บทวิจารณ์การจำลองสภาพภูมิอากาศในอดีตบริเวณประเทศไทยระหว่างยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายถึงสมัยโฮโลซีนตอนกลาง

Review of Paleoclimatic Reconstruction in Thailand between the Last Glacial Maximum and the Mid Holocene

อัคนีวุธ ชะบางบอน*

Akkaneewut Chabangborn*

หน่วยปฏิบัติการวิจัยสัณฐานวิทยาของพื้นผิวโลกและธรณีพิบัติภัยขั้นสูงในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ภาควิชาธรณีวิทยาคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Morphology of Earth Surface and Advanced Geohazards in Southeast Asia Research Unit,

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

Received : 1 October 2016

Accepted : 13 December 2016

Published online : 27 January 2017

บทคัดย่อ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ถูกพิจารณาว่ามีความสำคัญยิ่งต่อการติดตามการเปลี่ยนแปลงของลมมรสุมทวีปเอเชีย (the Asian monsoon) อันเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศโลก โดยการส่งผ่านพลังงานความร้อนและความชื้นจากเส้นศูนย์สูตรถึงบริเวณที่ตั้งอยู่บนเส้นละติจูดที่อยู่สูงขึ้นไป ในบทความนี้ได้รวบรวมและสรุปผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศบรรพกาล โดยใช้ตัวบ่งชี้ที่ปะปนอยู่กับตะกอนในทะเลสาบบริเวณประเทศไทย ระหว่างยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (23,000–19,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน หรือ years before present หรือ ก่อนปี ค.ศ. 1950) ถึงสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (8,000-4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) บริเวณภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็นและมีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปัจจุบัน ในขณะที่ภาคใต้มีสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้น แม้ว่าแท่งตะกอนที่ได้จากภาคเหนือและใต้แสดงความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลหลังช่วงเวลาดังกล่าว แต่ตัวบ่งชี้ในตะกอนทะเลสาบจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือยังคงแสดงสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็นและแห้งแล้งครอบคลุมเกือบตลอดยุคธารน้ำแข็งละลาย (19,000–12,900 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ก่อนที่มีปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นระหว่างยุคยังเกอร์ดรายอัส ถึงสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (13,000–7,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ในขณะที่บริเวณภาคใต้ไม่สามารถระบุว่าสภาพภูมิอากาศแบบอบอุ่นและชุ่มชื้นเริ่มต้นเมื่อใด แต่พบว่าครอบคลุมตลอดสมัยโฮโลซีนตอนต้นก่อนที่จะมีปริมาณน้ำฝนลดลงอีกครั้งในสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (ประมาณ 8,000–4,000 ปี ก่อนช่วงปัจจุบัน)

คำสำคัญ : ตัวบ่งชี้, ปีก่อนช่วงปัจจุบัน, ยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย, ยุคยังเกอร์ดรายอัส, สมัยโฮโลซีน

*Corresponding author. E-mail : akkaneewut@gmail.com

Abstract

Thailand has been considered to be located at the strategically important location for studying of the Asian monsoon variability. The reconstructed climatic conditions based on proxies in the lake sediments were here assembled. These data were subsequently synthesized in order to insight into the past climate variability in this key area between the last glacial maximum (LGM) and the mid Holocene (23,000–4,000 year before present or BP). Despites cool and dry conditions can be derived from the proxies in the sediment obtained from the north and northeast Thailand, the relatively warm and wet conditions can be reconstructed in the south during the LGM. The cool temperature and low precipitation prevail in the northeastern part of Thailand through the deglaciation (19,000–12,900 year BP). However, the north and south climatic conditions during this time interval cannot be reconstructed since the sediment cores derived from these area potentially containing unconformities. The northeast Thailand climate transfers to the wet conditions from the Younger Dryas to the mid Holocene (12,900–5,000 year BP). Although the onset of high precipitation cannot be defined in the records obtained from the south due to the hiatus in the sediment core. The wet conditions in the south cover entire the early Holocene (11,700–8,000 year BP) and terminate in the mid Holocene (8,000–4,000 year BP).

Keywords : proxy, year before present, the last glacial maximum, the Younger Dryas, the Holocene

***Corresponding author. E-mail** : akkaneewut@gmail.com

บทนำ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ถูกพิจารณาว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลมมรสุมทวีปเอเชีย (the Asian monsoon) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการพาพลังงานความร้อน และความชื้นจากบริเวณเส้นศูนย์สูตรไปยังพื้นที่ที่ตั้งอยู่บนเส้นละติจูดที่อยู่เหนือขึ้นไป (Kealhofer & Penny, 1998; Penny, 2001; Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013) เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างเขตมรสุมย่อยมหาสมุทรอินเดีย (Indian Ocean monsoon sub-system) และเอเชียตะวันออก (East Asian monsoon sub-system) (ประมาณลองจิจูดที่ 105 องศาตะวันออก) (Wang *et al*., 2003; Wang *et al*., 2005) ทำให้ได้รับผลกระทบโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของลมมรสุม นอกจากนี้ประเทศไทยยังเป็นเขตพื้นทวีป (continental area) แห่งแรกที่ได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้เริ่มฤดูฝนในแต่ละปีก่อนพื้นที่อื่นที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมทวีปเอเชีย อันเป็นผลมาจากรูปร่างของประเทศไทยมีลักษณะเป็นแหลมยื่นลงไปในทะเล เชื่อมระหว่างเขตพื้นทวีปกับเส้นศูนย์สูตร (เช่น Matsumoto, 1997; Cook และ Jones, 2012; Chabangborn และ Wohlfarth, 2014; Buckley และคณะ, 2014)

ปัจจุบันประเทศไทยถูกจัดอยู่ในเขตภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าสะวันนา (Tropical Savannah หรือ Aw) ตามการจำแนกสภาพภูมิอากาศแบบเคิปเปน (Köppen climate classification) โดยลักษณะของภูมิอากาศแบบทุ่งหญ้าสะวันนา คือ เดือนที่อากาศหนาวเย็นที่สุดมีอุณหภูมิสูงกว่า 18 องศาเซลเซียสและเดือนที่แห้งแล้งที่สุดมีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่า 60 มิลลิเมตร

(Peel และคณะ 2007) สภาพอากาศในประเทศไทยอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) ฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) และฤดูร้อน (มีนาคม-เมษายน) (Thai meteorological department, 2011) ในฤดูฝนร่องมรสุม (Intertropical Convergence Zone หรือ ITCZ) เลื่อนตัวพาดผ่านประเทศไทย ทำให้หย่อมความกดอากาศต่ำก่อตัวพร้อมกับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดพาเอาความชื้นจากมหาสมุทรอินเดียเข้ามาทำให้เกิดฝนตกชุก ร่องมรสุมจะเลื่อนตัวขึ้นไปทางทิศเหนือเรื่อยๆ ตามการโคจรของดวงอาทิตย์ก่อนที่จะค่อยๆ เลื่อนตัวลงมาทางทิศใต้ระหว่างเดือนกันยายนถึงตุลาคม การเลื่อนตัวลงมาทางใต้ของร่องมรสุมเปิดโอกาสให้หย่อมความกดอากาศสูงที่ก่อตัวบริเวณตอนกลางของทวีปเอเชียค่อยๆ เคลื่อนที่ลงมาแทนที่พร้อมกับนำความแห้งแล้งและหนาวเย็นมาด้วย

แม้ว่าตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทยจะมีความสำคัญต่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลมมรสุมทวีปเอเชียตลอดจนอาจจะส่งผลต่อสภาพภูมิอากาศโลก แต่การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมบรรพกาล (paleoenvironment) ในประเทศไทยก่อนปี ค.ศ. 1990 ส่วนมากไม่ได้มุ่งเน้นที่จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาล (paleoclimate) แต่เน้นที่การศึกษารูปแบบการดำรงชีวิตของมนุษย์ในชุมชนโบราณที่สัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมโดยรอบและการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเลเป็นหลัก (Pramojanee & Hastings, 1983; Hastings & Liengsakul, 1983; Somboon, 1988; Maloney & McAlister, 1990; Chabangborn & Wohlfarth, 2014) โดยใช้ตัวอย่างในบ่อขุดบนบกตามแหล่งโบราณคดีและตามชายฝั่งทะเล ซึ่งมีโอกาสที่อินทรียวัตถุที่ปะปนร่วมกับตะกอนจะถูกย่อยสลายหรือถูกรบกวนโดยกระบวนการต่างๆ ได้ง่าย ทำให้การลำดับชั้นตะกอน (stratigraphy) ต้องศึกษาด้วยความระมัดระวัง นอกจากนี้แล้วการศึกษาดังกล่าวยังมีการกำหนดอายุด้วยวิธีคาร์บอน-14 (C-14 หรือ radiocarbon dating) เพียง 2-3 ตัวอย่างเท่านั้น และใช้การเทียบสัมพันธ์ในการระบุอายุของชั้นตะกอนที่ไม่มีการกำหนดอายุ ซึ่งทำให้ไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างฉับพลัน (abrupt climate change) และยากต่อการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาในบริเวณอื่น

