

การสำรวจและวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบหมองหม่นของพระมหาธาตุ

เจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ

ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่

Finding and Analyzing Cause of Stain of Phra Maha Dhatu

Nabhamethanidol and Nabhapolbhumisiri at Doi Inthanon National

Park, Chom Thong, Chiang Mai

ธีรพัฒน์ ขันใจ¹ พัฒนาวิศว์ สว่างลาภ¹ วรุต ธรรมวิชัย² ณัฐวัฒน์ ภูักัดดี² กุศยา สุวรรณวิหก²

สมเกียรติ์ สุกางโฮง² สมคิด ระหงส์² และ สุธิณี เกิดเทพ^{1*}

Teerapat Khanjai¹, Pattanawit Sawanglap¹, Warut Thammawichai², Nathawat Poopakdee², Kusaya

Suvanvihok², Somkiat Sukanghong², Somkid Rahong² and Sutinee Girdthep^{1*}

Received: 30 May 2019, Revised: 1 July 2019, Accepted: 2 October 2020

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการศึกษาสมบัติทางเคมี สมบัติทางกายภาพ และสาเหตุของการเกิดคราบสกปรกของแผ่นกระเบื้องโมเสกบนพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ซึ่งตั้งอยู่ในอุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ โดยทำการวิเคราะห์สีของแผ่นกระเบื้องโมเสกด้วยการวัดการดูดกลืนแสงแบบสำหรับพื้นผิวทึบแสง วัดค่าความไม่ชอบน้ำด้วยการวัดมุมสัมผัสที่พื้นผิวกระเบื้อง และการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ซึ่งพบองค์ประกอบของโพลียูรีเทน จากนั้นตรวจสอบสภาพพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบของแผ่นกระเบื้องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มี EDX นอกจากนี้ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางความร้อนของแผ่นกระเบื้องด้วย DSC และ TGA และที่สำคัญผู้วิจัยทำการตรวจสอบคราบซึ่งมีลักษณะคล้ายหินปูนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มี EDX วัดค่าความเป็นกรด่างของน้ำฝน

¹ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ตำบลพระปฐมเจดีย์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

¹ Department of chemistry, Faculty of science, Silpakorn university, Sanamchandra Palace campus, Phraphomchedi, Mueang, Nakhon Pathom 73000, Thailand.

² กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช จังหวัดกรุงเทพ 10220

² Academic faculty, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Bangkok 10220, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): GIRDTHEP_S@su.ac.th

บริเวณพระมหาธาตุ ตรวจสอบองค์ประกอบของน้ำฝนด้วย ICP และยังสามารถศึกษาเพิ่มเติมเพื่อระบุชนิดของมอสในบริเวณพระมหาธาตุ ซึ่งผู้วิจัยมุ่งหวังว่าการระบุสาเหตุการเกิดคราบบนกระเบื้อง จะช่วยในการพัฒนาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการดูแลรักษาพระมหาธาตุทั้งสององค์

คำสำคัญ: พระมหาธาตุเจดีย์, แผ่นโมเสก, คราบหินปูน, อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์

ABSTRACT

In this work, chemical properties, physical properties, and cause of stains on mosaics of Phra Maha Dhatu Nabhamethanidol and Nabhapolbhumisiri at Doi Inthanon National Park, Chiang Mai were studied. The mosaic colors were determined by Diffused Reflectance Ultraviolet-visible Spectrometer (DRS). The hydrophilicity properties of the mosaics were analyzed by contact angle measurement (CA). Characterization by infrared spectrometer (IR) revealed chemical functional groups on polyurethane of the mosaics. The morphologies and elements of the mosaics surfaces were analyzed by scanning electron microscope (SEM) with Energy Dispersive X-ray (EDX). Moreover, thermal properties of the mosaics were analyzed by Differential Scanning Calorimeters (DSC) and Thermogravimetric Analysis (TGA). Importantly, the stains, limestone-like samples, were analyzed by SEM-EDX. In addition, the pH of rain water in the area of Phra Maha Dhatus was measured and its elemental composition was analyzed by Inductively Coupled Plasma (ICP). Furthermore, algae class of moss in vicinity of Phra Maha Dhatus was identified. Finding the cause of the unwanted stains will lead to developing of an effective maintenance method for Phra Maha Dhatus.

Key words: phra maha dhatu, mosaic, limestone, doi Inthanon national park

บทนำ

พระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ประดิษฐานอยู่บนที่สูงที่สุดในราชอาณาจักรไทย ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ ต.บ้านหลวง อ.จอมทอง จ.เชียงใหม่ ถูกสร้างขึ้นโดยกองทัพอากาศร่วมกับพสกนิกรชาวไทย โดยพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลสร้างถวาย “พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช มหाराชา (รัชกาลที่ 9) เนื่องในวโรกาสทรงเจริญพระชนมพรรษาครบ 5 รอบเมื่อปี พ.ศ. 2530 และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ สร้างถวาย “สมเด็จพระ

นางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ” เนื่องในวโรกาสทรงเจริญพระชนมพรรษาครบ 5 รอบเมื่อปี พ.ศ. 2535 (วิสุทธ์, 2551) เป็นเวลากว่า 20 ปีแล้ว ที่พระมหาธาตุเจดีย์อันยิ่งใหญ่สององค์นี้ได้ประดิษฐานอย่างสง่างาม เป็นที่เคารพสักการะของปวงชนชาวไทย ด้วยความสูงของสถานที่ที่ประดิษฐานอันเป็นยอดเขาที่สูงที่สุดในประเทศไทยซึ่งสูงเกือบ 8,000 ฟุตจากระดับน้ำทะเล จึงทำให้มีความหนาวเย็นตลอดทั้งปี รวมไปถึงสภาพอากาศที่ชื้นตลอดเวลา (กองทัพอากาศ, 2550)

สำหรับพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นั้นเป็นลักษณะของกระเบื้องโมเสกซึ่งเป็นเซรามิก ซึ่งในปัจจุบันเซรามิกได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากและถูกนำมาประยุกต์เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่างๆ มากมาย (ชิตินา, 2556) สำหรับพื้นผิวขององค์พระมหาธาตุเจดีย์ฯ ทั้งสององค์นี้เช่นกัน โดยได้มีการนำวัสดุเซรามิกที่เป็นกระเบื้องใช้ในการตกแต่ง เพื่อให้เกิดความสวยงามและความคงทน แต่อย่างไรก็ตามด้วยสภาพอากาศที่ได้กล่าวข้างต้นเป็นสภาวะที่เหมาะสมแก่การเกิดตะไคร่น้ำ และราได้ง่าย ทำให้เกิดคราบและมีตะไคร่น้ำเกาะที่พื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ซึ่งเป็นคราบที่ไม่พึงประสงค์ (Cho *et al.*, 2017) ทำให้พระมหาธาตุเจดีย์อันทรงคุณค่าเกิดความหมองหม่นไปอันเนื่องมาจากตะไคร่น้ำ และรา รวมไปถึงคราบหินปูนที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์ฯ

