการสลายพันธะเพื่อเปลี่ยนสถานะจึงใช้พลังงานไม่เท่ากัน

1. การตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปแบบสมดุล (Equilibrium isotope fractionation)

ในสถานะสมดุล อัตราปฏิกิริยาไปข้างหน้าจะเท่ากับอัตราปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งการตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปในภาวะสมดุลจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของไอโซโทป กล่าวคือในขณะสมดุลไอโซโทปที่หนักกว่าจะอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า

2. การตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปแบบจลนศาสตร์ (Kinetic isotope fractionation)

เป็นการตกผลึกแยกส่วนนอกเหนือสถานะสมดุล (อัตราปฏิกิริยาไปข้างหน้าไม่เท่ากับอัตราปฏิกิริยาย้อนกลับ) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนมวลของไอโซโทปและการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน จากกฎทั่วไปพันธะเคมีระหว่างไอโซโทปเบาจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าพันธะเคมีของไอโซโทปหนัก ดังนั้นไอโซโทปเบาจึงเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เร็วกว่าและมีความเข้มข้นมากกว่าในด้านผลผลิต และสารตั้งต้นที่เหลือจึงมีความเข้มข้นของไอโซโทปหนักมากกว่า ซึ่งในธรรมชาติการตกผลึกแยกส่วนแบบจลนศาสตร์จะเกิดขึ้นมากกว่าการตกผลึกแยกส่วนแบบสมดุล

ไอโซโทปเสถียรคาร์บอนและออกซิเจน

Fairchild et al., 2012 ระบุว่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในตะกอนถ้ำถูกรายงานอย่างกว้างขวางว่าเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญทางด้านการศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาล ซึ่งได้รับการยอมรับว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของหยดน้ำ (Drip water) ที่เข้าไปในถ้ำ ส่งผลให้ค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในตะกอนถ้ำมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการตกผลึกแยกส่วนของไอโซโทปออกซิเจนนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการศึกษาค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของตะกอนถ้ำ สามารถบ่งบอกสภาพแวดล้อมในการตกสะสมตัวของตะกอนถ้ำได้

สำหรับไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) ที่มีการวัดค่าองค์ประกอบร่วมกันกับไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) พบว่าไอโซโทปคาร์บอนมีแนวโน้มที่จะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการ degassing และพีชพันธุ์เหนือถ้ำ

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

สำหรับโครงการในครั้งนี้สามารถแบ่งวิธีการวิจัยหลักๆได้ทั้งหมด 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. คัดเลือกตัวอย่างหินงอกสำหรับทำการศึกษา
เลือกตัวอย่างจากการสำรวจของนายกำปนาท จันทร์คำและคณะในปี พ.ศ. 2558 – พ.ศ. 2559 โดยตัวอย่างที่เลือกมีชื่อว่า KPC-01 จากถ้ำเขาแพร อ.บ้านไร่ จ.อุทัยธานี
3. การเตรียมตัวอย่าง
เตรียมตัวอย่างโดยการตัดหินงอก (ความยาว 20.5 เซนติเมตร) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนตามแนวยาว (Longitudinal section) ได้เป็นตัวอย่าง KPC-01-1 และตัวอย่าง KPC-01-2 ตามลำดับ (รูปที่ 5 และ รูปที่ 6)
 - 3.1 ส่วนที่หนึ่ง ตัวอย่าง KPC-01-1 นำไปขัดมัน (Polishing) เพื่อใช้ในการศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก (รูปที่ 7)
 - 3.2 ส่วนที่สอง ตัวอย่าง KPC-01-2 นำไปเจาะตามแนวชั้นการเจริญเติบโตทุกๆ 2 มิลลิเมตรเพื่อนำผงตัวอย่างที่ได้จากการเจาะ ส่งไปวิเคราะห์หาค่าไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ด้วยเครื่อง IR-MS (รูปที่ 8)



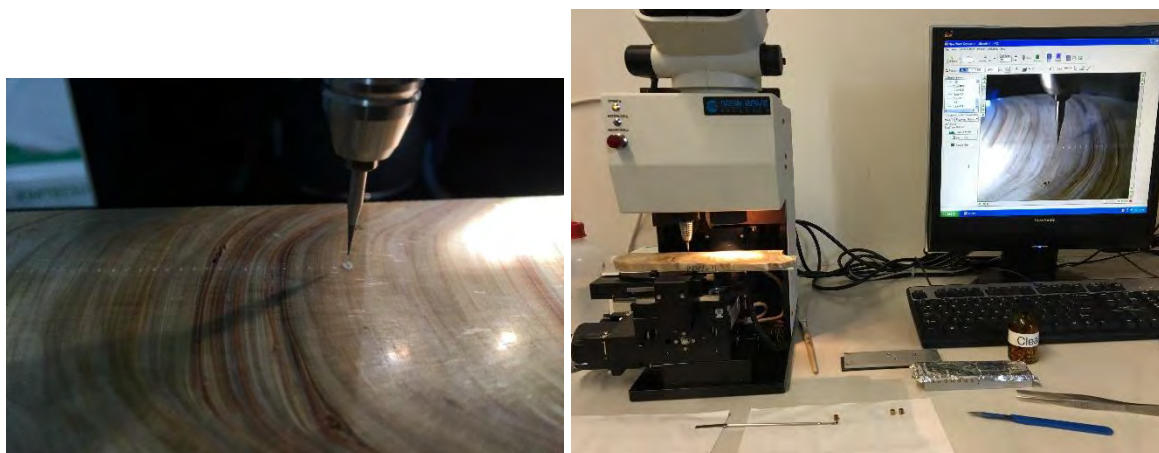
รูปที่ 5 : การตัดแบ่งตัวอย่างหินงอกออกเป็น 2 ส่วนตามแนวยาว



รูปที่ 6 : ตัวอย่าง KPC-01-1 และ KPC-01-2



รูปที่ 7 : การนำตัวอย่าง KPC-01-1 ไปขัดมัน (Polishing)



รูปที่ 8 : ตัวอย่าง KPC-01-2 ที่เจาะตามแนวชั้นการเจริญเติบโตทุกๆ 2 มิลลิเมตร

4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของตัวอย่าง KPC-01-1

นำเทคโนโลยีสมาร์ทเลนส์มาใช้ในการขยายภาพและถ่ายภาพต่อเนื่องด้วยเทคนิคฟานอรามา ภายใต้ความร่วมมือกับ ศ.ดร.สนอง เอกสิทธิ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 : ศ.ดร.สนอง เอกสิทธิ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาฯ ผู้คิดค้นเทคโนโลยีสมาร์ทเลนส์

4.1 เตรียมอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ดังนี้

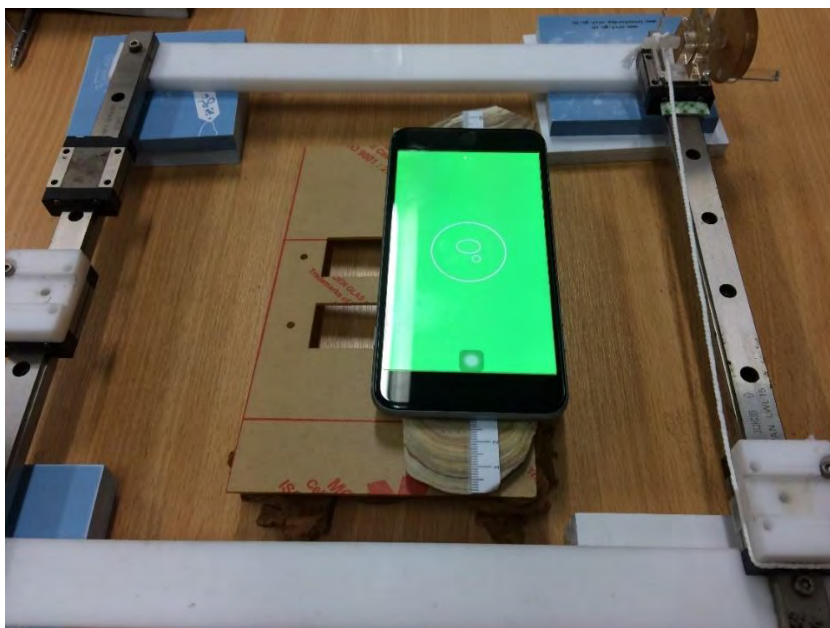
1. ตัวอย่าง KPC-01-1 ที่ทำการขัดมันเรียบร้อยแล้ว
2. สเกลที่ทำจากกระดาษ A4 หนา 70 แกรม ความยาว 20.5 เซนติเมตร
3. เทปชุ่น 3M
4. ดินน้ำมัน
5. แผ่นไม้กระดาน
6. ชุดสมาร์ตเลนส์ 1 ชุด (เลือกใช้เลนส์กำลังขยาย x20)
7. สมาร์ทโฟนใช้สำหรับถ่ายรูป (iPhone 6s plus)
8. ชาร์ตสี RAL Classic Color Chart ที่ใช้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก

