

## ความสัมพันธ์ระหว่างภูมิอากาศภายนอกถ้ำและจุลภูมิอากาศภายในถ้ำภูผาเพชร จังหวัดสตูล ภาคใต้ ประเทศไทย

### The Relationship between Surface Climate and Cave Microclimate Conditions at Phu Pha Phet Cave in Satun Province of Southern Thailand

พิมพ์พี บัวเพชร (Pimpajee Buaphet)\* ดร.นาถสุดา ภูมิจันงค์ (Dr.Nathsuda Pumijumong)\*\*

ดร.โชติกา เมืองสง (Dr. Chotika Muangsong)\*\*\* กิตตภา มะลิมาตร (Kittapha Malimart)\*\*\*\*

#### บทคัดย่อ

ถ้ำภูผาเพชร อำเภอมะนัง จังหวัดสตูล เป็นถ้ำขนาดใหญ่ที่สุดในอุทยานธรณีสตูล งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภูมิอากาศภายนอกถ้ำและจุลภูมิอากาศภายในถ้ำภูผาเพชร ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ บริเวณใกล้ปากถ้ำ โถงถ้ำตอนกลางและโถงถ้ำส่วนท้าย ตัวแปรที่ศึกษานั้น ได้แก่ อุณหภูมิ (T) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ทั้งภายนอกและภายในถ้ำ โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบอัตโนมัติเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ณ บริเวณใกล้ปากถ้ำมีความสัมพันธ์กับอากาศภายนอกถ้ำในระดับสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (อุณหภูมิถ้ำ vs. อุณหภูมิภายนอกถ้ำ:  $r = 0.70$ , ความชื้นสัมพัทธ์ในถ้ำ vs. ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกถ้ำ:  $r = 0.82$ ) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศภายนอกต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบถ้ำ

#### ABSTRACT

Phu Pha Phet cave locates in Manang district of Satun province, which is regarded as the largest cave in Satun Geopark. This study aimed to investigate the relationship between surface and cave climate. The microclimate monitoring was carried out at three locations within the cave including the location near cave entrance, the middle chamber, and the end of cave chamber. Air temperature (T) and Relative Humidity (RH) was automatically recorded using the automatic data loggers for the period between January, 2016 and April, 2017. The relationships between cave parameters and those climatic factors were explored by Pearson correlation analysis. Results showed that the strongest relationships between cave air (T & RH) and surface climate were found ( $p < 0.01$ ) at the location near cave entrance (Cave T. vs. Surface air T.:  $r = 0.70$ , Cave RH vs. Surface RH:  $r = 0.82$ ). These implied that the changes in surface climate can affect the cave microclimate system.

**คำสำคัญ:** การติดตามตรวจวัดถ้ำ จุลภูมิอากาศของถ้ำ การเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ

**Keywords:** Cave monitoring, Cave microclimate, Climate change

\* นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

\*\* รองศาสตราจารย์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

\*\*\*อาจารย์ สาขาวิชาวนวัฒนกรรมการจัดการสังคมและสิ่งแวดล้อม หลักสูตรศิลปศาสตรบัณฑิต โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล

\*\*\*\*ผู้ช่วยนักวิจัย โครงการจัดตั้งวิทยาเขตอำนาจเจริญ มหาวิทยาลัยมหิดล

## บทนำ

ถ้ำ (Cave) เป็นแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีความสำคัญและทรงคุณค่า ภายในถ้ำนั้นประกอบไปด้วยทรัพยากรทางธรรมชาติต่างๆ ทั้งทรัพยากรธรณี (หินงอก หินย้อย ฯลฯ) ทรัพยากรชีวภาพและสิ่งมีชีวิต (ค้างคาว จิ้งหรีด เห็ดรา ฯลฯ) รวมถึงยังเป็นแหล่งเก็บรักษามรดกอันทรงคุณค่าทางด้าน โบราณคดีและศิลปกรรมต่างๆ (โลงไม้ ภาพเขียน ฯลฯ) ซึ่งก่อให้เกิดประโยชน์แก่สาธารณชนทั้งทางสังคม เศรษฐกิจ รวมถึงประโยชน์ในด้านการประยุกต์ใช้ทรัพยากรต่างๆ ภายในถ้ำเพื่อสร้างองค์ความรู้ทางด้านวิชาการ (Wannasri et al., 2007; Muangsong et al., 2014) อย่างยั่งยืน สำหรับการเปลี่ยนแปลงของระบบถ้ำนั้น เกิดขึ้นได้จากทั้งปัจจัยทางธรรมชาติ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะธรรมชาติ (Natural variation of the environment) ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล (Seasonal cycles) (Badino, 2004; Riechelmann et al., 2017) และปัจจัยจากกิจกรรมของมนุษย์ รวมถึงการใช้ถ้ำเป็นพื้นที่นันทนาการและการท่องเที่ยว (Hoyos et al., 1998; Lobo, 2015)