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นนี้ทำให้ทางเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลได้จัดสรรงบประมาณในการทำความสะอาดเป็นจำนวน 2 ครั้งต่อปี และการทำความสะอาดที่บ่อยครั้งนี้ทำให้สิ้นเปลืองทั้งทางด้านงบประมาณและทรัพยากรบุคคลเป็นจำนวนไม่น้อย อีกทั้งการทำความสะอาดโดยใช้อุปกรณ์ขัดถูจะทำให้แผ่นกระเบื้องโมเสกที่ใช้เป็นวัสดุพื้นผิวของพระมหาธาตุทั้งสองเกิดการผุกร่อน หรือหลุดร่อนออกมาเนื่องจากพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสองที่เป็นอนุสรณ์สถานที่สำคัญแห่งหนึ่งและที่ยึดเหนี่ยวจิตใจของคนไทย การบำรุงรักษาพระมหาธาตุเจดีย์ทั้งสองเพื่อให้ดูสง่างามอยู่เสมอจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ในงานวิจัยนี้การสำรวจปัญหาของการเกิดคราบที่ไม่พึงประสงค์เหล่านี้เพื่อที่จะหาแนวทางในการบำรุงรักษาในทางใหม่จึงเป็นสิ่งที่ดีกว่าการทำความสะอาดด้วยการขัด

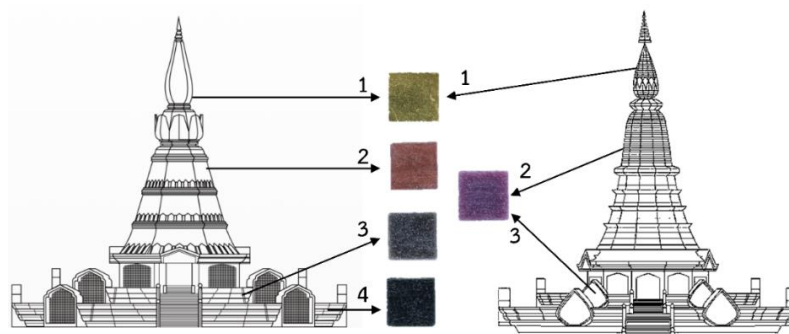
ถู และรวมไปถึงการหาสาเหตุของคราบไม่พึงประสงค์ที่จะนำไปสู่การแก้ไขปัญหาการเกิดคราบได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

งานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหาที่เกิดขึ้นกับพระมหาธาตุทั้งสององค์ โดยหาสาเหตุของการหมองหม่น เช่น การเกิดตะไคร่น้ำ รา หรือจุลินทรีย์อื่นๆ รวมไปถึงคราบสกปรกที่เกิดขึ้น นอกจากนี้พื้นผิววัสดุขององค์พระมหาธาตุ ทั้งสององค์ถูกวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี โดยใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นจะนำไปสู่การแก้ปัญหาในการศึกษาหาแนวทางป้องกันการหมองหม่นขององค์พระมหาธาตุทั้งสององค์ต่อไปอย่างยั่งยืน

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้จากการสำรวจองค์พระมหาธาตุเจดีย์ฯ โดยจะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ บริเวณพื้นผิวที่ประกอบขององค์พระมหาธาตุเจดีย์ฯ และคราบไม่พึงประสงค์ที่ปรากฏ โดยตัวอย่างวัสดุที่ใช้ประกอบองค์พระมหาธาตุเจดีย์ฯ รวมทั้งสององค์เป็นแผ่นโมเสกมีลักษณะของสีที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ได้แก่ โมเสกสีทอง (ตัวอย่างหมายเลข 1), โมเสกสีน้ำตาล (ตัวอย่างหมายเลข 2), โมเสกสีเทาเข้ม (ตัวอย่างหมายเลข 3), โมเสกสีเทาอ่อน (ตัวอย่างหมายเลข 4) และโมเสกสีม่วง (ตัวอย่างหมายเลข 5) ดังแสดงตำแหน่งของโมเสกแต่ละสีในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 (ซ้าย) ลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาเจดีย์ธาตุนภเมทนีดลในตำแหน่งต่างๆ 1. ยอดเจดีย์ 2. ตัวองค์เจดีย์ 3. ฐานด้านข้างด้านล่างชั้นที่สองของเจดีย์ 4. ฐานด้านข้างด้านล่าง (กองทัพอากาศ, 2550) และ (ขวา) แสดงลักษณะโมเสกที่ใช้เป็นพื้นผิวของพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริในตำแหน่งต่างๆ 1. ยอดเจดีย์ 2. ตัวองค์เจดีย์ 3. ชุ่มและฐานด้านข้างด้านล่าง รวมถึงฐานด้านข้างด้านล่างชั้นที่สองของเจดีย์ (กองทัพอากาศ, 2550)

สำหรับคราบไม่พึงประสงค์ตัวอย่างที่เกาะอยู่บนพื้นผิววัสดุจะถูกเก็บตามตำแหน่งต่างๆ ขององค์พระมหาธาตุเจดีย์ หลังจากการสำรวจจะถูกเก็บเพื่อมาวิเคราะห์ลักษณะเพื่อประเมินหาสาเหตุของ

การเกิดคราบ โดยตัวอย่างที่เก็บคือตัวอย่างที่มีลักษณะคล้ายหินปูน (ภาพที่ 2ก) ตะไคร่น้ำ (ภาพที่ 2 ข) และน้ำตัวฝนอย่าง (ภาพที่ 2ค) ซึ่งถูกวิเคราะห์โดยเครื่องมือขั้นสูงต่อไป



ภาพที่ 2 คราบไม่พึงประสงค์ (ก) ตัวอย่างลักษณะคล้ายหินปูน (ข) ตะไคร่น้ำ (ค) น้ำตัวฝนอย่าง

2. การวิเคราะห์และการตรวจสอบลักษณะ (Characterizations) ของสารตัวอย่าง

วัสดุตัวอย่าง (โมเสกทั้ง 5 ชนิด) ถูกศึกษา ลักษณะทางกายภาพโดยการถ่ายรูปด้วยกล้อง DSLR

ยี่ห้อ CANON รุ่น 80D และวิเคราะห์ลักษณะของสีของแผ่นโมเสกจะอาศัยการหาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Diffused Reflectance Ultraviolet-visible Spectrometer (DRS) โดยใช้การรายงานค่าระบบสี

เป็น CIE D65 โดยค่า L^* เป็นค่าความสว่าง (Lightness) มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 100 ค่า a^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีแดง เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีเขียว และค่า b^* ที่เป็น + สีจะเป็นไปในทิศทางสีเหลือง เป็น - สีจะเป็นไปในทิศทางสีน้ำเงิน (ภักขัญ, 2550)

สมบัติความชอบน้ำของแผ่นวัสดุตัวอย่างได้ถูกวิเคราะห์โดยการวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle, CA) จะหยดน้ำลงบนแผ่นโมเสกตัวอย่างในปริมาตร 2.00 μL และทำการเก็บภาพถ่ายโดย USB Microscope ยี่ห้อ SHODENSHA รุ่น TG500PC2 ทำการวัดหาค่ามุมสัมผัสของน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ เวอร์ชัน 1.8.0

สำหรับการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิดจะตรวจสอบโดยอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared spectrometer) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น Spectrum 100 (ATR mode)

ลักษณะสัณฐานวิทยาของพื้นผิวภายในและภายนอกของแผ่นโมเสกถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3 พร้อมกับ Energy Dispersive X-ray (EDX) ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุในแผ่นโมเสก

ในการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแผ่นวัสดุตัวอย่างจะอาศัยเครื่อง Differential Scanning Calorimeters (DSC) โดยใช้โมเสกตัวอย่างบดละเอียดปริมาณ 3-5 mg วิเคราะห์ภายใต้อุณหภูมิ

25 - 250 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา 10 $^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ และเสถียรภาพทางความร้อนของแผ่นโมเสกตัวอย่างถูกวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA) ในช่วงอุณหภูมิ 50 - 800 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตรา 20 $^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$

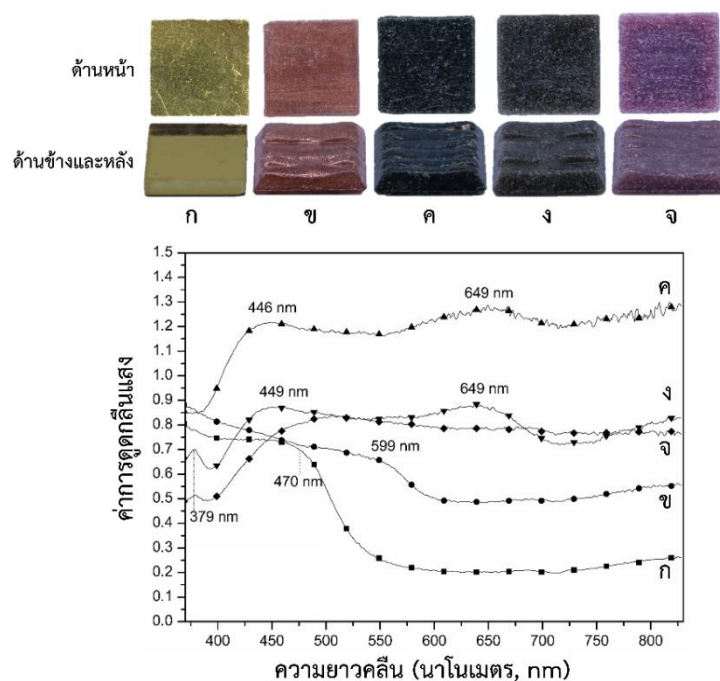
ทราบไม่เพียงประสงค์ตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายหินปูนจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM - EDX และน้ำตัวฝนอย่างจะถูกวัดค่าความเป็นกรดด่าง (pH) อย่างง่ายด้วย Universal pH paper และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุแคลเซียม (Ca) ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS) ของ PerkinElmer รุ่น PinAAcle 900F อาศัยวิธีการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0-13 ppm โดยตัวอย่างน้ำฝน 3 มิลลิลิตรถูกเจือจางด้วยน้ำปราศจากไอออนให้มีปริมาตร 25.00 มิลลิลิตรแล้วนำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืน โดยมีค่าระดับการเจือจาง (Dilution factor) เท่ากับ 8.33

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การตรวจสอบลักษณะ (Characterizations) ของสารตัวอย่างโมเสก

1.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นโมเสก

โมเสกทั้ง 5 ชนิดดังภาพที่ 3 เป็นโมเสกที่ใช้ปูเป็นพื้นผิวขององค์พระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดล และ พระมหาธาตุเจดีย์นภพโลภูมิสิริ



ภาพที่ 3 (บน) โหมดตัวอย่าง และ (ล่าง) ค่าการดูดกลืนแสงของแผ่นโม่สีทั้ง 5 ชนิดได้แก่ (ก) สีทอง, (ข) สีนํ้าตาล, (ค) สีเทาเข้ม, (ง) สีเทาอ่อน และ (จ) สีม่วง

จากการนำแผ่น โม่สีตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของโม่สีแต่ละชนิด ได้ผลแสดงดังภาพที่ 3 พร้อมทั้งหาค่าสีโดยใช้ระบบสี CIE D65 ได้ผลตามตารางที่ 1 โดยระบบที่

ใช้การวัดสีในเครื่อง Spectrophotometer คือ ระบบ CIE L^* a^* b^* ซึ่งเป็นวิธีการวัดสีที่ใช้ลักษณะของ Color space

ตารางที่ 1 แสดงค่าสีในระบบสี CIE D65 และมุมสัมผัสของหยดน้ำ

โม่สีตัวอย่าง	ค่าสี			มุมสัมผัสของหยดน้ำ	
	L^*	a^*	b^*		
สีทอง	77.4463	0.2937	44.5548	$45.5^\circ \pm 0.6^\circ$	
สีนํ้าตาล	56.7576	8.8328	12.5742	$35.9^\circ \pm 0.6^\circ$	
สีเทาเข้ม	30.4811	-2.9891	0.1430	$42.9^\circ \pm 0.5^\circ$	
สีเทาอ่อน	45.0418	-1.7729	0.9988	$35.7^\circ \pm 0.6^\circ$	
สีม่วง	46.3560	5.3265	-5.4804	$25.2^\circ \pm 0.3^\circ$	

จากการวัดการดูดกลืนแสงของโม่สีสีทอง พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 450 nm

เป็นช่วงคลื่นสีน้ำเงิน ซึ่งสีที่มองเห็นจะมีสีเหลือง จากค่าสีในตารางที่ 1 บ่งบอกถึงโม่สีสีทองมี

ลักษณะเป็นสีเหลือง โดยแสดงค่า b^* ที่เป็นบวกซึ่งหมายถึงสีแสดงทิศทางสีเหลือง โมเสกสีน้ำตาลพบว่ามีการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 550 nm เป็นช่วงของสีเขียว จะทำให้โมเสกชนิดนี้แสดงค่าเป็นสีน้ำตาลจากค่าสีในตารางที่ 1 บ่งบอกถึงโมเสกสีน้ำตาลมีลักษณะเป็นสีเหลือง โดยแสดงค่า b^* ที่เป็นบวกซึ่งหมายถึงสีแสดงทิศทางสีเหลืองเล็กน้อย โมเสกสีเทาเข้มพบว่ามีการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 430 และ 650 nm เป็นสีม่วงและสีส้มตามลำดับ จะแสดงลักษณะสีเทา โมเสกสีเทาอ่อนพบว่ามีการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 430 และ 650 nm เป็นสีม่วงและสีส้มตามลำดับ จะแสดงลักษณะสีเทาเช่นเดียวกับโมเสกสีเทาเข้ม นอกจากนี้มีค่าความสว่าง L^* ที่เพิ่มขึ้นจากโมเสกสีเทาเข้มที่แสดงในตารางที่ 1 โมเสกสีม่วงพบว่ามีการดูดกลืนแสงที่สูงอยู่ในช่วง 500 nm เป็นสีเขียวแกมเหลือง จะแสดงลักษณะสีคราม-ม่วง จากค่าสีในตารางที่ 1 บ่งบอกถึงโมเสกสีม่วงนี้มีค่าความสว่าง L^* เล็กน้อยและมีค่าโทนสีน้ำเงินโดยแสดงค่า b^* ไปในทางลบ