4.2 วิธีการทดลอง

1. ใช้เทปชุ่น 3M ติดสเกลลงบนตัวอย่าง KPC-01-1 (รูปที่ 10)
2. ประกอบชุดสมาร์ตเลนส์ให้พร้อมใช้งาน จากนั้นนำตัวอย่างวางลงบนไม้กระดาน และใช้ดินน้ำมันปรับความสูง - ต่ำของไม้กระดาน ให้ตัวอย่างมีระนาบเดียวกันทั้งหมด (รูปที่ 11)
3. ใช้เลนส์กำลังขยาย x20 หนีบติดกับกล้องถ่ายรูปของสมาร์ทโฟนที่เตรียมไว้ จากนั้นวางสมาร์ทโฟนบนแท่นเคลื่อนที่ เพื่อปรับระยะโฟกัสของภาพ (ทดสอบการเคลื่อนที่ของแท่นวางสมาร์ทโฟนว่าไม่มีการสะดุดระหว่างการถ่ายภาพด้วยวิธีพานอรามา) (รูปที่ 12)
4. ทำการถ่ายภาพตัวอย่าง (รูปที่ 13)
5. นำภาพเข้าสู่คอมพิวเตอร์และทำการนับจำนวนชั้นการเจริญเติบโต



รูปที่ 10 : การใช้เทปชุ่น 3M ติดสเกลลงบนตัวอย่างหิ้งอก KPC-01-1



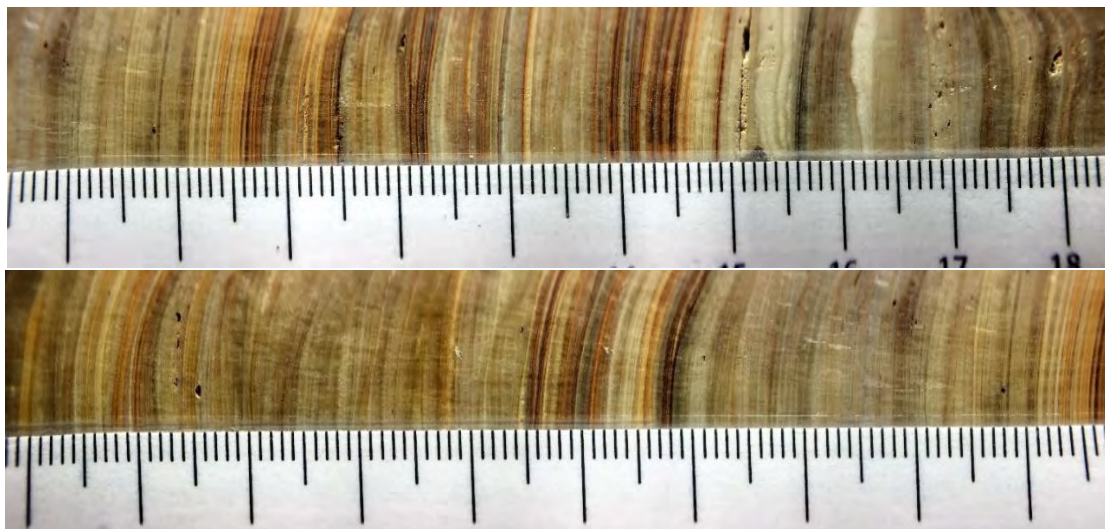
รูปที่ 11 : การใช้ดินน้ำมันปรับไม้กระดานให้ตัวอย่างอยู่ในระนาบเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 12 : การติดสมาร์ทเลนส์กับกล้องสมาร์ทโฟน และใช้โหมดการถ่ายภาพพาโนรามา



รูปที่ 13 : การถ่ายภาพขึ้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอก



รูปที่ 14 : ภาพที่ได้จากถ่ายโดยสมาร์ทเลนส์กำลังขยาย x20

5. วิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) และออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$)

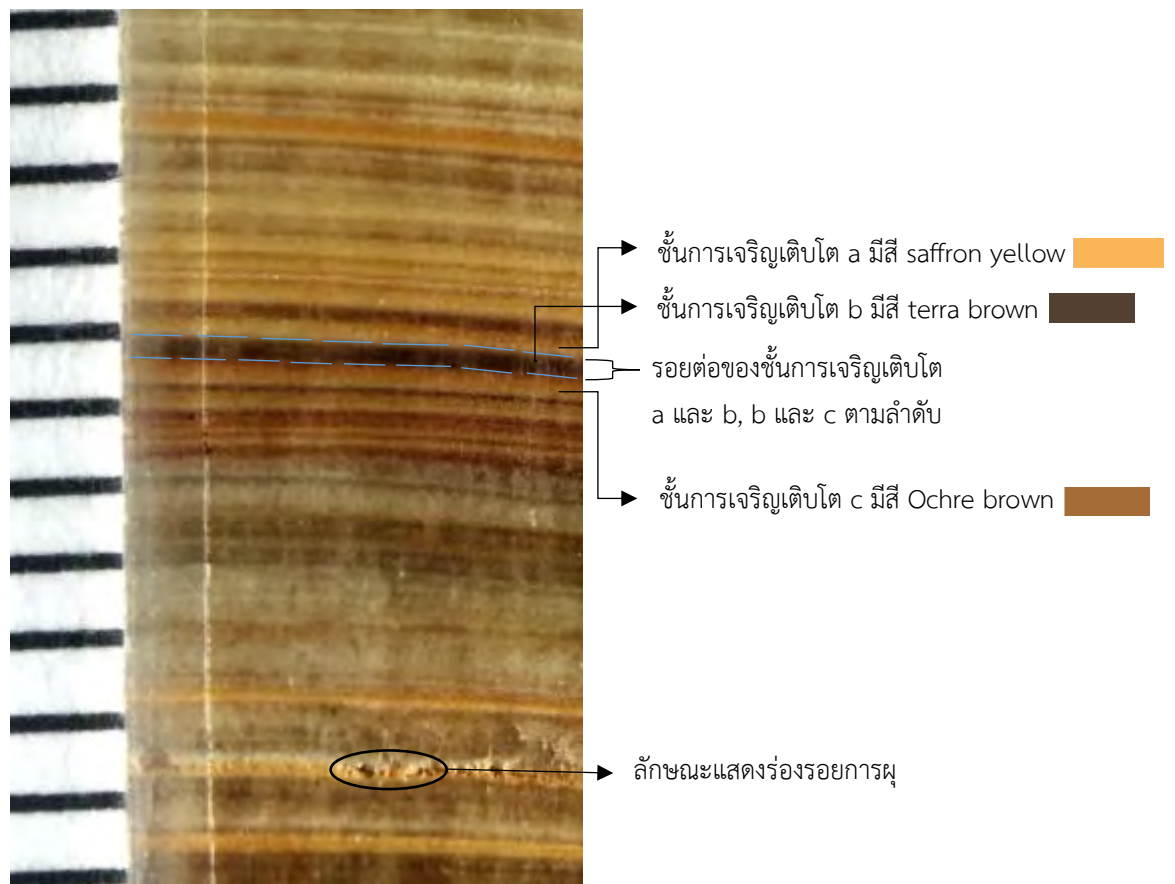
นำผงที่ได้จากการเจาะตัวอย่าง KPC-01-2 ทั้งหมด 97 ตัวอย่าง ส่งไปวิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจน ด้วยเครื่อง Isotope Ratio Mass Spectrometer (IR-MS) ที่ศูนย์วิจัย Max Planck Institute for Chemistry, Mainz ณ ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี้ ภายใต้ความร่วมมือของ อ.ดร.สกลวรรณ ชาวไชย และ Prof. Dr. Hubert Vonhof

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของหินงอก

จากการนำเทคโนโลยีสแกนนิ่งมาใช้ในการขยายภาพด้วยกำลังขยาย x20 และถ่ายภาพต่อเนื่อง (พาโนรามา) เพื่อใช้ศึกษาสีและจำนวนชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอก KPC-01-1 การศึกษานับจำนวนชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกจากภาพถ่ายกำลังขยาย x20 พิจารณาจากความแตกต่างของสีในชั้นการเจริญเติบโต (รูปที่ 15) พบว่าตัวอย่างหินงอก KPC-01-1 ดังกล่าวมีชั้นการเจริญเติบโตทั้งหมด 761 ชั้น แสดงดังรูปที่ 17












รูปที่ 15 : ตัวอย่างการนับชั้นการเจริญเติบโต จากความแตกต่างของสีที่ 102-113 มิลลิเมตรจากส่วนบนของหินงอก

การนับชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก สามารถแบ่งสีที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 9 สี โดยกำหนดให้แต่ละสีมีค่าดัชนี (index) เฉพาะตัว ตั้งแต่ดัชนีที่ 1 – 9 ดังนี้

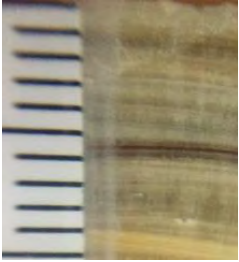
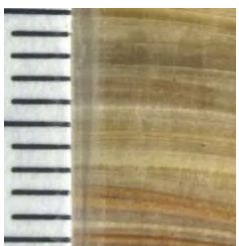

index 1: สี traffic white	index 2: สี light grey
index 3: สี grey	index 4: สี zink yellow
index 5: สี saffron yellow	index 6: สี sand yellow
index 7: สี curry	index 8: สี ochre brown
index 9: สี terra brown	

ซึ่งสีที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบเป็นสีที่มีมาตรฐานเดียวกันทั่วโลก (รูปที่ 16)

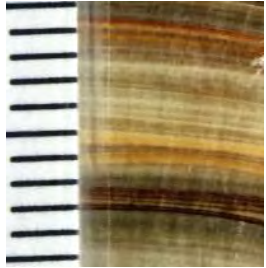
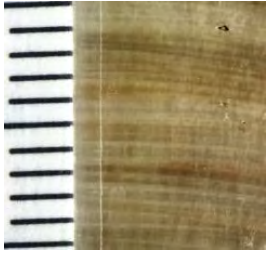

index:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
color:									
RAL:	9016	7035	7032	1018	1017	1002	1027	8001	8028
R:	231	215	184	248	245	198	157	108	078
G:	235	215	183	243	208	166	145	059	059
B:	218	215	153	053	051	100	001	042	049