หลังจากปี ค.ศ. 1990 มีความพยายามที่จะนำตัวบ่งชี้ (proxies) ที่ปะปนอยู่ร่วมกับตะกอนในทะเลสาบมาใช้ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาลบริเวณประเทศไทย (ตารางที่ 1) โดยตัวบ่งชี้ที่มักมีการนำมาใช้ศึกษาตะกอนทะเลสาบในประเทศไทย ได้แก่ เรณูวิทยา (palynology) และธรณีเคมีของอินทรียวัตถุที่ตกสะสมตัวร่วมกับตะกอนในทะเลสาบ (รายละเอียดใน Chabangborn (submitted)) เนื่องจากตะกอนที่สะสมตัวในทะเลสาบมีการสะสมตัวตามกฎการลำดับชั้นตะกอน (law of superposition) ชั้นตะกอนที่อายุแก่กว่าจะสะสมตัวอยู่ใต้ชั้นตะกอนที่มีอายุอ่อนกว่าโดยได้รับการรบกวนจากภายนอกน้อย ทำให้มีการลำดับชั้นตะกอนง่าย นอกจากนี้ตะกอนทะเลสาบยังมีการสะสมตัวร่วมกับตัวบ่งชี้หลายชนิดซึ่งสามารถนำมาใช้สอบเทียบกันในการแปลความหมาย

อย่างไรก็ตามการนำตัวบ่งชี้มาใช้ในการจำลองสภาพภูมิอากาศจัดเป็นข้อมูลโดยอ้อม (indirect information) เป็นการแปลความหมายโดยอ้างอิงจากสมมติฐานที่การเปลี่ยนแปลงของตัวบ่งชี้เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ทำให้ยากต่อการที่จะระบุตัวแปรทางภูมิอากาศ (climate variables) เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้นจากตัวบ่งชี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของตัวบ่งชี้อาจจะไม่ได้มีเพียงสภาพภูมิอากาศเท่านั้น แต่ยังอาจจะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นด้วย เช่น ลักษณะภูมิประเทศ สมบัติทางธรณีวิทยาของหินและดินโดยรอบพื้นที่ศึกษา เป็นต้น วิธีหนึ่งที่ผู้ศึกษานิยมนำมาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยอื่น คือ การเปรียบเทียบระหว่างสภาพแวดล้อมแต่ละช่วงเวลา แล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละพื้นที่ศึกษา (Kealhofer & Penny 1998; Penny 2001; White *et al*., 2004; Penny & Kealhofer 2005)

ตารางที่ 1 ทะเลสาบในประเทศไทยที่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศบรรพกาล (หมายเหตุ: เฉพาะข้อมูลที่มีการศึกษาในยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (the last glacial maximum หรือ LGM ระหว่างช่วงเวลา 23,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (year before present หรือก่อนปี ค.ศ. 1950)) และสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (the mid Holocene ระหว่างช่วงเวลา 8,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) เท่านั้น)

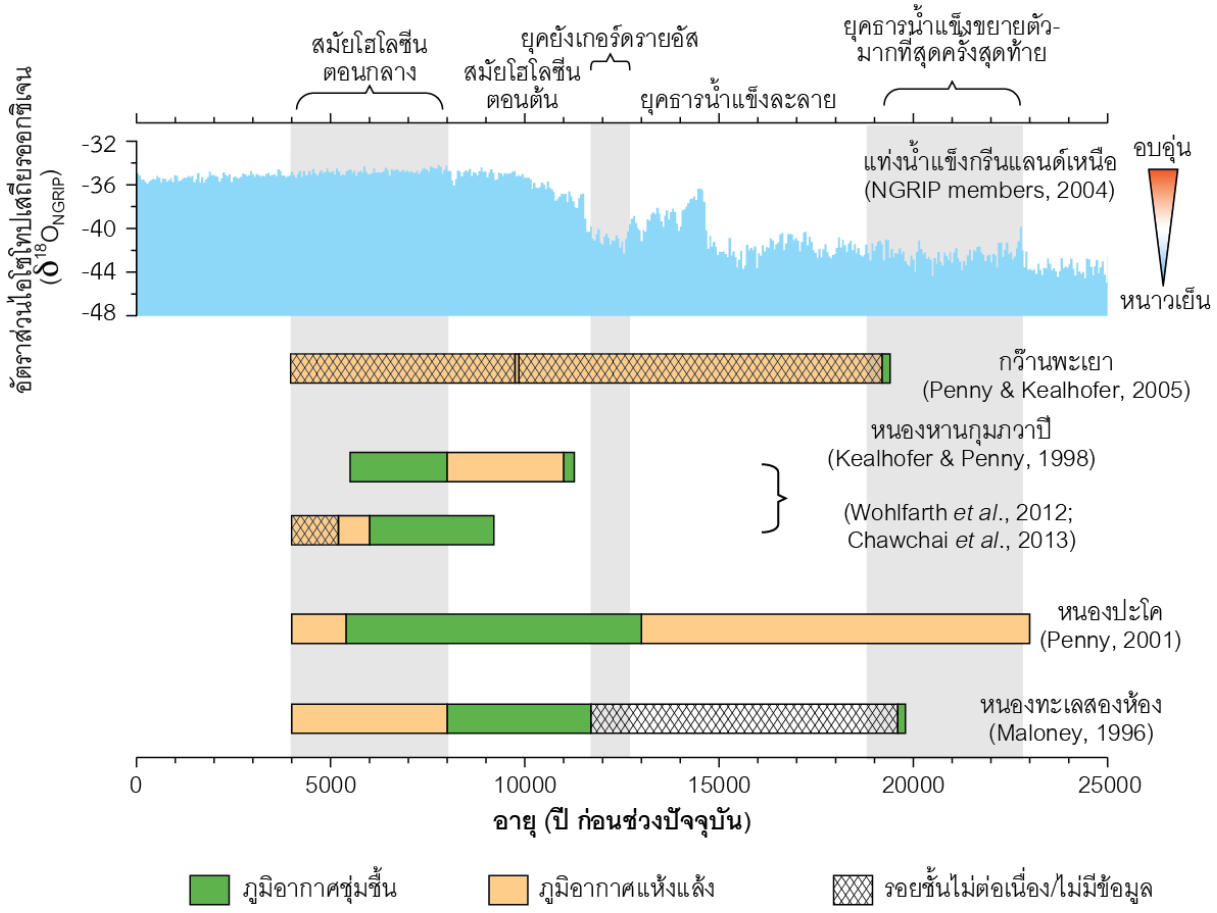
#	สถานที่	ตำแหน่ง		ตัวบ่งชี้	เอกสารอ้างอิง
		ละติจูด	ลองจิจูด		
1	กว๊านพะเยา จ.พะเยา	19.17	99.87	ละอองเรณู	White *et al*., 2004; Penny & Kealhofer, 2005
2	หนองหาน กุมภวาปี จ.อุดรธานี	17.13	103.20	ละอองเรณู และธรณีเคมีของตะกอนทะเลสาบ	Kealhofer & Penny, 1998; White *et al*., 2004; Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013
3	หนองปะโค จ. อุดรธานี	17.10	102.93	ละอองเรณู	White *et al*., 2004; Penny, 2001
4	หนองทะเลสองห้อง จ.ตรัง	7.87	99.48	ละอองเรณู	Maloney, 1999; White *et al*., 2004

แม้ว่าจะใช้การเปรียบเทียบเข้ามาประกอบแต่อย่างไรก็ตามการแปลความหมายจากตัวบ่งชี้ต่างๆก็ยังคงมีความสลับซับซ้อน มีความขัดแย้งในตัวเองและไม่มีหลักเกณฑ์ตายตัว (สรุปใน Chabangborn (submitted)) ทำให้ในบทความวิจัยที่นำเสนองานทางด้านนี้มีบทการอภิปรายผลอย่างกว้างขวาง บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและนำเสนอผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยในอดีต เพื่อให้ผู้อ่านสามารถมองเห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยได้ชัดเจนขึ้น

สภาพภูมิอากาศบรรพกาลบริเวณประเทศไทย (Paleoclimate in Thailand)

สภาพภูมิอากาศบรรพกาลบริเวณประเทศไทยในที่นี้ ถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่วงเวลา ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในบริเวณซีกโลกเหนือจากข้อมูลอุณหภูมิบรรพกาล (paleo-temperature) โดยใช้ตัวบ่งชี้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรออกซิเจน ($\delta^{18}O$) ในแท่งน้ำแข็งกรีนแลนด์เหนือ (North Greenland Ice core Project หรือ NGRIP) ระหว่างช่วงเวลา 23,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (year before present หรือก่อนปี ค.ศ. 1950) (NGRIP members, 2004) โดยไม่พิจารณาเหตุการณ์ในช่วงหลังจาก 4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ในตัวบ่งชี้ต่างๆ ดังมีหลักฐานแสดงให้เห็นว่าเริ่มมีการตัดไม้และทำเกษตรกรรมในบริเวณประเทศไทยเมื่อประมาณ 3,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Higham *et al*., 2011; Chabangborn & Wohlfarth, 2014; Higham, 2015; Wohlfarth *et al*., 2016) (ภาพที่ 1)