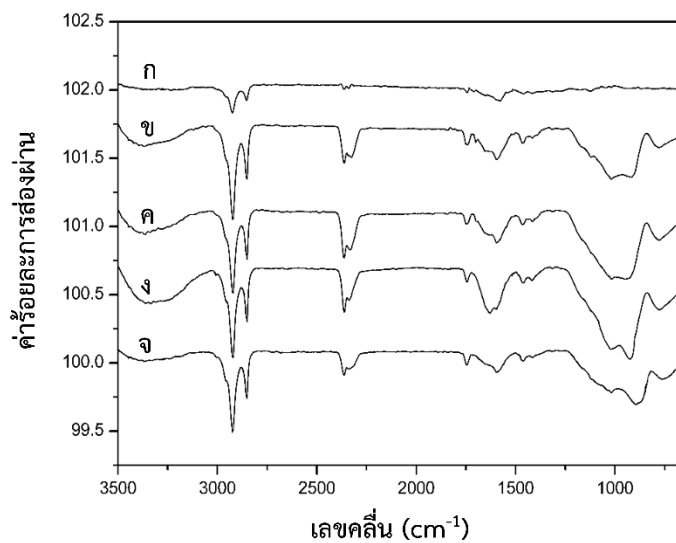
1.2 สมบัติความชอบน้ำของแผ่นวัสดุตัวอย่าง

การวัดมุมสัมผัสของน้ำ (Contact angle, CA) ของแผ่นโมเสกตัวอย่างได้ผลดังตารางที่ 1 และจากปรากฏการณ์ความชอบและไม่ชอบน้ำของพื้นผิวมีความเกี่ยวข้องกับมุมสัมผัสกับพื้นผิว ซึ่งเป็นมุมที่เกิดขึ้นในเขตสามสถานะ (ของแข็ง, ของเหลว, อากาศ) อธิบายด้วยมุมสัมผัสระหว่างพื้นผิวของของเหลวที่พื้นผิวของของแข็ง โดยทั่วไป ถ้ามุมสัมผัสน้อยกว่า 90 องศา จะเรียกว่าพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า 90 องศา จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic surface) ถ้ามุมสัมผัสมากกว่า 150 องศา จะเรียกว่าพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำเป็นพิเศษ (Superhydrophilic or Ultra hydrophilic surface) (Anand *et al.*, 2011)

จากค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิวโมเสกตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ สีทอง สีน้ำตาล สีเทาเข้ม สีเทาอ่อน และ สีม่วง มีค่า 45.2, 35.0, 43.1, 35.5 และ 25.3 องศาตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 90 องศา นั้นแสดงว่าโมเสกตัวอย่างทั้ง 5 ชนิดเป็นพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) และเนื่องจากโมเสกดังกล่าวมีพื้นผิวที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surface) ประกอบกับสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ที่มีสภาพอากาศที่มีฝนตกชุกและมีความชื้นสูงตลอดทั้งปี ทำให้พระมหาธาตุฯ ทั้งสององค์มีหยดน้ำเกาะอยู่ตลอด ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมกับตะไคร่น้ำ เช่น มอส นอกจากนี้ยังทำให้เกิดคราบหินปูนได้อีกด้วย ซึ่งมาจากการที่น้ำสะสมบนพื้นผิวบริเวณปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อของโมเสกโดยเกิดการชะและหลุดในเวลาต่อมา

1.3 การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน

การตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของพื้นผิวหน้าแผ่นโมเสกได้ถูกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm^{-1}) และ ค่าร้อยละการส่องผ่าน (%Transmittance, %T) ดังภาพที่ 5 พบว่าโมเสกทั้ง 5 ชนิดปรากฏพีคที่เลขคลื่น 3329-3365 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบ N-H Stretching และ 1539-1651 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นแบบ Scissoring ของหมู่ $-\text{NH}_2$ การสั่นที่ประมาณ 1280 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-N stretch และ 761-777 cm^{-1} เป็นการสั่นแบบ $-\text{NH}_2$ wagging นอกจากนี้ที่เลขคลื่น 2900-2800 cm^{-1} แสดงหมู่ $-\text{CH}_2$ Stretching เลขคลื่นที่ 1700-1600 cm^{-1} นั้นคือพีคของหมู่คาร์บอนิล ($\text{C}=\text{O}$) เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมมาตรฐานจะพบว่าเป็นสเปกตรัมของพอลิยูรีเทน (Polyurethane) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chiono *et al.* (2014) โดยสามารถยืนยันได้ว่าโมเสกทั้ง 5 ชนิดได้ถูกเคลือบด้วยพอลิยูรีเทนที่พื้นผิว



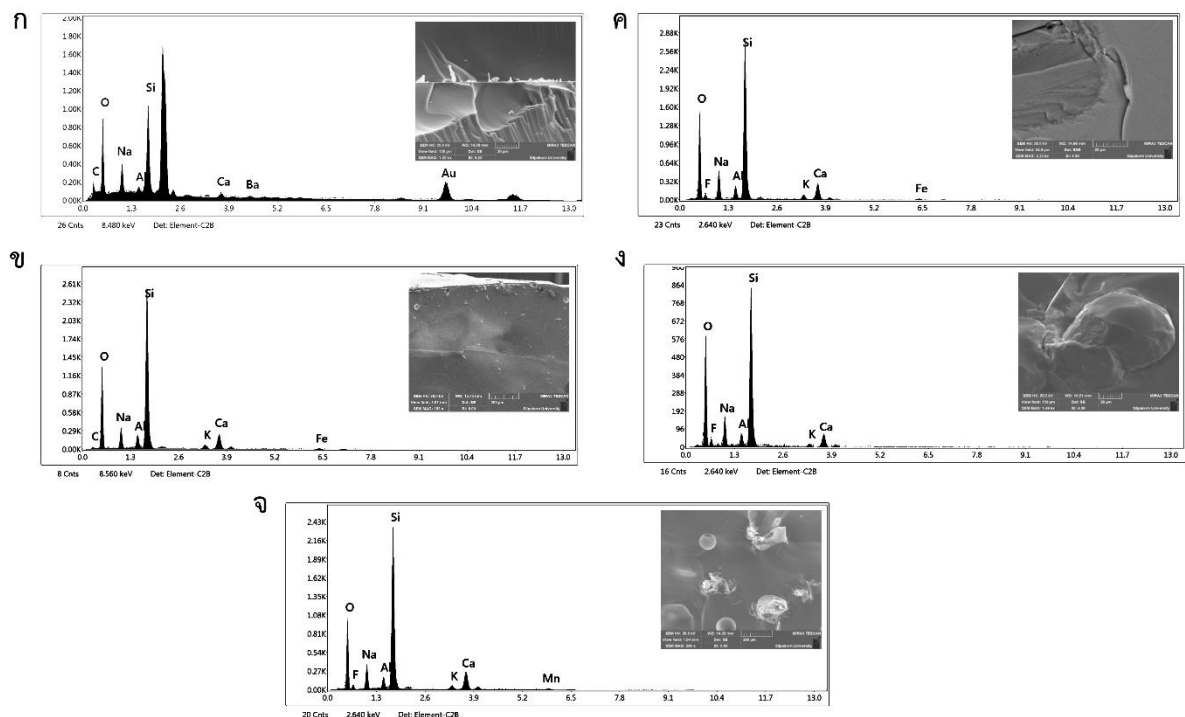
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขคลื่น (cm^{-1}) และค่า %T ของแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด คือ (ก) สีทอง, (ข) สีน้ำตาล, (ค) สีเทาเข้ม, (ง) สีเทาอ่อน และ (จ) สีม่วง