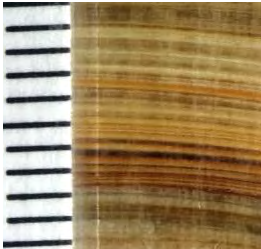
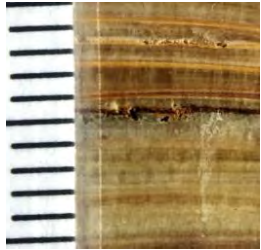
รูปที่ 16 : สีมาตรฐานที่ใช้ในการเปรียบเทียบสีของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

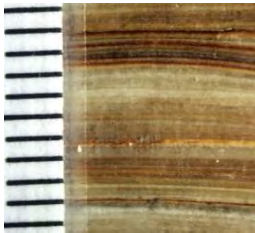
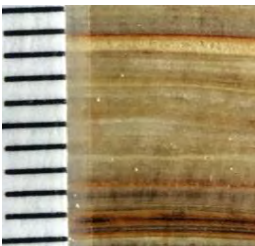
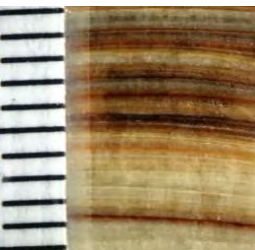
(ที่มา : <http://www.misterpainting.com/RAL-Color/RAL-Color-Conversion.html>)

cm	ภาพจากสมาร์ทโฟน	mm	color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสีไอโซโทป	ดัชนีสี
1		1	Traffic white	1	-	
		2	Curry, Silk grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		3	Cream, Silk grey, Cream	4	-	
		4	Traffic white, Silk grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		5	Traffic white, Silk grey	2	-	
		6	Quartz grey, Terra brown	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		7	Cream, Curry	5	เป็นชั้นสลับกันระหว่าง 2 สีข้างต้น	
		8	Cream, Silk grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		9	Cream, Curry	4	-	
		10	Traffic white, Zink yellow	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี zink yellow	4
2		11	Curry, Traffic white	3	-	
		12	Traffic white, Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		13	Traffic white, Curry	6	-	
		14	Sand yellow, Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		15	Traffic white, Zink yellow	5	-	
		16	Zink yellow, Sand yellow	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี sand yellow	6
		17	Cream, Zink yellow	2	-	
		18	Curry, Cream, Sand - Saffron yellow	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		19	Sand yellow, Saffron yellow, Silk grey	5	-	
		20	Sand -Saffron yellow, Ochre brown	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
3		21	Quartz grey, Silk grey	3	-	
		22	Quartz grey, Silk grey, Traffic white	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		23	Traffic white, Light grey	4	-	
		24	Light grey, Cream	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		25	Traffic white, Light grey	7	-	
		26	Light grey, Light grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์เป็นสี light grey	2
		27	Light grey, Light grey, Sand yellow	6	-	
		28	Sand yellow, Silk grey	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		29	Sand yellow, Silk grey	5	-	
		30	Traffic white, Quartz grey, Pebble grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	1

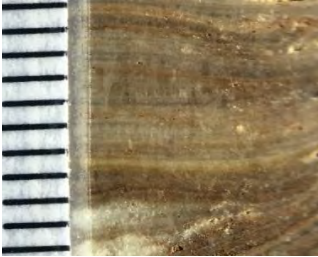
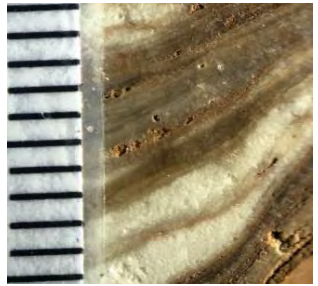

cm	ภาพจากสมาร์ทเลนส์	mm	Color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ไอโซโทป	ดัชนีสี
4		31	Curry, Cream	5	-	
		32	Silk grey, Light grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		33	Light grey, Ochre brown	5	-	
		34	Light grey, Ochre brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		35	Curry, Light grey	2	-	
		36	Traffic white, Curry	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7
		37	Traffic white, Curry	3	-	
		38	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		39	Traffic white, Curry	3	-	
		40	Traffic white, Curry	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
5		41	Curry	2	-	
		42	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		43	Traffic white, Sand grey, Curry	5	-	
		44	Curry, Traffic white	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		45	Curry	4	-	
		46	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7
		47	Traffic white, Curry	5	-	
		48	Clay brown, Honey yellow	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		49	Traffic white, Clay brown	3	-	
		50	Silk grey, Traffic white, Light grey	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี sand brown	6
6		51	Light grey, Curry	5	-	
		52	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7
		53	Traffic white, Curry	4	-	
		54	Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		55	Sand yellow, Quartz grey	2	ในชั้นสี sand yellow มีร่องรอยการผุ	
		56	grey, Clay & Ochre brown, Light grey	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		57	Clay brown, Grey, Traffic white, Curry	5	-	
		58	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9
		59	Daffodil yellow, Terra brown	5	-	
		60	Ochre brown, Traffic white, Quartz grey	8	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7

cm	ภาพจากส마트เลนส์	mm	Color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ไอโซโทป	ดัชนีสี
7		61	Grey, Ochre brown, Saffron yellow	6	-	
		62	Clay brown, Daffodil yellow, Curry	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		63	Traffic white, Curry	3	-	
		64	Silk grey, Traffic white	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		65	Traffic white, Sand yellow	5	-	
		66	Saffron yellow, Clay brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		67	Daffodil yellow, Silk - Quartz grey	2	-	
		68	Terra brown, Clay brown	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9
		69	Terra brown, Quartz grey	2	-	
		70	Curry, Light grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
8		71	Traffic white, Light grey	3	มีร่องรอยการผูกในชั้นสี light grey	
		72	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		73	Traffic white, Curry	3	-	
		74	Traffic white, Curry	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		75	Light grey, Traffic white	3	-	
		76	Traffic white, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		77	Traffic white, Curry	3	-	
		78	Traffic white, Light grey	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		79	Traffic white, Light grey	3	-	
		80	Traffic white, Pebble grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
9		81	Light grey, Traffic white	2	-	
		82	Traffic white, Ochre brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		83	Traffic white, Ochre brown	4	-	
		84	Traffic white, Pebble grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		85	Traffic white, Ochre brown	4	-	
		86	Pebble grey	1	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		87	Silk grey, Ochre brown	4	-	
		88	Traffic white, Light grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		89	Traffic white, Terra brown	5	-	
		90	Traffic white, Curry	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2

cm	ภาพจากสมาร์ทเลนส์	Mm	color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ที่ไอโซโทป	ดัชนีสี
10		91	Traffic white, Light grey, Curry	4	-	
		92	Light grey, Traffic white	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		93	Light grey, Pebble grey, Ochre brown	4	-	
		94	Curry, Ochre brown	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		95	Curry, Light grey, Ochre brown	4	-	
		96	Traffic white, Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		97	Traffic white, Curry	5	-	
		98	Traffic white, Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		99	Cream, Curry, Sand yellow	7	-	
		100	Sand yellow, Traffic white	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
11		101	Traffic white, Curry	5	-	
		102	Curry, Zink yellow, Cream, Ochre brown	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7
		103	Sand yellow, Cream, Ochre brown	5	-	
		104	Traffic white, Ochre brown, Clay brown	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		105	Clay brown, Saffron - Sand yellow	5	-	
		106	Sand yellow, Cream, Clay brown	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		107	Terra brown, Ochre brown, Curry	5	-	
		108	Ochre brown, Sand yellow, Pebble grey	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		109	Light grey, Curry	4	-	
		110	Light grey, Traffic white	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
12		111	Cream, Sand yellow, Saffron yellow	4	-	
		112	Clay brown, Traffic white, Saffron yellow	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		113	Clay brown, Cream, Saffron yellow	4	-	
		114	Clay brown, Cream	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9
		115	Saffron yellow, Curry, Terra brown	4	มีร่องรอยผลดอดดัชนีสี terra brown	
		116	Pebble grey, Light grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		117	Cream, Curry	3	-	
		118	Curry, Light grey, Traffic white	5	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		119	Curry, Cream	4	-	
		120	Traffic white	1	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3

cm	ภาพจากสมาร์ทเลนส์	mm	color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ที่ไอโซโทป	ดัชนีสี
13		121	Curry, Clay brown, Grey, Saffron yellow	5	-	
		122	Clay & Terra & Ochre brown, Curry	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		123	Quartz grey, Clay brown, Saffron yellow	6	-	
		124	Traffic white, Light grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9
		125	Traffic white, Ochre brown	3	-	
		126	Traffic white, Clay brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	7
		127	Clay brown, Saffron yellow, Pebble grey	2	-	
		128	Terra brown, Light grey, Sand yellow	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		129	Curry, Traffic white, Light grey, Clay brown	5	-	
		130	Quartz grey, Traffic white, Curry	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
14		131	Silk grey	3	-	
		132	Ochre brown, Saffron yellow, Cream	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		133	Sand yellow, Traffic white, Curry	4	-	
		134	Curry, Traffic white, Silk grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		135	Curry, Traffic white	2	-	
		136	Traffic white, Light grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		137	Traffic white, Silk grey	2	-	
		138	Silk grey, Ochre brown, Quartz grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		139	Quartz grey, Light grey, Terra brown	5	-	
		140	Saffron yellow, Clay & Terra brown	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
15		141	Traffic white, Pebble grey, Ochre brown	4	-	
		142	Terra & Ochre & Clay brown, Curry	7	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		143	Light grey, Curry, Terra brown	4	-	
		144	Silk grey, Clay brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี ochre brown	8
		145	Curry, Terra & Clay brown	8	-	
		146	Curry, Cream, Sand & Saffron yellow	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		147	Cream, Sand yellow, Curry	3	-	
		148	Traffic white, Silk grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี curry	7
		149	Pebble grey, Ochre brown	3	-	
		150	Traffic white, Light grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2