การแปลความหมายอ้างอิงตามผู้แต่งบทความในตารางที่ 1 ซึ่งใช้การประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศแบบหนาวเย็น/แห้งแล้ง และอบอุ่น/ชุ่มชื้น โดยการเปรียบเทียบในแต่ละช่วงเวลา



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิบรรพกาล (paleo-temperature) ที่ได้จากตัวบ่งชี้อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรออกซิเจน ($\delta^{18}O$) ในแท่งน้ำแข็งกรีนแลนด์เหนือ (NGRIP members, 2004) ระหว่างยุคธารน้ำเข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (the last glacial maximum) ถึงสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (the mid Holocene)

1) ยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (the last glacial maximum)

ยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายประมาณว่ามีอายุระหว่าง 23,000–19,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Clark *et al*., 2009; Chabangborn *et al*., 2013) เป็นช่วงที่มีธารน้ำแข็งขนาดใหญ่ปกคลุมบริเวณซีกโลกเหนือเป็นบริเวณกว้าง ได้แก่ ธารน้ำแข็งสแกนดิเนเวีย (Scandinavian ice sheet) ในทวีปยุโรปทางตอนเหนือ ธารน้ำแข็งลอเร็นไทด์ (Laurentide ice sheet) ในทวีปอเมริกาเหนือ เป็นต้น การก่อตัวของน้ำแข็งในช่วงนี้ทำให้ระดับน้ำทะเลลดลงถึงประมาณ 120 เมตร โดยเฉพาะบริเวณอ่าวไทยการลดลงของระดับน้ำทะเลทำให้เกิดแผ่นดินเชื่อมระหว่างเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เขตพื้นทวีป (Mainland

Southeast Asia) กับเกาะสุมาตรา ชวา และบอร์เนียว เป็นผืนแผ่นดินขนาดใหญ่ที่เรียกว่า ทวีปซุนดาร์ (Sundaland) (Voris, 2000; Hanebuth *et al*., 2011) ประเทศไทยรวมถึงบริเวณอื่นที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมทวีปเอเชียถูกประเมินว่าปกคลุมด้วยสภาพอากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งกว่าปัจจุบัน (เช่น Huang *et al*., 1997; Hodell *et al*., 1999; White *et al*., 2004; Cosford *et al*., 2010; Fleitmann *et al*., 2011)

ละลองเรณูที่ปะปนอยู่ในแท่งตะกอนทะเลสาบจากกว๊านพะเยา จ.พะเยา บ่งชี้ว่าว่าพืชที่พบมากโดยรอบกว๊านพะเยาในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย ได้แก่ พืชในสกุลสน (*Pinus*) และสกุลโอ๊ค (*Quercus*) กระจายตัวร่วมกับพืชสกุลสามพันปีหรือสนหางกระรอก (*Dacrydium*) สกุลตะเคียน (*Hopea*/*Shorea*) และสกุลหม่อนอ่อน (*Myrica*) นอกจากนี้ยังพบพืชในหมวดเฟิร์นโดยเฉพาะในสกุลลิเภา (*Lygodium*) เป็นจำนวนมาก (Penny & Kealhofer, 2005)

ในแท่งตะกอนทะเลสาบจากหนองปะโค จ. อุดรธานี พบละอองเรณูของพืชไม้ยืนต้น (arboreal) สกุลสน (*Pinus*) และสกุลโอ๊ค (*Quercus*) ในปริมาณมากร่วมกับพืชในสกุลก่อ (*Lithocarpus*/*Castanopsis*) และพืชวงศ์ก่อ (Fagaceae) ในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย และพืชไม้พุ่ม (non-arboreal) ที่พบมากในช่วงนี้ ได้แก่ พืชวงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) นอกจากนี้ยังพบละอองเรณูของพืชในสกุลโกฐจุฬาลัมพา (*Artemisia*) ซึ่งเป็นพืชที่มักพบในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศแห้งแล้ง ละอองเรณูที่พบในบางตัวอย่างพบว่ามีความคล้ายคลึงกันกับพืชที่พบบริเวณภูกระดึงในปัจจุบัน (Penny, 2001)

สำหรับบริเวณหนองทะเลสองห้อง จ.ตรัง ตัวอย่างที่อาจจะบันทึกการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมบรรพกาลในช่วงน้ำแข็งขยายตัวครั้งหลังสุดมีเพียง 1 ตัวอย่างเท่านั้น โดยละอองเรณูที่พบในตัวอย่างดังกล่าวแสดงลักษณะของป่าที่ประกอบด้วยไม้ยืนต้นวงศ์ก่อ (Fagaceae) ทั้งในสกุลก่อ (*Castanopsis*) และสกุลโอ๊ค (*Quercus*) โดยพบร่วมกับพืชสกุลเฉียงพร้านางแอ (*Carallia brachiata*) สกุลเน่าใน (*Ilex*) สกุลอินทนิลหรือยี่เข่ง (*Legerstroemia*) สำหรับพืชไม้พุ่มพบพืชในวงศ์หญ้า (Poaceae) และดอกไม้ที่เจริญเติบโตในน้ำสกุลฝิ่นน้ำหรือป๊อปปี้น้ำ (*Nymphoides*) (Maloney, 1996; White *et al*., 2004)

ละอองเรณูในแท่งตะกอนทะเลสาบจากหนองปะโค จ. อุดรธานี บ่งชี้ว่าบริเวณโดยรอบหนองน้ำดังกล่าวอาจถูกล้อมรอบด้วยป่าสนหรือโอ๊ค (pine/oak forest) ซึ่งพืชดังกล่าวสามารถขยายตัวได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปัจจุบัน (Penny, 2001; Penny & Kealhofer, 2005) แม้ว่าจะพบละอองเรณูของพืชสกุลโกฐจุฬาลัมพา (*Artemisia*) แต่ละอองเรณูรวมถึงตัวบ่งชี้อื่นที่ใช้ร่วมในการจำลองสภาพแวดล้อมบรรพกาลต่างก็ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งที่ชัดเจนนัก (Penny, 2001) แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับผลการศึกษาของ Werner (1997) ซึ่งนำเสนอว่าพืชพรรณที่กระจายตัวอยู่ในป่าสนหรือโอ๊คเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศแบบหนาวเย็นและแห้งแล้ง จึงอาจอนุมานได้ว่าภูมิอากาศที่หนาวเย็นบริเวณหนองปะโคเกิดร่วมกับการที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าในปัจจุบัน (Penny, 2001) (รูป 1) ในขณะที่พบละอองเรณูของพืชดอกที่ขยายตัวในน้ำสกุลฝิ่นน้ำหรือป๊อปปี้น้ำ (*Nymphoides*) บริเวณหนองทะเลสองห้องและพบสปอร์ของเฟิร์นซึ่งต้องการน้ำในการขยายพันธุ์ในปริมาณมากบริเวณกว๊านพะเยา ซึ่งต่างก็แสดงให้เห็นถึงสภาพภูมิอากาศที่มีความชุ่มชื้นในบริเวณดังกล่าว (ภาพที่ 1)

2) ยุคธารน้ำแข็งละลาย (Degraciation)

ธารน้ำแข็งที่มีการขยายตัวอย่างมากในยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายเริ่มมีการหดตัวลงเรื่อยๆ เมื่อประมาณ 19,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน แม้ว่าอุณหภูมิของโลกมีแนวโน้มที่ค่อยๆ สูงขึ้น แต่ก็ยังมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศกลับไปมาเป็นช่วงสั้นๆ เช่น เหตุการณ์เฮนริช ครั้งที่ 1 (Heinrich event 1) เมื่อประมาณ 17,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน ซึ่งเป็นช่วงที่พบชั้นกรวดในแท่งตะกอนมหาสมุทร (marine core) บริเวณมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ (the north Atlantic Ocean) ซึ่งสันนิษฐานว่าถูกพามาโดยภูเขาน้ำแข็ง (iceberg) และชี้ให้เห็นถึงการขยายตัวของธารน้ำแข็งอันเนื่องมาจากการที่อุณหภูมิลดลงอย่างฉับพลัน ส่งผลให้เกิดความแห้งแล้งและหนาวเย็นไปทั่วโลก (เช่น Heinrich, 1988; Bond *et al*., 1992; NGRIP members, 2004; Pausata *et al*., 2011) หรือในเหตุการณ์โบลิง-อัลเลอร์รอด (Bølling-Allerød) ประมาณระหว่าง 14,000–12,900 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน ที่อุณหภูมิบริเวณซีกโลกเหนือสูงขึ้นพร้อมกับมีปริมาณการเกิดหยาดน้ำฟ้า (precipitation) เพิ่มมากขึ้น (เช่น NGRIP member, 2004; Hoek, 2009) ในยุคธารน้ำแข็งละลายประเทศไทยรวมถึงบริเวณอื่นที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมทวีปเอเชียเชื่อว่ามีสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งต่อเนื่องมาจากยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (เช่น Huang *et al*., 1997; Hodell *et al*., 1999; White *et al*., 2004; Cosford *et al*., 2010; Fleitmann *et al*., 2011)