1.4 ลักษณะฐานานวิทยาของพื้นผิวภายในและภายนอกของแผ่นวัสดุตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวภาคตัดขวาง (Fractural surface) ของแผ่นโมเสกแสดงดังภาพที่ 6 พบว่าโมเสกทั้ง 5 ชนิดธาตุซิลิกา (Silica, Si) เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาเป็นธาตุออกซิเจน (Oxygen, O) และอะลูมิเนียม (Aluminum, Al) ซึ่งให้เห็นว่าโมเสกทั้ง 5 นี้ถูกขึ้นรูปจากแก้วชนิดที่มีซิลิกาโดยมีการเติมธาตุอื่นเป็นองค์ประกอบเพื่อทำให้เกิดสีขึ้น โดยโมเสกสีทอง (ภาพที่ 6ก) ปรากฏธาตุของทอง (Gold, Au) สำหรับโมเสกสีน้ำตาลแสดงภาพ SEM ของพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน (ภาพที่ 6ข) โดยมีสารประกอบให้สีที่มีธาตุเหล็ก (Iron, Fe) เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกับโมเสกที่มีสีเทาเข้ม (ภาพที่ 6ค) สำหรับโมเสกสีเทาอ่อน (ภาพที่ 6ง) แสดงภาพ

SEM ของพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกันเช่นกันแต่ไม่แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ให้สีชัดเจน จากภาพที่ 6จ เป็นภาพ SEM ถ่ายตัดขวางของแผ่นโมเสกสีม่วงโดยพบว่าเนื้อของโมเสกไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดและมีองค์ประกอบเป็นธาตุแมงกานีส (Manganese, Mn) ที่เป็นองค์ประกอบที่ให้สีของแผ่นโมเสกสีม่วงอีกด้วย

จากข้อมูลพื้นผิวภาคตัดขวางที่ได้จากเทคนิค SEM นี้ชี้ให้เห็นว่าได้ว่าโมเสกทั้ง 5 ชนิดเป็นโมเสกที่ผลิตมาจากแก้วซิลิกา โดยเมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบ FTIR ดังแสดงก่อนหน้า (หัวข้อ 1.3) ที่มีการส่องวิเคราะห์ลงบนพื้นผิวตัวอย่างพบหมู่ฟังก์ชันที่น่าจะเป็นของพอลิยูรีเทนบนพื้นผิวของโมเสก ดังนั้นจึงโมเสกทั้ง 5 ชนิดนี้เป็นแก้วซิลิกาและมีการเคลือบพอลิยูรีเทนด้านบน

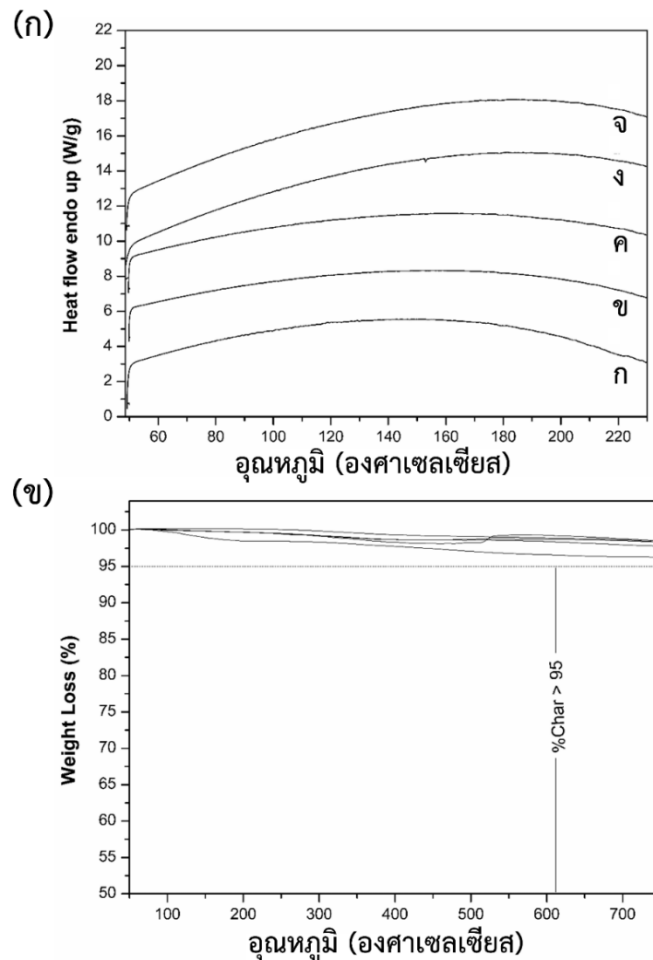


ภาพที่ 6 ภาพ SEM-EDX แสดงพื้นผิวตัดขวางของ (ก) แผ่นโม่เสกสีทองที่กำลังขยาย 1500 เท่า (ข) แผ่นโม่เสกสีน้ำตาลที่กำลังขยาย 200 เท่า (ค) แผ่นโม่เสกสีเทาเข้มที่กำลังขยาย 200 เท่า (ง) แผ่นโม่เสกสีเทาอ่อนที่กำลังขยาย 200 เท่า (จ) แผ่นโม่เสกสีม่วงที่กำลังขยาย 200 เท่า

1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เมื่อนำแผ่นโม่เสกตัวอย่างไปวัดด้วยเทคนิค DSC พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความร้อนเกิดขึ้นในช่วงการทดสอบตั้งแต่ 45-230 °C ดังภาพที่ 7ก เช่นเดียวกับผลของ Amrollahi *et al.* (2011) เนื่องจากพอลิยูรีเทนเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเทอร์โมเซต

(Thermoset) และมีลักษณะเป็นร่างแห (Crosslink) ไม่สามารถหลอมด้วยความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิการศึกษา นอกจากนี้โม่เสกยังมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ที่หลอมที่อุณหภูมิมากกว่าช่วงอุณหภูมิที่วิเคราะห์ (ประมาณ 1,000 °C) จึงไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 7 (บน) เทอร์โมแกรมของแผ่นโม่เสกทั้ง 5 ชนิดได้แก่ (ก) สีทอง, (ข) สีน้ำตาล, (ค) สีเทาเข้ม, (ง) สีเทาอ่อน และ (จ) สีม่วง และ (ล่าง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Sample Temperature (°C) และค่า %weight (%) ของโม่เสกทั้ง 5 ชนิด