cm	ภาพจากสมาร์ทเลนส์	mm	Color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ไอโซโทป	ดัชนีสี
16		151	Traffic white, Light grey	2	เป็นตำแหน่งที่มีรอยแตกออกของตัวอย่าง	
		152	Zink yellow, Pebble grey	1	ตั้งแต่ตำแหน่ง 152-156 mm มีร่องรอยการผุขนาดใหญ่ ทำให้ชั้นการเจริญเติบโตมีความโค้งเล็กน้อย ไม่ขนานกับชั้นเจริญเติบโตในตำแหน่งก่อนหน้านี้	2
		153	Traffic white	1		1
		154	Traffic white	1		2
		155	Pebble grey, Traffic white	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey, traffic white และ light grey ตามลำดับ	
		156	Traffic white, Silk grey, Grey	8		
		157	Terra brown, Quartz & grey	5	-	
		158	Curry, Ochre brown	6	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		159	Pebble grey	3	-	
		160	Light & Silk grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
17		161	Silk grey	1	-	
		162	Cream, Traffic white	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
		163	Traffic white	1	ชั้นที่มีสี Traffic white ค่อยๆเพิ่มความหนามากขึ้น	
		164	Cream, Pebble grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		165	Cream, Pebble grey	2	--	
		166	Pebble grey, Silk grey	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		167	Cream, Quartz grey	2	มีร่องรอยการผุ	
		168	Silk & Light grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		169	Traffic white	1	มีร่องรอยการผุจำนวนมาก	
		170	Silk grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี traffic white	1
18		171	Pebble & Light grey	3	-	
		172	Silk grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		173	Light & Quartz grey	3	-	
		174	Clay brown, Quartz grey	2	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3
		175	Quartz grey, Curry	4	-	
		176	Pebble grey, Curry	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		177	Light grey	3	-	
		178	Curry, Silk grey, Terra brown	4	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2
		179	Pebble grey, Cream	2	มีรอยผุขนาดใหญ่ในชั้นสี pebble grey	
		180	Cream, Quartz grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3

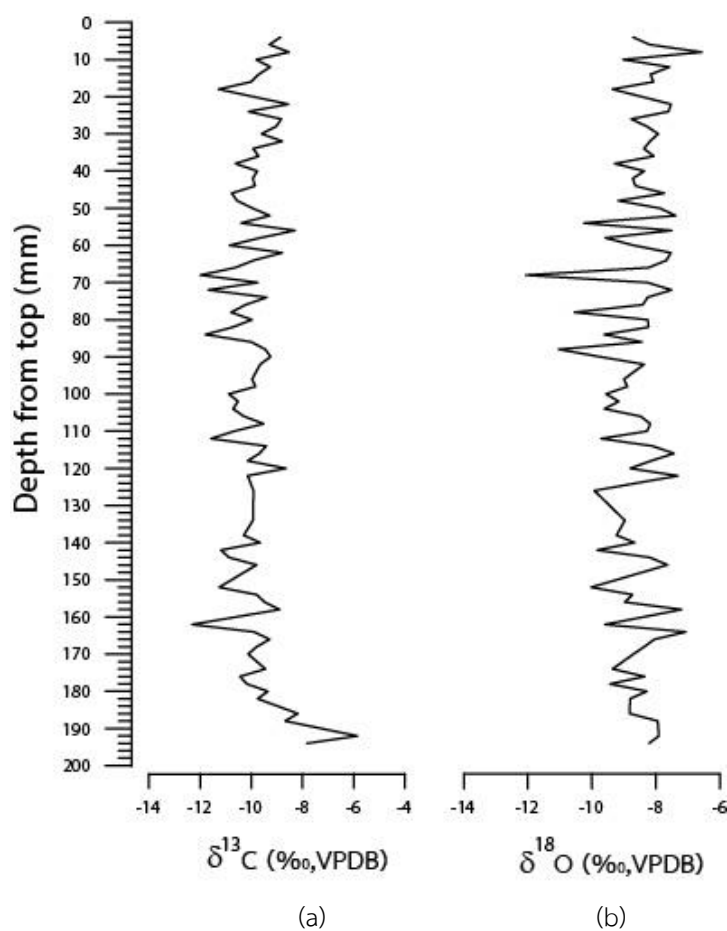
cm	ภาพจากสมาร์ทเลนส์	mm	Color	จำนวนชั้น	สีของตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ไอโซโทป	ดัชนีสี	
19		181	Sad yellow, Quartz grey	3	-		
		182	Clay brown, Grey, light grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3	
		183	Silk grey, Clay brown	3	-		
		184	Pebble & Light grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2	
		185	Sand grey	1	-		
		186	Light grey, Clay brown	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี light grey	2	
		187	Silk grey, Sand yellow, Curry	4	-		
		188	Quartz grey, Terra brown	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9	
		189	Traffic white	1	-		
		190	Quartz grey	1	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี grey	3	
20		191	Traffic white	1	มีร่องรอยการผุ ชั้นมีความหนาแน่นมาก		
		192	Traffic white, Grey, Terra brown	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9	
		193	Terra brown, Quartz grey	4	-		
		194	Terra brown, Quartz grey	3	ตำแหน่งที่เจาะไปวิเคราะห์ตรงกับสี terra brown	9	
		195	Silk & Quartz grey	2	-	-	
		196	Silk grey, Ochre brown	2	-	-	
		197	Terra brown, Traffic white	2	-	-	
		198	Curry, Terra brown	3	-	-	
		199	Traffic white	1	-	-	
		200	Ochre brown	1	-	-	
21		201			-	-	
		202	Traffic white	1		-	
		203				-	-
		204				-	-
		205	Terra brown	1		-	-

รูปที่ 17 : ตารางบันทึกข้อมูลการนับชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

3.2 การวิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก

หลังจากนำผงที่ได้จากการเจาะตัวอย่าง KPC-01-2 ทั้งหมด 97 ตัวอย่าง ส่งไปวิเคราะห์ไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนด้วยเครื่อง Isotope Ratio Mass Spectrometer (IR-MS) ที่ศูนย์วิจัย Max Planck Institute for Chemistry, Mainz ณ ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมันนี้ ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูล ดังกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูล (รูปที่ 18)

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล พบว่าไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -9.87 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความสูงที่สุดที่ตำแหน่ง 192 มิลลิเมตร เท่ากับ -5.86 เปอร์เซ็นต์ และมีความต่ำสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 162 มิลลิเมตร เท่ากับ -12.31 เปอร์เซ็นต์ ไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -8.58 เปอร์เซ็นต์ โดยมีความสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่ง 8 มิลลิเมตร เท่ากับ -6.56 เปอร์เซ็นต์ และมีความต่ำสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 68 มิลลิเมตรเท่ากับ -12.07 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 18 : กราฟแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูล (a) ไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) (b) ไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$)