Penny & Kealhofer (2005) เสนอว่าบริเวณกว๊านพะเยามีสภาพภูมิอากาศคล้ายกับช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย แต่จากการกำหนดอายุด้วยวิธีคาร์บอน-14 แสดงอัตราการสะสมตัวของตะกอนในทะเลสาบที่ลดลงอย่างฉับพลัน โดยในช่วงเวลาระหว่าง 9,000 ปีมีชั้นตะกอนสะสมตัวหนาเพียงประมาณ 20 เซนติเมตร (Penny & Kealhofer, 2005) ซึ่งแสดงให้ถึงการที่ปริมาณน้ำท่าที่ไหลเข้ามาสู่ทะเลสาบลดลงอันเป็นผลมาจากความแห้งแล้ง (ภาพที่ 1) หรืออาจสามารถอธิบายได้อีกแบบว่าชั้นตะกอนนี้ด้านบนที่หายไปอาจจะถูกกัดเซาะไปในช่วงเวลาเวลาใดเวลาหนึ่ง ที่มีน้ำท่าไหลเข้าสู่กว๊านพะเยามากขึ้น

ละอองเรณูจากหนองปะโคแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของพันธุ์พืชที่ปกคลุมพื้นที่ ซึ่งอาจจะสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในยุคธารน้ำแข็งละลาย โดยยังคงพบละอองเรณูของพืชสกุลสน (*Pinus*) สกุลโอ๊ค (*Quercus*) วงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) ปะปนร่วมกับตะกอนทะเลสาบในปริมาณมากเมื่อเทียบกับละอองเรณูของพืชชนิดอื่นเช่นเดียวกับในยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (Penny, 2001) แต่พบละอองเรณูของพืชไม้ยืนต้นวงศ์เหงือกปลาหมอ (Acanthaceae) พืชไม้พุ่มสกุลโกฐจุฬาลัมพา (*Arthemisia*) ในแท่งตะกอนร่วมกับเศษถ่านจากการเผาไหม้ (charcoal) ในปริมาณมากระหว่าง 17,600–15,500 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน หลักฐานเหล่านี้ชี้ให้เห็นสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งมากกว่าในช่วงยุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย โดยการลดลงของปริมาณน้ำฝนนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาใกล้เคียงกับ เหตุการณ์เฮนริช ครั้งที่ 1 ในซีกโลกเหนือ นอกจากนั้นการที่พบละอองเรณูของพืชบางชนิดเพิ่มปริมาณมากขึ้น เช่น พืชในวงศ์เหงือกปลาหมอ (Acanthaceae) สกุลเอล์ม (*Ulmus*) และสกุลโกฐจุฬาลัมพา (*Arthemesia*) ซึ่งเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็น บ่งบอกถึงการที่อุณหภูมิลดลงกว่ายุคธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายระหว่าง 15,400–13,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Penny, 2001) (ภาพที่ 1) ส่วนในกรณีของแท่งตะกอนจากหนองทะเลสองห้องไม่มีผลการวิเคราะห์ละอองเรณูในยุคนี้ (Maloney, 1996; White *et al*., 2004)

3) ยุคยังเกอร์ดรายอัส (Younger Dryas)

ยุคยังเกอร์ดรายอัสเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างฉับพลัน หลังจากการที่อุณหภูมิบริเวณซีกโลกเหนือเริ่มสูงขึ้นในเหตุการณ์โบลิง-อัลเลอร์รอด อุณหภูมิกลับลดลงอย่างรวดเร็วในยุคยังเกอร์ดรายอัสซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาประมาณ 12,900–11,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (เช่น Björck, 2013; Carlson, 2013) ชื่อของช่วงอายุนี้ได้มากจากชื่อของพืชเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่หนาวเย็นสกุล *Dryas octopetata* ซึ่งละอองเรณูของมันมักพบร่วมกับตะกอนทะเลสาบในทวีปยุโรปทางตอนเหนือที่มีการกำหนดอายุในช่วงนี้ การที่สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนเป็นหนาวเย็นและแห้งแล้งอย่างฉับพลันในยุคยังเกอร์ดรายอัส ก่อนที่จะเข้าสู่สภาพภูมิอากาศแบบอบอุ่นและชุ่มชื้นกว่าในสมัยโฮโลซีน (the Holocene) ทำให้เป็นที่สนใจจากนักวิจัยหลายท่าน

อย่างไรก็ตามหลักฐานที่บ่งชี้ถึงสภาพภูมิอากาศแห้งแล้ง และหนาวเย็นในช่วงเวลานี้จากบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หาได้ยาก ซึ่งยังคงเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ในปัจจุบันว่าความหนาวเย็นและแห้งแล้งในเขตซีกโลกเหนือในยุคยังเกอร์ดรายอัส ส่งผลกระทบมาถึงพื้นที่บริเวณนี้หรือไม่ (Maloney, 1995; Partin *et al*., 2007) การที่ไม่พบตัวบ่งชี้ที่แสดงสภาพภูมิอากาศที่สอดคล้องกับในเขตซีกโลกเหนือ ยังอาจสามารถอธิบายอีกอย่างหนึ่งจากการกำหนดอายุโดยใช้เทคนิคคาร์บอน-14 จากตัวอย่างบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีความละเอียดต่ำ ในขณะที่การกำหนดอายุด้วยเทคนิคดังกล่าวในตะกอนยุคยังเกอร์ดรายอัสมีความคลาดเคลื่อนสูง อันเป็นผลมาจากยุคยังเกอร์ดรายอัสเป็นช่วงที่สนามแม่เหล็กโลกอ่อนกำลังลงทำให้รังสีคอสมิกความเข้มสูงผ่านชั้นบรรยากาศโลกเข้ามาได้มาก เกิดการแตกตัวของคาร์บอน-14 ในบรรยากาศมาก การกำหนดอายุโดยใช้วิธีคาร์บอน-14 ในตะกอนยุคยังเกอร์ดรายอัสจึงได้อายุที่แก่กว่าความเป็นจริง (Muscheler *et al*., 2008) ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดอายุที่ละเอียดมากขึ้นหรือนำไปเทียบกับเส้นโค้งเรดิโอคาร์บอน (radiocarbon curve) เพื่อปรับค่าการกำหนดอายุที่ได้จากคาร์บอน-14 ก่อนนำไปใช้ (Reimer *et al*., 2013)

การศึกษาละอองเรณูในแท่งตะกอนจากกว๊านพะเยาและหนองทะเลสองห้องไม่สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในช่วงเวลานี้ได้ แต่ละอองเรณูในตะกอนทะเลสาบจากหนองปะโคบ่งชี้ว่าว่ามีปริมาณของพืชในสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แสดงการเปลี่ยนแปลงของพันธุ์พืชโดยรอบหนองปะโค จากป่าสนหรือโอ๊คไปเป็นป่าไม้ใบกว้างเขตอบอุ่น (topical broad-leaves forest) (Penny, 2001) ชี้ให้เห็นสภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิอบอุ่นขึ้นและ/หรือมีปริมาณน้ำฝนมากขึ้นกว่าในยุคธารน้ำแข็งละลาย (ภาพที่ 1)

4) สมัยโฮโลซีนตอนต้น (Early Holocene)

สมัยโฮโลซีนตอนต้นเริ่มเมื่อประมาณ 11,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน เป็นช่วงที่พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังโลกเพิ่มขึ้น ทำให้ซีกโลกเหนืออบอุ่นขึ้น ธารน้ำแข็งละลายและระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว น้ำทะเลรุกล้ำเข้ามาในอ่าวไทยในช่วงนี้ (Somboon, 1988; Voris, 2000; Hanebuth *et al*., 2011) สมัยโฮโลซีนตอนต้นในที่นี้กำหนดให้สิ้นสุดเมื่อประมาณ 8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Walker *et al*., 2012) ซึ่งเป็นช่วงที่พลังงานรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นผิวโลกเริ่มลดลงพร้อมกับเกิดเหตุการณ์ที่อุณหภูมิพื้นผิวโลกลดลงอย่างฉับพลัน เรียกว่าเหตุการณ์ 8,200 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (8.2 kiloyears event) (เช่น Alley *et al*., 1997; Morrill & Jacobsen, 2005) โดยเหตุการณ์นี้ถูกประเมินว่ามีความรุนแรงน้อยกว่ายุคยังเกอร์ดรายอัสแต่มากกว่ายุคน้ำแข็งน้อย (little ice age) การจำลองสภาพภูมิอากาศชี้ให้เห็นถึงการที่ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทวีกำลังแรงขึ้นพร้อมกับการที่ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นในสมัยโฮโลซีนตอนต้น (เช่น Huang *et al*., 1997; Mingram

et al., 2004; Yancheva *et al.,* 2007; Wang *et al.,* 2010; Cook & Jones, 2012; Chabangborn & Wohlfarth, 2014 เป็นต้น)

ละอองเรณูที่พบในแท่งตะกอนจากกว๊านพะเยาแสดงสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งคล้ายคลึงกับในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งหลังสุด (Penny & Kealhofer, 2005) แต่เนื่องจากชั้นตะกอนจากกว๊านพะเยาที่สามารถระบุว่าอยู่ในสมัยโฮโลซีนตอนต้นมีความหนาน้อยมาก อันอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากรอยความไม่ต่อเนื่อง (unconformity) จึงควรที่จะต้องระมัดระวังในการนำเอาข้อมูลชุดนี้มาใช้ (ภาพที่ 1)