อุทยานธรณีสตูล (Satun Geopark) เป็นอุทยานธรณีแห่งแรกและแห่งเดียวในประเทศไทยที่ได้รับการประกาศจาก The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) ให้เป็นอุทยานธรณีโลกของยูเนสโก (UNESCO Global Geoparks) (ค.ศ. 2018-2021) ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลนี้เป็นฐานข้อมูลได้ ถ้ำภูผาเพชร (Phu Pha Phet cave) อำเภอมะนัง จังหวัดสตูล เป็นถ้ำขนาดใหญ่ที่สุดในอุทยานธรณีสตูล และมีความสำคัญทางด้านธรณีวิทยา นิเวศวิทยา และวัฒนธรรม อย่างไรก็ตาม การศึกษาถ้ำภูผาเพชรนั้นยังขาดแคลนข้อมูลด้านการเปลี่ยนแปลงของระบบต่างๆ ภายในถ้ำ ดังนั้น การพัฒนาระบบการติดตามตรวจวัดจุดภูมิอากาศภายในถ้ำนั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในถ้ำซึ่งถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญด้านอากาศหรือบรรยากาศ (Critical atmospheric parameter) ที่ได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติว่าเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับการประเมินสถานภาพของถ้ำและการกำหนดความสามารถในการรองรับของถ้ำเพื่อการท่องเที่ยว (Fernandez-Cortes et al., 2006; Šebela, Turk, 2014; Novas et al., 2017)

ระบบการติดตามตรวจวัดจุดภูมิอากาศของถ้ำในที่นี้ หมายถึง การตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ภายในถ้ำอย่างละเอียด (Detailed measurement) การบันทึกค่า (Recording of data) และการเก็บข้อมูล (Storing of data) โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบอัตโนมัติ สำหรับงานวิจัยนี้ มีขอบเขตของตัวแปรที่นำเสนอเพียง ค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (Relative Humidity) ภายในถ้ำ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้สำหรับการวางแผนจัดการถ้ำและเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของทรัพยากรชีวภาพและทรัพยากรธรณีภายในถ้ำ (Fernandez-Cortes et al., 2006; Hu et al., 2008; Šebela, Turk, 2014; Novas et al., 2017) โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภูมิอากาศภายนอกถ้ำและจุดภูมิอากาศภายในถ้ำภูผาเพชร ณ ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งข้อมูลจากการตรวจวัดนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการประเมินสถานะของถ้ำและเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงของระบบถ้ำอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศภายนอก รวมถึงสามารถใช้เป็นข้อมูลเสริมเพื่อประกอบการประเมินการรับรองให้เป็นอุทยานธรณีโลกของยูเนสโกในระยะต่อไป (Re-validation process) ท้ายที่สุดแล้วจะช่วยสนับสนุนการคงอยู่และการรับรองอุทยานธรณีสตูลให้เป็นอุทยานธรณีโลกของยูเนสโกสืบไป

## วัตถุประสงค์การวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภูมิอากาศภายนอกถ้ำและจุดภูมิอากาศ (อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) ภายในถ้ำภูผาเพชร ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ บริเวณใกล้ปากถ้ำ, โถงถ้ำตอนกลางและโถงถ้ำส่วนท้าย

## วิธีการวิจัย

### สถานที่ศึกษา

ถ้ำภูผาเพชร (7°4'55"N, 99°57'77"E) อยู่ในพื้นที่หมู่ที่ 9 บ้านป่าพน ตำบลป่าลี้พัฒนา อำเภอเมษามิ่ง จังหวัดสตูล (รูปที่ 1) เป็นถ้ำขนาดใหญ่ที่สุดในอุทยานธรณีสตูล และอยู่ภายใต้การดูแลของเขตรักษาพันธุ์สัตว์ป่าเขาบรรทัด ซึ่งมีความสำคัญทั้งทางด้านธรณีวิทยา นิเวศวิทยา และวัฒนธรรม พื้นที่ถ้ำเป็นเขาหินปูน มีความสูงจากระดับน้ำทะเล 200 เมตร มีความยาวแนวโถงหลักรวม 536.65 เมตร (รัศรินทร์ และคณะ, 2558)

### การติดตามตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศภายนอกถ้ำ (Surface climate monitoring)

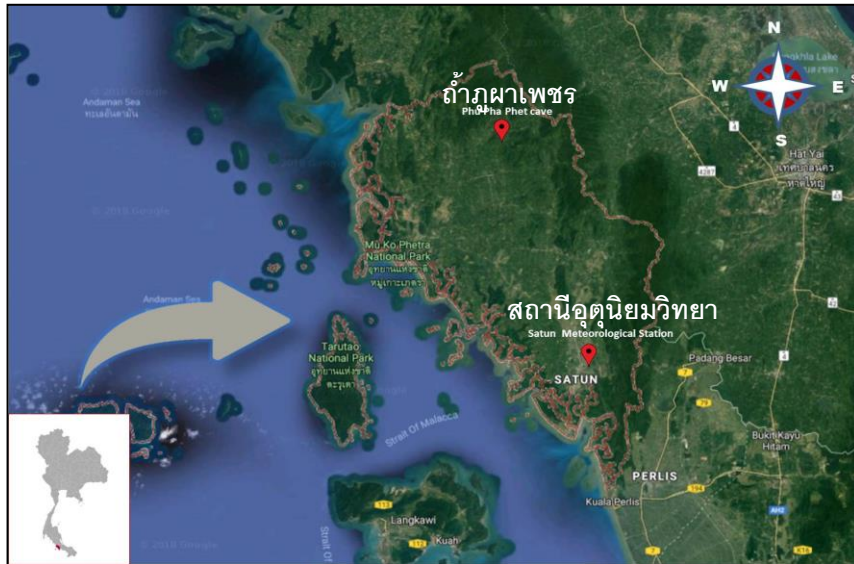
ติดตั้งสถานีตรวจวัดภูมิอากาศทั่วไปรายวัน (Daily climate condition) บริเวณนอกถ้ำภูผาเพชร (สถานีตรวจอากาศภูผาเพชร: PPP-00) โดยวัดค่าอุณหภูมิ (T) และความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ในอากาศด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์แบบอัตโนมัติ (Onset HOBO® temperature/relative humidity data Logger) ที่ติดตั้งไว้ในเรือนเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer Screen) ซึ่งตั้งเวลาการบันทึกข้อมูลทุกๆ 5 นาที อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติเหล่านี้สามารถส่งงาน เชื่อมต่อ และดาวน์โหลดข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ได้ด้วยโปรแกรมอัตโนมัติ HOBOware® (โซติกา, 2561) โดยเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2560 และวัดปริมาณน้ำฝน (Rainfall amount) ด้วยเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบอัตโนมัติ (Automatic logging rain gauge) สำหรับข้อมูลการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนนั้น พบว่าอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณน้ำฝนมีความขัดข้องในช่วงต้นปี พ.ศ. 2560 ข้อมูลในรายงานการวิจัยนี้จึงอ้างอิงข้อมูลหลักจากผลการตรวจวัดที่ได้ระหว่างวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2559 ควบคู่ไปกับข้อมูลข้อมูลปริมาณน้ำฝนจากสถานีตรวจวัดของกรมอุตุนิยมวิทยา (2560) ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล (6°39'0"N, 100°5'0"E) รหัสสถานี 570201 ซึ่งตั้งอยู่ในเขต อ. เมือง จ. สตูล (รูปที่ 1) เพื่อเป็นข้อมูลตัวแทนของสภาพภูมิอากาศในปัจจุบัน (Modern climate condition) ในพื้นที่ศึกษาเพื่อการเปรียบเทียบกับข้อมูลจุลอุตุนิยมวิทยาในถ้ำต่อไป

### การติดตามตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงจุลภูมิอากาศภายในถ้ำ (Cave microclimate monitoring)

สำหรับการติดตามตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้ำนั้น ใช้อุปกรณ์บันทึกข้อมูลอัตโนมัติเช่นเดียวกับการตรวจวัดภูมิอากาศภายนอกถ้ำระหว่างวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2559-30 เมษายน พ.ศ. 2560 โดยดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ใน 3 ตำแหน่งหลักที่สำคัญภายในถ้ำ ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1 โถงถ้ำส่วนต้นบริเวณใกล้กับปากถ้ำ (PPP-01) ซึ่งเป็นตำแหน่งแรกที่มีการแลกเปลี่ยนหมุนเวียนอากาศกับภายนอก ตำแหน่งที่ 2 โถงถ้ำตอนกลาง (PPP-02) เป็นตำแหน่งที่เป็นรอยต่อระหว่างบริเวณปากถ้ำและ โถงถ้ำส่วนท้ายสุด ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นจุดท่องเที่ยวหลัก และตำแหน่งที่ 3 โถงถ้ำส่วนท้าย (PPP-03) ซึ่งมีลักษณะเป็นห้องโถงปิด มีการแลกเปลี่ยนหมุนเวียนของอากาศภายในห้องโถงและภายนอกน้อย ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มักมีนักท่องเที่ยวเข้าไปจุดรูปตามความเชื่อส่วนบุคคล

### การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)

วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้สถิติสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson correlation analysis) เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (IBM SPSS Statistics 18) โดยเป็นการวิเคราะห์และแสดงข้อมูลทั้งข้อมูลเฉลี่ยรายวันและรายเดือน



รูปที่ 1 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ตั้งของถ้ำผาเพชร ( $7^{\circ}4'55''\text{N}$ ,  $99^{\circ}57'77''\text{E}$ ) และสถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล ( $6^{\circ}39'0''\text{N}$ ,  $100^{\circ}5'0''\text{E}$ )

## ผลการวิจัย

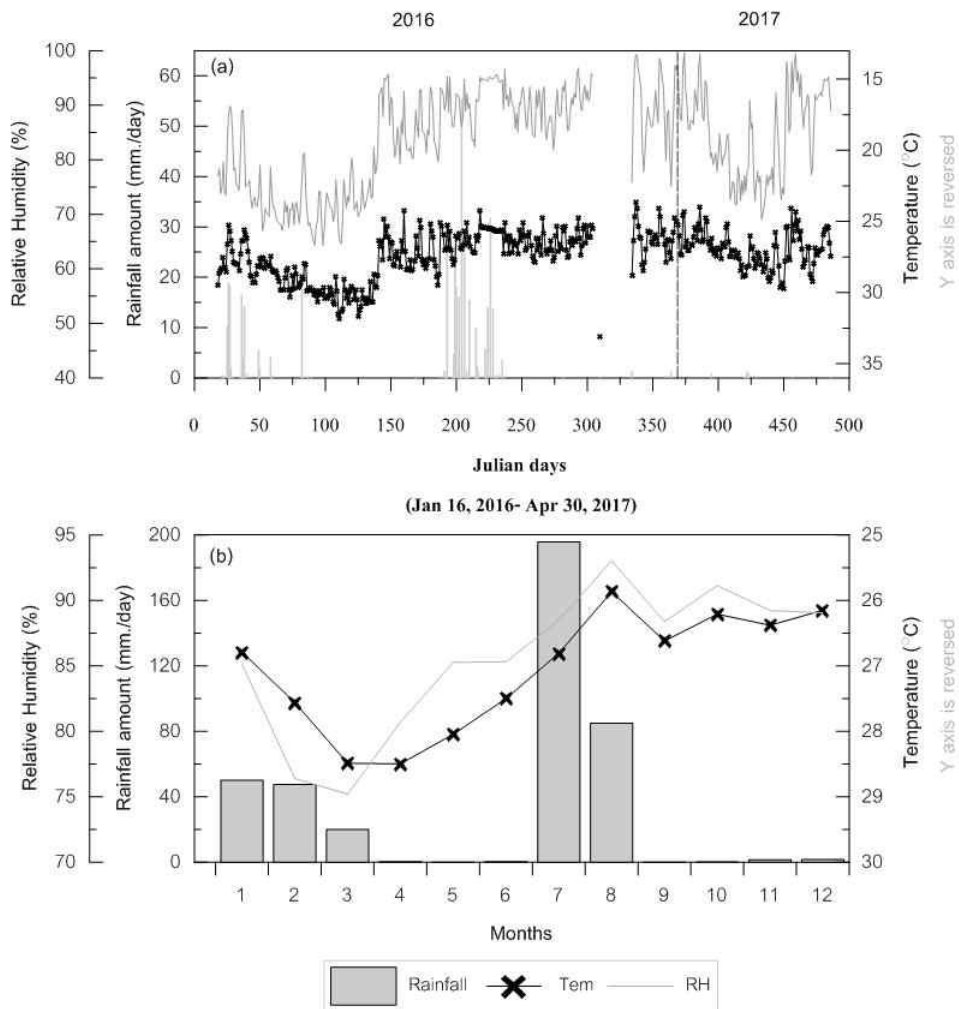
### ความผันแปรของภูมิอากาศภายนอกถ้ำ

1) ปริมาณน้ำฝน ณ สถานีตรวจวัดจุดภูมิอากาศนอกถ้ำผาเพชร (PPP-00) มีค่าผันแปรไปในแต่ละฤดูกาล โดยพบว่าปริมาณน้ำฝนรวมรายวัน (Daily rainfall) มีค่าผันแปรระหว่าง 0.2 มม./วัน จนถึง 55.4 มม./วัน (รูปที่ 2 (a)) ซึ่งปริมาณน้ำฝนรวมรายวันที่มีปริมาณน้อยที่สุดนั้น พบในฤดูหนาว เช่น วันที่ 29 มกราคม พ.ศ. 2559 และในช่วงก่อนฤดูมรสุม เช่น เดือนมีนาคม (วันที่ 23, 26, 29) และบางครั้งก็พบปริมาณฝนรวมรายวันน้อยในช่วงฤดูฝนได้เช่นกัน เช่น เดือนกรกฎาคม (วันที่ 25) และเดือนสิงหาคม (วันที่ 1 และ 23) พ.ศ. 2559 เป็นต้น สำหรับปริมาณน้ำฝนรวมรายวันที่มีปริมาณมากที่สุดนั้นพบในช่วงฤดูฝน เช่น วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เป็นต้น โดยมีจำนวนวันที่มีฝนตก (Rainy days) รวมทั้งหมด 7 วัน ในเดือนมกราคม พ.ศ. 2559, 9 วัน ในเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559, 4 วัน ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2559, และไม่มีฝนตกในเดือนเมษายน พ.ศ. 2559 โดยพบจำนวนวันที่ฝนตกต่อเนื่องกันสูงสุด (Consecutive days with rain or prolonged wet periods) คือ 5 วัน (วันที่ 25-29 มกราคม) และมีจำนวนวันที่ฝนไม่ตกต่อเนื่องกันหรือช่วงแห้งแล้งต่อเนื่อง (Consecutive days without rain or prolonged dry periods) ยาวนานถึง 32 วัน ระหว่างวันที่ 30 มีนาคม ถึง 30 เมษายน (รูปที่ 2 (a)) สำหรับในช่วงฤดูฝนนั้น ปริมาณน้ำฝนรวมรายเดือน (Monthly rainfall) มีปริมาณมากที่สุด คือ 196 มม. ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559 (รูปที่ 2 (b))