สำหรับผลการทดสอบ TGA (ภาพที่ 7ข) เป็นการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุพบว่าวัสดุสามารถทนความร้อนได้ดีโดยการสลายตัวหรือน้ำหนักที่หายไป (Weight loss) ลดลง 3-4 % ที่อุณหภูมิ 785 °C โดยมี %char ที่มีค่าน้อยกว่า 95% จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผล DSC เนื่องจากมีองค์ประกอบของแก้วซิลิกาที่เป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิในการวิเคราะห์ (อุณหภูมิห้อง-800 °C) เช่นเดียวกับการทดลองของ Zhang *et al.* (2011) และสำหรับองค์ประกอบที่เป็นพอลิยูรีเทนไม่สามารถหลอมด้วย

ความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจึงไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่หายไป

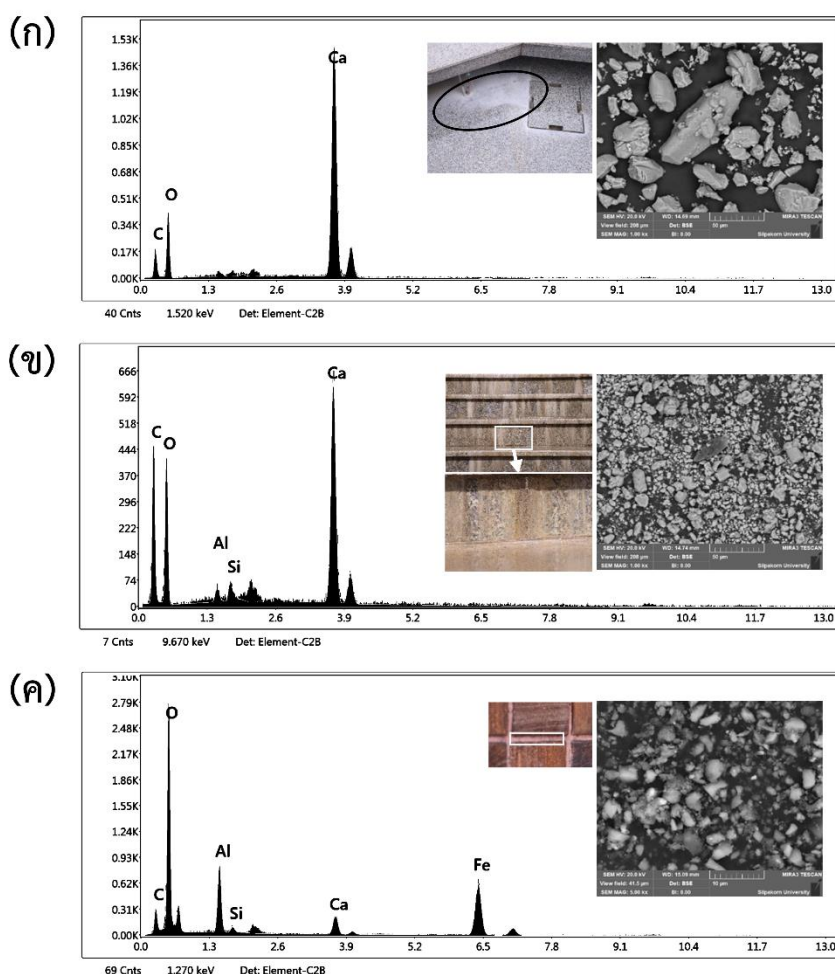
2. การสำรวจและการวิเคราะห์คราบไม่พึงประสงค์ตัวอย่าง

คราบไม่พึงประสงค์ตัวอย่างที่บริเวณพระมหาธาตุเจดีย์ฯ ถูกเก็บมาวิเคราะห์และตรวจสอบทางเคมี ซึ่งจากการสำรวจจะพบตัวอย่างที่เคลือบหรือเกาะติดที่พื้นผิว คือ ตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายหินปูน จะวิเคราะห์โดยอาศัยเทคนิค SEM-EDX เพื่อคุณลักษณะพื้นฐานวิทยาและองค์ประกอบของธาตุนอกจากนี้ น้ำตัวอย่างที่ตกบริเวณบริเวณพระมหาธาตุเจดีย์ฯ ถูกเก็บมาตรวจวิเคราะห์เช่นกัน โดย

วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเบส (pH) และหาองค์ประกอบธาตุแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบหลักคราบหินปูนด้วยการอาศัยเทคนิค AAS

สำหรับคราบตัวอย่างที่เป็นลักษณะคล้ายหินปูนถูกเก็บมาจากแหล่งต่างๆ จากการสำรวจพบว่าคราบดังกล่าวพบมากที่สุดคือ พื้นทางเดินของพระมหาเจดีย์ธาตุนภพลภูมิสิริ (ภาพที่ 8ก) และคราบ

หินปูนบนบันไดทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุฯ (ภาพที่ 8ข) ซึ่งพบว่าจากสองแหล่งนี้มีองค์ประกอบธาตุหลักเป็นแคลเซียม (Ca) ซึ่งองค์ประกอบหลักของหินปูนซึ่งบริเวณบันไดทางขึ้นจะมีองค์ประกอบของธาตุ Al และ Si ด้วย เนื่องจากบริเวณที่เก็บตัวอย่างเป็นบริเวณทางเดินจึงมีการปนเปื้อนของดินโดยพบว่ามี Al และ Si เป็นองค์ประกอบหลักร่วมด้วย



ภาพที่ 8 (ก) คราบหินปูนพื้นทางเดินของพระมหาเจดีย์ธาตุนภพลภูมิสิริและผล SEM-EDX (ข) หินปูนของพระธาตุคราบหินปูนบนบันไดทางขึ้นไปยังพระมหาธาตุและผล SEM-EDX (ค) ตัวอย่างปูนยาแนวของซุ้มรอบองค์พระธาตุฯ ที่อยู่บริเวณรอยต่อของแผ่นโมเสกและผล SEM-EDX

นอกจากนี้ตัวอย่างของปูนยาแนวได้ถูกเก็บเพื่อมาวิเคราะห์ซึ่งสาเหตุที่มาของการเกิดคราบหินปูนที่มีองค์ประกอบของแคลเซียม (ภาพที่ 8ก)

จากผลพบว่าปูนยาแนวมีองค์ประกอบของธาตุแคลเซียม และจากการสำรวจพบว่าลักษณะปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อระหว่างแผ่นโมเสกนั้นถูกหลุดล่อน

ออกซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โมเสกหลุดออกจากตัวองค์พระธาตุฯ ทั้งสอง ดังภาพที่ 9 โดยสามารถเกิดจากการที่มีน้ำฝนชะเป็นเวลานานและสม่ำเสมอ

ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณน้ำฝนที่พบ (จะแสดงในหัวข้อที่ 3 การวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบหมองหม่น)



(ก)



(ข)