สำหรับบริเวณหนองปะโคละอองเรณูของพืชสกุลสน (*Pinus*) และสกุลโอ๊ค (*Quercus*) ที่พบมากก่อนสมัยโฮโลซีนตอนต้นมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด สวนทางกับปริมาณละอองเรณูของพืชสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะลดลงอย่างฉับพลันเมื่อประมาณ 8,900 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน พร้อมกับที่ละอองเรณูของพืชวงศ์หญ้า (Poaceae) และกก (Cyperaceae) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น หลักฐานต่างๆ เหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการขยายตัวของป่าไม้ใบกว้างเขตอบอุ่น (Penny, 2001) และสภาพภูมิอากาศแบบที่อบอุ่นและชุ่มชื้นขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงยังเกอร์ดรายอัส (ภาพที่ 1)

บริเวณหนองหานกุมภวาปี จ.อุดรธานี ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากหนองปะโคมาทางทิศตะวันออกประมาณ 10 กิโลเมตร พบละอองเรณูของพืชยืนต้นสกุล *Celtis* และสกุลสน (*Pinus*) ส่วนไม้พุ่มที่พบมากได้แก่ พืชวงศ์หญ้า (Poaceae) ร่วมกับละอองเรณูของพืชสกุลลัดวิเจีย (*Ludwigia*) ซึ่งเป็นพืชน้ำและพืชสกุลจิก (*Barringtonia*) หรือสกุลชมพู่หรือหว้า (*Eugenia*) ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตได้ดีในบริเวณพื้นที่ชุ่มน้ำ นอกจากนี้ยังพบฟิโธลิทของพืชวงศ์หญ้าที่มักพบแพร่พันธุ์อยู่ใกล้น้ำในปริมาณมาก (Kealhofer & Penny, 1998) บ่งชี้ให้เห็นว่ามีน้ำขังอยู่ในทะเลสาบตั้งแต่ก่อน 11,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (ภาพที่ 1) แต่ในชั้นตะกอนชั้นถัดมาพบละอองเรณูของพืชยืนต้นหลายชนิดและพืชวงศ์หญ้า (Poaceae) ในปริมาณมากระหว่าง 11,000 ถึงประมาณ 8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Kealhofer & Penny, 1998) ละอองเรณูของพืชยืนต้นดังกล่าวเป็นส่วนประกอบของ ป่าโปร่งแห้งแล้งจนถึงป่าดิบแล้งหรือป่าไม้ผลัดใบ (dry/mixed deciduous forest) ซึ่งอาจจะชี้ถึงสภาพภูมิอากาศที่มีปริมาณน้ำฝนลดลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้านี้ (ก่อน 11,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) (ภาพที่ 1) นอกจากนี้ยังพบเศษถ่านจากการเผาไหม้ในปริมาณมากเมื่อประมาณ 9,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Kealhofer & Penny, 1998) ซึ่งเป็นหลักฐานที่สอดคล้องกับสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งที่เกิดขึ้น

Wohlfarth *et al*. (2012) ได้นำตะกอนจากบริเวณหนองหานกุมภวาปีมาศึกษาตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุการตอบสนองการเป็นแม่เหล็กของตะกอน และซากสิ่งมีชีวิตไดอะตอมที่ปะปนอยู่ในตะกอนทะเลสาบ พบว่าตะกอนที่สะสมตัวในสมัยโฮโลซีนตอนต้นมีค่าอินทรีย์คาร์บอนรวมน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอินทรียวัตถุถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์มาก อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจนมีค่าระหว่าง 10–25 และอัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนประมาณ -21–-24‰ แสดงถึงอินทรียวัตุที่มีต้นกำเนิดจากทั้งบริเวณพื้นที่โดยรอบและในตัวของหนองน้ำเอง สอดคล้องกับตัวบ่งชี้การตอบสนองการเป็นแม่เหล็กของตะกอน ที่แสดงถึงการที่ตะกอนปริมาณมากถูกพัดพามาโดยกระแสน้ำ ซากบรรพชีวินไดอะตอมที่พบมากได้แก่ *Aulacoseira granulata* ซึ่งพบมากในทะเลสาบน้ำตื้นในเขตร้อนชื้น

ตัวบ่งชี้ทั้งหมดนี้แสดงสภาพของหนองหานกุมภวาปีที่มีลักษณะเป็นหนองน้ำตื้น ได้รับน้ำบางส่วนจากทางน้ำโดยรอบซึ่งพัดพาตะกอนและอินทรียวัตถุมาสะสมตัว การที่อินทรียวัตถุมีการสะสมตัวน้อยอาจเป็นผลเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายซ้ำโดยจุลินทรีย์เนื่องจากการหมุนวนของชั้นน้ำในทะเลสาบ (Wohlfarth *et al*., 2012) จากหลักฐานดังกล่าวสรุปได้ว่าบริเวณหนองหานกุมภวาปีมีสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้น (ภาพที่ 1) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Chawchai *et al.*

(2013) ซึ่งวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุและธรณีเคมีของตะกอนโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray fluorescence หรือ XRF) ของแท่งตะกอนจากพื้นที่ทางตอนใต้ของหนองหานกุมภวาปี

แท่งตะกอนจากบริเวณหนองทะเลสองห้องพบละอองเรณูของพืชไม้ต้นสกุลก่อ (*Castanopsis*) สกุลเทียนกิ่งขาว (*Lawsonia inermis*) และสกุลฝิ่นน้ำหรือป๊อปปี้น้ำ (*Nymphoides*) ในปริมาณมากแสดงถึงป่าไม้และพื้นที่ชุ่มน้ำที่ล้อมรอบหนองน้ำอยู่ (Malonry, 1996; White *et al*., 2004) และแสดงถึงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นใกล้เคียงกับในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (ภาพที่ 1)

5) สมัยโฮโลซีนตอนกลาง (Mid Holocene)

สมัยโฮโลซีนตอนกลางครอบคลุมระยะเวลาประมาณ 8,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Walker *et al*., 2012) ในช่วงนี้อุณหภูมิบริเวณซีกโลกเหนือค่อยๆ เย็นตัวลง อันอาจจะเป็นผลมาจากการลดลงของปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นโลก และมีปริมาณน้ำฝนเริ่มลดลงตามไปด้วย (Steig, 1999) อย่างไรก็ตามระดับน้ำทะเลกลับสูงขึ้นจนกระทั่งสูงกว่าปัจจุบันประมาณ 4-5 เมตร ในบริเวณอ่าวไทยเมื่อประมาณ 6,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Nimnart *et al*., 2015) ในสมัยโฮโลซีนตอนกลางลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้อ่อนกำลังลงทำให้ปริมาณน้ำฝนลดลง (เช่น Cook & Jones, 2012 เป็นต้น)

ละอองเรณูที่พบร่วมกับตะกอนทะเลสาบบริเวณหนองปะโคประกอบด้วยพืชสกุลสน (*Pinus*) สกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) วงศ์หญ้า (Poaceae) และวงศ์กก (Cyperaceae) ละอองเรณูของพืชที่ทนความแห้งแล้งได้ดีลดลง ในขณะที่ปริมาณละอองเรณูของพืชสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) ซึ่งเป็นพืชที่เจริญเติบโตอยู่ในบริเวณโดยรอบหนองน้ำเพิ่มขึ้น (Penny, 2001) อันอาจเป็นผลมาจากการที่มีน้ำท่าไหลเข้าสู่หนองน้ำหรือมีฝนตกมากขึ้นเทียบกับสมัยโฮโลซีนตอนต้น ระหว่าง 8,000–5,500 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (ภาพที่ 1) ปริมาณละอองเรณูของพืชสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) ลดลงหลังจาก 5,400 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน แต่พืชพรรณที่เป็นส่วนประกอบของป่าไม้ใบกว้างเขตอบอุ่นยังคงอยู่ นอกจากนี้ยังพบละอองเรณูของพืชที่ทนความแล้งได้ดี เช่น พืชวงศ์สมอ/โคลงเคลง (Combretaceae/Melastomataceae) ร่วมกับพืชสกุล *Celtis* สกุลยางนา (*Dipterocarpus*) สกุลชมพู่หรือหว้า (*Eugenia*) และสกุล *Macaranga* เพิ่มขึ้น (Penny, 2001) อันอาจจะสะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่บริเวณนี้ได้รับปริมาณน้ำฝนน้อยลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนหน้านี้ (8,000-5,500 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) (ภาพที่ 1)