2) ความชื้นสัมพัทธ์ จากการบันทึกด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบอัตโนมัติต่อเนื่องยาวนาน 486 วัน (ระหว่างวันที่ 16 มกราคม ถึงวันที่ 30 เมษายน พ.ศ. 2560) ณ สถานีตรวจวัดจุดภูมิอากาศบริเวณภายนอกถ้ำผาเพชรนั้น พบว่าค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์รายวัน (Daily relative humidity) มีค่าผันแปรอยู่ระหว่าง 64.2% จนถึง 99.6% โดยความชื้นสัมพัทธ์รายวันมีค่าเฉลี่ย 83.7% (รูปที่ 2 (a)) สำหรับค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศรายเดือน (Monthly relative

humidity) นั้นพบว่า มีค่าเท่ากับ 85.6% โดยเดือนสิงหาคมเป็นเดือนที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนสูงที่สุด (93%) และพบค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์รายเดือนต่ำที่สุดในเดือนมีนาคม (75.2%) (รูปที่ 2 (b))

3) อุณหภูมิ สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (Daily air temperature) ที่ตรวจวัดได้ ณ สถานีตรวจวัดภายนอกถ้ำภูผาเพชรนั้นมีค่า 27.4 °C โดยพบค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันต่ำที่สุด 23.6 °C ในวันที่ 2 ธันวาคม พ.ศ. 2560 และค่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันสูงที่สุดมีค่า 31.9 °C ในวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2559 (รูปที่ 2 (a)) โดยค่าเฉลี่ยรายเดือนของอุณหภูมิ (Monthly air temperature) มีค่า 27.1 °C พบว่า เดือนเมษายนเป็นเดือนที่ร้อนที่สุด (28.5 °C) และเดือนมกราคมเป็นเดือนที่อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนต่ำที่สุด (26.2 °C) (รูปที่ 2 (b)) พบว่าค่าความผันแปรของอุณหภูมิมิมีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยรายวัน (a) และค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยรายเดือน (b) ของตัวแปรต่างๆ ที่ตรวจวัด อันประกอบไปด้วย อุณหภูมิ (กราฟเส้นทึบสีดำพร้อมสัญลักษณ์) ความชื้นสัมพัทธ์ (กราฟเส้นทึบสีเทา) และปริมาณน้ำฝนรวม (กราฟแท่งสีเทา) ณ สถานีตรวจวัดถ้ำภูผาเพชร (PPP-00)