บทที่ 4

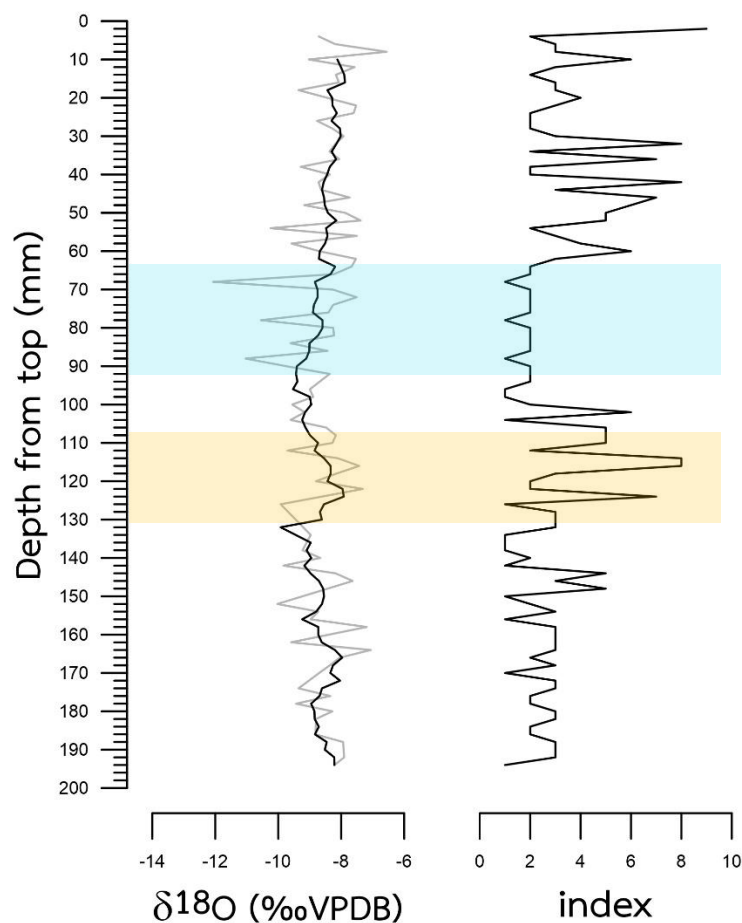
อภิปรายผล

4.1 ลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของหินงอก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 3 ผู้ทำโครงการเลือกใช้สมาร์ทเลนส์กำลังขยาย $\times 20$ ในการถ่ายภาพต่อเนื่องภายใต้แสง UV เพราะเป็นกำลังขยายที่ให้ภาพความแตกต่างของสีในแต่ละชั้นการเจริญเติบโตชัดมากที่สุด เนื่องจากในการทดลองใช้กำลังขยายของสมาร์ทเลนส์ที่สูงขึ้น (กำลังขยาย $\times 40$) ภายใต้การดูแลของ ศ.ดร.สนอง เอกสิทธิ์ พบว่าภาพที่ได้มีลักษณะมูมองภาพที่แคบและค่อนข้างมืด (ทำให้สังเกตเห็นความแตกต่างของสีได้ยาก) แต่สมาร์ทเลนส์กำลังขยาย $\times 40$ สามารถมองเห็นลักษณะของผลึกได้ชัดเจนมากขึ้น เหมาะแก่การศึกษาเชิงลึกในด้านการจัดเรียงตัวของผลึกแร่เป็นอย่างมาก ดังนั้นการทำโครงการในครั้งนี้จึงเลือกกำลังขยายของสมาร์ทเลนส์ให้ตรงตามวัตถุประสงค์มากที่สุด

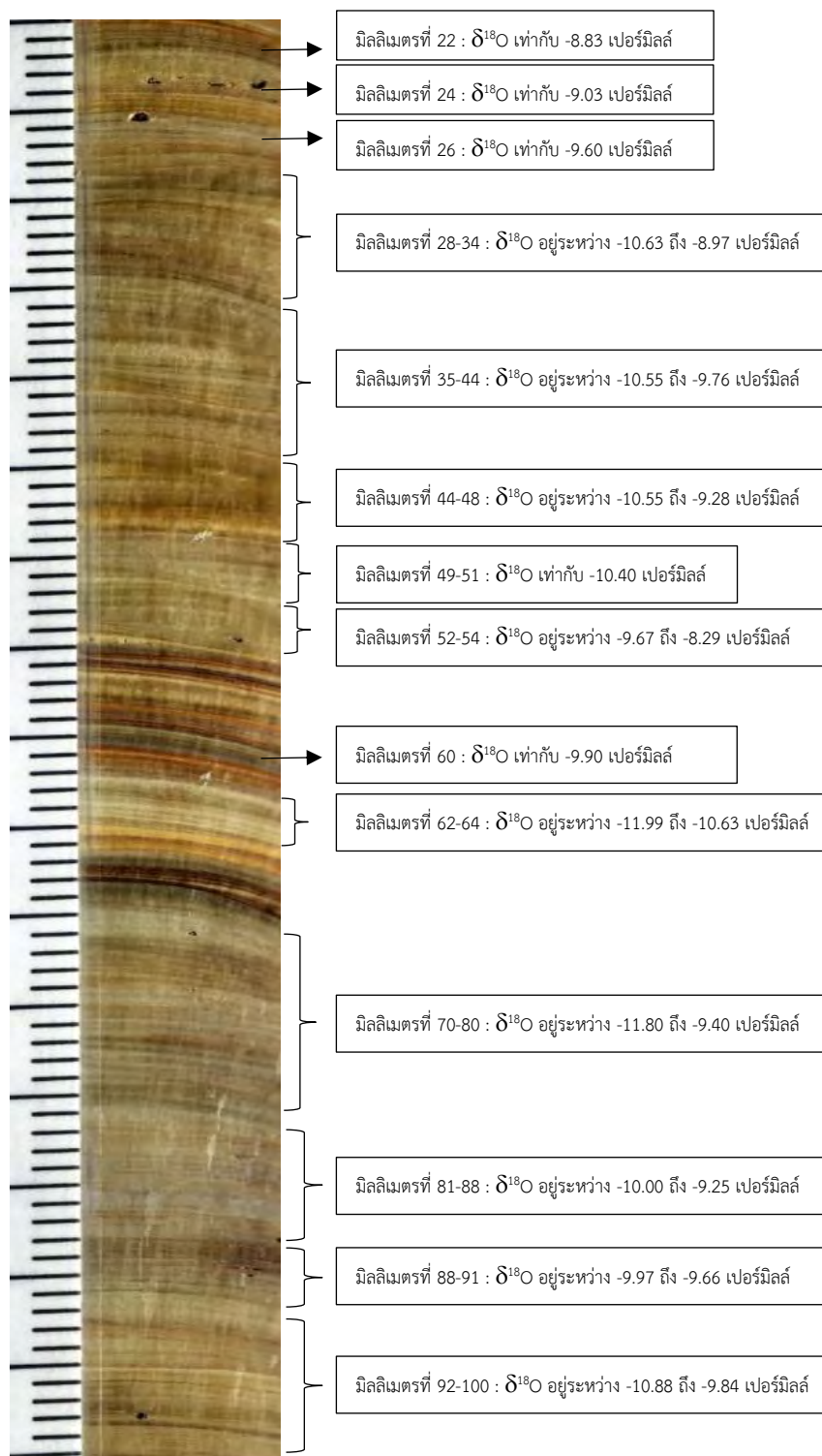
จากการนับชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอก KPC-01-1 โดยสังเกตความแตกต่างของสีในแต่ละชั้นการเจริญเติบโตได้ทั้งหมด 761 ชั้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถแบ่งสีที่แตกต่างกันได้ทั้งหมด 9 สี และกำหนดให้แต่ละสีมีค่าดัชนี (index) เฉพาะตัว ตั้งแต่ดัชนีที่ 1-9 โดยเริ่มจากโทนสีขาว – เทา โทนสีเหลือง และสิ้นสุดที่โทนสีน้ำตาล ทั้งนี้ชั้นการเจริญเติบโตมีการสลับโทนสีกันไปอย่างไม่มีระบบ กล่าวคือบางโทนสีในบางช่วงจะกว้างแต่ในบางช่วงจะแคบ

คณะของ Webster et. al. (2007) ได้ศึกษาสีของหินงอกโดยกำหนดค่าดัชนีของสีตั้งแต่ดัชนีที่ 1-8 โดยเริ่มจากโทนสีขาวเทาไปหาโทนสีน้ำตาล จากการศึกษาในครั้งนี้ระบุว่าสีของหินงอกมีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) คือสีที่มีค่าดัชนีต่ำ (ดัชนีที่ 1-4) สัมพันธ์กับค่า $\delta^{18}\text{O}$ ที่มีค่าน้อย ในทางกลับกันสีที่มีค่าดัชนีสูง (ดัชนีที่ 4-8) สัมพันธ์กับค่า $\delta^{18}\text{O}$ ที่มีค่ามาก ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของสีและค่าไอโซโทปออกซิเจนของตัวอย่างหินงอก KPC-01-2 พบว่าสีของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจนไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยข้างต้น (รูปที่ 19)



รูปที่ 19 : การเปรียบเทียบค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) (กราฟสีอ่อน) และดัชนีสีของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก

สำหรับการศึกษาในประเทศไทย ผู้ทำโครงการนี้ความเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Muangsong et al., 2011 ที่ศึกษาระดับสีเทา (Grey scale) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกจากถ้ำน้ำจาง อ.ปางมะผ้า จ.แม่ฮ่องสอน และได้สรุปว่าระดับสีเทาของหินงอกมีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) และอัตราการเจริญเติบโต โดยระบุว่าระดับสีที่มีความสว่างมากกว่าจะสัมพันธ์กับชั้นการเจริญเติบโตที่กว้างกว่า มีค่าไอโซโทปออกซิเจนต่ำ และมีอัตราการเจริญเติบโตสูง ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝนได้ เพราะอาจถูกควบคุมด้วยเงื่อนไขเดียวกัน



รูปที่ 20 : ชั้นการเจริญเติบโตของหินอก KPC-01-1 ตั้งแต่มิลลิเมตรที่ 21-100 จากส่วนบนของหินงอก

จากรูปที่ 20 จะเห็นว่าสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกมีความเข้มและความสว่างแตกต่างกัน จากการสังเกตเบื้องต้นพบว่าส่วนใหญ่ชั้นการเจริญเติบโตที่มีสีสว่างมากกว่า จะมีค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ต่ำกว่าชั้นการเจริญเติบโตที่มีสีเข้มกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ระดับสีเทาในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกโดย Muangsong et al., 2011 จึงอาจสรุปได้ว่าระดับสีที่อ่อนกว่าในตัวอย่างหินงอก KPC-01-1 สามารถตีความไปในทิศทางเดียวกันกับระดับสีเทาที่สว่างกว่าของตัวอย่างหินงอกจากถ้ำน้ำจาง อ.ปางมะผ้า จ.แม่ฮ่องสอน ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในเงื่อนไขที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจากการวิเคราะห์และตีความเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Webster et al., 2007 และ Muangsong et al., 2011 สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่าสีของหินงอก มีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอก

นอกจากนี้ลักษณะความเข้มของสีในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกอาจจะสามารถบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝนได้เช่นเดียวกับลักษณะความเข้มของสีในวงปีของต้นไม้ กล่าวคือสีที่อ่อนกว่า (ดัชนีที่ 1-4) บ่งบอกถึงฤดูกาลที่มีปริมาณน้ำฝนมากกว่าสีที่เข้มกว่า (ดัชนีที่ 5-9) ซึ่งแต่ละสีที่แสดงในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการตกสะสมตัวหรือการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมที่อยู่ภายในถ้ำและ/หรือสภาพแวดล้อมเหนือถ้ำ เช่น สภาพบรรยากาศ พืชพันธุ์และดิน ชั้นหินปูนให้น้ำ การเจริญเติบโตของผลึกหินถ้ำปฐมภูมิ และการเปลี่ยนแปลงชั้นทุติยภูมิ กระบวนการเหล่านี้ทำให้หินงอกมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งหินงอกจะเก็บลักษณะเฉพาะตัวเหล่านี้ไว้ภายในชั้นการเจริญเติบโต (Fairchild et al., 2006)

นอกจากนี้สีในแต่ละชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกอาจจะบ่งบอกถึงธาตุร่องรอยบางชนิดที่มีการสะสมตัว เช่น สีนํ้าตาลเข้ม อาจจะบ่งบอกถึงธาตุเหล็ก (Fe) หรือ ธาตุร่องรอยอื่นๆ ซึ่งต้องทำการเปรียบเทียบกับการศึกษาธาตุร่องรอยจากตัวอย่างหินงอกเดียวกัน จากโครงการของนายพศุทธิ์ รัตนศรีมงคล เพื่อหาความสัมพันธ์ของสีกับธาตุร่องรอยใน ชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกต่อไป

ตัวอย่างหินงอกที่นำมาศึกษานั้นได้ทำการหาอายุด้วยวิธีการหาอายุยูเรเนียม – ทอเรียม (U-Th dating) โดย อ.ดร.สกวรรณ ชาวไชย พบว่าหินงอกดังกล่าวมีอายุอยู่ในช่วง 2000 ปี ซึ่งบริเวณ 0.5 มิลลิเมตรจากส่วนบนของหินงอกมีอายุอยู่ในช่วง ค.ศ. 1929 - ค.ศ. 1952 (ประมาณ ค.ศ. 1941) และสมมติให้หินงอกมีความยาวประมาณ 200 มิลลิเมตร ที่มีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง (ไม่มีช่วงการหยุดสะสมตัวหรือ hiatus) ซึ่งจากการนับจำนวนชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอกที่นำมาศึกษาได้ทั้งหมด 761 ชั้น ทำให้สามารถตีความได้ว่าชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกนี้ไม่ใช่การสะสมตัวประจำปี (annual lamina)

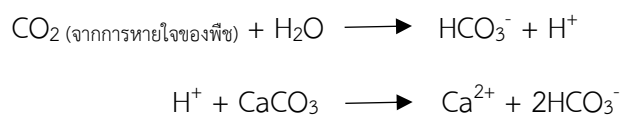
4.2 การเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนของหินงอก

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลในบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจน ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอกมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละชั้นการเจริญเติบโต ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมหรือสภาพภูมิอากาศในการสะสมตัวของหินงอก (ตัวอย่างหินงอก KPC-01-2) ดังอภิปรายผลต่อไปนี้

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง McDermott et al., 2004 ได้กล่าวถึงเงื่อนไขที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) ไว้โดยสังเขป ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการสะสมตัวของแคลไซต์ (CaCO_3) ในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นระบบเปิด ทำให้การเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอนมีความเกี่ยวข้องกับสภาพแวดล้อมเหนือถ้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโซนของดิน พืชพันธุ์ที่ปกคลุมถ้ำและอาจจะเกี่ยวข้องกับหินเหี่ยว (กรณีระบบปิด) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ของ Fairchild et al., 2006 ที่ระบุว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอน เกิดจากดินและส่วนบนของบริเวณเหนือคาสต์ (โซนการละลาย) โดยการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอนสามารถถูกควบคุมโดย สัดส่วนของพืช C3 และ C4 การละลายในระบบเปิดและระบบปิด องค์ประกอบของหินเหี่ยว (มีผลเมื่อเป็นระบบปิด) และจลนศาสตร์ของการสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน

McDermott et al., 2004 ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอนสามารถเกิดขึ้นได้ เพราะดินได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นจำนวนมากจากการหายใจของพืช และเมื่อมีน้ำซึมผ่านชั้นดินดังกล่าว ทำให้เกิดการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ได้เป็นสารละลายคาร์บอเนตซึมเข้าสู่รอยแตกของถ้ำ ดังสมการ



ซึ่งเมื่อเกิดสภาวะที่เหมาะสมแคลไซต์จะตกสะสมตัวและพัฒนาไปเป็นหินงอกต่อไป ดังนั้นหินงอกที่เกิดขึ้นจะสามารถบันทึกไอโซโทปคาร์บอนไว้ได้ กล่าวคือ คาร์บอนในสารละลายคาร์บอเนตที่สะสมตัวจากการหายใจของพืช C3 และ C4 จะมีค่าไอโซโทปคาร์บอนอยู่ในช่วง -14 ถึง -6 เพอร์มิลล์ และช่วง -6 ถึง +2 เพอร์มิลล์ ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างหินงอก KPC-01-2 ตั้งแต่มีลลิเมตรที่ 2 – 194 (ทุกๆ 2 มิลลิเมตร) พบว่าค่าไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) มีค่าอยู่ระหว่าง -12.31 ถึง -5.86 เปอร์มิลล์ ซึ่งอยู่ในช่วงการสะสมตัวของคาร์บอนเนตที่ได้จากการหายใจของพืช C3 ตามการระบุของ McDermott et al., 2004 และจากการสำรวจภาคสนามของ นางสาววิษา ใฝ่สนจำลองศรี และคณะในปี พ.ศ. 2558 - พ.ศ. 2559 ระบุว่าบริเวณพื้นที่ศึกษาในอำเภอบ้านไร่มีลักษณะเป็นป่าเบญจพรรณและพบไม้ขึ้นอยู่ทั่วไป ไม้พื้นเป็นพวกหญ้า (ซึ่งไม่ใช่หญ้าในตระกูลพืช C4) โดยทางชีววิทยาไม่ได้ระบุพืชเหล่านี้ไว้ในกลุ่มพืช C4 ดังนั้นสามารถวิเคราะห์ได้ว่าพืชพันธุ์ที่ปกคลุมถ้ำในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นพืชในตระกูลพืช C3 (เป็นตระกูลส่วนใหญ่ของพืชทั้งหมด)

(หมายเหตุ : พืชตระกูล C4 ได้แก่ อ้อย, ข้าวโพด, ข้าวฟ่าง, หญ้าคา, หญ้าขน, บานไม่รู้โรย เป็นต้น)

แต่อย่างไรก็ตามการตีความของไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) ในหินงอกยังคงเป็นเรื่องยากที่จะหาข้อบ่งชี้ในการระบุปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปคาร์บอนได้อย่างแน่ชัด (McDermott et al., 2004) ดังนั้นการตีความดังกล่าวข้างต้นเป็นเพียงการตีความในเบื้องต้นในการทำนายสภาพแวดล้อมบรรพกาลบริเวณเหนือถ้ำ

นอกจากนี้ยังไม่เคยมีการใช้ไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) ในการศึกษาหินงอกในประเทศไทยมาก่อน ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมอย่างละเอียดเกี่ยวกับพืชพันธุ์ที่ปกคลุมถ้ำและศึกษาหินงอกในบริเวณใกล้เคียงเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มข้อมูลทางการศึกษาด้านไอโซโทปคาร์บอนและทำให้ผลการแปลความหมายของข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$)

การแปลความหมายของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในหินงอก ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ในอดีตนักวิทยาศาสตร์ใช้การเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจนในการบ่งบอกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบรรพกาล แต่อย่างไรก็ตามค่าของไอโซโทปออกซิเจนในหินงอกยังคงถูกควบคุมโดยหยดน้ำ (drip water) ที่ซึมเข้ามาภายในถ้ำซึ่งอาจจะบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝนและลักษณะภูมิอากาศภายนอกถ้ำได้ จากเงื่อนไขดังกล่าวนักวิจัยพยายามค้นหาคำตอบว่า ไอโซโทปออกซิเจนในหินงอกบ่งบอกถึงอุณหภูมิหรือปริมาณน้ำฝนมากกว่ากัน (Fairchild et al., 2006)