สำหรับในหนองหานกุมภวาปีโดยทั่วไปพบละอองเรณูของพืชวงศ์กก (Cyperaceae) และสปอร์ของเฟิร์นในปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดระหว่าง 8,000–6,800 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน ละอองเรณูของพืชสกุลจิก (*Barringtonia*) ที่เคยพบมากหายไป (Kealhofer & Penny, 1998) แต่ละอองเรณูที่ได้จากชั้นตะกอนแสดงสังคมพืชที่มีลักษณะคล้ายกับสภาพแวดล้อมของหนองหานกุมภวาปีในปัจจุบันที่ปกคลุมด้วยกลุ่มของหญ้าและกกที่รากของมันสานตัวกันอย่างหนาแน่นลอยอยู่เหนือผิวน้ำ (floating mat) (Kealhofer & Penny, 1998) การที่พบสปอร์ของเฟิร์นในปริมาณมากอาจสะท้อนให้เห็นภาพของการที่ระดับน้ำในหนองน้ำเพิ่มขึ้นหรือสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้น (ภาพที่ 1) พบละอองเรณูของพืชสกุลไชยวาน (*Cephalanthus*) เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่พืชที่ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี เช่น สกุล *Celtis* สกุลยางนา (*Dipterocarpus*) และสกุลก่อนก (*Lithocarpus*) ลดลงระหว่าง 6,800–5,500 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน แสดงถึงความชุ่มชื้นเพิ่มขึ้นจากสมัยโฮโลซีนตอนต้น (ภาพที่ 1)

จากการศึกษาตัวบ่งชี้ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุในตะกอนทะเลสาบ พบว่าตะกอนทะเลสาบบริเวณหนองหานกุมภวาปีมีปริมาณอินทรียวัตถุน้อยระหว่าง 8,000–6,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนและ

อัตราส่วนไอโซโทปเสถียรคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกับในชั้นตะกอนที่สะสมตัวในสมัยโฮโลซีนตอนต้น และยังคงพบไดอะตอม *Aulacoseira granulata* ในปริมาณมาก (Wohlfarth *et al*., 2012) หลักฐานทั้งหมดนี้ชี้ให้เห็นถึงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นใกล้เคียงกับสมัยโฮโลซีนตอนต้น (ภาพที่ 1)

ปริมาณของอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้นระหว่าง 6,700–5,900 ปีก่อนช่วงปัจจุบันพร้อมกับที่ตัวบ่งชี้การตอบสนองการเป็นแม่เหล็กของตะกอนและปริมาณของไดอะตอมลดลง (Wohlfarth *et al*., 2012) การที่พบปริมาณของอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการที่กระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ลดลง การที่จำนวนไดอะตอมที่สะสมตัวอยู่ร่วมกับตะกอนลดลงสามารถอธิบายได้หลายสาเหตุ อันเป็นผลมาจากการที่สภาพแวดล้อมในหนองน้ำเปลี่ยนไปหรือเกิดการแย่งชิงอาหารระหว่างไดอะตอมกับสาหร่ายบางชนิดในหนองน้ำ อย่างไรก็ตามข้อมูลทั้งหมดบ่งชี้ว่าระดับน้ำในหนองน้ำค่อยๆ ลดระดับลงอันอาจจะเป็นผลมาจากการที่น้ำท่าที่ไหลเข้ามาสู่หนองน้ำและปริมาณน้ำฝนลดลงกว่าสภาพภูมิอากาศในบริเวณนี้ระหว่าง 8,000–6,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (ภาพที่ 1) ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับลักษณะของตะกอนชั้นที่ปิดทับอยู่ที่มีลักษณะเป็นชั้นพีท (peat) พบว่ามีลักษณะต่างกันอย่างเห็นได้ชัดบริเวณรอยต่อ (sharp boundary) ข้อมูลที่ได้จากการกำหนดอายุด้วยวิธีคาร์บอน-14 แสดงการกระโดดของอายุประมาณเกือบ 1,000 ปี ในชั้นตะกอนหนา 15 เซนติเมตร ซึ่งอาจจะแสดงให้เห็นถึงร่องรอยความไม่ต่อเนื่องอันเป็นผลมาจากการที่ระดับน้ำในหนองน้ำลดลง (ภาพที่ 1) หลังจากนั้นประมาณ 3,200 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน พบว่าลักษณะของตะกอนและสมบัติทางธรณีเคมีของอินทรียวัตถุเปลี่ยนไปและพบไดอะตอม *Aulacoseira granulata* ปะปนอยู่ในตะกอนซึ่งอาจจะแสดงถึงการที่มีน้ำมาขังในบริเวณหนองหานกุมภวาปีอีกครั้ง (Wohlfarth *et al*., 2012) ผลการวิเคราะห์โดยรวมสอดคล้องกับ Chawchai และคณะ (2013) แต่มีความคลาดเคลื่อนทางเวลาเล็กน้อย อันเป็นผลเนื่องมาจากหนองหานกุมภวาปีเป็นหนองน้ำขนาดใหญ่และพื้นท้องทะเลสาบไม่สม่ำเสมอบางบริเวณลึกในขณะที่บางแห่งตื้นกว่า บริเวณส่วนที่ลึกกว่าน้ำจะแห้งช้ากว่าส่วนที่ตื้นในขณะที่เกิดสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้ง

ในขณะที่แห่งตะกอนจากบริเวณหนองทะเลสองห้องที่ไม่พบละอองเรณูของดอกไม้ที่เจริญเติบโตในน้ำสกุลฝิ่นน้ำหรือป๊อปปี้น้ำ (*Nymphoides*) และละอองเรณูของพืชสกุลเทียนกิ่งขาว (*Lawsonia inermis*) ลดลงอย่างชัดเจน (Maloney, 1996; White *et al*., 2004) บ่งชี้ว่าว่าระดับน้ำในหนองน้ำลดลง ประมาณ 8,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน และพบละอองเรณูของพืชที่ดำรงชีวิตอยู่ในสภาพป่าดิบแล้งหรือป่าไม้ผลัดใบมากขึ้นซึ่งบ่งชี้ว่ามีความแห้งแล้งมากกว่าในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายและสมัยโฮโลซีนตอนต้น (ภาพที่ 1)

อภิปรายและสรุปผล (Discussion and Conclusion)

การศึกษาในครั้งนี้ได้รวบรวมการจำลองสภาพภูมิอากาศบรรพกาลและทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ จากการใช้ตัวบ่งชี้เรณูวิทยาและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุที่ทำการศึกษาจากทะเลสาบในบริเวณประเทศไทย เพื่อให้สามารถมองเห็นภาพรวมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบรรพกาลบริเวณประเทศไทยระหว่าง 23,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (year before present หรือ ก่อนปี ค.ศ. 1950) ได้ชัดเจนขึ้น โดยแบ่งช่วงเวลาดังกล่าวออกเป็น 5 ช่วงเวลาตามการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศบริเวณซีกโลกเหนือ

ตัวบ่งชี้ละอองเรณูแสดงให้เห็นว่าสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นในบริเวณกว๊านพะเยา ในช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้าย (23,000–19,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) (Penny & Kealhofer, 2005) ในขณะที่บริเวณหนองปะโคตัวบ่งชี้ละอองเรณูแสดงสภาพภูมิอากาศแบบหนาวเย็น แต่ไม่พบหลักฐานที่แสดงถึงความแห้งแล้งที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับพื้นที่บริเวณอื่น

ที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมทวีปเอเชีย Penny (2001) เสนอว่าบริเวณนี้อาจจะมีปริมาณน้ำฝนลดลงน้อยกว่าในปัจจุบัน ตัวบ่งชี้ละอองเรณูจากหนองทะเลสองห้อง จ.ตรัง บ่งชี้ว่ามีภาคใต้มีสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นเนื่องจากมีน้ำขังอยู่ในหนองน้ำ (Maloney, 1996; White *et al*., 2004) อย่างไรก็ตามในการพิจารณาไม่อาจละเลยความเป็นไปได้ที่หนองทะเลสองห้องเป็นทะเลสาบที่เกิดจากหลุมยุบ (sink hole) (Maloney, 1996) มีเป็นหินปูนอยู่โดยรอบ การทำละลายคาร์บอนองค์ประกอบในหินปูนโดยน้ำฝนอาจจะทำให้การกำหนดอายุโดยใช้คาร์บอน-14 คลาดเคลื่อนแก่กว่าอายุจริง

สภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งบริเวณตอนเหนือของประเทศไทยต่อเนื่องมาจนถึงช่วงเวลาประมาณ 13,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน แต่เนื่องจากการศึกษาตะกอนทะเลสาบในบริเวณนี้มีการตรวจกำหนดอายุเพียง 1-2 ตัวอย่างในช่วงธารน้ำแข็งละลาย (the deglaciation ระหว่าง 19,000 -12,900 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ทำให้ไม่สามารถที่จะตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างฉับพลันที่มักพบในบริเวณอื่นได้ ในขณะที่ในยุคยังเกอร์ดรายอัส (the younger dryas ระหว่าง 12,900–11,700 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ซึ่งซีกโลกเหนือถูกปกคลุมด้วยสภาพภูมิอากาศแห้งแล้งและหนาวเย็น ละอองเรณูที่สะสมตัวร่วมกับตะกอนทะเลสาบในหนองปะโคกลับชี้ให้เห็นถึงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นมากกว่าช่วงธารน้ำแข็งขยายตัวมากที่สุดครั้งสุดท้ายในบริเวณประเทศไทย การที่สภาพภูมิอากาศบริเวณประเทศไทยต่างจากพื้นที่อื่นอาจเป็นผลเนื่องมาจากการที่การระบุช่วงอายุยุคยังเกอร์ดรายอัส ต้องการการกำหนดอายุอย่างละเอียด และอีกความเป็นไปได้คือสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งและหนาวเย็นในยุคยังเกอร์ ดรายแอสไม่ได้ขยายตัวลงมาทางใต้จนถึงบริเวณประเทศไทย