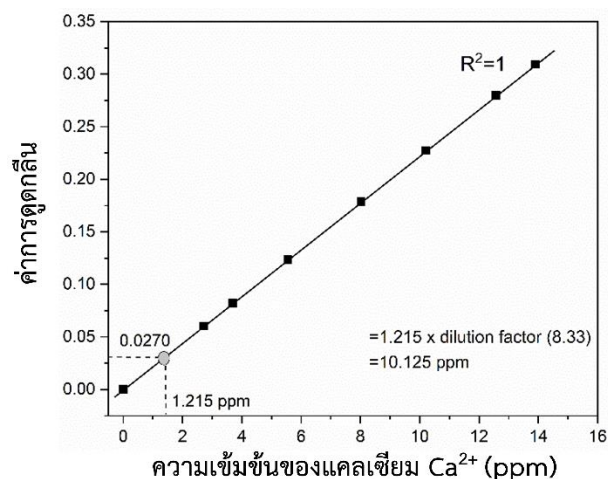
ภาพที่ 9 (ก) การหลุดล่อนของปูนยาแนว และ (ข) โมเสกที่หลุดออกจากตัวองค์พระธาตุ

สำหรับน้ำตัวฝนอย่างถูกวิเคราะห์โดยการตรวจสอบค่าความเป็นกรดเบส (pH) และองค์ประกอบของธาตุแคลเซียมที่เป็นธาตุที่สำคัญที่

เป็นองค์ประกอบในหินปูนด้วยเทคนิค AAS แสดงดังภาพที่ 10



(ก)



(ข)

ภาพที่ 10 (ก) ค่าความเป็นกรดเบส (pH) และ (ข) การวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียม (Ca^{2+}) ด้วยกราฟมาตรฐานของสารละลายแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยมีค่าระดับการเจือจาง (Dilution factor) เท่ากับ 8.33

จากผลการทดสอบพบว่าค่าความเป็นกรดเบสแสดงค่าประมาณ 7-8 ซึ่งเป็นค่าปกติของน้ำตามธรรมชาติ โดยค่าความกระด้างของน้ำแสดงได้ด้วยค่า total hardness ซึ่งคำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร (หรือ 1 ส่วนในล้านส่วน, ppm) พบว่าปริมาณของ

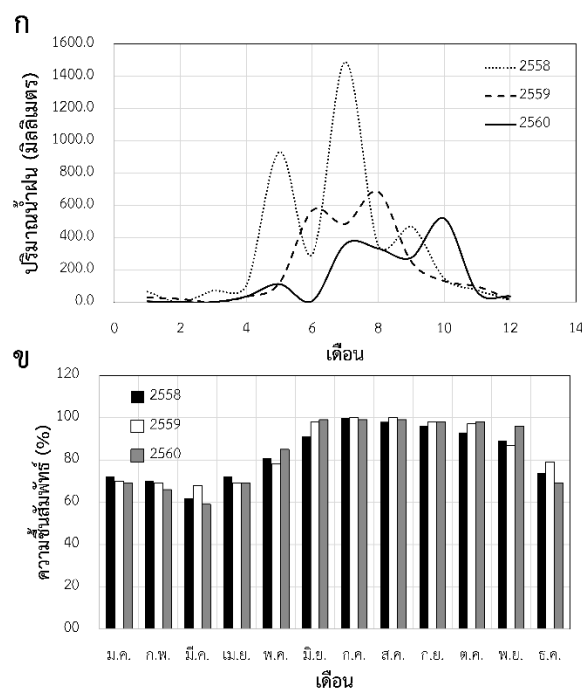
แคลเซียม (Ca^{2+}) ที่ได้คือ 10.125 ppm จัดว่าเป็นน้ำอ่อนที่เป็นน้ำฝน

3. การวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบหมองหม่น

สำหรับการวิเคราะห์ถึงการเกิดคราบหมองหม่นบนองค์พระมหาเจดีย์ฯ นั้นจำเป็นต้องทราบถึงสภาพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์

โดยทำการรวบรวมข้อมูลจากแผนภูมิอากาศ กอง
ข่าวอากาศ กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ
กองทัพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์
(แผนภูมิอากาศ กองข่าวอากาศ กรมควบคุมการ
ปฏิบัติทางอากาศ กองทัพอากาศ, 2561) โดยเก็บ
ข้อมูลปริมาณฝนและความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 1
มกราคม 2558 - 31 ธันวาคม 2560 (ภาพที่ 11)

สำหรับปริมาณน้ำฝน (ภาพที่ 11ก) พบว่าช่วงเดือนที่
มีปริมาณน้ำฝนมากกว่า 100 มิลลิเมตร จะอยู่ในช่วง
เดือน ก.ค. - ต.ค. ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนที่มีปริมาณฝนที่
สูง จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณฝนที่มากกว่า
100 มิลลิเมตรครอบคลุมเกินกว่า 6 เดือน จากสถิติ
ข้อมูลในรอบ 3 ปี



ภาพที่ 11 (ก) แสดงปริมาณน้ำฝนและ (ข) ความชื้นสัมพัทธ์ ณ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ 12 เดือน ตั้งแต่ปี
พ.ศ. 2558 - 2560

จากภาพที่ 11ข แสดงให้เห็นว่าดอยอิน
ทนนท์ มีความชื้นสัมพัทธ์สูงถึงสูงมากตลอดทั้งปี
โดยมีค่าเฉลี่ยรายปีของปี พ.ศ. 2558 - 2560 ใกล้เคียง
กันคือ 84% ช่วงเดือนที่มีความความชื้นสัมพัทธ์สูง
มากคือ พ.ค. - พ.ย. คือมีค่าเฉลี่ยรายสามปี อยู่ในช่วง
81% ถึง 100% ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณน้ำฝน
กล่าวคือในช่วงฤดูฝนจะมีความชื้นสัมพัทธ์สูง โดย
ความชื้นสัมพัทธ์นั้นมีผลอย่างมากต่อการเกิด
สิ่งมีชีวิตจำพวกรา และสาหร่ายขนาดเล็กบนพื้นผิว
ของวัสดุพื้นผิวที่มีความชอบน้ำ (แสดงในตารางที่ 1)

โดยจากการสำรวจก็พบสิ่งมีชีวิตที่เป็นราและมอส
เป็นจำนวนมาก ดังนั้นคราบหมองหม่นเกิดขึ้นเกิด
จากหลายปัจจัยด้วยกัน โดยปัจจัยหลักคือ ได้แก่
สภาพอากาศที่มีความชื้นและปริมาณน้ำฝนที่สูง
กล่าวคือการที่น้ำฝนตกลงมาแล้วเกิดการชะลงบน
โมเสกและปูนยาแนวไหลจากที่สูงลงด้านล่างรอบ
องค์พระมหาเจดีย์ฯ เกิดเป็นคราบหินปูนสะสมบน
ทางเดินพื้นและบันไดเป็นจำนวนมากนั่นเอง
นอกจากนี้การที่โมเสกมีความชอบน้ำยังสามารถทำ
ให้เกิดการสะสมคราบฝุ่นบนพื้นผิวของโมเสกทำให้

เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของราและมอส ซึ่งจัดว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคราบหมองหม่นขึ้นบนองค์พระมหาเจดีย์ฯ

สรุป

จากการสำรวจสาเหตุของการเกิดคราบหมองหม่นของพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดล และพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ ณ อุทยานแห่งชาติคอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าองค์พระมหาธาตุฯ ใช้โมเสกที่เป็นวัสดุตกแต่งทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ โมเสกสีทอง สีน้ำตาล สีเทาเข้ม สีเทาอ่อน และสีม่วง ซึ่งเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบด้วย SEM และ ATR-FTIR ซึ่ให้เห็นว่าเป็นโมเสกที่ทำมาจากแก้วซิลิกาที่พื้นผิวมีการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นพอลิยูรีเทน แผ่นโมเสกจึงมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่แสดงถึงพื้นผิวที่ขบมน้ำ นอกจากนี้พบว่าสีที่ปรากฏของโมเสกแต่ละชนิดมาจากองค์ประกอบของสารให้สีที่มีธาตุที่แตกต่างกัน คือ โมเสกสีทองมีองค์ประกอบของธาตุทอง (Au) สีน้ำตาลและสีเทาเข้มมีองค์ประกอบของธาตุเหล็ก (Fe) และสีม่วงมีองค์ประกอบของธาตุแมงกานีส (Mn) และจากสมบัติทางความร้อนที่ได้จากเทคนิค DSC และ TGA ซึ่ให้เห็นว่าแผ่นโมเสกทำมาจากวัสดุที่สามารถทนความร้อนได้สูงมากกว่า 1,000 °C ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก SEM-EDX ที่พบองค์ประกอบของธาตุซิลิกา (Si) ในแผ่นโมเสกทั้ง 5 ชนิด

เมื่อทำการสำรวจและวิเคราะห์คราบไม่พึงประสงค์ตามทางเดินและบันได พบว่าคราบไม่พึงประสงค์นั้นประกอบด้วยธาตุหลักที่เป็นแคลเซียมซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของหินปูน สำหรับตัวอย่างน้ำฝนเมื่อถูกตรวจสอบความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) พบว่ามีค่าเป็นกลางและมีปริมาณของแคลเซียม (Ca^{2+}) เท่ากับ 10.125 ppm ถึงถือว่าเป็นค่าปกติของน้ำฝนที่จัดว่าเป็นน้ำอ่อน นอกจากนี้จากการสำรวจยัง

พบว่าปูนยาแนวที่เป็นรอยต่อระหว่างแผ่นโมเสกนั้นถูกหลุดลอกออกซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้โมเสกหลุดออกจากตัวองค์พระธาตุฯ ทั้งสอง ดังนั้นคราบหมองหม่นเกิดขึ้น เกิดจากการที่มีน้ำฝนชะลงบนองค์พระมหาธาตุฯ เป็นเวลานานและสม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์ที่มาก ณ อุทยานแห่งชาติคอยอินทนนท์ ทำให้ปูนยาแนวเกิดการหลุดร่อน จึงส่งผลให้เกิดเป็นคราบหินปูนสะสมบนทางเดินพื้นและบันไดเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้การที่โมเสกมีความขบมน้ำยังสามารถทำให้เกิดการสะสมคราบฝุ่นบนพื้นผิวของโมเสกทำให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของราและมอส ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดคราบหมองหม่นขึ้นบนองค์พระมหาเจดีย์ฯ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมูลนิธิพระมหาธาตุเจดีย์นภเมทนีดลและพระมหาธาตุเจดีย์นภพลภูมิสิริ กองทัพอากาศ ที่สนับสนุนเงินทุนวิจัยแก่ผู้วิจัย แผนกภูมิอากาศ กองข่าวอากาศ กรมควบคุมการปฏิบัติทางอากาศ กองทัพอากาศ ณ อุทยานแห่งชาติคอยอินทนนท์ ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลสภาพอากาศ ณ คอยอินทนนท์ อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ กองการศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช และภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสารเคมี รวมถึงสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองทัพอากาศ. 2550. พระมหาธาตุณภพลภูมิสิริ. พระมหาธาตุณภพลภูมิสิริ ประวัติฉบับเต็ม. แหล่งที่มา: <http://phramahathat.com/fulldoc/mother.html>, 30 มกราคม 2562.

- ริติมา คุณยศยิ่ง. 2556. การทดลองเนื้อดินเพื่อทำ เซรามิกหอม โดยใช้กากดินขาวทดแทนทราย. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง** 6(1): 19-30.
- แผนภูมิอากาศ กองข่าวอากาศ กรมควบคุมการ ปฏิบัติทางอากาศ กองทัพอากาศ. 2561. **ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา** ปี พ.ศ.2558 – 2560 **สถานีอุตุนิยมวิทยาท. กรมอุตุนิยมวิทยา**, กรุงเทพฯ.
- ภักดิ์ ทงท้อมพร. 2550. การมองเห็นและการวัดสี. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. แหล่งที่มา: http://dss.go.th/dssweb/st-articles/files/pep_7_550_Color_Measurement.pdf, 30 มกราคม 2562.
- วิสุทธิ์ ภิญญาวาณิชกะ. 2551. พระมหาธาตุ “นกเมทนีดล นภพลภูมิสิริ”. แหล่งที่มา: http://www.wisut.net/article/พระมหาธาตุ_นกเมทนีดล_นภพลภูมิสิริ, 30 มกราคม 2562.
- Amrollahi, M., Sadeghi, G.M.M. and Kashcooli, Y. 2011. Investigation of novel polyurethane elastomeric networks based on polybutadiene-ol/polypropyleneoxide mixture and their structure-properties relationship. **Materials and Design** 32(7): 3933-3941.
- Anand, V.G., Hemant, K.R., Sreekumaran, A.N. and Seeram, R. 2011. A review on self-cleaning coatings. **Journal of Materials Chemistry** 21: 16304-16322.
- Chiono, V., Mozetic, P., Boffito, M., Sartori, S., Gioffredi, E., Silvestri, A., Rainer, A., Giannitelli, S.M., Trombetta, M., Nurzynska, D., Meglio, F.D., Castaldo, C., Miraglia, R., Montagnani, S. and Ciardelli, G. 2014. Polyurethane-based scaffolds for myocardial tissue engineering. **Interface Focus** 4(1): 2042-8898.
- Cho, E.C., Chang-Jian, C.W., Chen, H.C., Chuang, K.S., Zheng, J.H., Hsiao, Y.S., Lee, K.C. and Huang, J.H. 2017. Robust multifunctional superhydrophobic coatings with enhanced water/oil separation, self-cleaning, anti-corrosion, and anti-biological adhesion. **Chemical Engineering Journal** 314: 347-357.
- Zhang, H., Li, C., Guo, J., Zang, L. and Luo, J. 2011. In Situ Synthesis of Poly (methyl methacrylate)/SiO₂ Hybrid Nanocomposites via “Grafting Onto” Strategy Based on UV Irradiation in the Presence of Iron Aqueous Solution. **Journal of Nanomaterials** 2012: 9.