#### ความผันแปรของจุลภูมิอากาศภายในถ้ำ

ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์รายวันภายในถ้ำนั้นมีค่า ณ ตำแหน่งบริเวณใกล้ปากถ้ำ (PPP-01) อยู่ในช่วง 76.7–97.8% ในตำแหน่งบริเวณโถงกลางของถ้ำ (PPP-02) มีค่าระหว่าง 81.6–96.1% ณ ตำแหน่งท้ายสุดของโถงถ้ำ (PPP-03)

พบว่า มีค่าเฉลี่ย 95.4% โดยมีความผันแปรของความชื้นสัมพัทธ์อยู่ภายในช่วง 90.7–98.4% (รูปที่ 3) สำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันของอากาศภายในถ้ำนั้น มีค่าเฉลี่ย 25.6, 25.2, และ 24.9 °C ณ ตำแหน่ง PPP-01, PPP-02, และ PPP-03 ตามลำดับ (รูปที่ 3)

#### ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายในถ้ำกับภูมิอากาศภายนอกถ้ำ

ความผันแปรของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้ำนั้น มีความแปรผันไปตามความผันแปรของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกถ้ำ (รูปที่ 3 และตารางที่ 1) ผลการศึกษาพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนภายในและภายนอกถ้ำ มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ณ ตำแหน่งบริเวณใกล้ปากถ้ำ (PPP-01) โดยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้ำและภายนอกถ้ำมีค่า  $r = 0.82$  และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกถ้ำมีค่า  $r = 0.70$  (ตารางที่ 1) สำหรับตำแหน่งที่มีค่าความสัมพันธ์กันในระดับต่ำที่สุด คือ ตำแหน่ง PPP-03 ซึ่งพบเพียงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้ำและภายนอกถ้ำ ( $r = 0.32$ ) (ตารางที่ 1) นอกจากนี้ พบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในถ้ำ (ตารางที่ 1)

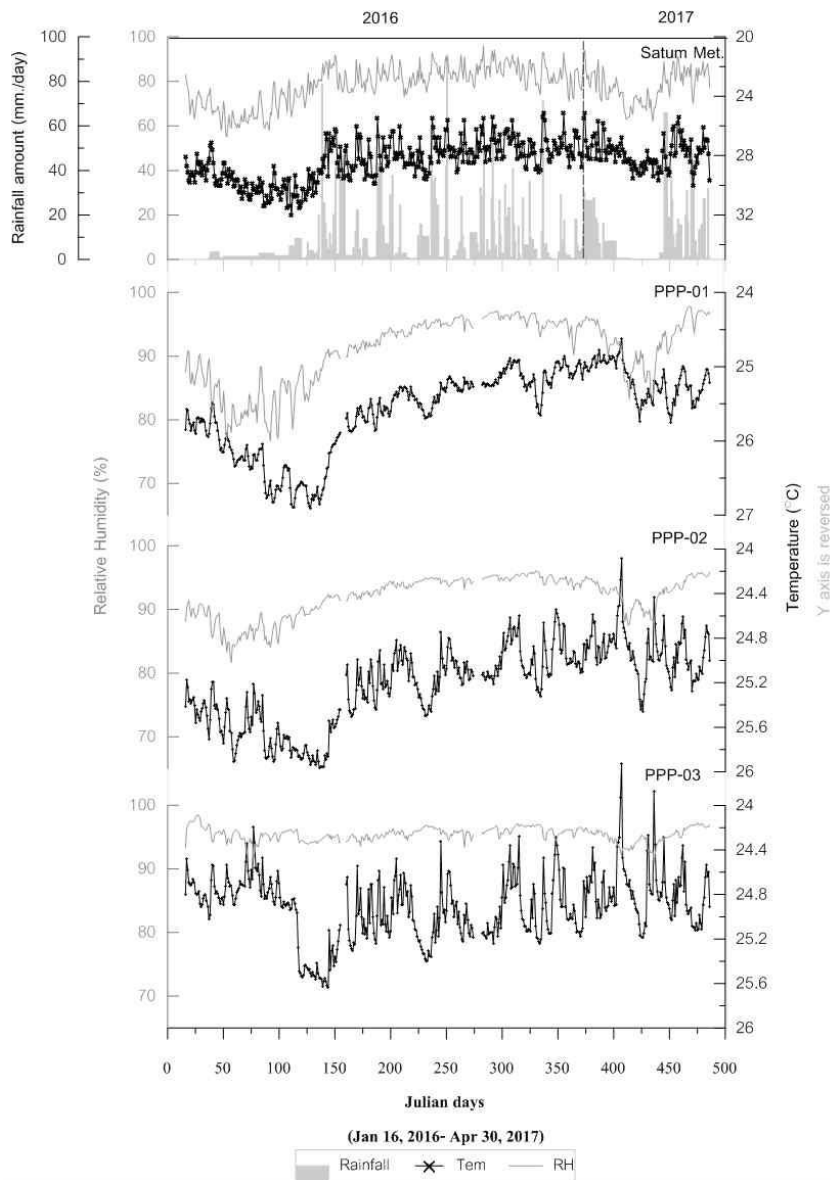
ตารางที่ 1 การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$  values) โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation

Coefficient) ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในถ้ำ

ภูผาเพชร (PPP-01, PPP-02, และ PPP-03) กับตัวแปรภูมิอากาศภายนอกถ้ำ (ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์)

Cave air parameters	Locations	Surface climate parameters		
		Rainfall	Temperature	Relative Humidity
Relative Humidity	PPP-01	0.00	-0.69*	0.82*
	PPP-02	0.00	-0.64*	0.81*
	PPP-03	0.00	-0.17*	0.32*
Temperature	PPP-01	0.03	0.70*	-0.45*
	PPP-02	0.03	0.65*	-0.39*
	PPP-03	0.05	0.11	0.23

หมายเหตุ: \* = นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99% ( $p < 0.01$ )



รูปที่ 3 ค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยรายวันของตัวแปรต่างๆ ที่ตรวจวัด อันประกอบไปด้วย อุณหภูมิ (กราฟเส้นทึบสีดำ พร้อมสัญลักษณ์) ความชื้นสัมพัทธ์ (กราฟเส้นทึบสีเทา) และปริมาณน้ำฝนรวม (กราฟแท่งสีเทา) ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล (Satun Met.) และตำแหน่งต่างๆ ภายในถ้ำภูผาเพชร (PPP-01, PPP-02, และ PPP-03)

### อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างภูมิอากาศภายนอกถ้ำและจุลภูมิอากาศภายในถ้ำภูผาเพชร อำเภอมะนัง จังหวัดสตูล ณ ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ บริเวณใกล้ปากถ้ำ โถงถ้ำตอนกลางและโถงถ้ำส่วนท้าย การตรวจวัดระบบถ้ำนี้เป็นการติดตามตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบอัตโนมัติเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2559 ถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 ผลการศึกษา พบว่าข้อมูลภูมิอากาศภายนอกถ้ำ เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล สำหรับการเปลี่ยนแปลงของระบบอากาศภายในถ้ำนั้นพบว่า

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในถ้ำมีความผันแปรที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของระบบภูมิอากาศภายนอกถ้ำ