ในสมัยโฮโลซีนตอนต้น (the early Holocene ระหว่าง 11,700–8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ตัวบ่งชี้ละอองเรณูจากหนองปะโคและหนองทะเลสองห้องรวมถึงตัวบ่งชี้ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุจากหนองหานกุมภวาปีต่างก็แสดงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นต่อเนื่องมาจากยุคยังเกอร์ดรายอัส (Maloney, 1996; White *et al*., 2004; Wohlfarth *et al*., 2012 และ Chawchai *et al*., 2013) ในขณะที่การจำลองสภาพภูมิอากาศบริเวณหนองหานกุมภวาปีโดยอาศัยตัวบ่งชี้ละอองเรณูและฟิโธลิธต่างก็แสดงสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งระหว่าง 11,000 – 8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Kealhofer & Penny, 1998) อย่างไรก็ตามตัวบ่งชี้ละอองเรณูไม่ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของพืชพรรณโดยรอบหนองหานกุมภวาปี ในทางตรงข้าม Kealhofer & Penny (1998) พบละอองเรณูของพืชวงศ์ฝิ่นน้ำหรือป๊อปปี้น้ำ (*Nymphaides*) และพืชสกุลกก (Cyperaceae) สะสมตัวร่วมกับตะกอนทะเลสาบ อันแสดงให้เห็นถึงการที่ในหนองหานกุมภวาปีมีน้ำขังอยู่ตลอดในระหว่าง 11,000 – 8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน เช่นเดียวกับหลักฐานจากการแปลความหมายจากตัวบ่งชี้ธรณีเคมีของอินทรียวัตถุ แต่การที่พบเศษถ่านจากการเผาไหม้จำนวนมากซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับฟิโธลิทแล้วทำให้สามารถสันนิษฐานได้ว่าพื้นที่บริเวณนี้เกิดไฟไหม้ป่าแบบไม่รุนแรงแต่เกิดบ่อยครั้ง (Kealhofer & Penny, 1998) ซึ่งแสดงสภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้ง นอกจากนี้ยังพบละอองเรณูของพืชพันธุ์ที่เป็นองค์ประกอบของป่าโปร่งแล้ง (open dry-land) ร่วมกับป่าไม้ (woodland) หรือป่าผสมผลัดใบ (dry/mixed deciduous) และเศษถ่านจากการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามจากหลักฐานดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่าพืชพันธุ์ที่พบเป็นผลมาจากการแทนที่ภายหลังจากการเกิดไฟไหม้ป่า เพราะฉะนั้นบริเวณประเทศไทยจึงควรที่จะมีภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นในสมัยโฮโลซีนตอนต้นเทียบเคียงกับยุคยังเกอร์ดรายอัส การที่ตัวบ่งชี้ต่างชนิดกันจากทะเลสาบเดียวกันกลับแสดงให้เห็นถึงสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน จึงทำให้การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมบรรพกาลโดยใช้ตะกอนทะเลสาบจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวบ่งชี้มากกว่าหนึ่งอย่างขึ้นไปเพื่อที่จะสามารถแปลความหมายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

สมัยโฮโลซีนตอนกลาง (the mid Holocene ประมาณ 8,000–4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) ตัวบ่งชี้เรณูวิทยาและธรณีเคมีของอินทรียวัตถุต่างก็บ่งชี้ถึงสภาพภูมิอากาศแบบชุ่มชื้นใกล้เคียงกับยุคโฮโลซีนตอนต้นบริเวณหนองหานกุมภวาปีระหว่าง

8,000–7,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน ก่อนที่ปริมาณน้ำฝนลดลงเมื่อเทียบกับช่วงก่อนนั้น (8,000 – 4,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน) และเข้าสู่สภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้ง อย่างไรก็ตามช่วงเวลาที่เข้าสู่สภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งยังมีความเหลื่อมกันในเชิงของเวลาอยู่ ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนลดลงบริเวณหนองทะเลสองห้องเมื่อประมาณ 8,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Maloney, 1996; White *et al*., 2004) หนองปะโคประมาณ 5,300 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Penny, 2001) ตอนใต้ของหนองหานกุมภวาปีประมาณ 6,500 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Chawchai *et al*., 2013) และตอนเหนือของหนองหานกุมภวาปีประมาณ 7,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบัน (Wohlfarth *et al*., 2012) ความแตกต่างในเชิงเวลานี้อาจเป็นผลมาจากการกำหนดอายุตะกอนจากหนองทะเลสองห้องและหนองปะโคที่มีผลการกำหนดอายุไม่กี่ตัวอย่างแล้วทำการเทียบสัมพันธ์เพื่อกำหนดอายุตะกอนในระหว่างชั้นที่ไม่มีผลการกำหนดอายุ ในขณะที่ผลการศึกษาของ Chawchai *et al.* (2013) และ Wohlfarth *et al.* (2012) เก็บตัวอย่างจากหนองหานกุมภาวาปีเช่นเดียวกันแต่เนื่องจากหนองหานเป็นทะเลสาบน้ำจืดขนาดใหญ่ (ประมาณ 27 ตารางกิโลเมตร) ซึ่งคาดว่าเกิดจากการยุบตัวของโดมเกลือ (salt dome) และตัวอย่างเก็บจากคนละพื้นที่ จึงมีความเป็นไปได้ว่าแต่ละบริเวณของหนองหานกุมภวาปีมีความลึกไม่เท่ากันเนื่องจากการยุบตัวของแต่ละโดมเกลือต่างกัน ในขณะที่สภาพภูมิอากาศเข้าสู่ความแห้งแล้งบริเวณที่น้ำตื้นก็แห้งก่อนส่วนบริเวณที่ลึกก็ยังมีน้ำขังอยู่ ทำให้สภาพภูมิอากาศแบบแห้งแล้งจึงน่าที่จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 7,000 ปีก่อนช่วงปัจจุบันในสมัยโฮโลซีนตอนกลาง (Wohlfarth *et al*., 2012; Chawchai *et al*., 2013)

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง ประจำปีงบประมาณ 2558 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คลัสเตอร์วิจัยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและจัดการภัยพิบัติ เลขที่โครงการ CU-58-065-CC

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ บาร์บาร่า เวิฮ์ลฟาร์ต (Prof. Barbara Wohlfarth) ที่เป็นผู้ผลักดันและสนับสนุนให้ผู้เขียนสนใจศึกษาสภาพภูมิอากาศบรรพกาล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สันติ ภัยหลบลี้ นางสาวนันทนัช เหล่านิยมไทย และนางสาวอัสสุมา สายนาคำ ที่ช่วยอ่านและให้คำแนะนำในการเขียนบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

Alley, R.B., Mayewski, P.A., Sowers, T., Stuiver, M., Taylor, K.C., & Clark, P.U. (1997). Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, *25*, 483-486.

Björck, S. (2013). Paleoclimate Reconstruction | Younger Dryas oscillation, Global Evidence. In: Elias, S.A., & Mock, C.J. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)* (pp. 222-228). Amsterdam: Elsevier.

Bond, G., Heinrich, H., Broecker, W., Labeyrie, L., McManus, J., Andrews, J., Huon, S., Jantschik, R., Clasen, S., Simet, C., Tedesco, K., Klas, M., Bonani, G., & Ivy, S. (1992). Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic Ocean during the last glacial period. *Nature*, 245-249.

Buckley, B.M., Fletcher, R., Wang, S.-Y.S., Zottoli, B., & Pottier, C. (2014). Monsoon extremes and society over the past millennium on mainland Southeast Asia. *Quaternary Science Reviews*, *95*, 1-19.

Carlson, A.E. (2013). Paleoclimate | The Younger Dryas climate event. In: Elias, S.A., & Mock, C.J. (Eds.), *Encyclopedia of Quaternary Science (Second Edition)* (pp. 126-134). Amsterdam: Elsevier.

Chabangborn, A. (submitted). Paleoclimatic assessment based on palynological and organic geochemical proxies in lake sediments in Thailand. *Burapha Science Journal*.

Chabangborn, A., Brandefelt, J., & Wohlfarth, B. (2014). Asian monsoon climate during the Last Glacial Maximum: palaeo-data–model comparisons. *Boreas*, *43*, 220-242.

Chabangborn, A., & Wohlfarth, B. (2014). Climate over mainland Southeast Asia 10.5–5 ka. *Journal of Quaternary Science*, *29*, 445-454.

Chawchai, S., Chabangborn, A., Kylander, M., Löwemark, L., Mörth, C.M., Blaauw, M., Klubseang, W., Reimer, P.J., Fritz, S.C., & Wohlfarth, B. (2013). Lake Kumphawapi – an archive of Holocene palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes in northeast Thailand. *Quaternary Science Reviews*, *68*, 59-75.

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., & McCabe, A.M. (2009). The Last Glacial Maximum. *Science*, *325*, 710-714.

Cook, C.G., & Jones, R.T. (2012). Palaeoclimate dynamics in continental Southeast Asia over the last ~ 30,000 Cal yrs BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 339–341, 1-11.