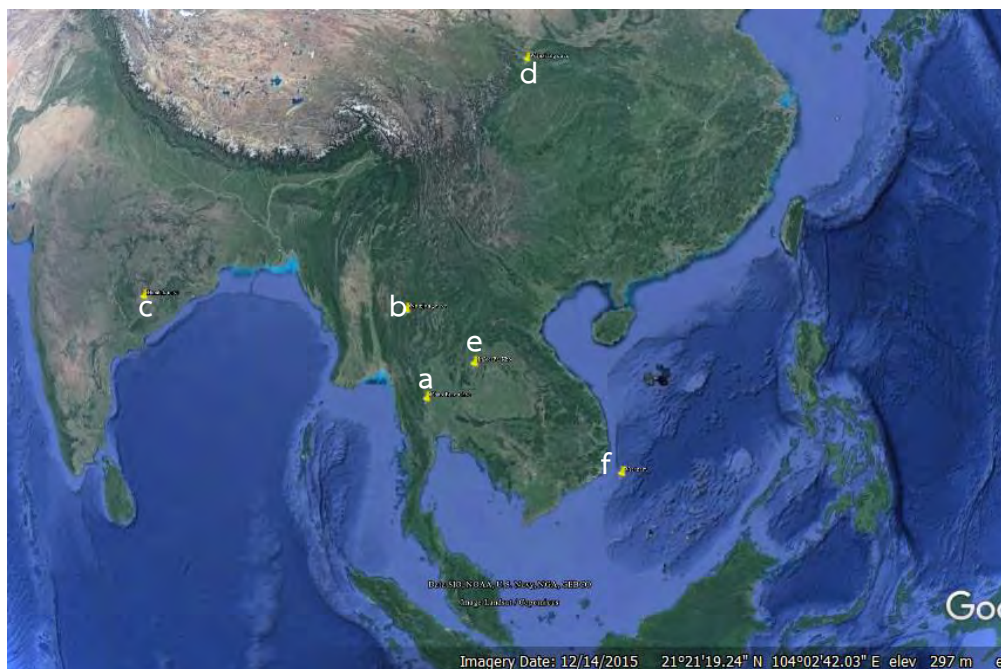
หลากหลายงานวิจัยสมัยใหม่ได้สนับสนุนว่าค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในหินงอกบ่งบอกถึงปริมาณน้ำฝน (Precipitation or Rainfall) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่ใกล้เคียงกับบริเวณพื้นที่ศึกษา ได้แก่

(1) การศึกษาไอโซโทปออกซิเจนของหินงอกจากถ้ำ Dandak ที่ตั้งอยู่ทางตอนกลางด้านทิศตะวันออกของประเทศอินเดีย เพื่อใช้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนจากมรสุมอินเดียในช่วง ค.ศ. 600 – 1500 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์อย่างชัดเจนระหว่างค่าติดลบหลายๆของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$ มีค่าน้อย) และปริมาณน้ำฝนจากมรสุมในปริมาณมาก (Sinha et al., 2007; Berkelhammer et al., 2010)

(2) การศึกษาไอโซโทปออกซิเจนของหินงอกจากถ้ำ Wanxiang ที่ตั้งอยู่ทางตอนกลางของประเทศจีน เพื่อใช้บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนจากมรสุมเอเชีย โดยหินงอกดังกล่าวเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องจาก ค.ศ. 190 – 2006 (Zhang et al., 2008)

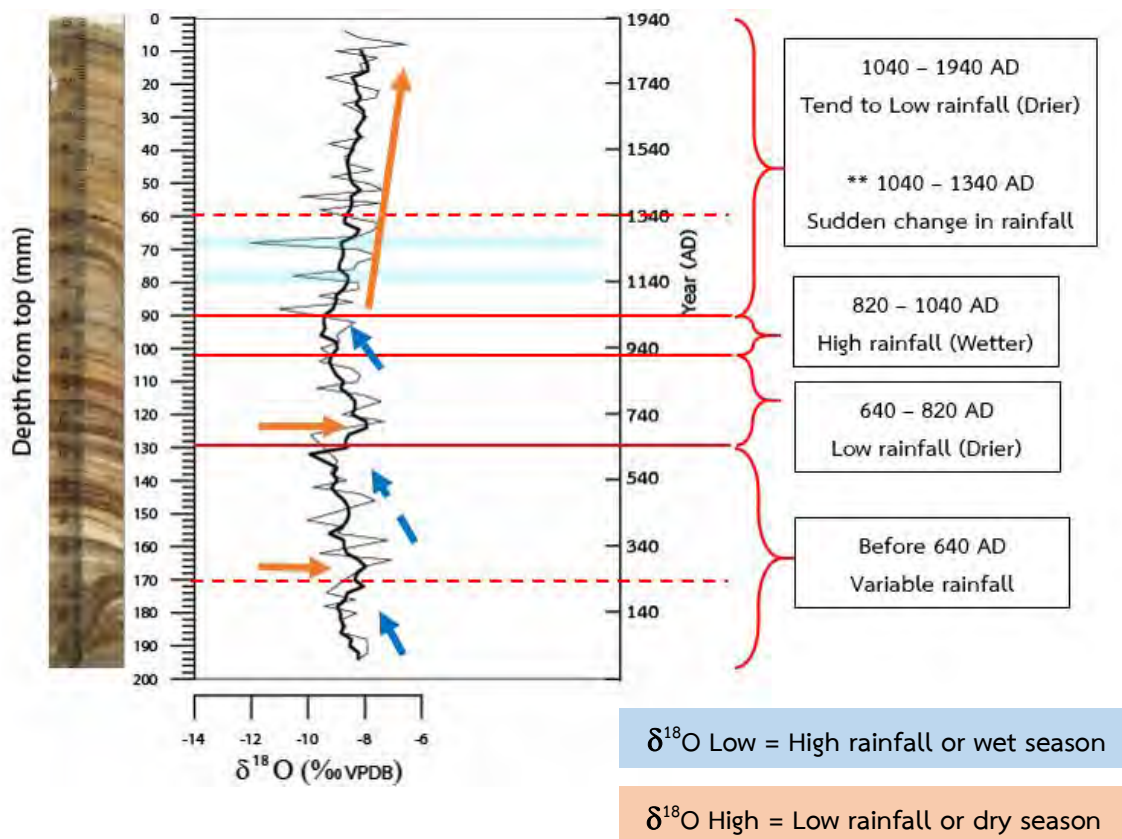
(3) การศึกษาไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอกที่เดียวในประเทศไทยที่ถ้ำน้ำจาง อ.ปางมะผ้า จ.แม่ฮ่องสอน โดย Cai et al., 2010 ได้ทำการศึกษาไอโซโทปออกซิเจนและอัตราการเจริญเติบโตของหินงอก และนำผลดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากกรมอุตุนิยมวิทยาท้องถิ่นในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษา ซึ่งศึกษาเพียงแค่ส่วนบนของหินงอกที่มีอายุอยู่ในช่วง ค.ศ. (1902-1908) – 2005 จากการศึกษาค้นคว้าพบว่ามีค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) อยู่ระหว่าง -6.8 ถึง -3.3 เปอร์มิลล์ และการเปลี่ยนแปลงค่าไอโซโทปออกซิเจนมีความสัมพันธ์อย่างเด่นชัดกับอัตราการเจริญเติบโตของหินงอกและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนจากฤดูมรสุม กล่าวคือ ค่า $\delta^{18}\text{O}$ มีค่าลดลงเมื่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้สรุปว่าปริมาณน้ำฝนในพื้นที่นี้ได้รับอิทธิพลจากมรสุมเอเชีย (Asian

monsoon) และอาจแสดงถึงความสัมพันธ์กับความรุนแรงของ western North Pacific summer monsoon และมรสุมอินเดีย (Indian monsoon)



รูปที่ 21 : (a) พื้นที่ศึกษา (b) ถ้ำน้ำจาง แม่ฮ่องสอน (c) ถ้ำ Dandak ในอินเดีย (d) ถ้ำ Wanxiang ในจีน (e) Lake Pa Kho (Chawchai et al., 2015) (f) Tree ring (Buckley et al., 2007)
(Modified from Google Earth)

จากการวิเคราะห์ตัวอย่างหินงอก KPC-01-2 พบว่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) มีค่าอยู่ระหว่าง -12.07 ถึง -6.56 เพอร์มิลล์ และมีอายุอยู่ในช่วง 2000 ปี โดยบริเวณ 0.5 มิลลิเมตรจากส่วนบนของหินงอกมีอายุประมาณ ค.ศ. 1941 จากค่าการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจนในพื้นที่ศึกษา คาดว่าสามารถบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในอดีตได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Cai et al., 2010 Zhang et al., 2008 และ Sinha et al., 2007 โดยสามารถแบ่งช่วงพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอกกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในบริเวณพื้นที่ศึกษาได้ 4 ช่วง ดังนี้ (รูปที่ 22)



รูปที่ 22 : ช่วงการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน (เส้นกราฟสีจาง คือ ค่า $\delta^{18}\text{O}$ ทุกๆ 2 มิลลิเมตรที่เจาะตัวอย่างไปวิเคราะห์, เส้นกราฟสีเข้ม คือ ค่า $\delta^{18}\text{O}$ เฉลี่ยทุกๆ 10 มิลลิเมตร)

- ช่วงที่ 1 (ช่วงอายุแก่กว่า ค.ศ. 640)
จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ในช่วงนี้ พบว่ามีค่า $\delta^{18}\text{O}$ ค่อนข้างแปรปรวน บางช่วงเพิ่มขึ้น (ลูกศรสีแสด) บางช่วงลดลง (ลูกศรสีฟ้า) ดังนั้นในตอนต้นของการสะสมตัวของหินอกมีปริมาณน้ำฝนค่อนข้างแปรปรวน
- ช่วงที่ 2 (ค.ศ. 640 – 820)
ค่า $\delta^{18}\text{O}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แสดงถึงปริมาณน้ำฝนน้อยหรือเป็นสภาพแวดล้อมแบบแห้งแล้ง (Dry season)