ผลการศึกษาในตำแหน่งที่ตรวจวัดนั้น ณ ตำแหน่งบริเวณใกล้ปากถ้ำ (PPP-01) และ โถงกลางถ้ำ (PPP-02) มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระบบภูมิอากาศภายนอกมากกว่าตำแหน่ง โถงท้ายของถ้ำ (PPP-03) โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ณ บริเวณใกล้ปากถ้ำมีความสัมพันธ์กับอากาศภายนอกถ้ำในระดับสูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 (อุณหภูมิถ้ำ vs. อุณหภูมิภายนอกถ้ำ:  $r = 0.70$ , ความชื้นสัมพัทธ์ในถ้ำ vs. ความชื้นสัมพัทธ์ภายนอกถ้ำ:  $r = 0.82$ ) เนื่องจากบริเวณปากถ้ำมีลักษณะเป็นช่องเปิดกว้างอันเกิดจากการเจาะผนังถ้ำเพื่อให้นักท่องเที่ยวสามารถเข้าไปเที่ยวชมภายในถ้ำได้สะดวก จึงแสดงให้เห็นว่าหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศภายนอกแล้ว บริเวณใกล้ปากถ้ำนี้จะเป็ตำแหน่งที่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของระบบอากาศภายนอกมากที่สุด และสามารถส่งผลไปยังบริเวณ โถงกลางถ้ำ ได้อีกด้วยเช่นกัน ดังนั้น จากข้อมูลการตรวจวัดนี้จึงสามารถใช้ไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการดำเนินการก่อสร้างหรือปรับปรุงสภาพถ้ำเพื่อการท่องเที่ยวในอนาคตได้ โดยเฉพาะหากมีการเจาะผนังถ้ำเพิ่มเติม หรือขยายขนาดของช่องเปิดที่เป็นปากถ้ำในปัจจุบัน อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระบบภูมิอากาศภายในถ้ำได้ สำหรับตำแหน่ง โถงท้ายของถ้ำ (PPP-03) นั้นพบว่า ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของภูมิอากาศภายนอกน้อย เนื่องจากมีลักษณะเป็น โถงถ้ำปิด ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากปัจจัยของสภาพอากาศตามธรรมชาติอาจส่งผลกระทบต่อบริเวณนี้ไม่มากนัก เนื่องจากเป็น โถงถ้ำปิดที่มีการหมุนเวียนของอากาศน้อย ข้อควรระวังคือ ผลกระทบอันเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การจูดรูป เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลเสริมเพื่อประกอบการประเมินการรับรองให้เป็นอุทยานธรณีโลกของยูเนสโกในระยะต่อไปและช่วยสนับสนุนการจัดการถ้ำอย่างยั่งยืนในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม องค์การบริหารส่วนตำบลป่าลุ่มพัฒนา อำเภอเม่นัง จังหวัดสตูล และคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล สนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายสวัสดิภาพสาธารณะ (grant number RDG5930014, RDG6130019) และ the Natural Science Foundation of China (grant number 41661144021)

### เอกสารอ้างอิง

โชติกา เมืองสง. 2561. คู่มือการตรวจวัดระบบถ้ำ (Cave monitoring handbook). สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (ฝ่ายสวัสดิภาพสาธารณะ). บริษัทจรัสสินิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด, กรุงเทพมหานคร. รัสรินทร์ ศิริภัทรภูรินนท์ และคณะ. 2558. การสำรวจถ้ำ และการจัดทำแผนผังถ้ำภูผาเพชร. สำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 4 , สุราษฎร์ธานี.

Badino, G. 2004. Cave temperatures and global climate change. *International Journal of Speleology*. 33(1/4), pp.103-114.



- Fernandez-Cortes, A., Calaforra, J. M., Sanchez-Martos, F. 2006. Spatiotemporal analysis of air conditions as a tool for the environmental management of a show cave (Cueva del Agua, Spain). *Atmospheric Environment* 40(38): pp. 7378-7394.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J. C., Sánchez-Moral, S., & Sanz-Rubio, E. 1998. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology* 33(4): pp. 231-242, doi: 10.1007/s002540050242.
- Hu, C., Henderson, G. M., Huang, J., Chen, Z., Johnson, K. R. 2008. Report of a three-year monitoring programme at Heshang Cave, Central China. *International Journal of Speleology*, 37(3): pp 143-151.
- Lobo, H. A. S. 2015. Tourist carrying capacity of Santana cave (PETAR-SP, Brazil): A new method based on a critical atmospheric parameter. *Tourism Management Perspectives* 16: pp. 67-75, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2015.07.001>.
- Muangsong C, Pumijumong N, Cai B, Hu C. 2014. An annually laminated stalagmite record of Thailand monsoon change over the past 387 years and its relationship to IOD and ENSO. *Quaternary International* 349: pp. 90-97.
- Novas, N., Gázquez, J. A., MacLennan, J., García, R. M., Ros, M. F., Manzano-Agugliaro, F. 2017. A real-time underground environment monitoring system for sustainable tourism of caves. *Journal of Cleaner Production* 142: 2707-2721.
- Riechelmann, S., Schröder-Ritzrau, A., Spöfl, C., Riechelmann, D. F. C., Richter, D. K., Mangini, A., Immenhauser, A. 2017. Sensitivity of Bunker Cave to climatic forcings highlighted through multi-annual monitoring of rain, soil, and dripwaters. *Chemical Geology* 449: pp.194-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.015>.
- Šebela, S., Turk, J. 2014. Sustainable use of the Predjama Cave (Slovenia) and possible scenarios related to anticipated major increases in tourist numbers. *Tourism Management Perspectives* 10: pp. 37-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2014.01.002>
- Wanasri S, Pumijumong N, Choosongdet R. A dendroarcheology of Teak Coffin Head Styles from Bo Krai Cave, Northern Thailand. 2004. *Environment and Natural Resources Journal* 2 (1-2): pp.105-114. (in Thai with English abstract).