Cosford, J., Qing, H., Lin, Y., Eglington, B., Mattey, D., Chen, Y.G., Zhang, M., & Cheng, H. (2010). The East Asian monsoon during MIS 2 expressed in a speleothem $\delta^{18}O$ record from Jintanwan Cave, Hunan, China. *Quaternary Research*, *73*, 541-549.

Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., Yuan, D., Cai, Y., Zhang, M., Lin, Y., Qing, J., An, Z., & Revenaugh, J. (2005). A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. Earth and Planetary Science Letters ,*233,* 71-86.

EPICA community members. (2006). One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature, *444*, 195-198.

Fleitmann, D., Burns, S.J., Pekala, M., Mangini, A., Al-Subbary, A., Al-Aowah, M., Kramers, J., & Matter, A. (2011). Holocene and Pleistocene pluvial periods in Yemen, southern Arabia. *Quaternary Science Reviews*, *30*, 783-787.

Hanebuth, T.J.J., Voris, H.K., Yokoyama, Y., Saito, Y., & Okuno, J.I. (2011). Formation and fate of sedimentary depocentres on Southeast Asia's Sunda Shelf over the past sea-level cycle and biogeographic implications. *Earth-Science Reviews*, *104*, 92-110.

Hastings, P., & Liengsakul, M. (1983). Chronology of the late Quaternary climatic changes in Thailand, in: Thiramongkol, N., & Pisutha-Arnond, V. (Eds.), *Proceeding of the First Symposium on geomorphology and Quaternary geology of Thailand* (pp. 13-25), Department of Geology, Chulalongkorn University, Bangkok.

Heinrich, H. (1988). Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research*, *29*, 142-152.

Higham, C.F.W. (2015). Debating a great site: Ban Non Wat and the wider prehistory of Southeast Asia. *Antiquity, 89*, 1211–1220.

Higham, C., Higham, T., Ciarla, R., Douka, K., Kijngam, A., & Rispoli, F. (2011). The Origins of the Bronze Age of Southeast Asia. *Journal of World Prehistory*, *24*, 227-274.

Hodell, D.A., Brenner, M., Kanfoush, S.L., Curtis, J.H., Stoner, J.S., Xueliang, S., Yuan, W., & Whitmore, T.J. (1999). Paleoclimate of Southwestern China for the Past 50,000 yr Inferred from Lake Sediment Records. Quaternary Research, *52*, 369-380.

Hoek, W.Z. (2009). "Bølling-Allerød Interstadial." In: Gornitz, V. (Ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments* (pp. 100-103). Dordrecht: Springer Netherlands.

Huang, C-Y., Liew, P-M., Zhao, M., Chang, T-C., Kuo, C-M., Chen, M-T., Wang, C-H., & Zheng, L-F. (1997). Deep sea and lake records of the Southeast Asian paleomonsoons for the last 25 thousand years. *Earth and Planetary Science Letters*, *146*, 59-72.

Kealhofer, L., & Penny, D. (1998). A combined pollen and phytolith record for fourteen thousand years of vegetation change in northeastern Thailand. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *103,* 83-93.

Maloney, B.K. (1995). Evidence for the Younger Dryas climatic event in Southeast Asia. *Quaternary Science Reviews*, *14*, 949-958.

Maloney, B.K. (1996). A 10,600 year pollen record from Nong Thale Song Hong, Trang Province, South Thailand. *Indo-Pacific Prehistory Association Bulletin*, *18*, 129-137.

Maloney, B.K. & McAlister, J.J. (1990). Khok Phanom Di, central Thailand: chemical analysis of pollen core KL 2 and AMS radiocarbon dates from cores KL 2 and BMR 2. *Geoarchaeology*, *5*, 375–382.

Matsumoto, J. (1997). Seasonal transition of summer rainy season over indochina and adjacent monsoon region. *Advances in Atmospheric Sciences*, *14*, 231-245.

Mingram, J., Schettler, G., Nowaczyk, N., Luo, X., Lu, H., Liu, J., & Negendank, J.F.W. (2004). The Huguang maar lake—a high-resolution record of palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes over the last 78,000 years from South China. Quaternary International, *122*, 85-107.

Morrill, C., & Jacobsen, R.M. (2005). How widespread were climate anomalies 8200 years ago? *Geophysical Research Letters*, *32*, 1-4.

Muscheler, R., Kromer, B., Bjorck, S., Svensson, A., Friedrich, M., Kaiser, K.F., & Southon, J. (2008). Tree rings and ice cores reveal 14C calibration uncertainties during the Younger Dryas. *Nature Geosciences*, *1,* 263-267.

NGRIP members (2004). High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, *431*, 147-151.

Nimnate, P., Chutakositkanon, V., Choowong, M., Pailoplee, S., & Phantuwongraj, S. (2015). Evidence of Holocene sea level regression from Chumphon coast of the Gulf of Thailand. *ScienceAsia*, *41*, 55-63.

Partin, J.W., Cobb, K.M., Adkins, J.F., Clark, B., & Fernandez, D.P. (2007). Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum. *Nature*, *449*, 452-455.

Pausata, F.S.R., Battisti, D.S., Nisancioglu, K.H., & Bitz, C.M. (2011). Chinese stalagmite $\delta^{18}O$ controlled by changes in the Indian monsoon during a simulated Heinrich event. *Nature Geosciences*, *4*, 474-480.

Penny, D. (2001). A 40,000 year palynological record from north-east Thailand; implications for biogeography and palaeo-environmental reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, *171*, 97-128.

Penny, D., & Kealhofer, L. (2005). Microfossil evidence of land-use intensification in north Thailand. *Journal of Archaeological Science*, *32,* 69-82.

Pramojanee, P., & Hastings, P.J. (1983). Geomorphological and palynology investigation of sea level changes in Chantaburi, SE Thailand, in: Thiramongkol, N., Pisutha-Arnond, V. (Eds.), *Proceeding of the First Symposium on geomorphology and Quaternary geology of Thailand* (pp. 35-51), Department of Geology, Chulalongkorn University, Bangkok.

Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J., Blackwell, P., Bronk Ramsey, C., Buck, C., Cheng, H., Edwards, R., Friedrich, M., Grootes, P., Guilderson, T., Haflidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T., Hoffmann, D., Hogg, A., Hughen, K., Kaiser, K., Kromer, B., Manning, S., Niu, M., Reimer, R., Richards, D., Scott, E., Southon, J., Staff, R., Turney, C., & van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, *55*, 1869-1887.

Somboon, J.R.P. (1988). Paleontological study of the recent marine sediments in the lower central plain, Thailand. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, *2*, 201-210.

Steig, E.J. (1999). Mid-Holocene Climate Change. *Science*, *286*, 1485-1487.

Thai Meteorological Department (2011). *Climate of Thailand*. Bangkok. Retrive August 19, 2016, from www.tmd.go.th/en/archive/thailand_climate.pdf.

Voris, H.K. (2000). Maps of Pleistocene sea levels in Southeast Asia: shorelines, river systems and time durations. *Journal of Biogeography*, *27*, 1153-1167.

Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., An, Z.S., Wu, J.Y., Shen, C.C., & Dorale, J.A. (2001). A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. Science, *294*, 2345-2348.

Walker, M.J.C., Berkelhammer, M., Björck, S., Cwynar, L.C., Fisher, D.A., Long, A.J., Lowe, J.J., Newnham, R.M., Rasmussen, S.O., & Weiss, H. (2012). Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, *27*, 649-659.

Wang, B., Clemens, S.C., & Liu, P. (2003). Contrasting the Indian and East Asian monsoons: implications on geologic timescales. *Marine Geology*, *201*, 5-21.

Wang, H., Hong, Y., Lin, Q., Hong, B., Zhu, Y., Wang, Y., & Xu, H. (2010). Response of humification degree to monsoon climate during the Holocene from the Hongyuan peat bog, eastern Tibetan Plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, *286*, 171-177.

Wang, P., Clemens, S., Beaufort, L., Braconnot, P., Ganssen, G., Jian, Z., Kershaw, P., & Sarnthein, M. (2005). Evolution and variability of the Asian monsoon system: state of the art and outstanding issues. *Quaternary Science Reviews*, *24*, 595-629.

Werner, W.L. (1997). Pines and other conifers in Thailand – a Quaternary relic? *Journal of Quaternary Science*, *12,* 451-454.

White, J.C., Penny, D., Kealhofer, L., & Maloney, B. (2004). Vegetation changes from the late Pleistocene through the Holocene from three areas of archaeological significance in Thailand. *Quaternary International, 113*, 111-132.

Wohlfarth, B., Higham, C., Yamoah, K.A., Chabangborn, A., Chawchai, S., & Smittenberg, R.H. (2016). Human adaptation to mid- to late-Holocene climate change in Northeast Thailand. *The Holocene*, 1-12.

Wohlfarth, B., Klubseang, W., Inthongkaew, S., Fritz, S.C., Blaauw, M., Reimer, P.J., Chabangborn, A., Löwemark, L., & Chawchai, S. (2012). Holocene environmental changes in northeast Thailand as reconstructed from a tropical wetland. *Global and Planetary Change*, *92–93*, 148-161.