- ช่วงที่ 3 (ค.ศ. 820 – 1040)
ค่า $\delta^{18}\text{O}$ มีแนวโน้มลดลง แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำฝน หรือเป็นสภาพแวดล้อมแบบชุ่มชื้น (Wet season)
- ช่วงที่ 4 (ค.ศ. 1040 – 1940)
ค่า $\delta^{18}\text{O}$ ในช่วงนี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงสิ้นสุดการสะสมตัวของหินงอก แสดงถึงการลดลงของปริมาณน้ำฝน แต่ในช่วง ค.ศ. 1040 – 1340 ค่าไอโซโทปออกซิเจนเปลี่ยนแปลงลดลงและเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน แสดงถึงการเพิ่มและลดลงของปริมาณน้ำฝนอย่างรวดเร็วเช่นกัน

เนื่องจากการตีความการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถระบุได้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงเฉพาะพื้นที่ (local variation) หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงในบริเวณกว้าง (regional variation) ผู้ทำโครงการจึงนำผลการวิเคราะห์และตีความจากตัวอย่างหินงอกที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบกับการศึกษาในบริเวณใกล้เคียงที่ระบุถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในช่วง 2000 ปี ดังรูปที่ 23

Proxy & study area	Year (AD)												
	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000			
$\delta^{18}\text{O}$ พื้นที่ศึกษา	Variable rainfall				Dry		Wet		Dry Wet Dry				
ธาตุร่องรอยในพื้นที่ศึกษา (จากโครงการของ นายพศุทธิ์ รัตนศรีมงคล)	Wet			Variable rainfall			Wet		Variable rainfall			Dry	
ทะเลสาบปาโคภาคอีสาน (Chawchai et al., 2015)	Wet			Dry									
$\delta^{18}\text{O}$ ถ้ำน้ำจาง (Cai et al., 2010)											DryWet		
$\delta^{18}\text{O}$ ถ้ำ Dandak (Sinha et al., 2007)						Wet			Dry				
$\delta^{18}\text{O}$ ถ้ำ Wanxiang (Zhang et al., 2008)				Dry			Wet		Dry				
Tree ring (Buckley et al., 2007)								Dry					

รูปที่ 23 : การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในบริเวณใกล้เคียง

จากรูปการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในช่วง 2000 ปีในบริเวณใกล้เคียงพื้นที่ศึกษา พบว่าช่วงที่ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้น (Wet season) ในพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วงเดียวกับสภาพแวดล้อมแบบชุ่มชื้นที่ได้จากการวิเคราะห์ไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอกจากถ้ำ Dandak ในประเทศอินเดีย และถ้ำ Wanxiang ในประเทศจีน ช่วงที่ปริมาณน้ำฝนลดลง (Dry season) ในพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วงเดียวกันกับสภาพแวดล้อมแบบแห้งแล้งที่ได้จากการวิเคราะห์ไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของหินงอกจากถ้ำ Dandak ในประเทศอินเดีย ถ้ำ Wanxiang ในประเทศจีน ถ้ำน้ำจาง อ.ปางมะผ้า จ.แม่ฮ่องสอน ในประเทศไทย และสอดคล้องกับข้อมูลวงปีต้นไม้ในประเทศเวียดนาม

ดังนั้นคาดว่า การเปลี่ยนแปลงค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ของตัวอย่างหินงอกในพื้นที่ศึกษา มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝน และเป็นการเปลี่ยนแปลงในบริเวณกว้าง (regional variation) โดยปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นคาดว่าได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW monsoon) ที่พัดพาความชื้นมาจากอ่าวเบงกอลในมหาสมุทรอินเดีย

บทที่ 5

สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผลในบทที่ผ่านมา สามารถสรุปผลการทำโครงการตามวัตถุประสงค์ได้ ดังนี้

1. ลักษณะทางกายภาพ (สีและจำนวนชั้น) ของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก
 - 1.1 ตัวอย่างหินงอก KPC-01-1 นับชั้นการเจริญเติบโตได้ทั้งหมด 761 ชั้น จากการทราบอายุเบื้องต้นของหินงอกว่าอยู่ในช่วง 2000 ปี ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น สามารถระบุได้ว่าการสะสมตัวของชั้นการเจริญเติบโตของตัวอย่างหินงอกนี้ไม่ใช่ชั้นประจำปี (annual lamina)
 - 1.2 สีของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกมีความสัมพันธ์กับค่าไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) โดยสีที่ค่าดัชนีสีต่ำ (index 1-4) สัมพันธ์กับไอโซโทปออกซิเจนที่มีค่าน้อย (ค่า $\delta^{18}\text{O}$ ติดลบมาก) และสีที่มีค่าดัชนีสีสูง (index 5-9) สัมพันธ์กับไอโซโทปออกซิเจนที่มีค่ามาก (ค่า $\delta^{18}\text{O}$ ติดลบน้อย)
2. การเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอนและออกซิเจนในชั้นการเจริญเติบโตของหินงอกและปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในการสะสมตัวของหินงอกในบริเวณพื้นที่ศึกษา
 - 2.1 ตัวอย่างหินงอก KPC-01-2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปคาร์บอน ($\delta^{13}\text{C}$) อยู่ระหว่าง -12.31 ถึง -5.86 เพอร์มิลล์ ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงที่บ่งบอกว่าเป็นการสะสมตัวของคาร์บอนेटที่ได้รับคาร์บอนไดออกไซด์มาจากการหายใจของพืชตระกูล C3 ดังนั้นในช่วงอายุ 2000 ปี สภาพแวดล้อมเหนือถ้ำในพื้นที่ศึกษาถูกปกคลุมด้วยพืชตระกูล C3
 - 2.2 ตัวอย่างหินงอก KPC-01-2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) อยู่ระหว่าง -12.07 ถึง -6.56 เพอร์มิลล์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในบริเวณพื้นที่ศึกษา กล่าวคือ ไอโซโทปออกซิเจนที่มีค่าน้อย บ่งบอกปริมาณน้ำฝนมากหรือเป็นสภาพแวดล้อมแบบชุ่มชื้น และไอโซโทปออกซิเจนที่มีค่ามาก บ่งบอกปริมาณน้ำฝนน้อยหรือเป็นสภาพแวดล้อมแบบแห้งแล้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็นการเปลี่ยนแปลงในบริเวณกว้าง (regional variation) โดยปริมาณน้ำฝนที่เพิ่มขึ้นคาดว่าได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW monsoon)

ข้อเสนอแนะ

1. การตีความด้านการเปลี่ยนแปลงของไอโซโทปออกซิเจน ($\delta^{18}\text{O}$) ว่ามีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนเป็นเพียงการตีความเบื้องต้นเท่านั้น ดังนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมจากตัวอย่างหินงอกในพื้นที่ศึกษาเดียวกันหรือในบริเวณใกล้เคียง เพื่อให้ผลการศึกษา มีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ควรมีการบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนในพื้นที่ศึกษาอย่างใกล้ชิดเพื่อเพิ่มข้อมูลในการเปรียบเทียบได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น
2. การศึกษาสีและจำนวนชั้นของชั้นการเจริญเติบโตของหินงอก ควรใช้การศึกษาสีในรูปแบบอื่นเปรียบเทียบเพิ่มเติม เช่น การศึกษาระดับสีเทา (Grey scale) การศึกษาสีเรืองแสง (Fluorescence) และควรใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการนับชั้นการเจริญเติบโตเพื่อความถูกต้องมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Chawchai, S., Chabangborn, A., Fritz, S., Väiliranta, M., Mörrth, C. M., Blaauw, M., Reimer, P. J., Krusic, P. J., Löwemark, L., & Wohlfarth, B., 2015. Hydroclimatic shifts in northeast Thailand during the last two millennia – The record of Lake Pa Kho. *Quaternary Science Reviews*, 111, 62-71.
- Cai, B., Pumijumnong, N., Tan, M., Muangsong, C., Kong, X., Jiang, X., & Nan, S., 2010. Effects of intraseasonal variation of summer monsoon rainfall on stable isotope and growth rate of a stalagmite from northwestern Thailand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D21).
- Fairchild, I. J., Baker, A., 2012. Geochemistry of speleothems. *Speleothem Science: From Process to Past Environments*, First Edition, 245-289.
- Fairchild, I. J., Smith, C. L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Matthey, D., & McDermott, F., E. I. M. S., 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75(1), 105-153.
- Kendall, C., Caldwell, E.A., 1998. Fundamentals of Isotope Geochemistry, In: C. Kendall and J.J. McDonnell (Eds.), *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier Science, Amsterdam, 51-86.
- McDermott, F., 2004. Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23(7), 901-918.
- Muangsong, C., Pumijumnong, N., Cai, B., & Tan, M., 2011. Stalagmite grey level as a proxy of the paleoclimate in northwestern Thailand. *ScienceAsia*, 37, 262-267.
- Sinha, A., Stott, L., Berkelhammer, M., Cheng, H., Edwards, R. L., Buckley, B., Aldenderfer, M., & Mudelsee, M., 2011. A global context for megadroughts in monsoon Asia during the past millennium. *Quaternary Science Reviews*, 30(1), 47-62.

- Sinha, A., Berkelhammer, M., Stott, L., Mudelsee, M., Cheng, H., & Biswas, J., 2011. The leading mode of Indian Summer Monsoon precipitation variability during the last millennium. *Geophysical Research Letters*, 38(15).
- Webster, J. W., Brook, G. A., Rainsback, L. B., Cheng, H., Edwards, R. L., Alexander, C., & Reeder, P. P., 2007. Stalagmite evidence from Belize indicating significant droughts at the time of Preclassic Abandonment, the Maya Hiatus, and the Classic Maya collapse. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 250(1), 1-17.
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R. L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., Liu, J., Tan, M., Wang, X., & An, C., 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *science*, 322(5903), 940-942.